

大學教本

電機工程

Professor Dr. Adolf Thomälen 著

杜若城 譯述

第一版

上海

勵志書局發行

1124
301

Kurzes Lehrbuch der Elektrotechnik

VON

Professor Dr. Adolf Thomälen.

杜若城譯述

第一版



上海
勵志書局發行

1937

凡 例

1. 原著係德國大學教授 Professor Dr. Adolf Thomälen 所作，專供工學院電機工程系教本及參考書之用，本書係就原著第十版譯出。
2. 本書之目的在討論電機工程之一般現象並指示為助理解各現象所須之各概念。
3. 為明白解釋物理的關係，書中儘量採用平面測定法。至向量測定法及三角法亦依情形分別採用，而討論交流時，向量法尤為重要。在多數情形中，例如當討論變壓器，三相交流電動機，移相器，換頻機，複式籠狀電樞及補償三相交流電動機之各問題時，應用算法以代圖法，蓋若用算法不但方法相同即手續亦較簡便。至為一般所不樂用之複算法，並非因其方法之難，但實因其中複雜量或虛量之不易切實表明。本書中採用之補救法係由選用簡明代用量。
4. 關於線路之計算，畸變波之變為基本波及諧波，單相交流及三相交流之無功測定，對稱三相交流系之分解而為對稱系，他如網絡之轉覆及零點之接地等種種問題常用試驗圖，為表示同步機之在工作時之性狀應用激發圖以代電壓圖。在關於三相交流電動機之一章中并討論推斥電動機，極之換接及補償電動機。
5. 本書所用電學名詞及術語均附注德英法三國文字，俾資參考。

民國二十六年一月 譯者識

目 次

第一章 直流電機之基本定律

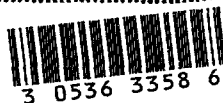
1. 電流	1
2. 電壓	2
3. 歐姆定律	3
4. 電阻	7
5. 克希荷夫定律	9
6. 電阻及電流在一迴線內之分佈	11
7. 電池之串聯接法及並聯接法	12
8. 惠斯登電橋	14
9. 電壓依反接法之測定	15
10. 電功及電功率	16
11. 電熱損失	18

第二章 電化學

12. 電解之過程	21
13. 電解中之重比	24
14. 極化	26
15. 蓄電池	28
16. 電池中之過程	31
17. 電量計	33

第三章 電磁學

18. 磁感應	33
19. 感應通量	35
20. 感應定律	37
21. 電流之磁效應	40
22. 導磁性	41



23. 電路	49
24. 通電導體與磁場間之力	50
25. 自感應	54
26. 互感應	58
27. 電功及磁能	59
28. 電磁鐵之起重及起重力	61
29. 磁滯	64
30. 渦流	65

第四章 電 場

31. 電場密度	68
32. 電場強度	73
33. 介質傳導係數	74
34. 電位	76
35. 電容	77
36. 電場之能	81

第五章 量度制

37. 方程式及量度單位	82
--------------	----

第六章 直流電樞

38. 帶雙裂環換向器之雙 T 式電樞及其繞法	86
39. 二極環形繞組及鼓形繞組	87
40. 多極迴線繞組	93
41. 多極波形繞組	95
42. 直流發電機之電壓及電樞電阻	102

第七章 直流電機之磁性狀況

43. 場磁鐵	103
44. 被捷接圖之電流	106

45. 無火花之運轉..... 118
 46. 正交磁化作用及電樞之反作用..... 116

第八章 直流電機

47. 分激電機..... 120
 48. 關於自激之接法..... 121
 49. 串繞電機..... 123
 50. 分繞電機及複繞電機..... 124
 51. 蓄電池組與電機之並聯運用..... 127
 52. 電壓之區分..... 133
 53. 定流電機..... 134
 54. 效率..... 137

第九章 直流電動機

55. 電動機之轉向..... 141
 56. 轉矩，轉數及功率..... 143
 57. 分繞電動機..... 145
 58. 分繞電動機之起動及調整..... 148
 59. 串繞電動機..... 155
 60. 例..... 158
 61. 串繞電動機之調整..... 160
 62. 鼓形操縱器..... 163

第十章 導線

63. 導線計算法之原理..... 164
 64. 接頭方程式..... 166
 65. 圖解法（比例尺算法）..... 169

第十一章 交流之基本定律

66. 交流之電流強度及電壓..... 171

97. 基本波及諧波	175
68. 平均值及有效值	179
69. 交流之平均功率	182
70. 線示法	184
71. 複算法或符號算法	188
72. 交流電路內之自感應	192
73. 交流電路內之電容	196

第十二章 交流電阻之串聯

74. 串聯中之電阻及自感應	197
75. 成串聯之電阻及電容	203
76. 交流之廣義歐姆定律	204

第十三章 並聯及混聯

77. 成並聯之交流電阻	207
78. 分佈自感應及電容	211

第十四章 軌 跡

79. 直線及圓之方程式 軌跡曲線	216
80. 三相交流電動機上之應用	218
81. 變壓器上之應用	220
82. 倒轉法	225

第十五章 多相電流

83. 三相交流之特性	225
84. 三角接法及星形接法	227
85. 三相交流之有效功率	230
86. 無功率之測定	233
87. 非對稱負載	236
88. 一非對稱三相交流系變為對稱系之分解	242

89. 三相交流導線之電感系數.....	243
90. 三相交流線之電容.....	249

第十六章 瞬間現象及瞬間波

91. 瞬間現象.....	251
92. 關於直流之例 接電手續.....	253
93. 關於交流之例.....	257
94. 瞬間波.....	261
95. 反射定律.....	263
96. 導線內之通路過程.....	266
97. 二導線之連接.....	269
98. 零點之接地.....	271

第十七章 變壓器

99. 變壓器之構造及接法.....	274
100. 變壓器之磁化電流.....	280
101. 飽和之影響.....	283
102. 鐵損失.....	285
103. 有負載時之變壓器.....	288
104. 電壓損失考慮.....	290
105. 雜散之算法.....	294
106. 變壓器之損失及效率.....	296
107. 在有非對稱負載時之三相交流變壓器.....	298
108. 三相交流變壓器之並聯.....	301

第十八章 交流電機之構造及電壓

109. 交流電機之構造.....	301
110. 繞組因數.....	312

第十九章 同步機之作工

111. 同步機之連接 整步	315
112. 激發強度變動時之同步機	318
113. 同步機之負載	324
114. 整步力	326
115. 交流電機之擺動	328
116. 未飽和電機中電壓損失之考慮	333
117. 鐵飽和之考慮	335
118. 有顯極時之電壓圖	340
119. 電樞激發及電樞雜散之分離	341
120. 同步機之捷路電流	343
221. 自動電壓調整	344

第二十章 三相交流電動機

122. 三相交流電動機之工作方法	348
123. 三相交流穩組之磁場	352
124. 略去鐵電阻之磁化電流	355
125. 鐵飽和之考慮	357
126. 三相交流電動機之轉矩	359
127. 無雜散之三相交流電動機	361
128. 有雜散之三相交流電動機之電流圖	365
129. 依電流圖之電數值及電流數值	369
130. 例	372
131. 退移及轉矩	375
132. 三相交流電動機之起動	378
133. 皮膚作用電動機	380
134. 無耗轉數調整	384
135. 雜散因數	387

第二十一章 單相感應電動機

136. 單相電動機之反迴轉激發	394
137. 利用固定子激發之分解而成之電流圖	395
138. 根據橫磁場之電流圖	399

第二十二章 帶換向器之單相交流電動機

139. 產電壓	400
140. 適用交流之串繞電動機	404
141. 推斥電動機	407
142. 愛雪包電動機及拉多爾電動機	412
143. 複繞電動機	417

第二十三章 三相交流串繞電動機

144. 連接法及電流分佈法	422
145. 電壓圖及電流圖	424
146. 功率因數及起動之改良	428

第二十四章 補償三相交流電動機

147. 在固定子饋電之電動機	431
148. 在轉動子饋之電動機	433

第二十五章 三相交流調整組

149. 轉數之調整	435
150. 自激移相器	437
151. 換頻機	439

第二十六章 轉動換流機

152. 電壓及電流之比例	444
153. 在轉動換流機內之電熱	448
154. 串聯換流機	451

第二十七章 水銀整流器

155. 構造及接法.....	452
156. 電壓及電流之比例.....	454
157. 變壓器之大小及變換因數.....	457
158. 內電壓損失.....	458
159. 電感之影響.....	459
漢文索引.....	463

電機工程

第一章 直流之基本定律

1. 電流.

白熾燈之生熱，電動機之輸功，鐵之磁化，液體之分解等均爲電流之效應。恰如異性摩擦電¹⁾量間之平衡作用，是類過程亦概在一電壓差或電壓²⁾之影響下進行。

如水自高處流至低處或如熱自高溫體轉至低溫體，電自電壓較高之處流至較低之處。此種均壓作用無論在帶異性電之二金屬球間或在電池或發電機之二端間發生，均謂之電流³⁾。

然在摩擦電與由電池或發電機發生之流動電之間，却有一種差別。聚在萊頓瓶上由電花放出之電，其電量⁴⁾與在短時間由丹聶爾電池發生或在一日間通過一城市之電纜網之電量相較大相懸殊。至兩者之電壓或電位差⁵⁾則反是。摩擦電之電位差遠較發電機一般的電壓爲高。所謂電位差或電壓者，是處僅視爲促成平衡之努力。摩擦電容易發生電花通過空氣，由是可見其電位差決非平常焉。又兩者之性質亦不同。摩擦電之向平衡之努力係出於驟，而流動電之努力則出於漸。

今不闡明電之物理關係，但爲計算起見，設想祇有陽電⁶⁾被迫流

1) 摩擦電; Reibungselektrizität; frictional electricity; électricité par frottement. 2) 電壓; elektrische Spannung; voltage; tension électrique. 3) 電流; elektrischer Strom; electric current; courant électrique. 4) 電量; Elektrizitätsmenge; quantity of electricity; quantité d'électricité. 5) 電位差; potentialdifferenz; electric potential difference; différence de électrique. 6) 電; Elektrizität; electricity; électricité.



動，例如用綢擦玻璃棒所生之摩擦電是。電流強度¹⁾為在一單位時間內通過導體橫斷面積之電量。如命Q表電量，t表時間，則電流強度

$$I = Q/t. \quad (1)$$

依定則，凡有一強度單位之電流能於1秒間從一銀溶液析出1.118毫克(公絲)之銀分。此電流強度曰一安培²⁾，略稱一安。

有每秒一安培之電流通過導體橫斷面積之電量，曰一庫侖³⁾，略稱一庫。一安培小時或曰1安時⁴⁾故等於3600庫侖。如一金屬絲燈之電流強度為I=0.5安培，則在一小時或3600秒間通過該燈之電量當為

$$Q = It = 0.5 \times 3600 = 1800 \text{ 庫侖} = 0.5 \text{ 安時}.$$

至電流密度⁵⁾為電流強度對於橫斷面積之比。

由經驗知電流之磁效應與其電解效應之間存有一種固定關係，而電流強度可由磁效應量之。計器中其用電流圈變另一電流圈或一導體之方向或吸引之者，曰電流指示器。供測弱流用之指示器，曰電流計⁶⁾——電流之測定⁷⁾。

2. 電壓。

促電流動之電壓或由發電機發生或由電池發生。在前者中，一線圈在一磁鐵前旋轉，而在後者之液體內浸有化學性不測之二液。與電池之兩極例如一為鋅板一為炭板，二者浸在稀酸(Cr O_2)及硫酸(H_2SO_4)內。用靜電計檢驗斷路電池，知炭面上帶正電，鋅面上帶負電；故在電池兩端之間存有電壓。當將兩端由一金屬導體或液態導體通接時，發生均壓作用或電流。此時遂有正電循外導體由炭向鋅流動(圖1)。

此後電循外導體流動不絕，故在電池內電復由鋅板兩極板。如

1) 電流強度; Stromstärke; current intensity; intensité du courant. 2) 安培; Ampere; ampère; ampère. 3) 庫侖; Coulomb; coulomb; coulomb. 4) 安時; Ampere-heure; ampère-heure; ampère-heure. 5) 電流密度; Stromdichte; current density; densité du courant. 6) 電流計; Galvanometer; galvanometer; galvanomètre. 7) 電流之測定; Strommessung; current measurement; mesure du courant.

水由山地注入海中後，復由蒸發回至高處，俾水循環不絕。在電池內亦必存有一種原因，使電循電池的內電阻及外電阻流動不絕。此種使電流動的原因，曰電動勢¹⁾；略稱電勢。電動勢可與使水沿導管循環流動不絕之唧筒相比擬。外電路開斷時，電動勢等於路端電壓。電路閉時，吾人僅能就全電路內之效應而計算，非如二點間之電壓而量之焉。此種在內外電路內作用之電壓曰產電壓²⁾。

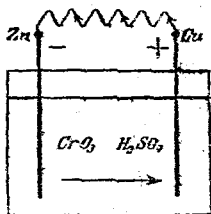


圖1. 丹電池。

電壓概就其所惹起之電流測定。例如以管聯絡二容器，如管之抵抗或活門口徑不變，則在一時間單位內從一容器流至其他一容器的水量隨壓力或其壓差而增減。依同法若由計器連接欲測計其電壓之二點，例如若干串聯電池之兩端，則此計器指出電流為示電壓強弱之一種量——電壓之測定³⁾。

由一電池發生之電壓幾乎全不變動且與電池之大小無關。電池可比諸一高擱的水櫃。在水櫃與消費處之間存有一定的壓力，其強度由水面與消費處間之高差而定。至水櫃壓力與水櫃大小全無關係，所要在維持櫃內水面高低不變而已。水流之強度視水量消費之多少而定。同樣，電池中僅其發生之電壓不變——電壓強度可用驗電器在電池電路開斷時證實——，而電流強度則變。就一般而言，電流強度視電路內電流通過之難易而定，故即視外電路之電阻之大小而定。

電壓之常用單位比較上述丹電池之電壓小一半，稱曰伏特⁴⁾，略稱伏。

3. 歐姆定律。

1. 電動勢; elektromotorische Kraft; electromotive force; force electromotrice. 2. 產電壓; erzeugte Spannung; produced voltage. 3. 電壓之測定; Spannungsmessung; voltage measurement; mesure de tension. 4. 伏特; Volt; volt; volt.

試將若干不同的電壓先後分別連絡在同一均壓線上，則由計器指出之電流強度係與電壓為比例。同樣，若將性質，長度及橫斷面積不同之若干導線先後結在同一電池之二端，則亦察見不等強電流，而此係因導線對於電流起強弱不等的抵抗之故。抵抗較大時，電流強度較小。反之則較大。故電流強度與抵抗成反比。如以水為譬，在一定壓力下於一時間單位內壓入於一導管內之水量當管愈長及管壁摩擦係數愈大及管徑愈狹時愈小。換言之，即管之抵抗愈大時，水量愈小。

準此，電流強度與電壓為正比，與電阻¹⁾為反比。

如命E表電壓，R表電路電阻，則電流強度

$$I = E/R. \quad (2)$$

公式(2)稱曰歐姆定律²⁾。據此，當1伏之電壓產生1安之電流時，導體電阻當為一實用單位，稱曰1歐姆³⁾，略稱1歐。此電阻即為長106.3厘米(公分)橫斷面積一平方毫米(公厘)之水銀⁴⁾所有者。

舉例言之，如某發電機之電壓為E=115伏，其內電阻為0.05歐，而外電阻為1.1歐，則全電阻R=1.15歐，故I=E/R=100安。

依據合法的決定，1安為電流在1秒間析出1.118毫克銀分之重量，而1歐為長106.3厘米橫斷面積1平方毫米之水銀線所有者之電阻——法定單位⁴⁾。由是遂定1伏為在有1歐之電阻內惹起1安之電流之電壓。

上述之安培及歐姆與米厘單位及秒單位共成實用量度制之基本單位。各種合調的量度制均有一種優點，即其對於一般的物理方程式均適用。是種方程式在不計量度單位時固然有效，但若在算題中代入一制之各量單位亦有效也。

茲由變更方程式(2)得R=E/I。此式示試驗大電阻時電壓雖大但惹起之電流強度則小之理由。故電阻無非為電壓與電流強度之比而不

¹⁾電阻; elektrischer Widerstand; electric resistance; résistance électrique. ²⁾歐姆定律; Ohmsches Gesetz; Ohm's law; loi d'Ohm. ³⁾歐姆; Ohm; ohm; ohm. ⁴⁾法定單位; Einheiten gesetzliche Festlegung; legal units; unités légales.

應視為一種反電壓。如將電阻與電流強度相乘積，則得電壓，其方程式為 $E=IR$ 。此式左邊表電源之電壓，右邊表電流 I 通過電阻 R 時消耗之電壓，曰壓損失或壓耗¹⁾，二者係相等。

歐姆定律不但對於全電路且對於其各分部亦適用。例如令電流 I 依次通過電阻 R_1 , R_2 及 R_3 (圖2)。如命 U_1, U_2, U_3 表各電阻之路端電壓²⁾

·由實驗證明：

$$\begin{aligned} U_1 &= IR_1 & U_2 &= IR_2 & U_3 &= IR_3 \\ R_1 &= U_1/I & R_2 &= U_2/I & R_3 &= U_3/I. \end{aligned}$$

如由應用一高壓使電流達大的強度，但無論如何例如在路端電壓 U 與電流強度 I 之間必成某一定的比例。此一定的比例稱曰電阻。其值惟當溫度發生變化時變動。故方程式(2)對於一電路之各分部均適用，祇須由 R 表該分部之電阻並以路端電壓 U 代替 E 。

舉例言之，試令1歐之電阻與在轉動中之一電動機之電樞相串聯，然後令與110伏之電壓相連接。如電流強度為15安，則在電阻內之電壓損失為 $1 \times 15 = 15$ 伏而在電動機電樞之電壓當為 $110 - 15 = 95$ 伏。

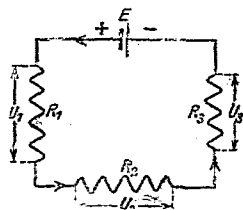


圖2. 串聯接法。

茲欲說明安培計³⁾(電流指示器)及伏特計⁴⁾(電壓指示器)之作用方式。此二種計器⁵⁾之作用根據一線圈之磁效應，故二者均測一電流強度。其間之差別僅在連接法及構造。

安培計係插在主路內(圖3)，且為減少計內發生之熱及電壓損失，含有少數粗線匝。

¹⁾ 壓耗; Spannungsverbrauch, Spannungsverlust; voltage drop; perte de tension. ²⁾ 路端電壓; Klemmenspannung; terminal voltage; tension aux bornes. ³⁾ 安培計; Stromzeiger, Amperemeter; ampere-meter, ammeter; ampèremètre, ammètre. ⁴⁾ 伏特計; Spannungszeiger, Voltmeter; voltmeter; voltmètre. ⁵⁾ 計器; Messgerät; measuring device; appareil mesureux.

反之，伏特計係與欲測定之電壓相連接，例如在第三圖中所示係插

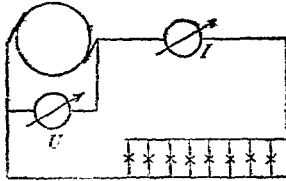


圖3. 電流指示器及電壓指示器。

特計插在該分路內。計內之電流既表一種損失，故凡伏特計均有大電阻或須串聯一大電阻。如是，耗電體之電壓或電流強度不致因伏特計面受影響。通過該計器之電流既極弱，故計器內圈線之橫斷面積可極小。爲蓋起強有力的磁效應，其匝數須多。

數須多。

計器中指針之偏轉既由通過之電流所促成，故一伏特計之工作其實全與一安培計同。如將其中通過之電流與該計器之電阻相乘積，則得計器二端間之電壓，後者自然可在一標度上指出之。因安培計及伏特計具有基本相似性，故多數計器可供測電壓及電流強度之用。例如某安培計，其中1/1000安之電流促成一度之偏轉。其用充伏特計時，如使計器分路內之電阻增至1000歐姆，則每度偏轉當與 $1000 \times 1/1000 = 1$ 伏特之電壓相當。

爲比較安培計，將其前後串聯如第4圖。又爲比較伏特計，將其並聯，換言之，使兩者均與欲測定之電壓相連接。在第5圖中例如爲校準¹⁾伏特計，測出電阻R之兩端間之電壓。插在前面之燈消耗發電機電壓之一部分，俾易調節在電阻R之電壓。

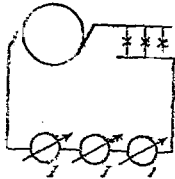


圖4. 電流指示器之校準。

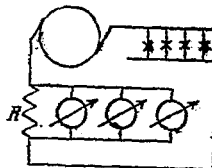


圖5. 電壓指示器之校準。

爲比較伏特計，務須注意不使其先後串聯，蓋當計器之電阻不等時，總電壓在各計器內分配不等。

安培計及伏特計

1: 校準; Eichung; standardization, graduation.

又可供測電阻之用(電阻之測定¹⁾)，惟須在分路內不產生電動勢。例如導10安培強之電流通過一電動機之靜止電樞並測得刷處之電壓U為2伏，則電樞之電阻R當等於U/I=0.2歐。如是測出之電阻故並不包括饋電線之電阻²⁾。

4. 電阻。

電阻³⁾為電壓與電流強度之比，其與導體之長及橫斷面積發生一簡單關係。電阻又與導體物質及溫度有關。如命l表長，q表橫斷面積，e表一常數，則由經驗知

$$R = \rho l / q. \quad (3)$$

電阻故與長成正比與橫斷面積成反比。e之值視物質之性質而定。如在方程式(3)中命l=1及q=1，則R=e。故e為導體在有一單位長及一單位橫斷面積時之電阻，曰電阻係數⁴⁾。其量法不遵前述(見第2面)之量度制，但大都以米數計長，以平方毫米計橫斷面積，故e係以歐數乘平方毫米/米計算。如是乃得若干物質之電阻係數如下：

銅	在15°時	0.017	鎳銅(德銀)	0.2至0.4
鋁		0.029	炭	100至1000
水銀	1/1.063 =	0.94	硫酸(25%)	1400.

鎳銅因有大電阻系數係供製造減衰電流強度或消滅電壓之電阻器之用。至電樞及計器之圈線及一般的導線係用導電頗良之銅製出，故其中電壓損失不大。舉例為譬，設一銅線之長為20米，即往返二線之長l=2×20=40米。又其橫斷面積q=50平方毫米，故往返二線之電阻當為R=e l/q=0.017×40/50=0.0136歐。有60安電流通過時，電壓損失為IR=0.0136×60=0.8伏。根據經濟的理由惟有天空線係以

¹⁾電阻之測定; Widerstandsmessung; resistance measurement; mesure de r(sistance); ²⁾饋電線之電阻; Zuleitungswiderstand; feeder resistance; r(sistance de feeder. ³⁾電阻; elektrischer Widerstand; electric resistance; r(sistance électrique; ⁴⁾電阻係數; sp. zifischer Widerstand; specific resistance; r(sistance spécifique.

用鋁製出爲佳。

金屬之電阻係數均隨溫度而增加。所謂溫度係數¹⁾者，即在 15° 時決定之一電阻單位於溫度增加 1° 時之電阻的增加率，如命 R₁₅ 表在 15° 時之電阻，R 表在 θ° 時之電阻及 α 表溫度係數，則

$$R = R_{15}[1 + \alpha(\theta - 15)].$$

電機內在溫度計不能達到之部分之溫度之增加可藉溫度係數決定。如命 θ₁ 表室內溫度，R₁ 表電機之磁繞組之初電阻，則工作若干小時之後，繞組之電阻當爲 R₂。此兩電阻之關係如下：

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_{15}[1 + \alpha(\theta_1 - 15)]}{R_{15}[1 + \alpha(\theta_2 - 15)]}$$

由變式得

$$\frac{R_1}{R_2 - R_1} = \frac{1 + \alpha(\theta_1 - 15)}{\alpha(\theta_2 - \theta_1)} \quad \text{或} \quad \theta_2 - \theta_1 = \frac{R_2 - R_1}{R_1} \left(\frac{1}{\alpha} + \theta_1 - 15 \right).$$

就銅言之，α = 0.004，即 1/α = 250，換言之，增加之溫度或加熱²⁾爲

$$\theta_2 - \theta_1 = \frac{R_2 - R_1}{R_1} (255 + \theta_1).$$

如 R₁ = 40 歐，θ₁ = 20°，R₂ = 47 歐，則 θ₂ - θ₁ = 255 × 7 ÷ 40 = 44.6°。

除水銀外，金屬之溫度係數既大，是以不適供製精確電阻器之用。爲製造各種儀器概用有 0.0002 至 0.0004 之溫度係數及一大電阻係數之錳銅³⁾，或德銀⁴⁾。錳銅⁵⁾之電阻係數幾乎與溫度無關。

炭及液態導體與金屬相反，其電阻當溫度增加時反減小，故其溫度係數爲一負數。因此之故，炭絲燈之電阻當燈開時比被燈點燃時爲小。其計算係據電壓與電流強度之關係。

¹⁾溫度係數; Temperaturkoeffizient; temperature coefficient; coefficient d; temperature. ²⁾加熱; Erwärmung; Warming; Chauffage. ³⁾錳銅; Nickelin; copper-nickel; Kupfernickel. ⁴⁾德銀; Neussilber; german silver; argent d'Allemagne. ⁵⁾錳鋼; Manganin; manganin; manganite.

一常用之值曰電導¹⁾，為電阻之反值。電導之單位曰西門子，略稱西，即為歐姆之反值。例如電阻等於20歐時，電導為 $\frac{1}{20}=0.05$ 西。電導係數²⁾故等於電阻係數之反值，例如純銅之電導係數為1.6， $0.17=59 \times$ 西 \times 米 \div 平方毫米，工業銅之電導係數為57或58西 \times 米 \div 平方毫米。

5. 克希荷夫定律³⁾。

1. 由經驗知在各分路點，流來之電流之總和等於流去之電流之總和。如以流來之電流為正，流去之電流為負，則在各分路點

$$\sum I = 0. \quad (4)$$

例如假定一分繞發電機之路端電壓為 $U=220$ 伏特，外電路內之電流強度為 $I=100$ 安培而分繞制之電阻為 $R_m=50$ 歐姆(圖6)。於是磁鐵繞組內及電樞內之電流強度當為 $I_m=U/R_m=4.4$ 安培及 $I_a=I+I_m=104.4$ 安培。

據方程式(4)，謂電沿全路自正號接線端流至負號接線端而被耗盡之見解並非正當。如不顧及電荷，全電量確由正號端流出，在負號端流入，而後經電源復回至正號端。電並非陸續新生，但同一電量循全電路流動而不在一處停滯或消滅。故所謂電流損失僅表示電流之一部分向別路流去致不能再利用之意。其實所消耗者為電壓而非電量。

2. 在各閉電路內電流強度與電阻之乘積等於電路內發生之電壓之總和。

$$\sum IR = \sum E. \quad (5)$$

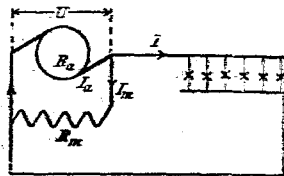


圖6. 分繞發電機。

1) 電導; elektrischer Leitwert; electric conductivity; conductibility (de-
trique. 2) 電導係數; spezifische Leitwert; specific conductance; conductance
specifique. 3) 克希荷夫定律; Kirchhoff'sche Regeln; Kirchhoff's laws; lois
de Kirchhoff.

此外在各分路上須記明一計算方向¹⁾。如已知電流方向，電路之計算方向當與電流方向一致。此後遵各閉路之任一循環方向並為創方程式(5)之方向與循環方向相反之電壓及計算矢首與循環方向相反之電流均為負。若最後電流強度之總和為負，則電流流動之方向當與矢首之方向相反。

第7圖表一電機與一電池組反接之情形。由電機及電池組發生之電壓 E 及 E_b 。其方向均為自左向右。假定先時未知電流之方向，故右方上端之矢首無非為表全路電流方向之任意選定之計算矢首。此後依時針方向並據方程式(5)得

$$IR_a + IR_l + IR_b = E - E_b$$

或

$$I = (E - E_b) : (R_a + R_l + R_b) \quad (5)$$

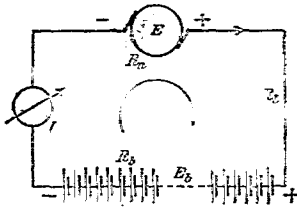


圖7. 反接法。

設 $E > E_b$ ，則 I 為正，申言之，電流依矢首所示之方向而流動。該機故為一發電機，其中產生之電壓其方向與電流方向一致。如 $E =$

116伏， $E_b = 100$ 伏， $R_a = 0.1$ ， $R_l = 0.12$ 及 $R_b = 0.18$ 歐，則

$$I = \frac{116 - 100}{0.1 + 0.12 + 0.18} = \frac{16}{0.4} = 40 \text{ 安。}$$

各部之電壓損失為 $IR_a = 4$ ， $IR_l = 4.8$ 及 $IR_b = 7.2$ 伏，總計16伏。發電機之116伏電壓中，16伏抵償電壓消失，100伏抵償電池組之100伏電壓，電池組因此充電。發電機及電池組之路端電壓分別為

$$U_m = E - IR_a = 112 \text{ 伏} \quad \text{及} \quad U_b = E_b + IR_b = 107.2 \text{ 伏。}$$

二者之差等於導線之電壓消耗，即與上相同，為4.8伏。

圖7及方程式(a)在 $E_b > E$ 時亦適用。方程式(a)於是表負電流環

¹⁾計算方向；Zählrichtung.

度之值。電流故反矢首之方向且與電發機之電壓之方向相反。該發電機是以如電動機轉動而從電池組納取電力。

6. 電阻及電流在一迴線內之分佈。

在串聯接法中，總電阻等於分電阻之總和，是以大於任何一分電阻。反之，在二電阻 R_1 及 R_2 之並聯接法中（圖8），總電阻¹⁾反較任何一電阻為小。故因並聯而增加者並非電阻但為其電導。並聯後之電導等於分路電導之和。如命 R_1 及 R_2 表分電阻，則並聯之總電阻 R 可由下列方程式表示之。

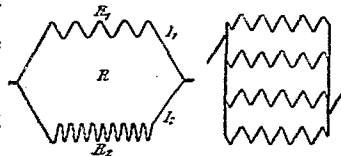


圖8. 電阻之並聯接法。

$$1/R = 1/R_1 + 1/R_2, \text{ 或 } R = R_1 R_2 / (R_1 + R_2). \quad (6)$$

由並聯電阻可惹起一種極小而又準確之電阻。設想一過分大之電阻 R_1 並使之與一第二電阻 R_2 相並聯。假定 $R_1 = 0.102$ 歐。設欲由並聯第二電阻 R_2 使發生 0.1 歐之總電阻 R 。

由方程式(6): $0.1 = 0.102 \times R_2 / (0.102 + R_2)$, 或 $R_2 = 5.1$ 歐。
 茲若其誤錯為 2%, 而 R_2 其實祇有 5 歐, 則 $R = R_1 R_2 / (R_1 + R_2) = 0.09996$ 歐。故總電阻之誤差僅有 0.04%。

在有二路以上之分路時，全部分之電導等於各電導之總和，即

$$1/R = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3 + \dots$$

由此式可求得總電阻 R 。如分電阻相等，則計算尤易。假定一四極發電機之電樞繞組含有四相等並聯分路（圖9）。如每路之線長為 50 米，橫斷面積為 10 平方毫米，熱銅之電阻係數等於 0.62 歐 \times 平方毫米/米，則每分路之電阻當為 $e \times l/q = 0.1$ 歐。如四分路並聯，則總電阻當小四倍。

今計算第 8 圖中電流強度之關係。如命 U 表電阻 R_1 或 R_2 之路端電

1) 總電阻; Gesamt-widerstand; total resistance; résistance totale.

壓， I_1 及 I_2 表電流強度，則

$$U = I_1 R_1 = I_2 R_2 \quad \text{或} \quad I_1 : I_2 = R_2 : R_1. \quad (7)$$

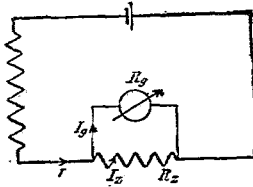


圖10. 用分路之量法。

如命 R_g 表電流計之電阻， I_g 表計器內之電流， I_z 表電阻 R_z 內之電流，則

$$I_g : I_z = R_z : R_g \quad \text{或} \quad I_g : (I_g + I_z) = R_z : (R_g + R_z).$$

今據第10圖 $I_g + I_z = I$ ，故

$$I = I_g (R_g + R_z) : R_z.$$

為便於計算起見，尋常使 R_z 等於 R_g 之 $1/9$ ， $1/99$ 或 $1/999$ 。例如

$R_g = 100$ 歐及 $R_z = 100/999$ 歐，則

$$I = I_g \frac{100 + 100/999}{100/999} = 1000 I_g.$$

7. 電池之串聯接法及並聯接法。

在電池之串聯接法¹⁾中，一電池之正極與次一電池之負極相連接（圖11），故同一電流依次通過全數電池。又因電池之電壓係依同一方向，故恰如電池之內電阻，電池之電壓亦互相加積。設電池之內電阻遠較其外電阻為小，則縱使有多數電池亦不惹起顯著之影響。至電壓則顯然增加。曠是之故，串聯接法係當用大外電阻惹起大電流強度時用之。

在電池之並聯接法或分接法²⁾（圖12）中，則將正極與正極，負

1) 串聯接法; Reihenschaltung; series connection; connexion en série.

2) 分接法; Nebenschaltung; shunt connection; connexion en parallèle.

極與負極連接，且因電壓不互相加積之故，在外電阻內之電壓不大。舉譬言之，如從兩等高之水櫃接下二管，則當時之壓力除不計微小壓

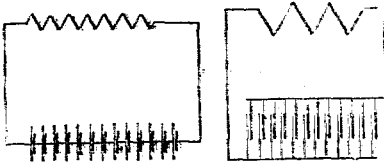


圖11. 串聯接法。 圖12. 分接法。

力損失外正與單用一水櫃時相同。至電流強度在該接法中則往往頗大，譬如外電阻小時可毋須有高壓以惹起強電流，又內電阻與外電阻比較強時亦概用此接法以產強電流。

除串聯接法及並聯接法外，又可先將電池聯接為若干串以後再將數串並聯如第13圖所示，是為電池之混聯接法¹⁾。茲命R表外電阻，R_b表電池組之電阻，R_i表電池之電阻，E表由各電池發生之電壓，x

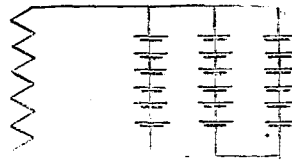


圖13. 電池之混聯接法。

表每串之電池數，z表電池之總數。準此，則電池之串數為z/x，每串之電阻為R_ix，電池組之電壓為E×x，又電池組之電阻

$$R_b = \frac{R_i x}{z/x} = \frac{R_i x^2}{z}$$

在外電路內之電流強度I:

$$I = \frac{E \times x}{R + R_i x^2/z} = \frac{E}{R/x + R_i x/z}$$

此式之值當分母愈小時愈大，如命分母之依x之微分商等於零，則R=R_ix²/z。為使電流強度有最大值，必須使電池組之內電阻等於外電阻。此定則僅在弱電工程中重要。

¹⁾混聯接法；gemischte Schaltung；series-shunt connection；connexion en série et en parallèle.

8. 惠斯登電橋。

電阻除前接由測定電壓及電流強度而決定外，又可藉惠斯登電橋 (圖14) 直接確定。在帶標度之裸線 AB (稱曰量線) 之間連接電壓不明之電池 E。與該線並聯者，有欲測計之電阻 x 及與 x 相串聯之一已知電阻 R，在電橋之 CD 支路上有一電流計，其一端 C 可在線上滑動。

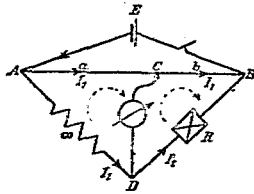


圖14. 惠斯登電橋。

移 C 使電流計不呈偏轉時，表示 CD 分路內無電流通過。此時在電阻 a 及 b 內通過之電流為 I_1 ，在電阻 x 及 R 內通過之電流為 I_2 ，在下方之兩電路內既不產生電壓而 CD 內又無電流通過

，故依據克希荷夫第二定律

$$I_1 a + 0 - I_2 x = 0 \quad \text{及} \quad I_1 b - I_2 R + 0 = 0.$$

由是得 $x:R = a:b$ ，電阻之比例是以直接等於線長之比例。

上列之方程式可以一水流為譬而明瞭之。如令水流通過二並行而又鉛直之管並再用一水平管連接該二管，則因無高差之故，管內無電流通過。

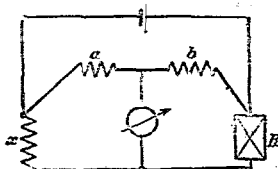


圖15. 用惠斯登橋法以除去一部分之誤差。

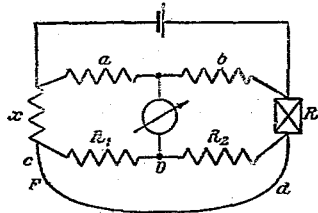


圖16. 湯姆遜雙橋法。

電橋中之情形正與此相似。當電流計內無電流通過時，在 CD 二點之

① 惠斯登電橋; Wheatstonesche Brücke; Wheatstone's bridge; pont de Wheatstone. ② 湯姆遜雙橋法; Thomsonsche Dopp-Brücke; Thomson's bridge; pont de Lord Kelvin.

間並無電壓，而由A至C之電壓消耗等於由A至D之電壓消耗，故由上述， $I_1 a = I_2 x$ 及 $I_1 b = I_2 R$ 。若電阻R與x約略相等，則所得之結果最準確。

電阻小時，連接x及R之接線之電阻能惹起誤差。為免除該種誤差之一部分，將電池直接插在x與R二電阻之末端並用線圈電阻c及b以代滑線（圖15）。線圈之電阻極大，是以接線之電阻可略去不計。但x與R間之接線之影響仍存在。若在第15圖中將計器直接置在電阻x之末端，則R當增大而經增大之值等於x與R間之接線之電阻。反之，若將計器直接連接在R，則測得之x值過大。

如欲除去x及R間之接線之影響，則須由應用二電阻 R_1 及 R_2 使計器同時與x及R相連接（圖16）。 R_1 與 R_2 之比與a與b之比同。x與R復由在下面之一線連接。此後由變動電阻R可使電橋分路內之電流減至零值。其時在D與F之間並無電壓。F依 $c:d = R_1:R_2 = a:b$ 之比區分x與R間之接線，故可想像計器不與D而直接與F相連接。當電橋分路內無電流通過時，應有依次列方程式表示之關係： $a:b = (x+c):(R+d)$ 。

既然 $c/d = a/b$ ，是以x/R恰等於a/b，由是遂求出接線之電阻。凡小電阻（如電機之電樞電阻）即可依此法精密測定。

9. 電壓依反接法¹⁾之測定。

在一帶標度之量線之間裝一帶電壓 E_0 之電池（圖17）。其電壓毋須確定，但當試驗之際不許變動，且必須大於欲測定之電壓。

在量線A端與接觸C之間連接一電流計，一電阻及一已知其電壓 E_n 之電池，並令 E_n

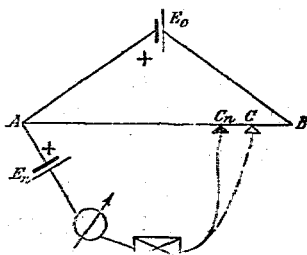


圖17. 電壓之依反接法之測定。

¹⁾ 反接法; Gegenseitigung; connection in opposition; montage en opposition.

與 E_0 相反接。

今移動接觸至在計器內幾乎無電流通過為止，並捷接電阻。次將接觸移至 C_n ，當時計器指出計內並無電流通過。

茲以欲測定其電壓 E 之電池代替帶電壓 E_n 之電池並使電壓 E 復與 E_0 反接。如將接觸向 C 移動，計器內可無電流通過。

其時 AB 間之電壓沿量線消耗，而其中各部分之壓耗與線長為比例。準此以觀，電壓 AC_n 與電壓 E_n 成平衡而電壓 AC 則與電壓 E 成平衡。故若以相當之線長代替電壓，則得下列之關係： $AC_n : AC = E_n : E$ 。

又 AB 間之電壓 U 有如下之關係： $AB : AC_n = U : E_n$ 。 U 為路端電壓，其與電池產生之電壓 E_0 相較小電池之內壓損失。應注意者，產電壓 E_0 之電池並非如相比較之電池 (E_n 及 E) 不通電流。

此法幾乎為校準計器之惟一方法。（依福斯納¹⁾之補償器²⁾）。其中以精密測定後之電阻代替量線，以蓄電池組代電池 E_0 ，並用一斯吞電池以產已知之電壓。

10. 電功及電功率。

電流通過導體使導體發熱。由實驗知熱量依電壓 U ，電流強度 I 及時間 t 而增加。熱既與功 A 等價，故 UIt 表示電功³⁾。即

$$A = UIt. \quad (8)$$

如以水流為譬，水流在某一定時間內所成之功等於水量與落距之乘積。計算電功之方法亦同，蓋 It 表示在 t 時間內受電壓 U 之影響而流動之電量。

經1安培之電流，受1伏特電壓之影響在1秒間所作之功曰1焦耳⁴⁾。伏特及安培之單位係任意選出，致成立如下之關係：

1) 福斯納; Feussner. 2) 補償器; Kompensationsapparat; compensating set; appareil compensateur. 3) 電功; elektrische Arbeit; electric work; travail d'électricité. 4) 焦耳; Joule; joule; joule.

$$1 \text{ 焦耳} = \frac{1}{9.81} \text{ 仟米克} = 0.102 \text{ 仟米克}^1) \cdot (9)$$

譬如某發電機在 220 伏電壓下供給 50 安電流歷 1 小時 = 3600 秒之久，其所成之功

$$A = 220 \times 50 \times 3600 = 396 \times 10^6 \text{ 焦耳} = 40.5 \times 10^6 \text{ 仟米克} \cdot$$

又如令帶 2 伏電壓之電池供給 0.55 安電流歷 1 小時之久，其所成之功為

$$A = 2 \times 0.55 \times 3600 = 3960 \text{ 焦耳} = 400 \text{ 仟米克} \cdot$$

依據方程式(8)當可更明瞭電壓之意義。二點間之電壓等於一單位之電量自一點移動至他點時所作之功。在靜電磁場中此功亦曰電位²⁾之差(參見第34章)。在動電學中此名稱准在討論與路程無關之功時用之。

由方程式(8)可計算電流之熱量³⁾。熱既與功同價，故亦可以焦耳計算。然尋常多以克卡⁴⁾為熱之單位。所謂克卡為使 1 克之水之溫度增加 1° 所須之熱量。

今 1 克卡 = 0.427 仟米克 = 0.427 × 9.81 焦耳或 1 焦耳 = 0.24 克卡。如 U 以伏特，I 以安培而 t 以秒計，則熱量當以克卡計：

$$Q = 0.24 UI t. \quad (10)$$

此方程式謂之焦耳定律⁵⁾。為以實驗證實此定律，用一浸在水中之白金螺線導電流通過某量之水，白金螺線之兩端繫粗銅線以導入電流。容水之玻璃杯係置在玻璃瓶木上(見圖18)並由空氣層與外面容器

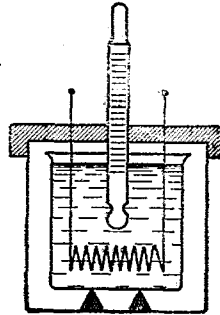


圖18. 焦耳定律之確定。

¹⁾ 仟米克; Meterkilogramm; kilogrammeter; *milligrammètre*. ²⁾ 電位; elektrisches Potential; electric potential; *potentiel électrique*. ³⁾ 熱量; Warmemenge; quantity of heat; *quantité calorifique*. ⁴⁾ 克卡; Gramme-kalorie; gram-calorie; *calorie-gramme*. ⁵⁾ 焦耳定律; Joulesches Gesetz; Joule's law; loi de Joule.

相隔離，俾於可能範圍內免除熱損失。先確定電壓，電流強度，時間及溫度之增長 θ ，一次計算熱之克卡數，即以水重之克數乘增加之溫度。

如實驗得法可應方程式(10)之要求。最好令實驗在較室內溫度為低之溫度下開始而在同量較高之溫度下告終，蓋如是在後半實驗中由內向外洩出之熱量與在前半實驗中由外向內加入者相等，如是可免熱損失之缺陷。水量包括玻璃杯之水當量。為求玻璃杯之水當量以玻璃之比熱，乘玻璃重之克數，故即以0.19乘之。

UI 既表電功，則在一時簡單位內所成之功或功率

$$N = UI. \quad (11)$$

一安之電流強度在一伏電壓下所成之功率¹⁾曰1瓦特，簡稱1瓦²⁾。1瓦特故等於每秒1焦耳或1焦耳等於1瓦秒。

例如電壓 $U = 100$ 伏，電流強度 $I = 10$ 安，則電功率³⁾ $N = UI = 100 \times 10 = 1000$ 瓦。

一馬力⁴⁾ 既等於每秒75仟米克，故

$$1 \text{ 馬力} = 75 \text{ 仟米克/秒} = 75 \times 9.81 \text{ 焦耳/秒} = 735 \text{ 瓦。}$$

1000瓦謂之仟瓦⁵⁾。此單位亦常代替馬力。1仟瓦時⁶⁾ 等於 1000×3600 瓦秒，故即等於 3.6×10^6 焦耳。

11. 電熱損失。

如於方程式(11)中代入 $U = IR$ 之關係，則得在一時間單位內變熱 (焦耳熱⁷⁾) 之功率

$$N_w = IR. \quad (12)$$

此功率故與電流強度之自乘及電阻成比例。

¹⁾ 功率; Leistung; power; puissance. ²⁾ 瓦特; Watt; watt; watt. ³⁾ 電功率; elektrische Leistung; electric power; puissance électrique. ⁴⁾ 馬力; Pferdestärke; horse-power; cheval. ⁵⁾ 仟瓦; Kilowatt; kilowatt; kilowatt. ⁶⁾ 仟瓦時; Kilowattstunde; kilowatt hour; kilowatt-heure. ⁷⁾ 焦耳熱; Joulesche Wärme; Joule's heat; chaleur de Joule.

例如將功率 N 輸至 $l/2$ 之遠處，受相對損失 v 。此損失可在較低電壓下有較強電流時發生，或在較高電壓下有較弱電流時發生。就一般而言，

$$I = N/U. \quad (a)$$

據公式(12)及(6)往返兩線之電阻

$$R = \frac{Nw}{I^2} = \frac{vN}{I^2} \quad \text{及} \quad q = \frac{l}{R} = \frac{q'l}{vN} \times I^2. \quad (b)$$

準此則如經輸送(力之輸送¹⁾)之功率 N 及相對損失不變，橫斷面積與電流強度之自乘為正比而與電壓之自乘為反比。

例如經輸送之功率 $N = 10,000$ 仟瓦 $= 10^7$ 瓦，往返兩線之長 l 共計 300 千米 $= 3 \times 10^5$ 米，相對損失為 0.1 ，則就銅線($q = 0.017$ 歐 \times 平方毫米 \div 米)而言，其橫斷面積

$$q = \frac{q'l}{vN} I^2 = 50 \times 10^{-4} I^2 \text{ 平方毫米}.$$

次依次選定 $100, 1000, 10000$ 及 100000 伏電壓，於是據方程式(a)及(b)得如下之數據：

U	$I = \frac{10^7}{U}$	$q = 50 \times 10^{-4} I^2$
100伏	100000安	50×10^6 平方毫米
1000伏	10000安	50×10^4 平方毫米
10000伏	1000安	50×10^2 平方毫米
100000伏	100安	50 平方毫米

因經濟關係，尋常概用末列之配置。如交流在多數情形中即用如是之配置。

又為減少饋電線內電壓損失或線之橫斷面積常採用三線接法²⁾。

假定耗 0.25 安培電流之某金屬絲燈有規定的光強及壽命。其電阻

¹⁾力之輸送；Kraftübertragung；power transmission；transmission de puissance. ²⁾三線接法；Dreileiterschaltung；three wire connection；connexion à trois fils.

在熱狀況下爲 440 歐。爲使 0.25 安電流通過該燈必須有 $440 \times 0.25 = 110$ 伏之路端電壓。今假定有 400 同樣之燈於 2 仟米(公里)之遠處而在饋電線內祇許有 10% 之電壓損失。求導線之橫斷面積。

例 1. 電壓爲 110 伏。燈互相並聯(圖 19)。如每燈耗電 0.25 安，則 400 燈須耗電 $I = 0.25 \times 400 = 100$ 安。輸送之功率： $N = UI = 110 \times 100 = 11000$ 瓦。導線內之損失爲 10%，即等於 1100 瓦。線內之電阻故爲



$$R = \frac{N_w}{I^2} = \frac{1100}{100^2} = 0.11 \text{ 歐}.$$

如 $l = 2 \times 2000 = 4000$ 米，電阻係數 $q =$

圖 19. 雙線法中之白蠟燈。0.017 歐 \times 平方毫米/米，則

$$q = \frac{ql}{R} = \frac{0.017 \times 4000}{0.11} = 620 \text{ 平方毫米}.$$

例 2. 電壓 220 伏。每二燈相串聯——電壓之區分¹⁾。兩發電機先後串聯如第 20 圖所示，其電壓各爲 110 伏。各燈之電壓爲 110 弗。故全數 400 燈分爲 200 串，每串各帶 0.25 安之電流，申言之，總電流強度



$I = 200 \times 0.25 = 50$ 安。功率同前例，仍爲 $N = UI = 220 \times 50 = 11000$ 瓦。損失亦爲 10%，即等於 1100 瓦。是以在本例中

$$R = \frac{1100}{50^2} = 0.44 \text{ 歐},$$

$$q = \frac{0.017 \times 4000}{0.44} = 155 \text{ 平方毫米}.$$

圖 20. 三線法中之白蠟燈。

在兩例中燈數相等。然導線橫斷面積因網壓加倍之故，減小四倍。反之，若導線橫斷面積及相對損失均不變，則加倍之網壓可輸送四倍強之功率。

又在第二例中，爲便於各燈可獨立開關起見，從發電機之連接點

¹⁾電壓之區分；Spannungsteilung；division of voltage；graduation de tension.

接出一中性線¹⁾以連每二燈之連接點。此線普通有如外導線一半大之橫斷面積。雖因此加添一中性線，仍可節省大量之銅。

第二章 電化學

12. 電解之過程。

第一類之導體²⁾，如金屬及炭，電流不能變化之。第二類之導體³⁾，如成液態或溶解態之鹼類，酸類及鹽類遇電流則分解。此分解作用謂之電解⁴⁾。

起電解作用之儀器曰電解電池⁵⁾。浸在液體內用以導入或導出電流之導體，曰電極⁶⁾。導電流於電池內之一極曰陽極⁷⁾或正極，而導電流出電池外之一極曰陰極⁸⁾或負極（圖21）。

液體之成分一部分隨電流而達陰極，而其他一部分則背電流而達陽極。是種游離成分謂之游子⁹⁾。游子在未通電流以前即存在而此可由觀察滲透壓力¹⁰⁾明之。水藉滲透壓力透過半滲透性壁而入溶液。就一般而言，等體積之極稀薄溶液含有等多數之分子，其滲透壓力相等。然第二類導體之溶液則不然。例如在鹽酸中滲透壓力等於吾人意料之二倍，而在硫酸中等於三倍。為解決此困難，阿倫尼烏斯¹¹⁾假定分子分解而為多數最小部分（游子），是種最小部分在關於滲透壓力一方面有與分子相同之作用。例如鹽酸(HCl)之分子分為H及Cl二游子，硫酸(H₂SO₄)之分子分為H₂H及SO₄三游子。

1) 中性線; Nulleiter (Neutralleiter); neutral wire; fil neutre. 2) 第一類之導體; Leiter erster Klasse; conductors of the first class; conducteurs de première classe. 3) 第二類之導體; Leiter zweiter Klasse; conductors of the second class; conducteurs de seconde classe. 4) 電解; Elektrolyse; electrolysis; électrolyse. 5) 電解電池; Zersetzungszelle; decomposition (electrolytic) cell; pile électrolytique. 6) 電極; Elektroden; electrodes; Electrodes. 7) 陽極; Anode; anode. 8) 陰極; Kathode; cathode; cathode. 9) 游子; Ionen; ions; ions. 10) 滲透壓力; osmotischer Druck; osmotic pressure; pression osmotique. 11) 阿倫尼烏斯; Arrhenius.

對於冰點之下降¹⁾及沸點之上昇²⁾，第二類導體亦呈相同之異態。第二類導體含有自由游子之意見因此益可信。游子直接決定傳導性。

荷正電之游子曰陰向游子³⁾。其通電時為陰極所吸引。荷負電之游子曰陽向游子⁴⁾。陽向游子反電流方向游移至陽極而在是處卸去其負電。此情形與惟正電流動之觀念不符，故最好任此二觀念相並存在。

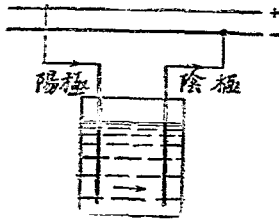


圖21. 電解電池。

屬於陰向游子者，如鉀，鎂，鐵，金等金屬⁵⁾之游子。此類均呈特性金屬光澤且為熱及電之良導體。其與氫及氧之化合物例如氫氧化

鈉(NaOH)，氫氧化鉀(KOH)，氫氧化鈣(Ca(OH)₂)稱曰鹼類。鹼類能染紅色試紙為藍色，有苛性，呈灰汁味並能中和酸類。氫既隨電流而游至陰極，故如金屬有正電性，尤其因能代替金屬之故。

屬於陽向游子者為非金屬⁶⁾之游子。固態非金屬為熱與電之不良導體，其與氫及氧之化合物，例如鹽酸(HCl)，硫酸(H₂SO₄)，硝酸(HNO₃)，磷酸(H₃PO₄)等稱曰酸類。酸類能染藍色試紙為紅色，帶酸味且能溶解金屬並中和鹼類。

氯，溴，碘及氟之與水之化合物皆為正向分子。其他正向分子如SO₄，PO₄，NO₃等之酸根及鹽基⁷⁾之氫氧羣OH。

例。

氫氧化鉀依次列方程式而分解： $2KOH = 2K + 2OH$ 。鉀隨電流游

¹⁾冰點之下降; Gefrierpunkterniderung; freezing point depression; abaissement de point de congélation. ²⁾沸點之上昇; Siedepunkterhöhung; boiling point elevation; élévation de point d'ébullition. ³⁾陰向游子; Kation; cation; cation. ⁴⁾陽向游子; Anion; anion. ⁵⁾金屬; Metall; metal; métal. ⁶⁾非金屬; Nichtmetall; non-metal; non-métal. ⁷⁾鹽基; Base; base; base.

移至陰極並在是處除成氫氧化鉀外復放出氫氣： $2K+2H_2O=2KOH+H_2$ ，反之，反電流方向而游移之氫氧羣OH在陽極放出氧氣： $2OH=H_2O+O$ ，此情形恰如水單獨分解時之情形。然其實不然，因純水為一完全非導體。

鹽酸依次列方程式而分解： $HCl=H+Cl$ ，觀此在陰極上放出氫氣，在陽極上放出氯氣。

硫酸依次列公式而分解： $H_2SO_4=H_2+SO_4$ ，其時在陰極上亦發生氫氣，而酸根 SO_4 則游移至陽極。若陽極由炭或白金所成，則 SO_4 羣依次列方程式而分解： $SO_4+H_2O=H_2SO_4+O$ ，故在此情形中，恰如能水單獨分解。反之，如陽極由銅所成， SO_4 與銅化合而為硫酸銅： $SO_4+Cu=CuSO_4$ 。

氯化鉀依次列方程式而分解： $KCl=K+Cl$ ，鉀隨電流游移至陰極。在是處亦經第二過程而變為氫氧化鉀，至氯則反電流之方向而游移至陽極。如將此二電極由一半滲性層（例如一土瓶）隔離，則最後產物為氫氧化鉀及氯。然若不經隔離，則所成之氯氣對於氫氧化鉀發生作用。在冷溶液中經此第三過程發生次氯化鉀： $2KOH+2Cl=KClO+KCl+H_2O$ 。然在熱溶液中，則發生次鹽酸鉀： $6KOH+6Cl=KClO_3+5KCl+H_2O$ 。

硫酸銅依此列方程式而分解： $CuSO_4=Cu+SO_4$ ，銅隨電流游移至陰極析出； SO_4 則游移至陽極。如陽極由白金或炭所成，則同上在極處放出氧氣。然若由銅所成，則銅依次列公式溶解： $Cu+SO_4=CuSO_4$ 。

以上所舉各例均關於水溶液電解質之分解。至於熔解電解質之分解，其一例如礬土（ Al_2O_3 ）之分解。此物在氟化鋁及氯化鋁（經電流之熱維持而呈溶解狀態）之熔解體中溶解並經電流之作用依次列方程式分解： $Al_2O_3=2Al+O_3$ ，發生之氧與炭陽極化合——鋁之提煉¹⁾。

1) 鋁之提煉：Aluminium Darstellung; preparation of aluminum; préparation d'aluminium.

13. 電解中之重比.

據法拉第¹⁾ 在一電極析出之重量與電流強度及時間故即與電量為固定的比例²⁾。此外又與電解質之成分有關。例如導等強之電流分別通過有白金極並帶硫酸 (H_2SO_4)、鹽酸 (HCl)、硫酸銅 ($CuSO_4$)、氯化銅 ($CuCl_2$) 及次氯化銅 ($CuCl$) 之分解電池 (圖 22)。俟第一電池析出 2 毫克輕氣後將實驗停止，於是得如下表中所示之重量。表中括弧內表原子量³⁾，換言之，表成化合物之元素之最小量 (與氫相比較)。例如氯之原子量為 35.4，因鹽酸 (HCl) 中每一份之氫含有 35.4 份之氯。

1. (H_2SO_4) 2 毫克氫 ($H=1$), 16 毫克氧 ($O=16$).
2. (HCl) 2 毫克氫 ($H=1$), 70.8 毫克氯 ($Cl=35.4$).
3. ($CuSO_4$) 63.2 毫克銅 ($Cu=63.2$), 16 毫克氧 ($O=16$).
4. ($CuCl_2$) 3.2 毫克銅 ($Cu=63.2$), 70.8 毫克氯 ($Cl=35.4$).

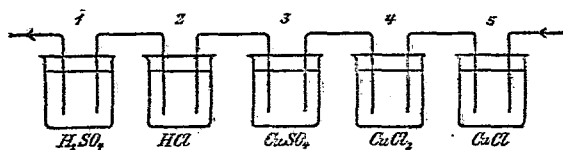


圖 22. 分解電池之中聯接法。

以上均依正規。由第一電池之析出量可推算其後三電池之析出量，因在第二電池內析出之氫量與在第一電池內析出之氫量相等，第三電池內析出之氧量與在第一電池內析出之氧量相等，而在第四電池內析出之銅量與在第三電池內析出之銅量相等。此試驗似表示如電流強度及時間相等，由電池析出之一元素之重量亦必等。

然在次氯化銅 ($CuCl$) 中則遇一種困難。因其中每 63.2 份之銅既含 35.4 份之氯，則或如在第三及第四電池中得 63.2 毫克之銅並因此發

1) 法拉第; Faraday. 2) 電解中之重比; Gewichtsverhältnisse bei der Elektrolyse; weight proportion in the electrolysis; proportion de poids dans l'électrolyse. 3) 原子量; Atomgewicht atomic weight; poids atomique.

生 35.4 毫克之氯或如在第二及第四電池中得 70.8 毫克之氯而此則與 126.4 毫克之銅相當。由實驗得如第二情形所示之結果，即

5. (CuCl) 126.4 毫克銅 (銅 = 63.2), 70.8 毫克氯 (氯 = 35.4)。

準此，則如電流強度及時間相等，從次氯化物溶液析出之銅量比較從氯化物溶液析出者大一倍。

就一般而言，析出之重量不依原子量但依化合當量¹⁾而異。化合當量為原子價²⁾分原子量之商。所謂原子價即為與一元素化合或可由一元素代替之氫原子數。例如氯為一價元素，因其與一氫原子化合而成鹽酸(HCl)。鉀亦為一價元素，因在氯化鉀(KCl)中一鉀原子可代替鹽酸中之一氫原子。他如氧則為二價元素，因一氧原子與二氫原子化合而為水(H₂O)。又在次氯化銅中，一銅原子與一氯原子化合，故銅在是處為一價元素。茲設想一氫原子之重為 1 毫克，故在前列第一電池中共有二氫原子與 SO₄ 羣分離，故有二價解散。又在其餘電池中亦解散二價。法拉第定律至是遂成如次之最簡單的說法：同一電流在相等時間內到處解散等數之價或到處析出化合當量。或據另一說法：由一定量之電流所電解之電解質之量各與其化合當量為比例。

如命 G 表重量，a 表原子量，n 表原子價，I 表電流強度，t 表時間，c 表一常數，則

$$G = c \frac{n}{n} It. \quad (1)$$

由實驗示 $c = 1.0386 \times 10^{-3}$ 克/庫倫。然 I 既表電量而 a/n 表化合當量，故法拉第定律又可有如下之說法：等價之電量輸送等量之電，換言之，有相等容電空間。

凡由一單位電量析出之重量，謂之電化當量³⁾。據方程式 (1) 等於 $0.010386/n$ 毫克/庫倫。故此為輸送 1 庫倫電量之重量。例如銀之

1) 化合當量; Äquivalentgewicht; equivalent weight; poids équivalent.
2) 原子價; Wertigkeit (Valenz); valency; atomicité. 3) 電化當量; elektrochemisches Äquivalentgewicht; electrochemical equivalent; equivalent électrochimique.

電化當量爲 $0.010386 \times 107.6 / 1 = 1.118$ 毫克/庫倫。又銅在氯化物及硫酸鹽溶液中之電化當量爲 $0.010386 \times 63.2 / 2 = 0.328$ 毫克/庫倫。

藉氣體之比重表明所析出之爆鳴氣¹⁾之體積如下：1 安培之電在 1 秒間供給 0.174 立米厘之在 0° 溫度及 760 毫米壓力下之爆鳴氣。

在水之分解中， H_2O 發生一份之氧原子及二份之氫原子。然一氫分子含有二氫原子而一氧分子含有二氧原子，故氫分子仍較氧分子多一倍。據亞佛加德羅定則²⁾，析出之輕氣比較重氣多占一倍之空間——容積比³⁾。

14. 極 化⁴⁾。

置稀薄硫酸於電解電池之鉑極間分解，則在電池上可測出 2 至 3 伏特之電壓。若連接較小之電壓，水不分解，若如第 23 圖連接 10 伏或 20 伏之電壓並插入一電阻，則可自動發生 2 至 3 伏之端電壓。在第 23 圖中 E_s 表由發電機之電壓， I 電流強度， R 前置電阻，發電機及饋線之總電阻。電解電池之電壓故爲 $U = E_s - IR$ 。

電壓雖然自外面接入，使電流通過電池，然電池電壓之大小視電

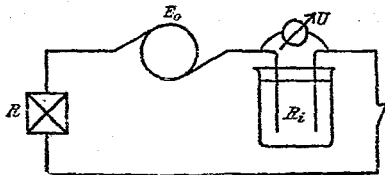


圖 23. 發電機，分解電池及電阻互相串聯。

池之性質由電池自動決定，故不能任意變更之。

例如由變更發電機電壓或前置電阻使電流顯然變動時，其電壓仍不變。又若變更二電極之

距離或即變動液體之電阻，電池電壓仍無甚變動。由此觀之，電池電壓並非由電流強度及內電阻 R_i 決定，故與金屬線上之電壓不同。其值其實遠較由歐姆定律決定之壓耗爲大。

1) 爆鳴氣; Knallgas; detonating gas; gaz explosif. 2) 亞佛加德羅定則; Avogadro'sche Regel; Avogadro's rule; règle d'Avogadro. 3) 容積比; Volumenverhältnisse; volume proportion; proportion en volume. 4) 極化; Polarisation; polarization; polarisation.

爲明此事實，可觀察當將電池之主電流開斷時有電流通過與電池並聯之電壓指示器。電解電池此時有如一電源之作用，而能依反對方向供給電流。此種電流曰極化電流，其有效電壓曰極化電壓。此電壓因電極上被有細氣泡發生，故此種產生電流之電池係由輕氣，硫酸及養氣組成。其電壓反對原來之電流。

此電壓自有電流以來即有效。路端電壓 U 是以除供給小歐姆壓耗外，復須抵消由極化而起之反電壓 E 。故 $U = E + IR_i$ 。

極化電壓故爲由電極之變化而起之電壓。當其與歐姆壓耗相較遠大時，電池之路端電壓幾乎全由此而非由電流強度或電池之內電阻決定。

據能量律，極化電壓之存在可依下法說明之。如以 $I t$ 乘上列方程式，則得 $U I t = E I t + I^2 R_i t$ ，其中 $U I t$ 表加入於電池內之功而 $I^2 R_i t$ 表電熱之消耗。 $E I t$ 故可斷定爲分解水而消耗者。當時產出之爆鳴氣具有能量，燃之發熱或作功，後者等於爲分解而消耗之功。

分解時儲蓄於產物內之化學能¹⁾及產物之量既與電量爲比例，由此可知同種電解電池恆有等大之極化電壓。但不同種之電池其電壓亦不同。例如用鉑極從硫酸銅析出銅及氧，故其極化與水分解而爲氫及氧之極化不同。因此之故，在二情形中最後產物重行化合時之燃燒熱量亦不等。

今欲豫計極化如下。據方程式(1)，析去之重量爲 $G = c I t a / n$ 。分解時所須之功

$$A = E I t = \frac{E G}{c a / n}$$

$$\text{或} \quad \frac{c A a / n}{G}$$

今 $A : G$ 等於析出一單位重量所須之功，故 $A a / n : G$ 等於爲分解化合當量而輸入之功或爲產物重行化合時成熱輸出之功。如功以焦耳計，重以克計， c 以克/倫庫計，則電壓 E 應以伏特計。

¹⁾ 化學能；chemische Energie; chemical energy; énergie chimique.

在生成一克當量之水時，例如發散 34000 克卡之熱，據第17面第 10 方程式此熱量與 $34000 \div 0.84 = 141700$ 焦耳之功相當。準此則

$$E = 1.0386 \times 10^{-6} \times 141700 = 1.47 \text{ 伏特。}$$

一丹蕭爾電池之電壓止略大於 1 伏特，故不足分解水。其實有極化電壓增在 1.47 伏特之上。

如用一純銅板為陽極以分解銅鹽溶液，則陽極銅溶解而在陰極上有銅沉澱。二電極是以無時不具相同化學性，因而與溶液決不能組成一電源。極化故不可能。在陰極上析出銅質所耗之功恰等於陽極上銅由溶解而給出之功，故此分解作用並不耗費功。電池路端電壓正等於歐姆壓耗。

15. 蓄 電 池 .

蓄電池¹⁾含鉛板，在鉛板間稀薄硫酸分解。陽極板為鉛柵，圖 24，其表面因過氯酸鹽之作用變為過氧化鉛。陰極板亦係鉛柵，但其中又帶填滿氧化鉛之網目。陰極板經 40 小時

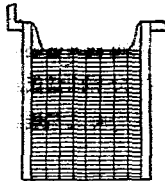


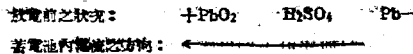
圖24. 蓄電池板。

之充電後為金屬鉛。各板經其鼻形突出物懸在一玻璃器之上口。各蓄電池之同名板用鉛條銲接如圖 25。

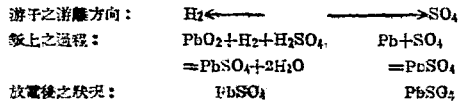


圖25. 板之聯合。

蓄電池產生之電壓約 2 伏特。此電壓不但放電時即充電時亦存在。充電時其作用與電流或與路端電壓反對。當時電流從一極流入而當放電時從同極流出。此極在兩種情形中均為陽極。蓋陽極為發電（放電）時電流離蓄電池之一極或當耗電（充電）時電流入蓄電池之一極。哥爾羅希指出放電時發生之過程如下：

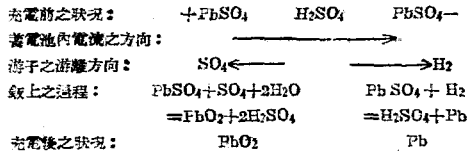


¹⁾蓄電池 (Dynamler (Akkumulator); accumulator; accumulateur.



故當放電時二板均變為硫酸鉛：在陽板一方面，原來之過氧化鉛經還原而為（硫酸）氧化鉛，在陰板一方面原來之鉛經氧化亦變為（硫酸）氧化鉛。陽板之過氧化鉛故逐漸將其過剩之氧給與陰極鉛。鉛之氧化故為電源之成因，恰如石炭在爐內之氧化為熱源之成因。終至陽板盡給其過剩之氧而陰板被氧化之後，蓄電池內儲蓄之能全放出。此過程謂之放電，此時兩板之化學性全相同，故不復為一電源。

今使放電後之蓄電池重行充電：



在板上復生成過氧化鉛及鉛，而電解電池復變為一電源。

在此過程中，除發生氧化作用及還原作用外，酸之密度亦起變化。當放電之際，其比重略減而當充電之際略增。

準此以觀，充電作用殆為有效質量之變化作用而並非為電之儲蓄作用。蓄電池之電容量概指放電時移動之總電量。是處無所謂儲蓄。

電容量既由有效質量之重量決定，故在理論上蓄電池或經強電流在短時間內或經弱電流在長時間內放電均無關係。又前次充電時作用之電流強度亦無關，其實以強流放電時之電容量較以弱流放電時之電容量為小，因在第一情形中，有效質量僅在表面變動故也。

至關於電量之效率¹⁾係等於放電及充電之兩電流強度各與時間之乘積二者之比。此比大都 > 0.9 之上。依原理其值當為1，蓋充電及放

¹⁾效率； Wirkungsgrad; efficiency; rendement.

電無非為有效質量之生成作用及復原作用，而動電量與經變化之有效質量為比例。然若充電與放電時間相隔頗久，則蓄電池自動放電。此與絕緣不良之關係尚淺，其與因酸不淨，充電不充分或酸之密度不均勻在同一級上電流之自放電之關係則頗深。至減小效率之另一種原因為充電時電量之一部分供發散氣體之用，故為一種無益的消耗。當充電將終，而有效質量之最大部分變化之後，氫及氧不能再侵蝕蓄電池板，申言之，此時開始發散氣體，故尋常在氣體強烈發散以前即須停止充電，蓋非如是難冀有高的效率。

至於功之效率則更為重要。為確定此效率，應注意當用規定之電流充電及放電時之路端電壓。路端電壓當充電之初約為 2.1 伏特而俟充電將終時因在電極上附着氣泡之故增加(圖26a)。俟其達 2.6 伏特之後，遂停止充電。當放電時，路端電壓當初約 1.9 伏特，而後將終時降至 1.8 伏特(圖26b)。若再任其繼續放電，則板難免受損而電壓下降頗速。

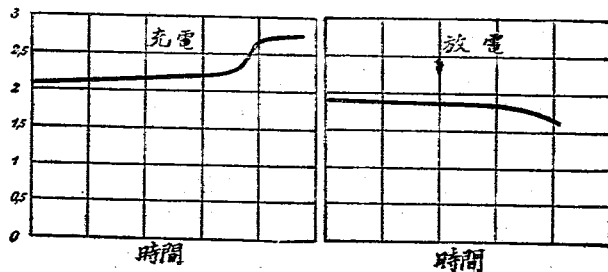


圖26a. 充電時之電壓——充電曲線¹⁾。 圖26b. 放電時之電壓——放電曲線²⁾。

路端電壓在放電時比較充電時為小，其故殆因內部之電壓損失。如命 E 表由蓄電池發生之電壓， R_i 表內電阻，則路端電壓當充電之際為 $U = E + IR_i$ ，當放電之際為 $U = E - IR_i$ 。且放電時蓄電池之產電壓比

¹⁾ 充電曲線；Lade-Kurve；charging curve；courbe de chargement.

²⁾ 放電曲線；Entladekurve；discharging curve；courbe de déchargement.

較充電時之產電壓減少充電時因氣體發散而增長之值。關於電功之效率是以至多在 0.8 至 0.9 左右。

16. 電池中之過程。

最簡單之電池¹⁾含有浸在稀薄硫酸中之銅及鋅。鋅上敷銻成爲汞膏，故當電池不起作用時，硫酸不能溶解之。用一靜電計檢驗開路電池，察見銅帶正電，鋅帶負電。接鐵線經導線連接後，電流在池外從銅向鋅流動，在池內則自鋅向銅流動。硫酸因此分解，氫隨電流而移至銅處，釀成氣泡，此時遂生成由氫，硫酸及鋅組成之新電池，其電壓與原來電壓相反對。因此之故，原來電壓逐漸下降，申言之，電池開始極化。此種極化必須阻止，即令氫於發生之後立即使成化合物或代替一金屬，致有金屬析出。

爲達此目的，凡丹遜兩電池²⁾均含銅盤及稀薄硫酸。此二者經一半滲透性隔壁隔離。浸在銅盤中之一銅板成爲陽極而浸在硫酸中之一鋅板成爲陰極： $+C_u \text{---} C_u SO_4 \parallel H_2SO_4 \text{---} Zn \text{---}$

由電池產出之電流在池內從鋅向銅流動。從硫酸分出之氫透過隔壁而達銅板致有銅析出 $H_2 + C_u SO_4 = C_u + H_2SO_4$ 。鋅與反電流之方向而游移之 SO_4 化合而成硫酸鋅 ($Zn SO_4$) 溶解： $Zn + SO_4 = Zn SO_4$ 。此氧化過程產生外電路內之功，電池內之電熱及爲析出銅分所消耗之功。電功故等於鋅溶解時所得之功與銅析出時所消耗之功之差。電極既不變化，自無極化可言。電壓恆爲 1.07 伏特。

本生電池³⁾含有浸在稀硝酸中之炭及浸在稀薄硫酸中之鋅。此二液經一半滲透性壁隔離： $+C \text{---} HNO_3 \parallel H_2SO_4 \text{---} Zn \text{---}$ 。炭表陽極而鋅表陰極。鋅經 SO_4 溶解成爲硫酸鋅。至隨電流而游移之氫則在炭極與硝酸之氧化合： $3H_2 + 2HNO_3 = 2NO + 4H_2O$ 。一氧化氮 (NO) 在空

¹⁾ 電池; Zelle; cell; élément. ²⁾ 丹遜兩電池; Daniell-Zelle (Element); Darcil cell; élément de Daniell. ³⁾ 本生電池; Bunsen-Zelle; Bunsen cell; élément de Bunsen.

氣中氧化而成褐色二氧化氮 (NO₂)。電壓為自1.8至1.9伏特。其內電阻不大。

重鉻酸電池¹⁾ 含炭及鋅於一由稀薄硫酸及重鉻酸鉀 (K₂Cr₂O₇, CrO₃) 所成之溶液內：



電池內並無隔壁。炭表陽極。SO₄ 溶解鋅極而在炭極之氫與由重鉻酸鉀分出之氧化合。至含在重鉻酸鉀中之鉻酸 (CrO₃) 經氫還原而為氧化鉻： $2Cr_2O_3 + 3H_2 = Cr_2O_3 + 3H_2O$ 。其時鉻酸之紅色變呈硫酸鉻之綠色。同時原為 2 伏特之電壓略減。

勒克蘭社電池²⁾ 在氯化銨溶液內含鋅及炭。 $+C - NH_4Cl - Zn -$ 。氯游移至鋅極，使鋅溶解，變為氯化鋅。恰如在氧化過程中，在此過程中亦供給功。有金屬性之 NH₄ 羣游移至炭極，而在是處依次列方程式分解而為氫及氮： $NH_4 = NH_3 + H$ 。氮與在炭周圍之二氧化錳 (MnO₂) 粉化合，否則電池為之極化。二氧化錳遇氫則變為三氧化二錳 (Mn₂O₃) 並供給氧分，後者與氫化合： $2MnO_2 + H_2 = Mn_2O_3 + H_2O$ 。然電流被阻時，氧與氮之化合不夠速，因此平時不通電時約計 1.4 伏特之產電壓當有較強電流導出時減小。

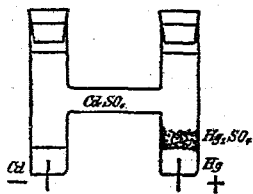


圖27. 衛斯吞電池。

衛斯吞電池³⁾ 為一錳電池⁴⁾ (圖27)。其中有一呈H形之玻璃器，器內鑲入二白金線。陽電極為水銀 (Hg)，陰極為鎘汞膏，其中含有12至13%之鎘 (Cd)。所用之溶液為一飽和硫酸鎘溶液 (CaSO₄)，其飽和狀態由加入硫酸鎘結晶維持之。通電時鎘隨電流游離。為防其與陽電極化合而成合金，致第二極漸呈相似之趨勢，在水銀

¹⁾ 重鉻酸電池；Chromzelle；chromic acid cell；bichromate cell；élément au bichromate de potasse。 ²⁾ 勒克蘭社電池；Leclanché-Zelle；Leclanché cell；élément de Leclanché。 ³⁾ 衛斯吞電池；Weston Zelle；Weston cell；élément de Weston。 ⁴⁾ 錳電池；Kadmiumzelle；cadmium cell；élément de cadmium。

上帶有硫酸氧化鎳(Hg_2SO_4)、硫酸鎳結晶及金屬鎳之混合物。鎳之游子於是與硫酸氧化鎳化水銀及硫酸鎳： $Cd + Hg_2SO_4 = CdSO_4 + 2Hg$ 。陽極既照原仍為水銀，是以不發生極化。在陰極鎳經 SO_4 羣溶解。如導出之電流不強，電壓恆為1.0183伏特。

17. 電量計¹⁾

為精密確定電流之強度，概用一銀電量計。陰極為一白金坩堝，其中含有20至40重份之純硝酸銀($AgNO_3$)與100重份之水所成之溶液。陽極為一純銀條。俟每100立厘米之溶液析出3克之銀及在每平方厘米之陰極上析出0.1克重之銀後，溶液不能再用。電流密度在陽極上每平方厘米不得超過1/5安培，在陰極上不得超過1/50安培。在試驗之前秤得坩堝之重。試驗完終後，用不含氯之蒸餾水淨洗，至洗下之水加鹽酸之後不再混濁為止。以後浸在有70°至90°溫度之蒸餾水中至10分鐘之久並淨洗之，至洗下之水加鹽酸之後不混濁為止。終將坩堝用溫熱焙燥並置在乾燥瓶之內任其冷卻，再於10分鐘之後秤之。

坩堝內壁與手指之接觸須絕對禁止，否則沉澱之銀不能固着在壁上。為除去有機污物，在試驗之前，將坩堝燒至赤熱。然其時坩堝內不許帶有銀痕，否則生成一種容易溶融之鎳銀合金。且當時祇許用無光火焰之尖端，俾免發生碳鎳化合物。

如命 G_1 及 G_2 表試驗前後之重， t 表時間， c 表電化當量，則電流強度

$$I = (G_2 - G_1) : ct.$$

又如重量以毫克計，時間以秒計，並以 $\alpha = 1.118$ 毫克/庫倫，則測得之電流強度當以安培數計。

第三章 電 磁²⁾

18. 磁 感 應

¹⁾電量計; Voltmeter; voltameter; voltamètre; ²⁾電磁; Elektromagnetismus; ^{e)}Electromagnetism; electromagnetisme.

據法拉第在呈磁效應之永久磁鐵或電磁鐵之周圍之空間，謂之磁場¹⁾。其效應或為對於磁極或通電導體之力效應，或為感應效應。因感應效應，當將一線環或一導體於磁場內轉動或移動時，在線環內即生電壓。

自法拉第以來，不再假定有超距作用。是種效應之原因必在察見效應之處。至由何種效應證明磁場之存在，則不成問題。茲處擬由感應效應說起。例如將一線匝在磁場內旋轉 180° 度，由當時發生之電流衝動即證明該種效應之存在。為簡單起見，假定磁場全均勻，或假定線匝之面積極小，是以在線匝附近可視為有均勻磁場。如其他狀況不變，電流衝動隨線匝之面積而增加，且當匝占某初位置時，電流衝動最強。茲用帶一單位面積之線匝使其占某一定位置，俾旋轉 180° 後可有最強電流衝動。是種磁場之強度可經此衝動由帶某一定電阻之計器測得之，稱曰磁感應強度²⁾。

為測定磁感應強度既須將線匝置在某一定初位置，是以此種感應強度恰如一力作用，其在空間有一定之方向。在本實驗中其方向與在初位置之匝面正交。如欲合成在磁場中一點由各種發生之感應強度，則亦必依幾何方法為之，恰如合成若干機械力然。

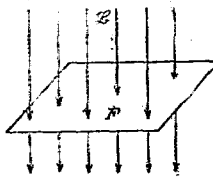


圖28. 依正交方向穿過一平面之磁感線。

為依直觀法表示磁感應強度，法拉第假定磁場內充滿磁力線³⁾或感應線，且讓後者從北極發出(圖28)。此種感應線不過示感應之方向。然以不同密度表示時，則

可用以約示感應之強度。磁感應強度之意義，故與力線之密度或磁密度⁴⁾相同。

¹⁾磁場; magnetischer Feld; magnetic field; champ magnétique. ²⁾磁感應強度; magnetische Induktion; magnetic induction; induction magnétique. ³⁾磁力線; magnetische Feldlinie; magnetic field line; ligne du champ magnétique. ⁴⁾磁密度; magnetische Dichte; magnetic density; densité magnétique.

爲表示感應線或磁力線，自上撒布鐵粉於一底盤上，鐵粉由落下而感應，於是互相吸引致排列而成一定之曲線。第29圖示一通電線圈之力線，而第30圖示二異名極之力線。

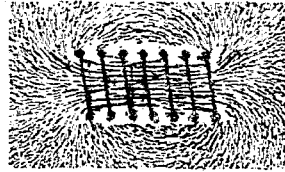


圖29. 一通電線圈之力線。

曲線指示在各點之方向並同時示感應強度。感應在極處最強，故鐵粉亦在極之附近最密。

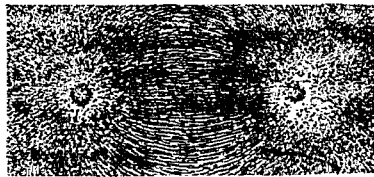


圖30. 在二異名極之磁場內之鐵粉。

19. 感應通量.

經感應線通過之面積與感應強度之與此面正交之分強度之乘積謂之通過該面之感應通量¹⁾，而係以 Φ 表示之。磁密度 \mathcal{H} 爲通過一單位面積之感應通量或磁通量²⁾。如感應線與面 F 正交(見第28圖)，則

$$\Phi = \mathcal{H}F \quad (1) \quad \mathcal{H} = \frac{\Phi}{F}$$

通量 Φ 之單位爲在1秒間引起1伏特感應之通量，此單位謂之1伏秒³⁾。其 10^8 之一往往稱曰1馬克士威⁴⁾或1力線。感應強度 \mathcal{H} 之單位故爲1伏秒/平方厘米。而 10^{-8} 伏秒/平方厘米謂之1高斯⁵⁾或1力線/平方厘米。

舉例言之，如在一發電機中北極上向電樞之面積爲 $F=500$ 平方厘米而與該面正交之均勻感應強度 $\mathcal{H}=10000$ 高斯 $=10000 \times 10^{-8}$ 伏秒/平方厘米，則入電樞之通量。

¹⁾ 感應通量; Induktionsfluss; induction flux; flux d'induction. ²⁾ 磁通量; magnetischer Fluss; magnetic flux; flux magnétique. ³⁾ 伏秒; Voltsekunde; volt second; volt-second. ⁴⁾ 馬克士威; Maxwell; maxwell; maxwell. ⁵⁾ 高斯; Gauss; gauss; gauss;

$$\Phi = \mathcal{H}F = 10000 \times 10^{-8} \times 500 = 5 \times 10^{-2} \text{伏秒} = 5 \times 10^8 \text{力線}.$$

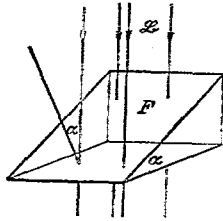


圖31. 通過F面之通量。

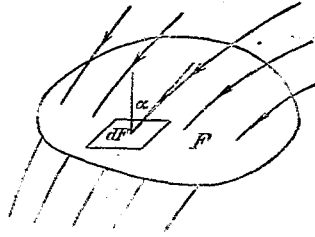


圖32. 通過F面之通量。



圖33. 感應管。

如均勻感應強度 \mathcal{H} 與在F平面上之法線成 α 角，則感應強度之與該面正交之成分為 $\mathcal{H}\cos\alpha$ (圖31)。準此，通過該面之通量

$$\Phi = \int \mathcal{H}F\cos\alpha. \quad (2)$$

如磁場不均勻或面彎曲而 α 表磁感應強度與在 dF 微分面上法線之角度，則

$$\Phi = \int \mathcal{H}dF\cos\alpha.$$

通量無向，故與感應強度不同。通過一面積之多數通量不同感應線對於該面之方向如何，必須依代數法加積。

今將磁場分為有任意橫斷面積之若干管，其壁到處與感應強度之方向一致(圖33)。是種方向管曰感應管¹⁾。通常假定無感應線通過管壁，即認通過管壁之磁通量為零。同管各橫斷面均有同一感應通量而在管中如依次通過不同物質，例如空氣及鐵，此情形仍不變。

通過一管之各橫斷面積之通量既相同，故可想像管內有一種連續不絕之通量，後者充滿全管，依次通過一管之各部分。感應線自北極發出，通過全磁場而入南極。此後假定在磁鐵內部，通量自南極同至北極，故磁力線均為閉曲線。

¹⁾ 感應管; Induktionsrohr; induction tube; tuyau à induction.

與 $\int \mathbf{H} \cdot d\mathbf{r}$ 相反，通過空間之由磁力線組成之磁流並非為物理量，但僅為一種假設觀念。其與水流不同，並非為一種運動現象，但呈一種靜態，其維持並不耗費功。又磁流通過不同物質時，其強度不變，而此可由實驗證明之。

20. 感應定律¹⁾。

在第34圖中由圓矢線指出一線匝之迴轉方向。在匝面上置拔栓器之尖端並依迴轉方向轉動拔栓器之上柄。其時螺旋轉動之方向謂之正匝軸。依第34圖，此方向為自右向左而無論拔栓器在圈面之右側或左側均然，在迴轉方向與匝軸方向之間故有一定之關係。電壓及電流之依迴轉方向者，又感應通量之依匝軸之方向者均為正。依第40面，拔栓器定則實與正電流惹起正通量之定則相脗合。

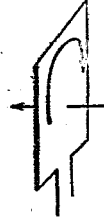


圖34. 旋轉方向及匝軸。

如已在第34面提及，照法拉第之說法云：如線匝包圍之感應通量發生變動，則在匝內立刻惹起一種感應電勢或感應電壓²⁾至變動停止時為止。其方向亦一定，因其發生之電流反對通量之變動。故通量增加時產生一種負電壓。

設在 w 匝內之通量 Φ 在 dt 時間內變動 $d\Phi$ 。依據符號定則，電壓之瞬時值當為

$$e = -w \frac{d\Phi}{dt}. \quad (3)$$

如 Φ 以伏秒計， t 以秒數計，則產生之電壓或產電壓 e 當以伏特數計。應注意者， e 僅為第3方程式右邊之簡號。感應定律之意義在次式中錄出：

$$\sum iR = -w \frac{d\Phi}{dt}. \quad (4)$$

在一通路內歐姆壓耗之總和等於每單位時間內磁通量之遞減率。

¹⁾ 感應定律; Induktionsgesetz; law of induction; loi de l'induction. ²⁾ 感應電壓; induzierte Spannung; induced voltage; tension induite.

該方程式之兩邊茲可分別測出，二者之結果相等。

通量之變動可由靜止線內通量依時變動而致，恰如在變壓器中，然如一匝或一圈在磁場內變動其位置，如在電機中，則亦能使通量變動。第35至第37圖示在紙面後一南極之前移動一環之情形。故通量自前向後貫穿匝面。與第40面關於電流之磁效應之定則相當，在是處可說明之如次：依通量貫穿匝面之方向——故在是處依自前向後之方向——以視匝面，當通量增加時，產出之電壓（或曰感電壓）係依逆時針之方向。例如在第35圖中即示此情形。

在第36圖中包含之通量已達其最大值，其時通量不變動，故環內電壓為零。

終則因通量遞減（第37圖），亦惹起一電壓，但此時其作用方向與時針之旋轉方向一致。故電壓之方向正正第36圖所示之瞬間變更。

環通常帶有與磁力線正交之兩直線，其運動時橫切力線。茲命第

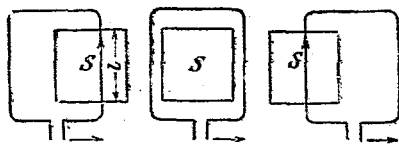


圖35.

圖36.

圖37.

磁場內一環之運動。

35圖中在極前一部分之線之長為 l ，速度為 v 。假定沿 l 長之感應強度到處全同，而運動方向與導線方向及感應線方向相正交。如導線在 dt 時

間內移動 ds 之路程，則為其所描出之面積等於 $l ds$ ，而經增加之通量等於 $d\Phi = \mathcal{H} l ds$ 。如不注意方向，則電壓

$$e = d\Phi/dt = \mathcal{H} l ds/dt = \mathcal{H} l v. \quad (5)$$

如然以伏秒/平方厘米計， l 以厘米計而 v 以厘米/秒計，則電壓 e 當以伏特計。

包含之通量之變動既等於被導線橫切之力線數，故依照法拉第亦可假定電壓因導線橫切力線而發生。如1厘米長之導線以每秒1厘米之速度依正交方向切每平方厘米1伏秒感應強度之磁場，則產生之電壓等於1伏特。

又假定在一多極電機中依正交方向切磁場之動線之長等於30厘米，在極前串聯之導線數共為400，速度每秒等於2000厘米，而感應強度等於7000高斯= 7000×10^{-8} 伏秒/平方厘米，則據第5方程式所產生之電壓為

$$e = 7000 \times 10^{-8} \times 30 \times 400 \times 2000 = 16800 \text{ 伏。}$$

如導線之方向不與磁場方向正交，或運動方向不與導線及磁場正交，則須以 l 或 v 之正交成分以代 l 或 v 。

產電壓之方向固可依前述之方法表明，但亦可依法拉第游泳定則¹⁾而確定之：設依磁力線之正向游泳並依導體運動方向注視導體，則產電壓之方向係向右方——產電壓之方向²⁾。例如在第35至第37圖中，人自前向後游泳，面向右方，則電壓之方向係依伸出之右手，故即自下向上。

在第38圖中，導線固定而極則向右運動，故導線對於極之相對運動為自右向左。據游泳定則，當時產生電壓，其方向為自上向下。在是處電壓之方向亦可視所包含之通量增加或減而決定。

通量之變動天然僅就一通路之通量而言。由一電壓指示器連接一虛轉電機之接線螺旋而成之路在是處不得視為通路。又若用一靜電計器因電壓通過絕緣質（參見第32章）之故，亦不得視為通路。是以在後者二情形中實無所謂通量變動。

至通路不必一定由導體所成，但亦可一部分或全部分由非導體所成。在無論由導體或非導體所成之通路內，感電壓等於所包含之磁通量之變動速率，故等於 $\int E \, dl \cos \alpha$ ，其中 E 表每單位長之電壓，即電場強度， α 表電場強度與 dl 微分路間之角，而積分係就一通路而設，後者偶然可通過一體。感應定律之一般方程式故為

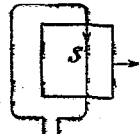


圖38：橫切導線之磁場。

1) 法拉第游泳定則；Faradaysche Schwimmerregel；Faraday's rule；règle flécteur de Faraday. 2) 產電壓之方向；Richtung der erzeugten Spannung；direction of produced voltage；direction de la tension induite.

$$\int E \cdot l \cos \alpha = -w \frac{d\Phi}{dt}. \quad (6)$$

今計算由一線圈所供給之電功。如命 i 表電流之時值，則在 dt 時間內由線圈供給之電功依方程式 (3) 爲

$$dA = e i dt = -i w d\Phi. \quad (7)$$

如 i 以安培數計， Φ 以伏秒數計，則功當以焦耳數計。

如 i 及 $d\Phi$ 之符號相同，功爲負，申言之，電功係從外方導入於線圈內。例如當關閉一電路使其通電時即發生此情形。

21. 電流之磁效應。

設想一極長之通電導線。電路之其他部分相距遙遠，其影響可略去不計。周圍之介質假定均一，例如空氣是。今撒布鐵粉於一經導線鉛直通過之紙板上(圖30)。由鐵粉之排列表示磁力線或以導線爲中心

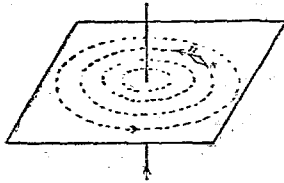


圖30. 一通電導線之磁場。

之圓而其面則與導線相正交。如置一磁針於此面上，則磁針依磁力線之方向而位置。一枚與南極相距遠並可自由運動之北極依磁力線之方向環繞導線。此方向與含導線及北極之鉛直面正交而可由安培游泳

定則¹⁾確定：設想依電流方向游泳並注視磁針，則見北極向左偏向。

在一通電之線環²⁾中(圖31)，依據安培定則，感應線由一側穿過環面而達他側，再在外面首尾相接。一平坦環是以爲一磁圓盤，其北極係在感應線離圓盤之側。對環面而視，如電流依時針方向流動，則在人前者爲一南極，否則爲一北極。一極便當之定則爲拔栓器定則：將拔栓器之尖端置在環面上並依電流之方向轉動該器之柄。此時螺旋旋進之方向表感應線之方向。又若以右手握住通電之線環並使拇指向電流方向。此時其他指指示感應線之方向。

¹⁾安培游泳定則；Amperesche Regel; Ampere's swimming rule; règle floteur d'Ampère. ²⁾線環；Schleife; loop; agrafe.



圖40. 環。

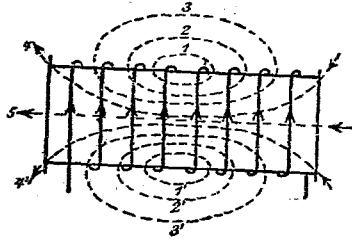


圖41. 一線圈之磁線。

設依第41圖將若干線匝連接而成一線圈¹⁾或螺管，則恰如第40圖所示，磁力線穿過環面。但此時各線連接而為長線，其中一部分穿過全線圈，在管內者其方向概與管軸一致，在管外者連接而成閉線。

恰如在磁鐵中，磁力線一部分由圈之兩端而一部分由側面發出。在磁鐵中磁線一部分從南極進入，通過磁鐵內部，終則在北極離開磁鐵。此情形與螺管磁力線分佈之情形尤相類似。

在計器中利用電流圈之磁效應以測電流及電壓。計器中之電流圈能變動鐵質部分之方向或吸引之。

22. 導磁性²⁾

第42圖示一帶 w 匝數之環，環內通過電流 I 。環之內部或為真空或含有空氣或鐵。環內磁場由一虛線表明。如環之橫斷面積與環徑相較不大，則在環內可視為帶均勻感應強度。

今於線匝上置一輔助圈並將匝內之電路開斷，於是測得電流之衝動。由此乃決定通量 Φ 及感應強度 H 。

²⁾ 據經驗知感應強度隨 Iw 之乘積而增加。

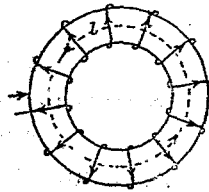


圖42. 環形電流線圈。

¹⁾ 線圈; Spule; coil; bobine. ²⁾ 導磁性 (或導磁係數); magnetische Leitfähigkeit; magnetic conductivity; conductivité magnétique.

並隨力線徑路之長 l 而減。如名 I_w 表激發強度¹⁾，則感應強度隨每單位長之激發強度而增加。此單位長之激發強度謂之磁場強度²⁾，而係以 h 表之。故磁場強度

$$h = \frac{I_w}{l}$$

磁場強度係以安/厘米計算。此非每長單位之激發強度，但實為每長單位之磁壓，申言之，即等於每長單位之力線徑路所耗費之激發強度。

感應強度既又與物質有關，故

$$\mathcal{H} = \mu h = \mu \frac{I_w}{l} \quad (8)$$

其中 μ 表物質之導磁係數。如 \mathcal{H} 以伏秒/平方厘米計，而 h 以安/厘米計，則 μ 當以伏秒/平方厘米：安/厘米 = 歐秒/平方厘米。1 歐秒謂之 1 亨利，略稱 1 亨，故 μ 當以每厘米若干亨計。

由實驗得真空及空氣之導磁係數

$$\mu_0 = 4\pi 10^{-9} \text{ 亨/厘米}$$

其中之 10^{-9} 及 4π 二因數根據電流強度及電壓之任意選定之單位之關係。

若感應強度不以伏秒/平方厘米但以高斯計算，則得空氣內之感應強度

$$\mathcal{H} = \mu \frac{I_w}{l} 10^9 \quad (8a)$$

今欲使 $\Phi = 4 \times 10^{-2}$ 伏秒 = 4×10^8 力線通過長 $l = 0.7$ 厘米及橫斷面積 $F = 400$ 平方厘米之空間。是以力線密度 $\mathcal{H} = 4 \times 10^8 / 400 = 10000$ 高斯而依方程式 (8a) 每單位長所須之激發強度

$$h_g = \frac{I_w}{l} \frac{\mathcal{H}}{\mu_0 \cdot 10^9} = \frac{10000}{0.4\pi} = 8000 \text{ 安區/厘米}$$

¹⁾ 激發強度; *Erregung; excitation; excitation.* ²⁾ 磁場強度; *magnetische Feldstärke; magnetic field intensity; intensité du champ magnétique.*

0.7 厘立長之激發強度故為

$$(Iw)l = 8000 \times 0.7 = 5600 \text{ 安匝} \cdot$$

若在第42圖所示之圈內不為空氣但有鐵體，則由實驗知其導磁係數比較內部為空氣時大 μ 倍。 μ 為對空氣而言之導磁率¹⁾，其與導磁係數之差僅因其為一純數，其值可大至300%或以上，其與導磁係數一般之關係如下： $\Pi = \mu \Pi_0$ 。就空氣而言， $\mu = 1$ 。

由經驗知如用第43圖之配置亦可供驗鐵之用。為此將長 l 之鐵棒置在一鐵軛之間，後者之磁導極強，故其磁阻幾等於零。鐵棒之感應強度故亦為 $\mathcal{H} = \Pi I \times w / l$ ，其中 l 並非表力線全部徑路之長但僅表鐵棒之長。

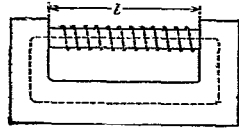


圖43. 均勻磁化。

因鐵具有較強導磁性，其在一均勻磁場²⁾內時吸入幾乎全數之感應線(圖44)。感應線入鐵之一側曰南極，其離鐵之一側曰北極。感應線密度亦以在極處比較在原來磁場中為大，而在鐵之中段則較小。感應線且依與鐵面幾乎正交之方向進入鐵體。就一般而言，其入另一介質時，折射角 α_1 與 α_2 之正切之比視二介質之導磁率之比而定(圖45)。

吾人可由方程式(8)導出對於磁適用之歐姆定律。第42圖表示一感應管，其全部之長 l 具有等大之橫斷面積及導磁係數。充滿全管之通量故為

$$\Phi = \mathcal{H} F = \frac{\Pi F}{l} I w.$$

其中 $\Pi F / l$ 可與一電導相比擬，亦係與橫斷面積為正比與長為反比。此係數曰管之磁導³⁾而以 Λ 表示之，即

¹⁾導磁率; magn. tische (Permeabilität) Durchlässigkeit; magnetic permeability; perméabilité; magnétique. ²⁾磁場內之鐵; Eisen im magnetischen Feld; iron in magnetic field; fer dans le champ magnétique. ³⁾正切定律; Tangentengesetz; tangent law; loi des tangentes. ⁴⁾磁導; magnetischer Leitwert; magnetic conductance; conductance magnétique.

$$\Lambda = \frac{\pi F}{l} \quad (9)$$

如 π 以亨/厘米計， F 以平方厘米計，而 l 以厘米計，則 Λ 當以亨計。

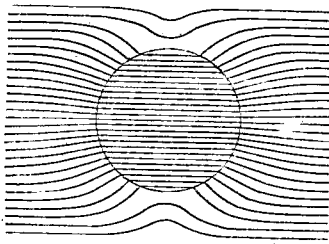


圖44. 在均勻磁場中之磁球。

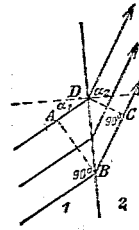


圖45. 磁 球。

今比較通量及電流得對於磁適用之歐姆定律，而可由下列方程式表示之

$$\Phi = I_w \Lambda \quad (10)$$

其中磁場強度或激發強度 I_w 有如磁壓¹⁾之作用，後者使磁通量通過具有磁導 Λ 之管。磁場強度因此變為每單位長之磁壓。

在上述關於電機空腔之一例中 $\Phi = 4 \times 10^{-9}$ 伏秒及

$$\Lambda = \frac{\pi F}{l} = \frac{4\pi 10^{-9} 400}{0.7} = 7.14 \times 10^{-6} \text{ 亨。}$$

準此其所須之激發強度

$$(I_w)l = \Phi / \Lambda = 4 \times 10^{-9} / 7.14 \times 10^{-6} = 5600 \text{ 安匝。}$$

然在對於磁適用與對於電適用之兩歐姆定律間有一重要差別。為維持磁場與維持電流不同，毋須耗功。俟平衡狀態成立之後，導入圈內之功完全變為電熱，而非變為磁能。當圈內以空氣代鐵，故當通量極小時，如電流強度不變此功亦不變。在平衡狀態之磁化既不須功，故在電機中除電樞內之通量外，復有雜散通量時，磁化不直接減小效率。

¹⁾ 磁壓；magnetische Spannung；magnetic tension；tensão magnética e:

此外復有一重要差別。導磁係數 μ 不但隨鐵種而異，且在同一之鐵中又隨處不同，蓋其除與化學成分有關外，復視製作方法例如所用之熱度而有差別，且其與感應強度頗有關係。此外又視磁化強度增減而定。尋常所謂導磁係數或磁導概就空氣而非就鐵而言。

論鐵時常用由實驗確定之磁化曲線¹⁾，其中以每單位長所消耗之激發強度 $h = Iw/l$ 表在橫座標上而以相應之感應強度 B 表在縱座標(圖

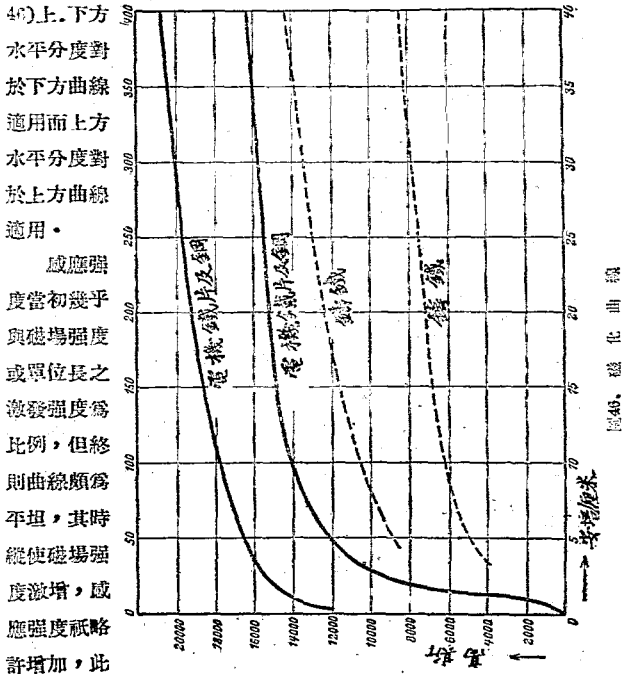


圖46. 磁化曲線

水平分度對於下方曲線適用而上方水平分度對於上方曲線適用。

感應強度當初幾乎與磁場強度或單位長之激發強度為比例，但終則曲線頗為平坦，其時縱使磁場強度激增，感應強度祇略許增加，此

現象曰鐵之磁飽和²⁾，雖則不能指出鐵何時始達飽和狀態。當鐵之感

1) 磁化曲線; Magnetisierungskurve; magnetization curve; courbe d'aimantation. 2) 磁飽和; magnetische Sättigung; magnetic saturation; saturation magnétique.

應強度之增加率與在空氣中相同，即 $d^2 = \mu_0 \cdot dh$ 時，可稱鐵已入完全飽和狀態。其時感應強度雖然恆與增加中之磁場強度成比例增加，但所增頗微。

曲線示電機鐵片¹⁾及軟電機鑄鋼²⁾之優越特性。鑄鐵³⁾(生鐵)遠不適宜，雖然今日亦有比較軟而容易磁化之鑄鐵，如依韋伯⁴⁾磁化說視磁化過程為一種分子鐵之重行排列，則不難明瞭用軟鐵之優點。分子鐵本帶磁性，但因其雜亂(見圖47)是以其磁性不能向外表現。如將鐵移在一磁場內，則各分子依同向排列，而鐵之性質愈軟時，其同向之排列亦愈完全。鐵因端面上之自由磁而呈磁性，但在內部因分子異名極間相互之作用磁性消滅——分子磁⁵⁾。

離開磁場之後，硬鋼保持磁性最強，硬鑄鐵次之，軟鐵最弱，由此證明上述觀念之不誤。換向後之分子鐵能回復原位而當鐵愈硬時其恢復愈難。據另一種解釋，謂鋼磁鐵在中段並不呈磁性，但截斷之後

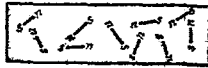


圖47. 未經磁化之鐵。

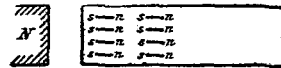


圖48. 被磁化之鐵。

，在斷面附近發生相反之極。

其他一確證為鐵因磁化換向⁶⁾發生熱量。當磁化時，分子鐵約旋轉 180° ，結果摩擦發熱。為此必須消耗功若干。此現象謂之磁摩擦⁷⁾或曰磁滯⁸⁾，申言之，即滯後之謂。

28. 電 路。

¹⁾電機鐵片(電極鐵片); Dynamoblech (Ankerblech); dynamo sheet; tôle pour dynamos. ²⁾電機鑄鋼; Dynamogußsta'1; dynamo cast steel; acier fondu pour dynamos. ³⁾鑄鐵; Gußeisen; cast iron; fonte. ⁴⁾韋伯; Weber. ⁵⁾分子磁; Molekularmagnetismus; molecular magnetism; magnétisme-moléculaire. ⁶⁾磁化換向; Ummagnetisierung; reversion of magnetization; inversion d'aimantation. ⁷⁾磁摩擦; magnetische Reibung; magnetic friction; friction magnétique. ⁸⁾磁滯; Hysteresis; hysteresis; hystérésis.

磁路¹⁾可含有橫斷面積，長及導磁性均不同之若干部分（參考圖49），後者依次為磁通量所通過。據霍普根生²⁾全路所須之激發強度等於各分部所須之激發強度³⁾之和。

由經驗知全激發強度 ΣIw 可密集在磁路之一分部，而例如在發電機中等於磁鐵電流 I 與磁鐵上安匝數 w 之乘積。此種激發強度尋常視為使通量依次通過磁路或克服磁阻⁴⁾所須之磁壓。

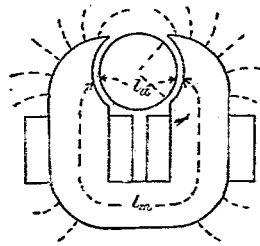


圖49. 電機中之磁路。

具有不同導磁性之各分部可各帶某一定橫斷面積，即沿長 l 帶有一常感應強度。是以單位長之激發強度 h 在 l 徑路內不變，且若徑路之方向與力線方向一致，

$$\Sigma h l = \Sigma Iw. \quad (11)$$

然尋常徑路之橫斷面積，感應性及磁場強度均變動，而惟徑路 l 之方向與力線方向一致。此時

$$\int h \cdot l = \Sigma Iw. \quad (12)$$

其中 ΣIw 表全激發強度而以安匝數量之。今匝數 w 等於磁路一孔內之線數。故 ΣIw 表貫穿該孔之電流數，曰貫穿率⁵⁾。第12方程式表示貫穿定律⁶⁾。據此定律云：電路之全磁壓消耗等於貫穿率。

由經驗知如以一任意閉合之曲線（如第50圖）代感應線，上述之情事仍有效。然此時須代以磁場強度 h 依徑路 dl 方向之成分。如磁場強度 h 與徑路 dl 成 α ，則

$$\int h \cdot l \cos \alpha = \Sigma Iw. \quad (13)$$

¹⁾磁路；magnetischer Kreis；magnetic circuit；circuit magnétique.

²⁾霍普根生；Hopkinson. ³⁾激發強度；Erregung；excitation；excitation. ⁴⁾磁阻；magnetischer Widerstand；magnetic resistance；résistance magnétique.

⁵⁾貫穿率；Durchflutung. ⁶⁾貫穿定律；Durchflutungsgesetz.

以下各例均關於一感應線之徑路。

1. 今欲計算一電機(圖51)之漏磁通量或雜散通量¹⁾。激發強度顯然不過為一種磁壓。恰如電壓使電流通過燈，電動機及與電動機等並聯之絕緣，在電機之極端之磁壓不但使通量通過空隙及電樞且使漏磁通量由側面穿過空氣。此現象謂之磁漏或磁雜散²⁾。假定一極對上之激發強度為3200安匝。

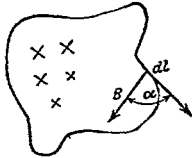


圖50. 示貫穿率。

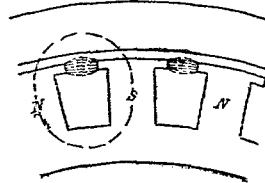


圖51. 交流發電機。

第51圖中一北極及一南極二者頂部之距離為 $l_1 = 6.5$ 厘米，一極頂側面之面積為 75 平方厘米。如在異名極頂間之中點雜散線擴佈至雙橫斷面積，則平均橫斷面積為 1.5×75 平方厘米，是以向二側發出之通量之橫斷面積 $F_1 = 2 \times 1.5 \times 75 = 225$ 平方厘米。惹起此通量之激發強度為 $(Iw)_1 = 6200$ 安匝。

同樣，由一北極之二側面發出之雜散通量 $l_2 = 10$ 厘米及 $F_2 = 960$ 平方厘米。極頂之激發強度等於 6200 安匝而在磁鐵軀處之激發強度等於零，故在側面間之雜散通量為 $(Iw)_2 = 6200 \div 2 = 3100$ 安匝。

因磁鐵之強導磁性，在第11方程式中雜散線之徑路可經磁鐵路去，雖然磁鐵經主通量而呈強飽和狀態。故直接由方程式(8)

$$\mathcal{H}_1 = H \cdot \frac{(Iw)_1}{l_1} = \frac{4\pi \cdot 10^{-9} \times 6200}{6.5} = 12 \times 10^{-6} \text{伏秒/平方厘米},$$

$$\Phi_1 = \mathcal{H}_1 F_1 = 0.27 \times 10^{-2} \text{伏秒},$$

¹⁾ 漏磁通量；一名雜散通量；Streufluss；leakage flux；flux de dispersion.

²⁾ 磁漏，一名磁雜散；magnetische Streuung；Magnetstreuung；magnetic straying；dispersion magnétique.

$$\tau_2 = \frac{(Iw)_2}{l_2} = \frac{4\pi \times 10^{-9} \times 3100}{10} = 39 \times 10^{-9} \text{伏秒/平方厘米,}$$

$$\Phi_2 = \tau_2 F_2 = 0.37 \times 10^{-2} \text{伏秒.}$$

在是處亦可以閉感應線內之電流線數代電流匝數而計算。對於磁性適用之歐姆定律是處亦可用。準此則

$$A_1 = \frac{F_1}{l_1} = 430 \times 10^{-9} \text{亨} \quad \Phi_1 = (Iw)_1 A_1 = 0.27 \times 10^{-2} \text{伏秒.}$$

$$A_2 = \frac{F_2}{l_2} = 1200 \times 10^{-9} \text{亨} \quad \Phi_2 = (Iw)_2 A_2 = 0.37 \times 10^{-2} \text{伏秒.}$$

2. 又求圖 51 中電機所須之激發強度俾在電樞及空隙中可有 2.5×10^{-2} 伏秒之通量。如極頂側面之雜散約為 17%，則在磁鐵中可認為有 3×10^{-2} 伏秒之通量。茲命 l 表磁路之長， F 表橫斷面積， l_1 雙倍空隙之長。電樞由電機鐵片構成而磁鐵框則由鑄鐵構成。在電樞橫斷面積中，因鐵片由紙絕緣¹⁾之空間損失約計 10%。在飽和時發生作用之電樞齒為簡單起見，可略去不計。感應強度係以高斯計算，即以平方厘米計之面積分以伏秒計之通量並以 10^8 乘之。鐵中之磁場強度 h 係從第 40 圖檢出，至空氣中之磁場強度則依第 83 方程式（見第 42 面）視為等於 0.8 τ_1 ——激發之預算²⁾。

所得結果：

	電樞	空氣	磁鐵框
路長	$l_a = 20$ 平方厘米	$l_1 = 0.8$ 厘米	$l_m = 110$ 厘米
橫斷面積	$F_a = 200$ 厘米	$F_1 = 420$ 平方厘米	$F_m = 400$ 平方厘米
通量	$\Phi = 2.5 \times 10^{-2}$ 伏秒	$\Phi = 2.5 \times 10^{-2}$ 伏秒	$\Phi_m = 3 \times 10^{-2}$ 伏秒
感應強度 $\tau = \frac{\Phi}{F}$	$\tau_a = 8600$ 高斯	$\tau_1 = 3960$ 高斯	$\tau_m = 7500$ 高斯
磁場強度	$h_a = 2.0$ 安/厘米	$h_1 = 4770$ 安/厘米	$h_m = 25$ 安/厘米
激發強度	$(Iw)_a = 40$ 安培	$(Iw)_1 = 3820$ 安培	$(Iw)_m = 2750$ 安培

全磁路所須之激發強度故為 $40 + 3820 + 2750 = 6610$ 安匝。如是在樞心上須有每匝 1 安培之匝 6610 或每匝 2 安培之匝 3305。

¹⁾ 紙絕緣: P4papierisolation; paper insulation; isolement de papier. ²⁾ 激發之預算; Vorausberechnung der Erregung.

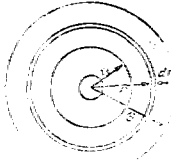


圖52. 與紙面正交之一
線之磁場。

3. 某一無限長之線帶圓橫斷面積而有電流 I 通過 (參考第52圖) · 求空中離該線 r 遠處之感應強度 · 根據對稱理由, 在以該線為中心之帶 r 半徑之一環上, 每單位長之感應強度 h 為一常數 · 既 $\cos\alpha=1$ 而 $w=1$, 故據第 13 方程式: $\int h dl \cos \alpha = h 2\pi r = I$,

或據方程式 (8):

$$\mathcal{H} = \Pi_0 h = \frac{\Pi_0 I}{2\pi r}. \quad (14)$$

例如 $I=100$ 安培而 $\Pi_0=4\pi \times 10^{-9}$ 亨利/厘米時, 在離 10 厘米遠處之感應強度

$$\mathcal{H} = \frac{10^9 \times 4\pi \times 10^{-9} \times 100}{2 \times 10\pi} = \frac{0.2 \times 100}{10} = 2 \text{ 高斯}.$$

今將磁場分解為若干磁管, 申言之, 分為若干同心空筒狀體, 如命 r_1 表一管之內半徑, r_2 表外半徑而 l 表長, 則通過與紙面正交之面 $l dr$ 之通量等於 $\beta l dr$. 積算 r_1 與 r_2 間之通量, 得

$$\Phi = \int_{r_1}^{r_2} \beta l dr = \int_{r_1}^{r_2} \frac{\Pi_0 I l}{2r\pi} dr = \frac{\Pi_0 I l}{2\pi} \text{對數} \frac{r_2}{r_1} \times \frac{1}{0.4343}. \quad (15)$$

故如每二連續半徑成同大比例, 各管之通量當相等 ·

24. 通電導體與磁場間之力。

茲處所討論者為一通電之直導體在一均勻磁場內所受之磁力¹⁾ · 如磁場固定而導體可移動, 則適用下列之定則: 隨電流游泳, 面向發出磁力線之北極, 則極受向左之力作用而導體本身受向右之力作用 · 例如依第53圖自下向上游泳, 面向在紙面後之北極, 則導體向右運動 · 又如依第54圖自左向右游泳, 面向紙面前之北極, 通電導體遂向右

¹⁾ 磁力; magnetische Kraft; magnetic force; force magnétique.

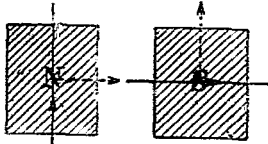


圖53.

磁場及通電導體間之功。

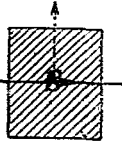


圖54.

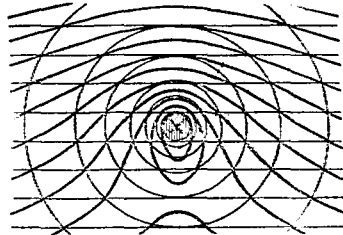


圖55. 磁場及通電導體。

手移動，即向上運動。

直通電導體在均勻磁場內所受之力效應在電動機及計器中大範圍利用之。為便於明瞭此過程之真相，設想在一自左向右之均勻磁場內有一直通電導體，後者垂直通過紙面並有電流自前向後通過。次將均勻磁場經同向之等距平面分為帶等通量之板狀管。同樣又將導體之磁場分為空筒狀管，各含與原磁場之板狀管同多之通量。於是依第15方程式二隣近筒狀面之直徑成相等之比例。二種管壁之切線及筒狀管與紙面之切線成等向之直線及圓。

今依所示之方法以曲線連接直線與圓之交點並將此曲線依導線之方向故即依與紙面正交之方向展開，使曲線變為曲面。在二交點之曲線遂描出一面，由其二側通過二相等通量。此曲面故為一磁管之壁而諸曲線表全磁場之磁線。

磁場既原來自左向右，故依據上述之游泳定則，導體必向下運動。法拉第之觀念遂由此美滿徵實。據此觀念，磁場中力作用之由來係因力線施一種拉力¹⁾，使磁力線自動縮短。又因同時施一種橫壓力²⁾，使力線自動移位。

因磁場及一通電導體依是法而互起力作用，為使一發電機運轉，

¹⁾拉力；Längszug; longitudinal pull; traction longitudinale. ²⁾橫壓力；Querdruck; transversale pressure; pression transversale.

必須施功。由運動而發生之電流反對電機運動（楞次定律¹⁾）為克服反力，發動機必須施等大之力。

今可計算有電流 I 通過並長 l 之導體在具感應強度之磁場內所受之力作用。如第35圖中之導體在 dt 時間內依與線及感應強度正交之方向移動 ds 之距離，電壓依第38面第5方程式為 $e = \mathcal{H} l ds / dt$ 。在 dt 時間內發生之電功：

$$dA = e I dt = \mathcal{H} I l ds.$$

為此須耗等大之機械功。如以 ds 分電功，則得磁場及一與感應強度正交之導體間之力

$$P = \mathcal{H} I l. \quad (16)$$

如導體不與感應強度正交，則須以其與感應強度正交之成分代入方程式中。

如感應強度係以伏秒/平方厘米計，電流強度以安培計，而長以厘米計，則力當以焦耳/厘米計。如力以仟克而感應強度以高斯計，則

$$1 \text{ 仟克} = \frac{1 \text{ 仟米克}}{100 \text{ 厘米}} = \frac{9.81 \text{ 焦耳}}{100 \text{ 厘米}}. \quad 1 \text{ 高斯} = 10^{-8} \text{ 伏秒/平方厘米}.$$

將此換算因數代入第16方程式中則得

$$\frac{9.81}{100} P = 10^{-8} \mathcal{H} I l$$

或

$$P = 10.2 \times 10^{-8} \mathcal{H} I l. \quad (17)$$

例如 $\mathcal{H} = 8000$ 高斯， $I = 20$ 安培， $l = 30$ 厘米，則

$$P = 10.2 \times 8000 \times 20 \times 30 \times 10^{-8} = 0.493 \text{ 仟克}.$$

第35圖中之裝置迄今表示一發電機，其中電流為產電壓所惹起並係與電壓同向。然上述之方程式對於由外電壓惹起之電流亦適用。此時任通電導體自由以代使其反磁場與電流間作用之力而旋轉。該裝置遂是變為一種電動機²⁾ 而當磁場方向及電流方向不變時，通電導線依

¹⁾楞次定律；Lenz'sches Gesetz；Lenz's law；loi de Lenz. ²⁾電動機；Motor；motor；moteur.

與前相反之方向運轉。產電壓之方向因此亦相反，且對於電流起反對之作用。電流強度此時隨路端電壓與該反電壓（常稱反電動勢）之差而異。路端電壓之一部分為克服反電壓而消耗，其與電流表示導入之電功率，後者在電動機中變為機械功率——工作方式¹⁾。

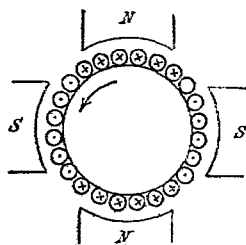


圖56. 電 動 機。

實際電動機之通電導體依第56關係分配在一鼓形鐵體之圓周。導體依一定方法連接，俾在各極前發生之力依同向而作用。在第16方程式中 l 表在極前之線之總長。

舉例言之，如極前之感應強度 $\mathcal{H} = 7000$ 高斯，一導線之電流強度 $I = 14$ 安培，導線數 $z = 244$ ，電樞之長 $b = 24$ 厘米。電樞之直徑 $d = 40$ 厘米，極弧對於極節距之比為 $2/3$ ，則在全數極前導線之長為 $l = zb \cdot 2/3 = 15000$ 厘米，於是得轉力²⁾ 或轉矩³⁾，

$$P = 10,2 \times 10^{-9} \times 7000 \times 14 \times 15000 = 150 \text{ 仟克。}$$

當半徑為 20 厘米 = 0.2 米時，轉矩

$$M = 150 \times 0,2 = 30 \text{ 仟米克。}$$

茲於一均勻介體內置帶圓橫斷面積之二直導線，線中分別通過同向之電流（圖57）。次以各線之橫斷面積為中點描圓若干並使二隣近圓之半徑依第15方程式為同一的比例。今依所示方法以曲線連接圓與圓之交點並依線之方向移該曲線。在二交點間之曲線遂由移動描出曲面，而從反對一側通過等大之通量。曲面表磁場管之壁而曲線表示磁線，後者包圍二導線。此亦因二導線之磁效應在外方相加而在二者之間則相抵消之故。外面力線之拉引力有使導線接近之作用。帶同向電流

¹⁾ 工作方式; Wirkungsweise; manner of action; manière de l'action.

²⁾ 轉力; Zugkraft; tractive effort; force de traction. ³⁾ 轉矩; Drehmoment turning moment; moment of rotation.

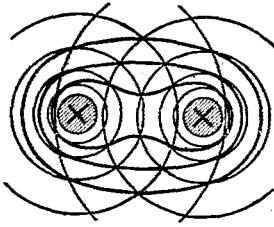


圖57. 同 向 電 流。

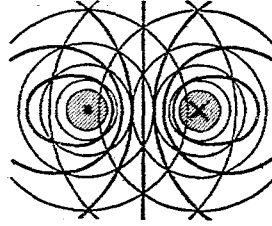


圖58. 反 向 電 流。

之導線之所以互相吸引者，即緣於此理。

如二通電導線之電流方向相反，將二種圈之交點依第58圖連接並將曲線依線向移動。在二交點間之曲線描出曲面，由其二反對側通過等大之通量，故曲面為磁場管之壁。磁力線之方向表示電流之磁效應在導體間相加，在導體外則相抵消。在導體間磁力線之橫壓力今迫導體分離。帶異向電流之導線之所以互相推拒者，即因此故。又二導線既可表一單匝之二側，是以各匝有推擴其面之傾向。

通電導線及線圈間之力在計器（電功率計¹⁾）中供測電流，電壓及功率（功率之測定²⁾）之用。可動線圈旋轉，終則占有包含最大磁通量之位置。

25. 自 感 應。

當包含在圈內之通量變動時發生電壓。通量隨線圈在磁場中之位置或隨線圈內之電流而變動。此現象謂之自感應³⁾。

如是在是處仍如在第38面中假定電壓切磁力線而發生，吾人依第59圖可想像磁力線係當電流發生時從導線發出，而以後成波線向四方傳播。

¹⁾ 電功率計; Elektrodynamometer; electro-dynamometer; électrodynamomètre. ²⁾ 功率之測定; Leistungsmessung; power measurement; mesure de puissance. ³⁾ 自感應; Selbstinduktion; self-induction; self-induction

由通量變動而起之電壓有一定方向，因由其惹起之電流有反對通量變動之作用。經自感應而發生之電壓，其方向故與在遞增中之電流之方向反對而與在遞減中之電流之方向一致。

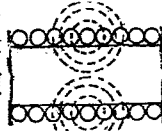


圖59. 在生成中之磁場。

設以帶 w 匝之線圈磁化一磁路，其中各匝假定包含等大之通量。磁路之磁導 Λ 與感應強度無關，此不但在空氣中及在將達飽和狀態之鐵中如是，即在磁路內當空氣在磁路內之抵抗大於鐵之抵抗時亦莫不然。如電流於 dt 時間內增加 di 則依據關於磁之歐姆定律，通量當增加 $d\Phi = di w \Lambda$ 。至所發生之電壓為：

$$e = -w \frac{d\Phi}{dt} = -w^2 \Lambda \frac{di}{dt}.$$

式中 $w^2 \Lambda$ 曰電感或電感係數¹⁾ L 。是以

$$L = w^2 \Lambda \quad (18) \quad \text{及} \quad e = L \frac{di}{dt}. \quad (19)$$

凡具有一單位電感係數之圈其中電流每秒變動1安時者能產生1伏之電壓。此單位曰1亨利²⁾，略稱1亨，即亨利等於歐姆 \times 秒。線圈一方面起磁化作用而一方面匝內產生電壓，故電感與匝數之自乘有關。

今據對於磁適用之歐姆定律， $\Phi = Iw\Lambda$ 。電感係數表通量與匝數在有一單位電流強度時之連環（磁通連環³⁾）而以亨利計算之電感係數表電流為1安時以伏瓦數計算之磁通連環。

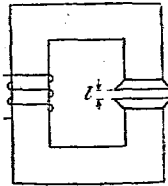


圖60. 磁通線圈。

如由 $w = 100$ 線匝所成之線圈含有一鐵心（圖62）而如後者之長 $l = 40$ 厘米，橫斷面積 $F = 20$ 平方厘米，而磁導或導磁係數 $\mu = 4000 \times 4\pi \times 10^{-9} \times$ 亨/厘米，則電感係數

$$L = \frac{100^2 \times 4000 \times 4\pi \times 10^{-9} \times 20}{40} = 0.25 \text{ 亨利}.$$

1. 感應或電感係數；Induktivität；inductance；coefficient d'induction. 2. 亨利；姆姆亨；Henry；henry；henry. 3. 磁通連環；Flussverketting；interlinking of flux，interconnexion du flux.

如鐵心含有一空隙(圖60),恰如在抗流線圈¹中然,則鐵之磁阻與空氣之磁阻相較自可不計。此時在第18方程式中 l 及 F 分別表空隙之長及橫斷面積。例如 $w=200$, $l=0.5$ 厘米及 $F=100$ 平方厘米,則

$$L=200^2 \times 4\pi \times 10^{-9} \times 100/0.5=0.1 \text{ 亨利。}$$

今試計算一自由交流導線²或交流架空線之電感係數,惟應注意吾人僅能討論一環之電感係數但不能討論單獨一線或一導線部分之電感係數(圖61)。據第55面,電感係數既等於電流強度分量 \times 匝數而 w 又等於1,則當長為 l ,距離為 d 而線之半徑為 r 時依據第50面第15方程式,經一導線之在空氣間隙之通量所惹起之電感:

$$L_1 = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \frac{d}{r} \times \frac{1}{0.4343}$$

電流既在一線內流去而在他線內流回,在環內由二電流所生之通量有相同之符號。故環之電感係數

$$L = 2L_1 = \frac{\mu_0 l}{\pi} \frac{d}{r} \times \frac{1}{0.4343} \quad (20)$$

假定 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-9}$ 亨/厘米,則1仟米或10⁵厘米長之

圖61. 導線。電感係數當為

$$L' = \frac{4\pi \times 10^{-9} \times 10^5}{\pi} \frac{d}{r} \times \frac{1}{0.4343} = 4 \times 10^{-4} \frac{d}{r} \times \frac{1}{0.4343} \text{ 亨利/仟米。} \quad (21)$$

其中 d 及 r 係以等大量度計算。例如長為30仟米,距離 $d=80$ 厘米,半徑 $r=0.4$ 厘米,則感應係數

$$L = 20L' = 20 \times 4 \times 10^{-4} \frac{80}{0.4} \times \frac{1}{0.4343} = \frac{20 \times 4 \times 10^{-4} \times 2 \times 10^1}{0.4343} = 0.0424 \text{ 亨利。}$$

依據第21方程式而計算之電感係數經導線內之磁場顯然增加(參考第89節)。為此在該方程式中必導入通量與電流之關係以代通量與

¹ 抗流線圈,亦名阻電圈; Drosselspule; choking coil; bobine de reactance.

² 自由交流導線或交流架空線; freie Wechselstromleitung; free alternating current line; ligne de courant alternatif libre.

匝數之關聯。

今計算一直流電樞之一圈線之自感應之平均電壓 E 。線圈之一部分係嵌在電樞鐵之槽內。電樞之長假定等於30厘米，匝數 $w=2$ 。當電流為1安時，槽內每厘米長之導線惹起 6×10^{-5} 伏秒之通量。一槽每厘米長之磁導故為 6×10^{-5} 亨利/厘米而有30厘米長之電樞時就一槽對而言之磁導 $\Lambda = 2 \times 30 \times 6 \times 10^{-5} = 360 \times 10^{-5}$ 亨利。今若將二匝互相串聯，則

$$L = w^2 \Lambda = 4 \times 360 \times 10^{-5} = 14.4 \times 10^{-6} \text{ 亨利。}$$

設電流在時間 $T=0.004$ 秒間自 -50 變至 $+50$ 安培，則平均變動速率當為 $2I/T$ ，而所產生之平均電壓或平均產電壓

$$E = L \frac{2I}{T} = 14.4 \times 10^{-6} \times \frac{100}{0.004} = 0.36 \text{ 伏特。}$$

當電流突然中斷時，電磁鐵之自感應電壓可達一顯著之值。此時為電磁鐵之多數匝所包含之強通量迅速消滅。又在方程式 $e = -w d\Phi / dt$ 之右邊，分子急增而分母驟減。自感應之電壓故可極大，致絕緣體被其突破，而在間斷之處輒起電花。電流被其維持仍能通過空隙，致自感應電壓驟然降下。

因自感應之故，在開斷電磁鐵之電流之前，往往插入一電阻減衰之。或如第62圖於開斷電路¹之前插入磁鐵繞組 R_m 及電阻 R 。當總線內之電流中斷時，磁鐵繞組之電流及所包含之通量緩緩遞減。繞組內於是發生自感應電壓，其方向與在遞減中之電流相同。此電壓在磁鐵繞組及電阻內惹起電流至片刻之久，如是可免磁鐵電流迅速消滅。

在若干情形中須將自感應完全制止。在用交流之惠斯登電橋中例如用一感應器為電源並於橋路內用一電話機為計器。此時欲測定之電阻內之自感應惹起擾亂。蓋此時電流強度不僅與歐姆電阻且又與自感應有關，後者一時增強而一時衰減電流。職是之故，依此方法祇可試驗非感應電阻，例如白熾燈或直線。又用資比較之電阻亦須屬非感應

¹ 開斷電路；Ausschalten；putting out of circuit；mis hors de circuit.

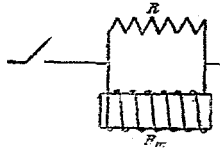


圖62. 電 磁 鐵。

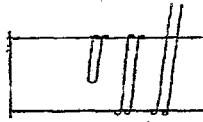


圖63. 雙 線 圈。

的一種。爲此依第63圖將線折半並將二線
並列繞之（無感
雙線繞法¹⁾）。
此後在兩隣近區
內恆通過方向相
反之電流。

26. 互感應.

如在一線圈內電流發生變動，則在隣近線圈內亦產生電壓。此現象謂之互感應²⁾。依第64圖無論以 2 爲記之線圈（如在自感應作用中）屬於線圈 1 之電路抑屬於一獨立電路，所發生之電壓不變。在各情形中，如線圈 1 中之電流 i 變動，在線圈 2 中必發生一電壓。其方向與由自感應而惹起者相同，即與第一圈中遞增之電流反向，與遞減之電流同向。



圖64. 互感應。

然自感應係由第一圈所包含之全部通量所惹起而互感應則依第64圖僅由第一圈通過第二圈之一部分通量所促成。成雜散之一部分通量其僅包圍第一線圈而非包圍第二線圈者祇與第一圈之自感應而非與互感應有關。

今命 Λ 表第一圈之通過第二圈之一部分通量之磁導。依據歐姆定律當第一圈之匝數爲 w_1 而其電流之臨時值爲 i_1 時，其通量爲 $\Phi = i_1 w_1 \Lambda$ 。如第二圈含有 w_2 匝，則當通量變動時，其中所產生之電壓 $e_{12} = -w_2 d\Phi/dt = -w_1 w_2 \Lambda di_1/dt$ 。今命

$$M = w_1 w_2 \Lambda \quad (22) \quad \text{即 } e_{12} = -M di_1/dt \quad (23)$$

並稱 M 爲互感係數³⁾。此係數如自感係數亦以亨利計算。

¹⁾ 無感雙線繞法；induktionlose (bifilar) Wicklung; non-inductive winding; enroulement sans induction. ²⁾ 互感應；gegenseitige Induktion; mutual induction; induction mutuelle. ³⁾ 互感係數；gegenseitige Induktivität; mutual inductance; inductance mutuelle.

如將二圈之職務交換，互感係數仍不變。在第一圈內之互感應電壓故為 $\varepsilon_1 = -M \frac{di_2}{dt}$ ，今須確定一正圈軸線，凡電流其通量依正圈軸線之方向通過線匝者，其導入之方向曰正。

互感應電壓不僅由電流變動而致，但當第二圈對於帶固定電流之第一圈之位置發生變動時亦可發生。例如將二圈依其軸線之方向互相移近或移開（圖64），在第二圈內發生之電流對於通量變動起反對之作用。今將二圈移近時，第二圈包含之通量增加，是以在第二圈內發生之電流與第一圈內之電流反向。反之，若將二圈移開，則在第二圈內發生之電流與在第一圈內之電流同向。同時關於通電導體之力效應之定律亦指出上述之情形：在第二圈內產生之電流阻止運動。

27. 電功及磁能。

電流在一線圈內增加時，惹起自感應電壓，其方向與電流之方向相反，故緩而電流之增長。壓入之路端電壓既克服自感應電壓，其與電流強度及經歷之時間惹起一電功，後者成磁能儲蓄而當電路開斷時惹起電花，變為熱量。

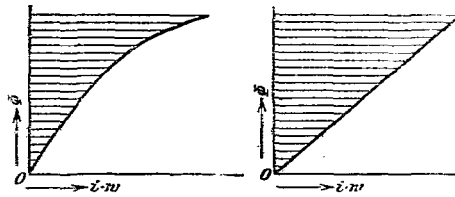


圖65. 導磁率可變。帶條紋之面表示磁能。
圖66. 導磁率不變。

在 w 匝內之電流 i 磁化一磁路時，各匝皆與全部通量 Φ 相聯繫並在 dt 時間內電流增加 di 。其時通量當增加 $d\Phi$ 而在線圈內發生之電壓 $e = -w \frac{d\Phi}{dt}$ 。據第46面第7方程式，由線圈產生之電功為 $dA = ei dt = -i w d\Phi$ 。

當電流及通量增加時， i 及 $d\Phi$ 有相同之符號，電功故為負。功從外面導入而成能儲蓄。當電流及通量減少時， i 及 $d\Phi$ 帶相反之符號，由圈供給之功故為正。線圈供給電功，其儲蓄之磁能減少。

如令電流自零值增至 I ，並如在第65圖中將 iw 之臨時值表在一水平線上而將 Φ 之臨時值表在一鉛直線上。此時導入之電功等於 $iwd\Phi$ ，即等於一細條之面積。故電流增至終值 I 時，被導入之電功等於條面之面積。

若當電流增長之際並不發生機械功——例如用電磁鐵起揚之功，並略去因分子鐵換向而發生之低量熱，則所導入之全部功皆變為磁能¹⁾。此磁能故亦可由條面表示之

$$w = \int_0^I i w d\Phi. \quad (24)$$

此時如將電路開斷，電流自 i 減至零值，則磁能復變為電熱。因當時消衰之通量惹起自感應電壓，而後者復惹起一種與之同向之電流。在開斷之處，且往往發生電花。此電花可維持電流至片刻之久。

若導磁率不變，通量與激發強度之關係由第66圖中之直線表明。磁能復等於條面之面積，即等於其寬與高之乘積之半數。今命 Φ 表電流為 I 時通量之終值，則由應用第44面第10方程式及第55面第18方程式得磁能

$$W = 0.5Iw\Phi = 0.5LI^2. \quad (25)$$

今欲計算磁能與感應強度 \mathcal{H} 及磁場強度 h 之關係並設想有導磁係數 μ 之一柱狀空間，其橫斷面積為 F 及長為 l 。此空間經 i 安匝磁化。如命 Φ, \mathcal{H}, h 及 i 表瞬間值，則在任一時間

$$\Phi = \mathcal{H}F \quad \text{及} \quad iw = hL.$$

以此二者代入第24方程式中，得磁能及磁能密度。磁能

$$W = \int_0^{\mathcal{H}} h d\mathcal{H} F.$$

1) 磁能; magnetische Energie; magnetic energy; énergie magnétique.
 2) 磁能密度; magnetische Energiedichte; density of magnetic energy; densité de l'énergie magnétique.

IF 既表經磁化之空間，則每空間單位之能或磁能密度：

$$\sigma = \int_0^B h \, d\mathcal{H}. \quad (26)$$

設想之空間既恆可選其充分小者，是以第26方程式亦適於非均勻磁化作用。固定導磁係數為 μ 時， $h = \mathcal{H} : \mu$ ，即

$$\sigma = \int_0^B \frac{\mathcal{H} \, d\mathcal{H}}{\mu} = \frac{\mathcal{H}^2}{2\mu} = \frac{h^2 \mu}{2}, \quad (27)$$

式中 h 及 \mathcal{H} 表終值。在第56面之抗流線圈中，例如電流強度 $I = 20$ 安培，匝數 $w = 200$ ，空間之長 $l = 0.5$ 厘米時，每單位長之激發強度 $h = I \times w / l = 8000$ 安培/厘米。感應強度故為

$\mathcal{H} = \mu_0 I w / l = 4\pi \times 10^{-9} \times 8000 = 10000 \times 10^{-9}$ 伏秒/平方厘米 = 10000 高斯。

今經磁化之空間 $V = Fl = 100 \times 0.5 = 50$ 立厘米，是以在空間內儲蓄之能。

$$W = \sigma V = \frac{h^2 \mu}{2} V = \frac{8000 \times 10000 \times 10^{-9}}{2} \times 50 = 20 \text{ 焦耳}。$$

由應用以前算出之值 $L = 0.1$ 亨利，第25方程式亦示20焦耳。

如不略去抗流線圈之鐵之磁阻，可知在鐵內亦儲蓄少量之能而此可由第26方程式或第35圖表明之。

28. 電磁鐵之起重及起重力。

方程式 $A = \int i \, w \, d\Phi$ 表示在各個情形下導入之電功，但如前節中當不作其他之功時僅表示磁能。如導入之電功除變通量外又惹起機械功則又當別論矣。其一例如用電磁鐵起重¹⁾。

在起重之前，極與銜鐵之間相隔一大距離，故其間磁阻頗大，申言之，由電流僅能惹起較小磁通量 AB (圖67)。曲線 OB 表一直流電磁鐵降下以前即當有一固定大距離時磁通量與激發強度之關係。

¹⁾ 電磁鐵之起重；Hub eines Elektromagnet; lifting of an electromagnet

當下降之際，空氣距離減小而磁通量增加。因此惹起一種與路端電壓相反對之電壓，電流於是依曲線 BC 逐漸減小。終則銜鐵靜止，電流復增至原來之 OA 值。此時磁通量與有固定小空氣徑路之磁化曲化 OCD 相應而增至 AD。

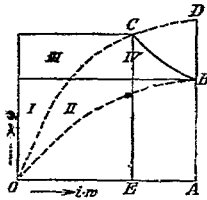


圖67. 導磁率可變。

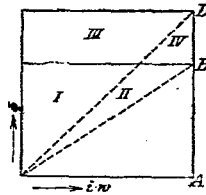


圖68. 導磁率不變。

一直流電磁鐵之工作面及磁能。

今導入之電功為 $\int i w d\Phi$ ，即等於面積 III + IV。磁能之增加等於 I + III - (I + II) = III - II。機械功故等於導入之功與儲能之

差，即等於 II + IV。是以電源不僅供給起重之功且供給變為磁能之功。

今於繞組之前插入一極大之電阻並選擇一相當大之電源電壓。此時磁鐵下降之際因通量變動而發生之電壓與電源電壓相較有限，可以略去，電流強度故不變，恆等於 OA。曲線 BC 遂與 BD 相符合。若導磁係數固定，則得第 68 圖。此時導入之功與面積 III + IV 相當而係等於由面 II + IV 表示之起揚功之二倍。準此，則導入之功其供增加磁能者係與供起重者相等。第 68 圖例如對於電磁鐵之空間適用，其中 $i w$ 表空間單獨所須之激發強度。

為決定電磁鐵之起重力¹⁾，仍假定當磁鐵下降之際，電流強度變動頗小。命下降時在任一時間之感應強度等於 α ，空間距離等於 l 。在感應強度增加 $d\alpha$ 之時間內，導入之電功為 dA_2 ，而當極面為 F 時等於此電功一半大之機械功 dA_m 為

$$dA_2 = d\alpha^2 F i w \quad dA_m = 0.5 d\alpha^2 F i w. \quad (a)$$

¹⁾ 電磁鐵之起重力；Tragkraft (Zugkraft) eines Elektromagnet; tractive force of an electromagnet; force portante d'un électroaimant.

今

$$\mathcal{E} = \frac{i\omega}{l}, \quad \text{即} \quad d\mathcal{E} = -\frac{i\omega}{l} dl$$

如於方程式(a)中代入 $d\mathcal{E}$ 之值並以 $\mathcal{E}l/i$ 代 $i\omega$,則得

$$dA_m = -0.5\mathcal{E}^2 F_c l / \mathcal{E}_0$$

$-dA_m$ 既表工作之路程,故起重力

$$P = 0.5\mathcal{E}^2 F / \mathcal{E}_0 \quad (28)$$

舉例為證,如命 $\mathcal{E} = 5000$ 高斯, $F = 100$ 平方厘米。起重力應以
 仟克計。今

$$1 \text{ 仟克} = \frac{9.81 \text{ 焦耳}}{100 \text{ 厘米}} \quad 1 \text{ 高斯} = 10^{-8} \text{ 伏秒/平方厘米}$$

如 $\mathcal{E}_0 = 4\pi \times 10^{-9}$ 亨利/厘米則

$$P \frac{9.8}{100} = \frac{0.5 \times 10^{-16} \times 5000^2 \times 100}{4\pi \times 10^{-9}} \text{ 仟克}$$

申言之, $P \cong 4 \times 5000^2 \times 100 \times 10^{-8} = 100$ 仟克。

如為一蹄形磁鐵則當以二極面之面積表示 F 。

今討論交流磁鐵。在此種電磁鐵中通量變動於正負最高值之間。恰如在變壓器(見第103節)中,當繞組之電阻小時此巔值係經端電壓規定,是以並不變動。如交流週期與下降時間相較小時,則在起揚時間內,通量數次達其巔值,而極與銜鐵間之距離每次縮短若干。與是種巔值發生時之距離相應者,為電流之巔值, YR, NE, YH及NL以及由虛線表示之OB, OE, OH, OL等磁化曲線(第69圖)。

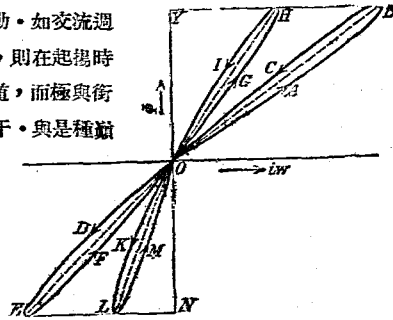


圖69. 交流磁鐵之工作面。

為簡單起見祇設想起揚期間之全週期。通量與激發強度之關係此

時由曲線OABCOD等表明。與當時空間距離相應，當磁化強度遞增時通量小於由虛曲線表示之值，而當磁化強度減衰時則大於該值。

在第一四分之一週期間，由外線路導入之電功恰如在第65圖中等於OABY面。在第二四分之一週期間，其BCOY部分復還給於外線路。電流成磁能始終既各為零，故當時並無變為磁能之電功而OABCO小面等於前半週期間之起揚功。諸小面之和等於全部起揚功。

29. 磁 滯。

鐵之磁化曲線概自未磁化以前描起。當初令磁化電流從零值遞增，同時每單位長之激發強度 h 及磁感強度 \mathcal{G} 增長。今如在一水平線上表單位長之激發強度 h ，而在一鉛直線上表磁感強度 \mathcal{G} ，則成如第70圖之曲線OA。

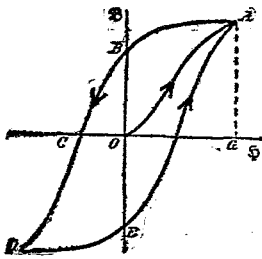


圖70. 磁滯循環。

已達一任意選定之最大感應強度 $G_A = \mathcal{G}_m$ 之後，再令電流遞減，則為惹起單位長之等大激發強度所須之感應強度當磁化作用遞減時比較磁化作用遞增時為大。此時若仍由水平線表示單位長之激發強度而由鉛直線表示相應之感應強度，則得曲線AB。此種情形表示鐵

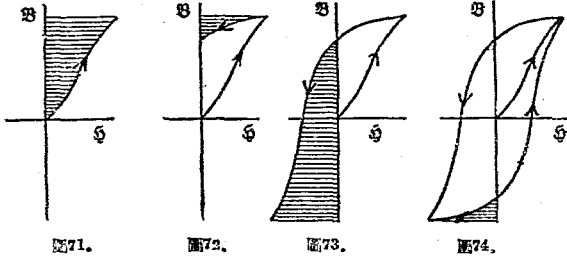
仍保留一小部分之磁（磁滯）。

磁化作用遞減至 $h=0$ 時之感應強度等於OB。此為磁剩餘¹⁾之感應強度。故依某種意義磁滯與磁剩餘全相同。為解釋此二現象，認定經依一定方向排列後之分子鐵因摩擦作用有保持其位置之傾向。

今若倒轉電流之方向，則為消滅磁剩餘，一單位長所須之激發強度等於OC。由此可知分子鐵反對反磁化作用。俟單位長之激發強度增至OC以上，遂為依反對方向之感應強度。CD與遞增之磁化作用相當

1) 磁剩餘; magnetischer Rückstand; magnetic residue; residu magnétique.

而DE 則與遞減之磁化作用相當，OE 表磁剩餘。



以面表示鐵磁化時之功。

據第61面第26方程式，單位空間之能 $\sigma = \int h d^2 \mathcal{H}$ 既等於第71圖中之一小條面，故 $\int h d \mathcal{H}$ 等於全部條面，後者表示當磁化之際，為使感應強度自零值增至終值，單位空間所消耗之功。

當磁化作用遞減時， $d^2 \mathcal{H}$ 因而功為負，申言之，由第73圖中之面表出之一部分之功仍可獲得。倒轉電流之方向之後，儲蓄之功復為正而與第73圖中之面相當。其中由第74圖中之面表示之一部分仍可獲得。
 一空間單位在一週期間所須之反磁化之功故等於磁滯面積。如 \mathcal{H} 係以伏秒/平方厘米計， h 以安培/厘米計，則一空間單位所須之功當以焦耳/立方厘米計。經磁滯之功損失幾乎與最大感應強度之平方為比例。此損失曰鐵損失¹⁾。

30. 渦 流。

渦流²⁾ 為在帶大橫斷面積之導體內不依規定之路徑但循最小電阻之徑路隨便閉合之電流。當導體在磁場內運動之際，渦流電壓依與感應強度及運動正交之方向而作用。試繞一銅線匝於一整塊鼓形鐵，如第75圖上半部所示。次令鼓形鐵依一定方向旋轉，此時上部導體向前

¹⁾ 鐵損失; Eisenverlust; iron loss, perte dans le fer. ²⁾ 渦流; Wirbelstrom; eddy current; courant parasite.

運動。依據法拉第定律，在線內發生之電壓係依矢首方向，同時在下面鐵部內亦發生一相等電壓。結果在帶大橫斷面積之鐵體內因電阻極小恆發生極顯著之電流。此電流在鐵體內惹起強熱因而惹起功之大量

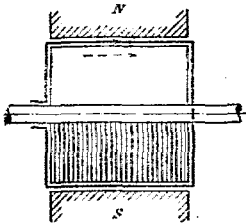


圖75. 整塊鐵及由鐵片合成之磁軛鐵。

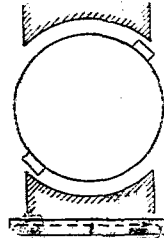


圖76. 在粗導體內之渦流。

損失。如設想第75圖中之鐵體為一連接發電機，其中發生之電流對於運動起反對作用，是以惹起功損失，則可明白解釋上述之情

事。此渦流損失¹⁾係與渦流強度之自乘為比例，即與渦流電路內之產電壓之自乘為比例，故即與頻率之自乘及感應強度之自乘為比例。

至在電機及變壓器之鐵片內之渦流，其計算見第102節。

為示由渦流消耗之功，在一未經激發之電磁鐵之極間，令一銅盤往返擺動。電磁鐵激發之後，盤立即停止運動，蓋所產生之渦流阻止運動（懷爾登霍芬提²⁾）。此時銅盤之動能變為電熱。

渦流既表電功之消耗，故一電機之電樞必須用鐵片合成，恰如在第75圖中電樞之下半部然，蓋如是雖不能消滅渦流之全部但可減去其大部分。鐵片由面上之氧化物層或漆或由絹絲紙隔離。尋常鐵依一定方向細分，俾導體內所產之電壓之方向與此方向正交。

在裝有槽電樞之電機中，其極靴大都亦須由鐵片組成。磁通量有通過電樞齒之傾向且常經離開極角之齒帶走。因此在極角處產生渦流。又在極面之下亦可產生渦流，因極鐵內對於齒之感應強度比較對於槽之感應強度為大而最大及最小感應強度之位置隨運轉變動之故。

¹⁾ 渦流損失; Wirbelstromverlust; eddy current loss; perte par courants de Foucault. ²⁾ 懷爾登霍芬提; Waltenhofensches Pendel; Waltenhofen's pendulum; pendule de Waltenhofen.

然在電樞銅內亦可產生渦流，在第76圖中將其故意誇大。如繞組係由帶大橫斷面積之銅條所成，時常當銅條之一稜尚在磁場內時，其餘各稜已不在極之範圍內，圖中下方示一銅條之一側面。在是種導體上部產生之電壓在此部分內惹起電流，後者之大部分經末端連接及外導線網向外導出，但一部分依由點線所示之方向在導體之下部自行閉合。其實在導體下部並無相反之電流方向，但僅有一較小的電密度，所謂皮膚作用¹⁾或表層作用。

為除去電樞銅內之渦流，依斜向截去極角或使之呈圓形或將極與電樞間之空隙在近極角之處放大。如是可惹起一種漸漸減衰之磁場。

在今日常用之有槽電樞中，渦流之生成極微弱。通量幾乎全部通過電樞之齒（見第127圖），而當運轉之際，一部分為之帶走並因而延長。終則磁場迅速切過槽之全橫斷面積，而在電樞導體之各部分內惹起等大之電壓，故渦流幾乎可全部除去。

然有較大運轉速度及同時電樞導體有較大徑度時，縱使在有槽電樞內，渦流生成作用或皮膚作用仍可觀。此時不得不用一種由多數平行並互相絕緣之導線組成之導體。並將其槽內扭轉，如在疊倍爾條狀體²⁾中。

恰如在發電機內然，在變壓器之鐵內亦有渦流損失。

鐵內之全部損失故由磁滯損失及渦流損失合成。為確定此損失，以交流磁化鐵體並測定導入之功率，此功率當時由一功率計之偏向指出，其中一線圈有電流通過而他圈則與電壓相連接。

所謂鐵之損失數字³⁾係指一仟克之鐵當有每秒50週期及1000高斯之最大感應強度時以瓦數計算之全部消耗。在慣用之0.5厘米厚之鐵片中，此損失指數為每仟克鐵約自3瓦以至4瓦。如用含硅之鐵片所謂合金鐵片（其中具有較大電阻），則損失約可減少一半。

普通鐵片因受熱至久，其損失數字增加——鐵之成熟。合金片⁴⁾

1) 皮膚作用; *Skinverdrängung*; skin effect; effect de peau. 2) 疊倍爾條狀體; *Robelstaben*; *Robel's bars*; *barres de Robel*. 3) 損失數字; *Verlustziffer*; loss of calls; *perte des appels*. 4) 合金片; *legiertes Blech*; *alloyed plate*; *tôle alliée*.

之損失指數則不變。

在特殊情形中，渦流有益。如渦流輪掣¹⁾之作用全賴一電磁鐵之極對於運動時一鐵盤內產生之渦流之磁力。

有時利用渦流以阻尼計器。其時將可動之磁鐵懸在一銅器內。磁鐵遂占新靜止位置。如計器含有一個在一銅磁鐵前擺動之可動圈，例如在鏡測電流計中然，則可由捷接線圈以阻尼運動，其時線圈內由擺動發生之電流往往立時使線圈達靜止狀態。

第四章 電 場

31. 電場密度。

恰如在一磁鐵周圍內有一磁場，在帶靜電荷之導體或通電導體之周圍有一電場²⁾。電場之由普通直流電壓惹起者與靜電電場相較極極弱。如用高交流電壓則可發生強電場。

電場之作用，例如同名電之推拒作用，知之已久。較為重要者，在是處恰如在磁場中，為電場之電密度³⁾，亦曰電位移⁴⁾或與磁感應強度相比擬，曰電感應強度⁵⁾。其測定應用電場消長之際似通過介體⁶⁾之單位面積之電流衝動。

例如令一板狀電容器充電或放電，利用電流衝動測定在運動中之電量並以中間層之面積分之。於是得介體中之電密度。其大小以每平方厘米之庫侖數計算並以D表之。為得關於電密度之一直觀的觀念，設想在電容器平行板面之間插入一種與之並行之橫斷面，其左面帶負電，右面帶正電。此時單位面積之電荷曰電密度。

恰如磁密度，電密度在空間亦有一定方向且其方向與力方向相腩

1) 渦流輪掣；Wirbelstrombremse; eddy current brake; frein à courants parasites. 2) 電場; elektrisches Feld; electric field; champ électrique. 3) 電密度; elektrische Dichte; electric density; densité électrique. 4) 電位移; elektrische Verschiebung; electric displacement; déplacement électrique. 5) 電感應強度; elektrische Induktion; electric induction; induction électrique. 6) 介體或介質; Dielektrikum; dielectric; diélectrique.

合。在同處之數密度故亦可依幾何學方法相加而為總密度。

前章中凡就磁力線及磁力管而言者就電力線¹⁾及電力管²⁾而言亦適用，其間惟有一種差別，即電力線及管始自帶正電之面，終於帶負電之面，而磁感應線及管則首尾相接。止在磁通量發生或消滅之際，依據感應定律不但在附近線區內即在介體內亦產生閉合電場線³⁾。

電場線之方向係用電羅盤⁴⁾確定。電羅盤由二枚荷異性電之金屬球所成。二球固定在一軸上而與軸絕緣，電場線方向又可由撒布鐵粉於磁場內決定，恰如依同法確定一磁場之方向然。

電位移通量⁵⁾或電感應通量等於一面與該面正交之位移成分之乘積，電位移既以每平方厘米之庫侖數計算，故電通量⁶⁾之單位為1庫侖， 10^{-6} 庫侖稱曰1微庫侖⁷⁾。

如命 α 表 dF 面上之一垂直線與電位移 D 所成之角，則通量

$$Q = \int D \, dF \cos \alpha \quad (1)$$

吾人故意使通量之單位與電量之單位一致。因此不但可以相同之單位(即庫侖)測通量及電量並可以同記號表示此二者

。由是獲得之便利，即此後可以通過一面之電通量完全代替電量。集在一絕緣導體表面上之電量今可代以介質中之通量。此情形實迎合法拉第之見解⁸⁾，而認若干過程例如一容電器之充電及放電均在介質中進行。絕緣導體無時不保持一重要之特性，即其為電通量之出發點，而縱使其位置變動，該種出發點仍存住。

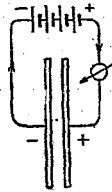


圖77. 充電。

1) 電力線; elektrische Kraftlinie; electric line of force; ligne de force électrique. 2) 電力管或電場管; elektrische Feldröhre (Flussröhre); electric field tube; tube de champ électrique. 3) 電場線或曰電感線; elektrische Feldlinie (Induktionslinie); electric field line; ligne de champ électrique. 4) 電羅盤; elektrischer Kompass; electric compass; boussole électrique. 5) 電位移通量(或電感應通量); elektrischer Verschiebungsfuss; (elektrische Induktionsfluss; electric displacement flux; flux d'induction électrique. 6) 電通量; elektrischer Fluss; electric flux; flux électrique. 7) 微庫侖; Mikrocoulomb; microcoulomb; microcoulomb. 8) 法拉第之見解; Faradaysche Anschauung; Faraday's opinion; opinion de Faraday.

電量在單位時間內之變動所謂位移電流¹⁾今則成為通過介質之通量之在單位時間內之變動，即

$$i = dQ/dt. \quad (2)$$

例如令第77圖中之容電器²⁾充電，正電從電源之正接線螺旋流至右板而負電從電源之負接線螺旋流至左板。上述之過程又可想像正電從左板回至電源之負接線螺旋。由此乃想到一種電流的循環，其中電

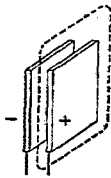


圖78. 充電或放電時穿過以閉線線為邊之面之貫穿率。

循電路流動，雖則中間隔有容電器之間隙層。倘電線中之實際電流在間隙層中經位移電流而繼續。俟充電告終之後，位移電流遂為零而其時祇存位移通量。

位移電流之一特別顯著之現象，例如令一交流電源與一無負載之斷路電纜接觸時發生。此時在電纜內雖電纜並不連接耗電器且又有大絕緣電阻，強度電流流動不絕。

位移電流顯出與通路電流相同之磁效應。設想在第78圖中之介質內置一由虛線圍進之面，依據貫穿定律沿閉虛線之磁壓 $\int h dL$ 與充電或放電時經位移電流穿過之面為比例，申言之，即與單位時間內電通量之變動量為比例。準此則電場中之過程與磁場中之過程全一致。沿一閉虛線之電壓與所包含之磁通量之變動速度為比例，而磁壓則與所包含之電通量之變動速度為比例。



圖79. 板狀容電器之電場線。

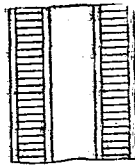


圖80. 管狀容電器之電場線。

例1. 在板狀容電器³⁾中，如略去緣邊作用，電場線之方向到處同向，圖79。密度 D 到處相等而通量或電荷 Q 在一側之板面 F 為

$$Q = DF.$$

1) 位移電流; Verschiebungsstrom; displacement current; courant de déplacement. 2) 容電器; Kondensator; condenser; condensateur. 3) 板狀容電器或曰平行板容電器; Plattenkondensator; parallel plate condenser; condensateur à plateaux.

例如一側面之面積等於 1000 平方厘米，而電荷等於 3 微庫倫 = 3×10^{-6} 庫倫，是以在介質內之電感強度 $D = Q/F = 0.003 \times 10^{-6}$ 庫倫/平方厘米。

2. 在極長管狀容電器¹⁾中，例如在同一軸電纜 (圖80) 中，如不計在表面之緣邊作用，感應強度在介質內到處均同。如命 l 表容電器之長， r 表管狀面之半徑，則面等於 $2r\pi l$ 。通量或電荷為 Q 時與軸相距 r 遠處之感應強度

$$D = Q/F = Q/2r\pi l.$$

例如長為 2 仟米 = 2×10^5 厘米，內導體外半徑等於 1 厘米，則當電荷為 0.0025 庫倫時，內導體表面上之感應強度 $D = Q/2r\pi l = 0.002 \times 10^{-8}$ 庫倫/平方厘米。

此方程式對於在無限細之直線之 r 厘米遠處之感應強度亦適用。

3. 在球狀容電器²⁾中離中心 r 遠之處

$$D = Q/4r^2\pi.$$

如附近並無導體以擾亂電場線平均的配置，則此方程式對於在均

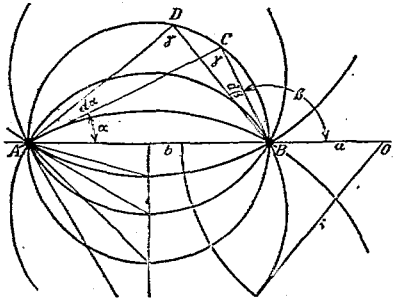


圖81. 在無限細之導線間之電場線。

勻介質內離帶電量 Q 之球心 r 遠處之密度亦適用。此時電場線終於在無限遠處帶反對電荷之內球面。然實際其末端終於帶反對電荷之屋內壁上。在球附近之電場線之配置却不因此而受顯著影響。

4. 假定無限長而橫斷面積無限小之帶異電荷之二導線依第81圖在 A 及 B 二點穿過紙面。C 及 D 點設在一電場線上。此線依導線方向

¹⁾ 管狀容電器; Röhrenkondensator; tub: condenser; condensateur cylindrique.
²⁾ 球狀容電器; Kugelkondensator; spherical condenser; condensateur sphérique.

移動時描出電管之壁。如在第 81 圖中 α 增加 $d\alpha$, 則 β 當增加 $d\beta$, 今在 CD 寬之壁上並無通量通過, 申言之, 從 A 及 B 有反對但相等之通量穿過 CD。由此得 $d\beta = d\alpha$, 或如積分之並以積分常數等於 γ , 則 $\beta = \alpha + \gamma$, 故 γ 角不能變動, 申言之, 電場線為在 $AB = b$ 上之圓弧。

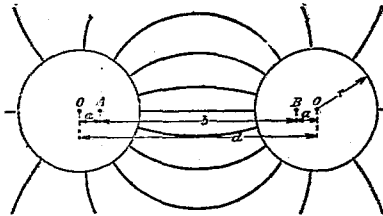


圖82. 二等半徑線之電場線。

今將電場分為若干等通量之管。為此從 A 點引出等距之線若干以達在 AB 線中點之鉛直線, 再以該種交點為中心劃圓一組, 後者均經過 A 及 B, 如以上所示,

各圓均表電場線。其依導線方向移動時在連續二圓間之空間各成一電場管。各圓在 A 及 B 之切線既成互成相等之角, 故各管之通量均相等。

5. 今在第 83 圖中描帶異性電之二長圓直線之電場線。為此利用第 81 圖中之一事實, 即從 AB 延長之 O 點以達各圓之切線 r 之平方均

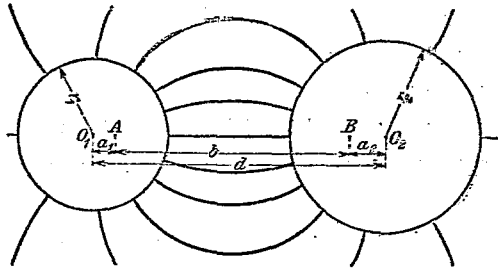


圖83. 二不等半徑線間之電場線。

有等大之值, 申言之, $r^2 = a(a+b)$.

(a)

但以 O 為中心而以切線為半徑之一圓依正交方向橫切各電場線, 故為一等位線。其他一事實即電場線之方向係與其導體表面相正交,

故凡在介質中與電場線正交之面可代以一導體表面所謂等位面¹⁾。如以一相等金屬面代替半徑 r 之筒狀體之表面，申言之，如筒面為一線之表面，電場線向外之分佈並不變動。筒狀體內無電場線，蓋一金屬導體之電荷祇限於表面，在其內部電場係等於零。

設以二無限細之導線代替第 82 圖中之導體並令其依 A 及 B 二電軸²⁾ 移動，再依第 81 圖中之圖法示該二無限細之導線。電場線仍成通過 A 及 B 之圓。

今須確定 A 軸及 B 軸。O 表二中心而 d 表其間之距離。如在第 81 圖中 a 表電軸與中心之距離， b 表二軸間之距離。準此則 $b = d - 2a$ ，是以關於 r^2 之方程式如下： $r^2 = a(d - a)$ ，申言之

$$a = d/2 - \sqrt{d^2/4 - r^2}$$

例如半徑 $r = 0.4$ 厘米，導體中心之距離 $d = 32$ 厘米，是以電軸與導體中心之距離 $a = 16 - \sqrt{256 - 0.16} = 0.005$ 厘米。如由此例指出，導體半徑 r 與 a 相較極小時，電軸可與導體之中線相符合。

如依第 83 圖導體之半徑不等，則

$$r_1^2 = a_1(a_1 + b) \quad r_2^2 = a_2(a_2 + b) \quad a_1 + a_2 + b = d$$

由上列諸式可計算 a_1 、 a_2 及 b 。又當導體距離大時， a_1 及 a_2 均可視為零。

7. 最後確定一坦平傳導面與一同方向但帶反對電荷之導體間之電場線。電場線既均與平面正交，故此等平面可由在第 82 圖中通過 A B 中點而與諸電場線正交之平面代替。今依第 82 圖所示之方法描出導體對於坦平傳導面之像³⁾。

32. 電場強度.

發生電場之原因為電壓。電壓係存在一通電導體之二點間，其除

1) 等位面; Äquipotentialfläche; equipotential surface; surface équipotentielle. 2) 導體之電軸; elektrische Achse von Leitern; electric axis of conductors; axe électrique du conducteur. 3) 像; Spiegelbild; image.

在導體內惹起電流外，又於介質內惹起一電場。然在容電器之端板間及電場中絕緣質之二點間亦存有電壓。故在電場之各點有對每長單位有效之電壓，稱曰電場強度¹⁾。如U表沿l長之電壓，則在均勻電場中，此強度可由下列方程式表示之

$$e = \frac{U}{l} \quad (3)$$

就一般而言，在非均勻電場內 $U = \int e \, dl \cos \alpha$ ，其中 α 表電場強度與微徑路 dl 間之角。如將第3方程式之右邊以電量Q乘積之，則得電功計中之功。沿一長單位所作之功既等於一力，故電場強度為施於一電量單位上之力而可由一電羅盤之振數決定之。

電場強度之單位在實用制中為伏/厘米。例如一容電器之板間距離 $l = 0.1$ 厘米。當電壓 $U = 100$ 伏時，與絕緣質無關係之電場強度 $e = U/l = 1000$ 伏/厘米。

如電場強度超出與絕緣質性質有關之某一定值，則發生電花。例如空氣之介質強度為每厘米 23500 伏特。

33. 介質傳導係數。

某板狀容電器之面積為F，板間距離為l，介質為一任何絕緣質。由實驗知電場強度愈大時(即電壓愈大而板間距離愈小時)，其電密度D愈大，且又與絕緣質有關

$$D = \Delta \frac{U}{l} = \Delta e \quad (4)$$

設想電密度由電場強度發生，則 Δ 當表介質傳導係數²⁾。如電場強度以伏特/厘米計，而密度以庫侖/平方厘米計，則介質傳導係數 Δ 當以庫侖/平方厘米 ÷ 伏特/厘米計。今庫 ÷ 伏稱曰法拉，略稱曰法。介質傳導係數之單位故為1 法拉/厘米。由實驗知就空氣而言

¹⁾電場強度; elektrische Feldstärke; electric field intensity; intensité de champ électrique. ²⁾介質傳導係數; dielektrische Leitfähigkeit; dielectric conductivity; conductivité diélectrique.

$$\Delta_0 = 8.84 \times 10^{-12} \text{ 法拉/厘米} \cdot \quad (5)$$

II. Δ_0 之乘積等於光速之自乘之逆值。如以亨利/厘米表 II。及以法拉/厘米表 Δ_0 ，則光速¹⁾當以厘米/秒計，故等於 3×10^{10} 厘米/秒。

在空氣容電器中如由一別種絕緣質以代空氣，則當有等大電壓或電場強度時，電場密度當等於前時之 ϵ 倍。 ϵ 稱曰介質常數²⁾。

$$\Delta = \epsilon \Delta_0. \quad (6)$$

普通絕緣質如硬橡皮，雲母，玻璃等，其介質常數係在 2 與 10 之間。

例如以 100 伏特之電壓充板狀容電器。如板間距離 $l = 0.1$ 厘米，則介質內之電場強度 $e = U/l = 1000$ 伏特/厘米。故帶有 $\epsilon = 5$ 之介質常數之物質，其密度

$$D = 5 \times 8.84 \times 10^{-12} \times 1000 = 4.42 \times 10^{-10} \text{ 庫倫/平方厘米}.$$

故當 $F = 100$ 平方厘米時，電荷或通量 $Q = 0.044$ 微庫倫。

如以面 F 乘第 4 方程式之兩邊，則得介質中之通量

$$Q = \frac{\Delta F U}{l}, \quad (7)$$

其中 $\Delta F/l$ 有如介質傳導³⁾ 之作用。此方程式可視為關於電通量之歐姆定律⁴⁾。例如在一容電器之平行板間，一部分充滿空氣而一部分填以帶介質常數 ϵ 之玻璃（見第 84 圖）。在空氣處之電壓既與在玻璃處相同，故其電場強度之方程式為 $e_l = e_g$ 。依據方程式 (4) 及 (6)，玻璃中之電場密度等於空氣中之 ϵ 倍。

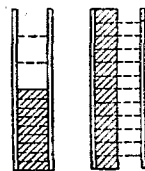


圖84. 圖85.
不同介質。

如平行板間依如圖 85 所示之方法而填充，則玻璃中之密度與空氣中之密度相等，故依據方程式 (4) 及 (6) 在玻璃中之電場強度等於空氣中之 $1/\epsilon$ 倍。

1) 光速度; Lichtgeschwindigkeit; light velocity; vitesse de la lumière.
2) 介質常數; Dielektrizitätskonstante; dielectric constant; constante diélectrique.
3) 介質傳導; dielektrischer Leitwert; dielectric conductance; conductance diélectrique.
4) 歐姆定律; Ohm'sches Gesetz; Ohm's law; loi d'Ohm.

據歐姆定律解釋之，此事實非常明晰。在帶較大介質導電係數之物質中祇消耗總電壓之一小部分。電壓之主要部分係在後面之空氣中消耗，故每單位長之電壓在空氣中較大。職是之故，一空氣容電器之電場強度雖原來遠在23000伏特/厘米之發火花極限之下，但如依第85圖插入一玻璃板，則立生火花，雖然直玻璃板具有大介質強度。

此情形復示凡空間其以帶大介質強度之絕緣物填充者不應再帶空氣層。

電場中之介質導電係數具有與磁場中之導磁係數相同之意義，例如電場線依次通過不同物質時，各折射角之正切間之關係恰如各物質之介質導電係數間之關係(圖45)。

又恰如磁場線，電場線向帶較大導電係數之物質而密集，故第44圖對於電場線亦適用。惟兩者之間程度顯然不同。鐵之介質導電係數雖遠較空氣之導電係數為大，但與鐵之導磁係數相較則甚小。因此之故，電場線並非幾乎依正交方向入帶較大導電係數之物質中，而磁場線則然。

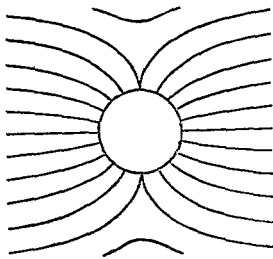


圖86. 在均勻電場中之導體。

若移一金屬導體於此電場內，則電場線始依第86圖垂直進入導體內，蓋其介質傳導係數實無限之大。金屬故成為電場線之完全捷路，而電場在金屬內部等於零。此情形當導體中心空時亦不變。在導體各點間是以並無電壓。電場線終於導體之一側而復在他側發出。因電場線在金屬面上與面正交，故凡高壓三相交流電線中之三導線均帶金屬套，否則電荷隨時變動之三導線之電場線之配置頗不規則，以致絕緣質受不良影響。

34. 電 位.

電位¹⁾為一點對於一無限遠點之電壓。是種電位祇於電壓與電壓沿而測定或計算之路程無關時可存在。在電場中正適應此要求。

求在帶圓橫斷面積之二無限長導線之電場中一點P之電位。依據第72面以導線之電軸代替導線。電軸在A B兩點通過紙面(圖37)。命單位長之電荷為±q。

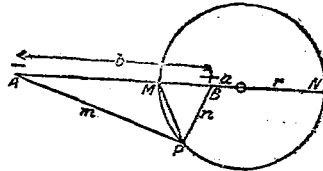


圖37. 二無限細導線之電場。

據第72面含P點之等位面為一帶r半徑之筒狀套。據同面方程式(a)

$$\frac{r}{a} = \frac{a+b}{r} \quad \text{或} \quad \frac{r+a}{r-a} = \frac{a+b+r}{a+b-r} \quad (a)$$

此時由確定在N點之等大電位以代計算在P點之電位。如從N依水平方向向右前進，則先得感應強度而次得與B相距x遠處之電場強度。

$$D = \frac{q}{2\pi x} - \frac{q}{2\pi(b+x)} \quad e = \frac{q}{\Delta_0 2\pi} \left(\frac{1}{x} - \frac{1}{b+x} \right)$$

準此

$$P = \int_{a+r}^{\infty} e dx = \frac{q}{2\pi \Delta_0} \left[\text{對數} \frac{x}{b+x} \right]_{a+r}^{\infty} \times \frac{1}{0.4343} = \frac{q}{2\pi \Delta_0} \text{對數} \left(\frac{a+b+r}{a+r} \right) \times \frac{1}{0.4343}$$

據方程式(a) NA長既經B及M諸和的區分，故(a+b+r):(a+r) = m:n而

$$P = \frac{q}{2\pi \Delta_0} \text{對數} \frac{m}{n} \times \frac{1}{0.4343} \quad (8)$$

35. 電 容.

電量或電通量與電壓之比，謂之電容²⁾。如命U表電壓，C表電容

¹⁾電位; elektrisches Potential; electric potential; potentiel électrique.

²⁾電容; elektrische Kapazität; electric capacity; capacité électrique.

，則通量或電荷

$$Q = GU. \quad (9)$$

凡容電器其中當電壓為 1 伏時有 1 庫侖之通量通過其面者稱有一單位電容。此單位曰法拉¹⁾。1 微法拉²⁾等於 10^{-6} 法拉。

與方程式 (7) 相比較可知電容與介質電導無別，故方程式 (9) 當表關於電通量之歐姆定律。電容是以與電導同法計算。

1. 在帶面積 F 及板間距離 l 之板狀容電器中，電容放為

$$C = \frac{\Delta F}{l} = \frac{\epsilon \Delta_0 F}{l}. \quad (10)$$

由此顯見電容與電導同法計算。例如某容電器其一板在一側之面積為 400 平方厘米。依第 25 圖將 30 同名板依次連接，其兩面之面積 $F = 2 \times 30 \times 400 = 24000$ 平方厘米。距離 $l = 0.2$ 厘米。如中間層含空氣，則據方程式 (10)

$$C = \frac{\Delta_0 F}{l} = \frac{8.84 \times 10^{-18} \times 24000}{0.2} = 0.0106 \times 10^{-6} \text{ 法拉}。$$

2. 當計算電容時常須導入介質電阻³⁾，後者為電容之逆值。在帶軸長 l 之管狀容電器中，例如有時須計算壁厚 dr 而與軸相距 r 之一空筒狀體之介質電阻並由方程式 (10) 求得 C 之逆值。為此須以 dl 代 F ， $2\pi r l$ 代 F 。內半徑為 r_1 而外半徑為 r_2 時，總介質電阻：

$$\int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{\Delta 2\pi r l} = \frac{1}{\Delta 2\pi l} \text{對數} \frac{r_2}{r_1} \times \frac{1}{0.4343}$$

其逆值即等於電容

$$G = \frac{\Delta 2\pi l}{\text{對數} r_2/r_1} \times 0.4343. \quad (11)$$

在內導體之電密度及電場強度於是為

1) 法拉; Farad; farad. 2) 微法拉; Mikrofara; microfarad; microfarad. 3) 介質電阻; dielektrischer Widerstand; dielectric resistance; resistance diélectrique.

$$D_1 = \frac{Q}{2r_1\pi l} = \frac{CU}{2r_1\pi l} = \frac{\Delta U}{r_1 \text{對數} r_2/r_1} \times 0.4343 \text{ 及 } e_1 = \frac{U}{r_1 \text{對數} r_2/r_1} \times 0.4343.$$

今求半徑為 r_2 而內導體之電場強度有最小值時之 r_1 值。為此乃依 r 將分母微分之並以微分商等於零

$$\text{對數} r_2/r_1 \times \frac{1}{0.4343} + r_1 \frac{1}{r_2/r_1} \left(-\frac{r_2}{r_1^2} \right) = 0$$

或對數 $r_2/r_1 \frac{1}{0.4343} = 1$ 。由此得 $r_2/r_1 = e = 2.718$ 或 $r_1 = r_2 : 2.718$ 。

有較小 r 值時，電容或通量雖小，但內導體之面積同時亦極小，電密度或電場強度放大。有較大 r_1 值時二導體之距離過小，故電容或即通量過大。

如以長 l 分方程式(11)，則得單位長之電容

$$C' = \frac{\Delta 2\pi}{\text{對數} r_2/r_1} \times 0.4343. \quad (12)$$

因 $\Delta = \epsilon \Delta_0 = \epsilon \times 8.84 \times 10^{-12}$ 法拉/厘米，1 仟米 = 10^5 厘米。

$$C' = \frac{\epsilon \times 2\pi \times 8.84 \times 10^{-12} \times 10^5}{\text{對數} r_2/r_1} \times 0.4343 = \frac{\epsilon \times 5.54 \times 10^{-8}}{\text{對數} r_2/r_1} \times 0.4343$$

法拉/仟米。

在某 2 仟米長之同軸電纜中，例如內導體之外徑 $r_1 = 1$ 厘米，外導體之內半徑 $r_2 = 1.5$ 厘米，而 $\epsilon = 4$ 。此時依方程式(12)： $G = 2C' = 1.1 \times 10^{-8}$ 法拉。當電壓為 1000 伏時，電荷 $Q = CU = 1100 \times 10^{-6}$ 庫倫。在內導體表面之感應強度及場強度為

$$D_1 = Q : 2r_1\pi l = 0.00088 \times 10^{-6} \text{ 庫倫/平方厘米。}$$

及 $e_1 = D_1 : \epsilon \Delta_0 = 2470$ 伏/厘米。

因面積較大之故，外導體內表面之感應強度依 1:1.5 之比例而較小。故其場強度等於 $2470 \div 1.5 = 1650$ 伏特/厘米。若將 1000 伏電壓沿 0.5 厘米之長不勻分配，則場強度到處為 $1000 \div 0.5 = 2000$ 伏特/厘米。

3. 在空氣中某球之半徑為 r ，其近旁無導電之面與相對立。茲須依方程式(10)計算一空心球之介質傳導係數及其逆值。假定球壁之厚

為dx, 離中心之距離為x, 周圍空間之總介質電阻:

$$\int_r^\infty \frac{dx}{\Delta_0 4\pi x^2} = \frac{1}{4\pi \Delta_0} \times \frac{1}{r}, \text{ 即 } C = 4\pi \Delta_0 r. \quad (13)$$

在上面計算中, 假定該球充電之過程不在球之表面但在無限空間中進行。此時導體不過為介體中之一空間。一大球不因有大表面而有大大電容, 但因周圍空間之阻力不大之故。以電容為一介質電導比較以此為導體表面之容電本頗為適當。若意認電容為一電導, 則愈可想見過程係在介體中而並非在導體表面進行。然導體表面仍有一重要職務, 蓋其依據第99面為通量之源而該種通量之源隨導體而運動。

4. 今計算一長導線之電容。導線半徑為 r (圖88), 是處仍引用電軸 A 及 B 並依第79面計算。依方程式(8), 在 P 點之電位既與在 Q 點者相反對, 故電壓成電位差

$$P_P - P_Q = \frac{q}{\pi \Delta_0} \text{對數} \frac{a+b-r}{r-a} \times \frac{1}{0.4343}$$

準此則單位長之電容

$$C' = \frac{q}{P_P - P_Q} = \frac{\pi \Delta_0}{\text{對數} \frac{a+b-r}{r-a}} \times 0.4343. \quad (14)$$

如 $\Delta_0 = 8.84 \times 10^{-12}$ 法拉/厘米, 則 C' 當以法拉/厘米計。1 仟米長之電容其大為單位長 (1 厘米) 之電容之 10^3 倍。普通可以 $r-a$ 等於 r 並以 $a+b-r$ 等於線之距離 d 。

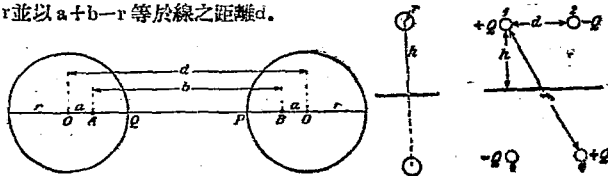


圖88. 同直徑之導體。 圖89. 以地布同線。 圖90. 雙導線。

例如長為10仟米, 距離 d 為50厘米而半徑為 0.5 厘米時

$$C = \frac{10 \times 10^6 \times \pi \times 8.84 \times 10^{-12}}{\text{對數} \frac{50}{0.5} \times \frac{1}{0.4343}} = 0.06 \times 10^{-6} \text{ 法拉} \cdot$$

在以地為回線之一單線輸電情形中，作導線之像並依第89圖以兩者間之距離 $d=2h$ 。又 $\epsilon=1$ 。導線與像間之電容可依方程式(14)計算。今導線與地間之介質電阻僅及導線與像間介質電阻之半，電容加倍。故單位長之電容

$$C^2 = \frac{2\pi\Delta_0}{\text{對數} \frac{2h}{r}} \times 0.4343, \quad (15)$$

6. 為確定一雙線對於地之電容乃依第90圖描同高之去線1及回線2之像3,4。此時在導線1表面之電位同時由1,3及2,4之環之電場而發生。如命 r 表半徑， h 表離地面之高度， d 表導線距離，則 f 依第90圖等於1與4間之距離故等於 $\sqrt{d^2+4h^2}$ ，故1,3及2,4兩環在導線1上所生之電位依第78面第8 方程式為

$$\frac{q}{2\pi\Delta_0} \text{對數} \frac{2h}{r} \times \frac{1}{0.4343} \text{ 及 } \frac{q}{2\pi\Delta_0} \text{對數} \frac{d}{f} \times \frac{1}{0.4343}.$$

其和為導線1之電位，導線2之電位與導線1之電位反對但其數值相等，因而單位長之電容

$$C^2 = \frac{q}{P_1 - P_2} = \frac{\pi\Delta_0}{\text{對數} \frac{2hd}{rf}} \times 0.4343 \quad (16)$$

如 $\Delta_0 = 8.84 \times 10^{-12}$ 法拉/厘米，則 C^2 當以法拉/厘米計。1 仟米長之電容其大為單位長(1 厘米)之電容之 10^5 倍。

36. 電場之能。

設於一容電器上施以自零值逐漸增至 U 值之電壓，容電器遂充電。如命 u 表電壓之臨時值，則電荷之臨時值 $Q_t = C_u$ 。如電壓在 dt 時間內增加 du ，則電荷當增加 $dQ_t = Cdu$ ，而單位時間內流入之電量，申言之，充電電流

$$i = dQ_t/dt = C du/dt.$$

充電時輸入之功故為

$$A = \int_0^U u i dt = \int_0^U C u du = 0.5CU^2. \quad (17)$$

依另一式錄之， $QU/2 = Q^2/2C$ ，其中 $Q = CU$ 表電荷之終值。此功儲蓄而成電場之能¹⁾，放電時復變為電功。例如一電纜之電容為 1×10^{-6} 法拉，電壓為10000伏特時，經儲蓄之電能 $W = 0.5CU^2 = 50$ 焦耳。

今欲計算電能密度²⁾。如在有 F 面積及 l 距離之板狀電容器中略去緣邊作用並如命 D 表感應強度， e 電場強度，則 $Q = DF$ 而 $U = \epsilon l$ 。如在第17方程式中以 $CU = Q$ ，則電能

$$W = 0.5QU = 0.5eDFl.$$

Fl 既表容積，故電能密度。

$$\sigma = 0.5eD. \quad (18)$$

如電場強度以伏特/厘米計；電密度以庫侖/平方厘米計，則電能密度當以焦耳/立厘米計。

第五章 量度制

37. 方程式及量度單位.

1. 物理量間之方程式自然根據一定量度單位。如欲用以表數值的計算，則必須選擇適當量度單位或量度制³⁾。如在方程式中任意選定各單位，則方程式含有一個由各單位而定之比例因數。如欲方程式中不應含有是種因數，則各單位必須互相決定，申言之，各單位除末後之一單位外均任意選定而末後之一單位則隨已選定之單位而決定。例如在 $U = IR$ 之方程式中，設電強度 I 以安培計算，電阻 R 以歐姆計

¹⁾電場之能; Energie des elektrischen Feldes (elektrische Energiedichte); energy of electric field; énergie du champ électrique. ²⁾電能密度; Dichte der elektrischen Energie; density of electric energy; densité de l'énergie électrique. ³⁾量度制; Masssystem; system of measures; système de mesure.

算，則電壓當以伏特計算，故伏特 = 安培 × 歐姆。一整個單位制全據若干基本單位及其相互關係而決定。

1. 實用量度制。在當初由米氏¹⁾說明而近年經華洛脫²⁾採用之實用制中係以厘米，秒，安培及歐姆為基本單位。

一厘米為保存在巴黎之一標準尺之 100 分之一分部。

一秒為一平均太陽日之 86400 分之一分部。

一安培為 1 秒間析出 1.118 毫克銀之電流強度。

一歐姆為長 106.3 厘米橫斷面積 1 平方毫米之一水銀絲之電阻。

此四種單位均故意採定。安培及歐姆單位根據絕對奧斯量度制（見下）而成立。但該量度制既本身亦係故意採定者，故安培及歐姆恰如秒及厘米亦可視為全係故意採定者。由是種基本單位乃導出下列實用制之單位：

量	單位	量	單位
電壓 U	伏特 = 安培 × 歐姆	磁場強度 h	安培/厘米
功率 N	瓦特 = 伏特 × 安培	磁導 Δ	亨利 = 歐姆 × 秒
功 A	焦耳 = 瓦特 × 秒	導磁係數 μ	亨利/厘米
轉矩或扭矩 M	焦耳 = 1/9.81 仟米克	電量 Q	庫倫 = 安培 × 秒
力 P	焦耳/厘米 = $\frac{100}{9.81}$ 仟克	電密度 D	庫倫/平方秒
轉數 n	秒 ⁻¹	電場強度 e	伏特/厘米
磁通量 Φ	伏特 × 秒	電容 C	法拉 = 庫倫/伏特
磁密度 β	伏特秒/平方厘米	介質傳電係數 Δ	法拉/厘米

由應用上列諸單位於一般的方程式中，在計算時毋須再用換算因數。例如在 $P = \sqrt{3} I l$ 之方程式中，感應強度以伏特秒/平方厘米計，電流強度 I 以安培計而長 l 以厘米計，則力 P 當以焦耳/厘米計。

若隨便採用別種單位則須用換算因數。此種因數此時須加入於一般方程式中。在上面 $P = \sqrt{3} I l$ 之方程式中設力應以仟克計，感應強度以高斯計，則當知

1) 米氏; Mic. 2) 華洛脫; Wallot.

$$1 \text{ 仟克} = \frac{9.81}{100} \text{ 焦耳/厘米} \quad 1 \text{ 高斯} = 10^{-9} \frac{\text{伏特秒}}{\text{平方厘米}}$$

於是得

$$P \frac{9.81}{100} = 9.81 \times 10^{-9} I \quad \text{或} \quad P = 10^{-9} \cdot 2 \times 10^{-9} I Z$$

凡方程式其中單位故意選定而與量度制之單位有別者，概帶數字之因數：

在一方程式中如以在一定情形下有效之數值代替一字母則該方程式失其一般的意義而變為算學方程式。如在一算數表之頂行載明， $I = U/10$ ，是種不完全的方程式僅表在某一情形下之數值而自然並不表示物理量間一般的關係。若 I 以安培數計， U 以伏特計，則此式表示有各電壓 U 時通過電阻 $R = 10$ 歐之電流強度。

2. 高斯絕對量度制。在高斯絕對量度制中含厘米(長)，克¹⁾ (質量)及秒(時間)之三基本單位，所謂絕對量度單位²⁾。

根據此三基本單位而導出之力單位曰達因³⁾ = 1克厘米/平方秒 = 1/981000 仟克(公斤)，其中仟克為工程上的力單位。功之單位曰爾格 = 1 厘米達因⁴⁾ = 10^{-7} 焦耳。

在空氣中相距 1 厘米之二點極間作用之力定為一極之強度單位⁵⁾，曰單位極⁶⁾。由假定 1 極單位有 4π 力線乃導出通量之單位及感應強度之單位。通量強度之單位曰 1 馬克士威或一力線，而感應強度之單位曰高斯。電壓之單位此時為 1 力線/秒 = 10^{-9} 伏特。

由 $N = UI$ 之功率方程式得高斯制中電流強度之單位。

上列諸單位，如 1 高斯及 1 馬克士威常用於電磁學中而電感係數之單位，即 1 厘米 = 10^{-9} 亨利，則往往用於高頻率工程中。

因故意使 1 安培等於高斯單位之十分之一分部及 1 伏特等於 10^9 高

¹⁾ 克; gramm; gram; gramm². ²⁾ 絕對量度單位; Einheiten in absoluten Mass; units in absolute measure; unité du système absolu. ³⁾ 達因; Dyne; dyne; dyne. ⁴⁾ 厘米達因; Zentimeterdyn; centimeterdyne; centimètradyne. ⁵⁾ 極之強度單位; Einheit der Polstärke; unit of pol strength; unité de l'intensité de Pól. ⁶⁾ 單位極; Einheitspol; unit pole; pôle unitaire.

斯單位。此二實用單位係由絕對單位導出。

絕對制與實用制之重要差別在於磁感強度及磁場強度之因次及單位均故意選定並以一純粹數值代導磁係數 μ 。故根據絕對制之方程式如 $\mathcal{H} = \mu \times 0.4\pi \times Iw/l$ ，僅為一數值間之方程式而並非為物理量間之方程式，其中 \mathcal{H} 表高斯， I 表安培及 l 表厘米。

3. 靜電量度制·靜電量度制¹⁾ 亦根據厘米，克，秒之基本單位。電量之靜單位為空氣中作用於相距 1 厘米之另一相等點電量而惹起 1 達因力之電量。

如經馬克士威²⁾ 由試驗確定，此靜單位僅及絕對單位之 3×10^9 分之一。然 3×10^{10} 既為以厘米/秒計之光速度，故馬克士威 漸定光為一種電磁現象而除光波外亦必有電波發生。此事實於若干年之後經赫芝³⁾ 徵實。

若依羅蘭特⁴⁾ 之試驗令一環充電致環周每厘米之長有一靜單位電量之電荷並令其旋轉至有 3×10^{10} 厘米/秒之圓速度，則環可有與帶一絕對單位之電流強度之循環電流等強之磁效應。

今使電壓及電容之靜單位變為相當實用單位，得

$$1 \text{ 靜電壓單位} = \frac{1 \text{ 爾格}}{\text{電量靜單位}}.$$

今 1 爾格 = 10^{-7} 焦耳而電量之靜單位等於 $\frac{1}{3 \times 10^9}$ 絕對單位。故等於 $\frac{1}{3 \times 10^9}$ 庫侖。由此得

$$1 \text{ 靜電壓單位} = 10^{-7} \times 3 \times 10^9 \frac{\text{焦耳}}{\text{庫侖}} = 300 \text{ 伏特}.$$

$$1 \text{ 靜電容單位} = \frac{10}{3 \times 10^{10}} \text{ 庫侖} : 300 \text{ 伏} = \frac{1}{9 \times 10^{11}} \text{ 法拉}.$$
 因在靜

電制中介質傳導係數僅為一純數，電容之因次為一長之因次，而其單

1) 靜電量度制; elektrostatische Maßsystem; electrostatic system of measures; système de mesure Electrostatique. 2) 馬克士威; Maxwell. 3) 赫芝; Hertz. 4) 羅蘭特; Rowland.

位為 1 厘米·是以 1 厘米 = $\frac{1}{9 \times 10^{11}}$ 法拉·

第六章 直流電樞

38. 帶雙裂環換向器之雙T式電樞¹⁾及其繞法²⁾。

據法拉第於 1831 及 1832 年間在 “Experimental reserches on electricity” 之題名下發表之工作遂知一導體在磁場內運動時惹起電壓現象。約在 1851 年間，此現象在西門子雙T式電樞(圖91)中有其最大的應用。此電樞含有一鼓形鐵，在其槽內置一由絕緣銅線所成之繞組。此繞組與一雙裂環換向器³⁾相連接。如令鼓體於一磁鐵之極間旋轉，則槽內之線橫切磁場以致在線內發生電壓。

在第91圖中連接成羣之線所謂圈邊係正對極之中點，而在是處橫切一均勻磁場。依據法拉第(見第40面)游泳定則，其右旋時線內產出之電壓之方向在北極前為自前向後而在南極前為自後向前。一匝之兩

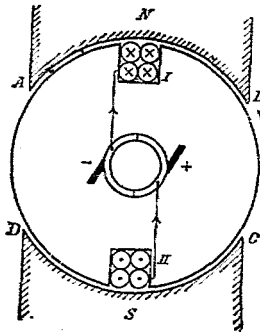


圖91. 雙T式電樞。

半內之電壓故首尾相接而在各匝內均然。

圈邊 I 離開北極區時，電壓逐漸降至零值。以後進入南極區時，電壓方向倒轉。在線圈內於是發生交變電壓。

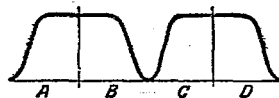


圖92. 電流依時間變動之曲線。

1) 雙T式電樞; Doppal-T-Anker; double T armature; induit en double T.
2) 電樞之繞法; Ankerwicklung; armature winding; enroulement d'induit.
3) 換向器或回轉流器; Kummulator (Stromwender, Kollector); commutator (current reverser); commutateur (inverseur de courant).

當圈邊在極弧前之際，電壓近於均勻。如命 ρ 表極下之感應強度， l 槽內導線之全長， v 表圓速度，則在該時間內產生之電壓依方程式(5)（見第10面）為 $E = \rho l v$ 。

設將換向器之二半經刷¹⁾與一外電路相連接。現今一般所用之刷大都由炭條製出(炭刷²⁾)，而不再為如當初之線刷。如為簡單起見，換向器在圈面內對分，則刷必須裝在中性帶內，申言之，必在與極之縱方向正交之電樞直徑之二端上。此後如線圈內電壓之方向變換，則線圈與刷連接之末端同時亦交換，申言之，改與外線路之其他接線螺旋相連接。職是之故，在外線路內電流方向恆不變。故線圈內之交流在外線路內變為僅強度變動之直流。槽並不過分寬時，電流隨時間而變之強度如第92圖所示。

39. 二極環形繞組及鼓形繞組。

為令外電路電流之方向及強度均不變動，必須應用多數槽以代二槽且換向器亦須分為多數部分(多裂環換向器³⁾)。此情形當初在1860年見於柏西諾梯⁴⁾之環形電樞中。環形繞組⁵⁾以後在1872年由赫夫涅·阿登內克⁶⁾發明之鼓形繞組⁷⁾代替。雖然今日往往說起環形繞組，蓋為觀察一般情形在環形繞組中比較在鼓形繞組中方便。

環形繞組為一繞在一鐵環上之閉螺旋。其在第93圖中由八個各含二匝之線圈所成。然實際線圈之數尚遠多於是。各圈皆依同向而繞。在延長軸上設由黃銅或銅製出之四裂環換向器，後者依軸之方向分為與線圈同數並互相絕緣之換向片或整流片。

今以線連接各圈並由各接點接出一線以達其前之換向片，或將一圈之末端直接導至一片而在是處與次圈之起端相連接。

1) 刷; Bürste; brush; balai. 2) 炭刷; Kohlebürste; carbon brush; balai de charbon. 3) 多裂環換向器; mehrteiliger Stromwender; split ring commutator. 4) 柏西諾梯; Pacinotti. 5) 環形繞組; Ringwicklung; ring winding; enroulement annulaire. 6) 赫夫涅·阿登內克; Hefner-Alteneck. 7) 鼓形繞組; Trommelwicklung; drum winding; enroulement à tambour.

若令環旋轉於一電磁鐵之極間，則繞組之線橫切磁場。磁場線既穿環之鐵體進行而在環之中心空處幾乎並無磁場，故磁場線僅在被環

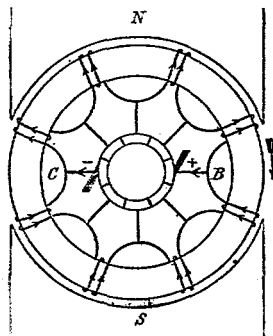


圖93. 各圈均在電路內。

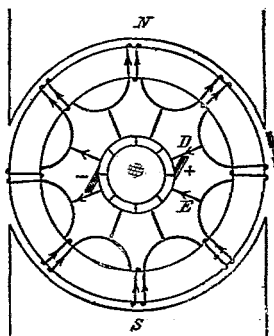


圖94. 二側各有一圈被短接。

之外線橫切。為表示電流方向茲處不依法拉第游泳定則由置矢首及矢尾標記於導線橫斷面內但由置矢形標記於端接上表明之。在右轉之發電機中電流在前端接內依自南極以至北極之方向流動。

第93圖中之矢形標記表明電樞上半部及下半部之兩等電壓相會於B點。此二電壓互相對抗並在發電機內互相抵消。今設在B,C二處各置一刷並以一外導線聯絡之，則電流在B處離開發電機。此後電流經過外導線而在C處復入機內，再分二路經過繞組而流向B處。故在B處之刷為正刷在C處之刷為負刷。換向片間之絕緣正對所屬之線圈，而刷則在與感應正交之直徑，即在中立帶¹⁾D中。

如線圈及換向片之數頗多，則在極前隨時有等多數之線，而電壓在各瞬間均等大。

若當電樞旋轉之際，二刷同時分別在二換向片上(見第94圖)，電壓亦不變。此時在中性帶上之二線圈經刷捷接故不在電路內。電流直接從D及E流至正刷。若刷之位置準確，經捷接而不在電路內之圈無

¹⁾ 中立帶; neutrale Zone; neutral zone; zone neutre.

磁場線可切，是以其捷路¹⁾對於電壓不發生影響。且因圈數多之故，經捷接開去之電路中之一線圈對於電樞電阻亦無甚影響。

設依第95及96圖繞一圈或多數圈於環上則成一多路繞組²⁾，如以圈數計之捲繞進展之節與圈數有一公分數者，則所成之繞組曰多重閉繞組³⁾。第95圖示兩個互相分離但各自成通路之繞組

1 3 5 7 9 11 1 及 2 4 6 8 10 12 2。

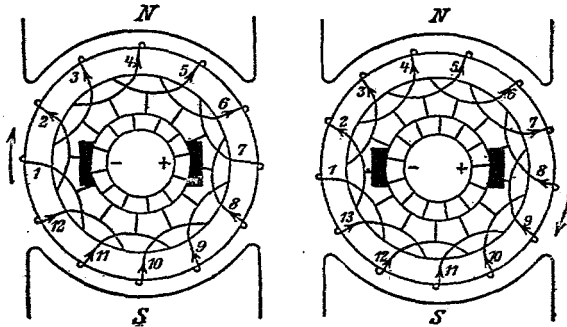


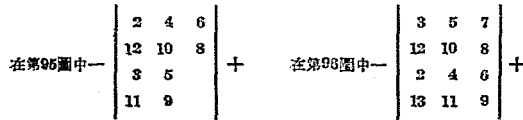
圖95. 多路的二重閉者。

圖96. 多路的一重閉者。

如繞組節及圈數並無公分數者，則所成之繞組曰單重閉繞組⁴⁾。例如在第96圖中之順次為

1 3 5 7 9 11 13 2 4 6 8 10 12 1。

設在繞組上記入表電流方向之矢線，遂知電流分四路流動，而兩刷同時必至少接觸二換向片。在所示之瞬間電流之循環



1) 捷路; Kurzschluss; short circuit; court-circuit. 2) 多路機組; mehrgängige Wicklung; multi-circuit winding; bobinage à circuit multiple. 3) 多重閉繞組; mehrfach geschlossene Wicklung; multiple closed winding; bobinage fermé multiple. 4) 單重閉繞組; einfach geschlossene Wicklung; simplex enclosed winding; bobinage fermé simple.

今轉而討論鼓形繞組。恰如在環形繞組中，此繞組亦含有一組線圈，後者互相連接而其末端各與一換向片相連接。線圈之數故與換向片之數相等。在圖中所示者其數遠較實際情形中為少。

在大電機中各圈祇含帶條狀橫斷面積之一匝（條形繞組¹⁾）。在小電機中每圈含有多數匝，然在圖中往往僅表明一匝。繞組先沿鼓體之周面（電樞面）配置，以後橫貫末端而再回至周面。

各圈含有在周面上之二圈邊²⁾。如一圈之二圈邊相對而其間之距離所謂圈節距³⁾或圈之寬度適等於電樞之直徑或在多極機中等於一極節距⁴⁾者，則是種繞組曰整節繞組⁵⁾。但若圈之寬度比較直徑或極節距為大或小，則成為短節繞組⁶⁾。其弦必須夠大，俾通過電樞周面之通量幾乎全部包含在線圈內。

往日通用之光繞組⁷⁾其圈線係在鼓體之周面。今日常用之有槽繞組⁸⁾其線圈係預先繞在一型上致呈必須的形狀而以後置在電樞鐵之槽內。由此種型繞圈⁹⁾所成之有槽繞組製作較易而價亦較廉。用有槽電樞¹⁰⁾之其他利益為其線之較良的利用，繞組較妥的按置及較小渦流損失（參考第67面）。

在常用之雙層繞組¹¹⁾中，每槽上下含圈線二層。一圈之二邊其一曰圈之始部，係在槽之上部，其他日圈之末部，係與始部相距一極節距而係在槽之下部。在一槽內且常有多數平行圈邊（見第97圖，又參見第110圖）。一層平行圈邊係連接在相隣之換向片上。至在槽內每層含有一條或多數條在接法上不發生影響。

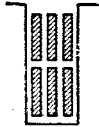


圖97. 圈邊。

1) 條形繞組; Stabwicklung; bar winding; bobine en forme de barres.
 2) 圈邊; Spulenseite; coil side; côté de bobine.
 3) 圈節距; Spulenweite; coil pitch; pas d'une bobine.
 4) 極節距; Polteilung; pole pitch; pas du pôle.
 5) 整節繞組; Durchmesserwicklung; full-pitch winding.
 6) 短節繞組; Schenwicklung; fractional pitch.
 7) 光繞組; glatte Wicklung; smooth winding; bobinage lisse.
 8) 有槽繞組; Nutwicklung; slot winding; bobinage à rainures.
 9) 型繞圈; FormsPule; form wound coil.
 10) 有槽電樞; Nutanker; slotted core armature; induit à rainures.
 11) 雙層繞組; Zweischichtwicklung; double layer winding; bobinage à deux couches.

在上面之一圈邊係與在下面但屬於另一圈之一圈邊共占電樞周邊之某一磁場。是種磁場帶連續性而上下二圈邊係用磁場之號碼表明（參考第110圖）。在編順次時將上圈邊用活體數字表明，如槽內每層祇含一圈邊，則磁場與槽相符合。

一圈之二圈邊相連於鼓體之端面成爲圓首¹⁾，故圈首係在端面上，或如在殼式繞組²⁾中，則在鼓體周面延長之面上。每圈首含有二部分。此二部分恰如二連續圈之端接係在與軸正交之不同面內，故二圈首或端接可交叉位置

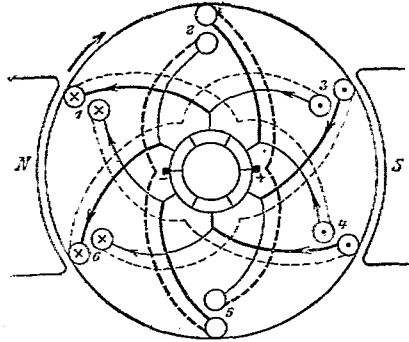
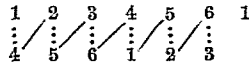


圖98. 帶偶數圈之二極整節繞組。

但並不接觸。在前端面上之前端接係與上圈邊相連接並係用粗線表明（參考第98圖）。至在後端面上之圈首係由虛線表明。其由粗虛線表明者係指經一刷捷接之圈。

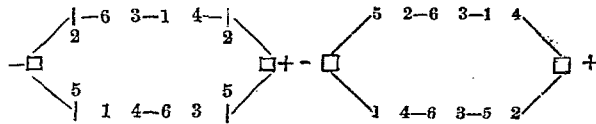
第98圖示一帶6圈之二極繞組。其6圈係置在6槽內。一圈之二圈邊例如在後端經虛線連接者之1（上）及4（下）係正相對立故構成整節繞組。與圈1 4連接者爲圈2 5，其中間經過帶換向片之端接4 2。各圈如是輾轉連接，終則繞組自行捷接。圈間連接順次如下：



其中鉛直虛線連接表示圈節距或圈首而與後端面上之虛線相當。斜線表兩圈在前端面上經過換向片之連接。

1) 圈首; Spulenköpfe; coil end; tete de bobine. 2) 殼式繞組; Fasswicklung (Mantelwicklung; shell type winding; bobinage à enveloppe.

茲令電樞依時針方向旋轉，電流於是在北極前自前向後流動，申言之，在前端面上電流自南極一方面流向北極一方面。在圈邊線上及端接線上之矢線標記即明示此情形。在中立帶內幾場 2 及 5 不帶矢線標記，因其處線圈被捷接而圈內不帶電流。在由圖表示之瞬間，圈 2 5 及 5 2 (其圈首由後端粗虛線表示)各經一刷捷接。刷之位置如圖中所示。此圖既表一發電機，故電流由負刷導入機內。此後電流分二路通過繞組成一循環如下圖左：



當刷祇與一換向片接觸時，各圈電路及電流循環立即發生變動，示之如上圖右。

如將周面展開則得第99圖。此圖表示當時線圈並不全數皆在電路內。同槽之上圈邊及下圈邊在圖中係在同處表出。繞組依矢首所示之方向在紙面後之極前並在固定刷前移動。

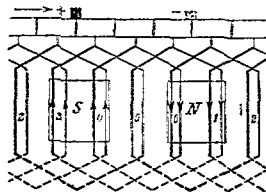


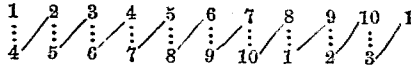
圖99. 鼓面繞組之展開¹⁾。

設若一極對之槽數為一奇數，則如第 100 圖所示，一圈並不包含一整個直徑。同時當刷僅與一換向片接觸時，二刷先後被捷接。然常通刷與多數換向片接觸，故縱使在第 100 圖之繞組中同時亦有線圈被兩異名刷捷接。

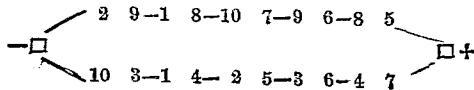
為免除火花，在同槽內不應置經異名圈捷接之圈邊，此可由短節繞法除去之。

在第 101 圖中例如從 1 出發不如在整節繞法中向 6，又不向 5 但向 4 而與圈 1 4 以後與圈 2 5 連接。其順次如下：

¹⁾鼓面繞組之展開; Abwicklung der Trommel.



如記入電流矢線標記，則得電流循環如下：



經異名刷連接之圈此時不再在同槽內。

在短節繞組中，凡在中立帶內之線例如在3, 4, 8 及 9 槽內之線帶反對電流。此實為一利益，蓋電樞之總磁效應因此可減少(參見第46節)。然圈之寬度或圈節距與直徑之差不應過大，否則為免除火花而裝設之換向極必相距過分之遠。

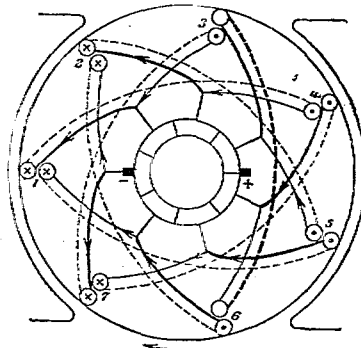


圖100. 帶奇數圈。

40. 多極迴線繞組¹⁾。

發電機尺度增加之後，二極磁鐵樞之形狀遂呈過分畸形之外觀，且因機身狹長之故，對於透氣頗為不良。加以因電樞電流之磁效應，一極前之電流

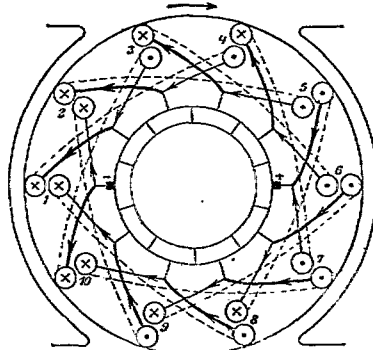


圖101. 短節繞組。

¹⁾ 迴線繞組; Schleifenwicklung; loop winding; enroulement à boucles.

線數，申言之，即一線之電流強度與在一極前之線數之乘積不應超出某一定值。終則在帶強度電流之發電機中為防運轉時發生火花及渦流亦有將電樞繞組由應用一多極磁鐵樞分為多於二路之必要。

先設想在一四極磁鐵樞內之一普通單路環形電樞（見第102圖）。

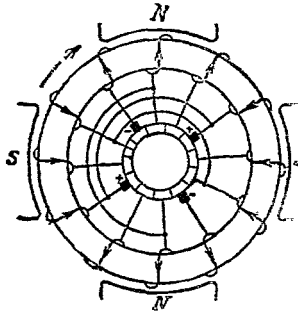


圖102. 帶均等連接之環形電樞。

磁鐵樞依法激發之後，其異名極依次排列。如為右轉，在繞線上記入電流矢線標記，則知須依所示之位置裝二正刷及二負刷。同名之刷互相聯絡而與外線路之相當端鈕相連接。此時電樞電流分為四分路流動。如命 p 表極對之數， a 平行電樞分路之半數，則在單路環形繞組中 $a=p$ 。

在帶迴線繞組之多極鼓形電樞中，每圈帶有在相反極前之二圈邊，其一邊曰圈之始部，其他曰末部。在第103圖中例如線1上為第一

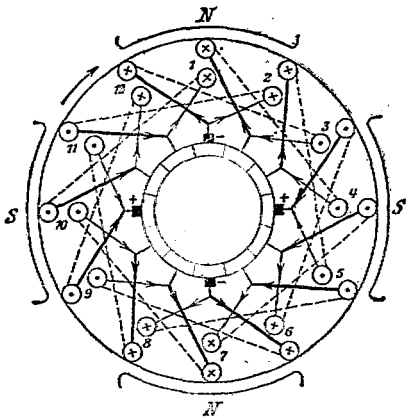


圖103. 帶迴線繞組之一四極鼓形電樞。

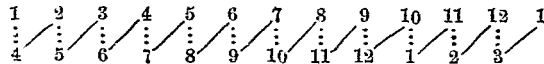
圈之始部，線4下為其末部。此線圈與第二圈之始部相連接。在第103圖中例如線4下與線9上相連接。依次繞成之各圈之始部均平行排列。多極鼓形繞組完全與環形繞組相膾合。若設想成末部之圈邊被廢棄或與始部相併，則得環形電樞之依次排列之外圈邊。恰如在環形電樞中，在帶迴線繞組之

鼓形電樞中，電路之半數或即刷之半數等於極對之數，申言之，即 $a = p$ 。故迴線繞組適於強度電流，凡大電機大都用之。

設圈正包含一極節距，則成爲整節繞組，否則曰短節繞組。

圈數可任意選定，但爲使電流換向時不發生火花，此數須可由極對之數分盡。第 103 圖示一帶迴線繞組及 12 線圈之四極鼓形體。線圈係設在 12 槽內。舍一始部圈邊及一末部圈邊之各磁場復連續記明。其中由虛線表明之圈首舍全極節距，故此繞組爲一整節繞組。

各圈邊編號之後，其順序如下：

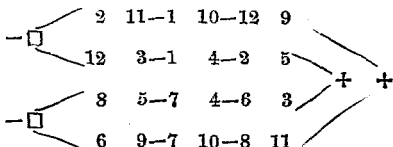


如載入電流矢線記號，

可知在由圖所示之瞬間

，電流分四路流動。

轉動 $\frac{1}{24}$ 之一轉後，



在 11, 2, 5 及 8 諸磁場內之圈邊同時均被捷接。

諸電樞分路之圈邊在鼓形繞組中分配在一極對之前而在環形繞組中各在一極之前。設極對強弱不同，則各分路內之負載不等。例如在一四極發電機中，在一極對之前產生之電壓 $E_1 = 115$ 伏特，而在其他一極對之前 $E_2 = 114$ 伏特。設第 102 圖中各在一極對前之二分路（成爲一組）之電阻命爲 $R = 0.05$ 歐姆而總電流等於 100 安培。二組分路之刷間電壓既相同，故在二組內之電流 I_1 及 I_2 與方程式 $E_1 - I_1 R = E_2 - I_2 R$ 相應。準此， $I_1 - I_2 = 20$ ，申言之，有 100 安培之總電流時， $I_1 = 60$ 及 $I_2 = 40$ 安培。

在較大電機中是以至少須設法免除刷處之不整一，爲此用一均壓連接¹⁾或等位連接²⁾，後者將相距二極節距之換向片依第 102 及第 104

¹⁾均壓連接; Ausgleichverbinder; equalizer connection; connexionégall-satrice. ²⁾等位連接; Equipotentialverbinder; equipotential connection; connexion equipotentiele.

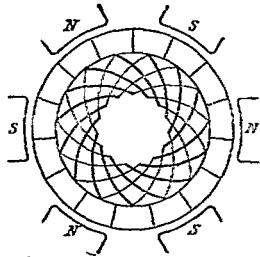


圖104. 帶均壓連接之換向器。

圖相隔或全數互相連接。換向片之數故須可由極對之數分盡。

極對相同時，在經連接之換向片間並無電壓，故在均壓連接內不帶電流。電流分配不等時，均壓連接容納電流之過剩部分，故在各刷流到等強之電流。

又與同名刷相接觸之換向片同時亦經均壓連接聯絡。若全數換向片均裝均

壓連接，則其時祇須用二刷。然此種裝置惟間或用之。

如在第103圖中，均壓連接係設在通至換向器之線上或如在第104圖中在換向器之面電樞之一側而與換向片直接相連接，或設在前後端之繞組上。

在四極鼓形電樞中，各分路內之電樞電流分配不勻。因其磁效應有平衡極之不整一作用，故電流在分路內之不均勻的分配並不顯著。然為防運轉時發生火花，仍須設若干均壓連接。

41. 多極波形繞組¹⁾。

在迴線繞組中連接屬於同極對之先後線圈，但在多極波形繞組中則依第105及105圖連接屬於次一極對之同位置之線圈。依此方法在一巡迴間串聯 p 數之圈。此法與對於二極機之一圈予以 p 倍之匝數相同。在第105圖中例如含1,5及9諸圈之巡迴係與一個三倍匝數之圈相等，其線匝展開在1至13之間。又在第106圖中含1,6及11諸圈之巡迴係與展開在1至3間而與含有3倍匝數之一圈相等。一巡迴之各圈對於在前面之圈在磁場中略許移位，而諸移位之總和等於一巡迴之總移位。

在一巡迴之後，或通過 p 數圈之後，如在第105圖中，即達與出發

¹⁾ 波形繞組；Weilenwicklung wave winding; bobinage à la forme d'onde.

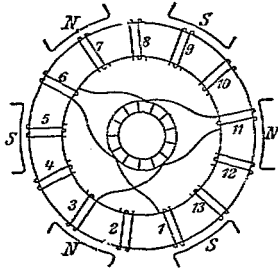


圖105. 波形繞組(a=1)

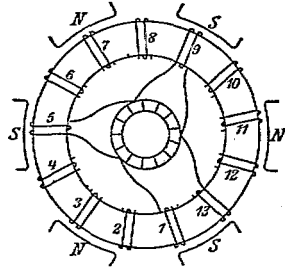


圖106. 波形繞組(a=2)

點直接隣近之位置，則此繞組當與單路二極繞組等值。若祇能於通過 p 數同位圈之後方可達到初圈之次一圈，則此時如在單路二極繞組中成二電分路，各路之圈邊分配在全數極之前，刷亦祇須二枚，然通常如在迴線繞組中大都設 2p 刷，各刷互以一極節距相隔。

反之，若在一巡迴之後即遠離出發圈 a 個圈始部遠之位置，則該繞組與依第 95 圖及 96 圖之多路二極繞組等值。其中如多路二極繞組中然，亦分為 2a 電分路。在第 106 圖中如自 1 開始向 3 巡迴，申言之，a 等於 2 而繞組含有 2a = 4 電分路。此時裝 2a 刷已夠用，但仍可裝 2p 刷。

此繞法對於環形體及鼓體均適用。如命 S 表圈數或換向片數，2a 電分路數而 2p 極數，則用環形電樞時以圈數計而用鼓形電樞時以圈始部計或在二情形中均以換向片數計之繞組節距¹⁾ Y 係依愛爾諾方程式

$$pY = S \pm a \quad (1)$$

計算。下符號在非交叉繞組(圖 105)中適用而上符號在交叉繞組(圖 106)中適用。因 S 及 Y 無公分數，該繞組為單重閉繞組。

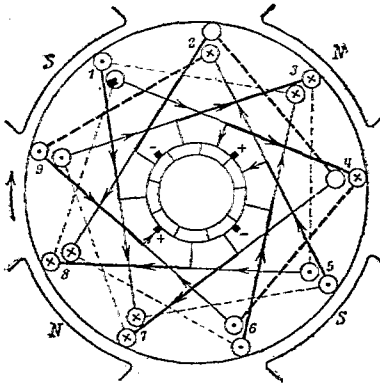
在鼓形電樞中，繞組節距含有相似之二部分。在後端面之一部分例如第 107 圖中之 1-3 曰圈節距而經過換向器在前端面之部分例如第 107 圖中之 3-6 為連接一圓之末部及次圈之始部之連接節距。自 1 經 3 及換向器以達 6 之全節距成一繞組節距。繞組節距係依圈始部之數或

¹⁾ 繞組節距; Wicklungsschritt; winding pitch; pas d'enroulement.

換向片之數計算，故等於 $6-1=5$ 。

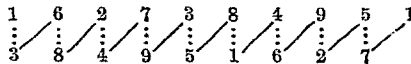
在常用之雙層繞組中一圈之始部與另一圈之末部上下重疊。此時

含有上下二圈邊之磁場亦連續並在是種磁場中計算節距 Y 。



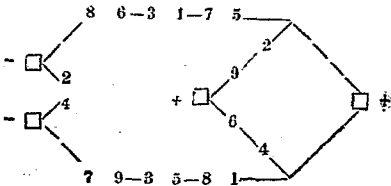
第107圖示一帶 $S=9$ 圈及 $2a=2$ 電分路之波形繞組。每槽合二圈邊。由方程式1, $S=9, a=1$ 及 $p=2$ 時, $Y=(S \pm a)/p=5$ 或 4 。如選定節距之數為 5 , 後端分節距所謂圈節距等於 2 , 前端分節距等於 3 。於是成一順序如下:

圖107. 帶二電分路之四極波形繞組。



今設想設四枚各以一極節距相隔之刷並使電流由1及5流向一刷，後者被覆在二換向片上。此刷係在圖中上方右角，在所示之瞬間串聯之4及9二圈被捷接。又二負刷捷接圈2、4。各圈在後方之圈首係由

粗虛線表示。其電路循環示之如左。



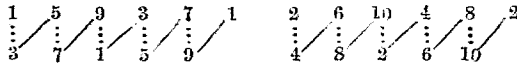
圈之電阻與刷之接觸電阻或過渡電阻相較既極小，在2、9及在4

6 圈內有電流通過而電樞電流幾乎平均分配在兩正刷間。

如循一電分路之圈邊順次觀察，可知其圈邊分配在諸極之前。其對於極之位置逐漸變更，是以與一沿一極對分配之電分路相等。第10

8 圖示展開在一平面內之繞組。其中被正刷連接之圈係由粗線表明。此種圈祇帶約一半強之電流。

第 109 圖示一帶 10 圈及四電分路之 6 極鼓形電樞。據方程式(1)，當 $S=10$, $p=3$ 及 $a=2$ 時, $Y=(S \pm a):p=(10 \pm 2):3=4$, S 及 Y 既有公分數 2, 故其繞組二重閉繞組。如選二分節距各等於 2, 則得一順序如下:



從 1 上開始於 3 全節距 ($p=3$) 之後即達 3 上。各全節距包括在後之圈節距及在前之連接節距。3 上既為開始後第二圈始部, 故 $a=2$, 申言之, 此繞組含有 $2a=4$ 電分路。

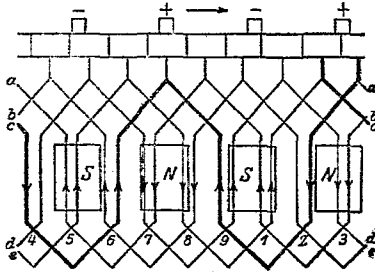
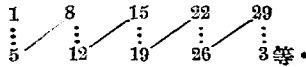


圖 10S. 展開後之波形繞組。

又第 110 圖示一 8 極波形繞組, 其中帶有 $2a=4$

電分路。圈數或換向片數 $S=30$, 各槽內平行圈邊之數等於 3, 繞組節距 $Y=(S \pm a)/p=8$ 或 7, 今若選定 $Y=7$ 並選後方分節距等於 4, 前方分節距等於 3, 後方分節距之數於是不能由槽內平行圈邊之數分盡而圈節距 (在後方) 是以不等長 (梯形繞組)。其順序如下:



為便於檢視電路循環及圈之捷接, 將繞組還原於一 2 極代表圖 (圖 111) 上。在此圖中以圈代圈邊而各圈有上圈邊之號數。與上圈邊連接之換向片以上圈邊之號數記出。此時將換向器分為 p 數等分部, 各與一變極節距相當。終將各分部依上下排列而於下面再加添第一分部。在是處 $p=4$, 故共有 $p+1=5$ 列。

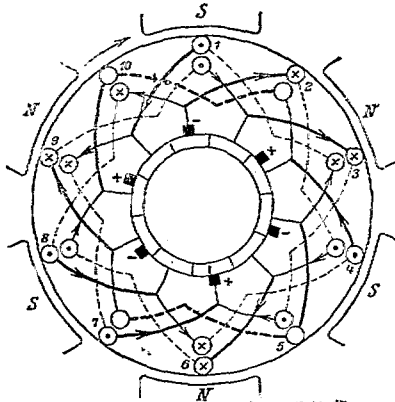


圖109. 帶四電分路之8極波形繞組。

在一繞組巡迴中
依次連續之換向片
此時沿一斜線而上下
位置，例如在第 111
圖中，換向片 4, 11,
18, 25 及 2。繞組當時
依鋸齒形進展，例如
從換向片 10 經過 17,
24, 1 而至 8, 自此向直
接對上之最上列之第
8 換向片，復由此經
過 15, 22 等。

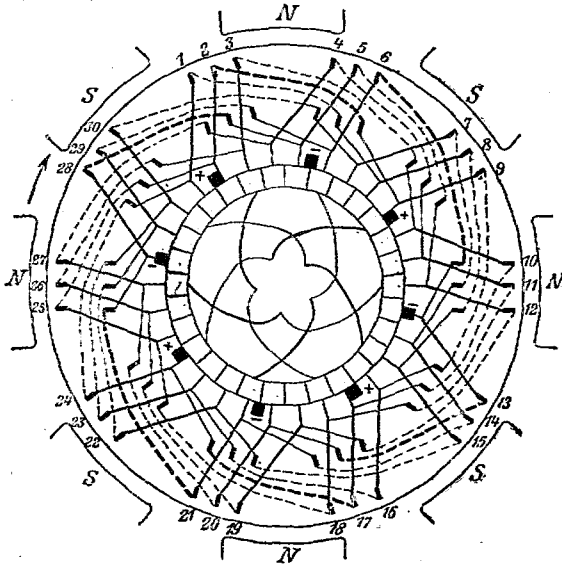


圖110. 帶四電分路及均壓連接之8極波形繞組。

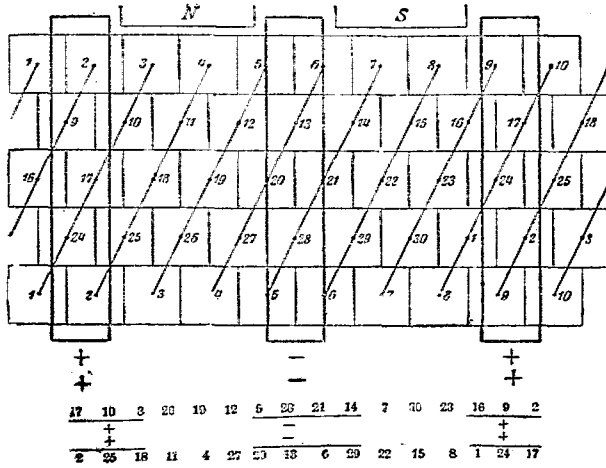


圖111. 二極代表圖。

在 p 節距之間，申言之，在全一週之間跨過 a 換向片，故在第 111 圖中上下二換向片之移位等於 a/p 。

各圈成換向片間之連接。3 及 10 換向片間之斜線指線圈 3 7，後者經過換向片 10 與圈 10 14 相連接。

同名之刷既重疊位置，故可連接而為被在各列上之一刷。此時顯然表出繞組分二路或尋常分 a 路在刷前滑過，而在一刷內導入之電流向左右分為 $2a$ 分路（參考第 111 圖下方）。今又可容易決定被連成一總刷之各同名刷將若干線圈捷接而成一環，其被正刷捷接者為圈 10（在 10 及 11 之間），17 及 24，再向後經刷回至 10。被捷接之各圈亦帶電流。故電流一部分直接而一部分經由一被捷接之圈導入於電樞分路內。

在波形繞組中，一電樞分路之圈邊雖然分配在各極上，因而極之不均一可無損礙，但其中仍須用均壓連接。此種連接自然僅當電分路之數多於二時用之。凡相距等遠並對於極有等相對位置之 a 換向片

均經連接。圈數或換向片數及極對數故必須經 a 分盡。當槽內有多數相並圈邊時，若槽數能為 a 分盡，則亦有利，蓋如此可毋須將槽內各異位圈邊連接也。

第在 110 圖所示之繞組已適應此種條件。凡以 $S/a=30/2$ 換向片相距之每兩換向片故可經一均壓線連接之。是種連接祇須表出其一部分。在第 110 圖中例如祇表出其三分之一部分。經連接之換向片，申言之，經連接之邊圈此時對於極占有相同之位置。

42. 直流發電機之電壓及電樞電阻。

一圈邊從一極之中點轉至次一同名極之點中所須之時間 $T=1/pn$ 。如一極之通量為 Φ ，則為一匝所包含之通量在 $T/4$ 時間內當增加或減少 Φ 。依據感應定律故在一匝內發生之平均電壓 $M(e)=\Phi/T/4$ 。如命 z 表線數，則互相串聯者當有 $z/2a$ 線或 $z/4a$ 匝。發電機產電壓故為

$$E=M(e)\frac{z}{4a}=\frac{p}{a}\Phi n z. \quad (2)$$

如命 Φ 表通量之伏秒數。 n 表每秒間之轉數，則 E 當表所產出之電壓之伏特數。

在二極發電機中， $p=1$ 而當繞組為單路之一種時， a 亦等於 1。在帶迴線繞組之多極發電機中，假定用單路繞組時， a 亦等於 p 。至在波形繞組中， p 及 a 不等。方程式 (2) 對於環形電樞亦適用，而祇須以在外周之線數表 z 。

今如命 l 表繞組之總長，則一分路之長當為 $l/2a$ ，而一分路之電阻當等於 $ql/2aq$ 。當有 $2a$ 相並分路時，電樞電阻當小 $2a$ 倍，故其一般的方程式為

$$R_a = ql/4a^2q. \quad (3)$$

溫銅之電阻係數可視為 0.02 歐姆 \times 平方毫米 \div 米。除繞組電阻 ¹⁾

¹⁾ 繞組電阻; Ankerwiderstand; armature resistance; résistance de l'induit.

外，又有刷之過渡電阻或接觸電阻。樞之電壓損失與電流強度無關。嚴格計之，二刷共有 1.5 伏特以至 2 伏特之電壓損失。

例如線長 $l=400$ 米，橫斷面積 $q=40$ 平方毫米，電流分路之半數 $a=2$ ，則 $R_a=0.03 \times 400: 4 \times 4 \times 40=0.0125$ 歐姆。當電流為 400 安培時，電樞內之電壓損失 $I_a R_a=0.0125 \times 400=5$ 伏特。如刷處電壓損失為 1.5 伏特，則總電壓損失當為 6.5 伏特，故在有 220 伏特路端電壓時，發電機之產電壓必為 226.5 伏特，

吾人今能決定何時應用波形繞組以代迴線繞組。無論如何，一電樞導線之橫斷面積不應過小，否則線之絕緣體占去過大之地位。又由帶大橫斷面積之金屬條組成之繞組比較由線組成者為廉。在一電樞分路內之電流強度不應過小，而電樞分路之數不應過多。

故凡電流強度較小之小發電機，以僅含二分路為有利，申言之，用帶 $a=1$ 之波形繞組。

至發強電流之大發電機縱使有 2p 電分路，其電樞電流常充分之強，而非用帶有較大橫斷面積之金屬條不可，因此是種發電機概用迴線繞組，尤其因具有分路導體數均一之良好特點。

若一分路之電流當僅有二分路時過大，而當有 $2p$ 分路時過小，則據愛爾諾拉哥爾¹⁾之意見，以用帶有 4 電流分路之波形繞組為最宜。

第七章 直流電機之磁性狀況

43. 場磁鐵。

場磁鐵²⁾含有由電樞片，鑄鐵(生鐵)，鑄鋼或錠鐵用螺釘釘合之若干部分。

電樞片供製電樞之用，但亦可用製極靴，俾由細分以減少渦流損失。又極心亦常由電樞片組成，因電樞片有大導磁係數，祇須用有小

¹⁾ 愛爾諾拉哥爾; Arnold-la-Cour. ²⁾ 場磁鐵; Feldmagnet; field magnet; inducteur.

橫斷面積之磁極或輕激發繞組。

鑄鐵往日幾乎專供製磁鐵框¹⁾之用。因其導磁係數不大，今日惟在中小發電機中用之。其中接地板與磁鐵框鑄成一體。在多數情形中，鑄鐵之低製鍊費及低售價抵償導磁係數之不利及磁鐵體較重之弊。

今日凡具高效率之發電機概用鑄鋼以代鑄鐵。鑄鋼之導磁係數與電機片之導磁係數相近。因此鑄鋼有比較鑄鐵為大之磁感強度，即在極上僅須惹起較小激發作用。場磁鐵之鐵重及銅重故小，因此不但機體較輕，即冷却亦速。但鑄鋼亦有缺點，即鑄鋼之價較昂且因磁鐵框不能與接地板鑄成一體之故，製作費亦較大。

因雜散或漏洩，磁鐵內之通量比較電樞內為大。因有在磁鐵心及軛鐵內擴大之感應強度，激發強度之耗費當較無雜散之發電機中為強。

故磁鐵框之形狀以祇能惹起最小可能雜散為合格。第 112 圖中之銳稜徒無益的增加發電機之重並增加側面雜散通量。

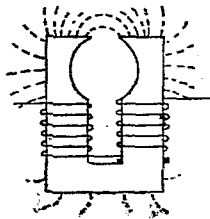


圖 112. 磁鐵框形狀不良時之雜散磁場。

磁鐵內之通量對於電樞內之通量之比曰雜散因數。為確定此值，依第 113 圖於磁鐵心上繞一輔助圈並在圈之末端連接量電衡之計器。若開斷激發電流之電路，則不但激發圈內之磁場即輔助圈內之磁場亦消失。此時

由計器指針之偏轉指出通量之大小。依同法將輔助圈繞於電樞上再試驗之，此兩偏轉之比即為雜散因數。在由拉梅耶²⁾說明而在今日常用之鐵甲發電機中(圖 113)，激發圈頗接近電樞，因此，雜散磁場之橫斷面積不大，其雜散因數約有 1.15 之適宜值。在同種發電機中視雜散磁場電阻之大小其雜散亦各各不同。例如在其他相同之情形下，在帶矩形橫斷面積之極中，其雜散通量比較在帶圓形橫斷面積之極中為大，又異名極相接近時雜散通量亦較遠離時為大。此外對於有用磁場之磁

¹⁾磁鐵框或曰磁鐵架；Magnetgestell；Magnetkörper；magnet frame；bati magnétique. ²⁾拉梅耶；Lahmeyer.

阻亦頗有關係。例如極與電樞間之空隙特別大時，爲征服此磁阻須用一較大之激發強度。此時惹起一種與有用通量相較特別大之雜散通量。若將雜散通量及有用通量視作平行流動而其強度與該磁路之磁阻成逆比之比例，則此情形益爲明顯。

一方面在同一發電機中因工作狀況不同其雜散因數亦異，蓋視磁鐵激發強度，電樞內之通量亦不一致。職是之故，齒之飽和程度亦不同，又其磁阻亦可變。終則在不帶換向極之發電機中電樞之反激發作用影響有用通量對於雜散通量之比。

爲計算此比例乃應用雜散場之磁導¹⁾。當雜散路之橫斷面爲 F 及長爲 l 時，據第49面其值爲 $\Lambda = \mu_0 F/l$ ，其中 $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-9}$ 亨/厘米。今如命 Θ 表激發強度 I_w ，則爲使通量 Φ 通過電樞，齒及空氣須有 $\Theta_a + \Theta_z + \Theta_l$ 激發強度，此外且須征服電樞之反激發強度 Θ_g ，故雜散通量

$$\Phi_s = (\Theta_a + \Theta_z + \Theta_l + \Theta_g) \Lambda.$$

此時通過磁鐵橫斷面積之通量爲 $\Phi_m = \Phi + \Phi_s$ 。關於是種雜散之計算其一例見於第33節中。

今欲預計一發電機之磁鐵激發強度及磁路之橫斷面積。據第113及114圖

電樞直徑	$d = 15.0$ 厘米，	單次空隙距離	0.2 厘米，
軸之直徑	$d_w = 3.5$ 厘米，	極口角	70°，
電樞之長	$b = 11.0$ 厘米，	極心直徑	7.4 厘米，
槽之深度	$t_n = 2.0$ 厘米，	磁鐵橫斷面積	33.5 平方厘米，
槽之寬度	$b_n = 0.5$ 厘米，	槽數	36。

紙紙占有之空間損失爲 15% 時，電樞橫斷面積 $F_a = 0.85(d - d_w - 2t_n)b = 70$ 平方厘米。

如由平均齒圓之圓周減去槽之寬度之總和，其剩餘以 $b\beta/360$ 乘之，即得齒之橫斷面積。故有 36 槽時： $F_z = 0.85[(d - t_n)\pi - 36b_n]$

¹⁾ 雜散場之磁導；magnetische Leitwert des Streufeldes；magnetic conductance of stray field；conductance magnétique du champ de dispersion.

$b\beta/360 = 41.5$ 平方厘米。

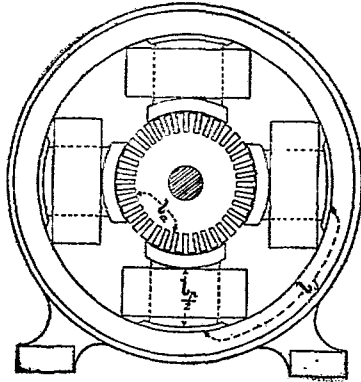


圖113. 四極發電機。比例尺1:6。

據第114圖空隙橫斷面積 F_l 等於一極孔之面與在一極前之電樞之鐵表面之平均面積。二次空隙距離為 $l_1 = 0.4$ 厘米時，極孔之面積等於 $(d + l_1) \pi \beta b / 360 = 104$ 平方厘米。有36槽時，電樞在一極前之鐵表面為 $(d + 36b_n) b \beta / 360 = 62$ 平方厘米。二者之平均值： $F_l = 0.5(104 + 62) = 83$ 平方厘米。

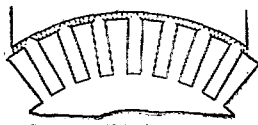


圖114. 電樞一部分之截面。比例尺1:2

極心之橫斷面積： $F_p = 7.4^2 \pi / 4 = 43$ 平方厘米。

一極之通量既在軛鐵內分為二部分，是以軛鐵之橫斷面積： $F_J = 2 \times 33.5 = 67$ 平方厘米。

磁路之長可依下列記錄表明，其中 l_1 表二次空隙距離， l_2 表二次齒深， l_p 表一極心之二次長， l_J 軛鐵內磁路之一次長。極靴可不計及。

電樞片	電樞片	空氣	熟鐵	生鐵
$F_a = 70$	$F_x = 41.5$	$F_l = 83$	$F_p = 43$	$F_J = 67$ 平方厘米
$l_a = 7$	$l_2 = 4$	$l_1 = 0.4$	$l_p = 12.5$	$l_J = 22$ 厘米。

任意選定通量之值 Φ ，以 10^8 乘通量之伏秒數再以橫斷面積分之，終則由第45面第46圖求得每厘米之以安匝數計之相當激發強度 h 。熟鐵之曲線在第6圖中並不載入，為得一分部所須之激發強度以該分部

之路長乘 h 。其時極心及軛鐵內之通量 Φ_m 因雜散之故約為電樞及空氣內通量 Φ 之1.2倍。據方程式(8a)空隙長 l_i 所須之激發強度直接為 $\Theta_i = 0.8\mathcal{R}_i l_i$ 。

尋常祇須計算有額面電壓及大飽和度時之激發強度。茲選定 $\Phi = 0.4 \times 10^{-2}$ 及 0.6×10^{-2} 伏秒並以高斯數表之。

$\Phi =$	0.4	0.6×10^{-2}	$\Phi_m = 1.2\Phi$	0.48	0.72×10^{-2}
$\mathcal{R}_a = 10^9\Phi/F_a =$	5700	8550	$\mathcal{R}_p = 10^9\Phi_m/F_p$	11200	16800
$h_a =$	1.1	1.8	$h_p =$	5	100
$\Theta_a = h_a I_a =$	7.7	19.6	$\Theta_p = h_p I_p$	62.5	1250
$\mathcal{R}_l = 10^9\Phi/F_l =$	4820	7320	$\mathcal{R}_y = 10^9\Phi_y /$	7200	10740
$\Theta_l = 0.8\mathcal{R}_l l_l =$	1540	2310	$h_y =$	19	107
$\mathcal{R}_z = 10^9\Phi/F_z =$	9650	14400	$\Theta_y = h_y I_y$	418	2350
$h_z =$	2.3	9	$\Sigma\Theta$	2040	5960
$\Theta_z = h_z I_z =$	9.2	36			

今於一鉛直線上表通量而於一水平線上表各分部及全電路之激發強度(圖115)。關於空氣之曲線為一直線。全激發強度 Θ 之曲線當初與此線相密接，以後隨鐵之在增長中之飽和程度而呈坦平之傾向。此

曲線稱曰發電機之磁化曲線。據此線例如當有一任意大之通量OA時，關於極之激發強度等於AB，關於軛鐵之激發強度等於AC而關於全路之激發強度 $AE = AB + AC + AD$ 。關於電樞及

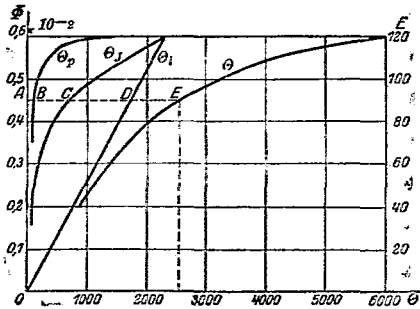


圖115. 各分部及全路之激發強度。

齒之激發強度則可不計。然因齒有大飽和度，關於齒之激發強度通常

不應忽略之。

茲假定電樞上之線數 $z = 720$ ，極對數 $p = 2$ ，每分鐘轉數 1365 ，或每分鐘轉數 $n = 27.8$ 。據第102面方程式(2)用迴線繞組時： $E = p/a\Phi_{nz} = 2 \times 10^6\Phi$ 。第115圖之曲線故示電壓與一極對激發強度之關係——零載曲線¹⁾或零載特性曲線²⁾。

44. 被捷接圈之電流。

當一線圈被一刷捷接時，圈內電流之方向即倒轉——電流之換向³⁾。茲欲確定捷路電流之依時間之變動。刷之寬度假定等於一換向片之寬度，故一刷僅能捷接一線圈。

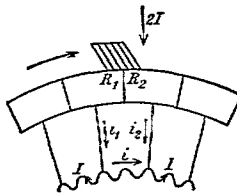


圖116. 被捷接之圈。

電樞依第116圖自左向右沿一固定之刷移動。進入於刷下之換向片由1表明而在刷下離開之換向片由2表明。假定正號計算方向(見第10面)在刷內及在換向器與線圈之連接內為自上向下，在圈內則自左向右，即與變向後之電流方向相當。如命 I 表一電樞分路內之電

流， i_1 及 i_2 在連接線內電流之臨時值， i 被捷接之線圈內之電流之臨時值。於是依據第一克希荷夫定則：

$$i_1 = I + i \qquad i_2 = I - i.$$

線圈及連接線之電阻自可不計。茲命 R 表全刷之過渡電阻， t 表時間而自捷路發生之始算起， T 表捷路經歷之時間。如若不計電流密度對於過渡電阻之影響，則進入刷下及在刷下離去之換向片之過渡電阻 R_1 及 R_2 與接觸面成逆比。由此：

$$R_1 = RT/t \qquad R_2 = RT/(T-t).$$

1) 零載曲線; Leerlaufkurve; no load curve; courbe à circuit ouvert. 2) 零載特性曲線; Leerlaufcharakteristik; no-load characteristic; caractéristique à circuit ouvert. 3) 電流之換向; Stromwendung; current reversing; commutation du courant.

今假定在被捷接之圈內並無從外方加入或由自感應惹起之電壓。此時由第二克希荷夫定則在被捷接之路內 $i_1 R_1 - i_2 R_2 = 0$ 。由利用關於 R_1 及 R_2 之方程式得

$$i_1 : i_2 = R_2 : R_1 = t : (T - t), \text{ 申言之, } i_1 : (i_1 + i_2) = t : T.$$

如以刷內電流 $2I$ 代 $i_1 + i_2$ 及以 i 等於 $I + i_1$, 則得

$$i = 2It/T - I. \quad (1)$$

如在第 117 圖中在水平線上表 t 值而在鉛直線上表 i 值, 則得一直線。 $t < T/2$ 時捷路電流為負。

在任一時間 $t = OA$ 時

$$\begin{aligned} AC &= i \\ BC &= I + i = i_1 \\ CE &= I - i = i_2. \end{aligned}$$

今考慮被捷接圈之電感係數 L 。其計算根據包含槽及端連接之感應通量。如同時經由一異名刷捷接與第一線圈同槽之第二線圈

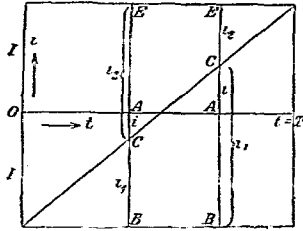


圖117. 直捷路線。

則經槽之通量惹起之電感係數之值當加倍。

據第57面自感應電壓之平均值

$$E_g = 2IL/T. \quad (2)$$

今若在線圈內經一外換向磁場¹⁾惹起一換向電壓²⁾ e_{rw} 而後者隨時變動, 正換向電壓係依該線圈之計算方向, 是以即依電流換向後之方向而作用。

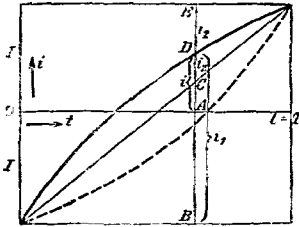


圖118. 捷路電流之曲線。

¹⁾換向磁場; Wendefeld; reversing magnetic field; champ magnétique réversible. ²⁾換向電壓; Wendespannung; reverse voltage; tension réversible.

之總和當等於零，此時得一如上之直電流線。自感應電壓之臨時值於是在全捷路時間內不變而等於第 2 方程式中之平均值。換向電壓在全捷路時間內自必與自感應電壓同大。

如換向電壓之臨時值恆大於平均自感應電壓，則捷路電流之曲線依據 118 圖當在直線之上。故電流於過一半捷路時間以前即轉換方向。當在 A 時間時

$$AD=i \quad BD=I+i=i_1 \quad DE=I-i=i_2$$

終則如換向電壓之臨時值恆小於平均自感應電壓，則捷路電流之曲線當在捷路電流直線之下。此時電流於過去一半捷路時間之後始轉換方向。

今以捷路電流 i 等於直線捷路電流 AC 及一輔助捷路電流 $i_2 = CD$ 之和。直捷路電流線依方程式 (1) 既等於 $2It/T - I$ ，故捷路電流

$$i = 2It/T - I + i_2$$

準此則

$$i_1 = I + i = 2It/T + i_2 \quad i_2 = I - i = 2I(T-t)/T - i$$

今將關於 i 之方程式依 t 微分並由利用方程式 (2) 乃得

$$e_s = -L di/dt = -E_s - L di_2/dt$$

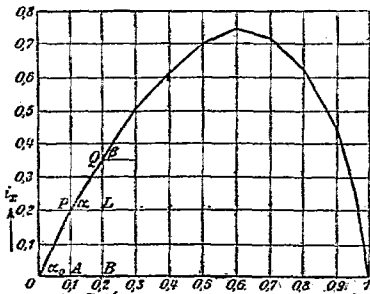


圖119. 輔助電流之曲線。

今據第二克希荷夫定則：

$e_s + e_w = i_1 R_1 - i_2 R_2$ 。在此式內代入 e_s, i_1 及 i_2 以及第 108 面內之 R_1 及 R_2 之值並以 $e_w - E_s = e_z$ 。由此乃得輔助捷路電流¹⁾之方程式

$$L \frac{di_2}{dt} = e_z - \frac{i_2 R T^2}{t(T-t)} \quad (3)$$

¹⁾ 輔助捷路電流；zusätzlicher Kurzschlussstrom；additional short circuit current；courant en court-circuit additionnel.

第 119 圖之曲線約略示輔助電流與時間之關係。例如當

$$2I = 10 \text{ 安培} \quad R = 0.1 \text{ 歐姆} \quad L = 0.05 \text{ 亨利} \quad T = 1 \text{ 秒時}$$

據方程式(2) $E_s = 2IL/T = 0.5$ 伏特。在全捷路時間內換向電壓之臨時值始終不變而為 $e_w = 0.8$ 伏特，故 $e_z = 0.3$ 伏特。此時據方程式(3)

$$\frac{di_z}{dt} + 2 \frac{i_z}{t(T-t)} = 6 \frac{\text{安培}}{\text{秒}}$$

當捷路發生之始 $t=0$ ， $T-t=T$ ， $i=-I$ 而據關於 i 之方程式 $i_z=0$ 又 $i_z/t = di_z/dt$ 。 $t=0$ 時上列方程式遂變為次式：

$$\frac{di_z}{dt} + \frac{2di_z}{1 dt} = 6 \frac{\text{安培}}{\text{秒}} \quad \text{即} \quad \text{tg}\alpha_0 = \frac{di_z}{dt} = \frac{6}{3} = 2 \frac{\text{安培}}{\text{秒}}$$

在製第 119 圖時，直線之值及橫線之值之比例尺有時不同。

今假定在當初 $OA=0.1$ 秒時間內之遞增率不變，而在 A 時得輔助電流 $i_z = AP = OA \cdot \text{tg}\alpha_0 = 0.1 \times 2 = 0.2$ 安。故在 A 時， $t=0.1$ 秒而 $i_z = 0.2$ 安。以此值代於上式內，則在 A 時之遞增率 $\text{tg}\alpha = di_z/dt = 6 - 2 \times 0.2 \div 0.1(1-0.1) = 1.556$ 安/秒。

下次時間 AB 復假定為 0.1 秒。在此時間內電流之增加 $LQ = AB \text{ tg}\alpha = 0.1 \times 1.556 = 0.1556$ 安。故在 B 時 $t=0.2$ 秒而 $i_z = BQ = AP + LQ = 0.2 + 0.1556 = 0.3556$ 安。如復將此值代入上式內，則得在 B 時之遞增率 $\text{tg}\beta = di_z/dt = 6 - 2 \times 0.3556 \div 0.2(1-0.2) = 1.556$ 安/秒等。依此方法製出之曲線已夠準確。

輔助電流之曲線形隨 $e_z = e_w - E_s$ 而變。今假定在捷路時間內 e_z 之符號至多變換一次。如第 3 方程式所示，輔助電流之曲線當捷路發

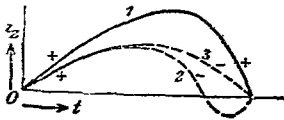


圖120.

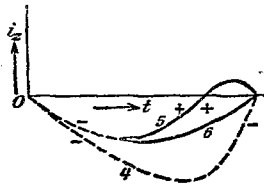


圖121.

輔助電流之曲線。

生之初，即當 $i_z = 0$ 時係向上，假定在此瞬間 e_z 為正。如在全捷接時間內 e_z 恆為正，則得第 120 圖中之曲線 1。反之，如在捷接時間內 e_z 為負，則得 2 或 3 之曲線形。

若當捷路發生之初 e_z 為負，則曲線當初係向下。此時若在全捷接時間內 e_z 恆為負，則得第 121 圖中之曲線形 4。反之，若在捷接時間內 e_z 恆為正，則得 5 或 6 之曲線形。

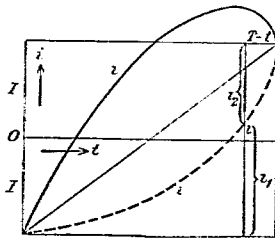


圖122. $t=T$ 時無限大之遞增率或遞減率。

e_z 為正時之曲線形統由實線表明而 e_z 為負時之曲線形統由虛線表明。視曲線在水平線之上或下，輔助電流或為正或為負。曲線向上時， di_z/dt 為正，向下時 di_z/dt 為負。

當捷路告終時，即當 $t=T$ 而 $i=I$ 時，輔助電流依第 110 面關於 i 之方程式隨時均為零。在此瞬間中之遞增率或遞減率如無限制，則能發生火花，對於運轉頗為危險。此時 di/dt 隨 di_z/dt 變為無限大，因而捷路將終時之自感應電壓變為無限大。在第 122 圖中此情形當換向電壓占優勢時由實線表明而當平均自感應電壓占優勢時由虛線表明。同時據第 122 圖與在離去之刷稜下之電流密度為比例之 $i:(T-t)$ 之比在 $t=T$ 時變為無限大。此二種情形於換向片離開刷時均惹起火花。

因輔助電流曲線之遞增率或遞減率末後變為無限大之故，在捷路將終之前， e_z 與 $L di_z/dt$ 相較極小而可忽略之。第 3 方程式故變作次式：

$$\frac{RT}{L} = - \frac{di_z/dt}{i_z/(T-t)} \times \frac{t}{T}$$

又據第 123 圖在捷路將終之前 $i_z/(T-t)$ 大於 $-t\epsilon\alpha$ ，故大於 $-di_z/dt$ 而 T 亦大於 t 。據此，則如遞增率或遞減率末後變為無限大， RT/L 當小於一。

若遞增率末後停住不變，則在捷路告終時 $i_z:(T-t) = -di_z/dt$ 。

此時第3 方程式示 $t=T$ 時之捷路之終點

$$\frac{di_z}{dt} = -\frac{e_z}{RT-L}$$

茲在由1,2,4及5曲線所示之情形中在捷路告終時， di_z/dt 之符號與 e_z 相反。故如 RT 大於 L ，則依據上列方程式在此種曲線中之遞增率當有一定限制。

捷路告終時，祇在第3及第6 曲線中 e_z 有與 di_z/dt 相同之符號。此時上列方程式示在該情形 ($RT < L$) 中之無限遞增率。然此時換向電壓必須完全平衡，否則得2及5之曲線形，故即得 $RT < L$ 時一無限大之遞增率。一有限大之遞增率是以斷然僅就 $RT > L$ 時之一種而言。

以上均假定刷之寬度等於一換向片之寬度。設若刷之寬度大於一換向片之寬度，則同時可有數圈被捷接。此時除線圈之自感應外復有被捷接圈之互感應。然捷路時間現今既延長，互感應大部分之影響為之抵消。故如以 T 為刷之寬度等於一換向片時之捷路時間，此可完全忽略之。

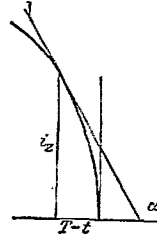


圖1:3. $t=T$ 時無限大之遞增率。

45. 無火花之運轉

如捷路電流之曲線在捷路告終時傾斜愈急，據第 112 面其自感應電壓亦愈大，同時在將離開之刷稜以下之電流密度愈大，因而發生火花之危險程度亦增。以是故須努力設法以期惹起一直的捷路曲線。最好方法係用換向極¹⁾。此法於1884年為曼開斯²⁾所創，但始於30年之後實地採用。今日凡中大電機均用之。

換向極之位置係與刷同，亦在中立帶中。據第 124 圖在其中為電樞電流通過之各匝對於電樞之電流匝起反對之作用。電樞之電流匝依刷之連接方向惹起磁化作用。為不但抵消電樞之磁作用，但復於換向

¹⁾換向極; Wendepol; (Hilfspol) commutating (reversing) pole; pôle de commutation. ²⁾曼開斯; Menges.

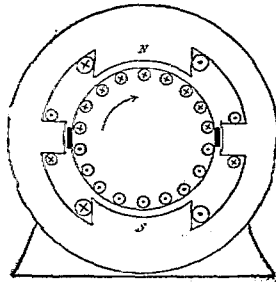


圖124. 帶換向極之發電機。

極下惹起一換向磁場，換向極之電流匝必須較電樞之電流匝為大，俾得抵償換向極路內之磁壓耗。換向磁場必須於換向帶之大部分內具有相等感應強度且其強度必須足以在被捷接之圈內當電樞運轉之際發生與平均自感應電壓相等之電壓。如是據第109面捷路電流曲線為一直線，而換向電壓及自感應電壓在各瞬間均互相抵消，一比較正當之說法稱由捷接圈發生之通量之變動經所包含之換向通量之變動抵消而經線圈包含之通量故幾乎不變動。電流之換向此時惟在刷之過渡電阻之影響下進行。電流密度並不變動。

換向極之激發作用之變動既與電樞及被捷接圈之磁效應之變動相當，故一換向磁場其若就一定負載而測定者當負載變動時沒有所須的強度。換向極機是以不感負載之變動。其過載量故僅由發熱而少由火花指出。

自感應電壓既隨時經換向電壓抵消，故當設計時可許發電機有較

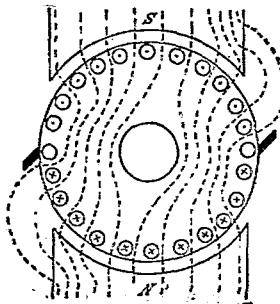


圖125. 磁場之畸變。

大平均自感應電壓而仍無發生火花之慮。此點在轉數達每分鐘3000轉之輪機發電機中特別重要。有是種高轉數時，一線圈之捷路時間特短而電流之變動率故即平均自感應電壓必大。是種發電機由裝換向極而變活躍。

如欲於可能範圍內限制被捷接線圈之電感係數則自然亦以在換向極機中較易。為此應用開口槽——槽之形

1 輪機發電機；Turbomaschine；turbo-dynamo；turlo-dynamo，槽之形狀；Nut-form；form of slot；forme de la rainure。

狀²⁾——而在較大電機中由用每圈祇含一匝，又由使圈節距不與極節距相等，使被異名刷捷接之圈邊不在同槽內，否則總電感係數當加倍。

終則為保運轉時不發生火花今日概用炭刷以代往日慣用之銅刷。惟在帶小電壓及大電流強度之電解機中因炭耗電壓較大之故大都不用炭刷。

炭刷惹起較大摩擦作用並使換向片發強熱，以是在速轉輪機發電機中當初拒絕不用，以後由應用空心換向片及換向器依軸向之區分，改良輪機發電機之通氣狀況，炭刷遂見用於輪機發電機中。

今轉而論不帶換向極之發電機而任其中刷之位置在有負載時仍留在零載時最適當之位置，申言之，即留在幾何學的中立帶中。被捷接圈之圈邊今橫切由電樞發生之強橫磁場¹⁾。其實此橫磁場與縱磁場²⁾相合而成爲一總磁場。後者據第 125 圖呈畸形——磁場之畸變³⁾，在電樞離開發電機一極之一側，感應強度比較在他側爲強，被捷接之圈邊是以目下在帶磁線之場內，因此在該圈邊內發生電壓，後者如自感應電壓然有維持在遞減中之電流之傾向並對於在遞增中之電流惹起反對之作用。此電流亦可視爲延遲電流換向之負換向電壓，捷路電流曲線之斜度終則較大因而發生火花之危險亦增加。

爲此故須將刷之位置移動。在發電機中依旋轉方向而在電動機中背旋轉方向。於是被捷接圈之圈邊當初在不帶磁力線之位置，故至少可免除由電樞磁場之不利的的作用。然爲抵消自感應之有害作用，此時仍須有一正換向磁場。爲此再將刷移前至達極之尖角附近，使被捷接之圈邊依第 126 圖入於有所須強度之磁場內。

爲便於確定刷之位置，須有自中立帶逐漸過渡至直達極弧下之磁場。往往由用圓形極隅已可除去發生火花之傾向。又由使極之側面傾斜亦便於刷之位置之確定。然如用換向極而在換向帶之大部分內發生

1) 橫磁場; Querfeld; cross field; champ transversal. 2) 縱磁場; Langsfeld; longitudinal field; champ longitudinal. 3) 磁場之畸變; Feldverzerrung; field distortion, distorsion du champ.

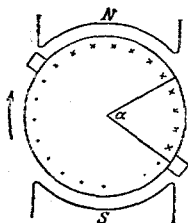


圖126. 帶移位刷之發電機。

之均勻磁場則由是不能發生。

此外復有一特別不利之缺點即在換向帶中之磁場當負載發生變動時變動頗劇，此在換向極機中則不然。其故因該磁場祇經磁鐵激發強度與電樞線匝之激發強度之差而發生，故當負載較大時在被捷接圈圈邊所在處之磁場消衰而在換向極機中則增強。刷之位置是以當負載變動時每須重行決定，因而極感

不便。尋常依平均負載而定刷之位置，故當負載較小時發電機帶一過強之換向磁場而當負載較大時帶一過弱之換向磁場而工作。

在不帶換向極之電機中被捷接圈之自感應電壓在各瞬間並非被換向電壓抵消。為使旋轉時不發生火花，依據前節末段之說明必須設法使刷之過渡電阻 R ，被捷接圈之電感係數 L 及捷路時間 T 備下列各條件：

$$RT/L > 1 \quad (4) \quad \text{即} \quad 2IR > 2IL/T. \quad (5)$$

在有均勻電流密度時，刷下之電壓損失故必須大於自感應之平均電壓。今據經驗，炭刷之電壓損失約近於1伏，故自感應之平均電壓可許有等大之值，然其實可許有二倍大之值，因當時一小而難見之火花生成作用增加過渡電阻 R ，故易容迎合第4方程式之要求。又在是處有限制電感係數 L 之必要以及用帶大過渡電阻之炭刷之優點。如不用炭刷，則負載變動時刷之位置不能不移動。

46. 正交磁化作用及電樞之反作用。

電樞經電流匝變為一電磁鐵，其繞組軸與刷之直徑相符合。今特論在極前之電樞電流匝並稱之曰正交匝。

如極不經激發，則正交匝惹起一正交磁場或橫磁場，其強度依第127圖在極之中點下等於零，向兩側則依圓周之比例而增加，至在極之隅角之處達其最大值。

如極已經激發，在極下之磁場為磁鐵激發作用及電樞正交匝之作

用二者聯合惹起。此時如極靴及電樞齒祇略許飽和，則可將磁鐵激發作用在零載時發生之磁場與在磁鐵繞組不通電時電樞電流惹起之正交磁場併合而成爲總磁場。在此磁場中在發電機電樞進入極下之處發生磁場衰化作用而在離開極下之處發生磁場強化作用，但總通量及所發生之電壓並不因此而略起變動。

反之，如極靴及電樞齒已充分飽和，如在電樞離極之處極如是，則因在是處感應強度增加，導磁率

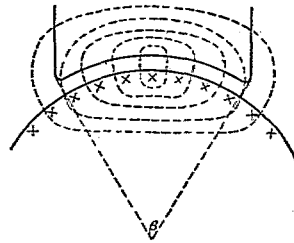


圖127. 電樞之正交磁場或橫磁場。

減小。在電樞進入極下之處導磁率雖略許增加然不能抵償電樞離極之處減少之量。故不但磁場呈畸形且通量亦較無負載時爲少。正交磁化¹⁾是以惹起比較虛轉時爲大之壓降，但因不大，無重要關係。

在電樞離極處之磁場如經負載而顯然增強，則可惹起換向片間之飛閃或竟惹起刷間之循環火花。職是之故，當計劃發電機之構造時留意使齒於虛轉時已呈強飽和狀態且一方面由限制旋轉速度及在磁場內一線圈導線之長使不致有發生火花飛閃之危險。虛轉時飽和之效用故爲不使電樞離極處之感應強度經負載而再大量增加。在齒根處之感應強度可有20000至24000高斯。然因一部分之通量在齒旁穿槽而過，實際並無如是之大之感應強度。

發電機之須長期工作或隨時須應強載者，其磁場須完全無畸變。爲此依第128圖用一補償繞組²⁾。此種繞組係設在極靴之槽內而爲電樞電流所通過，但其中電流之方向與電樞圈中電流之方向相反對。其匝數等於極弧前電樞之正交匝數，故不問負載之大小，正交磁化作用均被抵消而磁場之畸變遂可免。此時換向極之激發匝數比較在無補償繞

¹⁾正交磁化或曰橫磁化；*Quersmagnetisierung*; *cross (transversal) magnetization*; *ajmagnetation transversale*. ²⁾補償繞組；*Kompensationswicklung*; *compensation winding*; *bobinage de compensation*.

組之發電機中約減少補償繞組之電流匝之數，此種電機曰補償機¹⁾。

在用經台利²⁾說明之補償繞組時，磁鐵樞依第 129 圖並不帶突出之極但有如三相交流電動機之固定子之構造。在磁鐵樞槽內之主繞組之繞組軸係與刷之直徑正交而補償繞組之繞組軸係與刷之直徑平行。

補償繞組於是遂變為電樞繞組之正確

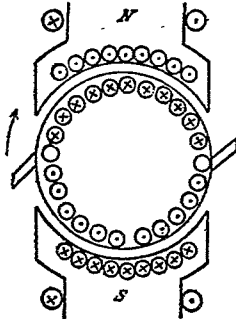


圖128. 帶補償繞組之發電機。

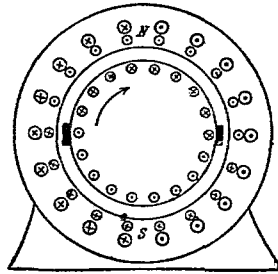


圖129. 台 利 機。

像，故電樞之磁效應沿圓周隨處均被抵消。然在換向帶中此效應不但不應抵消且必須惹起一種換向磁場，故在是處亦不應省去換向極；申言之，在磁鐵樞內須裝換向齒。此機曰補償台利機³⁾。

在不帶換向極之發電機中，正交磁化作用不但因在電樞離極處磁場增強且因在電樞入極處磁場衰退而不利，蓋在此磁場衰退之處被捷接之圈邊必須有一換向磁場以防電樞轉動時發生火花。如命 I_a 表電樞

電流， a 電樞電分路之數， z 全部線數及 β 極孔之角度，則在一極前之線數，申言之，屬於一磁路之正交磁化電流匝之數為

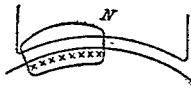


圖130. 電樞入極處之感應強度之確定。

$$\Theta_q = \frac{I_a}{2a} z \frac{\beta}{360} \quad (6)$$

1) 補償機; kompensierte Maschine; compensated machine; machine compensée. 2) 台利; Déri. 3) 補償台利機; kompensierte Dérimaschine; compensated Déri-machine; machine compensée de Déri.

茲欲確定在不帶換向極之發電機中不致惹起火花而可許有之正交磁化作用。為此依第 130 圖注意自電樞入極處起，經電樞齒及空隙以達極隅，再由是處橫穿極靴以達極之中點而後復經過空隙及電樞齒以達電樞鐵心而終則回至離極之處之磁線。如命 \mathcal{H}_w 表為轉動時不帶火花之在電樞入極處空隙內應有之感應強度， l 空隙二次之寬度，則在入極處空隙內之磁壓耗等於 $\mathcal{H}_w l/2 \div \Pi$ 。同時且不完全適切的假定在全路 $l/2$ 之感應強度始終不變。

如命 Θ_l 及 Θ_z 表在極之中點下關於雙空隙及雙齒深度所須之激發強度，則在單次路上之磁壓耗等於 $l(\Theta_l + \Theta_z)$ 。橫貫極靴，電樞以及電樞入極處之電樞齒之磁壓耗因不大故可以略去不計。此時由貫穿定律：

$$\frac{(\Theta_l + \Theta_z) l}{2} = \mathcal{H}_w \frac{l}{2} \div \Pi = \frac{\Theta_g}{2} \text{ 即 } \mathcal{H}_w = \Pi \frac{\Theta_l + \Theta_z - \Theta_g}{l}$$

如將 \mathcal{H}_w 以高斯計，則 Π 。當以亨/厘米計， Θ 以安培計而 l 以厘米計並以 10^8 乘方程式之右邊。

關於 Θ_l 及 Θ_z 可代以虛轉時（申言之，即磁場分配均勻時）使通量通過空氣及齒之激發強度。由上列方程式乃得許可的正交磁化電流匝之數。如正交磁化作用過大則須減少電樞上之線數而同時提高空隙之感應強度。由該方程式所示，用大空隙感應強度係為一有利之舉，蓋一方面激發強度 Θ_l 增加而同時電樞上之線數故即正交激發強度 Θ 減少。在大而緩轉之發電機中空隙感應強度可達 10000 高斯。又擴大空隙亦有利，蓋因此在上列方程式中分子之增加比較分母增加速大。然此有利點惟由消耗大量磁鐵鋼而求得。

在帶移位刷之發電機中，電樞除惹起橫磁化作用外又惹起縱磁化作用¹⁾。據第 126 圖在刷之雙移位角內之電樞電流匝有與磁鐵電流匝正反對之作用。此電流匝之作用曰電樞之反作用²⁾。磁鐵激發作用與

¹⁾ 縱磁化作用；Längsmagnetisierung；longitudinal magnetization；aimantation longitudinale. ²⁾ 電樞之反作用；Ankerrückwirkung；armature reaction；réaction d'induit.

電樞反作用之差今惹起發電機之縱磁場。爲惹起與虛轉時相同之電壓，須於虛轉激發強度上再增加電樞反作用之強度。如命 α 表刷之雙移位角， I_a 表電樞電流強度， $2a$ 電分路之數及 Z 電樞之總線數，則因刷移位而發生之電樞反作用爲

$$\Theta_G = \frac{I_a}{2a} Z \frac{\alpha}{360} \quad (7)$$

第八章 直流電機

47. 分激電機。

今設想一電機，其磁鐵繞組由一外電源饋電（圖 131），電機當初作虛轉，申言之，即作無載之運轉。若不變激發強度但僅變轉數，則

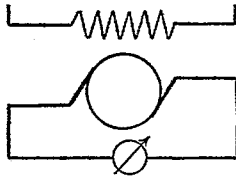


圖131. 虛轉時激發強度不變之電機。

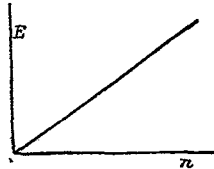


圖132. 激發強度不變時電壓與轉數之關係。

依據第102面之第3方程式其時發生之電壓 $E = p/a\Phi_{FZ}$ ，故與轉數爲比例（圖132）。

茲任轉數不變，但用一變阻器變動激發電流（圖 133），將激發電流 I_m 或磁鐵激發強度表在一水平線上而將伏特計上讀出之電壓表在

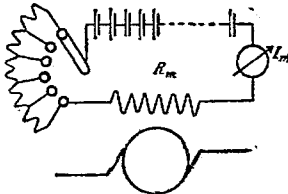


圖133. 虛轉時之電機。

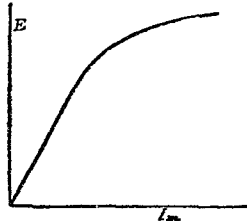


圖134. 虛轉曲線。

一鉛直線上，則得如第134圖之虛轉曲線，電壓之增長當初與激發電流為比例，至以後鐵飽和程度增長時激發電流之增長止能略使電壓增加。

虛轉時之路端電壓等於產電壓，是以與通量為比例。圖134示通量與激發電流之關係，虛轉曲線故即為電機之磁化曲線。

今變動電機之負載，申言之，即在固定激發強度及轉數下變動導出之電流 I 。虛轉時等於產電壓之路端電壓今減小，而比較虛轉時減少內電壓損失。如命 E 表產電壓， I 電樞電流， R_a 電樞電阻，則路端電壓 $U = E - IR_a$ 。若不計電樞反作用並假定激發強度不變，產電壓 E 不致變動(圖135)。電壓損失或壓耗與電流強度為比例。

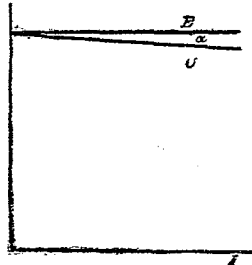


圖135. 激發強度不變時路端電壓與電流之關係。

圖中直線 U 與 E 所成之 α 角故具有一定之大小，即 $\text{tg}(\text{正切}) \alpha = IR_a \div I = R_a$ ，當時並顧及依水平方向及鉛直方向之比例尺。E及U二線之依鉛直線上之差此時即表電壓損失，傾斜線下之鉛直距當表路端電壓。實驗時由路端電壓及電壓損失可計算產電壓。

48. 關於自激之接法。

凡在磁場內由移動導體而能發生電功之機器，統稱曰電機或曰發電機¹⁾。根據韋納西門子²⁾於1836年發明之電機電原理³⁾，凡電機均為自激機⁴⁾。

電機起動時當初僅有剩餘磁場。因旋轉乃惹起一小電壓而當電路閉時此電壓惹起一弱電流。依第136圖此電流環繞電機之磁鐵之周圍，強化其磁性，因此電壓及電流復增加。電機如是自動努力並增長其

¹⁾電機或曰發電機；Dynamomaschine；dynamo-electric machine；machine dynamo-electrique. ²⁾韋納西門子；Werner Siemens. ³⁾電機電原理；dynamo-electrisches Prinzip；dynamoelectric principle. ⁴⁾自激機；selbsterregende Maschine；self-excited machine；machine auto-excitatrice.

磁性。

如是發生之磁場之強度及電壓與工作狀況有關，電機似須努力至鐵完全飽和為止，但此不過為一廣泛的觀念，蓋電流止當產電壓之增長比較激發電路內電壓消耗之增長為大時增加。依歐姆定律電流強度係由電壓及電阻決定，但磁場強度故即電壓本身除與電流強度有關外又與電阻有關。

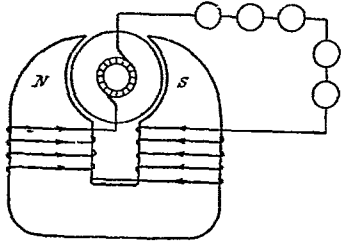


圖136. 串繞電機。

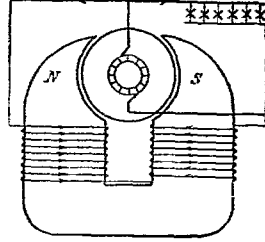


圖137. 分繞電機。

在串繞電機¹⁾ (圖136)中，磁鐵繞組含有少數粗線匝並與電樞繞組及外線路相串聯。

在分繞電機²⁾ (圖137)中，磁鐵繞組含有多數細線匝並直接與刷相連接，是以分接在外線路上。因磁鐵繞組具有大電阻，磁鐵電流與外電流相較頗小。

複繞電機³⁾ (圖138及139)為一分繞電機，其磁場復經一串繞組

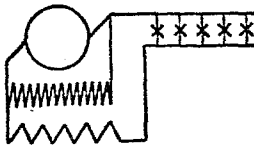


圖138. 複繞電機，從刷分接。

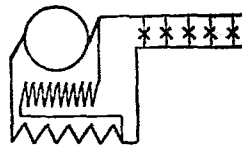


圖139. 複繞電機，從接線端分接。

1) 串繞電機; Hauptschlussmaschine; series dynamo; dynamo en série.
2) 分繞電機; Nebenschlussmaschine; shunt dynamo; dynamo shunt.
3) 複繞電機; Doppelschlussmaschine; compound dynamo; dynamo compound

而增強。因此當電流消耗增加時，雖然電樞內電壓損失增加，路端電壓仍可不變。依接法，電流之方向在串繞組及分繞組中均相同。在第 138 圖中示從刷之分接而在第 139 圖中則示從接線螺旋之分接。

電機之自激發¹⁾ 為其最重要之特點。

磁鐵繞組必須依一定方法而連接，俾剩磁可經發生之電流而強化。由剩磁惹起之電流其方向隨轉向而異，申言之，磁鐵繞組之接法及轉向須互相適合。如轉向不合，發電機不會自激。此時須倒轉旋轉方向。又如磁鐵繞組接法不合，發電機亦不會自激。此時倒轉接法之後電機當可自激。

如倒轉轉向或改變磁鐵繞組之接法後，電機仍不能自激，則必須增加轉數或減少磁鐵電路之電阻。此電阻在分繞電機中等於磁鐵繞組之電阻及變阻器之電阻，而在串繞電機中等於內外電阻之總和。此後如仍不能達所冀之目的，則其故當在刷之不良的位置或不良的托架。剩磁之極性對於自激並無影響，但祇與刷之符號有關。

分繞電機起動時不使有負載，申言之，不使其與耗電器相連接。經剩磁發生之低量電流此時以全強度通過磁鐵繞組。否則其大部分流入外網絡內致不足充分強化磁性。至串繞電機則止能在外負載插入之後始可使之起動，且外電阻不應過大。

49. 串繞電機。

在串繞電機中，電樞電流，激發電流及外電路電流均相同，今使一串繞電機之轉數不變但僅變動導出之電量（圖 140）並將電流強度 I 表在一水平線上而將路端電壓 U 表在一鉛直線上（圖 141）。此後劃一與水平線成 α 角之直線並使 $t_g \alpha = R_a + R_n$ 其中 R_n 表磁鐵上串繞組之電阻。此時依水平方向及鉛直方向用同一比例尺。直線之垂線此時表電機內之電壓損失 $I(R_a + R_n)$ 。如將此種鉛直線加在路端電壓曲線之鉛直線上，則得隨磁化電流而變之電機電壓 E 。如將電流強度與磁鐵匝數

¹⁾ 自激發；Selbsterregung；self-excitation；auto-excitation.

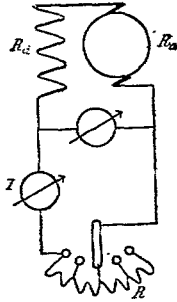


圖140. 有負載時之串繞電機。

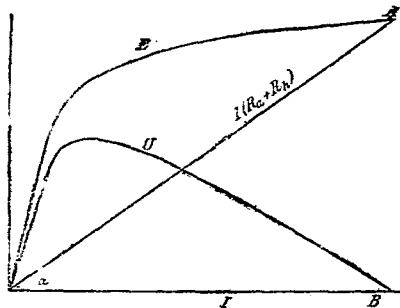


圖141. 串繞電機之產電壓及路端電壓與電流強度之關係。

之乘積表在一水平線上，則得第 115 圖之曲線。

電路開斷時產電壓為零，因當時磁化電流及磁場均為零之故。設用電阻不過大之線連接接線螺旋，則電機自動激發，致惹起電壓及電流。此時若減小外電阻，則電流強度增加而磁場及產電壓亦隨之增強，至發生捷路時達其最大值。

路端電壓隨負載而增加，至達最大值之後，重行下降。其所以然者，因鐵已達飽和狀態之故，此後電機電壓隨電流之增加小於機內所增加之電壓損失。終至成捷路時——串繞機天然不能耐此捷路電流——路端壓為零。此時全部電壓 BA 以使電流 OB 通過內電阻而耗盡。因電壓可變動之故，凡串繞機不適用充發電機。然電車及起重機之電動機則多由此機種充之。

50. 分繞電機及複繞電機。

試令一分繞電機依固定轉數而虛轉並用一變阻器變更磁鐵電流。當時電樞既僅供給弱磁鐵電流，電樞內之電壓損失頗小而路端電壓等於產電壓。如在一水平線上表明磁鐵電流 I_m 並在一鉛直線上表明路端電壓 U，則得如第 115 圖及 134 圖之零載曲線或虛轉曲線。

今使分繞電機與一外消耗電路相連接（圖142）。由插入電燈電流

，此時消耗之增加不再直接影響磁場，故與用串繞電機時不同。電流消耗對於激發強度及產電壓不惹起顯著影響，故在工作範圍內電壓幾乎不變。

外電路電流 I 增加時，電樞電流 I_a 依方程式為 $I_a = I + I_m$ 亦增加，因而電樞內之電壓損失亦增加。路端電壓遂依方程式 $U = E - I_a R_a$ 變動。虛轉時其值最大，以後因負載增加減小。

因磁鐵繞組直接與接線螺旋相連接，路端電壓減小時，磁鐵電流亦減小。因此磁場減衰而產電壓及路端電壓再度減小（見第 143 圖上部）。在分繞電機中，電壓在有負載時對於在零載時之變動實極小，然較分激電機中為大。

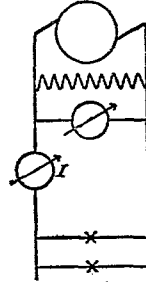


圖142. 分繞電機。

今若過分增加燈數，電流強度以後不再增加，但反減小，同時路端電壓逐漸減小（見第 143 圖下部）。終則成捷路時——當時二接線螺旋連成一點——電流強度等於零，同時磁鐵電流及磁場強度均等於零。若電機並無剩磁，則成捷路時產電壓及電樞電流亦當等於零。

如於一水平線上表明磁鐵電流而在鉛直線上表明產電壓 E (圖 144)，則容易顯出分繞電機之是種特性。磁鐵電阻既不變；路端電壓當依 $U = I_m R_m$ 之方程式與磁鐵電流為比例，故路端電壓之曲線為一直線 OB 。曲線 E 及 U 之鉛直線差表示電壓損失： $I_a R_a = (I + I_m) R_a = I R_a + I_m R_a$ 。虛轉時，磁鐵電流等於 OC ，而電樞內之電壓損失等於 $OC \times R_a = BA$ 。由此得直線 OA 及 OB 之鉛直差等於 $I_m R_a$ 。曲線 E 之鉛直線與直線 OA 之差此時等於 $I R_a$ 。以適當比例尺表之，此差可視為外電路電流 I 。其在第 144 圖中依鉛直方向表出之，得曲線 I 。此線示在一定工作狀況下，電流最強。磁鐵電路 I_m 既與路端電壓為比例，則由選定適當比例尺，曲線 I 於旋轉 90° 之後即變為第 143 圖中曲線之像。

為使壓降特別弱小，由構造使極心或極齒呈強飽和狀態。此時經負載惹起之激發強度之變動對於磁場幾無影響，而如在分繞電機中然

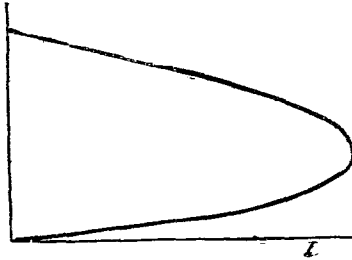


圖143. 一分繞電機之路端電壓。

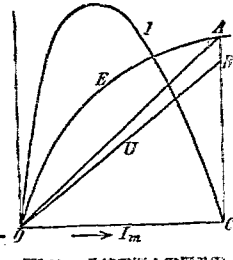


圖144. 分繞電機之電壓及電流與磁場電流之關係。

，有負載時之壓降與零轉時之壓降之差僅等於壓耗 $I_a R_a$ 。是種電機特適於燈電發電廠，蓋其中為使燈光寧靜起見須有一固定路端電壓。在炭絲燈中此點尤關重要，尤因炭之電阻隨熱度而增加之故。是以電壓變動惹起電流特別大之變動，致燈光閃動非常而燈之壽命遂強減。金屬絲燈感電壓變動雖不及炭絲燈靈敏，然仍不許有顯著電壓變動。故凡電機之不與電池組並聯而工作者其壓降不宜大。最後難免之電壓變動可由變動磁鐵電路之電阻而調整之。是謂電壓之調變¹⁾。反之，供蓄電池組充電用之電機其磁路之飽和程度則微弱。當充電之初，因毋須用特別大之路端電壓以克服電池之反電壓，在磁路內插入一電阻，此後隨充電過程將此電阻逐步撤去。

為維持負載變動時路端電壓之強度，尋常亦用插在磁鐵電路內之變阻器，然有時則代以一串繞組以增強分繞組之作用(複繞電機)。在第145圖中在一水平線上表明不論由分繞組或串繞組惹起之激發強度。虛轉時僅有分繞電機之激發強度 $00' = \Theta_h$ 。有負載時，當再加上串繞組之激發強度 Θ_h (自 $0'$ 起)。曲線E示產電壓與總激發強度之關係。此線之第二段近似一直線而與水平線成 α 之交角。電壓損失係與主電流為比例，故與激發強度 Θ_h 為比例。路端電壓U等於產電壓E減去電壓損失。由選定適當串繞組可使路端電壓U於激發強度 Θ 或即電流強度變動時不起變化。至暫時電壓變動以原動機調速器感覺不靈敏之故則

¹⁾ 調變; Regelung, regulating; réglage.

屬難免。

複繞電機及串繞電機均不適充蓄電池組之用。若原動機之轉數因某種理由而減少，則由蓄電池組發生之電壓超出電機之電壓，致有電流依反對方向通過磁鐵之串繞組。磁鐵遂反磁化。電機及蓄電池組之電壓此後不再依反對方向，但先後串聯。電路全部既僅含有電樞，導線及電池組之弱度電阻，故有惹起捷路之危險。因此如欲用複繞電機充電，則必須將該電機改作一分繞電機。此時電池組之正接線螺旋恆與電機之正接線螺旋相連接，而在磁鐵繞組內電流

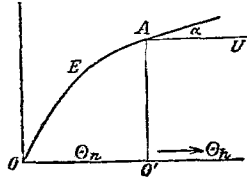


圖145. 複繞電機之電壓。

恆依一定方向通過，雖然主電流之方向曾經倒轉。由電池組及電機發生之電壓故恆依反對方向而連接。在換向器處之火花自屬難免。因此主線內插入一自動斷路器。此器於主電流強降時開斷主電流。

5I. 蓄電池組與電機之並聯運用。

在電機與電池組之並聯運用¹⁾中，網絡電壓或外電路電壓幾乎完全不變。電機之大小祇視平均負載而決定。今述其作用方式如次：

1. 電流消耗之變動。蓄電池組之產電壓在一長時期內可視為不變。電池組之內電壓損失小時，電池組之路端電壓U於是亦不變。故電機經一固定磁鐵電流而激發；申言之，如轉數不變，電機之產電壓E亦不變。因此依據次列方程式電樞電流亦不變

$$I_a = (E - U) / R_a \quad (1)$$

例如電池組放電時（圖146），外電路內並聯之白熾燈數增加，此增多之電流消耗幾乎全由電池組供給。反之，當充電時（圖147），若外電路內白熾燈之數增加，外電路從電池組導出一部分之電流。故無論電流消耗變動與否，電源恆供給同一電流而後者係被分配在電池

¹⁾ 並聯運用；Parallelbetrieb；parallel operation；marche en parallèle。

組與外電路之間。

由變動外電路電流，可故意使電池組由充電狀態過渡至放電狀態。例如電機單獨供給電流於外電路，電池組電流為零。路端電壓及由電池組發生之反電壓此時正相抵消。如以後開去白熾燈，則過剩之電流成充電電流流入於電池組內。反之，如增加燈數，則從電池組流出

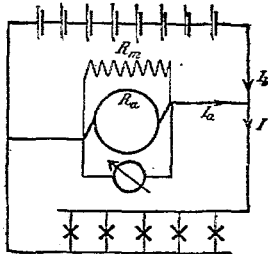


圖146. 放電時之電流循環。

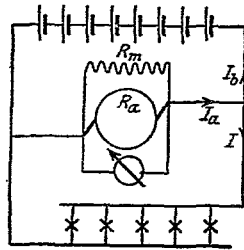


圖147. 充電時之電流循環。

放電電流。如電機經激發而供給一平均電流消耗，則當電流消耗變動時可使電池組自放電狀態過渡至充電狀態或反是（緩衝作用）。是種電池組特稱曰緩衝電池組¹⁾。

無論如何，在上述過程中路端電壓必略起變動。準確言之，祇電池組之產電壓而並非路端電壓固定。至實際之情形可由另一方法近似表明之。第 148 圖示相並聯之二電源，其電壓大約相等。當外電路電

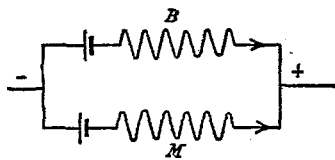


圖148. 並聯電源。

流增加時，所增加之電流之大部分通過有較小電阻之支路。依相同情形，當電池組與電機並聯時，所增加之電流之大部分係出於具有較小內電阻之電池組而惟小部分

係出於電機。電池組之緩衝作用是以當電機電阻與電池組電阻相較愈

¹⁾緩衝電池組；Pufferbatterie；buffer-battery；batterie-tampon。

大時愈佳。

完全緩衝作用惟當電池組電阻無限小時有之。爲此故依畢蘭尼於電池組之分路內依第 149 圖插入一昇壓機（畢蘭尼機¹⁾）。昇壓機係經與電池組並聯之分繞組及依反對方向而作用並由外電路電流饋電之串繞組激發。在有平均負載時，二繞組之作用互相抵消，昇壓機不產生電壓。

今選定電池組之電壓等於外電路電壓，故當有平均外電流消耗時，電池組電流係等於零。電流消耗增加時，串繞組之作用較強。經昇壓機發生之電壓此時依與電池組電壓相同之方向而作用。電池組於是供給強度電流。外電流消耗減時，分繞組之作用較強。此時經昇壓機發生之電壓依與電機電壓相同之方向而作用，申言之，電池組遂充電。電機電流是以恆一定而不受強功率變動之影響。然電池組須有一定之大小，俾可耐電流強度之變動。

由變動昇壓機分路內之電阻可變動平均外電路電流並提高電池之充電狀態，因如是可任意使充電短時間內導入於電池組內之電功多於在放電短時間內導出之電功。

昇壓機大都備有一激發機，後者裝有如昇壓機上所裝之二繞組。由變動激發機分繞組之電阻亦可如上變動平均外電路負載或提高電池組之充電狀態。此外由變動昇壓機激發電路內之電阻可任意調整緩衝程度；申言之，可使電機分擔一部分之電流變動以代由電池組擔任全部電流變動。

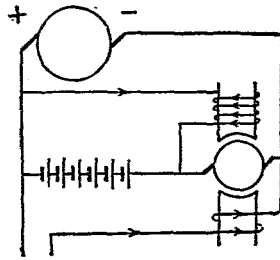


圖149. 畢蘭尼機。

2. 磁鐵激發之變動。今欲使一電機與一電池組相連接或就一般而言與一外電路相連接，後者之電壓經其他已在工作中之電機或經一

¹⁾ 畢蘭尼機；Piranimaschine；Pirani's maschine；machine de Pirani.

電池組決定。——直流電機之並聯¹⁾，先激發電機之磁鐵，使其有比較電池組或外電路之電壓為大之電壓。次連接電機及電池組或外電路之同名接線螺旋。二電壓之方向既相反對而電機之電壓僅略高於電池組之電壓或外電路電壓，電流強度不大。此後依方程式(1)由強化激發強度將電樞電流增至所冀之值。電壓指示器之偏轉此時並不變動，因電壓係由電池組或外電路決定之故。反之，在開斷²⁾電機與電池組或外電路之聯絡以前，先減衰電樞電流至完全等於零為止。

今欲使一電池組充電，假定此電池組係與接在外電路上之電機相並聯而尚不通電。為此由強化電機之激發強化電樞電流。此時外電路電壓同時即為電池組電壓，仍不變動。若外電路電流消耗不變，則所增加之電機電流流入電池組內，後者遂充電。反之，若欲停止充電作用，先減衰電機之激發電流至電機電流等於外電路電流為止，至是電池組電流減至零值。電池組遂成爲在外電路上之電壓調整器。

電流消耗大時，電機經激磁而負充分之負載³⁾。電池組僅供給剩下之電流消耗。

3. 電池組電壓之變動。與充電曲線及放電曲線相當，電池組電壓依時間而有逐步的變動。此變動故必須用電池組開關⁴⁾以調整之。爲不使電流於增減一電池時間斷，電池組開關之柄爲一複柄，其兩部分互相絕緣而中間係經電阻連接。在第150圖中例如第一開關電池與二柄及中間電阻連接而成閉路。將柄右旋時，主柄離開左邊金屬接觸而外電路經由中間電阻與已加添一池之電池組相連接。如繼續右旋，二柄同時在一接觸上而外電路遂與約增加2伏特之較大電壓相連接。若中間電阻之電壓損失經決定爲1伏特，則電壓因此約增加1伏特。

1) 直流電機之並聯; Parallelschalten von Gleichstrommaschinen; parallel switching of direct current dynamos; montage en parallèle des génératrices à courant continu. 2) 直流電機之開斷; Abschalten der Gleichstrommaschinen; switching off of direct current dynamos; mettre hors circuit des génératrices à courant continu. 3) 負載; Belastung; load; charge. 4) 電池組開關; Zellschalter; accumulator switch; réducteur-adjoncteur.

在節線連接¹⁾中，在電池組開關之二接觸間插入二電池，而在兩柄間連接一輔助電池²⁾，後者之電壓與電池組電壓起相反之作用。由旋動電池組開關，電池組電壓當初之變動等於一電池之電壓。若繼續旋動電池組開關，輔助電池遂被開去，而電池組之電壓變動當等於二電池之電壓。

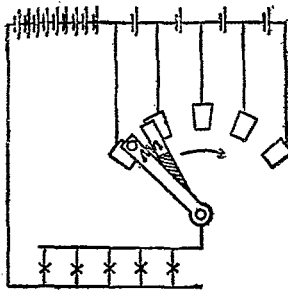


圖150. 由單電池組開關放電。

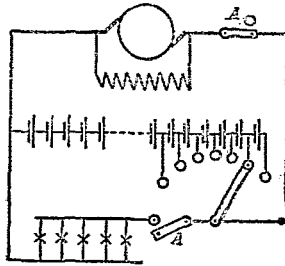


圖151. 用單電池組開關時之接線圖。

第 151 圖示一單電池組開關³⁾之接線圖。由應用此種開關，一外電路由電機及電池組共同饋電（放電⁴⁾），然充電⁵⁾時須將外電路由開關A開去，因時開關柄有關去若干預先已充電之開關電池之必要。若欲於充電時兼須供給電流當於外電路內，如在大多數情形中然，則須用一雙電池組開關⁶⁾（圖152）。其時外電路恆與在下方之放電柄相連接，而此柄充電及放電時均用充電壓調整器。在上方之充電柄當充電之際陸續開去已充分充電之開關電池，俾後者不致因長期過分充電而受損害。在二柄間之開關電池中，當有電池組及外電路之二電流通過。

充電告終時，二柄（第 152 圖）同時在左方之接觸上。此時若欲

1) 節線連接; leitungsparade Schaltung. 2) 輔助電池; Hilfszelle; auxiliary cell; élément auxiliaire. 3) 單電池組開關; Einfachz Henschalter; simple battery switch; réducteur adjoncteur simple. 4) 放電; Entladung; discharge; déchargement. 5) 充電; Ladung; charging; chargement. 6) 雙電池組開關; Doppzellenschalter; double battery switch; réducteur-adjoncteur double

停止充電，由調整分繞組使電池組內並無電流通過並倒旋換向開關或轉路開關之柄。此後電池組之作用當初恰如一電壓調整器，至以後電流消耗增加時自動供給電流。其電壓是以逐漸下降。為維持其原來高壓，必須用電池開關增加電池。此時將放電柄（或能自動）向右移動，並同時由一阻彈曳動充電柄。據理而言，無使開關移動之必要，蓋當放電時二柄恆在同一接觸上。然為防放電柄之接觸彈簧在晚上被電

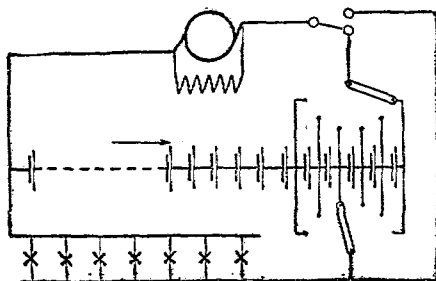


圖152. 帶變電池組開關之接線圖。

池及電機之二電流通過，此實屬必要。然其與電池組合作時僅供給外電路電壓，故未經充分利用。為免除此缺點，常用一昇壓機，如是

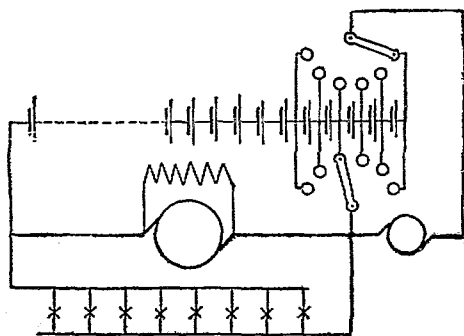


圖153. 帶昇壓機之變電池組開關。

電機須能供給充電將終時之高壓。例如外電路電壓

• 充電及放電曲柄之相當接觸既互相連接，故二曲柄祇須有一接觸組。

主電機祇須能供給外電路電壓，其價故較廉。依第 153 圖，此時主電機恆與放電柄故即與外電路相連接，而在充電柄及放電柄間之開關電

1) 開關電池; Schaltzelle; cubicle; habitacle.

池¹⁾由昇壓機充電。今假定開關電池之充電電流由調整昇壓機使與電池組之主電池部分之充電電流相等，則電池組電流直接從電池組之主電池部分以同一強度通過開關電池及昇壓機。放電柄因連接二等壓點故不帶電。此時放電柄純為一電壓調整器。

用雙電池組開關時，開關電池之數依次法決定：各電池之電壓在充電告終時為 2.7 伏，在放電告終時為 1.8 伏。故電池組之主部分當外電路電壓為 110 伏時須有 $110 \div 2.7 = 40$ 電池，而連開關電池在內之電池組必須有 $110 \div 1.8 = 60$ 電池。開關電池之數故等於 $60 - 40 = 20$ 或約占電池組之 30%。

4. 轉數變動。其他一問題為電流消耗不變時電機轉數變動對於電樞電流之影響。外電路電壓同時為電池組之路端電壓故大都變。反之，若轉數變動，電機之電壓隨之而變。結果，電樞電流 I_a 依方程式 (1) 變動。又在外電路內既不起變化，電池組電流亦隨電樞電流變動。故轉數變動惹起電池組電流之變動。

52. 電壓之區分。

電池組與電機並聯而供給電流時，為區分電壓(電壓之區分¹⁾)祇須將中線接在電池組之中點。電池組兩半之負載然往往不等。

又同軸之二串聯均壓機²⁾亦可供區分電壓之用(圖154)。其中在負載較強一側之電機發電而依第 154 圖供給電流 I 。此電機呈電動機性能之第二機轉動。如命 I_0 表一機之零載電流，則電動機納取 $I + 2I_0$ 電流。中線內之電流，申言之，電流 I_1 與 I_2 之差故為 $2I + 2I_0$ 。

為減少電機電樞內歐姆電

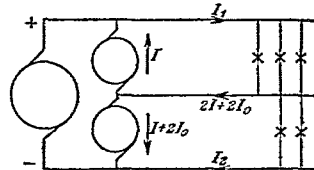


圖154. 帶均壓機之三線。

¹⁾電壓之區分; Spannungsteilung; division of voltage; division de tension. ²⁾均壓機; Ausgleichmaschine; equalizer; égalisatrice.

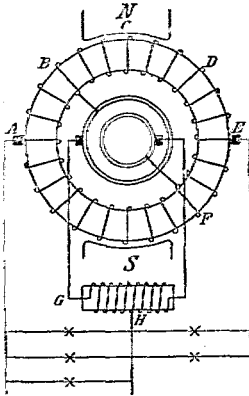


圖165. 電壓經抗流線圈之區分。

壓消耗之影響，使二電機分別經他半不相屬之外電路之電流激發，或應用中線之電流以強化發電機之磁場及減衰電動機之磁場。

在依陀羅華爾斯基¹⁾之用抗流線圈之電壓區分中(圖155)，將電樞繞組上在雙極電機中相距一極節距之二點接至匯電環，在匯電環間於是發生一交流電壓，後者饋電於一抗流線圈。據第72節，在此圈內惟直流能通過之。

總交流電壓等於BF，其中DE及EF

二電壓互相抵消，交流電壓故等於BD，

其一半等於BC。然此亦等於電壓GH。若將電壓BC及GH分別加於電壓AB，則在第一情形中得一半直流電壓而在第二情形中得直流電壓AH，後者故等於一半直流電壓。

其他一種更完善之電壓區分法係由散格爾²⁾所創。依此法，在繞組上互以 $\frac{2}{3}$ 極節距相距之三點經過匯電環而被接於依星形連接之三抗流線圈。零線係與星點相連接。終則依達脫瑪³⁾零線可經過在換向器上之二主刷間之一輔助刷返至電機。

53. 定流電機⁴⁾。

供列車照明⁵⁾用之羅森堡電機⁶⁾係經車之輪軸轉動，其轉數故頗不一致。此種電機係經電樞電流激發，雖然電樞僅帶有一繞組，然仍可依第156圖想像其有帶二換向器之兩繞組。其中導激發電流 I_x 之

1) 陀羅華爾斯基; Dobrowolski. 2) 散格爾; Sengel. 3) 達脫瑪; Dettmar. 4) 定流電機; Maschinen für gleichbleibenden Strom; machines for constant current flow; machines pour écoulement constant du courant. 5) 羅森堡電機; Rosenbergmachine; Rosenberg's machine; machine de Rosenberg. 6) 列車照明; Zugbeleuchtung; train lighting; éclairage des trains.

內繞組X經過 B_1, B_2 刷而被捷接。至導電流 I_y 之外繞組Y經過 B_3, B_4 二刷而饋電於外電路。與 B_3, B_4 二刷相連接者又有電機之磁鐵繞組及電池組。

由磁鐵繞組內定電流與電樞電流 I_y 之反作用惹起鉛直輔助通量 Φ_y 之磁場。當 X 繞組橫切之此磁場時即惹起激發電流 I_x ，後者發生一水平面通量 Φ_x 。

由電流 I_y 惹起之激發強度然後小於由定磁鐵電流所惹起者，否則若二者相等，通量 Φ_y 及產出之電流 I_x 皆消滅。且此時通量 Φ_x 及

經是發生之電流 I_y 均當等於零。職是之故，電流 I_y 無時不在極限之下，而縱使有無限大之轉數時亦然。此作用方式由計

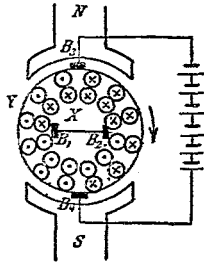


圖156. 格拉姆發電機。

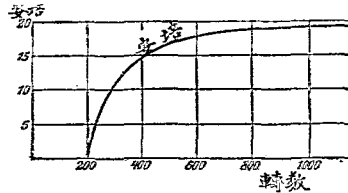


圖157. 格拉姆發電機之電流強度。

算顯出較佳。在此種計算中 a 至 f 均有固定值。

在經捷接之X繞組內產生一種電壓，後者與通量 Φ_y 及轉數 n 為比例。依據歐姆定律，一方面此電壓與電流 I_x 為比例，申言之，又與經此電流所惹起之通量 Φ_x 為比例。由是得 $\Phi_y n = a \Phi_x$ ，其中 Φ_y 與定磁鐵激發強度 b 及安匝數 $c I_y$ 之差為比例。一方面當鉛直刷上之電壓 U 固定時， Φ_x 與轉數為反比。上式於是變為如下之方程式：

$$(b - c I_y) n = a / n, \quad \text{即 } I_y = e - f / n^2.$$

轉數充分大時，方程式右方之第二項消滅，申言之，電流幾乎與轉數無關。第 157 圖表示 $e = 20$ 及 $f = 80 \times 10^4$ 時電流強度與轉數之關係。

為防轉數極小時發生倒流，在電機與電池組之間插入一鋁電池¹⁾

¹⁾ 鋁電池；Aluminiumzelle; aluminium cell; élément d'aluminium.

，後者於一鹵精液內含一鉛電極及一鐵電極。此電池祇任電流依鐵向鉛之方向通過。主刷 B_3B_4 之符號係與轉向無關。電機可由其剩磁自行激發。

以不變轉數轉動並供探照燈¹及銲接機²用之克來謀氏機³當外電阻強變時仍供給某一定強度之電流。其極上有三繞組(圖158)。其中分繞組1與刷相連接，繞組2係在串繞組內而繞組3則經一固定電

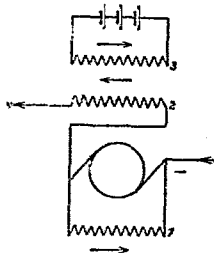


圖158 克來謀氏機。

壓自外激發。此電機為帶完全非飽和鐵之不穩定電機。茲命 U 表路端電壓， I_1 分路內之電流及 R_1 磁鐵繞組1之電阻。由調整電阻 R_1 可使第159圖中之零載曲線——因飽和弱微此線為一直線——呈與下相當之關係： $BA:OB=U:I_1 \cdot R_1$ 。此後單獨經分繞組之影響而產生之電壓足以抵償繞組1之 R_1 電阻內之壓耗。是種電機不自激發。其外激發使電機在較大或較小之電壓下工作，終至此激發

移開後，電壓保持其曾經達到之值。

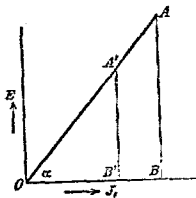


圖159. 不穩零載曲線⁴。

在是處外激發等於串繞激發²與固定激發³之差。今如外電阻減小，電流強度當初增加。因此與分繞激發¹相反之串繞激發²之作用超出激發³，電壓下降。主電流故減小，至外激發變為零時為止。此後遂發生平衡，因當時在分繞組影響下產生之電壓適足維持分繞組內之電流。電壓例如從 BA 降至 $B'A'$ (圖159)。

視線圖²及³之匝數，主電流既等於外激

¹探照燈; Scheinwerfer; searchlight; réflecteur. ²銲接機; Schweißmaschine; welding machine; machine à souder. ³克來謀氏機; Krämersche Maschine; Kramer's machine; machine de Kramer. ⁴不穩零載曲線; labile Leerlaufkurve; unstable no-load curve; courbe instable en circuit ouvert

發之固定電流，故由調整外激發之電流可變動主電流。

54. 效率。

一電機之損失包括在電樞繞組及磁鐵繞組內之電熱損失及零載損失¹⁾。如轉數及激發強度不變，零載損失在有負載時與無負載時相同。此損失包括摩擦損失及鐵損失。

摩擦損失²⁾係經軸承，刷及空氣之摩擦而促成。為便於洩出機內之熱，電機概帶外套，如輪機電機大部皆然。因此旋轉部分之兩端有如通風器之構造而從一鹵孔吸入之空氣先吹過機內之空隙——通風電機³⁾。

鐵損失包括磁帶損失⁴⁾及渦流損失。其中磁滯損失依據德國電機工程師協會之規定與感應強度之平方為比例。

在電樞鐵，極鐵，電樞銅及在電樞螺釘內發生之渦流損失係與感應強度之平方為比例，因隨感應強度不但產電壓即渦流之強度亦增加。

茲命E表電機之產電壓，U路端電壓，I外電路電流， I_a 電樞電流， I_m 磁鐵電流， R_a 電樞電阻及 N_0 。導入於充電動機轉動之電機之電樞內之功率。於是分統電機用充發電機時之效率

$$\eta = \frac{UI}{EI_a + N_0} = \frac{UI}{UI + I_a^2 R_a + UI_m + N_0} \quad (2)$$

為確定效率，由實驗決定導入於發電機內之機械功率並以此分有用功率。然效率亦可由諸損失決定。為此任電機充電動機虛轉，此時加入於電樞內之功率等於零載功率 N_0 。於此功率上如加磁鐵內之電熱及與工作電流相當之電熱 $I_a^2 R_a$ ，則得有 I_a 電流之負載時之全損失。

負載大時，電樞內之電熱損失 $I_a^2 R_a$ 頗大，而效率則低小。負載

¹⁾零載損失; Leerlaufverlust; no-load loss; perte en marche à vide. ²⁾摩擦損失; Reibungsverlust; frictional loss; perte de frottement. ³⁾通風電機; ventilierte Maschine; ventilated machine; machine ventilée. ⁴⁾磁滯損失; Hysteresisverlust; hysteresis loss; Perte par hystérésis.

小時，在磁鐵繞組內之固定電熱損失 UI_m 及零載損失 N_0 占主要部分而效率復低。在有適中負載時，可變動之電樞內之電熱損失約等於固定損失，其時效率最大。

效率曲線在近巔值之一大段幾乎近於水平，以是在此段內縱使負載劇烈變動，其對於效率之影響不大。

設某電機有 $U = 110$ 伏之路端電壓，而此由變動磁鐵電路內之電阻維持之。電樞電阻連刷之電阻在內假定為 0.2 歐。電機之零載曲線假定如第 115 圖所示，其中分為 4000 分部之水平線表示磁鐵電流，零載損失假定等於 250 瓦特。其經磁鐵激發變動之影響既限於一小部分，故是種損失可視為固定之一種。電樞之反效應為零。求電樞電流為 25 ， 50 及 75 安時之效率。如 $UI + UI_m + I_a^2 R_a + N_0 = \Sigma N$ ，則得下列諸值：

I_a	25	50	75	UI	2620	5335	8040
$I_a R_a$	5	10	15	UI_m	130	165	210
$E = U + I_a R_a$	115	120	125	$I_a^2 R_a$	125	500	1120
I_m 由第 115 圖	1.2	1.5	1.9	N_0	250	250	250
$I = I_a - I_m$	23.8	48.5	73.1	$\eta = UI / \Sigma N$	0.84	0.856	0.838

今由一實驗分析在有一固定激發強度時之零載損失。為此將二相同電機聯軸並使第一機轉動如一電動機而使第二機當初在不激發狀態。今自加入於電動機內之功率減去電熱 $UI_m + I_a^2 R_a$ 。其剩餘部分等於二機之摩擦損失及第一機之磁滯損失及渦流損失。此後將第二機激發，但仍任其虛轉。於是在電動機之各損失上復須加上第二機之磁滯損失及渦流損失。至是可確定摩擦功率及磁滯損失與渦流損失之總和。

設欲由此總和分出磁滯損失及渦流損失，以另一轉數重作此實驗，其時激發強度，換言之，即電機磁場自然必須如前不變。據第 58 節電動機之轉數係由變動電樞電路內之電阻而致。磁滯損失既與轉數之第一幂而渦流損失與轉數之第二幂成比例，則由應用 c_1 及 c_2 二常數求得磁滯損失 N_h 及渦流損失 N_w 之總和

$$N_h + N_w = c_1 n + c_2 n^2,$$

$$\text{即 } (N_h + N_w) \div n = c_1 + c_2 n. \quad (3)$$

如在第 160 圖中，依水平方向表轉數 n 及依鉛直方向表 $(N_h + N_w)/n$ ，則得一直線，其在垂軸上之一切點 c_1 表示一轉間之磁滯損失。以轉數乘之，則得總磁滯損失，如是遂將零載功率分析為其各部分。

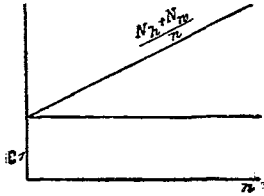


圖160. 鐵損失之分析。

摩擦損失又可經疲轉實驗確定。為此先令激發後之電機以高於預定之轉數充作電動機運動，開斷電樞電流並任電機於不變磁鐵激發強度下繼續運轉；其轉數經全零載損失 N_0 之制動作用而減少。此後觀測其在某一定時間之轉數並依水平方

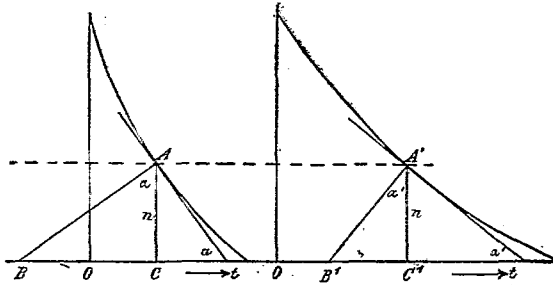


圖161. 磁鐵激發時之疲轉曲線¹⁾。 圖162. 磁鐵不激發時之疲轉曲線。

向表時間而依鉛直方向表轉數（圖 161）。如不觀測其轉數，則可注意與轉數為比例之路端電壓。次將電樞電流及磁鐵電流開斷並任電機如前疲轉。疲轉時間今較長，因此時已無鐵損失之制動作用（圖 162）。

命工作轉數 n 等於 AC 及 $A'C'$ 。次設法線 AB 及 $A'B'$ 並假定電樞之運動能與轉數之自乘為比例。如 k 表一恆數，則運動能 $W = kn^2$ 。

¹⁾疲轉曲線；Auslaufkurve；curve of slowing down；courbe de ralentissement.

申言之， $dW/dt = k2ndh/dt$ 。其中 dW/dt 表在單位時間內經損失之制動作用惹起之能之變動，申言之，即表以同轉數虛轉時所消耗之功率。此功率在第161圖中等於全損失 N_0 。而在第163圖中等於摩擦損失 N_f 。一方面 dn/dt 等於 $tg\alpha$ 或第於 $tg\alpha'$ ，準此， $N_0 = k2ntg\alpha$ 及 $N_f = k2n \times tg\alpha'$ ，申言之， $N_f:N_0 = tg\alpha':tg\alpha = B^2C^2:BG$ 。

在有一定轉數 n 及激發強度時，全損失 N_0 （電熱除外）既可由一虛轉實驗測定，則損失 N_f 自可計算。

依據台脫理另一確定摩擦損失之方法如下：用一前置變阻器變動作電動機而轉動之電機之刷電壓並由變動磁鐵電流 i_m 將轉數調整至有某一定值 n 。此時在163圖中依水平方向表 i_m 或刷之電壓 U ，依鉛直方向表零載損失 N_0 。減去電樞內電熱後之值。將如是製出之曲線延長

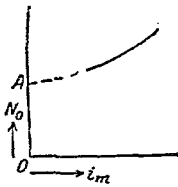


圖163.

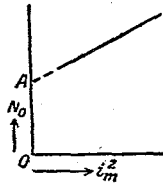


圖164.

摩擦損失之確定。

使其切鉛直線於A點。OA遂表磁鐵未激發時之零載損失，申言之，即摩擦損失。經剩磁之磁場惹起之鐵損失此時等於零。如依水平方向表 i_m^2 或 U^2 （圖164），則曲線延長較便。

霍普根生¹⁾示一種縱使無相當大之功率源時檢驗有全載之電機之功率損失之方法。為此將欲檢驗之兩相同電機聯軸。其一如電動機係與外電路連接並轉動充作發電機之第二機，後者當初仍虛轉。今使此機激發使有與外電路等強之電壓並依第125面將其接在外電路上。由增加其激發強度令第二機依第125面供給電流於外電路。其時電動機從外電路導取相當電流。其實由發電機產出之電流直接回至電動機內（反工作²⁾）而外電路祇供給由兩機之全損失決定之功率。此功率故容易決定。兩機之激發強度須有能惹起與尋常工作時相當之轉數及電

¹⁾霍普根生; Hopkinson. ²⁾反工作; Rückarbeitung; back working; travail inversé.

流強度。激發較強之一機用充發電機而激發較弱之一機用充電動機。

第九章 直流電動機

55. 電動機之轉向。

直流電動機¹⁾在構造上全與發電機同。同一電機竟可一時充發電機，他時充電動機。一電機當其充發電機而被轉動時惹起與原動矩相反對之轉矩，故有與電動機相同之工作傾向。同樣，電動機惹起與電流相反對之電壓，故同時有與發電機相同之工作傾向。

依據能量不滅律，發電機之轉動耗費相當量之能。由運動而產生之電流限制運動，當時磁場對於電流導體施一種反力，反對運動。例如發電機依時針方向而被轉動時（圖165），電流與磁場惹起之力作用使電樞依逆時針方向即依由虛矢線指出之方向轉動。

今設想移開原動機並任電機充作電動機由一電源供給電流（圖166），如電樞繞組及磁鐵繞組內之電流方向全與第165圖中相同，則電機此時轉動之方向必與以前相反；申言之，如在電樞繞組及磁場繞組內電流方向不變，電機充電動機時之轉向勢必與充發電機時被轉動之方向相反。

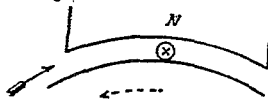


圖165. 反對發電機轉動之反力。

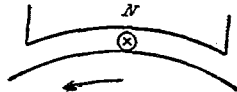


圖166. 經電樞交換作用轉動之電動機。

然由是並非謂各電機自發電機狀態過渡至電動機狀態時其轉向改變。轉向之倒轉惟須電樞及磁鐵內電流方向同時不變。以下擬討論發生此變動時之情形。

一串繞電機在第167圖中充發電機而被轉動，在第168圖中則充電動機（串繞電動機²⁾）而轉動。在二情形中接法全不變動。此時電

¹⁾ 直流電動機；Gleichstrommotoren；direct current motors；moteurs à courant continu. ²⁾ 串繞電動機；Hauptschlussmotor；series motor；moteur en série.

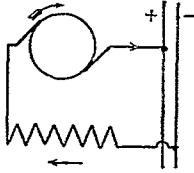


圖167. 充作發電機之串繞機。

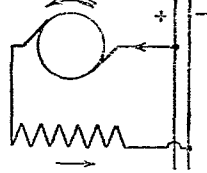


圖168. 充作電動機之串繞機。

流之方向在電動機之電樞及磁鐵中與在發電機之電樞及磁鐵中相反，故如不改變接法，一串繞電機充作電動機時之轉向與充作發

電機時之轉向相反。

為令充作發電機之串繞機當過渡而為電動機時仍保持原來之轉向，必須改變磁鐵繞組或電樞繞組之接法(普通改變電樞繞組之接法)。

依同一情形，當使在轉動中之串繞電動機與饋電線分離並使其充發電機接在電阻上時如在街道電車及起重機之電力制動¹⁾中然，其磁鐵或電樞之接法必須改變——捷路制動²⁾，否則電機不自激發，蓋剩磁發生之電壓有與電動機之反電壓相同之方向，故發生一種減衰剩磁之電流。

今欲將一分繞電機充作電動機(分繞電動機³⁾)且不改變其接法。故依據第 169 及第 170 圖，磁鐵電流之方向仍照舊。

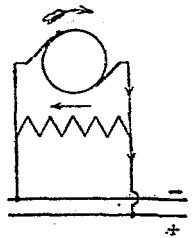


圖169. 充作發電機之分繞機。

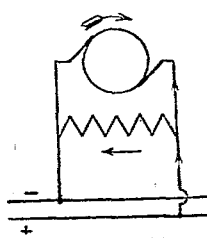


圖170. 充作電動機之分繞機。

之方向則在兩機中相反。若電流方向在磁鐵繞組及電樞繞組中皆仍舊，則電動機當依與電機相反之方向而轉動，但如若僅倒轉電樞電流之方向，則電機充作電動機時

¹⁾ 電力制動; elektrische Bremsung; electric braking; freinage électrique.

²⁾ 捷路制動; Kurzschlussbremsung; short-circuit braking; freinage par court-circuit. ³⁾ 分繞電動機; Nebenschlussmotor; shunt motor; moteur shunt.

之轉向當與充作發電機時之轉向相同。故一充作發電機而被轉動之分繞機如不改變接法當依先時之轉向而作電動機轉動。又如不改變充作電動機時之轉向，使一分繞機充作發電機而被轉動，此機能自激發。

改換與總線之連接對於轉向不發生影響，因由是電流在電樞繞組及磁鐵繞組內之方向均經倒轉之故。以是若欲改變轉向必須單獨改變電樞電流之方向或單獨改變磁鐵電流之方向，且因有磁滯影響，通常改變電樞電流之方向（圖171及172）。

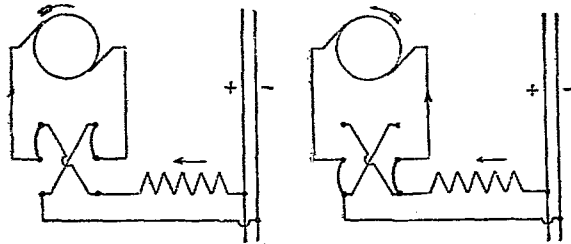


圖171. 圖172.
一串繞電動機之換向裝置。

56. 轉矩，轉數及功率。

命 ρ 表有光心電樞繞組之電樞在表面隨處之感應強度。又命 b 表電樞之長， d 電樞直徑， z 線數， p 極對數， $2a$ 電流分路數及 I_a 電樞電流。在 dx 寬度內，線長當為 $zb dx/d\pi$ 。準此，當線內電流強度為 $I_a/2a$ 時，作用於 dx 寬度之力據第52面第16方程式為

$$dP = \frac{I_a}{2a} \times \frac{z b dx}{d\pi}.$$

今以 $b dx$ 表通過 $b dx$ 面積之通量。如沿一極節距積算之，得一極之通量 Φ 及一極節距之輓力，再以極數 $2p$ 及半徑 $d/2$ 乘積之，得轉矩

$$M = \frac{P}{a} \times \frac{\Phi z I_a}{2\pi}. \quad (1)$$

如 Φ 以伏秒數， I_a 以安培數計算，則轉矩當以焦耳數計算，而1焦耳等於0.102仟米克。

上列之方程式係據一光心電樞導出，然此式對於有槽電樞亦適用。有用轉矩等於依上式算出之轉矩減去虛轉所須之轉矩。

據第1方程式，由電動機惹起之轉矩係與通量及電樞電流為比例。在穩定狀態時，電動機之轉矩係與由負載決定之轉矩相當，故 ΦI_a 之乘積恆隨負載而變動，申言之，即依負載之轉矩而定。通常祇當電動機尚靜止而電流強度尚不足使電動機起動時，電流可經一變阻器調整。但電動機一經轉動之後，方程式(1)即適用，申言之，電流強度視由負載而定之轉矩變動。此轉矩包括摩擦矩在內。

無自動變阻器之電動機，其電流強度恆與負載相當，其所以然者，因電動機之電樞恰如發電機之電樞然橫切一磁場並因而發生反電壓(參考第141面)。此反電壓與轉數為比例並對於流入之電流有抗流之效應，恰如一蒸汽機之調整器對於流入之蒸汽有阻遏之效應。

例如電動機之負載或負載轉矩增加，則當時之電流不足挽負載，故電動機之速度降下而反電壓隨之減小。結果，遂流入較強之電流至其強度與新轉矩相當為止。

反之，如負載減小，則因由當時電流強度惹起之轉矩過大，電動機轉動加速。由是而增加之反電壓阻止電流至在穩定狀態時電動機之轉矩仍等於其負載矩。

轉數係由產出之反電壓 E 決定，其方程式如下：

$$E = p/a \cdot \Phi \cdot n \cdot z.$$

外電路電壓 U 既應抵償反電壓及電壓損失 $I_a R_a$ ，故 $U = E + I_a R_a$ ，由此二方程式得轉數

$$n = \frac{E}{p/a \Phi z} = \frac{(U - I_a R_a)}{p/a \Phi z}. \quad (2)$$

負載或電流之變動故不但促成暫時的且往往不絕的轉數變動。依據第2方程式，在帶定磁場之電動機(分繞電動機)中，轉數之變動

極小，但在磁場強度隨電樞電流而變動之電動機（串繞電動機）中，此變動極大。

功率 N 係等於轉矩 M 與角速度¹⁾ ω 之乘積，申言之，

$$N = M\omega. \quad (3)$$

其中 $\omega = 2\pi n$ ，如 M 以焦耳數計， ω 以秒⁻¹ 數計，則功率當以瓦特數計。

如又欲以電單位表示輸出之功率，則以 I_a 乘關於 U 之方程式，於是得： $UI_a = EI_a + I_a^2 R_a$ ，其中 UI_a 表輸入於電樞內之功率，而 $I_a^2 R_a$ 表在電樞內變為電熱之功率。準此則 $E I_a$ 當表機械功率或機械力，其中包括有載功率及零載功率。

今據能量或功之不滅律， $E I_a = M\omega$ 。此事實可由在第143及144面關於 M 及 E 之方程式表明之。

轉矩或電樞電流極弱時，功率不大，負載增加時，功率亦增加，終至負載極大時，因轉數減少之故復降下，為決定功率達顛值時之時間乃依 I_a 微算 $N = E I_a = U I_a - I_a^2 R_a$ 方程式並以第一微分商等於零，於是得 $U - 2 I_a R_a = 0$ ，申言之， $I_a R_a = U/2$ 。故當電壓損失等於外電路電壓之一半或等於反電壓時功率最大。此情形當然不在工作範圍之內，蓋電動機不能耐如是強之電流，且當時導入之功率既一半變為電熱，故當有此過載量時，效率僅等於0.5。

57. 分繞電動機。

在分繞電動機中，磁鐵繞組直接由電源饋電，磁鐵繞組及電樞以後與外電路相連接，中間開去電阻。

依第 1 方程式全轉矩

$$M = \frac{p}{a} \times \frac{\Phi_z I_a}{2\pi}.$$

磁場既固定不變，故轉矩與電樞電流為比例（圖173）。

¹⁾角速度；Winkelgeschwindigkeit；angular velocity；vitesse angulaire.

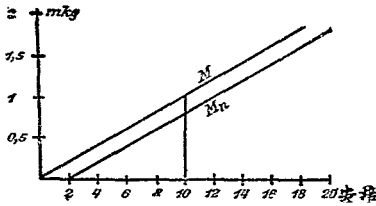


圖173. 轉矩及電樞電流。

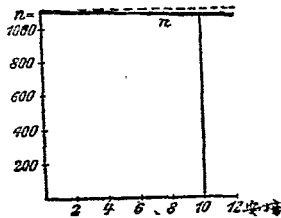


圖174. 轉數及電樞電流。

有用轉矩 M_n 比較全轉矩小零載損失。此轉矩故與 $I_a - I_0$ 之差為比例，其中 I_0 當表電樞內之無載電流或虛流。於是得第 173 圖中與全轉矩直線 M 平行並在水平軸上切下 I_0 段之直線 M_n 。

據第 2 方程式，轉數 $n = (U - I_a R_a) p / a \Phi z$ 。通量既然固定，故轉數與反電壓 $U - I_a R_a$ 為比例。與虛轉時相較，轉數之減少於是與電壓損失 $I_a R_a$ 或即與電流 I_a 為比例（圖 174）。但電壓損失既往往極小，

故分繞電動機之轉數在無載時及有全載時幾全相等。成羣工作時，分繞電動機為惟一適當之機種。

據第 3 方程式有用功率等於 $M_n 2\pi n$ 或 $E(I_a - I_0)$ 。如命 I 表電樞電流 I_a 及磁鐵電流 I_m 之總和，則效率

$$\eta = \frac{E(I_a - I_0)}{UI} = \frac{(U - I_a R_a)(I_a - I_0)}{U(I_a + I_m)} \quad (4)$$

虛轉時， $I_a = I_0$ ，而效率等於零。又當負載極大而縱使用最強可能的電樞電流 $I_a = U/R_a$ 不能挽電動機時，效率亦等於零。電動機僅暫時能耐此種大負載。

在有適中負載而電樞內之電熱損失約等於磁鐵內之固定零載損失及電熱損失時，效率最大。在有較小負載時，磁鐵內之兩損失占重要部分，而當有較大負載時電樞內之電熱損失極為顯著。

茲舉一例為譬。假定某二極電動機，其中

$$U = 110 \text{ 伏} \quad z = 300 \quad I_m = 1 \text{ 安}$$

$$\Phi = 2.0 \times 10^{-2} \text{ 伏秒} \quad R_a = 0.3 \text{ 歐} \quad I_0 = 2 \text{ 安}$$

今據第 1 方程式若 Φ 以伏秒計算而 I 以安培計算，則轉矩當以仟米克計算

$$M = \frac{1}{9.81} \times \frac{2.05 \times 10^{-2} \times 300}{6.28} I_a = 0.1 I_a$$

於是有效轉矩 $M_n = 0.1(I_a - I_0)$ 。

據第 2 方程式每分鐘間之轉數

$$n = \frac{60(110 - 0.3 I_a)}{2.05 \times 10^{-2} \times 300} = 1073 - 2.93 I_a$$

例如有用轉矩 $M_n = 0.8$ 仟米克，則電樞電流 $I_a = 8 + 2 = 10$ 安，全轉矩等於 1 仟米克而每分鐘之轉數 $n = 1044$ 。與絕對虛轉時之 1073 轉數相較，其轉數約減少 3%（參考第 173 及 174 圖）。

同時有用功率

$$N = E(I_a - I_0) = (U - I_a R_a)(I_a - I_0) = 856 \text{ 瓦}$$

及效率

$$\eta = \frac{N}{U(I_a + I_m)} = 0.7$$

茲須決定者為效率最大時之電流強度。零載損失或固定損失既等於 $UI_0 + UI_m = 330$ 瓦，故當有最大效率時， $I_a^2 R_a$ 損失亦約為 330 瓦。若電樞電阻 $R_a = 0.3$ 歐，則 $I_a = \sqrt{330/0.3} = 33$ 安。今試算有此負載及有一半至二倍負載時之效率得

I_a	$I = I_a + I_m$	$I_a - I_0$	$E = U - I_a R_a$	$\eta = E(I_a - I_0) : UI$
17	18	15	105	0.8
33	34	31	100	0.825
66	67	64	90	0.75

據是以觀，當負載變動大時，效率僅略許變動。故當計劃電動機之構造時毋須規定電動機於有額面負載時須有最大效率。以其轉數僅略次於作無載轉時之轉數，小電動機之負載概次於有最大效率時之負

載。

58. 分繞電動機之起動及調整。

1. 起動。如令一靜止電樞與全外電路電壓相連接，則因電流過強，電樞發熱過甚。且強流之衝動在導線內惹起大電壓損失並使附近電燈閃動不已。以是之故，每當電動機起動時在電樞繞組之前插入電阻（起動電阻¹⁾），俾電流強度不致過分之。如此後電動機起動，則反電壓隨速度而增加。反電壓維持電樞電流之強度使其有隨負載矩而定之值。以後可將起動電阻逐漸開去。

起動器祇許單獨插在電樞電路內而不許插在電樞及磁鐵之總饋電線內。否則當靜止時，磁鐵繞組被相並聯之電樞繞組捷接，以致電動機之路端電壓幾頻零值。此時磁鐵既不經激發，故電動機不會起動。一分繞電動機故恆須有三饋電線。

若起動之質量不大，則無起動器亦可起動。此情形例如見於船舶之原動機中，因船開動時船之螺旋槳須激起水之泡沫，起動阻力仍極小。為此將二分繞電動機之電樞串聯，且不插入電阻即令與外電路電壓相連接。在各電樞內故當初僅有一半外電路電壓。俟電動機起動之

後，再令各電樞連接全電壓。因電樞之自感應延宕電流之增長，而簡單歐姆定律對於電路開閉過程又不適用之故，是種不用電阻之起動自然可用。

又根據同一理由，當起動之質量不大時可使一小串繞電動機不用起動器而起動。

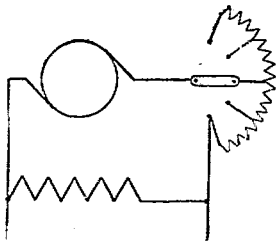


圖175. 電阻之調整。

2. 電阻之調整²⁾。 一電動機之

1) 起動電阻; Anlasswiderstand; starting resistance; r'sistance de démarrage. 2) 電阻之調整; Widerstandsregelung; regulation of resistance; r'sistance régulatrice.

磁鐵繞組係直接與固定外電路電壓相連接，而電樞則經可調整的變阻器與外電路電壓相連接（圖175）。假定負載不變，此時轉矩與轉數亦不變。無論負載或強或弱或僅等於摩擦負載，前置電阻之變動對於電流強度不發生影響，蓋依據第143面之第1方程式電流強度僅隨負載而變，故若負載不變而僅前置電阻變動，則電流強度當不致變動。就一般而言，當初減少電阻時，電流強度略許增加。然因此由電樞惹起之轉矩大於由負載決定之轉矩，故電樞之轉數增加。同時反電壓增加，電流強度遂減至當初之值。此值當與由負載決定之轉矩相應。在分繞電動機中，電流強度僅隨負載變動。

反之，電動機之轉數頗與前置電阻有關。外電路電壓 U 不但須克服反電壓及抵償電樞內之電壓損失但又須抵償前置電阻 R 內之壓耗，申言之， $U = E + I_a R_a + I_a R$ 。在此方程式中 U 及 R_a 不變，而若負載不起變動， I_a 亦固定。由是可知前置電阻之變動頗影響反電壓及轉數。

如若完全忽略電樞內之小電壓損失並以刷電壓與反電壓相等而相反，則此情形更為明顯。此時用一電壓指示器在刷處測定反電壓。以後由變動電阻 R 可知轉數幾恰與刷電壓為比例，而當虛轉時，因電樞內電壓損失最小，此種測定尤為準確。在第147面之例題中，例如帶110伏之刷電壓而虛轉時，依據第144面之第2方程式每分鐘之轉數 $n = 1067$ 。若以一前置電阻阻遏電壓使減至55伏，則依據第144面第2方程式每分鐘之轉數 $n = 531$ 。故刷電壓為55伏時之轉數約為110伏時之一半。準此以觀，轉數依刷電壓而變動。故用前置變阻器變動刷電壓可調整轉數。此種變阻器故亦稱調整起動器¹⁾。

如以上所述，前置變阻器係插在電樞分路內而非插在電樞及磁鐵之公饋電線內，否則電樞電壓及磁鐵電壓同時皆變動。如將二者同時增加一倍，則在弱飽和磁鐵中通量亦幾乎增加一倍。但此時第144面之第2方程式之分子中之 E 及分母中之 Φ 皆增加一倍，故對於轉數不發生影響。祇當磁鐵在強飽和狀態時，增加電樞及磁鐵之公饋電

¹⁾ 調整起動器; Regelanlasser; regulating starter; démarreur de réglage.

壓可使轉數幾乎依比例而增加。

用前置變阻器以變動轉數僅當長用變阻器柄時可能，例如在調整街道電車之串繞電動機之轉數時，負載每次之變動立刻促成電樞電流之變動，故即促成變阻器中壓耗之變動。結果，刷電壓及轉數皆顯然變動。如加負載於一在電樞前帶有極大電阻之串繞電動機，其轉數可同至零值。故轉數經負載之自動顯著變動僅有用前置電阻而調整之。

3. 磁場調整¹⁾。若不用前置變阻器，轉數亦可由變動磁場而調整。若略去第144面第2方程式中之 $I_a R_a$ 並以反電壓恆等於路端電壓，此種調整最易解釋。因如用調整變阻器減少磁鐵電流之強度或減少通量 Φ ，即可使轉數增加。在弱磁場內，電動機必轉動較速，俾可惹起與路端電壓相等之反電壓。蓋磁場強度減衰之後就某一定轉數而產生之反電壓自必減小，電樞電流之強度遂增加，終致電動機之轉矩超出負載轉矩，結果，電動機之運動勢必加速。

ΦI_a 既與負載為比例，故當磁場減衰時，如負載不變，電樞電流必增加。如命 $U=110$ 伏， $R_a=0.3$ 歐， $z=300$ 及 $\Phi=2.05 \times 10^{-2}$ 伏秒，則當 $I_a=10$ 安時，依據第147面，每分鐘之轉數 $n=1046$ 。設在同一負載下，磁場依 $0.8:1$ 之比而衰減，則電樞電流依 $1:0.8$ 之比而增加。於是得 $\Phi=0.8 \times 2.05 \times 10^{-2}$ 伏秒 $=1.64 \times 10^{-2}$ 伏秒及 $I_a=10/0.8=12.5$ 安。電樞電流之增加對於轉數並非完全不發生影響，因電壓損失亦隨之而增加之故。通量減小之後，依據第144面第2方程式每分鐘之轉數為 $n=1296$ 。帶微弱電樞電阻之電動機其轉數則依 $1:0.8$ 之比而增加，即自1073增至1340。

如令磁場過分減衰，電壓損失對於轉數之影響終則極大，致轉數復遞減。最後開斷磁鐵電流時，轉數降至零值。 Φ 或 I_a 有某一定之值時，轉數在某一負載下最大。為確定此 I_a 值，依據第144面命機械

¹⁾磁場調整; Feldregulierung; field regulating; réglage du champ magnétique.

功率等於為此所耗費之電功率之一部分，申言之，命

$$M_{2\max} = UI_a - I_a^2 R_a.$$

在此實驗中，負載既不變動，故M不變。若令 $dn: dI_a$ 等於零，則得 $I_a R_a = U/2$ 。故由減衰磁場強度，使電壓損失減至路端電壓之一半時，轉數即達在某一固定負載下之最大值。然因電樞電流大而效率小之故，此情形並非一實有情形。

與電阻調整不同，磁場調整不惹起顯著損失。然電動機之由磁場整調者實不多見。電動機以大轉數在弱磁場內工作時，在磁的一方面不經充分利用。又在有強磁場時，其轉動緩慢，故在機械的一方面祇略經利用。磁場強度之減衰且往往祇當有小轉矩時可能，否則電樞電流隨減衰之磁場增至電動機不能耐之值。

4. 電阻之接法。令電動機停息時，若突然開斷磁鐵電流之電路，則因發生自感應之故，絕緣體有被突破之慮，而無論如何在開斷之處至少發生火花。因此之故，有將磁鐵電流先緩緩減至零值之必要，其一法如第176圖將開關開啓——此法然實際不適用。此後電樞經動能繼續轉動，而緩緩消失之磁場在電樞內仍惹起電壓。此電壓之方向既與工作時有效反電壓之方向

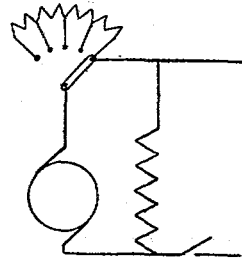


圖176. 不正當之開斷。

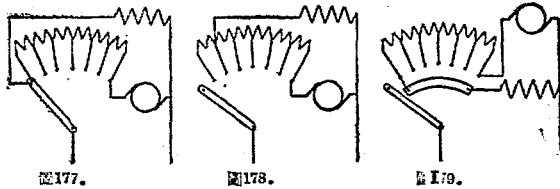
一致，故在磁鐵繞組內惹起與前時磁鐵電流同方向之電流。當電動機逐漸停息時，磁鐵電流故即磁場強度漸漸減至零值。此情形可由接在電動機接線標旋上之電壓指示器指出之。是種開去主電流之方法然極為危險，因當電動機停息之後，起動器¹⁾留在以後重閉電路時惹起危險捷路之位置。

至正當接法如第177圖所示，其中起動器及電樞先後相接而磁鐵繞組則被插在電樞自由末端與起動器之間。當柄在中間位置時，在右

¹⁾起動器; Anlasser; starter; démarreur.

端之電阻成起動器而在左端之一部分則在磁鐵電路內。電樞與磁鐵故永久連接，恰如第176圖中。在此情形下，電路之開斷（無火花開斷¹⁾）不惹起火花而尤當在全轉數下迅速開斷時為然。是種起動器因而稱曰無火花起動器²⁾。

在第177圖中磁鐵電路之電阻略許增加，但此無妨，因起動電阻遠小於磁鐵繞組之電阻。如欲稍稍減小磁鐵電路內之損失，則可將磁鐵電流從起動器分出（圖178）。然此後電路關閉之後，磁鐵電流當不致立即達其全值。為除去此缺點及磁鐵電路內之額外損失，常用一具帶雙刷彈簧之柄（圖179）。



分繞電動機中起動電阻及調整電阻之接法。

第180圖由磁場調整之起動器亦相同。柄復帶雙刷彈簧。電阻 R_1 表起動電阻。平時柄停在左刷條之右端。如令向左旋轉，此時為增加轉數將電阻 R_2 插在磁鐵電路內。為防電路開斷時惹起火花，起動器之左端係與變阻器之右端相連接，俾磁場繞組恆與電樞相連接（圖176至179）。

5. 起動機³⁾ 及 調整機⁴⁾。供極大電動機用之起動器，其製造不易，且用時惹起大損失，而尤以有大質量加速時為最。為在不良狀況下不絕的控制大功率電動機，例如運輸裝置⁵⁾，卸煤機，鉋床等之電動

¹⁾無火花開斷; funkenfreies Ausschalten; sparkless switching off; mise hors circuit sans étincelles. ²⁾無火花起動器; funkenfreier Anlasser; sparkless starter; démarreur sans étincelles. ³⁾起動機; Anlassmaschine; starting motor; départeur. ⁴⁾調整機; Regelmachine; variable speed motor; moteur à vitesse réglable. ⁵⁾運輸裝置; Förderanlage; transportation equipment; installation de transport.

機常用起動機及調整機。其調整且比較精細而精確。

例如在利歐那氏接法¹⁾中(圖181),被激工作機之電樞並不由外電路但由一特殊分激機所謂控制電機²⁾饋電,而與後者直接聯絡,中間並不插入一起動電阻。控制電機由一三相交流電動機所謂控制電動機³⁾以近於不變之轉數轉動。其電壓經一插在磁鐵電路內之電阻調整

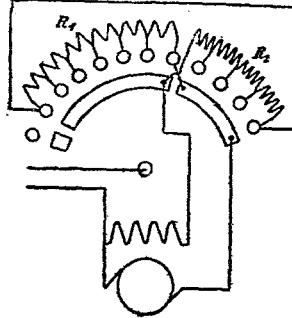


圖180. 起動電阻及調整電阻。

。工作電動機靜止時,控制電機之磁鐵電路開斷,如欲令工作機起動,逐漸增加控制電機之激發強度。又為停息工作機乃減衰控制電機之磁場至達零值。

在須不絕的起動及停息之電機中,往往依據英爾格納之方法於控制電動機及控制電機之軸上裝一飛輪。當工作機起動而控制電機之轉數減時,此輪給出其所儲蓄之能之一部分。工作機停息時,其作用如一發電機而供給電流於現時作電動機轉動而激發被弱化之控制電機,故因加速轉動,飛輪儲能。如是縱使負載強度變動,從外電路祇導入固定功率。控制電動機之轉數在有負載時務令其速減(12至15%),俾飛輪之作用可有效。控制電動機之大電樞電阻對於此有良好之影響。若其電樞電阻為零,則控制電動機依固定之轉數而轉動,申言之,負載之變動不由飛輪⁴⁾但由外電路調整——緩衝作用⁵⁾。

又在直流控制電動機中所須之減速運動亦可由設一串繞組於控制電動機上而致。此繞組經電動機電流通過之後強化分繞組之作用。其

1) 利歐那氏接法; Leonard-Schaltung; Leonard-connection; connexion de Leonard. 2) 控制電機; Steuersdynamo; control dynamo; dynamo de contrôle. 3) 控制電動機; Steuermotor; control motor; moteur de contrôle. 4) 飛輪; Schwungrad; flywheel; volant. 5) 緩衝作用; Pufferung; buffer action; action amortissuse.

效用根據當工作電動機有負載時反電壓頗阻遏控制電動機之電流。

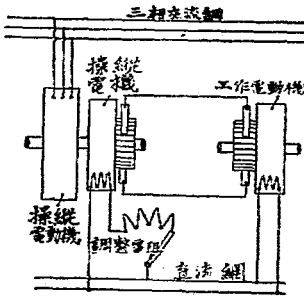


圖181. 利歐那氏接法。

較完全之方法係用英爾格納換流機¹⁾，其中當工作電動機起動之際，在控制電動機之電樞電路內自動插入電阻。此電阻當控制機減速之際亦自動插入。控制電動機之電流遂被維持不變。加入於控制電動機內之功率故一定而由飛輪應付負載之變動。又由變動激發強度亦可使直流控制電動機之電流不變。依此法電力廠

持續供給等強電流於控制電動機，無論工作電動機消耗電流或反給電流或一時停息。工作電動機起動時，控制電動機及飛輪合力轉動控制電機，制動時控制電動機及變為電動機而轉動之控制電機共同施力於飛輪。

在捲揚裝置中，籠在井中一定之深度與控制柄一定之位置相應而與負載全無關。此種調整不能由利用前置電阻而致。

大電動機又可經昇壓機²⁾起動，其產電壓當初與外電路電壓反對，以後則與之一致。在第 182 圖中例如激發固定之工作電動機係依 1000 伏電壓而構成，昇壓機及與之聯軸並激發強度亦固定之輔助機係依 500 伏電壓而構成。外電路電壓假定為 500 伏，輔助機既直接與外電路相連接，故輔助機及昇壓機以近於固定之轉數不絕轉動。且工作電動機靜止時其作用僅如昇壓機之饋電線。昇壓機轉動輔助機，後者之產電壓若由適度激發而產生者恰與外電路電壓相等並相反。

今弱化作電動機轉動之昇壓機之激發強度並由是略增其速度。因轉數增加之故，輔助機之產電壓超出外電路電壓並供給電流 I_1 ，因此昇

¹⁾ 英爾格納換流機; Ilgner-Umformer; Ilgner converter; convertisseur de Ilgner. ²⁾ 昇壓機; Zusatzmaschine; booster, survolteur.

壓機之電動功率及電流 I_2 增加。以事實而言， I_1 經過工作電動機之電樞而入於昇壓機中。

終則電流 I_2 極強致迫工作電動機起動。此時在右方有兩串聯之電動機但並不聯軸。就一般而言，外電路電壓係完全隨意分配在二電動機間。然在本情形中，昇壓機之轉數幾乎不變，故其產電壓由常時之激發強變決定。為抵消此反電壓須耗費外電路電壓之某一定部分。剩餘之電壓與工作機相連接，故後者依某一定之轉數而轉動。

俟工作電動機起動之後，電流強度 I_2 係由工作電動機之負載而決定（據第144面），故如昇壓機之磁場強度繼續減衰，電流強度不再會增加。昇壓機之與通量及與電流 I_2 為比例之轉矩今因磁場減衰而減，申言之，此機之速率減小。其減小率雖不大，但足以使由輔助機發生之電流減至零值。

此後使昇壓機之磁場降至零值，此機今由作電動機轉動之輔助機虛轉，但不發生電壓。在工作電動機上之電壓故為500伏。

今依相反之方向逐漸激發由輔助機轉動之昇壓機，故其產電壓與電流 I_2 同向。此機因而變為一發電機，其電壓與外電路電壓相加。電動機之路端電壓於是逐漸增至1000伏，以致電動機之轉數達其最高值，其功率一半直接由外電路而他半由昇壓機供給，間接自然全由外電路供給。

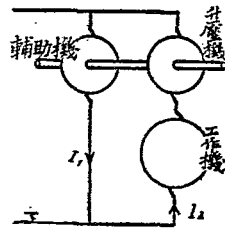


圖182. 由昇壓機之起動。

59. 串繞電動機.

在串繞電動機中，電樞電流同時為激發電流。其與通量連合惹起轉矩。故如增加串繞電動機之負載，則電樞電流及通量均增加。依據第143面第1方程式轉矩係隨二有效量 Φ 及 I_a 而增加。故在零非飽和之電動機中，二倍大之電流係與二倍大之通量相應，故即與四倍

大之轉矩相應。反之，如負載增至原來之四倍，電流僅增至原來之二倍。

依據第144面第2方程式，轉數 $n = (U - I_a R_a) : p / a \Phi z$ ，其中 R_a 表電樞及場磁鐵之總電阻。負載或電流增加時，以電樞及磁鐵之總電阻極小，上列方程式之分子不變。反之，分母則變動頗大，因通量同時隨電樞電流變動之故。職是之故，負載之變動對於轉數之影響頗大。負載增加時例如祇須有較少之轉數即可惹起幾乎與路端電壓相等之反電壓。

串繞電動機能以較弱之電流惹起較大之轉矩。因具有此特性，串繞電動機特適於起重機及電車之工作——起重機電動機¹⁾。當起動之際，因須使質量加速，所須之力矩自必大於由負載表示之轉矩。串繞電動機能以低電流消耗惹起大轉矩，是為該機之一優點。又遇路線傾斜增加時，串繞電動機亦能由消耗較弱電流惹起大轉矩。因此電力廠負載之變動不致極大。

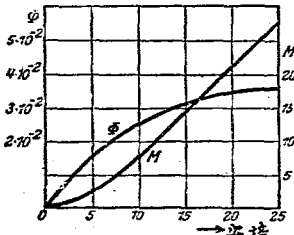


圖183. 一串繞電動機之通量，轉矩及電流強度。

若非同時減少轉數，此種大轉矩自然不致實現。當串繞電動機惹起大牽引力而為此從電力廠導取弱電流或功率時，其轉數必減少。轉數因負載增加之強降故並非為一缺點，且就電力廠功率不致起大變動一點言之，此實為一優點。

為研究串繞電動機之性能，須確定其磁化曲線，當時將該電動機充作發電機並由一電動機以一定之轉數 n_g 轉動。先測得由發電機供給之電流 I_a 及其路端電壓並計算產電壓，後者係等於路端電壓與電壓損失 $I_a R_a$ 之和。其中 R_a 復表全部內電阻。今由 $p / a z n_g$ 分產電壓，乃得由電流 I_a 發生之通量 Φ (圖183)。通量曲線與產電壓曲線之差僅在

1: 起重機電動機; Kranmotor; crane motor; mot. ur à gru.

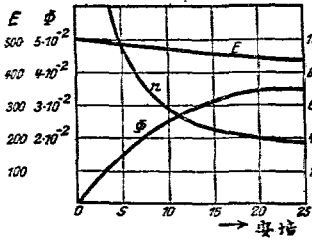


圖184。

—串繞電動機之電流強度，轉數，有用功率，有用轉矩及效率。

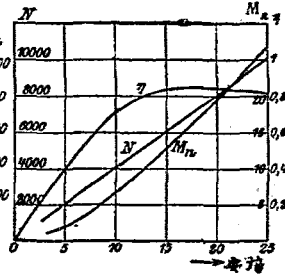


圖185。

比例尺度且此不但就發電機即就電動機而言亦然。

若此種測定係不可能，則任其帶固定路端電壓 U 充作電動機轉動並令其有機械負載。次測定電動機之轉數 n ，電流強度 I_a 並依第 144 面第 2 方程式計算通量。

此後計算 ΦI_a 之乘積，由是乃成第 183 圖中之轉矩 M 之曲線。此線當初背水平線而凸出，申言之，轉矩比較電流強度增加較速。終至鐵呈飽和狀態時，曲線幾成爲一直線，而其時轉矩之增加與電流之增加爲比例。

今在第 184 圖中在與水平軸相距 E （圖中等於 500 伏）之處描一水平線並從此線與鉛直軸之交點描一直線。此線對於水平線之傾角之正切以比例尺度表示時爲 R_a 。復表電動機之總電阻。此時水平線與傾斜線間之鉛直差等於 $I_a t_g \alpha = I_a R_a$ ，換言之，等於電壓損失。傾斜線之鉛直線表反電壓 E 。若以通量分之，則依據第 144 面之第 2 方程式得一種關於轉數之量並得第 184 圖中之曲線 n 。此線示串繞電動機之速度在完全無負載時飛漲。其轉數極度增加終致機破碎粉飛。因此之故，例如在電車中，除非其串繞電動機極有充分負載者，必須用自動開關以保護之。負載增加時，轉數當初減少，終至鐵部飽和時達近於固定之值。

在計算效率時，假定摩擦矩在各工作狀況下皆不變。若從M轉矩減去摩擦矩 M_0 ，則得第185圖中之有用轉矩 M_n 。又若以轉數乘有用轉矩，則若不計比例尺度，得有用功率N，若再以 UI_a 分之，則得效率。負載小時，因虛轉功率之影響，此效率不大。以後負載遞增，效率達一最高值，終則復下降，蓋此時電熱隨遞增中之電樞電流而強增故也。

60. 例.

在歐立根¹⁾機工廠之某電車電動機有凱普²⁾構造式：U=500伏， $R_a=2.75$ 歐， $z=944$ ， $p=2$ 及 $a=1$ 。其用作發電機而以每分鐘 $n_g=450$

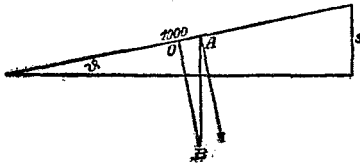


圖186. 車重AB分解而為分力。

之轉數轉動時，其產電壓 E_g 與電流之關係是與次表在首之二縱行相當。

今決定在本節之方程式僅示數值之關係並假定電壓係以伏計，電流強度

以安計，電阻以歐計，通量以伏秒計，輪之半徑以米計，轉矩以仟米克計，又轉數以每分鐘若干計。於是得

$$E_g = \frac{p}{a} \Phi \frac{n_g}{60} z \quad \text{或} \quad \Phi = 7.07 \times 10^{-5} E_g$$

$$M = \frac{p}{a} \times \frac{\Phi I_a z}{2\pi \cdot 9.81} \quad \text{或} \quad M = 30.71 \Phi I_a$$

$$E = U - I_a R_a \quad \text{或} \quad E = 500 - 2.75 I_a$$

$$E = \frac{p}{a} \Phi \frac{n}{60} z \quad \text{或} \quad n = 3.18 \times 10^{-2} E : \Phi$$

下表示電樞電流有各值時之情形。依前節之曲線而討論本例，其結果亦列入下表內：

¹⁾歐立根；Orlikon. ²⁾凱普；Kapp.

發 電 機	電 動 機 及 發 電 機		電 動 機		
I_a	E_g	$\Phi = 7.07 \times 10^{-5} E_g$	$M = 30.7 \Phi I_a$	$E = 500 - 2.75 I_a$	$n = 3.18 \times 10^{-2} E$
5	225	1.59×10^{-2}	2.45	485.3	970
10	302	2.53×10^{-2}	7.85	472.5	590
15	459	3.18×10^{-2}	14.6	458.7	470
20	490	3.46×10^{-2}	21.3	445	410
25	505	3.59×10^{-2}	27.3	431.3	390

今命 G 表車重， f 軌道抵抗（即使車之一重單位在坦平道上運動之力），又 s 表相對梯度。此時在坦平道上之牽引力等於 Gf 而在有梯度軌道上之牽引力等於 $G(f+s)$ （參考第 186 圖）。如命 r 表輪之半徑， c 直徑比率（電動機軸上之原動輪之直徑對於車輪直徑之比）及 η 表直徑比率之效率，則諸電動機之總轉矩等於 $cGr(f+s)\eta$ 。故車中如有二電動機，則一電動機之轉矩

$$M = 0.5 c Gr(f+s)\eta.$$

例如車重 $G = 8$ 公噸 = 8000 仟克，軌道抵抗 $f = 12$ 仟克/公噸，即等於 0.012 仟克/仟克，輪之半徑 $r = 0.39$ 米，直徑比率 $c = 0.204$ 及平均效率 0.8。此時一電動機之轉矩

$$M = 0.5 \times 0.204 \times 8000 \times 0.39 (0.012 + s) \times 0.8 \text{ 仟米克}$$

或
$$s = \frac{2.5M - 12}{1000}.$$

以上表中 M 之各值代入該方程式中則得有各轉矩時之梯度，或得有各梯度時之電流消耗。負梯度表示傾度。同時每分鐘之車速度等於 $2\pi rnc$ 米。是以每小時車速度之仟米數

$$v = \frac{2 \times 0.39 \times 3.14 \times 60 \times 0.204}{1000} n = 0.03n.$$

終則車上二電動機之總電流 $I = 2 \times I_a$ 。今將所得之結果列表列之如下：

I_a	M	S (以千數計)	v	I
5 安	2.45 仟米克	~5.85	29 仟米/時	10 安

10安	7.85 仟米克	7.4	17.7 仟米/秒	20安
15安	14.6 仟米克	24.6	13.8 仟米/秒	30安
20安	21.3 仟米克	41.5	12.3 仟米/秒	40安
25安	27.3 仟米克	53.5	11.7 仟米/秒	50安

61. 串繞電動機之調整.

依據第 144 面第 2 方程式電動機之轉數 $n = (U - I_a R_a) / p / a \Phi$ ，故變動串繞電動機轉數之最簡單方法厥為以起動器變更電動機之電壓 U ，其時經負載決定之電流在前置電阻中惹起一電壓損失，電動機電壓遂減，是種經前置電阻之調整在串繞電動機中最適宜。雖然，由電熱惹起之損失却極大。

如在分繞電動機中，有時其轉數向上之調整係由變動磁場為之。為此須與磁鐵繞組並接一調整電阻。此後經轉矩決定之電樞電流不再以全強度通過磁鐵繞組。

例如第 183 圖之電動機之並接分路內之電阻經選定與磁鐵繞組相等，因此，僅有一半之電樞電流通過磁鐵繞組，故為發生與前時等強之磁場須有二倍大之電樞電流。第 187 圖中之曲線 Φ 故與第 183 圖中之曲線相同，惟水平線之數值則加倍。若將電樞電流與通量之乘積以 30.7 (由第 159 面上表) 倍之，則得第 187 圖中之轉矩。

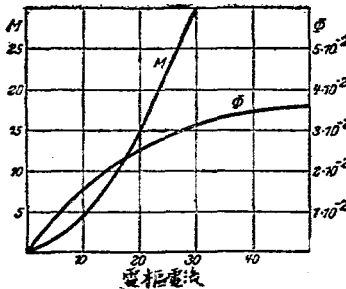


圖187. 插接分路後之電動機.

舉譬言之，負載等於14 仟米克時，由第 183 圖得15 安之電樞電流及 3.1×10^{-2} 伏秒之通量；反之，由第18 7圖得10安之電樞電流及 2.5×10^{-2} 伏秒之通量。如不計 電動機內低量電壓損失之影 響，轉數當與通量為反比例 ，即因並接一分路，轉數依

31:2.5之比而增加。

施潑拉克氏，將磁鐵線圈於起動時串聯而以後以全速度轉動時並聯，如是亦可變動磁場，是謂施潑拉克接法¹⁾。電車電動機之電樞是以概相並聯。然因此若電動機之磁阻不同或磁鐵繞組分路發生接觸或刷之過渡電阻不等，電動機納取不等強之電流。

設某車具有二並聯電樞，其刷電壓 U 等於500伏而電樞電阻等於1歐。若一電動機之電流強度等於15安，則其反電壓 $E = 500 - 15 \times$

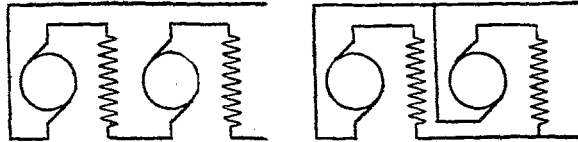


圖188. 串 聯。

圖189. 並 聯。

$1 = 485$ 伏。第二電動機之轉數與第一電動機之轉數相等。假定其磁場較第一機之磁場弱5%，則其電壓 $E = 485 \times 0.95 = 460$ 伏。準此，在第二電動機內流動之電流 $I_a = (U - E) / R_a = (500 - 460) / 1 = 40$ 安。

在車內故其通過 $40 + 15 = 55$ 安電流，其中15安電流通過激發較強之一機，而40安電流通過激發較弱之一機。第二機之功率故約等於第一機功率之三倍，激發相差較大時，經較強激發之一機產生之電壓竟可大於刷電壓，此時該電動機如發電機工作，供給電流於其他一電動機，後者至是不但單獨挽車且兼須轉動發電機。故此機常因惹起過大電熱而受損。

為防電動機受損，常由變更磁場繞組之接法以變動其轉數並經前置變阻器調整。由是使一車之電動機在起動時串聯而以後依正常速度轉動時並聯（圖188及189）。故起動時各電動機僅有一半之電壓。同時從電力廠祇須導出一半電流。在有強起動電流強度時，此點頗關重要。

¹⁾施潑拉克接法；Sprague-Schaltung；Sprague's connection；connexion de Sprague.

在此種並聯接法中，負載之分配難免不均勻。一電動機之電樞既與電樞鐵電阻相聯絡，故較強之電樞電流同時惹起較強之反電壓，後者復抑制電樞電流。設若一電動機之電樞鐵與磁鐵之距離比較在別機中為大，而電樞電流又相等，則其通量較別機中小10% (圖190及191)。此時若從通量曲線——不計及內電阻——描出二機之轉數曲線

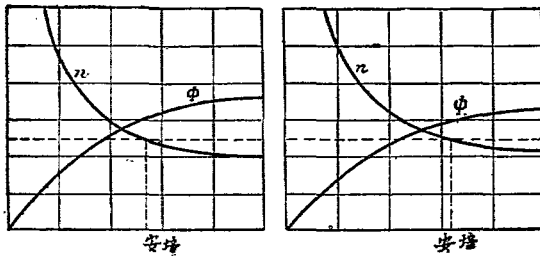


圖190.

圖191.

帶不等磁路之電動機之轉數及電流強度。

，則常見第二機之曲線之位置較高。在有一定轉數時（如由水平虛線所示），二機之電流強度不等，但其間之差決不致如施潑拉克接法中之大。

62. 鼓形操縱器。

起重機之電動機及電車之電動機係用一種可旋轉的鼓形操縱器或控制器¹⁾操縱。此器帶絕緣金屬條。其旋轉時在彈簧金屬接觸片之前滑過。接觸片係與導線，電動機或起動變阻器相連接。

第 192 圖示電車之電動機之接法。其中 a 表電車之導線，bcd 起起動器之接線螺旋，ef 電樞之接線螺旋，gh 磁場繞組之接線螺旋。接線螺旋同時連接護輪軌條。位置 1 至 3 表牽軌位置，I 及 II 制動位置，兩者之間有一零位。依據第 142 面從牽軌作用過渡至制動作用，電

¹⁾ 鼓形操縱器或鼓形控制器; Steuerwalze; Fahrshalter; drum type controller; hélice de contrôleur.

櫃對於磁場繞組之接法倒轉。為免生火花起見，電阻一部分之開去係由捷接為之。今設想電阻，電樞及磁場繞組互相分離直至由虛線表示之接線螺旋處並如在第 193 圖中與自 a 至 h 之金屬接觸片相連接。此時各點與其近邊之接線當表操縱器之展開面上之金屬條。

然為使電流不致非必要的開斷並為裝置上便利起見，相隣之各條須互相聯絡。在各位置聯絡之情形如在第 192 圖下端由橫行表明。至各縱行內先後聯絡之順次雖可不一定，但為在各位置時各部有相同之聯絡其順次如圖所示。

凡在各連接位置皆有效之連接謂之固定連接，例如第 192 圖中電阻兩部分間之連接及磁場繞組之接線螺旋 b 與護輪軌間之連接皆是。

橫行皆編號碼。其中之各接線螺旋帶有該行之號碼而以此號碼載在第 193 圖中。例如在制動位置 II，b 與 h 之連接帶號碼 1，c, d 及 f 之連接帶號碼 2 而 e 與 g 之連接帶號碼 3。

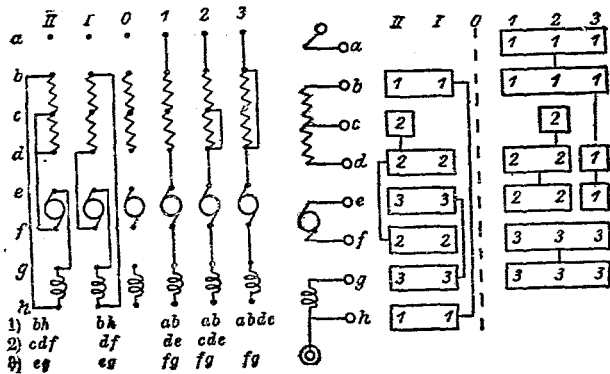


圖192. 各部之聯絡。

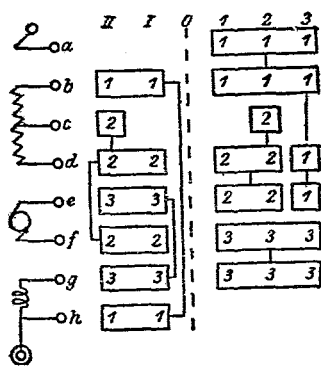


圖193. 操縱器與開之表面。

上下帶同號碼之位置今必電的聯絡，又左右帶同號碼之位置應有電的聯絡。第 193 圖即示此情形。

第十章 導線

63. 導線計算法之原理.

線段¹⁾為導線未分枝的部分。其兩端為饋電站(各站之電壓經粗饋電線維持不變)或線路之接頭。圖中通常僅表出正導線。電流經等長之回線回至發電廠。茲命 l 表線單次之長, q 其橫斷面積, k 電導係數, i 有效電流強度及 ε 一接頭對於饋電站之壓降。從線段中一接頭流出之電流, 其依接頭順次之方向者, 曰正電流。

在第 194 圖中設 ε_2 大於 ε_1 , 則在線段內電壓自 1 向 2 作用。其方程式如次:

$$\varepsilon_2 - \varepsilon_1 = 2[i_1 l_1 + (i_1 - i_a) l_2 + (i_1 - i_a - i_b) l_3] k q, \text{ 申言之,}$$

$$i_1 = \frac{i_b l_3 + i_a (l_2 + l_3)}{l_1 + l_2 + l_3} + \frac{k q (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)}{2(l_1 + l_2 + l_3)}. \quad (1)$$

依同法

$$i_2 = \frac{i_a l_1 + i_b (l_1 + l_2)}{l_1 + l_2 + l_3} - \frac{k q (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)}{2(l_1 + l_2 + l_3)}. \quad (2)$$

第 1 及第 2 方程式中右邊之第一項與接頭之壓降無關。此項表從別部分線路流達接頭之電流之一部分。無論任此電流部分通過該線段或為消耗電流 I_1 及 I_2 從接頭導至別處(見第 194 圖下部), 凡此皆與別部分線路或接頭之壓降無關。故

$$I_1 = \frac{i_b l_3 + i_a (l_2 + l_3)}{l_1 + l_2 + l_3}, \quad I_2 = \frac{i_a l_1 + i_b (l_1 + l_2)}{l_1 + l_2 + l_3}. \quad (3)$$

此二電流既如一水平桿上之兩向下壓力而計算, 故稱之曰接頭負載²⁾。當由線段導出負載時其移至接頭上, 其總和等於線段負載 $i_a + i_b$ 。

第 1 及第 2 方程式中右邊之第二項曰均流³⁾, 即在接頭間某一定

¹⁾ 線段; Strecke; section; section. ²⁾ 接頭負載; Belastung der Knoten; load in the joints; charge aux noeuds. ³⁾ 均流; Ausgleichstrom; equalizing current; courant égalisateur.

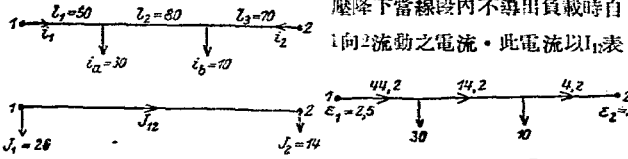


圖104。導線線段。

圖105。配電。

壓降下當線段內不導出負載時自
1向2流動之電流。此電流以 I_{12} 表

明且因其依自1向2之方向係一正電流。有全長 l 時之線之線段電導係數¹⁾：

$$\alpha = kq : 2L. \quad (4)$$

準此，則依第1及第2方程式：

$$I_{12} = (e_2 - e_1) \alpha_n, \quad I_{21} = (e_1 - e_2) \alpha_n = -I_{12}. \quad (5)$$

此線段雖導出負載但並非不帶電(圖194下部)。故依第1及第2方程式：

$$i_1 = I_1 + I_{12}, \quad i_2 = I_2 + I_{21} = I_2 - I_{12}. \quad (6)$$

故從接頭流入線段內之實有電流等於線段內之均流與由線段卸於接頭(線段之卸載²⁾)之負載(附載³⁾)之總和。

在第194圖中命 $e_1 = 2.5$ 及 $e_2 = 5$ 伏， $k = 58$ 西 \times 米/平方毫米， $l = 50 + 80 + 70$ 米及 $q = 50$ 平方毫米。茲須確定電流之分佈⁴⁾情形。在接頭卸下之負載

$$I_1 = (10 \times 70 + 30 \times 150) : 200 = 26, \quad I_2 = 10 + 30 - 26 = 14 \text{ 安}.$$

此後由計算得電導係數 $\alpha_{12} = 58 \times 50 \div 400 = 7.3$ 西，又得線段中之均流
 $I_{12} = (5 - 2.5) 7.3 = 18.2$ 安。

在線段內流動之實有電流故為

¹⁾線段電導係數；Strackenleitwert；section conductivity；conductibilité de section。
²⁾線段之卸載；Entlastung von Strecke；discharging of load of section；déchargement de section。
³⁾附載；zusätzliche Belastung；auxiliary load；charge auxiliaire。
⁴⁾電流之分佈；Stromverteilung；current distribution；distribution de courant électrique。

$$i_1 = I_1 + I_{11} = 26 + 18.2 = 44.2, \quad i_2 = I_2 - I_{12} = 14 - 18.2 = -4.2 \text{ 安}。$$

即有4.2安強之正電流由線段流達接頭2。第1 克希荷夫定則述示第195圖中之電流分佈之情形。

64. 接頭方程式¹⁾。

對於饋電站之壓降²⁾ E 在前節中假定一定。其實此壓降可依哥爾脫利³⁾說明並由泰舒繆拉⁴⁾改良之方法計算。在第196圖中命1至4為接頭，0為一饋電站。命在接頭1卸下之負載為A₁。此時

$$I_{21} = (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)a_{12}, \quad I_{31} = (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)a_{13}, \quad I_{41} = (\varepsilon_1 - \varepsilon_4)a_{14}, \quad I_{01} = \varepsilon_1 a_{10}。$$

此二電流之和等於A₁。即

$$a_{11} = -(a_{12} + a_{13} + a_{14} + a_{10}), \tag{7}$$

故

$$a_{11}\varepsilon_1 + a_{12}\varepsilon_2 + a_{13}\varepsilon_3 + a_{14}\varepsilon_4 + A_1 = 0。$$

就一般言，帶有n接頭之線路有n接頭方程式如下。

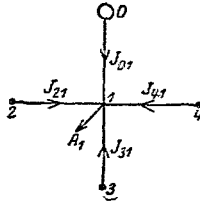
$$\left. \begin{aligned}
 a_{11}\varepsilon_1 + a_{12}\varepsilon_2 + a_{13}\varepsilon_3 + a_{14}\varepsilon_4 \dots + A_1 &= 0 \\
 a_{21}\varepsilon_1 + a_{22}\varepsilon_2 + a_{23}\varepsilon_3 + a_{24}\varepsilon_4 \dots + A_2 &= 0 \\
 a_{31}\varepsilon_1 + a_{32}\varepsilon_2 + a_{33}\varepsilon_3 + a_{34}\varepsilon_4 \dots + A_3 &= 0 \\
 a_{41}\varepsilon_1 + a_{42}\varepsilon_2 + a_{43}\varepsilon_3 + a_{44}\varepsilon_4 \dots + A_4 &= 0 \\
 \vdots & \\
 \vdots & \\
 \vdots & \\
 \vdots & \\
 \vdots & \\
 \vdots &
 \end{aligned} \right\} \tag{8}$$

其中a₁₁, a₂₂, a₃₃, a₄₄……表在各該接頭之諸電導係數之負總和——附加電導係數⁵⁾。

為除去ε₁，以-a₁₂/a₁₁乘第一方程式並將結果加於第二方程式。依

¹⁾接頭方程式; Knotengleichung, Netzgleichung; equation of joints (equation de jonction). ²⁾壓降; Spannungsabfall; line voltage drop; chute de tension. ³⁾哥爾脫利; Goltri. ⁴⁾泰舒繆拉; Zeichmüller. ⁵⁾附加電導係數; zusätzliche Leitwerte.

同法以 $-a_{13}/a_{11}$ 乘第一方程式並將結果加於第三方程式，如是連演，則得



186. 接 頭。

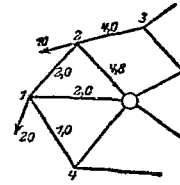


圖197. 一部分外線路或網絡數字表電導係數。

$$\left. \begin{aligned} b_{21}\varepsilon_2 + b_{23}\varepsilon_3 + b_{24}\varepsilon_4 \dots\dots\dots + B_2 &= 0, \\ b_{31}\varepsilon_2 + b_{33}\varepsilon_3 + b_{34}\varepsilon_4 \dots\dots\dots + P_3 &= 0, \\ b_{41}\varepsilon_2 + b_{43}\varepsilon_3 + b_{44}\varepsilon_4 \dots\dots\dots + B_4 &= 0, \\ \vdots & \\ \vdots & \\ \vdots & \end{aligned} \right\} (9)$$

其中例如

$$\left. \begin{aligned} b_{21} &= a_{21} + \frac{a_{12}a_{12}}{-a_{11}} = a_{22} + a'_{21} & b_{23} &= a_{23} + \frac{a_{12}}{-a_{11}} a_{13} = a_{23} + a'_{23} \\ B_2 &= A_2 + \frac{a_{12}}{-a_{11}} A_1 = A_2 + A'_2, \end{aligned} \right\} (10)$$

在第7方程式中表示之關係在第9方程式中亦有效，申言之，第9方程式表除去接頭1後之線路。在方程式中除去一未知項其意義故與從線路除去一接頭相等。在新線路中於是除含有原來之數值外復含有依第10方程式構成之附加值 ε' 及 A' 。

就第197圖中一部分之線路而言， $a_{11} = -5.0$ 。如除去接頭1，則得次列諸值，其中復假定 $a_1 = a_{10} - A_1$ 。

$$\begin{aligned} a_{11} &= -5 & a_{12} &= 2 & \varepsilon_{11} &= 1 & A_1 &= 20 & a_1 &= -18 \\ a'_{22} &= \frac{\varepsilon_{12}}{-a_{11}} \varepsilon_{12} = 0.8 & a'_{21} &= \frac{\varepsilon_{12}}{-a_{11}} a_{14} = 0.4 & A'_2 &= \frac{a_{12}}{-a_{11}} A_1 = 8 \\ a'_2 &= \frac{a_{12}}{-a_{11}} a_1 = -7.2 \end{aligned}$$

$$a'_{44} = \frac{a_{44}}{-a_{41}} a_{14} = 0.2 \qquad A'_4 = \frac{a_{44}}{-a_{41}} A_1 = 4$$

$$a'_4 = \frac{a_{44}}{-a_{21}} a_1 = -3.6.$$

接頭 1 遂被除去。此時在第 2 接點除須計及原來之值外復須計及上列之附加值。\$c_{22}\$ 當表接在接頭 2 之各線段之原來電導係數之負總和。\$c_{22}\$ 復等於 \$a_{22} - A_2\$。

茲上下分別錄出原來值及附加值，加積之，遂成除去接頭 2 後之附加值

$$\begin{array}{r} a_{22} = -10.8 \quad a_{23} = 4.0 \qquad A_2 = 10 \quad a_2 = -5.2 \\ a'_{22} = 0.8 \qquad a'_{23} = 0.4 \quad A'_2 = 8 \quad a'_2 = -7.2 \\ \hline l_{22} = -10 \quad b_{23} = 4.0 \quad l_{24} = 0.4 \quad B_2 = 18 \quad l_2 = -12.4 \\ a'_{33} = 4 \times \frac{4}{10} \quad a'_{34} = \frac{4 \times 0.4}{10} \quad A'_3 = \frac{4}{10} \times 18 \quad a'_3 = \frac{-4}{10} \times 12.4 \\ a'_{44} = \frac{0.4}{10} \times 0.4 \quad A'_4 = \frac{0.4}{10} \times 18 \quad a'_4 = \frac{-0.4}{10} \times 12.4. \end{array}$$

接頭 2 遂被除去。依同法可除去各接頭。

一簡單方法係由應用下列公式，其中以頂符號及左角符號代替脚註。

	1)	2)	4)	A)	a)	
	-5	2	1	20	-18	
2')		0.8	0.4	8	-7.2	
4')			0.2	4	-3.6	
		2)	3)	4)	A)	a)
原 值	-10.8	4.0		10	-5.2	
附加值	0.8		0.4	8	-7.2	
總值	-10	4.0	0.4	18	-12.4	
3')		1.6	0.16	7.2	-4.93	
4')			0.016	0.72	-0.5.	

以上在原值上僅加一組附加值。然就一般而言為除去一接頭，於原值上須將各組互數加上，後者在左方帶有相屬之號碼。

各試算以加號線下各行值之總和必等於零而決定。

終則祇留下一接頭，其總負載等於 B_n 。此接頭經由總電導係數 $-b_{nn}$ 與想像合併者之饋電站相連接。於是得

$$\epsilon_n = \frac{B_n}{-b_{nn}}$$

由此壓降可追算其餘之壓降，因在加號線下之值恆表與線路變化¹⁾一階段相應之接頭方程式。例如已知 $\epsilon_3=5$ 及 $\epsilon_4=7$ ，則就接頭 2 而言，

$$-10\epsilon_2 + 4.0 \times 5 + 0.4 \times 7 + 18 = 0, \quad \text{或} \quad \epsilon_2 = 4.08,$$

又就接頭 1 而言

$$-5\epsilon_1 + 2.0 \times 4.08 + 1.0 \times 7 + 20 = 0 \quad \text{或} \quad \epsilon_1 = 7.03.$$

為試證起見，計算在以後計算中尚必要之均流，例如在接頭 1

$$I_{21} = (\epsilon_1 - \epsilon_2)a_{12}, \quad I_{31} = (\epsilon_1 - \epsilon_3)a_{13}, \quad I_{01} = \epsilon_1 a_{10}$$

並證明在各接頭之總和是否等於原來接頭負載。

從一接頭流入線段內之實有電流依第 165 面等於均流及由線段卸於接頭之負載之總和。

65. 圖解法 (比例尺算法²⁾) .

下法係以舒懷克爾³⁾說明之方法為根據。其中採用之比例尺如下

$$1 \text{ 厘米} = c_a \text{ 西} \quad 1 \text{ 厘米} = c_i \text{ 安} \quad 1 \text{ 厘米} = c_u \text{ 伏}.$$

在第 199a 圖中在距軸 $OQ = c_i : c_a c_u$ 厘米之水平線上依選定之比例表出關於第 198 圖第 1 接頭之 a_{12} , a_{13} , a_{10} 及 A_1 。為試證起見，算出 $a_{12} + a_{13} + a_{10} + A_1 c_a / c_i$ 之總和並以 c_a 分之。其商必等於上水平線全長之厘米數。

¹⁾ 線路變化; Netzumformung; transformation of network; transformation de réseau. ²⁾ 比例尺算法; Maßstabrechnung. ³⁾ 舒懷克爾; Schwaiger.

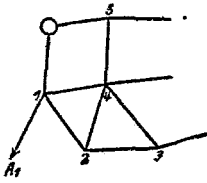


圖198. 一部分網絡或線路。

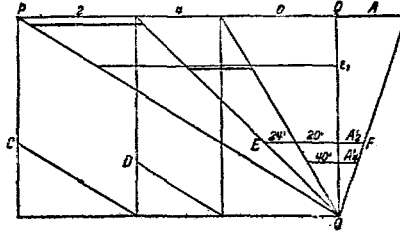


圖199a. 接 頭1.

今描出輻線束O，從上水平線之各分點作鉛直線以達下面水平軸並從諸足點作與對角線OP平行之線，後者切鉛直線於C及D。此時經過C及D之水平線示除去接頭1時之附加值。

關於接頭2，在第199b圖中依選定之比例尺作線以表原值及附加值之總和。故4處之長表 $a_{24} + a'_{24}$ ，O處之長僅表 a'_{20} 及A處之長表 $A_2 + A'_2$ 。為試證起見，根據第198圖計算與接頭2相連接之較高級數之電

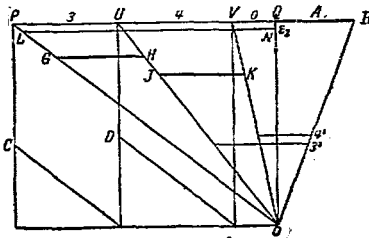


圖199b. 接 頭2.

導係數之總和，但包括 a_{20} ，並加上 $A_2 a_2 \cdot c_1$ 。此總和經 c_a 分之並以其厘米數加於EF後，必示第二接頭之上水平線。此時經過C及D之水平線必示除去第2接頭時之附加值。

依同法繼續演進，終則祇剩下帶全負載B之一接頭。此負載電流由想像已合併者之饋電站經過全電導係數線 b_0 流達該接頭（圖199c）。此接頭之號碼為8。今在屬於 b_0 之輻線之間作水平線ST；其長等於 $B_8 = QR$ 。於是當以厘米數計算OT, OQ等時，得

$$OT = OQ \frac{ST}{PQ} = \frac{c_1}{c_a c_u} \times \frac{B_8 / c_1}{b_0 / c_a} = \frac{F_8}{c_u b_0} = \frac{f_8}{c_u}$$

準此， $OT \times c_u$ 等於欲求之壓降 ϵ_3 。從此數回索可求得其餘之壓降

• 例如已知 ϵ_3 及 ϵ_4 ，
則在第199b圖中於
 $\epsilon_3: c_u$ 厘米及 $\epsilon_4:$
 c_u 厘米之高處分
別作水平線GH及
JK。在OP及OQ
之間作表GH, JK
及OR之總和之水

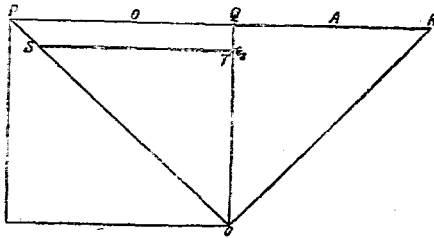


圖199c. 接前。

平線LN。若以 b 及 B 表總值並令比例尺度等於一，則

$$\frac{GH}{b_2} = \frac{\epsilon_3}{OQ} \quad \frac{JK}{b_4} = \frac{\epsilon_4}{OQ} \quad PQ = -b_2 \quad QR = B_2$$

LN 既等於GH+JK+QR,故

$$ON = \frac{LN \times OQ}{PQ} = \frac{b_2 \epsilon_3 + b_4 \epsilon_4 + B_2 \times OQ}{-b_2}$$

實際須將相當之各長代入，例如以 b/c_u 代 b ，以 ϵ/c_u 代 ϵ 及以 B/c_i 代 B ，故以 $OQ = c_1: c_u c_u$ 時得

$$ON = \frac{b_2 \epsilon_3 + b_4 \epsilon_4 + B_2}{-b_2 c_u} = \frac{\epsilon_2}{c_u}$$

故毋須經計算即可直接從 $c_u ON$ 讀出 ϵ_2 。在第199a圖中， ϵ_1 亦可依同法讀出。

第十一章 交流之基本定律

65. 交流之電流強度及電壓。

直流之電流強度及方向不依時間而變動。但交流¹⁾則不然，其強度及方向皆隨時間而為週期變動。設依水平方向表時間 t ，而依鉛直方向表電流強度之臨時值 i ，則成一曲線，曰電流曲線。相同狀態每演

1) 交流; Wechselsstrom; alternating current; courant alternatif.

一次所須之時間T 謂之一週期¹⁾之時間。在一時間單位內之週期數²⁾或頻率³⁾ 故為

$$f = 1/T. \quad (1)$$

交流之電流強度自零值長至巔值，次復降至零值。當通過零值時其方向變換，故在一週期間，其方向須變換二次。

頻率之實用單位曰1 赫芝⁴⁾，即等於每秒一週期。

為便於討論其過程起見，假定電壓曲線及電流曲線均為正弦曲線⁵⁾ (圖201)。凡電機其電壓曲線呈正弦形者，其工作狀況最良。為達此目的，使空腔從極心逐漸向極尖擴大(見第200圖)。他如在圓周上適當分配繞組亦可惹起相同之結果(參考第110節)。

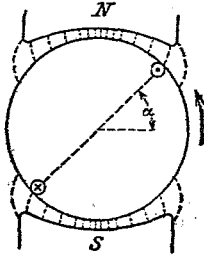


圖200. 電樞在t時之位置。

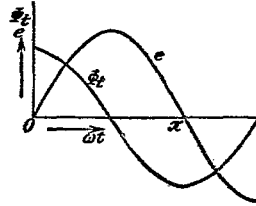


圖201. 電壓及包含之通量。

今假定磁力線密度為曲線之正弦函數，故當圓邊橫穿磁場而過時，在線內發生呈正弦曲線之電壓。其臨時值可由所包含之通量之變化決定以代由 $e = \frac{d\phi}{dt}$ 之方程式決定。

如命 ϕ_m 表在極心下之最大感應強度，則距中立帶 x 弧距之處之感應強度等於 $\phi_m \sin x$ 。當電樞之長為 b ，其半徑為 r 時，與 dx 弧相當之表面等於 $br \cdot dx$ 。設電樞面上之槽以 a 弧距超出中立帶之前，則為在核槽中一匝所包含之通量之臨時值：

1) 週期; Periode; period; période. 2) 週期數; Periodenzahl; number of periods or cycles; nombre des périodes. 3) 頻率; Frequenz; frequency; fréquence. 4) 赫芝; Hertz; hertz; hertz. 5) 正弦曲線; Sinuskurve; sine curve; sinusoide.

$$\Phi_t = \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} \mathcal{L}_m \sin x \cdot b r dx = 2\mathcal{L}_m b r \cos \alpha. \quad (1a)$$

如槽係在中立帶內，則 $\alpha=0$ 及 $\cos \alpha=1$ ，其時所包含之通量最大。此最大值为 $\Phi = 2\mathcal{L}_m b r$ ，故臨時值为 $\Phi_t = \Phi \cos \alpha$ 。

在 $t=0$ 時，假定槽在中立帶內。當時一匝包含最大通量 Φ 。如命 $\omega = 2\pi n$ 表角速度，則在 t 時內所經過之弧距 $\alpha = \omega t$ 。若置 ω 匝於同一槽內，則在 t 時各匝包含之通量 $\Phi_t = \Phi \cos \omega t$ 。故產電壓之臨時值

$$e = -w \times d\Phi_t / dt = w \omega \Phi \sin \omega t. \quad (2)$$

$\alpha = \omega t = 0$ 時，圈邊係在中立帶內而產電壓為零。故在第3方程式中， $\sin \omega t$ 等於零，因而電壓之臨時值等於零。同時包含之通量最大。為便於瞭解起見，在第201圖中依水平方向表與時間為比例之弧 ωt 並依鉛直方向表包含之通量。包含之通量最大時，其曲線水平而在一單位時間內之變動等於零，故在此時電壓通過零點。

又 $\omega t = \pi/2$ 時，圈邊係在極心下最強磁場內，此時產出之電壓最強——電壓之巔值¹⁾，因此第2方程式示電壓之巔值

$$e_m = w \omega \Phi. \quad (3)$$

第2方程式又可變作次式

$$e = e_m \sin \omega t. \quad (4)$$

電壓之巔值係當線匝不包含通量時發生。第201圖亦明白顯出此情形。當包含之通量通過零值點時，曲線之傾斜最大，申言之，當時在一時間單位內之變化最大。

設 ωt 超過 $\pi/2$ 而續增，圈邊復進入弱磁場而產電壓遂減。 $\omega t = \pi$ 時，圈邊復在中立帶。同時 $\sin \omega t$ 及產電壓等於零。如繼續轉動，圈邊橫切磁場之方向變換，因而產電壓之方向亦變，申言之，電壓變為負。

如命 $e \cos \alpha = \sin(\alpha + \pi/2)$ ，則得 $\Phi_t = \Phi \sin(\omega t + \pi/2)$ ，與第4方程式

1) 電壓之巔值: Höchstwert der Spannung; peak value of voltage; valeur maximum de tension.

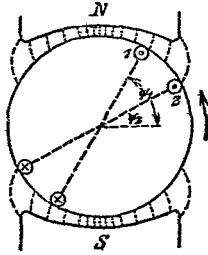


圖203. 在 $t=0$ 時有相差之電壓。

相較，指出由通量變動而產出之電壓滯在通量之後 90° 。此事實又可經第201圖證實，其

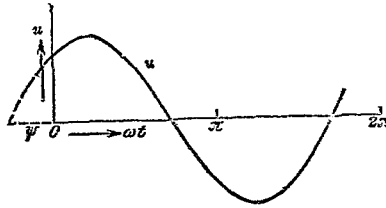


圖203. $u = u_m \sin(\omega t + \psi)$

中示產電壓之巔值比較通量之巔值後 $1/4$ 週期發生。

設有多數依時間狀態或相¹⁾不同之電壓或電流。在一電機之電極上例如繞着以某角相距之二相等線圈。第202圖示 $t=0$ 時之位置。在此時間，線圈1之圈邊超在中立帶前之角為 ψ_1 而線圈2之圈邊超在中立帶前之角為 ψ_2 。在二圈內之產電壓之臨時值： $e_1 = e_m \sin(\omega t + \psi_1)$ 及 $e_2 = e_m \sin(\omega t + \psi_2)$ 。設命 $t=0$ ，則可直接證明此方程式之正當。若就一般而言， ψ 表 $t=0$ 時交流波超在波源前之角度，則臨時值(與第203圖相應)

$$e = e_m \sin(\omega t + \psi) \tag{5}$$

在二極機中，一週期之時間等於一週轉之時間。在有 p 對極之多極機(其線面約包含一極節距)中，在一轉間必發生 p 週期。故如命 n 表轉數，則頻率

$$f = p \times n \tag{6}$$

一般通用之頻率為50赫芝。故為有50赫芝之頻率，帶2極對之電機之每分鐘之轉數必等於1500。

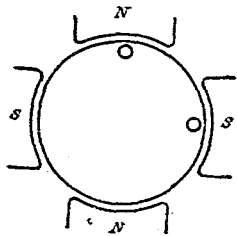


圖204. 四極機之電極圖。

在多極電機中，二極節距間之弧係

¹⁾ 即: Phase; phase; phase.

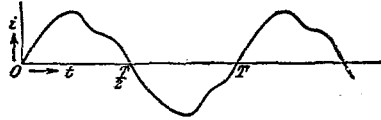
與一至週期或與 2π 弧相當。例如在四極機中(圖204),設一圈邊離開中立帶而達極之中心下,故約旋轉 $45^\circ = \pi/4$,則電壓必自零值變至巔值。職是之故,所謂一電角度¹⁾者並非表一週轉之360分之一,但表一週期之360分之一。據此意義,一極節距之弧必等於 π 。電之角速度²⁾故並非表時間單位之空間弧,但表 2π 弧與一週期之時間之比,申言之,

$$\omega = 2\pi/T = 2\pi f. \quad (7)$$

當交流通過一靜止圈時,如在變壓器中,交流本身依時間而作正弦形變動,其產電壓亦依時間而作同形之變動。弧 ωt 與時間仍具有一種關係。

67. 基本波及諧波。

以上假定電流強度及電壓為時間之簡單正弦函數,否則,例如在205圖中,總波含有帶總振動頻率之正弦基本波³⁾及頻率等於基本頻率之整數倍之正弦諧波⁴⁾。



205. 畸變電流曲線。
4) — 傅立葉級數⁵⁾。

如命 ω 表一電流之基本波之角速度及 $x = \omega t$,則帶 λ 級數之波及總波,

$$i_\lambda = i_{\lambda m} \sin(\lambda x + \psi_\lambda) \quad (a) \quad i = \sum_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} i_{\lambda m} \sin(\lambda x + \psi_\lambda). \quad (b)$$

級數1係指基本波,級數0係指在上面之一直流波,因有此波,正半波及負半波之面之大小遂異。

第206圖示基本波及一第三級諧波。 $x = -\psi_\lambda/\lambda$ 時, i_λ 既等於零

¹⁾ 電角度; elektrischer Grad; electrical degree; degré électrique. ²⁾ 角速度; Kreisfrequenz; angular velocity; vitesse angulaire. ³⁾ 基本波; Grundwelle; fondamentale wave; onde fondamentale. ⁴⁾ 諧波; Oberwelle, Oberschwingung, harmonische Schwingung; harmonic vibration; onde harmonique. ⁵⁾ 傅立葉級數; Fouriersche Reihe; Fourier series; série de Fourier.

，故 $OA = -\psi_3/3$ 。如無其他諧波，基本波及第三級諧波之和成爲總波。

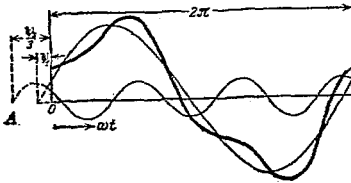
茲解 $\sin(\lambda x + \psi_\lambda)$ 並以

$$i_{\lambda m} \cos \psi_\lambda = a_\lambda \quad \text{及} \quad i_{\lambda m} \sin \psi_\lambda = b_\lambda$$

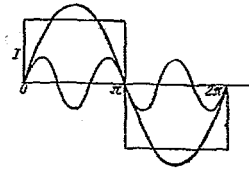
由是得

$$i_{\lambda m} \sin(\lambda x + \psi_\lambda) = a_\lambda \sin \lambda x + b_\lambda \cos \lambda x$$

其中 $a_\lambda \sin \lambda x$ 表一波，其值當 $t=0$ 時等於零。又 $b_\lambda \cos \lambda x$ 亦表一波，其當 $t=0$ 時，有正或負之巔值 b_λ 。



206. 基本波及第三級諧波。



207. 矩形電流曲線。

今由數學方程式表電流 i 之臨時值。求有級數 k 之波。以 $\sin kx$ 乘方乘式 (b) 並由變式得

$$i \sin kx = \sum_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} i_{\lambda m} \{ \cos(\lambda x - kx + \psi_\lambda) - \cos(\lambda x + kx + \psi_\lambda) \}$$

此後以 dx 乘二邊並在 $x=0$ 及 $x=2\pi$ 之間積算之。右邊之第二項無論 λ 之值如何均等於零而第一項當 $\lambda \leq k$ 時等於零。當 $\lambda = k$ 時

$$\int_0^{2\pi} i \sin kx \, dx = i_{km} \cos \psi_k \pi = \pi a_k$$

依同法

$$\int_0^{2\pi} i \cos kx \, dx = i_{km} \sin \psi_k \pi = \pi b_k$$

於是

$$i_{km} = \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \quad \text{及} \quad \text{tg} \psi_k = \frac{b_k}{a_k}$$

如波依水平軸對稱，則惟諧波含有奇級數。此時積算之範圍可限在 0 及 π 之間，由是得

$$0.5\pi a_k \quad \text{及} \quad 0.5\pi b_k.$$

如波源在 $x=0$ 而波依縱軸對稱，後者之位置為 $x=\pi/2$ ，則波祇帶正弦部分，申言之，祇有帶幅值 a_k 之波而當 $t=0$ 時穿過零點。此時祇須在 0 及 $\pi/2$ 之間分積並得 $0.25\pi a_k$ 及 $0.25\pi b_k$ 。

在第 207 圖中例如 $i=I$ 常數，故得

$$a_k = \frac{4I}{\pi k}.$$

總波

$$i = \frac{4}{\pi} I (\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3 \omega t + \frac{1}{5} \sin 5 \omega t + \dots).$$

基本波及第三級諧波如第 208 圖所示。

若電流曲線不由方程式表示但經由一實驗例如經一示波器決定，則將基本波之全週期之基線 2π 分為 $2n$ 等分部並依第 208 圖在分點設鉛直線。次將各鉛直線 y 之值與其相屬之 $\sin kx$ 相乘積並求其總和。於是得

$$\sum_{x=0}^{x=2\pi} y \sin kx = \sum_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} \sum_{x=0}^{x=2\pi} 0.5i_{\lambda m} \left\{ \cos (\lambda x - kx + \psi\lambda) - \cos (\lambda x + kx + \psi\lambda) \right\}. \quad (c)$$

就一般而言，等分 $(\lambda \pm k)2\pi$ 角之諸線之總和係等於零，故由方程式 (c) 所表示之總和亦必等於零。然若 $\lambda \pm k$ 可由 $2n$ 分盡，則當 x 有任何可能之值時， $(\lambda \pm k)x$ 必等於 2π 之整數倍而方程式 (c) 之右邊等於 na_1 或 $-na_2$ 。

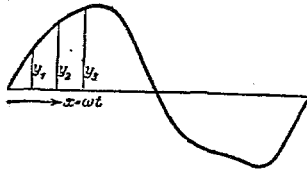


圖208. 全波之振幅分爲 $2n=12$ 部分。

是處可能之 λ 值列之如下表:

$\lambda-k$	λ	$\lambda+k$	λ
$0 \times 2n$	k		
$1 \times 2n$	$2n+k$	$1 \times 2n$	$2n-k$
$2 \times 2n$	$4n+k$	$2 \times 2n$	$4n-k$
$3 \times 2n$	$6n+k$	$3 \times 2n$	$6n-k$
:	:	:	:

準此

$$\sum_{x=0}^{x=2\pi} y \sin kx = n (0k - a_{2n-k} + a_{2n+k} - a_{4n-k} + a_{4n+k} \dots)$$

$$x = \frac{2\pi}{2n}$$

依同法得

$$\sum_{x=0}^{x=2\pi} y \cos kx = n (b_k + b_{2n-k} + b_{2n+k} + b_{4n-k} + b_{4n+k} \dots)$$

$$x = \frac{2\pi}{2n}$$

今略去較高級之波，而僅加積直至 $n-1$ 級數之波之值，則約得 a_x 及 nb_k 。對於通過 $2n$ 鉛直線之末端且並不含有高於 $n-1$ 級數之波者之波，此方法頗真確。

若波為依水平軸對稱之波，則將半波等分爲 n 部分，復以 $\sin kx$ 或 $\cos kx$ 相乘積。諸乘積之總和等於 $a_k n/2$ 或 $b_k n/2$ 。夫拉蓋爾¹⁾根據龍開²⁾之意見創一關於 $n=12$ 時之一極簡單的公式，其中相同因數常一再重出而與始端及末端等距之鉛直線與 $\sin kx$ 及 $\cos kx$ 相乘積。於是成下列之總和 s 及差 d ，其中例如 $s_1 = y_1 + y_{11}$ 及 $d_6 = -y_{12}$ ：

y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6
y_{12}	y_{11}	y_{10}	y_9	y_8	y_7
<hr/>					
s_1	s_2	s_3	s_4	s_5	s_6
d_6	d_5	d_4	d_3	d_2	d_1

1) 夫拉蓋爾; Fraerkel. 2) 龍開; Runge.

下表之 s 總和以右行之數相乘積，將乘積總之，則得 $6a_{1c}$ 。
 如以帶同脚註之差 d 代總和 s，則由加積並注意前置符號得 $6b_{1c}$ 。

0.259	s_1		s_5	s_5	s_1
0.5	s_2		s_2	$-s_2$	$-s_2$
0.707	s_3	$s_1 + s_3 - s_5$	$-s_3$	$-s_3$	$s_1 + s_3 - s_5$
0.866	s_4		$-s_4$	s_4	$-s_4$
0.966	s_5		s_1	s_1	s_5
1.0	s_6	$s_2 - s_6$	s_6	$-s_6$	$-(s_2 - s_6)$
<hr/>					
	$6a_1$	$6a_3$	$6a_5$	$6a_7$	$6a_{1f}$
	$6b_1$	$-6b_3$	$6b_5$	$-6b_7$	$6b_{1f}$

68. 平均值及有效值。

電流之臨時值 i 與時間 dt 之乘積表示在 dt 時間內運動之電量。將在電流之一半波之電量總之，並以一半週期之時間分之，則得一時間單位內之電量或平均電流強度¹⁾

$$M(i) = \frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} i \, dt. \quad (8)$$

設將交流依第91圖整流後使其通過一電量計，則由析出量及時間可計算電流之平均值。此平均值曰電解平均值²⁾。

電流曲線為一正曲線時，依水平方向表 $\alpha = \omega t$ 之弧（見第 209 圖）並依鉛直方向表電流之臨時值。於是一面積之面積等

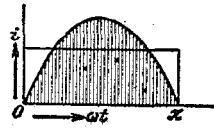


圖 209. 平均值之形成。

¹⁾ 平均電流強度；mittlere Stromstärke；mean intensity of current；intensité moyenne du courant. ²⁾ 電解平均值；elektrolytische Mittelwert；electrolytic mean value；valeur moyenne electrolytique.

valeur

於 ida 。今以在同一基線 π 上之矩形代替條面之全部，此矩形之高度常表所求之平均值

$$M(i) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} i_m \sin \alpha d\alpha = \frac{2}{\pi} i_m. \quad (9)$$

故在正弦曲線中平均值與最大值之比如 2 對於 π 或如 7 對於 11 。

例如一電機之正弦形磁場之顛值等於 i_m ，其感應強度之平均值當等於 $i_m 2/\pi$ ，如極節距為 τ 而電樞之長為 b ，則通量 $\Phi = b\tau i_m 2/\pi$ 。

又若在某三相交流電動機之捷接電樞(圖210)中，電樞電流 i_m 之顛值為 i_m ，當電流作正弦形分佈時，其平均值等於 $i_m 2/\pi$ 。如命 z 表條數， p 表極對之數，則由電樞電流所惹起之最大激發等於 $i_m 2/\pi \times z/2p$ 。此最大激發在電流為零之處有效並在是處惹起轉動子電流之磁場之顛值。雙空距離為 l 並略去鐵體中之路程時，此顛值

$$B_{2m} = \frac{\Pi_0}{l} \times \frac{i_m^2}{\pi} \times \frac{z}{2p}.$$

磁場作正弦形而分佈。當極節距為 τ ，電樞之長為 b 及平均值為 $i_m 2/\pi$ 時，由轉動子電流產出之通量

$$\Phi'' = b\tau i_m 2/\pi = \Pi_0 \frac{z}{\pi^2} i_m \frac{z}{2p} b\tau.$$

電流之有效值¹⁾ I 等於電流平均流動時發生與交流相等之電熱者之電流強度。今交流在電阻 R 內所發生之電熱等於 $i^2 R dt$ ，其中 dt 表示時間。準此，

$$I^2 R T = \int_0^T i^2 R dt, \quad \text{申言之, } I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} \quad (10)$$

有效值故等於瞬時值平方之平均值(平方平均值²⁾)之方根。在為計算正弦曲線中之有效值，依水平方向表 $\alpha = \omega t$ 之弧並依鉛直方向表

¹⁾有效值; Effektivwert; effective value; valeur efficace. ²⁾平方平均值; quadratische Mittelwert; quadratic mean value; valeur moyenne quadratique.

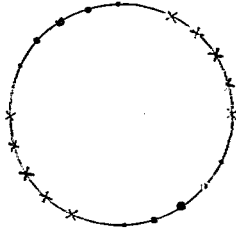


圖210. 四極三相交流電動機之轉動子電流。

電流臨時值之平方。一面條含有 $i^2 d\alpha$ 。設以一矩形代替在同一基線 2π 上之條面，則矩形之高度表示電流之平均的平方。其方根等於欲求之有效值。如命 $i = i_m \sin\alpha$ ，則得有效值如下

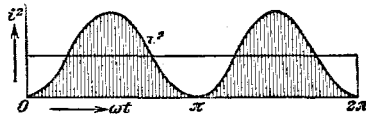


圖211. 有效值之確定。

$$I = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_m^2 \sin^2 \alpha d\alpha} = \frac{i_m}{\sqrt{2}} = 0.707 i_m. \quad (11)$$

故在正弦曲線中電流之有效值等於其顛值之 0.707 倍。電壓之有效值亦然，申言之，產電壓之有效值 $E = 0.707 e_m$ 而路端電壓之有效值 $U = 0.707 u_m$ 。

有效值係由多數經直流校準之計器直接指出。例如導交流通過經直流校準之測力計(功率計)。測力計含有一固定圈及一可動圈，二者可互相串聯，電流在二圈內同時變向。二圈間惹起之轉矩故恆依同方向作用。指針之偏轉與固定圈及可動圈內之電流有關，故即與欲測定之電流強度之平方有關。因有慣性，計器指出電流臨時值之平方之平均值，申言之，其偏轉與由強度為 I 之平均流動之電流所指出者相同，此值即為依第10方程式決定之值。由是以觀，經直流校準之計器當通交流時指出交流之有效值而與交流之曲線形無關。

在熱線計¹⁾中亦呈相同之情形。其鉑線因通電而發熱延長。此結果影響指針偏轉，偏轉之大小亦示交流之臨時值之平方之平均值。

在電流圈對於鐵心起整向作用或吸引作用之計器中其力與電流之

¹⁾ 熱線計; Hitzdrahtmessgeräte; hot-wire instruments; instruments à fil chaud.

臨時值及與鐵中之磁性為比例，是以在較小飽和狀態時與電流之臨時值之平方為比例。據原理而言，是處亦適用經直流校準之分度。但因鐵之磁滯作用，有一定有效值之交流之偏轉概較有同值之直流之偏轉為小。是種計器故係經交流校準，且大都利用經直流校準之測力計或熱線計校準。

是種校準法在費來利氏計¹⁾中亦用之。此計含有一個依二相繞成之固定子及一個由鋁製出之鼓形轉動子。固定子之二繞組有90°之位差，其中通過之電流亦異相。至異相電流則由插入一感應線圈於一繞組之電路內發生。由是乃產生一種轉動磁場並因而產生一種轉動子電流，後者與磁場惹起一轉矩。

69. 交流之平均功率²⁾.

如命 u 及 i 表電壓及電流強度之臨時值³⁾，則功率之臨時值當等於 ui 而在 dt 時間內之功當等於 $ui dt$ 。故平均功率：

$$N = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt. \quad (12)$$

此功率係由功率計指出且與曲線之形狀無關。

今假定電壓及電流皆呈曲線形且二者不同位——相之位移

4) 電流與方程式 $i = i_m \sin \omega t$ 相當而電壓

則由方程式 $u = u_m \sin(\omega t + \varphi)$ 表出。此情

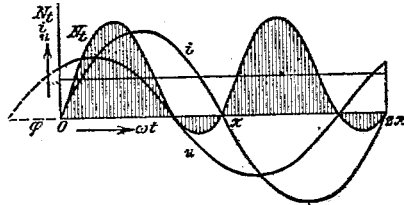


圖212. 功率之確定。

¹⁾ 費來利氏計；Ferraris messgeräte; Ferraris instruments; instruments Ferraris. ²⁾ 交流之平均功率; mittlere Leistung des Wechselstromes; mean power of alternating current; puissance moyenne du courant alternatif. ³⁾ 臨時值(瞬間值); Zeitwert (Augenblickswert); momentary value; valeur instantanée. ⁴⁾ 相之位移; Phasenverschiebung; phase displacement; déphasage.

形表示在 0 時間電壓已具有 $v_m \sin \varphi$ 值而當時電流尚等於零(參考第 212 圖)。電壓故以 φ 角移在電流之前——相之前移¹⁾。當電壓已達其顛值時，電流尚未達其顛值。

今求功率在各時間之臨時值 $N_t = ui$ 並以鉛直線表之，則得曲線 N_t 。一面條之面積 $ui dt$ 此時表示在 dt 時間內之功而一週期間之功當等於割線條面之面積。在水平軸下之面表示負號功。在發電機中此種負號功表示電流曾一時由外線路回入發電機而其時發電機恰如電動機轉動。

今總合半個週期內之面條，同時並注意符號，次於表半個週期時間之線上設一矩形以代總面積。此矩形之高度當表平均功率 N ，因帶負號面之故，平均功率應較單由電壓及電流強度決定者為小。若不如在第 212 圖中以時間但以弧角代替計算則自然最便。更簡單之方法例如以

$$\cos \varphi = \cos(\alpha + \varphi - \alpha) = \cos(\alpha + \varphi) \cos \alpha + \sin(\alpha + \varphi) \sin \alpha$$

$$\cos(2\alpha + \varphi) = \cos(\alpha + \varphi + \alpha) = \cos(\alpha + \varphi) \cos \alpha - \sin(\alpha + \varphi) \sin \alpha$$

命二方程式相減並由利用如是所成之方程式得：

$$N_t = u_m i_m \sin(\alpha + \varphi) \sin \alpha = 0.5 u_m i_m \{\cos \varphi - \cos(2\alpha + \varphi)\}$$

功率之時值故為雙頻率之餘弦函數。此時值以固定平均值 $N = 0.5 u_m \times i_m \cos \varphi$ 為中心而消長。以有效值 $U = u_m / \sqrt{2}$ 及 $I = i_m / \sqrt{2}$ 得平均功率或實有功率²⁾：

$$N = UI \cos \varphi. \tag{13}$$

此功率在第 212 圖中由曲線之平均高度 N_t 表出。UI 普通稱曰視功率³⁾，而有效功率與視功率之差曰功率因數⁴⁾，即功率因數。

$$\cos \varphi = N : UI. \tag{14}$$

設電流與電壓同相，恰如在白熾燈負載中，則 $\varphi = 0$ 而 $\cos \varphi =$

1) 相之前移; Phasenverteilung; phase lead; avance de phase. 2) 實有功率; Wirkleistung; real power; puissance réelle. 3) 視功率; Scheinleistung; apparent power; puissance apparente. 4) 功率因數; Leistungsfaktor; power factor; facteur de puissance.

1. 此時 $N=UI$ 。如 $\varphi=90^\circ$ ，則 $N=0$ 。

與有效功率 $UI \cos \varphi$ 相對待者為由 $U I \sin \varphi$ 乘積表出之無功功率¹⁾。

如電壓波及電流波發生畸變，則總功率 N 等於各波之功率之總和，其中屬於 k 級之諧波之功率為 $N_k = I_k I_k \cos \varphi_k$ 。電流或電壓之總波之有效值之平方等於各波之有效值之平方之總和。功率因數等於 $N:UI$ ，但不應再由 $\cos \varphi$ 表示。

70. 線示法。

呈正弦曲線之電流及電壓可由幅線²⁾或向徑³⁾表示。令電壓 $u = u_m \sin \omega t$ 。又命第213圖中 OE 線之長表巔值 u_m 。茲令此線以 $\omega = 2\pi f$ 之角速度背指針旋轉——幅線之轉向⁴⁾，其中 f 表交流之頻率。故在二極

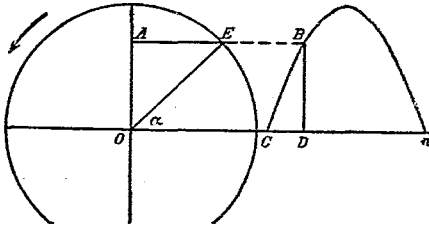


圖213. 電壓之以一線之表示法。

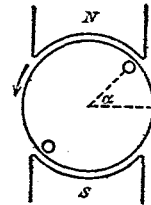


圖214. 旋轉中之線圈。

機中 (圖214) 線之轉數與電機之轉數相同。

當 $t=0$ 時， $\alpha=0$ 。此時電樞之線圈係在中立帶內而表電壓之線與水平軸之正方向一致。在任何時間，線與此軸成 α 角，申言之，若電機為一雙極電機，此角係等於圓面與中立帶所成之角。產電壓之瞬時

1) 無功功率; Blindleistung; wattless or idle power; puissance réactive ou déwattée. 2) 幅線; Strahl; ray; rayon; 3) 向徑; Radius Vektor; radius vector; rayon vecteur. 4) 幅線之轉向; Drehrichtung der Strahlen; direction of rotation of ray; direction de rotation de rayon.

值 u 此時等於 $u_m \sin \alpha$, 即等於 OE 線在鉛直軸上之投影。在右方正弦線中巔值等於 u_m , 與該時間相當之弧 GD 等於 α 及 DB 等於臨時值 OA 。

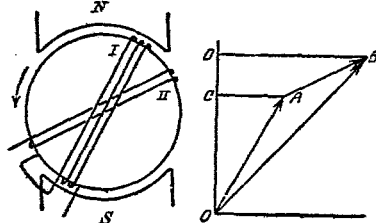


圖215. 異相電壓

今可將其不等有效值及異相之電壓總合之。在一電機之電樞上例如有二個互相串聯並異位之線圈。線圈 I 有較大線數，故有較大電壓。在第 215 圖中依與圓面相當之方向作各表一電壓之巔值之 OA 及 AE 二線並如在力之合成法中投之於鉛直軸上如 OC 及 GD 。此時二線圈之電壓之臨時值 OG 及 GD 之總和等於幾何學的總和 OB 之臨時值 OD 。準此以觀，一般電壓可依幾何學的方法合成之——幾何加法¹⁾。

以有效值代替巔值時，祇須變動比例尺度。此時 OB 線示總電壓之有效值。

依同法，強度及相均不等之二交流亦可合成。

在代慣用之平行四邊形¹⁾合成法之線之簡單串聯法中，係根據線依平行方向移動時並不變動之事實。線故無一定之起點，其方向係由矢首指出。又線命名時，起點及終點依線向所示之順序。例如在第 216 圖中 a 線等於 OD 線，其名稱爲 AB 而並非爲 BA 。又 b 線等於 OC 線，其名稱爲 BO 而並非爲 OB 。

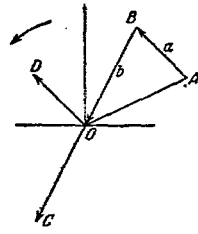


圖216. 輻線

幾何加法之特性在串聯法中遠較平行四邊形法中爲顯，在第 216 圖中， AB 及 BO 之總和爲 AO ，其方向爲自 A 向 O 。因 A 爲起點，故命

¹⁾幾何加法; geometrische Addition; geometrical addition; addition géométrique. ²⁾平行四邊形; Parallelogramm; parallelogram; parallélogramme.

名之順序自必依矢首之方向從A經過B而達O點——幅線之合成¹⁾。

又從一線減去第二線，其法先倒轉第二線之方向而以後加於第一線上。如二線從同點出發，例如第216圖中之AB及AO二線，其相差係等於其終點之連接線——幾何減法²⁾。此線故為被減之線之積，在第216圖中例如AO--AB=BO，因AB+BO=AO。

如用幾何加法，則克希荷夫定律對於交流亦適用。例如在發電機中經轉動磁場產生之電壓E等於內電壓損失與經發電機產生之路端電壓 U_k 之總和。依據第72節，內電壓損失係由與電壓 I 同相之歐姆電

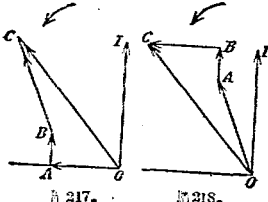


圖217. 一發電機之電壓圖，其中帶有感壓耗。

壓損失 IR 及超在電流前 90° 之有感電壓損失 $IL\omega$ 兩者所合成。在第217圖中，超在電流前 90° 之OA線等於 $IL\omega$ ，與電流同相之AB等於 IR ，BC等於 U_k 及 OC 等於 E。又在第218圖中——其中僅變動順次——OA等於 U_k ，與電流同相之AB等於 IR ，超出電流

90° 前之BC線等於 $IL\omega$ 及 CG 等於 E。

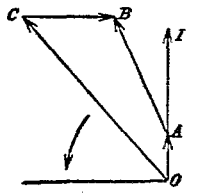


圖218. 一發電機之電壓圖，其中帶由自感應發生之電壓。

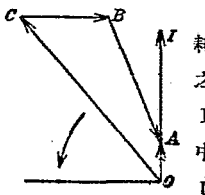


圖219. 一發電機之電壓圖，其中帶由自感應發生之電壓。

磁場發生之分壓，而 CB 表移在電流之後 90° 並由自感應發生之分電壓。

據第72節，有感壓

耗可由移在電流後 90°

之由自感應發生之電壓

E_s 代之。在第219圖

中例如 $OA=IR, AB=$

U_k 而總和OB等於合

成電壓。其中OC表由

¹⁾直線之合成; Zusammensetzung von Strahlen; composition of rays; composition de rayons. ²⁾幾何減法; geometrische Subtraktion; geometrical subtraction; soustraction géométrique.

設令發電機與一外線路相連接而後者復經其他電機饋電，則發電機不但可不供給路端電壓 U_R 且可有經其他發電機或線路發生並壓入於其內之等大反電壓 $U=BA$ 。在第 220 圖中，故內歐姆電壓損失 OA 等於 OC , CB 及 BA 三電壓之總和而後者分別由磁場，自感應及線路發生。

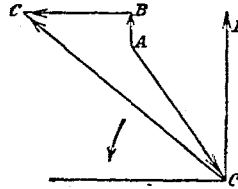


圖221. 一電動機之電壓圖，其中示有感壓耗。

在一電動機中電流經線路電壓 U 惹起，故概與之同相，但與磁場之產電壓相反對。如欲由自感應而起之有感電壓損失計算自感應，則成第 221 圖，其中 AO 表由磁場發生之電壓及 OC 表由線路壓入之電壓。故 $AO+OC$ 等於電壓損失 AC ，後者包括電熱損失 AB 及有感損失 BC 。

反之，如欲由自感應發生之電壓計算自感應，則祇須在第 221 圖中倒轉矢首之方向即可認 CB 為由自感應發生之電壓。故 $AO+OC+CB$ 之總和當表由磁場，外線路及自感應發生之電壓並等於歐姆電壓損失或熱損失 AB 。

今將帶路端電壓 U_1 及 U_2 之兩耗電器依法串聯。在二器內之電流 I 皆同相，但以 φ_1, φ_2 及 φ 分別移在 U_1, U_2 及 U 之後 (圖 222)。次將 U_1, U_2 及 U 諸線投射在電流線上。於是就一般而言，功率等於 $IU \cos \varphi$ ，申言之，等於電流 I 乘與電流同相之直角分電壓。此分電壓 $U \cos \varphi$ 名曰有效電壓。

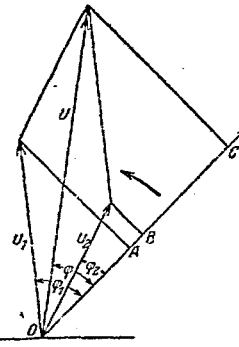


圖222. 總電壓功率等於分電壓功率之和。

準此，則分功率之總和等於 $U_1 I \cos \varphi_1 + U_2 I \cos \varphi_2 = I \times OA + I \times OB =$

OC 故即等於 $U \cos \varphi$ 。或 $U_1 I \cos \varphi_1 + U_2 I \cos \varphi_2 = U I \cos \varphi$ 。總電壓之功率故等於分電壓功率之和。

71. 複算法¹⁾或符號算法²⁾.

今欲將電壓線及電流線亦引用於計算法中。一線係由其長度（或量）及方向而決定。在是處量為電流或電壓之有效值。至方向則由相表示，申言之，係由線與水平軸之正號向所成之角度表示。為表示是種向量，概於表其值之字母上加一橫線。例如電流 \bar{I} 在思想上不但表有某一定強度且表帶有某一定相角 ψ 之電流。此角與電壓或電流之初位置或即與該角起算之位置有關。

在第 223 圖中電流 \bar{I} 包括依正水平軸向之分流 a 及依正鉛直軸向之分流 b 。為表明 b 依逆時針方向（或正方向）背 a 旋轉 90° ，以 $+j$ 與 b 相乘積³⁾。如命 I 表電流有效值及 ψ 表電流之相，則得

$$\bar{I} = a + jb, \quad (15) \quad \operatorname{tg} \psi = b/a, \quad (16)$$

$$I = \sqrt{a^2 + b^2}. \quad (17)$$

依第 223 圖，第 15 方程式又可錄作下式

$$\bar{I} = I \cos \psi + j I \sin \psi. \quad (18)$$

今可將電壓及電流依算法以代圖法合

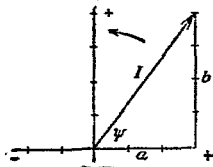


圖 223. 成直角之分流。

成。第 224 圖中表示帶有效值 U_1 及 U_2 之

兩電壓並 ψ_1 及 ψ_2 之兩相。其總和具有有效值 U 及相 ψ 。 $\bar{u}_1 = -4 + j3$ 及 $\bar{u}_2 = +3 + j2$ 。總之，得 $\bar{u} = \bar{u}_1 + \bar{u}_2 = -1 + j5$ ，而此則經第 224 圖證實之。據第 16 及第 17 兩方程式

$$U = \sqrt{(-1)^2 + 5^2} = \sqrt{26}. \quad \operatorname{tg} \psi = +5/(-1) = -5.$$

將 \bar{u} 線旋轉 180° ，遂變為 $-\bar{u}$ ，申言之，以 -1 乘積之，即等於將線移 180°

依以上之確定，以 $+j$ 相乘積，等於將線依正號轉向旋轉 90° 。故若以 $-j$ 相乘積，則等於將線依負號轉向旋轉 90° 。

¹⁾ 複算法; komplexe Rechnung. ²⁾ 符號算法; symbolische Rechnung; symbolic method of calculation. ³⁾ 與 $\pm j$ 之乘積; Vervielfachung mit $\pm j$; multiplication with $\pm j$.

二次以 j 或以 j^2 相乘積等於將線旋轉 $2 \times 90^\circ$ ，因而將線 \bar{u} 變為線 $-\bar{u}$ ，或 $j^2 \bar{u} = -\bar{u}$ ，申言之

$$j^2 = -1 \quad \text{及} \quad j = \sqrt{-1}.$$

準此以觀， j 不過為在別處以 i 指明之一想像單位。在第15及第18方程式中線依複式法表出。其中依正鉛直軸方向之分線表正想像線

而依負鉛直軸方向之分線表負想像線。是種計算法曰複算法（往日稱曰符號法）。

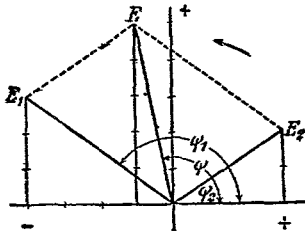


圖224. 總電壓及分電壓。

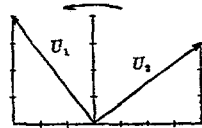


圖225. 互以90°移位之電壓。

在第225圖中例如將線 $U_2 = 4 + j3$ 向前移動 90° 。在算式中即以 $+j$ 相乘積，於是得

$$\bar{u}_1 = j \bar{u}_2 = j(4 + j3) = -3 + j4.$$

若觀察第 225 圖即可證實之。今再將 $\bar{u}_1 = -3 + j4$ 向後移動 90° ，得

$$\bar{u}_2 = -j \bar{u}_1 = -j(-3 + j4) = 4 + j3.$$

就一般而言，在複算法中，各方程式皆可分解而為二方程式，其中二邊之實項及虛項必各相等。

據是則在一方程式中各虛項可以 -1 乘積或在各項中可由配合複數以代複數。假使 $\bar{A} = \bar{B} + \bar{C}$ ，則 $\bar{A}_k = \bar{B}_k + \bar{C}_k$ 。其時若 $\bar{A} = p + jq$ ，則 $\bar{A}_k = p - jq$ 等。

算式中之分母其含有一複數者可以配合複數乘之，如是可使分母變為實分母。例如

$$\frac{2 + j5}{3 + j4} = \frac{(2 + j5)(3 - j4)}{(3 + j4)(3 - j4)} = \frac{26}{25} + \frac{j7}{25}.$$

除複式及三角式外尚有輻線之指數式¹⁾。當乘或分呈複式之量時，用此式特別有利。在第226圖中A在實軸上。命弧 ψ 分為m部分，其中m當達極限時等於 ∞ 。此時 \bar{a} 與A軸成直角而其量為 $A\psi/m$ 。據此， $\bar{a} = iA\psi/m$ ，申言之，

$$\bar{A}_1 = A + \bar{a} = A(1 + j\psi/m) \quad \bar{A}_2 = \bar{A}_1(1 + j\psi/m) = A\left(1 + j\frac{\psi}{m}\right)^2$$

$$\bar{A} = \lim_{m \rightarrow \infty} A\left(1 + j\frac{\psi}{m}\right)^m = \lim_{m \rightarrow \infty} A\left(1 + \frac{1}{m/j\psi}\right)^{j\psi m/j\psi}$$

今命 $m/j\psi = n$ 並注意極限 $\left(1 + \frac{1}{n}\right)^n = e = 2.71828$ ，其中 e 表自然對

數之基數，據是則

$$\bar{A} = Ae^{j\psi} \quad (19)$$

於是第18方程式

$$\cos \psi + j \sin \psi = e^{j\psi}$$

設將 $\sin \psi$ 級數以 j 乘積並加上 $\cos \psi$ 級數亦得同一結果。又如令 $e^{j\psi}$ 發展而為一級數，其結果因而亦同。

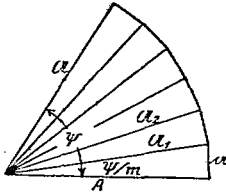


圖226. 指數式之導出。

例如已知三線或複數 \bar{A}_1 、 \bar{A}_2 及 \bar{A}_3 ，茲須計算 $\bar{A}_1 \times \bar{A}_2 / \bar{A}_3$ 則

$$\frac{\bar{A}_1 \times \bar{A}_2}{\bar{A}_3} = \frac{A_1 + A_2}{A_3} e^{j(\psi_1 + \psi_2 - \psi_3)} \quad (20)$$

同時得一種定則如次：如以一複數乘一線（複乘法²⁾）則得另一線，後者之長等於絕對量之乘積而其位置依複數之相角移在第一線之前。

例如電流 \bar{J} 應與 $z = R + jx$ 相乘積。為此命

$$\bar{J} = Ie^{j\psi} \quad Z = \sqrt{R^2 + x^2} \quad \cos \varphi = R/z \quad \bar{z} = ze^{j\psi}$$

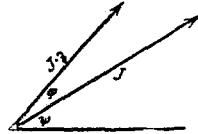
則得

¹⁾ 輻線之指數式；Exponential form des Strahles；exponential form of rays；forme exponente des rayons. ²⁾ 複乘法；komplexe Multiplikation；complex multiplication；multiplication compl x₂.

$$\overline{jz} = I e^{j\varphi} \times z \times e^{j\varphi} = I z \times e^{j(\psi+\varphi)}$$

依第 227 圖此式表示一線，其位置係超在 \overline{j} 之前並與之成一 φ 角。然應特別聲明者，二複數之乘積與在純向算法中之無向量內乘積或向量外乘積完全不同。

又為計算複數之幕，方根及對數用指數式亦頗便利。



由一線或一複數之指數式可知成比例之線成為二相似三角形。如 $\overline{A}:\overline{B}=\overline{C}:\overline{D}$ ，則 $\overline{j} \times \overline{z} = I z e^{j(\psi+\varphi)}$ 。

$$\frac{A e^{j\alpha}}{B e^{j\beta}} = \frac{C e^{j\gamma}}{D e^{j\delta}} \text{ 申言之, } \frac{A}{B} e^{j(\alpha-\beta)} = \frac{C}{D} e^{j(\gamma-\delta)}$$

方程式之二邊今表兩相同線，其量為 $A/B=C/D$ 而相角為 $\alpha-\beta=\gamma-\delta$ 。由此可想像第 227a 中兩三角形之相似。其轉向又相同。設三角形無相同之轉向但其餘則均相似，則其比例祇示量而並非示複數。

功率與電流強度及電壓不同，不能在線圖內表出，因其依第 212 圖有如電流及電壓兩倍之頻率。但功率之平均值可從電流及電壓之複式計算。依第 228 圖命 $\overline{j} = a+j$ 及 $\overline{u} = c+jd$ 。此時

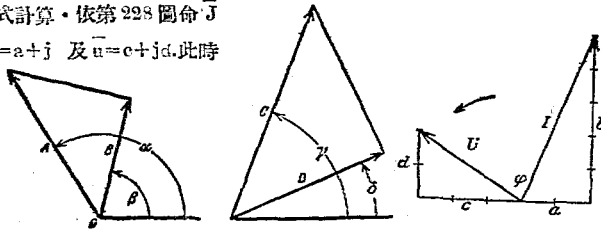


圖 227a. $\overline{A}:\overline{B}=\overline{C}:\overline{D}$. 圖 228. $N=ac+bd$.

a 與 c 及 b 與 d 各表功率並得 $N=ac+bd$ 。在是處 c 為一負數。

電流線 \overline{j} 可由配合複線 \overline{j}_k 代替而當 $\overline{u} = U e^{j\psi}$ 時， $\overline{j} = I e^{j(\psi-\varphi)}$ ，故 $\overline{j}_k = I e^{j(\varphi-\psi)}$ 。

$$\overline{u} \overline{j}_k = U I e^{j\varphi} = U I \cos\varphi + j U \times I \sin\varphi$$

右邊之第一項表有效功率而第二項表無功功率。

72. 交流電路內之自感應。

設想一個帶固定感應係數之線圈。線圈內若含有一鐵心，其飽和程度必極小，故在一週期間並在各工作狀況下之導磁率可視為一固定數。縱使在磁路內含有一空隙——其磁阻與鐵相較頗大——其導磁率亦夠大。若命 L 表感應係數，則依據第 190 面第 19 方程式由自感應所惹起之電壓之臨時值為 $e_s = -L di/dt$ 。若電流曲線呈正弦形，則 $= i_m \sin \omega t$ ，申言之， $di/dt = i_m \omega \cos \omega t = -i_m \omega \sin(\omega t - \pi/2)$ 。準此

$$e_s = +L\omega \times i_m \sin(\omega t - \pi/2). \quad (21)$$

顛值為 $L\omega \times i_m$ 而有效值為

$$E_s = L\omega I. \quad (22)$$

設一抗流線圈含有一個帶繞組並在一處切斷之鐵心(第60圖)。如感應並不過大，鐵之磁阻與空隙之磁阻相較可以略去不計。茲命 Q 空隙之長 $l = 0.6$ 厘米；電流強度 $I = 10$ 安，空隙橫斷面積 $F = 12$ 平方厘米，頻率 $f = 50$ 赫芝而匝數 $w = 200$ 。此時依第 44 面及 55 面電導及感應係數

$$\Lambda = \Pi_0 \times F/l = 4\pi \times 10^{-7} \times 12/0.6 \text{ 亨} \quad L = w^2 \Lambda = 0.61 \text{ 亨}.$$

角速度 ω 既等於 $2\pi f$ ，即等於每秒 314，故產電壓之有效值 $E_s = L\omega I = 31.4$ 伏。

以下當說明與抗流線圈相並接之電壓指示器恰測出 31.4 伏之電壓，是以抗流線圈恰如一電阻阻遏此電壓。由電壓與電流強度之比遂示 $L\omega$ 之值。

為計算一抗流線圈必從在第 173 面之關於電壓之一般的方程式(第 2 方程式)出發。為此在方程式中命 $\omega = 2\pi f$ 並以 $\sqrt{2}$ 分顛值得電壓之有效值

$$E_s = 2\pi w \times f \times \Phi / \sqrt{2} = 4.44 w f \Phi. \quad (23)$$

其中 Φ 表由一匝包含之通量之顛值，即表最大感應強度 \mathcal{H}_m 與經過量

通過之面F之乘積。如不計鐵內之路而僅注意空氣之路，則依據第12面，最大感應強度

$$\Phi_m = \Pi_0 i_m \times w / l = \Pi_0 \sqrt{2} I w / l. \quad (24)$$

茲命電流強度 $I = 10$ 安

，空氣橫斷面積 $F = 5$ 平方厘米，頻率 $f = 50$ 赫芝，最大感應強度 $\Phi_m = 5000$ 高斯 $= 5000 \times 10^{-8}$ 伏秒/平方厘米而產電壓 $E_s = 30$ 伏。於是

$$\Phi = 5000 \times 10^{-8} \times 15 = 75000 \times 10^{-8} \text{伏秒}。$$

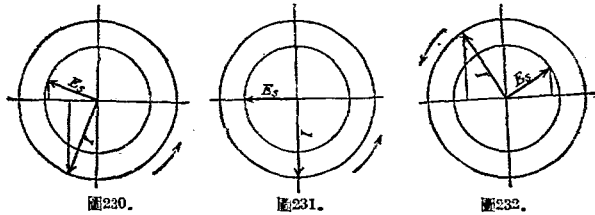
又依第23及24方程式

$$w = \frac{E_s}{4.440f} = 180, \quad l = \frac{4\pi \times 10^{-9} \sqrt{2} I w}{5000 \times 10^{-8}} = 0.64 \text{厘米}。$$

在空隙中既發生磁場線之雜散，經抗流線圈阻遏之電壓自必在30伏以上，故是處雜散起良好之作用。

今論呈正弦曲線之電流之自感應電壓之相。第193面示自感應電壓 e_s 之方程式，此電壓落在電流之後 90° (參考圖229)。

$t=0$ 時，電流強度等於零，而自感應電壓據第193面第21方程式



圖自感應產生之電壓之相。

達其負巔值，其故因當電流強度之曲線通過零點時，曲線之斜度最大，即 di/dt 最大。

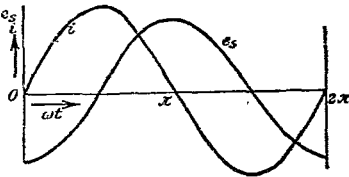


圖229. 電流及所發生之電壓。

以後 $\omega t = \pi/2$ 時，電流強度最大而電流曲線呈水平方向。此時電流及經線圈包含之通量皆不變動，因而自感應之電壓為零。自感應電壓之曲線 e_s 故落在電流之後 90° 。

第 230 至 232 線圖明示此種現象，且證實自感應之產電壓之方向與在遞減中之電流之方向一致而與在遞增中之電流之方向相反。

至由電流發生之通量如若不計磁滯之微弱影響係與電流同相。隨通量變動而發生之自感應之電壓故不但落在電流之後 90° 且亦以此角度落在通量之後。故若在第 229 圖中以時值 Φ_t 代替 i 即得第 231 圖。

今導入與自感應電壓相反對但相等之電壓，所謂有感壓耗¹⁾。此電壓為總電壓之一部分而係用以抵消自感應電壓 e_s 者。有感壓耗故為

$$u_s = -e_s = +L di/dt. \quad (35)$$

此電壓超前正弦形電流之前 90° (圖 233)。故當感應圈之有效阻微小時，電流當依第 223 圖落在電壓後 90° ，但 $\cos \varphi$ 既等於零，故功率

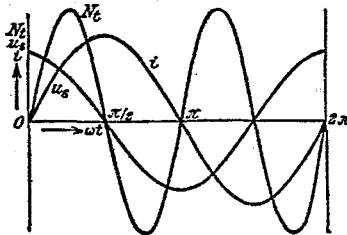


圖 233. 有效阻 $R=0$ 時之電流，電壓及功率

$N = U I \cos \varphi$ 等於零。功率之臨時值 $N_t = u_s \times i$ 在 0 至 $\pi/2$ 間為正而在 $\pi/2$ 至 π 間為負 (見第 233 圖)。曲線 N_t 之正面積表示導入於線圈內之電功而其負面積表示由線圈回給之功。二者之總和或總功故等於零。自感應線圈故

可阻遏一部分之電壓而同時不致惹起任何損失。

在交流電機之並聯接法中，抗流線圈有重要之用途。據第 35 節，自感應之性質恰如一種慣性而有反對電流變動之作用。若在並聯交流電機之間，有強度電流往返流動，則概利用抗流線圈以阻止是種電流

¹⁾有感壓耗; induktiver Spannungsverbrauch; inductive voltage consumption; consommation inductive de tension

(參見第 115 節)·當時將線圈插在電機與匯電條之間·圈內之電流既落在抗流線圈路端電壓 90° 之後，故在是種線圈內之功率消耗比較微小·雖圈內有電壓損失但電機間因插入抗流線圈其合作優良·在舒溫蒲尼之接法(第 234 圖)中，電壓

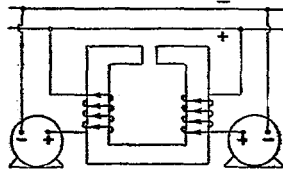


圖 234. 舒溫蒲尼抗流線圈¹⁾。

損失且可完全免除·因由二電機輸至外電路之電流依法繞抗流線圈之鐵心，二電流之磁效應相殺，故當二電流等強時，不產生磁場而電壓損失遂等於零·設在二機間有均流往返流動，抗流線圈即起作用並阻止均流之增長·

又在交流裝置中，抗流線圈充過高壓保護器·

今將自感應電壓納入於複算法算式中·依第 235 圖自感應電壓既落在電流 \vec{J} 之後 90° ，故若以 $L\omega$ 及 $-j$ 乘 \vec{J} 則得 \vec{E}_s ·又若以 $L\omega$ 及 $+j$ 乘 \vec{J} ，則得有自感壓耗，後者超前在電流之前 90° ·

故

$$\vec{E}_s = -j L\omega \vec{J}, \quad (26)$$

$$\vec{u}_s = +j L\omega \vec{J}. \quad (27)$$

例如在第 235 圖中， $\vec{J} = 3 + j2$ 安及 $L\omega = 2$ 歐，故若以 $j^2 = -1$ ，則

$$\vec{E}_s = -j2(3 + j2) = 4 - j6 \text{ 伏}$$

$$\vec{u}_s = +j2(3 + j2) = -4 + j6 \text{ 伏} \cdot$$

有效值 $I = \sqrt{3^2 + 2^2} = 3.6$ 安及 $E_s = U_s = \sqrt{4^2 + (-6)^2} = 7.2$ 伏·各線超前在水平

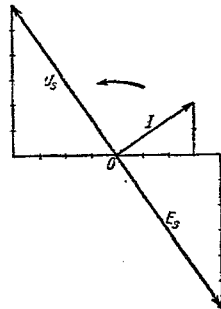


圖 235. 一抗電線圈之電流強度，路端電壓及自感應電壓·

軸正方向之前·此種角之正切其關於電流者等於 $2/(+3)$ ，其關於自感應電壓者等於 $-6/(+4)$ ·又其關於路端電壓者等於 $+6/(-4)$ ·故 \vec{J}

¹⁾舒溫蒲尼抗流線圈；Swinburn'sche Drosselspule；Swinburn's choke coil；bobine de réactance de Swinburn.

在第一象限內， \vec{E}_s 在第四象限內而 U_s 在第二象限內。

73. 交流電路內之電容

一種由電池，導線及一容電器組成之連接可視為一閉電路（參考第69面）。容電器充電時例如有同量之正電從容電器之負層流出恰如在正層中流入。據馬克士威氏繼續電線中之電流而在介質內通過者為經電場變動而發生之位移電流。凡具有電容之線例如一電纜其性質與容電器相同。

設一帶電容 C 之容電器之電壓（容壓¹⁾）於 dt 時間內增長 du ，其電量當增加 $dQt = Cdu$ ，故電流（容流²⁾）之臨時值

$$i = dQt/dt = Cdu/dt. \quad (28)$$

如在 $t=0$ 及 $t=t$ 之間積算之，則得比較 $t=0$ 時之電壓 u_0 為大之電壓。在 t 時之電壓故為

$$u = u_0 + \frac{1}{C} \int_0^t i dt. \quad (29)$$

如電流曲線呈正弦形而 $i = i_m \sin \omega t$ ，則

$$\frac{1}{C} \int_0^t i_m \sin \omega t dt = -\frac{i_m}{C\omega} \left[\cos \omega t \right]_0^t = -\frac{i_m}{C\omega} \cos \omega t + \frac{i_m}{C\omega}.$$

設若狀態不變，電壓曲線當依水平軸對稱，申言之，

$$u = -\frac{i_m}{C\omega} \cos \omega t = \frac{i_m}{C\omega} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right). \quad (30)$$

電壓之顛值故為 $i_m/C\omega$ 而其有效值

$$U = I/C\omega. \quad (31)$$

依據第30方程式，在容電器之電壓落在電流之後 90° ，申言之，電流起在電壓之前 90° （圖236）。 $\omega t = 0$ 時， $i = 0$ ，而電壓有其負號顛值，後者且當時絕不變動。容電器已充分充電，而後外電壓減時立即開始放電

¹⁾容壓；Kapazitätsspannung；capacity voltage；tension de capacité.

²⁾容流；Kapazitätsstrom；capacity current；courant de capacité.

• 電流及電壓在次一四分之一週期間倒轉其方向 •

$\omega t = \pi/2$ 時，電壓變動最大，故其時電流強度達其巔值。此後在次一四分之一週期間，電壓增長並惹起一種與之同向之電流。電壓及電流強度故均為正。以後可如法決定。

在第一四分之一週期，電流及電壓反向，故當時加入之功率為負，申言之，容

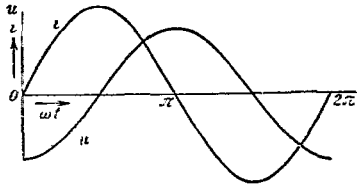


圖236. - 容電器之電壓及電流。

電器回給電功於電池。在第二四分之一週期，容電器復充電而加入之能量達其巔值。此能量可由利用第28方程式表示之。

$$W_m = \int_0^{u_m} u i dt = \int_0^{u_m} C u du = 0.5 C u_m^2 \quad (32)$$

正號功及負號功既相等，故平均功率等於零，即 $\varphi = -90^\circ$ 及 $\cos \varphi = 0$ 。

在複算法中容電器電壓落在電流之後 90° 之情形係依第30方程式由次列二方程式表示之

$$\bar{u} = -j\bar{I}/C\omega, \quad (33) \quad \text{即} \quad \bar{I} = jC\omega \bar{u}. \quad (34)$$

第十二章 交流電阻之串聯

74. 串聯中之電阻及自感應。

設命一電阻 R 及帶固定感應係數 L 及微小電阻之線圈依第237圖

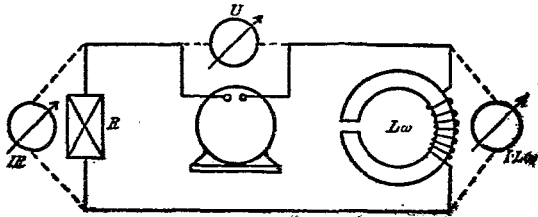


圖237. 成串聯之 R 及 $L\omega$ 。

與一電池相串聯並命在任一時間之電流強度等於 i 。此時經自感應發生之電壓 $e_s = -L di/dt$ 。此電壓與路端電壓 u 表示壓耗 iR ，即

$$iR = u + e_s = u - L di/dt.$$

今假定電流呈正弦曲線並在第 238 圖中依水平方向表示 ωt 弧而依鉛直方向表示與電流同相之壓耗 iR 及落在電流之後 90° 之自由感應發生之電壓。

當 ωt 等於零時， i 故即 iR 等於零，其時由自感應發生之電壓有其負號顛值。然電流強度祇當電壓無效時為零，故由自感應發生之電壓恰為路端電壓之臨時值 u 所抵消。

在 A 之瞬間， iR 為正，而由自感應發生之電壓為負。此時路端電壓 u 之一部分與電壓 iR 相抵消，其他一部分則克服自感應之電壓。

在 B 之瞬間，自感應之電壓為零，故路端電壓等於 iR 而兩曲線相交。

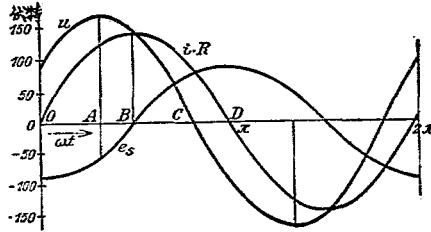


圖 238. 串聯之電阻及自感應。

終至在 C 時，自感應之電壓等於電壓 iR ，故當時路端電壓為零。

第 238 圖係就 $I=10$ 安， $R=10$ 歐及 $L\omega=6.28$ 而作。其中路端電壓之顛值等於 167 伏，而在電阻內消耗之電壓之顛值等於 $IR\sqrt{2} = 141.4$ 伏。電流強度故較依歐姆定律由路端電壓及電阻 R 所示者為小。是以就一般而言歐姆定律 $U=IR$ 不適用於交流。

一電壓指示器測定在某電阻之電壓為 $IR=100$ 伏，在自感應圈之電壓為 $IL\omega=62.8$ 伏及在總接線螺旋之電壓為 $167/\sqrt{2}=118$ 伏。依據克希荷夫定則，總電壓係等於諸分電壓之代數的總和。該定則僅對於交流之臨時值但並非對於其有效值適用。

終則路端電壓超前於電流之前而與之成一 ϕ 角，後者在第 238 圖中

與 CD 弧相當。電流故較路端電壓遲達顛值。此差角謂之相角而當電壓超在電流之前時其值曰正，反之，曰負。

今以與自感應電壓相反並相等之感應電壓損失代替自感應電壓，後者既落在電流之後 90° ，故感應電壓損失必超在電流之前 90° ，此電壓損失為路端電壓對於自感應電壓維持平衡之一部分。由第 195 面關於 iR 之方程式導出

$$u = iR + L \frac{di}{dt}. \quad (1)$$

是以路端電壓須在各瞬間抵償電壓消耗(歐姆電壓損失) iR 及有感壓耗(感應電壓損失) $+L \frac{di}{dt}$ 。電壓消耗係與電流同相，稱曰有效電壓。至超在電流前 90° 之有感壓耗稱曰無功電壓。

有感壓耗係經一線表示。此線與表示自感應電壓之線相反但相等，故其在複算法中等於 $+jL\omega I$ 。有效值之方向或符號既不表出，故為區別起見，以 $L\omega I$ 表由自感應發生之電壓，而以 $I \times L\omega$ 表有感壓耗。

電流之線係經方程式 $i = i_m \sin \omega t$ 規定而在第 29 圖中故意將其依水平軸之正方向表出。此圖示 $t=0$ 時之情形。壓耗 iR 係與電流同相。自感應電壓 E_s 係落在電流之後 90° ，故其線鉛直向下而與之相反對之有感壓耗 $I \times L\omega$ 係經一等長但向上之鉛直線表出。在以有感壓耗代替自感應之電壓 E_s 時，路端電壓 U 等於 iR 及 $I \times L\omega$ 之總和。電流復成 φ 角落在路端電壓之後。由第 239 圖

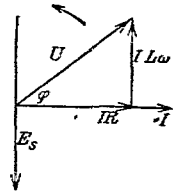


圖239. 或串聯之電阻及自感應。

$$U^2 = (iR)^2 + (I \times L\omega)^2, \text{ 或}$$

$$I = U : \sqrt{R^2 + L^2 \omega^2} \quad (2)$$

$$\text{tg} \varphi = L\omega / R. \quad (3)$$

在第 238 圖中，由電流強度，電阻及自感應決定路端電壓。在是處則可由路端電壓，電阻及自感應決定電流之強度及相。當 $U = 118$

1 無功電壓：Blindspannung; reactive voltage; tensi:n déwattée.

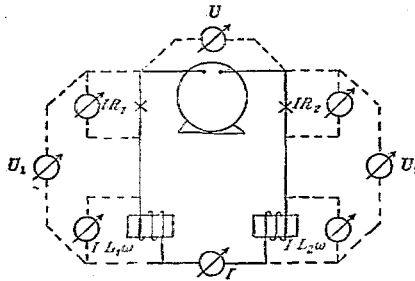


圖240. 成串聯之有效電阻及電抗。

伏， $R=10$ 歐及 $L\omega=6.28$ 歐時，由第2及3方程式得

$$I = 118 : \sqrt{10^2 + 6.28^2} = 10 \text{ 安。}$$

$$\text{tg}\varphi = 6.28/10 = 0.628.$$

與 $\text{tg}\varphi = 0.628$ 相當之弧，其值約等於

$\pi/3$ ，此在第238圖中由CD表示。

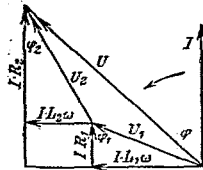


圖241. 電壓圖。

第240圖示二分路之串聯，二者均有電阻及自感應。

此時： $U_1 = I\sqrt{R_1^2 + L_1^2\omega^2}$ $\text{tg}\varphi_1 = L_1\omega/R_1$
 $U_2 = I\sqrt{R_2^2 + L_2^2\omega^2}$ 及 $\text{tg}\varphi_2 = L_2\omega/R_2$ 。

有效電壓 $I R_1$ 及 $I R_2$ 同相而無功電壓 $I \times L_1 \omega$ 及 $I \times L_2 \omega$ 亦然。由是乃成第241圖。分電壓 U_1 及 U_2 之總和等於總電壓 U 。分電壓一般均異相，而電流則在未分歧之電路內隨處均同相。總電壓 U 及其相係由次二方程式決定：

$$U = I\sqrt{(R_1 + R_2)^2 + (L_1 + L_2)^2\omega^2} \quad (4)$$

$$\text{tg}\varphi = (L_1 + L_2)\omega : (R_1 + R_2). \quad (5)$$

電阻及自感應亦可在電路之一部分內合併。假定一交流電機之各項如下：

- 電 壓 $U_k = 2000$ 伏 感應係數 $L = 0.04$ 亨
- 電流強度 $I = 50$ 安 電樞電阻 $R = 1$ 歐
- 頻 率 $f = 50$ 赫 外電路內之 $\cos\varphi = 0.8$ 。

與電流同相之歐姆電壓損失 $I R = 50 \times 1 = 50$ 伏，超在電流前 90° 之有感電壓損失 $I \times L\omega = 50 \times 0.04 \times 2\pi \times 50 = 628$ 伏。總電壓損失OF (圖242)等於 $I R$ 及 $I \times L\omega$ 之和，故 $OF = \sqrt{50^2 + 628^2} = 630$ 伏。此大電

壓損失幾乎全由自感應所惹起，故自感應之影響極不利。

外有效電壓依第 242 圖等於 $U_k \cos \varphi$ ，即等於 $2000 \times 0.8 = 1600$ 伏，而外有感壓耗等於 $U_k \sin \varphi = 2000 \times 0.6 = 1200$ 伏。有效電壓之總和故為 $IR + U_k \cos \varphi = 50 + 1600$ 伏，無功電壓之總和等於 $I \times L\omega + U_k \sin \varphi = 628 + 1200 = 1828$ 伏。經磁通量所發生之電壓為

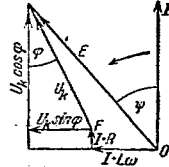


圖242. 電壓圖

$$E = \sqrt{1650^2 + 1828^2} = 2460 \text{ 伏} \cdot$$

此電壓成 ψ 角 ($= \text{弧} \cos 1650/2460$) 超前電流之前。其與路端電壓之差等於 $2460 - 2000 = 460$ 伏而電壓損失 $OF = 630$ 伏。此種外觀的矛盾可由 OF 與路端電壓 U_k 依幾何學加法相加為總電壓 E 之事實解釋之。

文舉一例，令一固定感應及一可變電阻 R 共與一固定電壓 U 相串聯。電阻 R 愈小時，依 $I = U / \sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}$ 方程式而決定之電流自然亦愈大。但其時功率僅增至某一固定之值，而以後如電阻 R 再繼續減小，功率反遞減，其方程式如下：

$$N = IR = U^2 R / (R^2 + L^2 \omega^2).$$

故當 $R=0$ 而全電路純為有感的一種時，其值為零而當 $R = L\omega$ 時，其值最大。

$L\omega$ 有如電阻之作用，特稱曰有感電阻¹⁾。此種抵抗恰如歐姆電阻亦以歐姆計算。為與有感電阻相區別，電阻 R 曰有效電阻²⁾。至 $\sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}$ 則稱曰阻抗³⁾ 而係以 z 表示之。

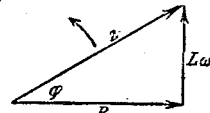


圖243. 複素阻電阻。

如以電流 I 分第 239 圖中電壓三角形

¹⁾有感電阻；induktiver Widerstand, Induktanz; inductive resistance;
²⁾有效電阻；Wirkwiderstand; effective resistance;
³⁾阻抗；Scheinwiderstand; impedance; impédance.

之各邊，則得第243圖中之直角電阻三角形，其中阻抗等於有效電阻及有感電阻之幾何的總和。同時電壓超在電流前之相差角 φ 等於阻抗超在有效電阻前之角(佛來銘電阻像¹⁾)。此角曰電阻角²⁾。在第243圖中之矢首不再指示線之轉向但指示角之正計算方向。各值間之關係如下：

$$z = \sqrt{R^2 + L^2\omega^2} \quad (6) \quad \cos\varphi = R/z. \quad (7) \quad \sin\varphi = L\omega/z. \quad (8)$$

恰如電流強度及電壓，阻抗亦可由一線表示，但其相角 φ 不變，故就此點而言，與電流強度及電壓之線不同。在電阻圖中R恆與實軸一致。依第190面第19方程式，阻抗之複算式如下：

$$\bar{z} = R + jL\omega \quad \text{或} \quad \bar{z} = ze^{j\varphi}. \quad (9)$$

在上式中 \bar{z} 包含 $z = \sqrt{R^2 + L^2\omega^2}$ 之值及阻抗角 $(\text{tg}\varphi = L\omega/R)$ 之雙

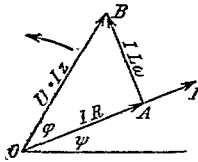


圖244. $u = j \times z$.

重意義。今以 $\bar{z} = R + jL\omega$ 乘依複算式表示之電流 \bar{J} ，則得 iR 及 $j \times L\omega$ ，前者與 iR 相並與電流 \bar{J} 同相，後者等於 $i \times L\omega$ 並以 90° 之角超在電流 i 之前(圖244)。此二部分之和為OA

+ AB = $i\sqrt{R^2 + L^2\omega^2} = iZ$ ，申言之，等於電壓 U 。此總和既以弧 $\text{tg} L\omega/R$ 之角超在電流之前，故就其相言之，亦表電壓 U ，因而可以 \bar{u} 表之。準此則得表歐姆定律之複算式：

$$\bar{u} = \bar{J} \times z. \quad (10)$$

此式僅表在第19面中導出之定則之一特殊之情形。該定則云：向量相乘時，即得一種量，此量等於各量之乘積而其相等於兩相角³⁾之和。

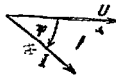


圖245. 帶相角 ψ 之電流。

設欲由複算法解答第200面之例一一，雖然在是種簡單情形中用此法並不有利。已知 $U = 118$ 伏， $R = 10$ 歐及 $L\omega = 6.28$ 歐。求電流之強度及相。在第245圖中依水平軸之正方向設線以表路端電壓 U ，於是得電

¹⁾ 佛來銘電阻像：Flemingsches Widerstandsbild. ²⁾ 電阻角；Widerstandswinkel；angle of resistance；angle de résistance. ³⁾ 相角；Phasenwinkel；phase angle；angle de phase.

流 $\bar{I} = \bar{u}/\bar{z} = 118/(10 + j6.28)$ 安。爲使分母變爲實數乃以 $10 - j6.28$ 相乘積，其中以 $j = \sqrt{-1}$ ，或以 $j^2 = -1$ ，於是得

$$\bar{I} = \frac{118}{10 + j6.28} \times \frac{10 - j6.28}{10 - j6.28} = \frac{118}{10^2 - 6.28^2} (10 - j6.28) \text{ 安,}$$

或 $\bar{I} = 8.5 - j5.31$ 安。電流之有效值及相角爲

$$I = \sqrt{8.5^2 + 5.31^2} = 10 \text{ 安} \quad \text{tg} \psi = -5.31/8.5 = -0.628.$$

相角特以 ψ 而非以 φ 表示，因由計算僅示對於正水平軸之位移。 ψ 係在第四象限內且爲一負角。此情形係由一背正轉動方向之矢首表明。反之，恆從電流方面算起之相位移角在是處爲一正角。

75. 成串聯之電阻及電容。

命電阻 R 與帶電容 C 之電容器相串聯。如總電壓之有效值爲 U ，隨時值爲 u ，則依據第 195 面第 29 方程式

$$u = u_0 + iR + \frac{1}{C} \int i dt. \quad (11)$$

電流曲線呈正弦形時，總電壓係由二分電壓合成，其一與電流同相並有 IR 之有效值，其他落在電流之後 90° 並依第 195 面等於 $1/C\omega$ 。後者爲一種無功電壓，並爲與有感電壓相區別起見，特稱曰容壓。有效電壓及容壓之正弦曲

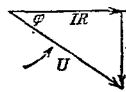


圖246. 成串聯之電阻及電容。

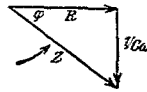


圖247. 成串聯之電阻及電容。

線之合成其法與在第 238 圖中所示者相同。較速之方法如第 24 圖中所示：

$$U = I \sqrt{R^2 + \frac{1}{C^2 \omega^2}} \quad (12) \quad \text{tg} \varphi = -\frac{1/C\omega}{R}. \quad (13)$$

$\text{tg} \varphi$ 方程式之負號表示依圖 246 當 IR 依水平軸之正方向表示時， φ 角係在第四象限內。

如仍由電流 I 分第 246 圖中之各線，即得一直角電阻三角形（圖

247), 其中 $z=U/I$ 表阻抗, R 表有效電阻及 $1/C\omega$ 表容阻¹⁾。其間之關係如下:

$$z = \sqrt{R^2 + 1/C^2\omega^2} \quad (14)$$

至 $\text{tg}\varphi$ 如第 13 方程式所示。設欲依複算法計算, 則須依第 247 圖令 $1/C\omega$ 落在 R 之後 90° , 即須以 $-j$ 乘之(見第 190 面)。由是得

$$\bar{z} = R - j \times 1/C\omega \quad (15)$$

容阻故為一種負有感電阻。

76. 交流之廣義歐姆定律。

設命有效電阻, 有感電阻及容阻互相串聯, 則依依第 192 面及 196 面得總電壓

$$u = u_0 + iR + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{G} \int i dt \quad (16)$$

電流曲線呈正弦形時, iR 與電流同相, 供抵消自感應用之電壓 $L \times \omega$ 超在電流之前 90° , 而在電容上之電壓 $1/G\omega$ 落在電流之後 90° 。此三種電壓之和遂等於總電壓 U (參考第 248 圖)。

如 $OA = I \times L\omega - 1/C\omega$, 則 OA 與 iR 之和等於總電壓。準此 $U^2 = (iR)^2 + OA^2$ 或

$$U = I \sqrt{R^2 + (L\omega - 1/C\omega)^2} \quad (17) \quad \text{及} \quad \text{tg}\varphi = (L\omega - 1/C\omega) : R \quad (18)$$

第 17 方程式稱曰關於交流之廣義歐姆定律。如以電流 I 分各線即得第 249 圖中之電阻圖。其中 R 表有效電阻, $L\omega - 1/C\omega$ 表電抗²⁾ x 及 $z = U/I$ 表阻抗。準此則

$$x = L\omega - 1/C\omega \quad (19) \quad z = \sqrt{R^2 + x^2} \quad (20)$$

$$\cos\varphi = R/z \quad (21) \quad \sin\varphi = x/z \quad (22) \quad \text{tg}\varphi = x/R \quad (23)$$

今以 $+j$ 相乘既等於將線 \bar{J} 向前旋轉 90° , 故以複算方程式表示歐姆定律時

¹⁾ 容阻; kapazitiver Widerstand; capacitive resistance; résistance capacitive. ²⁾ 電抗; Blindwiderstand; Reaktanz; reactance; réactance.

$$\vec{u} = \vec{I}R + j\vec{I}X = \vec{I}z. \quad (24)$$

阻抗 \vec{z} 之複算式

$$\vec{z} = R + j(L\omega - 1/C\omega) = R + jx. \quad (25)$$

爲確定一電分路之阻抗，先測定電壓 U ，電流強度 I 及功率 N 。次求 $\cos \varphi = N/UI$ 及 $\sin \varphi$ ，於是得阻抗 z 之實式，申言之，得一向量之值 $z = U/I$ 。由是得 $R = z \cos \varphi$ 及 $x = z \sin \varphi$ ，故 $\vec{z} = z(\cos \varphi + j \sin \varphi)$ 。依同法又可計算 $z = U/I$ ， $R = N/P$ 及 $x = \sqrt{z^2 - R^2}$ 。

然應注意者與 $\cos \varphi$ 之正號值相當之角可爲一負角或正角。又 $\sqrt{z^2 - R^2}$ 亦可爲正或負。測定法故不指出電抗之符號，申言之，該法不決定電抗爲一有感電阻或容阻。如若不預知電路因爲有感電路而相差故爲正者，則其符號須由插入一並不過分大之純粹電感係數於電路內以決定之。設相差因此增加，則知電抗當初爲有感電阻，反之爲容阻。

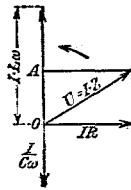


圖248. 成串聯之有效電阻，感應電壓及容電壓。

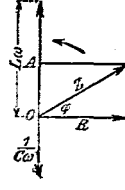


圖249. 成串聯之有效電阻，感抗及容抗。

在第17方程式之括弧內，分子及分母既皆含 ω ，故 ω 必惹起一種使括弧內之量變爲零之頻率，由 $L\omega - 1/C\omega = 0$ 求得 ω 之值而後以頻率 f 代之，即得次列二方程式

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{C \times L}}, \quad (26) \quad \text{即} \quad f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi \sqrt{C \times L}}. \quad (27)$$

有此頻率時， \vec{z} 之方程式等於零而第17方程式變爲 $U = IR$ ，故 $I = U/R$ 。此時電流強度與無自感應及電容而僅使電阻 R 與電壓 U 連接且無相差角時相同。

設命一電機之電壓爲 $E = 10000$ 伏，其電感係數 $L = 0.4$ 亨，一電纜之電容 $C = 2.5 \times 10^{-6}$ 法，電纜來回線之電阻 5 歐。電纜之電感係數假定不計，又頻率 f 假定等於 50 赫芝。今設想以一容電器代替電纜

並將容電器插在電機與電纜末端之中點。電機與容電器間之電阻此時為全路電阻之一半，即為 2.5 歐。當頻率 $f=50$ 赫芝時，電抗

$$L\omega - \frac{1}{C\omega} = 0.4 \times 6.28 \times 50 - \frac{10^6}{2.5 \times 50 \times 6.28} = 126 -$$

1275 = -1149 歐。

在開電纜內流動之電流強度依第 17 方程式為 $I = 10000 : \sqrt{2.5^2 + (-1149)^2} = 8.7$ 安。相差角幾乎等於 -90° ，故 $\cos\phi$ 幾乎等於零而功率幾乎亦等於零。設欲求電流在假定有以上諸值之電壓，電感係數及電容下達其顛值時之頻率。此危險頻率依第 27 方程式為

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{C \times L}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{2.5 \times 10^{-6} \times 0.4}} = 160 \text{ 赫芝。}$$

此時第 17 方程式中括弧內之值變為零，故電纜離開，電流極強，其值為 $I = E/R = 10000/2.5 = 4000$ 安。!! 且同時電容之電壓及自感應之電壓各達其非常大之值：

$$1/C\omega = L\omega \times I = 0.4 \times 2\pi \times 160 \times 4000 = 1.63 \times 10^6 \text{ 伏 !!}$$

電纜天然不能耐此大電流強度及電壓。當外電路之頻率 f 與電路之固有頻率： $2\pi\sqrt{LC}$ 相符合時，惹起一種特具的現象謂之共振¹⁾。在各瞬間經自感應發生之電壓足以產電容之大電壓或反是，故當時經電機發生之電壓祇供激發振動磁路。且須注意者電感係數 L 經選定等於 0.4 亨而僅對於小電機適用，恰如在絕緣實驗中所用者。若 L 較小，如在大功率機中所用之一種，則頻率當高於 160 赫芝之危險值。

上題中之頻率既大至 160 赫芝，故當有 50 赫芝之普通頻率時似不致發生共振之狀況，然電壓曲線亦可不為正弦形，故依據第 175 面其中除基本波外復可有高頻率之諧波。當外電路有 $f=50$ 赫芝之頻率時，第三級諧波例如可有 150 赫芝之頻率。此值頗近 160 赫芝，故其時之狀態頗近共振而第三級諧波之電流頗大。如於第 17 方程式中以 3ω 代基本波之角速度 ω 並以第三級諧波之電壓代 U ，則得此電流強度。

¹⁾ 共振; Resonanz; resonance; resonance.

在本題中假定第三級諧波之電壓等於基本波電壓之5%，故為 500 伏。當 $f=50$ 赫芝時，第三級諧波之電流

$$I_3 = \frac{500}{50 \sqrt{2.5^2 + (0.4 \times 3 \times 2\pi 50 - \frac{1}{2.5 \times 10^{-6} \times 3 \times 2\pi 50})^2}} = 72 \text{ 安。}$$

此電流依 72:8.7 之比大於基本波之電流，故極危險。

第十三章 並聯及混聯

77. 成並聯之交流電阻¹⁾。

恰如當電流與電壓間有相差角時電壓分解為有效電壓及無功電壓，電流亦可分解為有效電流²⁾ I_w 及無功電流³⁾ I_b ，其方程式如下：

$$I_w = I \cos \varphi \quad (1) \quad I_b = I \sin \varphi \quad (2)$$

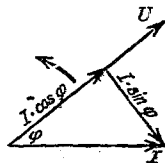
依據第 250 圖有效電流為與電壓同相之電流，其與電壓相乘時即示電力或功率。無功電流為電流之另一部分，其與電壓不發生有效功率或僅發生虛功率或無功率。當有正相差角或落後之電流時， $\sin \varphi$ 及無功電流均為正。正無功電流落在電壓之後 90° ，在電容電路內則超在電壓之前 90° ，故為負。

又依同圖：

$$I^2 = I_w^2 + I_b^2 \quad (3) \quad \operatorname{tg} \varphi = I_b / I_w \quad (4)$$

將電流分為有效電流及無功電流，其意義與以分別帶有效電阻及電抗之二並聯分路代該電路相同。

為惹起無功電流固不耗費功率，然其占住電動機，導線及發電機一部分之橫斷面積及增加電壓損失並由發熱而增加電功損失。圖 250. 有效電流及無功電流。



¹⁾ 交流電阻; Wechselstromwiderstand; alternating current resistance; résistance du courant alternatif. ²⁾ 有效電流(有功電流); Wirkstrom (Wattstrom); effective current; courant effective. ³⁾ 無功電流; Blindstrom; wattless current; courant déwatté.

職是之故，電機必須依其視功率（以仟伏安計算¹⁾）而非依其有效功率構成。當計劃時，故務須限制電流與電壓間之相差角俾限制無功電流至最小可能之值。

為並聯多數分路，將各分路分解為有效電流及無功電流，俾便計算總電流之強度及相。設以有效電流之總和及無功電流之總和構成一

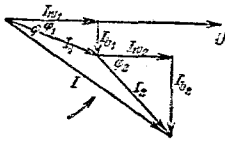


圖251. 由分路合成之總電流。

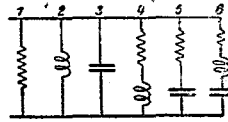


圖252. 並聯交流分路

直角三角形，則得總電流。其強度及相依第 351 圖經次列方程式表示之

$$I = \sqrt{(\sum I_w)^2 + (\sum I_b)^2} \quad (5) \quad \text{tg}\varphi = \sum I_b / \sum I_w \quad (6)$$

在第 252 圖中例如命各分路與一電壓 $U = 300$ 伏相連接。今計算各分路之諸值

$$z = \sqrt{R^2 + (L\omega - 1/C\omega)^2} \quad I = U/z$$

$$\cos\varphi = R/z$$

$$\sin\varphi = (L\omega - 1/C\omega)/z$$

$$I_w = I \cos\varphi$$

$$I_b = I \sin\varphi$$

諸值均以實用單位計算。茲作表列之如下：

分路	R	L ω	1/C ω	z	I	cos φ	sin φ	I _w	I _b
1	6	—	—	6	50	1	0	50	0
2	—	15	—	15	20	0	1	0	20
3	—	—	30	30	10	0	-1	0	-10
4	4	3	—	5	60	0.8	0.6	48	36
5	6	—	8	10	30	0.6	-0.8	18	-24
6	4	8	11	5	60	0.8	-0.6	48	-36
								164	-14

次得總電流之強度及相如下：

$$I = \sqrt{164^2 + (-14)^2} = 164.5 \quad \text{tg}\varphi = -14/164 = -0.0855$$

¹⁾ 仟伏安；Kilovoltampere；kilovoltampere；kilovolt ampere.

相差角為負，故電流超在電壓之前。

此題亦可依複算法解之。為此先計算各分路之 $z = R + j(L\omega - 1/C\omega)$ 並得 $\bar{J} = \bar{u}/z$ ，次將分子變為實數，然後總合諸電流。設令電壓之線故意與水平軸之正方向一致，則須以 $U = 300$ 之實值表 \bar{u} ，所得之結果如下：

分路	\bar{z}	$\bar{J} = \bar{u}/z$
1	6	50
2	$j15$	$-j20$
3	$-j30$	$+j10$
4	$4+j3$	$48-j36$
5	$6-j8$	$18+j24$
6	$4-j3$	$48+j36$
		$\Sigma \bar{J} = 164 + j14$

其中 $\Sigma \bar{J}$ 與有效電流及無功電流並無關係，但僅示與水平軸及鉛直軸有關之分流。此二者均為正，申言之，總電流線係在第一象限內，且超在正水平軸上之電壓線之前。 \bar{J} 線之相角 ψ 固為正角，但電流與電壓間之相差角則為負角。

如不用有效電流及無功電流，則可用有效電導¹⁾及電納²⁾。此二者不過為電壓等於 1 時之相當電流強度。先從帶串聯有效電阻 R 及電抗 x 入手，其導納³⁾——在實算式中以 y 而在複算式中以 \bar{y} 表示——等於阻抗之逆值，申言之，

$$\bar{y} = \frac{1}{z} = \frac{1}{R + jx} = \frac{R}{R^2 + x^2} - j \frac{x}{R^2 + x^2} \quad (7)$$

今名 $R/(R^2 + x^2)$ 為有效電導 g ，又名 $x/(R^2 + x^2)$ 為電納 b ，準此

$$g = R/(R^2 + x^2) \quad (8) \quad b = x/(R^2 + x^2) \quad (9) \quad \bar{y} = g - jb \quad (10)$$

$$y = \sqrt{g^2 + b^2} \quad (11) \quad I = U \times y \quad (12) \quad \text{及 } tg\varphi = b/g \quad (13)$$

其中 φ 表阻抗之相角，申言之，即電壓超在電流前之角。此角不

¹⁾有效電導簡稱電導；Wirkleitwert; conductance; conductance. ²⁾電納；Blindleitwert; susceptance; susceptance. ³⁾導納；Scheinleitwert; admittance; admittance.

應與屬於 \bar{y} 線之角相混，後者依據第10方程式等於 $\text{弧} \text{tg}(-b)/g$ ，故等於 $-\varphi_1$ ，而當 b 為正時係在第四象限內。

其實用第10方程式之意義與以帶有效電流及無功電流之二分路之並聯代 R 及 x 之串聯相同。

今欲確定第 253 圖中之二分路，俾總電流與電壓間不致發生相差角。在此情形中，無功電流之總和 $I_1 \sin \varphi_1 + I_2 \sin \varphi_2$ 必等於零。今 $I_1 = U/z_1$ 及 $I_2 = U/z_2$ ，又 $\sin \varphi_1 = L\omega/z_1$ 及 $\sin \varphi_2 = -(1/C\omega)/z_2$ ，如以 $z_1 = \sqrt{R_1^2 + L^2\omega^2}$ 及 $z_2 = \sqrt{R_2^2 + 1/C^2\omega^2}$ ，則得

$$\frac{L\omega}{R_1^2 + L^2\omega^2} = \frac{1/C\omega}{R_2^2 + 1/C^2\omega^2}$$

在此情形中無功電流之總和等於零。一分路之無功電流係與另一分路之無功電流相抵消，故在饋電線中祇有有效電流（電流共振¹⁾）。

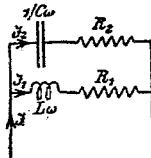


圖253. 並聯交流分路。

故由插入一容電器於與耗電器並聯之分路內，可免耗電器（例如三相交流電動機）之自感應對於饋電線及發電機惹起損害。但是種裝置並不充分耐久。如以後將說明，一超激同步電動機因其納取一種超在電壓前之電流有如一容電器之作用，故如在發電裝置中有同步電動機，則此種電動機必為超激電動機——超激²⁾。在特殊情形中，超激虛轉同步電動機在耗電處可充調相器或移相器³⁾——相之調整⁴⁾。 $R_1 = R_2$ 時，電流共振之條件為 $L\omega = 1/C\omega$ ，設若 R_1 及 R_2 實際等於零，則依據第 8 方程式各分路之有效電導等於零，故在饋電線內不但無功電流即有效電流亦等於零。在分路則有 $U:L\omega$ 之循環電流。在此情形中，分路對於饋電線之作用恰如一無限大之電阻。

¹⁾ 電流共振; Stromresonanz; current resonance; resonance du courant.

²⁾ 超激; Übererregung; over excitation; surexcitation. ³⁾ 移相器; Phasenschieber; phase schifter. ⁴⁾ 相之調整; Phas-nregelung; phase regulation; réglage de phase.

交流電阻並聯時，其分路之全阻抗 \bar{z} 恰如直流電阻係依與第12圖第7方程式相當之方程式計算。此方程式為

$$\bar{z} = \bar{z}_1 \bar{z}_2 (\bar{z}_1 + \bar{z}_2) \quad (14)$$

： 在第253圖中例如命 $\bar{z}_1 = R_1 + jL\omega$ 及 $\bar{z}_2 = R_2 - j1/C\omega$ 並將第14方程式中之分母變作實數，如是得全電阻之複算式。若此時全分路之作用僅如一歐姆電阻，方程式中之虛項必消滅。由是仍得與前相同之條件。

78. 分佈自感應及電容¹⁾

以上均假定僅電路之特別部分帶自感應及電容。今欲討論各部分均帶自感應及電容之情形，例如在饋電線及電纜中。其中不但來回線間之電壓即電流強度亦隨與始點之距離而異。為明瞭此事實之真義並得滿意之結果，今先用近似法計算。依是法電纜或架空線分為若干部分而在第254a圖中係由分為三分之一鏈線²⁾表明。R, L ω 及 C ω 表電纜之三部分之量。

* 例如已知導線末端之電壓 $U_2 = 1000$ 伏，電流強度 $I_2 = 20$ 安及功率因數 $\cos\phi_2 = 0.8$ ——假定電壓超前電流之前。茲命 1 仟米(公里)長之電阻 $R' = 0.4$ 歐，電感係數 $L' = 1 \times 10^{-3}$ 亨，電容 $C' = 0.56 \times 10^{-6}$ 法

及絕緣電阻之逆值所謂電漏

， $A' = 0$ 。又命

長等於 15 仟米

。依近似算法

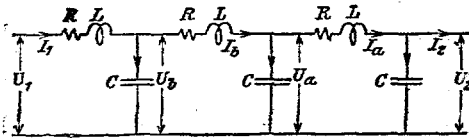


圖254a. 由鏈線代替一導線。

電纜每三分之一部分或每 5 仟米長之電阻 $R = 2$ 歐， $L = 1 \times 10^{-3}$ 亨， $C = 2.8 \times 10^{-6}$ 法。假定頻率 $f = 50$ 赫芝，則 $\omega = 2\pi f = 314$ /秒。申言之， $L\omega$

¹⁾分佈自感應及電容；verteilte Selbstinduktion und Kapazität; distributed self-induction and capacity. ²⁾鏈線；Kettenleiter; recurrent network; chaîne de circuits identiques.

$= 3.14$ 歐及 $C\omega = 8.8 \times 10^{-4}$ 西。求在導線始端之電壓 U_1 、電流強度 I_1 及功率因數 $\cos \varphi_1$ 。

在第254b圖中命表電壓 U_2 之線向右置在水平軸上並使表電流 I_1 之 OA 線以 φ_2 角落在電壓 U_2 之後。今依第254a圖電壓 U_2 使一起在電壓 U_2

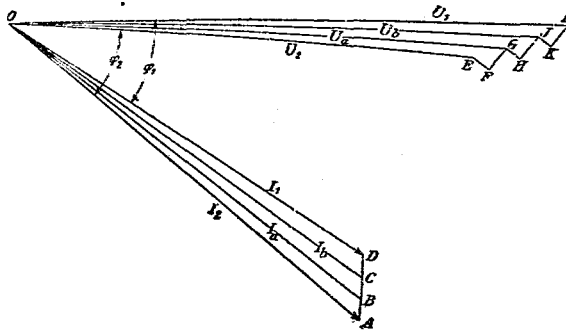


圖254b. 分佈自感應及電容之電流圖。

前 90° 之電流通過右容電器。其強度依據第196面第31方程式

$$AB = U_2 C \omega = 1000 \times 8.8 \times 10^{-4} = 0.88 \text{ 安。}$$

將 AB 線加於 OA 線上並令其有超在 OE 線之前 90° 之方向，於是得一表電流 I_a 之強度及相之 OB 線。由圖法知 $I_a = 19.5$ 安。次於表示電壓 U_2 之 OE 線上依電流 I_a 之方向加電壓損失 $EF = I_a R = 19.5 \times 2 = 39$ 伏及超在此損失前 90° 之另一電壓損失 $FG = I_a \times L\omega = 19.5 \times 3.14 = 61.2$ 伏。如於 OE 線上加超在電流 I_a 前弧 $\text{tg} L\omega/R$ 之 $EG = I_a \sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}$ ，其結果亦與前同，申言之，得第254a圖中之電壓 U_a 。依圖法得 $OG = 1070$ 伏。

電壓 U_a 在中間容電器內惹起電流

$$BC = U_a \times C\omega = 1070 \times 8.8 \times 10^{-4} = 0.94 \text{ 安。}$$

將此超在 OG 線前 90° 之 BC 線加在 OB 線上，於是得表電流 I_b 之 OC

線。依圖法 $I_b = 18.9$ 安。

在 OG 線上復依 I_b 之方向加線 $GH = I_b R = 18.9 \times 2 = 37.8$ 伏及以 90° 超前之線 $HJ = I_b L\omega = 18.9 \times 3.14 = 59$ 伏，於是得表電壓 U_b 之 OJ 線。

• 依圖法 $OJ = 1130$ 伏。

電壓 U_b 在左容電器內惹起電流

$$GD = U_b \times C\omega = 1130 \times 8.8 \times 10^{-6} = 0.99 \text{ 安。}$$

將 GD 依超在 OJ 前 90° 之方向加於 OC 線上，於是得表電流 I_1 之 OD 線。其強度等於 18.35 安。

最後在 OJ = U_b 線上依 I_1 之方向加電壓損失 $JK = I_1 R = 18.35 \times 2 = 36.7$ 伏及超前 90° 之 $KL = I_1 \times L\omega = 18.35 \times 3.14 = 57.5$ 伏，於是得路端電壓 $U_1 = OL$ 。依圖法

$$U_1 = 1200 \text{ 伏} \quad I_1 = 18.35 \text{ 安。} \quad \cos\varphi_1 = 0.827.$$

為清楚起見，故意選定 R, G 及 L 大於與實際相當之值。此題亦可依複算法明白解答。其中電壓 U_2 表一實數，副電流 $\bar{J}_2 = I_2 (\cos\varphi - j\sin\varphi)$ 。又命 $R + jL\omega$ 等於 \bar{z} 及 $jC\omega = \bar{y}$ 。電壓 U_2 惹起超前 90° 之電流 $jU_2 \times C\omega = U_2 \bar{y}$ 。今由算法得

$$\begin{aligned} \bar{J}_a &= \bar{J}_2 + U_2 \bar{y} = 16 - j11.13 & \bar{v}_a &= U_2 + \bar{J}_a \bar{z} = 1067 + j27.9 \\ \bar{J}_b &= \bar{J}_a + \bar{u}_a \bar{y} = 15.98 - j10.18 & \bar{u}_b &= \bar{u}_a + \bar{J}_b \bar{z} = 1130.7 + j57.5 \\ \bar{J}_1 &= \bar{J}_b + \bar{u}_b \bar{y} = 15.92 - j9.18 & \bar{v}_1 &= \bar{u}_b + \bar{J}_1 \bar{z} = 1191 + j8.88. \end{aligned}$$

依據第 188 面之第 17 方程式及依第 191 面

$$I_1 = 18.4 \text{ 安} \quad U_1 = 1196 \text{ 伏} \quad \cos\varphi_1 = N_1; U_1 I_1 = 0.825.$$

今欲精密確定沿導線之電流及電壓。其長 x 係從導線末端算起。命電壓及電流為時間之正弦函數。於是在長 dx 上增加之電壓及電流：

$$d\bar{u} = \bar{J}(R' + jL'\omega)dx \quad (15) \quad d\bar{J} = \bar{u}(A' + jC'\omega)dx. \quad (16)$$

將第 15 方程式微分之，則由利用第 16 方程式得

$$d^2 \bar{u} / dx^2 = (R' + jL'\omega)(A' + jC'\omega) \bar{u}. \quad (16a)$$

由微分方程之學理乃得一種易由二次微分證實之解答：

$$\bar{u} = \bar{A}\varepsilon^{cx} + \bar{B}\varepsilon^{-cx} \quad (17) \quad \text{是處 } c = \sqrt{(R^2 + jL^2\omega)(A^2 + jC^2\omega)}. \quad (18)$$

如依 x 微分第17方程式，則由利用第15及第18方程式得

$$\bar{J} \times \bar{Z} = \bar{A}\varepsilon^{cx} - \bar{B}\varepsilon^{-cx} \quad (19), \quad \text{是處 } \bar{Z} = \sqrt{(R^2 + jL^2\omega):(A^2 + jC^2\omega)}. \quad (20)$$

其中 \bar{Z} 稱曰導線之振動阻抗¹⁾ 或特性電阻²⁾。次須確定諸常數。命 \bar{u}_2 及 \bar{J}_2 分別表導線末端之電壓及電流強度，故當 $x=0$ 時，依第17及第19方程式得

$$\left. \begin{aligned} \bar{u}_2 &= \bar{A} + \bar{B} \\ \bar{J}_2 \bar{Z} &= \bar{A} - \bar{B} \end{aligned} \right\} \quad \text{即} \quad \left. \begin{aligned} \bar{A} &= 0.5(\bar{u}_2 + \bar{J}_2 \bar{Z}) \\ \bar{B} &= 0.5(\bar{u}_2 - \bar{J}_2 \bar{Z}) \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

有上列諸基本數值之後，即可依據第17及第19方程式計算導線各部之電壓及電流強度。若依圖法以代算法，先欲確定前題中在導線始端之電壓 \bar{u}_1 及電流 \bar{J}_1 已知

$$\begin{aligned} x &= 15 \text{ 仟米}, & R^2 &= 0.4 \text{ 歐/仟米}, & L^2 &= 2 \times 10^{-3} \text{ 亨/仟米}, \\ & & G^2 &= 0.56 \times 10^{-6} \text{ 法/仟米}, & A^2 &= 0. \end{aligned}$$

設命 $\omega = 2\pi f = 314$ /秒，則 $L^2\omega = 0.628$ 歐/仟米及 $C^2\omega = 176 \times 10^{-6}$ 西/仟米。

1. 依任何比例尺度命第255圖中 $OD = R^2 + jL^2\omega$ 及 $OF = A^2 + jC^2\omega$ 。從圖上讀出絕對量，互相乘積之並求其方根。由是依第18方程式求得線 \bar{c} 之量 $c = 0.0114$ 仟⁻¹，故 $cx = 0.171$ 。次求屬於 OD 及 OF 之弧之總數及將該總數等分之，於是得 \bar{c} 線之相角 γ 。就此相角並依任何比例尺度作 $OG = cx$ 並命 $\bar{c} = a + jb$ ，此時 $OH = ax = 0.018$ 及 $HG = bx = 0.165$ 。

今 $\log(\text{對數}) \varepsilon^{ax} = ax \log \varepsilon = 0.018 \times 0.4343 = 0.0078$ ，據此 $\varepsilon^{ax} = \text{數字對數 } 0.0078 = 1.05 = \varepsilon^{-ax} = 0.95$ 。

2. 照樣依第20方程式求 OD 與 OF 之比之方根並得振動阻抗 \bar{Z} 之絕

1) 振動阻抗; Schwingungswiderstand; oscillatory resistance; resistance d'oscillation. 2) 特性阻抗; Wellenwiderstand; characteristic impedance; impedance caractéristique.

對量 $Z = 65$ 歐。次從 OD 線減去 OF 線之相角並等分其餘值，於是得振動阻抗之 \bar{Z} 相角 ζ 。

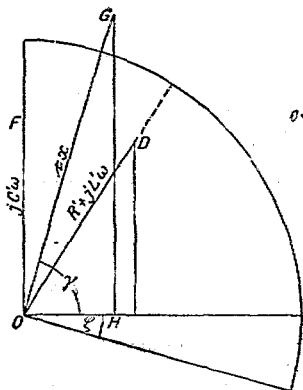


圖255. \bar{Z} 及 \bar{Z} 之確定。

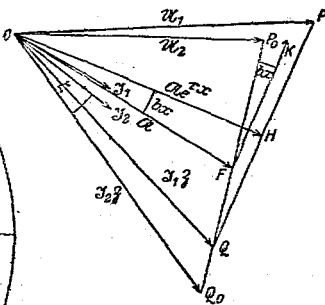


圖256. $\bar{A}, \bar{B}, \bar{u}_1$ 及 \bar{J}_1 之確定。

3. 在第 256 圖中作線 $OP_0 = \bar{u}_1 = 1000$ 伏並使線 \bar{J}_2 落後致使 $\cos\phi_2 = 0.8$ 。次作線 $OQ_0 = I_2 Z = 20 \times 65 = 1300$ 伏並使該線以 ζ 角超在 \bar{J}_2 之前，故在是處因 ζ 為負，係以 $-\zeta$ 角落在 \bar{J}_2 之後。如命 F 為 $Q_0 P_0$ 之中點，則依據第 21 圖 $OF = \bar{A}$ 及 $FP_0 = \bar{B}$ 。

4. 次將 \bar{A} 線與 $e^{ax} = 1.05$ 相乘積並令弧 $bx = 0.165$ 向前旋轉，於是得 $OH = \bar{A} e^{ax}$ 。再將線 $\bar{B} = EP_0$ 以 $e^{-ax} = 0.95$ 相乘積並令弧 $bx = 0.165$ 向後旋轉，於是得 $FK = \bar{B} e^{-ax}$ 。在是處因 bx 為一小角，其正弦等於弧。依第 17 及 19 方程式於是 $OP = OH + FK = \bar{u}_1$ 。又 $OQ = OH - FK = \bar{J}_1 Z$ 。次以 $Z = 65$ 歐分 OQ 並令其向後旋轉 ζ 角（故即等於向前旋轉 $-\zeta$ 角，於是得電流 \bar{J}_1 。最後讀出： $U_1 = 1194$ 伏， $I_1 = 18.3$ 安， $\cos\phi_1 = 0.83$ 。以上之近似算法是以已極真確。

如依圖法沿導線作線表 x 之任意值，則 H 及 K 點描出一對數螺旋線。在無損失之導線中此諸點均在一圓上，故 P 及 Q 描出橢圓。

第十四章 軌跡¹⁾79. 直線及圓之方程式。軌跡曲線²⁾。

1. 在 $\bar{R} = \bar{C} + \bar{D}\lambda$ 之方程式中， \bar{C} 及 \bar{D} 為固定值而係由線或複數決定。λ 為一實參數。當 λ 有各種不同之值時，依第 257 圖 \bar{R} 係在一直線上，後者通過 \bar{C} 之終點並同 \bar{D} 之方向。當 λ=0 時， $\bar{R}_0 = \bar{C}$ 。方程式 $\bar{R} = \bar{C} + \bar{D}\lambda$ 變為直線方程式。

2. 在次列方程式中

$$\bar{R} = \frac{\bar{A} + \bar{B}\lambda}{\bar{C} + \bar{D}\lambda} \quad (1)$$

\bar{A} , \bar{B} , \bar{C} 及 \bar{D} 為固定值，λ 為一實參數。λ=0, λ=1 及 λ=∞ 時

$$\bar{R}_0 = \frac{\bar{A}}{\bar{C}} \quad (2) \quad \bar{R}_1 = \frac{\bar{A} + \bar{B}}{\bar{C} + \bar{D}} \quad (3) \quad \bar{R}_\infty = \frac{\bar{B}}{\bar{D}} \quad (4)$$

依第 1 方程式求 λ 則由應用第 2 及第 4 方程式得

$$\lambda = \frac{\bar{A} \times \bar{C} - \bar{A} \bar{C}}{\bar{B} - \bar{R} \times \bar{D}} = \frac{\bar{C}}{\bar{D}} \times \frac{(\bar{R} - \bar{R}_0)}{\bar{R}_\infty - \bar{R}} \quad (5)$$

設

$$\bar{C} = C e^{j\gamma} \quad \text{及} \quad \bar{D} = D e^{j\delta}$$

則據第 5 方程式 $\bar{R} - \bar{R}_0$ 以固定角 $\eta = \delta - \gamma$ 起在 $\bar{R} - \bar{R}_0$ 之前，蓋 λ 之相角等於 0 而 \bar{C} 對於 \bar{D} 之相角等

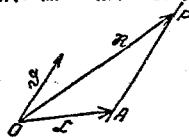


圖 257. $\bar{R} = \bar{C} + \bar{D}\lambda$.

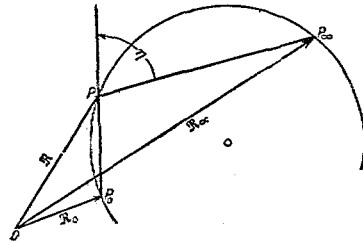


圖 258. $\bar{R} = \frac{\bar{A} + \bar{B}\lambda}{\bar{C} + \bar{D}\lambda}$.

¹⁾軌跡; geometrische Orte; geometrical locus; lieu géométrique. ²⁾軌跡曲線; Ortskurve; curve of locus; courbe de lieu.

於 $\gamma - \delta$ 。在第258圖中，以P描一圓並在 P_0P_∞ 弦上作一周邊角 $\pi - \eta$ 。第1方程式爲圓之方程式。設從 P_0 點作一以 η 角超在 P_∞ 前之線，則此線當爲該圓之正切，而圓之中心即可依法決定。

設 \bar{A} 或 \bar{B} 等於零或二者有相同相角或其相恰相反對，則圓通過始點。在此情形中恆可決定 \bar{R} 等於零時之參數 λ 之實值。

設 \bar{U} 及 \bar{D} 有相同之相角或 \bar{U} 或 \bar{D} 等於零，則圓變爲一直線。

參數此時應從圖上讀出。 $\lambda = 1$ 時，依第5方程式

$$1 = \frac{\bar{U}}{\bar{D}} \times \frac{\bar{R}_1 - \bar{R}_0}{\bar{R}_\infty - \bar{R}_1} \quad (5a), \quad \text{即 } \lambda = \frac{\bar{R} - \bar{R}_0}{\bar{R}_\infty - \bar{R}} \times \frac{\bar{R}_\infty - \bar{R}_1}{\bar{R}_1 - \bar{R}_0} = \frac{P_0P}{PP_\infty} \times$$

$$\frac{P_1P_\infty}{P_0P_1} \quad (5b)$$

今於第259圖中在 P_0 點作一正切及一與 P_0P_∞ 之平行線QT，後者被正切在 R_1P_0P 及 P_0P_1 分別在S及T相切。次在通過 P_0 之半徑上從P點設一鉛直線，後者在A及B分別與 P_0P_∞ 及 P_0P_1 相交切。此時如不顧及轉向，三角形 P_0PP_∞ 與 SQP_0 相似，又 $P_1P_\infty P_0$ 與 QP_0T 相似。準此以觀

$$\frac{P_0P}{PP_\infty} = \frac{QS}{P_0Q} \quad \text{及} \quad \frac{P_1P_\infty}{P_0P_1} = \frac{P_0Q}{QT}$$

依第5b方程式故

$$\lambda = \frac{QS}{QT} = \frac{AB}{AP} \quad (5c)$$

設QT等於100毫米，則QS當等於100 λ 毫米。

圓又可由在 P_0P_1 弦上之周邊角 ϵ 決定。依第5a方程式

$$\frac{\bar{D}}{\bar{U}} = \frac{\bar{R}_1 - \bar{R}_0}{\bar{R}_\infty - \bar{R}_1} = \frac{P_0P_1}{P_1P_\infty}, \quad \text{即} \quad \frac{\bar{U} + \bar{D}}{\bar{U}} = \frac{P_0P_1 + P_1P_\infty}{P_1P_\infty} =$$

$$\frac{P_0P_\infty}{P_1P_\infty} \quad (6)$$

故等於 $(\bar{U} + \bar{D}) : \bar{U}$ 之相角。

80. 三相交流電動機上之應用。

命 \bar{u}_1 表固定子電壓， \bar{J}_1 及 \bar{J}_2 固定子及轉動子內之電流強度， R_1 及 R_2 電阻， ω 原角速度， σ 電樞之退移或頻差¹⁾。

又命 L_1 及 L_2 表假定有某常導磁率時經繞組發生之全通量惹起之電感係數及 M 表互感係數。

今命 $a = j\omega L_1$, $b = j\omega L_2$
 $\times \omega$ 及 $c = jM\omega$, 於是據第二
 克希荷夫定律：

$$\bar{u}_1 = \bar{J}_1(R_1 + a) + \bar{J}_2 c \quad (7)$$

$$0 = \bar{J}_1 c + \bar{J}_2(R_2 + b). \quad (8)$$

如消去 \bar{J}_2 , 則得：

$$\bar{J}_1 = \bar{u}_1 \times \frac{R_2 + b\sigma}{(R_1 + a)R_2 + ((R_1^2 + a)b - c^2)\sigma}. \quad (9)$$

依據第 1 方程式，此式表示一圓。在鉛直軸上表出電壓 U_1 並得 $\sigma = 0$ (虛轉) 時， $\sigma = 1$ (捷路) 時及 $\sigma = \infty$ (以無限轉數背轉動磁場轉動) 時之固定子電流 OP_0 , OP_k 及 OP_∞ 。在第 259 圖中 P_1 點故與捷路點 P_k 同。

又依據第 9 方程式

$$\bar{J}_0 = \frac{\bar{u}_1}{R_1 + a} \quad (10) \quad \bar{J}_k = \bar{u}_1 \times \frac{(R_2 + b)}{(R_1 + a)(R_2 + b) - c^2} \quad (11)$$

$$\bar{J}_\infty = \frac{\bar{u}_1 b}{(R_1 + a)b - c^2}. \quad (12)$$

由測定電壓，電流強度及功率乃確定 \bar{J}_0 及 \bar{J}_k 。此時仍續用在 $P_0 P_k$ 弦上之 θ 角。在第 9 方程式中既然 $C = (R_1 + a)R_2$ 及 $D = (R_1 + a)b - c^2$,

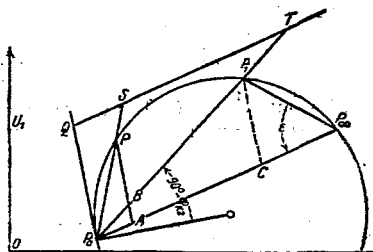


圖 259. 三相交流電動機之電流圖。

¹⁾ 退移或頻差; Schlüpfung; slip; glissement.

故依據第6方程式

$$\frac{P_0 P_\infty}{P_k P_\infty} = \frac{(R_1+a)(R_2+b)-c^2}{(R_1+a)R_2} \quad (13)$$

爲確定相角 ε ，命固定子被捷接並使轉動子與電壓 u_2 相連接。由交換脚註及電感係數，在轉動子內導入之轉動子電流¹⁾依據第11方程式

$$\bar{J}_{k2} = \bar{u}_2 \times \frac{R_1+a}{(R_1+a)(R_2+b)-c^2} \quad (14)$$

故由應用第14及第13兩方程式測定之阻抗

$$\bar{z}_{k2} = \frac{\bar{u}_2}{\bar{J}_{k2}} = \frac{(R_1+a)(R_2+b)-c^2}{R_1+a} \frac{P_0 P_\infty}{P_k P_\infty} R_2 \quad (15)$$

所屬之角 φ_{k2} ，故即爲在 $P_0 P_k$ 弦上之周邊角 ε ，爲此從 P_0 作一以 $90^\circ - \varphi_{k2}$ 之角落在 $P_0 P_k$ 之後之線。此線切在 $P_0 P_k$ 線上之鉛直線於圓之中心。如依沛地生²⁾命 $P_k P_\infty = P_0 P_\infty$ 等於 $R_2 : z_{k2}$ ，則第15方程式又示依第126節所須之 P_∞ 點。

依據第7及第10方程式轉動子電流

$$\bar{J}_2 = \frac{\bar{u}_1 - \bar{J}_1(R_1+a)}{c} = \frac{R_1+a}{c} \frac{(\bar{J}_c - \bar{J}_1)}{c} = \frac{R_1+a}{c} P P_0 \quad (16)$$

今確定轉動子內之損失。爲此應用與固定子簡線捷接時之轉動子電流 J_{2k} 。其值一方面依據第16方程式而地方面依第8及第11方程式爲

$$\bar{J}_{2k} = \frac{R_1+a_1}{c} P_k P_0 \quad \text{及} \quad \bar{u}_{2k} = - \frac{J_{kc}}{R_2+b} = - \frac{u_1 c}{(R_1+a)(R_2+b)-c^2}$$

由此二方程式及第13方程式得

$$\bar{J}_{2k} \times R_2 = -\bar{u}_1 \times \frac{(R_1+a)R_2}{(R_1+a)(R_2+b)-c^2} \times P_k P_0 = -\bar{u}_1 \frac{P_k P_\infty}{P_0 P_\infty} P_k P_0$$

設作一線 $P_k O$ 與在 P_∞ 之半徑相正交，則得

¹⁾轉動子電流(電樞電流) *Läuferstrom*; *armature current*; *courant de l'induit*.

²⁾沛地生; *P. terweel*.

$$I_2^2 R_2 = U_1 \times CP_K$$

依據第16方程式既然 $I_2^2 R_2 = AB \cdot CP_K$ ，故就一般而言

$$I_2^2 R_2 = U_1 \times AB \quad (17)$$

依據第127節轉動子內之相對損失既等於電樞之退移，故依據第50方程式導入於轉動子內之功率

$$N_{12} = U_1 \times AP \quad (18)$$

$R_1 = 0$ 時，電流圖顯然比較簡單。此時 \vec{J}_0 及 \vec{J}_∞ 落在 \vec{v}_1 之後 90° 而 $P_0 P_\infty$ 變為直徑。

81. 變壓器上之應用。

在作變壓器之圓線圖中恰如在作三相交流電動機之圓線圖中必須假定磁路有常導磁率。然嚴峻言之，此種導磁率惟不含鐵之變壓器始有之。

1. 設變壓器有電阻 R_n 之無感負載並假定鐵損失或鐵耗為零。此時如仍用第218面之記號，下列二方程式仍有效：

$$\vec{u}_1 = \vec{J}_1(R_1 + a) + \vec{J}_2 c \quad (19)$$

$$0 = \vec{J}_1 c + \vec{J}_2(R_2 + R_n + b) \quad (20)$$

如命 $R_2 + R_n$ 等於 R_2/σ ，則上列二方程式當與第7及第8二方程式相符合。故電樞有 σ 之退移時，三相交流電動機之性質恰如帶外副電阻 $R_n = R_2 \frac{1-\sigma}{\sigma}$ 之變壓器。其時關於變壓器之圓線圖係與電動機之圓線圖同而依據關於 R_n 之方程式， P_∞ 點係與 $-R_2$ 外阻電相當，申言之，與零值之副總電阻相當，故即與理想捷路相當。是以無論在變壓器或三相交流電動機中此點恆可由 P_{K1} 表示之。

恰如在三相交流電動機中， $U_1 \times AB$ 表在副部分內之損失及 $U_1 \times AP$ 表導至副部分內之功率。有用功率故為 $U_1 \times BP$ 。

當 $R_1 = 0$ 時，該問題復趨單純如見於第219面中。

2. 命變壓器帶阻抗 \vec{z}_n ，其量 z_n 可變動但其相角 ϕ_n 不能變動。此時可以 \vec{z}_n 代第19及第20方程式中之 R_n 並消去 \vec{J}_2 或可由第260圖中之代

用接法¹⁾ 導出電流圖並同時顧及鐵耗。茲命 R_1 及 R_2 表二繞組之電阻， x_1 及 x_2 經雜散惹起之電抗， R 虛轉時減去 R_1 後之有效電阻，申言之，即以電熱代替鐵耗之電阻，及 x 表虛轉時減去 x_1 後之電抗。又命

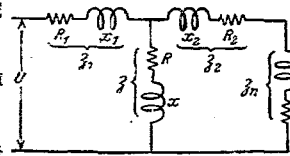


圖260. 代替接法。

$$\bar{z}_1 = R_1 + jx_1 \quad \bar{z}_2 = R_2 + jx_2 \quad \bar{z} = R + jx,$$

於是在原饋電中，在虛轉及成捷路時之總電阻

$$z_0 = \bar{z}_1 + \bar{z} \quad \bar{z}_k = \bar{z}_1 + \frac{\bar{z}_2 \bar{z}}{\bar{z}_2 + \bar{z}} = \frac{\bar{z}_1 \bar{z}_2 + \bar{z}_1 \bar{z} + \bar{z}_2 \bar{z}}{\bar{z}_2 + \bar{z}}$$

又在副饋電中

$$\bar{z}_{o2} = \bar{z}_2 + \bar{z} \quad \bar{z}_{k2} = \bar{z}_2 + \frac{\bar{z}_1 \bar{z}}{\bar{z}_1 + \bar{z}} = \frac{\bar{z}_1 \bar{z}_2 + \bar{z}_1 \bar{z} + \bar{z}_2 \bar{z}}{\bar{z}_1 + \bar{z}}$$

於是依歐姆定律及關於分路電阻之定則，同時以 $\bar{u}_1 = \bar{u}_0 = \bar{J}_0$ ，得

$$OP = \bar{J}_1 = \frac{\bar{u}_1}{\bar{z}_1 + \frac{(\bar{z}_2 + \bar{z}_n) \bar{z}}{\bar{z}_2 + \bar{z}_n + \bar{z}}} = \bar{J}_0 \times \frac{\bar{z}_{o2} + \bar{z}_n}{\bar{z}_{k2} + \bar{z}_n} \quad (21)$$

此式為圖之方程式。應注意者，其中以 $\bar{z}_n = 0$ 時得捷路電流 \bar{J}_k 而以 $\bar{z}_n = \infty$ 時得零載電流 \bar{J}_0 。參數為 \bar{z}_n 並依第1方程式 $\delta = \varphi_n$ 及 $\gamma = \varphi_{k2}$ ，故 $\eta = \delta - \gamma = \varphi_n - \varphi_{k2}$ 。依據第216面一般定則，今從 P_k (!) 作一線，後者以 $\varphi_n - \varphi_{k2}$ 之角超在 $P_k P_0$ 之前或以 $\varphi_{k2} - \varphi_n$ 之角落在該線之後。此線成爲一正切而由此可求得中心(圖261)。

今欲確定副電流強度及電壓。由第250圖命 $\bar{u}_1 = \bar{J}_0 \times \bar{z}_0$ ，則得

$$\bar{u}_1 = \bar{J}_1 \bar{z}_1 + (\bar{J}_1 - \bar{J}_2) \bar{z}_0 \text{ 即 } \bar{J}_2 = (\bar{J}_1 - \bar{J}_0) \bar{z}_0 / \bar{z} = P_0 P \times \bar{z}_0 / \bar{z} \quad (22)$$

若依第21方程式求 \bar{z}_n ，並以 \bar{z}_{o2} 、 $\bar{z}_{k2} = \bar{z}_0$ 、 \bar{z}_k 及 $\bar{J}_0 \times \bar{z}_0 = \bar{J}_k \times \bar{z}_k$ ，則

¹⁾ 代用接法；Ersatzschaltung；equivalent connection；connexion équivalente. ²⁾ 零載電流；Leerstrom；no load current；courant à vide.

得

$$\bar{z}_n = z_{k2} \times \frac{\bar{J}_k - \bar{J}_1}{\bar{J}_1 - \bar{J}_0} \quad (23)$$

據此，副端端電壓

$$\bar{u}_2 = \bar{J}_2 \bar{z}_n = (\bar{J}_k - \bar{J}_1) z_{k2} \times \bar{z}_0 / \bar{z} = PP_{k2} \times z_{k2} \times \bar{z}_0 / \bar{z} \quad (24)$$

茲由應用第 161 面關於虛轉電阻及捷路電阻之方程式

$$\bar{J}_k - \bar{J}_0 = \frac{\bar{u}_1}{z_k} - \frac{\bar{u}_1}{z_0} = \bar{u}_1 \times \frac{z_0 - z_k}{z_0 z_k} = \bar{u}_1 \times \frac{\bar{z}^2}{z_0^2 \times z_{k2}}$$

準此則由第 24 及第 22 方程式及應用 P_0BP 及 P_0PP_k 兩三角形之相似性並以 $\bar{J}_1 - \bar{J}_0 = P_0P_1$, $\bar{J}_k - \bar{J}_1 = PP_k$ 及 $\bar{J}_k - \bar{J}_0 = P_0P_k$ 得

$$\bar{u}_2 \bar{J}_2 = \frac{(\bar{J}_1 - \bar{J}_0)(\bar{J}_k - \bar{J}_1)}{\bar{J}_k - \bar{J}_0} \times \bar{u}_1 \text{ 或 } U_2 \times I_2 = U_1 \times BP \quad (25)$$

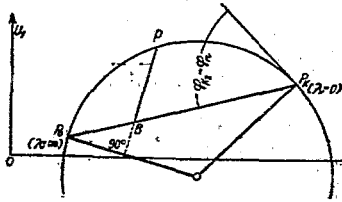


圖 261. 帶常數 φ_n 之變壓器。

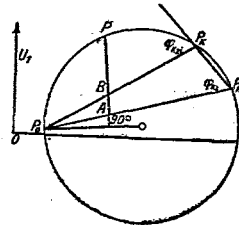


圖 262. 變壓器, $\varphi_n=0$.

在無感負載之特殊情形中， $\varphi_n=0$ 。在 P_0P_k 上之周邊角為 φ_{k2} 而在 P_0P_{ki} 上之周邊角為 φ_{ki2} (圖 262)。若從 z_{k2} 減去電阻 R_2 並使角與 P_kP_{ki}



圖 263. 理想的捷路。

P_0 三角形之角相符合既可依據第 263 圖得 $z_{k2}i$ ，則在是處復發生第 15 方程式及以圖表示 P_{ki} 之方法。給出之功率依據第 25 方程式等於 $U_1 \times B P$ 。若 $R_2=0$ 時，此功率為 $U_1 \times AP$ ，申言之， $U_1 \times AP$ 為導入於副部分內之功率而 $U_1 AB$ 為副部分內之銅耗。

在變壓器中，零載電流及經雜散惹起之電抗既非常之小，是以上面之電流圖僅示三相交流電動機有

帶無載之變壓器之性質。

82. 倒轉法。

為導出關於一線終點之軌跡有時應用倒轉法¹⁾。在第 264 圖 (圓線圖²⁾) 中，一圓經由始點及一與直徑正交之線決定。其中絕對量有如下列之關係

$$OA = OC \times OD \times 1/OB,$$

故如已知 $OC \times OD$ ，則一線之倒值之量可直接讀出，又相亦可從圖讀出，但有某一定限制。依據第 188 面。

$$a - jb = (a^2 + b^2) : (a + jb).$$

一複數及其倒值故並非有同一相角，但有反對等相角，申言之，倒轉線並非直接示倒值，但示對於實軸而言之像。

在第 265 圖中示二個以始點 O 為近似點之圓，申言之，有同一中心線及正切。其中

$$OB = \frac{OE^2}{OC} \text{ 及 } \frac{OE}{OG} = \frac{OD}{OA}, \text{ 即 } OB = OD \times OE \times \frac{1}{OA}.$$

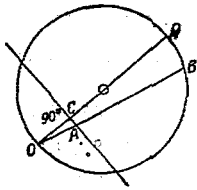


圖264—直線及一圓之倒轉。

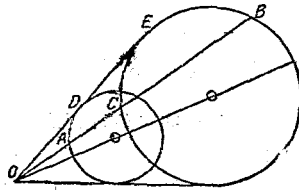


圖265. 二圓之倒轉。

一圓之線之就對於實軸而言之像，如不計比例尺度放為他圓之線之倒值。

圖又可視為其自身之反曲線。如在第 266 圖中 e 表始點之正切，

¹⁾ 倒轉法; Inversion; inversion. ²⁾ 圓線圖; Kreisbild, Kreisdiagramm; circle diagram; diagramme circulaire.

則 $OA = q^2 \times 1/OB$.

求有常外電路電壓時第 260 圖中代用接法之電流圖，但其中 \bar{z} 可

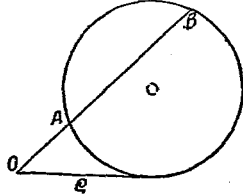


圖260. 圓固有反曲線。

表一純感應電阻 x 及 r_n 表一純有效電阻 R_n 。今反是而確定負載變動時為維持原電流 I_1 必須壓入之原電壓。為此在第 267 圖中依正鉛直軸設表電流 I_1 之線。此時 $OA = I_1 R_n$ 亦依此方向，而 $AB = I_1 x$ 則超前 90° 。如當時 BG 表分

路之電壓，則 OG 當表總電壓。

今分路之電壓 $BG = j(\bar{J}_1 - \bar{J}_2)x = j\bar{J}_1x - j\bar{J}_2x$ 。命超在 I_1 前 90° 之 BD 等於 I_1x ；於是差 GD 等於 I_2x 。此線超在電流 I_2 之前 90° ，故與 CG 之方向一致。

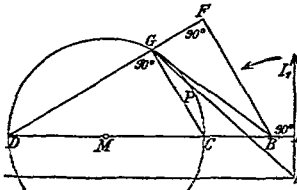


圖267. 有固定電流時之電壓圖，同時為電阻圖。

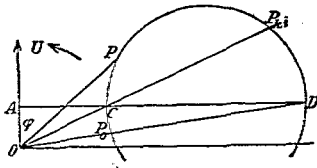


圖268. 有固定電壓時之電流圖。

今電壓 BG 亦在副分路上故係由分電壓 BF 及 FG 所合成。 $BF = I_2(R_2 + R_n)$ 與電流 I_2 同相而 $FG = I_2x$ 超在電流 I_2 之前 90° 。其中 $BC:CD = FG:GD = x_2:x$ ，故當 R_n 變動時， G 循以 CD 為直徑之圓而運動。

設以 I_1 分諸線或選定 $I_1 = 1$ 。電壓圖於是變為電阻圖。其中 $OA = R_n$ ，因此鉛直軸變為實軸。又 $AB = x_1$ 及 $BD = x$ ， BG 等於分路之阻抗而 OG 等於全部連接之阻抗而終點 G 復在圓上。

虛轉時 $R_n = \infty$ ，或理想捷路時， R_2 想像為零。在二情形中，分路之電阻純為有感的一種。在作虛轉時及有理想捷路時之全有感電阻於是為

$$x_o = x_1 + x = AD \quad x_{ki} = x_1 + x_2x / (x_2 + x) = AC.$$

茲依倒轉法討論有固定電壓時之電流圖。如命 r 表半徑及 q 表從始點之切線，二者均以歐數計，則

$$q^2 = \overline{OM} - r^2 = \overline{OA}^2 + \overline{AM}^2 - r^2 = \overline{OA}^2 + (AM+r)(AM-r).$$

依據第 267 圖 $q^2 = R_1^2 + x_o \cdot x_{ki}$ 。準此，則當有全電阻 OG 及固定電壓 U 時，依據第 224 面電流強度

$$I_1 = U/OG = OP \times U/q^2.$$

此時依第 224 面作對於實軸或即對於鉛直軸而言之電阻圖之像 (圖 268)。表固定路端電壓之線亦同此方向，因路端電壓起在電流前之角 φ 正與第 268 圖中阻抗起在有效電阻之前之角相等。爲免每次以 U/q^2 相乘積，先將與製作圓線圖有關之各線以 U/q^2 相乘積，於是在第 268 圖中

$$OA = R_1 \times U/q^2$$

$$AC = x_{ki} \times U/q^2$$

$$AD = x_o \times U/q^2$$

如路端電壓之線固定不變，電流 I_1 之 OP 線之終點 P 在各種工作狀況下經過 CD 而描成一圓。在電流圖中 OD 之倒轉線 OP_o 表無載電流，而 OC 之倒轉線 OP_{ki} 表理想捷接電流。

第 28 圖爲不計及鐵耗時關於無感有載變壓器或三相交流電動機之準確海蘭電流圖¹⁾。

第十五章 多相交流

83. 三相交流²⁾之特性。

多相交流依其時間的狀況，或即依其相而互相移位。凡供產多相交流或三相交流之發電機皆具有一組特別繞組或相線³⁾而後者互以相

1) 準確海蘭電流圖；genaues Heylandsches Strombild; accurate Heyland's current diagram. 2) 三相交流；Drehstrom, Dreiphasenstrom; three phase current; courant triphasé. 3) 相線；Strangen

等空間角度移位，因此在其中發生之電壓間亦起依時間的相當移位。設諸相線內之負載平均，則在電流間亦發生同一相差角。

一完全三相交流繞組必須含有極多數之單相線。在第 269 圖中例如一槽與在同一直徑之他端之另一槽同屬於一相線。繞組之各相線係導至特別接點並係與一外負載相連接，後者為簡單起見僅含有效電阻。磁場之分佈假定呈正弦形。如不計及繞組之有感電阻，則各相線內之電流與由磁場惹起之電壓同相。當其槽恰在一極心之前時，其值最大

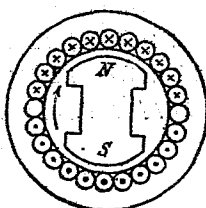


圖269. 多相繞組之電樞電流，整節繞組。

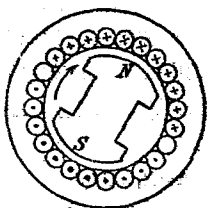


圖270. 電樞電流，較第269圖中後1/21週期。

在該瞬間之前後電流強度依正弦形曲線遞減。在第 269 圖中此情形經矢線明白表明。

在 1/12 週期之後，磁極輪占

如第 270 圖所示之位置，而電流亦以在極心前之槽中最強。在固定線內正弦形電流之分佈是以隨極輪同步旋轉——同步轉動電流¹⁾，故多相電流實為轉動電流。舉例比擬之，例如在一圓周裝燈一組，燈

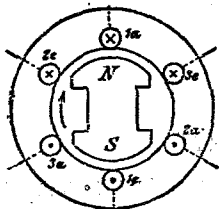


圖271. 三相繞組之電樞電流。

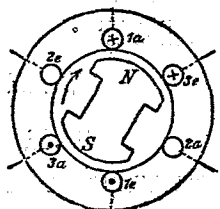


圖272. 電樞電流，較第271圖中後 1/2 週期。

¹⁾ 同步轉動電流; synchrone umlaufende Ströme; synchronously running current; courant marchant synchrone.

光之強度作正弦形分佈而此作正弦形分佈之光現象如在一廣告照明裝置中繞一圓周而旋轉。

實際以用三相線為限，蓋由此已能惹起極完善之作用。但在轉動換流機中用六線而在串聯換流機中用十二線。

第 271 圖示一雙極三相繞組。槽 $1a, 1c$ 或 $2a, 2c$ 或 $3a, 3c$ 分別屬於一線，線之始端以 a 其末端以 c 記明。三始端互以 $1/3$ 之圓周或在多極機中互以 $2/3$ 之極節距相隔。

三相線依同向而繞，申言之，槽內各始端均自後向前。又各端依記出之順序通過極心之前。三線分別導至三接線螺旋並可各帶等值之有效電流。

在極心前之一線帶最強電流 i_m ，在屬他線之鄰近圈邊內，電流皆同向，但磁場作正弦形分佈時其值僅等於 $i_m \sin 30^\circ = 0.5 i_m$ 。故帶最強電流之相線之圈邊其左右為帶有同向但僅一半強之電流之他線之圈邊所包圍。

在 $1/12$ 週期之後，第 2 線之圈邊依第 272 圖係在極之中間，故在該線內電壓及電流均等於零。其他二線各帶 $i_m \sin 60^\circ = 0.866 i_m$ 之電流。此時在一極之前有屬於兩線之二圈邊，其內通過等強並同向之電流。

再過 $1/12$ 週期，第 271 圖之情形復現出，然此時第 3 線帶最強電流。又在是處貫穿率亦隨磁場轉動，同時其值亦變動且不完全呈正弦形。

84. 三角接法及星形接法。

在第 271 圖及第 272 圖中之六導線可由三角接法¹⁾或星形接法²⁾減至三線，其中一導線恆為其他二線之回線。發電機中之相線依其電壓發生之順序亦以阿拉伯數字記明而電機之接線螺旋以羅馬數字記明

¹⁾三角接法; Dreieckschaltung; delta connection; connexion en triangle.

²⁾星形接法; Sternschaltung; delta connection; connexion en étoile.

Sta.

• 在接線圖(圖 275)中設矢
線以示電流及電壓之計算方向

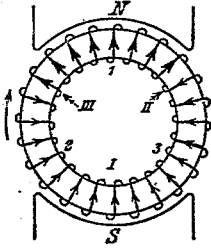


圖273. 在三角接法中一轉動環形
電樞之三相電流繞組。

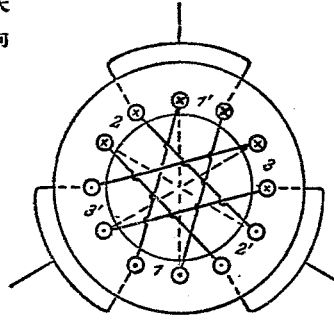


圖274. 在三角接法中一固定鼓形電
樞之三相電流繞組。

• 是種方向並不示電流及電壓在某一定瞬間之方向，但示電壓及電流認為正時之方向。是種矢線故為一種計算矢線。在同一之處大概僅用一矢線而無論其所指者為電流，壓耗，產電壓或反電壓。矢線固可任意選定但在三線中必須一致。在一不分歧之電路內矢線常依一方向連續。

在三角接法中，一相線之末端與次相線之始端相連接，故繞組自行閉合(圖273)。一直流繞組不問其呈環形或鼓形係在互以 120° 相距之三處與匯電環相連接，故是種繞組同時為一依三角而連接之三相電流繞組。第274圖示一發電機或電動機之鼓形繞組之三角接法。在圈邊1之左槽內，相線自後向前，其後成二匝隨着 $11'$ 線。在圈邊 $1'$ 之右槽內，線在後面連接與1相距 120° 之圈邊2，後者遂成為第二線之始端；此相線依同法與第3線相連接。外線路導線係接在每二線之連接點。

電壓波呈正弦形時，其三電壓互以 120° 移位而其總和等於零。故雖然繞組閉合，其內仍可不通電流。但若有諧波而此諧波之序數又可經3分盡者，則可惹起內電流。

在三角接法中二線路間之電壓(線路電壓¹⁾)等於一相線之路端

¹⁾線路電壓或網路電壓; Netzspannung; line voltage; tension du réseau.

電壓。茲以 U_{12} 表接線螺旋 1 及 2 間之電壓，其在外電路內自 1 向 2 之方向視作正方向（參考第 275 圖）。依同法又示電壓 U_{23} 及 U_{31} 之正計算方向。

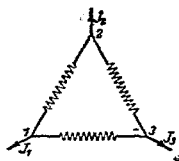


圖 275. 三角接法中之正計算方向。

今確定在外導線內之正計算方向。在發電機中此方向必為自發電機向外之方向（參考第 275 圖）。至在繞組內之正計算方向完全任意決定。最好完全廢除計算矢線而計算方向全憑腳注說明。例如在第 276 圖中

$$\vec{J}_2 = \vec{J}_{12} + \vec{J}_{32} = \vec{J}_{12} - \vec{J}_{23}$$

第 276 圖示諸輻線之差圖。其中三角形之隅角係順時針旋轉之方向編號，故當三角形繞正轉向例如繞重心旋轉時，1 在 2 之前而 2 在 3 之前。

在線路導線內之電流（總路電流¹⁾）係為一相線內之電流之 $\sqrt{3}$ 倍而與相連接之相線內之電流為 30° 及 150° 之位移。當該相線之電流各有 $i_m \sin 60^\circ$ 之值時，其值最大。

在星形接法中，三相線之始端連接成一星點而其末端則導至與外線路之接線螺旋。以 120° 相位移之電流之總和係等於零。例如電流與產電壓同相，則電流在一相線內最強而在其他二線內各有一半大之值（圖 277）。故若電流呈正弦形，由連接三相線電流之均衡不致擾亂。

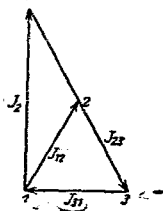


圖 276. 三角接法中之電流。

在星形接法中外導線內電流之強度及相均與相連接之線內之電流相同。恰如在三角接法中，自發電機向外導線流動之電流之方向為正計算方向（圖 278）。

至相線之電壓或星接電壓之正計算方向為自外向零點之方向。因此依第 279 圖外線路之電壓如下：

¹⁾ 線路電流或曰外電路電流；Netzstrom; line current; courant de ligne.

$$\vec{U}_{12} = \vec{U}_{10} + \vec{U}_{20} = 1 \angle 0^\circ - 1 \angle 120^\circ$$

線路電壓此時為相線電壓之 $\sqrt{3}$ 倍而與其他相線電壓分別成 30° 及 150° 之位移。當二星接電壓各等於 U_m

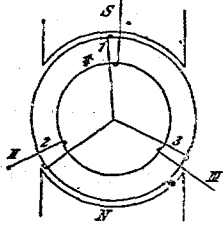


圖277. 星形接法。

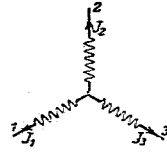


圖278. 星形接法

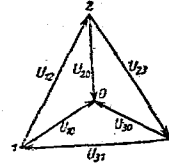


圖279. 星接電壓及外線路電壓。

$\sin 60^\circ = 0.866$ 時，外線路電壓達其最大值。

在高壓下輸電時，發電機及電動機以依星形連接為宜，蓋如是繞組每相之電壓較小而與線路電壓僅成 $1:1.73$ 之比。若插入燈羣以代

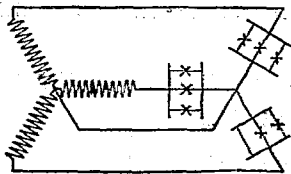


圖280. 帶零線之三相交流之分圖。

電動機，則依星形連接或三角連接均可。然如無特別設備，惟用三角接法時，線路間之燈數方可不等。

如於外線路作星形連接時亦欲使白熾燈所須之線路電壓之平衡不致因外線路間負載不等而被擾亂，則須依第280圖以一線連接發電機及外線路之二星點。

85. 三相交流之有效功率。

據第183面，一相線之功率之臨時值等於某一定平均值及一電流之雙頻率之正弦函數之總和。故當有對稱負載時，三相線之總功率之臨時值等於一相線之三次平均功率與三正弦函數之總和；後者之距離等於單頻率之 $1/3$ 週期及雙頻率之 $2/3$ 週期。由線示法不難指出此三正弦函數之和隨時等於零，故在各瞬間總功率等於一相線之三次平均值。

如不間接法，命一相線內之電壓等於 U_1 ，電流強度等於 I_1 而功率因數等於 $\cos \varphi$ 。又命 U 表線路電壓及 I 表線路電流。當各相線之負載相等時，總功率

$$N = 3 \times U_1 I_1 \cos \varphi. \quad (1)$$

在三角接法中， $U_1 = U$ 及 $I_1 = I/\sqrt{3}$ 。在星形接法中， $U_1 = U/\sqrt{3}$ 及 $I_1 = I$ 。準此，在二種接法中功率相等而為

$$N = \sqrt{3} U I \cos \varphi \quad (2)$$

今比較三相交流線及直流線中之損失。假定在同一外線路電壓及損失下由三相交流及直流分別輸功率 N 至等遠之處。若單獨一線之電阻等於 R ，橫斷面積等於 q ，全線之重等於 G 而其損失等於 V 。又命 g 表直流， d 表三相交流。於是

直流	三相交流
$N = U \times I$	$N = \sqrt{3} U I \cos \varphi$
$I = N : U$	$I = N : \sqrt{3} U \cos \varphi$
$V = 2I^2 R_g = 2N^2 R_g : U^2$	$V = 3I^2 R_d = N^2 R_d : U^2 \cos^2 \varphi$

若損失相等，則 $2R_g = R_d / \cos^2 \varphi$ 。又如長度不變，電阻與橫斷面積成反比而銅之總重量隨各線橫斷面積之總和而變，故

$$\frac{q_d}{q_g} = \frac{R_g}{R_d} = \frac{1}{2 \cos^2 \varphi}, \quad \text{即} \quad \frac{G_d}{G_g} = \frac{3q_d}{2q_g} = \frac{0.75}{\cos^2 \varphi}.$$

若 $\cos \varphi = 1$ ，則用三相交流導線時所須之銅僅等於用直流導線時之 75%。然因相之位移，一般之情形遂為不利。

今欲測定有效功率，為此須注意電流圈及電壓圈之記號俾可予偏轉以正當之記號而用於算式中。以下假定電源及電流圈之正接線螺旋均在左方而電壓圈之正接線螺旋則在上方。

1. 對稱電壓及對稱負載。

a) 一相線之功率之測定。設零點可達到，依第 281 圖測定一相線之功率 N_1 。

若零點不能達到，則依第 282 圖由三電阻構成一人工零點。若 R

表電壓圈之電阻，則當時之情形必須適合下列條件： $R_1 + R_2 = R_3$ ，電阻

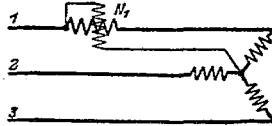


圖281. 一相線功率之量法。

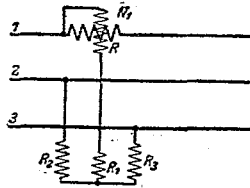


圖282. 人工零點。

R_1 當計算功率計之常數時須計及之。

在兩情形中總功率 $N = 3N_1$ 。

b) 電壓圈之換向。命 $\bar{u}\bar{j}$ 表 $UI \cos \varphi$ 之乘積並依據第 187 面設想總和之功率等於諸成分之功率之總和。依第 283 圖既然 $\bar{u}_{11} + \bar{u}_{12} = 3\bar{u}_{10}$ ，故

$$\bar{u}_{11}\bar{j}_1 + \bar{u}_{12}\bar{j}_1 = 3\bar{u}_{10}\bar{j}_1, \text{ 即據第 284 圖 } N = N'' + N^*.$$

若相差角大於 60° ，則向零點之 \bar{j}_1 線（與 \bar{u}_{10} 線同）與 \bar{u}_{11} 線成一鈍角（見第 283 圖）。故當第 284 圖中換向開關之柄位在左方時，功率計之偏轉係依反對方向。此後必須改換電壓圈之連接並將 N' 附以負號用於算式中。

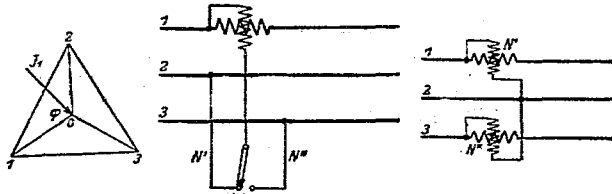


圖283. $\bar{u}_{12} + \bar{u}_{13} = 3\bar{u}_{10}$ 圖284. 電壓圈之換向。 圖285. 阿隆接法。

3. 非對稱電壓及非對稱負載。

a) 不帶零線之裝置。在阿隆接法（圖 285）中示關於任何曲線形之臨時值。因 $i_1 + i_2 + i_3 = 0$ ：

$$N_t = \bar{u}_{10}i_1 + \bar{u}_{20}i_2 + \bar{u}_{30}i_3 = \bar{u}_{10}i_1 - \bar{u}_{20}(i_1 + i_3) + \bar{u}_{30}i_3.$$

$$\text{今 } \bar{u}_{10} - \bar{u}_{20} = \bar{u}_{10} + \bar{u}_{02} = \bar{u}_{12}, \text{ 故 } N_t = \bar{u}_{12}i_1 + \bar{u}_{21}i_2.$$

準此，總功率之平均值依第 285 圖等於

$$N = N'' + N'.$$

若相差角大於 90° ，則依第 283 圖 \bar{J}_1 與 \bar{u}_2 間之角復為一鈍角，申言之，偏轉 N' 為負。此後亦須改變電壓圈之連接並將 N' 附以負號用於算式中。

若總功率為一負值，則此表示電能並非來自假定之一方面。功率計故為一能向指示器¹⁾。

設若祇有一功率計可用，則須將此計先依第 286 圖連接。讀後由變動三開關之位置再使其依第 287 圖連接

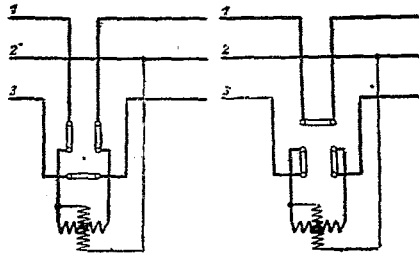


圖 286.

圖 287.

功率計之換向。

為欲由兩分功率確定總功率時免

去分別讀兩功率，則須用一由二單功率計所成之功率計，其可動的二線圈係在同一軸上，故若額及符號其轉矩互相增積。

b) 帶零線之裝置。在帶零線之裝置中，每相線之功率依第 281 圖分別測定。其總和即等於總功率。

86. 無功功率之測定²⁾。

無功功率或虛功率等於 $B = UI \sin \varphi$ 。設依第 288 圖以 90° 移後之等大電壓代替 U ，則 $B = U' I \cos \varphi'$ 。準此以觀，吾人故可用一計器測定無

¹⁾ 能向指示器; Energierichtungszeiger; energy direction indicator; indicateur de direction d'énergie. ²⁾ 無功功率之測定; Blindleistungsmessung; measurement of wattless or idle power; mesure de puissance réactive ou déwattée.

功功率，其中故意使電壓之電流移在欲測定之電壓 90° 之後，惟因其如是，當電壓與電流間有正相差角時，偏轉為正而有負相差角時偏轉為負。

用是種特種無功功率計¹⁾以測三相交流，其方法與測有效功率之方法同。然為量無功功率亦可應用普通功率計，惟須將其中之電壓圈接在一對稱三相交流系中之現成電壓上，後者落在欲測定之電壓 90° 之後，然此時又須知相之順序²⁾並於必要時預先確定之。為此依星形接法連接兩相等有效電阻 R 及一有感電阻 $L\omega$ (圖289)。如以三相交

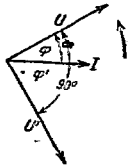


圖288. 量無功功率；

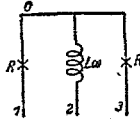


圖289. 轉動磁場方向指示器。

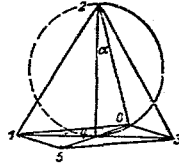


圖290. 電位圖。

流饋之，則星點之電位離開重心 (圖290)。今作三角形示其高度，於是

$$\bar{u}_{s0} = \bar{u}_{10} + \bar{u}_{20} = \bar{J}_1 R + \bar{J}_2 R = (\bar{J}_1 + \bar{J}_2) R = -\bar{J}_3 R.$$

一方面 $\bar{u}_{20} = j\bar{J}_2 L\omega$ 。故 $\bar{u}_{20} : \bar{u}_{s0} = -jL\omega/R$ ，申言之， \bar{u}_{20} 落在 \bar{u}_{s0} 之後 90° ，而星點之電位於 $L\omega$ 有各值時在 \bar{u}_{20} 之直徑上描出一圓。然 \bar{u}_{10} 既大於 \bar{u}_{20} ，故第 1 相線中之燈照明。在有 1 2 3 之相序時第 1 相線係在第 3 相線之後。凡燈之有落在他燈之後之相者，是以概照明。為使亮度之差極大起見，故意選定 $L\omega = R$ 。此時 $U_{20} = U_{s0}$ ，申言之， $\tan \alpha = 0.5$ 。

如以一容電器代電感係數，則當電容變動時，星點之電位在圓之虛線上移動。此時凡燈之有超在他燈之前之相者概照明。

¹⁾ 無功功率計；Blindleistungszeiger; wattless or idle power indicator; indicateur de puissance dévattée ou réactive. ²⁾ 相序；Phasenfolge; phase-sequence; suite de phases.

用普通功率計以測無功功率之方法在外線路電

壓對稱時如下：

1. 對稱負載。依第 291 圖無功功率

$$B = 3 U_{10} I_1 \sin\varphi = \sqrt{3} U_3 I_1 \cos\varphi. \quad (a)$$

今再按第 187 圖一總和之功率等於各成分之功率之和。故如命 $U \cos\varphi$ 等於 $\overline{u_j}$ ，則

$$B = \sqrt{3} \overline{u_{21} j_1} = \sqrt{3} (\overline{u_{13} j_1} - \overline{u_{12} j_1}). \quad (b) \quad \text{圖 291. 一電壓源.}$$

又據對稱理由 $\overline{u_{12} j_1} = \overline{u_{31} j_3}$ ，即

$$B = \sqrt{3} (\overline{u_{31} j_3} - \overline{u_{12} j_1}). \quad (c)$$

今 $\overline{u_j} = U \cos\varphi$ 之乘積可用一普通功率計測定。其時依方程式 (a) 圖 292 (弗蘭根費爾特接法¹⁾)， $B = \sqrt{3} N'$ ，或依方程式 (b) 由改變電壓圈之接法 (圖 284)，或終則依方程式 (c) 並依阿隆接法 (圖 285)。在後者二情形中

$$B = \sqrt{3} (N'' - N') \quad N = N' + N'' \quad \operatorname{tg}\varphi = \frac{\sqrt{3} (N'' - N')}{N'' + N'}$$

然應注意者，測無功功率之阿隆接法惟當有對稱負載時適用。

2. 非對稱負載。

a) 不帶零線之裝置。設命 $\overline{u_j}$ 表 $U \sin\varphi$ 並注意一總和之無功功率等於各成分之無功功率之和。因 $\overline{j_2} = -(\overline{j_1} + \overline{j_3})$ ，故由第 293 圖：

$$B = [\overline{u_{12} j_1}] + [\overline{u_{21} j_2}] + [\overline{u_{31} j_3}] = [\overline{u_{12} j_1}] + [\overline{u_{31} j_3}].$$

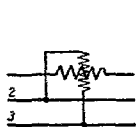


圖 292. $B = \sqrt{3} N'$.

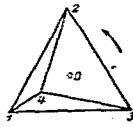


圖 293. 非對稱負載。

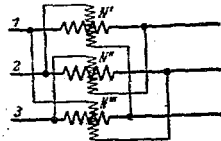


圖 294. $B = (N' + N'' + N''') : \sqrt{3}$.

如命 o 表電壓三角形之重心，則可以 90° 移後之電壓 $\sqrt{3} \overline{u_{o3}}$ 及 $\sqrt{3}$

¹⁾弗蘭根費爾特接法; Frankfield-Schaltung; Frankfield connection; connexion de Frankfield.

\bar{u}_{10} 代 \bar{u}_{12} 及 \bar{u}_{31} 並以餘弦代正弦。如照此循環代換：

$$B = \sqrt{3} (\bar{u}_{10}\bar{j}_3 + \bar{u}_{31}\bar{j}_1)$$

$$B = \sqrt{3} (\bar{u}_{20}\bar{j}_1 + \bar{u}_{01}\bar{j}_2)$$

$$B = \sqrt{3} (\bar{u}_{30}\bar{j}_2 + \bar{u}_{12}\bar{j}_3)$$

加積之，得 $B = (\bar{u}_{23}\bar{j}_1 + \bar{u}_{31}\bar{j}_2 + \bar{u}_{12}\bar{j}_3) : \sqrt{3}$ ，故得第294圖中示弗蘭根費爾特接法之三重化之接法。

b) 帶零線之裝置。是處三相線之無功率由應用特種無功率計分別量出而後求其總和。

87. 非對稱負載。

三相交流之線路之負載為非對稱時為確定電壓及電流應用斯坦梅賽地形法¹⁾。據是法線路之各點在圖面上由一定點表出而在兩點間所作之線指出線路兩點間之電壓之強度及相。

在第295圖中例如UVW三角形由測定線路接線螺旋U, V, W間之

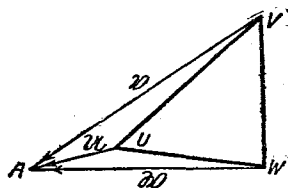


圖295. 電位圖。

電壓UV, VW及WU而決定。又A由測定線路接線螺旋與A間之電壓UA, VA及WA後決定。如在複算法中然，電壓須為呈正弦形的一種。此外復有另一種限制。就一般而言，因有交流磁通量穿過量線之環，電壓係與所測之徑

路有關。今假定穿過該環之交流通量極小而可忽略者，此時電壓與環之位置無關而可視作電位差。線路各點之電位此時由圖面上各點向帶零電位之任何一始點之線表明。

尋常往往以地球或以電力廠之星點電位為零。然當討論一特種電

¹⁾ 斯坦梅賽地形法；Steinmetzsche topographische Verfahren；Steinmetz topographic méthode；méthode topographique de Steinmetz.

位圖¹⁾時惟注意通達零電位之線之始點。是種在圖面上之始點此時直接表示線路相當點之電位。在電位圖中毋須確定一定之零點，但以通達任一想像零點之線代表電位而表出，是即表示電位圖與電壓圖之性質不同。

就實際而言，用電位算法以代電壓算法其意義無他惟以點算法²⁾代向量算法而已。一點之電位為從該點向有零電位之想像點而設之線。設在第296圖中 \bar{u} 及 \bar{v} 表接線螺旋U及V之電位，則從V向U之VU線依據第186面可由 $\nabla U = \bar{v} - \bar{u}$ 之方程式表示之。同樣，電壓 $UV = \bar{u} - \bar{v}$ 。

在AB二點間之電壓U，其自A向B而計算時為 $U_{AB} = \bar{A}B = \bar{A} - \bar{B}$ 其中 \bar{A} 及 \bar{B} 表對於一想像未知零壓點之電壓。其向零壓點而計算者為正電壓，其中毋須再用計算矢線。

又 U_{BA} 表從B向A而計算之電壓，而以 $U_{BA} = \bar{B}A = \bar{B} - \bar{A}$ 表示之。在第296圖中例如 $VP = 0.5VW$ ，申言之， $\bar{v} - \bar{P} = 0.5(\bar{v} - \bar{W})$ 或 $\bar{P} = 0.5(\bar{v} + \bar{W})$ ，故為求重心S之電位命

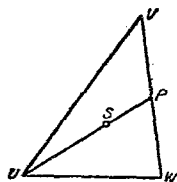


圖296. 電位圖。

$US = 2/3 \times UP$ 或 $\bar{u} - \bar{S} = 2/3 \times (\bar{u} - \bar{P}) = [\bar{u} - 0.5(\bar{v} + \bar{W})] \times 3/3$ 。由是，恰如在點算法中，重心之電位 \bar{S} 為

$$\bar{S} = (\bar{u} + \bar{v} + \bar{W}) : 3. \tag{a}$$

在電位圖中，線不許平行移位，故與在電壓圖中不同。

在第297圖中命 y_1, y_2 及 y_3 表一三相交流連接中三相線之電導。接線螺旋之電位，申言之，命向一想像未知零電位點之線為 $\bar{P}_1, \bar{P}_2, \bar{P}_3$ 。求星點之電位 \bar{P}_4 。今得

$$\bar{J}_1 = (\bar{P}_1 - \bar{P}_4) \bar{y}_1 \quad \bar{J}_2 = (\bar{P}_2 - \bar{P}_4) \bar{y}_2 \quad \bar{J}_3 = (\bar{P}_3 - \bar{P}_4) \bar{y}_3. \tag{3}$$

三電流之總和既等於零，故

¹⁾電位圖；Potentialbild；potential diagram；diagramme de potentiel.

²⁾點算法；Punktrechnung.

$$\bar{P}_4 = \frac{\bar{P}_1 Y_1 + \bar{P}_2 Y_2 + \bar{P}_3 Y_3}{Y_1 + Y_2 + Y_3} \quad (4)$$

此式不過為依第 166 面之一線路之節方程式。設令任意一點例如 \bar{P}_1 之電位為零，則可使電位方程式變為電壓方程式，並由是使其益為簡單。於是其餘之電位變為對於點 1 之電壓，及得

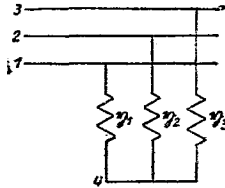


圖 297. 非對稱負載。

$$\bar{u}_{41} = \frac{\bar{u}_{21} Y_2 + \bar{u}_{31} Y_3}{Y_1 + Y_2 + Y_3} \quad \text{或} \quad \bar{u}_{41} = \frac{\bar{u}_{12} Y_2 + \bar{u}_{13} Y_3}{Y_1 + Y_2 + Y_3} \quad (5)$$

今可依算法或依較妥之圖法（第 298 及 299 圖）進行。假定電位 1, 2, 3 係由測得之 \bar{u}_{12} , \bar{u}_{13} 及 \bar{u}_{23} 電壓所成之三角形表明。又假定電導依量及相角表明。四線間之比既恆示二相似三角形，故依據第 5 方程式，三角形 159 與三角形 ABC 相似，而三角形 163 與

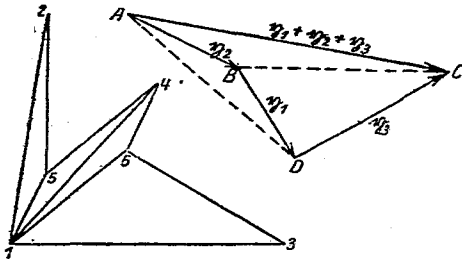


圖 298 及 299. 依圖法確定負載星點之電位。

三角形 CDA 相似。1 5 及 1 6 之總和為 1 4。此總和依第 5 方程式決定 \bar{u}_{41} 線及同時點 4，後者表星點之電位。由第 3 方程式乃得電流之量及相。

有對稱負載時， $\bar{Y}_1 = \bar{Y}_2 = \bar{Y}_3$ ，故依第 5 方程式： $\bar{u}_{41} = (\bar{u}_{12} + \bar{u}_{13})/3$ 。星點 4 之電位是以在重心 S。第 1 相線成捷路時， $\bar{Y}_1 = \infty$ 而星點 4 之電位與 1 相符合。

今欲假定有非對稱負載¹⁾ 時星點 4 之電位描一軌跡。

¹⁾ 非對稱負載；unsymmetrische Belastung；unsymmetrical load；charge dissymétrique。

1. 各相線當初含有帶相角 γ 之等電導 \bar{y} ，以後在第一相線中與 \bar{y} 並行插入帶固定相角 δ 但可變之電導 \bar{y}' 。此時依第5方程式

$$\bar{u}_{11} = \frac{(\bar{u}_{12} + \bar{u}_{13})\bar{y}}{3\bar{y} + \bar{y}'} \quad (6)$$

依第216面，點4之軌跡為一通過重心S及點1之圓。從S作一切線。此線以 $\delta - \gamma$ 角超在S1之前並示正旋轉方向。依此方向 \bar{y}' 之量自0增至 $+\infty$ 。

今命 \bar{y} 表有感無功電導，故依據第216面等於 $-j/L\omega$ 及 \bar{y}' 表一有效電導。此時 \bar{y} 之相角為 $\gamma = -\pi/2$ 及 \bar{y}' 之相角為 $\delta = 0$ 。在S之切線依據第216面以 $\delta - \gamma = \pi/2$ 之角超在S1之前，申言之，S1為直徑。由變動並聯有效電導得星點電位之軌跡。此軌跡為一圓（見第300圖）。此情形與由三單相變壓器接成之三相變壓器相同，其原線圈及副線圈均成星形連接而其中僅有一相線帶無感負載。由是可分明察見星接電壓隨負載之變動。在此情形中負載並不指示一種顯著電流之導出而此可在第107節中明之。

如 \bar{y} 純為一電容無功電導 $jC\omega$ ，故有 $\gamma = \pi/2$ 之相角及 \bar{y}' 為一純粹有效電導，則在同一徑路上得一由虛線表示之圓（第300圖）。此情形與一由相線扭成之電纜相當，其套接地，故導線與地之間由一電容電導相連接，而導線1則另由接地之捷路與地相連接。地之捷路愈短時在虛線圓上星點之電位自S向1之移動愈甚。

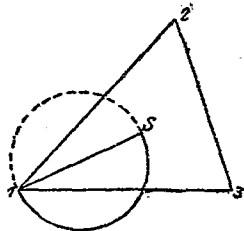


圖300. 一變壓器單方面之負載；或一電纜單方面之接地。

2. 各電導均有等大相角。 \bar{y}_1 及 \bar{y}_2 假定固定而 \bar{y}_3 則依其量而變動。於是依據第216面第5方程式示星點電位之點4係在一直線上。

$\bar{y}_3 = 0$ 時，依據方程式5電位係在A點，後者依 $1A:1B = \bar{y}_2:(\bar{y}_1 + \bar{y}_2)$ 之比例區分線 \bar{u}_{12} （圖301）。

$y_2 = \infty$ 時，依據方程式5, $\bar{u}_1 = \bar{u}_3$, 申言之，星點4之電位與3相符合。故如 \bar{y}_2 自0向 ∞ 變動，則表星點電位之一點自A向3移動。

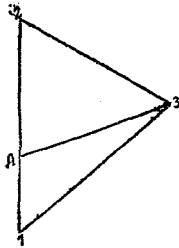


圖301. 有等相角及可變量之 \bar{y}_2 之電位圖。

當三電導共為有效值或共為有感無功值或共為電容無功值時即發生此情形，例如就同心電纜而言，當其導線對於成星點之套或對於地具有不同電容時即呈此情形。

然此說明對於電導一部分為有感無功電導而一部分為電容無功電導時亦適用。其時感應電導為負。在通過1及2之直線上之A點於是可在1或2之一側以代在1與2之間。又在3A直線上示星點電位之點4亦可在3或A之一側以代在3與A之間。

負載例如為一無載變壓器之負載。無載時之有感電阻為 x_0 。導線1或許在變壓器附近斷折而接在變壓器上之一端，或許落至地面（圖302）。此時變壓器之接線螺旋1'與導線1之間僅有一種經在1及地間之磁場容阻 x_c 聯絡。此時依第297圖在第5方程式中 $\bar{y}_2 = \bar{y}_3 = -j/x_0$ 及 $\bar{y}_1 = -j/(x_0 + x_c)$ 。且依第204面 x_c 有一負數值。於是依據第5方程式。

$$\bar{u}_{11} = \frac{(\bar{u}_2 + \bar{u}_3) \times 1/x_0}{2/x_0 + 1/(x_0 + x_c)} = \frac{(\bar{u}_2 + \bar{u}_3)(x_0 + x_c)}{3x_0 + 2x_c} \quad (b)$$

設命 $x_c = -3x_0$ 。於是 $\bar{u}_{11} = (\bar{u}_2 + \bar{u}_3) \times 2/3$ 。故在第303圖中

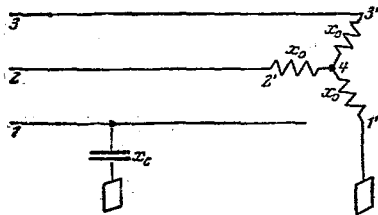


圖302. 網格轉覆之原因。

點4當表變壓器星點之電位。今依第302圖

$$\bar{u}_{11}' : \bar{u}_{11} = x_c : (x_c + x_0)$$

然在是處此比例等於3:2。於是第303圖

得接線螺¹⁾之電位。故在變壓器中有完全對稱之路端電壓。但相線之順序則變，申言之，電壓三角形呈扁坦形。由是乃成所謂網格之轉覆²⁾，其時電動機依倒向轉動。

如 $x_c = -1.5x_0$ ，則 \bar{u}_0 在方程式 b 中等於 ∞ (共振!)。將發生共振時，過高電壓能危害裝置。

今論非對稱負載作三角形連接時電流分佈之情形。在此情形中，為確定電流之分佈，將三角形連接改為星形連接，但不使接線螺旋之電位變動。為此依第166面第10方程式用將第304圖中之星形改為三角形(圖305)之方程式：

$$\bar{y}_{12} = \frac{\bar{y}_1 \bar{y}_2}{\bar{y}_1 + \bar{y}_2 + \bar{y}_3} \quad \bar{y}_{13} = \frac{\bar{y}_1 \bar{y}_3}{\bar{y}_1 + \bar{y}_2 + \bar{y}_3} \quad \bar{y}_{23} = \frac{\bar{y}_2 \bar{y}_3}{\bar{y}_1 + \bar{y}_2 + \bar{y}_3}$$

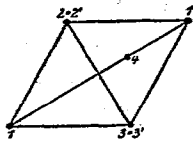


圖303. 線路之轉覆。

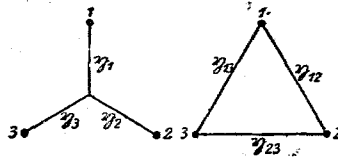


圖304及305. 星形變為三角形之變動。

今由利用上列方程式求得 $\bar{y}_{12} \times \bar{y}_{13} / \bar{y}_{23}$ 之值並再加 $y_{12} y_{13}$ ，於是得根納利方程式³⁾：

$$\bar{y}_1 = \bar{y}_{12} + \bar{y}_{13} + \bar{y}_{12} \bar{y}_{13} / \bar{y}_{23} \text{ 等。} \quad (7)$$

吾人故可以星形代三角形並依第3或第5方程式進行。至二接線螺旋間之電阻不因三角形變星形或反是而變動。

如在外線路上有若干成星形連接之三相非對稱負載，則因零點一般既無同一電位必須先將其改為若干三角連接而後綜合之使成爲一三角形。此後復使該三角形變爲星形並依第3或第5方程式進行。

¹⁾網格之轉覆；Kippen des Netzes; tipping of network. ²⁾根納利方程式；Kenellysche Gleichung; Kenelly's equation; equation de Kenelly.

88. 一非對稱三相交流系變為對稱系之分解。

若三相交流三相線之負載不等，則電壓損失亦不等，因而耗電器之電壓不對稱。此時耗電器接線螺旋之電位圖不再為等邊三角形，吾人可將此非對稱系依據斯多克維斯¹⁾之方法分解而為有相反相序之二對稱系。命一非對稱系之線路電壓為A, B, C (圖306)。

又命 $\alpha = 2\pi/3$ 並設想C及A各分解而為二成分，俾適合下列之條件：

$$C = M + G, \quad A = Me^{-j\alpha} + Ge^{j\alpha}.$$

既然 $A + B + C = 0$ 及互以 $\alpha = 2\pi/3$ 移位之三線之總和等於零，故方

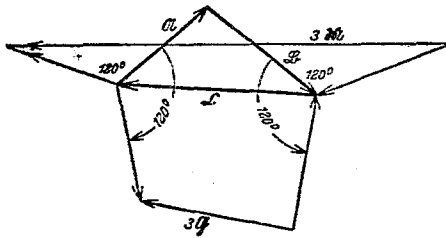


圖306. 非對稱系變為對稱系之分解。

程式 $B = Me^{j\alpha} + Ge^{-j\alpha}$ 亦有效。此時含M者之成分表同向對稱系而含G者之成分表反向對稱系。

為確定M, 以 $\epsilon^{j\alpha}$ 乘關於A之方

程式並以 $\epsilon^{-j\alpha}$ 乘關於B之方程式，再將二者加於C。今互以 $2\alpha = 4\pi/3$ 移位之三線之總和既等於零，故由是乃得下列方程式

$$C + Ae^{j\alpha} + Be^{-j\alpha} = 3M.$$

在第306圖中故須令A及B向外成 120° 之角並令二者加於C上，如是乃得所求之值 $3M$ 。如依同法令A及B向內成 120° 之角並加於C上，則得G之三倍值。

反向電壓系在電動機中惹起一種反轉動子轉向而轉動之轉動磁場，其結果故為一種反向轉矩及增加頗巨之鐵耗及銅耗。

¹⁾斯多克維斯；Stokvis.

89. 三相交流導線之電感係數.

恰如以前在第56面中所討論之電感電感係數並非指一單線之電感係數，但指一迴線之電感係數。是種迴線除始末二部之連接外——其影響可忽略之——或含有二導線或一導線及地或一導線及一插在始末間之電壓計之量線。

設一迴線含有長，直而圓之兩導線。線長為 l ，其半徑為 r 而線間之距離為 d 。此時由在二線間之磁場在空中惹起之電感係數依據第56面第20方程式為

$$L_1 = \frac{\mu_0}{\pi} l \times \text{對數} \frac{d}{r} \times \frac{1}{0.4343} \quad (a)$$

如已在第56面中說明，此外復有在導線內之磁場惹起之電感係數。為確定此值，乃應用電流強度為 1 安之通量連接。在是處此種連接不能如前時再視為通量與線匝之連接但必須視為在第56面簡單情形中亦適用之通量與電流之一般的連接。為真確起用，是處電感係數亦從磁能導出。

假定在全部導線橫斷面積內有均勻電流密度。當電流強度為 1 時，依第307圖在有 x 半徑之圓內之貫穿率當等於 $1 \times x^2/r^2$ 。若命 h 表在圓周單位長之激發強度，則依據貫穿定律

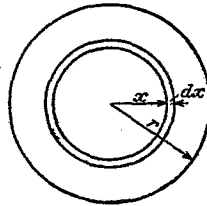


圖307. 導線橫斷面積

$$h \cdot 2x\pi = I \times x^2/r^2, \quad \text{即 } h = Ix/2\pi r^2.$$

此時在圓周之感應強度

$$\mathcal{H} = \mu h = \mu \times Ix/2\pi r^2 \quad (b)$$

通過 dx 寬及長之面積內之量通

$$d\Phi = \mathcal{H} dx = \mu \times Ix dx/2\pi r^2.$$

此通量與其包圍之電流之連接此時為 $d\Phi I x^2/r^2$ ，而一導線之總通量連環為

$$\int_0^r \frac{d\Phi \times I_x^2}{r^2} = \int_0^r \frac{\Pi \times I^2 x^3 dx}{2\pi r^4} = \frac{\Pi \times I^2}{8\pi} l^3.$$

因有來回線故須以2乘之並以 l^2 分之。由是得電感係數

$$L_2 = \frac{\Pi l}{4\pi}. \quad (c)$$

就銅及其他非磁性金屬而言， $\Pi = \Pi_0 = 4\pi \times 10^{-9}$ 亨/厘米。故在有1仟米 = 10^5 厘米長之銅線中

$$L_2 = \frac{4\pi \times 10^{-9} \times 10^5}{4\pi} = 10^{-4} \text{亨}.$$

如藉磁能亦得同一結果。在長 l ，半徑 x 及厚 dx 之一空筒內當有 Π 導磁係數時依第61面其磁能為

$$dW = \frac{\Pi^2}{2\Pi} 2\pi x \times l dx,$$

由應用方程式(b)得

$$dW = \frac{\Pi \times I^2 x^3 dx}{4\pi r^4}$$

或在0與 r 之間積算之，並因有來回線以2相乘積，則得

$$W = \frac{\Pi \times I^2 l}{8\pi}.$$

今據第61面，能等於 $0.5L_2 I^2$ 。故由等比較此二方程式

得 $L_2 = \Pi \times l / 4\pi$ 。

總電感係數遂為

$$L_a = L_1 + L_2 = \frac{l}{4\pi} = (4\Pi_0 \times \text{對數} \frac{d}{r} \times \frac{1}{0.4743} + \Pi). \quad (8)$$

如 l 以厘米計及 Π 與 Π_0 以亨/厘米計，則得 L_a 以亨計。

磁場在導線內惹起自感應以致假定之平均密度為之擾亂而在導線內部電流密度過分減小（皮膚作用¹⁾）。然在強電工程中因頻率不大

¹⁾ 皮膚作用；Hautwirkung, Stromverdrangung; skineffekt; skin effect; effet Kelvin.

，此點並無重要關係。

今欲計算第308圖中a及b二迴線間之互感係數。迴線a帶有單位強度之直流，後者循導線2流去而後循導線3流來。穿過迴線a之通量又

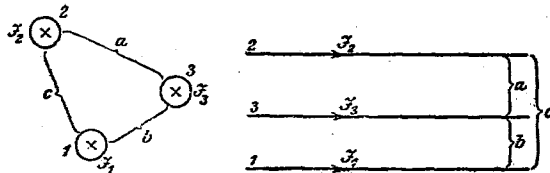


圖308. 非對稱三相交流導線。

透過迴線b及c。據是，依第8方程式而計算之自感係數 L_a 等於互感係數 M_{ab} 及 M_{ac} 。由循環交換，關於其他迴線亦得相同關係。如 $L_a = M_{ab} + M_{ac}$, $L_b = M_{ba} + M_{bc}$, $L_c = M_{ca} + M_{cb}$ 。由是得

$$M_{ab} = 0.5(L_a + L_b - L_c). \quad (9)$$

依此方法，互感係數可由自感係數表示之。

今於第1導線之始末二端間連接一電壓計以測三相交流之電壓。如為簡單起見，假定一導線之有效電阻等於零，則由電壓計所測定者僅為一種感應電壓。在第309圖中0表量線，其直接與導線1及由發電機及負載之相線間接與導線2及3所成之迴線為 α, β 及 γ 。今依第308圖認定三線中正電流方向為自始點向末點。次選定關於 α, β 及 γ 迴線之正轉動方向，即在 α 或 1, 0 迴線中依正電流 J_1 ，在 β 或 2, 0 迴線中依正電流 J_2 而在 γ 或 3, 0 迴線中依正電流 J_3 。故各電流其方向與此方向相反或其通量依與一正轉動電流之通量相反之方向穿過迴線者均為負電流。

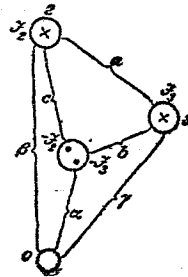


圖309. 二迴線內電流之復原。

今假定並無中線。於是 $\bar{J}_1 = -\bar{J}_2 - \bar{J}_3$ 。故依第309圖又可假定迴線 α 不帶電而迴線 β 及 γ 有電流 \bar{J}_2 及 \bar{J}_3 通過。在最迴線 α 內之有感壓耗於是全為 β 迴線對於量迴線 α 之互感而惹起。是處測得之電壓當有 ω 角速度並順及符號定則

時爲 $\bar{v}_\alpha = -jM_{c\alpha}\omega\bar{J}_2 - jM_{h\alpha}\omega\bar{J}_3$.

依據第9方程式互感係數可由自感係數表示，即依第309圖

$$M_{0\alpha} = 0.5(L_c + L_\alpha - L_\beta) \quad M_{h\alpha} = 0.5(L_b + L_\alpha - L_\gamma).$$

如以 $(-\bar{J}_2 - \bar{J}_3)L_\alpha = J_1L_\alpha$ ，則得

$$\bar{v}_\alpha = -j0.5\omega(L_c\bar{J}_2 + L_b\bar{J}_3) + j0.5\omega(\bar{J}_1L_\alpha + \bar{J}_2L_\beta + \bar{J}_3L_\gamma). \quad (10)$$

測得之電壓故與 α, β 及 γ 迴線之感應係數，申言之，與量線之位置有關。量線位置不同時，測得之電壓亦不同。職是之故，交流場中之電位差不能一概言之。 v_α 故又非爲一導線內之壓耗但爲在由導線及量線所成之迴線內之感應壓耗。

如量線之位置離導線夠遠者，則 $L_\alpha = L_\beta = L_\gamma$ 。今三電流之總和既等於零，故第10方程式之末項消滅，於是得

$$\bar{v}_\alpha = -j0.5\omega(L_c\bar{J}_2 + L_b\bar{J}_3). \quad (11)$$

由循環交換亦得關於 \bar{v}_β 及 \bar{v}_γ 之相同方程式。

在一對稱導線中， $L_a = L_b = L_c$ 。此時 $0.5L_a$ 曰工作感應係數或線路感應係數¹⁾ 而係以 L 表之。三電流之總和既等於零，故依據第11方程式 $\bar{v}_\alpha = jL \times \omega\bar{J}_1$ $\bar{v}_\beta = jL \times \omega\bar{J}_2$ $\bar{v}_\gamma = jL \times \omega\bar{J}_3$ 。 (12)

當發電機之星點接地而負載之星點依據第310圖由一電壓計(此計測得電壓 \bar{u}_0) 亦接地時，量線離開導線已夠遠。

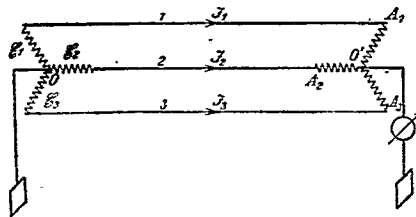


圖310. 星零點間之電壓(經過地)。

今命 \bar{z}_1, \bar{z}_2 及 \bar{z}_3 表三相線在零點之阻抗，其中包括發電機之阻抗，一導線之有效阻及有負載之相線之阻抗。又如命 E_1, E_2 及 E_3 依

¹⁾ 工作感應係數或線路感應係數；Betriebsinduktivität; working or circuit inductance; inductance de service.

量及相由發電機發生之電壓，則由第11或12方程式得

$$\begin{aligned} \vec{E}_1 &= \vec{J}_1 z_1 + \vec{v}_\alpha + \vec{u}_0 & \vec{E}_3 &= \vec{J}_3 z_3 + \vec{v}_\gamma + \vec{u}_0 \\ \vec{E}_2 &= \vec{J}_2 z_2 + \vec{v}_\beta + \vec{u}_0 & 0 &= \vec{J}_1 + \vec{J}_2 + \vec{J}_3 \end{aligned}$$

由聯合此四方程式及第11, 12二方程式可計算 $\vec{u}_0, \vec{J}_1, \vec{J}_2$ 及 \vec{J}_3 以及依

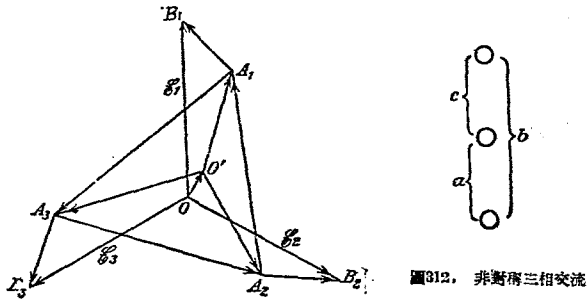


圖311. 負載之星電壓之確定。



圖312. 非對稱三相交流導線。

量及相之壓降並作第311圖。其中 A_1B_1 表發電機內第 1 線之有效電阻內之內壓耗與感應壓耗 \vec{v}_α 之總和， OO 表等於算得之電壓 \vec{u}_0 。此時當表有負載之第 1 相線之星電壓。其他二負載相線之星電壓為 $O'A_2$ 及 $O'A_3$ 。故 A_2A_1, A_3A_2 及 A_1A_3 表負載上之連環電壓。

\vec{u}_0 隨量線之位置而異，此實為一奇異之事。 O', A_1, A_2 及 A_3 各點之位置祇經一常數決定，而後者由第10方程式之第二項表示之。然如 O', A_1, A_2, A_3 依同向作等大之移位，負載電壓不致變動。

因三相線有近於相等之負載，星點間之電壓概可認有零值並由電流及藉第11或第12方程式以確定負載上之電壓。用此法之所以較為適當者因實際電壓不用阻抗但用電流計算。

舉例言之，在第312圖中銅線之長 $l=20$ 千米，線之半徑 $r=0.2$ 厘米，即與 a 及 c 二迴線之距離 d 等於30厘米，而與迴線 b 之距離等於60厘米。第344面第3方程式及由第7面第3方程式得

$$L_a = L_c = 0.042 \text{ 亨} \quad L_b = 0.0476 \text{ 亨} \quad R = 27.2 \text{ 歐} \cdot$$

又假定線路電壓為 10000 伏，故星電壓為 $10000/\sqrt{3} = 5800$ 伏。

由電力廠供給之功率
為 432 仟瓦，其功率
因數 $\cos\varphi = 0.8$ 而頻
率 $f = 50$ 赫。當有均
勻負載時各線之電流
強度

$$I = \frac{432000}{\sqrt{3} \times 10000 \times 0.8} \\ = 31.25 \text{ 安} \cdot$$

經導線之非對稱
惹起之弱度不均勻此
處略去不計。次依第

11 方程式確定壓耗。又為顧及負符號及與 j 之相乘，任壓耗之成分落在惹起該成分之電流之後 90° 。

今命 OD_1, OD_2, OD_3 (圖 313) 表電力廠之星電壓及 $\bar{J}_1, \bar{J}_2, \bar{J}_3$ 表以 φ 角移後之電流。關於迴線 α ，從電壓 OD_1 與第 11 方程式相當減去下列各線：

依電流 \bar{J}_1 之方向： $C_1 D_1 = J_1 R = 850$ 伏

移在 \bar{J}_2 之後 90° ： $B_1 C_1 = 0.5\omega \times L_c \quad J_2 = 206$ 伏

移在 \bar{J}_3 之後 90° ： $A_1 B_1 = 0.5\omega \times L_b \quad J_3 = 233$ 伏。

終則得負載之星電壓 OA_1 ——設若不計零點間之小電壓。為清楚起見，在第 313 圖中線表示三倍大之壓耗。

依同法得其他二星電壓。總壓耗 $A_1 C_1$ 及 $A_2 C_2$ 不再正移在電流 \bar{J}_1 及 \bar{J}_2 之前 90° 。在實際情形中，導線之非對稱可以略去，此非對稱且可由扭轉完全消滅。

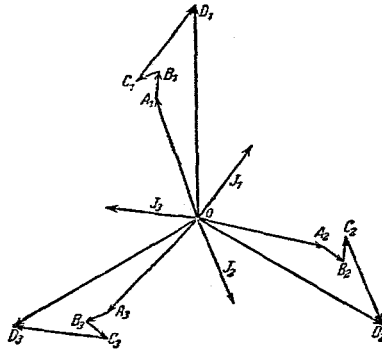


圖 313. 三相交流導線之壓耗。

90. 三相交流線¹⁾之電容.

今先算一對稱三相交流架空線之電容。線之半徑為 r 而其距離為 a 。在第 314 圖中設導線對於地面之像。如導線離地面之距離極大，故一線與任何像之距離可命為 d 。若命一長單位之電荷為 q_1 ，則在第 1 導線表面經 $11'$, $22'$ 及 $33'$ 三迴線之作用惹起之電位依第 77 面第 8 方程式為

$$P_1 = \frac{1}{2\pi\Delta_0} \left(q_1 \text{對數} \frac{d}{r} + q_2 \text{對數} \frac{d}{a} + q_3 \text{對數} \frac{d}{a} \right) \times \frac{1}{0.4343}$$

依同法得電位 P_2 及 P_3 。此電位無非為對於地之電壓或當電力廠之零點接地時表星電壓，後者之總和當電壓呈正弦曲線時係等於零。由 $P_1 + P_2 + P_3 = 0$ 得 $q_1 + q_2 + q_3 = 0$ ，申言之， $q_2 + q_3 = -q_1$ 。上面關於 P_1 之方程式因而變為次式

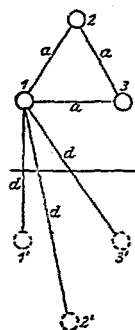
$$P_1 = \frac{q_1}{2\pi\Delta_0} \left(\text{對數} \frac{a}{r} \times \frac{1}{0.4343} \right)$$

一長單位之電荷與星電壓之比所謂一長單位 (圖 314. 對稱架空線.)

之工作電容 C^3 為 $q_1 : P_1$ ，即
$$C^3 = \frac{2\pi\Delta_0}{\text{對數} \frac{a}{r}} \times 0.4343 \quad (13)$$

當 $\Delta_0 = 8.84 \times 10^{-14}$ 法/厘米時，電容當以法/厘米計。1 仟米長之電容當大 10^8 倍。依第 80 面第 14 方程式此電容為有 r 半徑及 a 線距之一單相導線之電容之二倍。就一般言，架空線中電容之影響不大而由其惹起之移前電流惟當無負載時由其所惹起之電壓上昇而顯出。

今計算一三相交流電纜²⁾ (圖 315) 之電容。命 r 表導線之半徑， R 金屬套之內半徑及 a 導線中心與電纜中心之距離。一長單位之電荷假定為 q 。從導線表面發出之電通量設想從導線中心發出而與架空線相



¹⁾ 三相交流線；Drehstromleitung；three phase mains；réseau triphasé.

²⁾ 三相交流電纜；Drehstromkabel；three phase cable；cable triphasé.

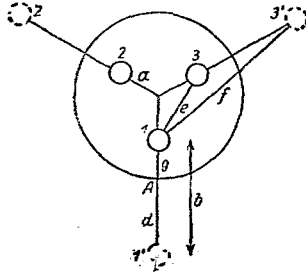


圖315. 三相交流電流電流。

較此實為一缺點。

外面之套成爲 $-q_1, -q_2$ 及 $-q_3$ 三電荷之等位面。是種電荷可由 $1', 2'$ 及 $3'$ 三電軸之等大電荷代替之。設電軸依第 7^2 面有一定位置，俾 $q_1(a+b) = R^2$ ，則成爲無套之之三迴線於一均一介質內。依據第 7^1 面第 8 方程式，在此迴線之場內第 1 導線表面之電位

$$P_1 = (q_1 \text{對數 } b/r + q_2 \text{對數 } e_1 + q_3 \text{對數 } f/e) \times \frac{1}{0.4343} \cdot 2\pi \Delta.$$

依同法得表示套之電位之方程式

$$P_A = (q_1 \text{對數 } d/g + q_2 \text{對數 } d/g + q_3 \text{對數 } d/g) \times \frac{1}{0.4343} \cdot 2\pi \Delta.$$

$P_1 - P_A$ 之差表第 1 導線與 A 間之電壓而當套接地時表第 1 三相交流相

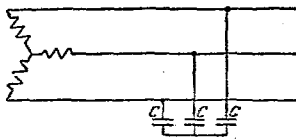


圖316. 代換接法。

線之星電壓 u_1 。依同法又可得其他二相線之星電壓。當有正弦電壓曲線時，電壓之總和等於零。由是得

$$q_1 + q_2 + q_3 = 0, \text{ 即 } q_2 + q_3 = -q_1.$$

今將此值導入於表 P_1 及 P_A 之方程式內並求一長單位之工作電容

C' ，後者視爲電荷 q 與星電壓 $P_1 - P_A$ 之比

$$C' = \frac{2\pi \Delta}{\text{對數} \frac{b \times e}{r \times f}} \times 0.4343 \quad (14)$$

由導入介質常數 ϵ ：則得 $\Delta = \epsilon \Delta_0 = \epsilon \times 8.84 \times 10^{-14}$ 法/厘米而此時 C' 遂表 1 厘米之電容。其 10^5 倍當表 1 仟米之電容。電容可由成星形連接並各具工作電容之三容電器表出之。

第十六章 瞬間現象¹⁾及瞬間波²⁾

91. 瞬間現象.

以上均假定在電路內有一均勻穩定狀態。今須檢討在電路內之變化與穩定狀態間之過渡狀態。電感及電容應互相分離並各表在一定點之值。命*i*及*q*分別表電流及電荷之時值，*i_d*及*q_d*表其永久值³⁾，後者當穩定狀態將實現時在過渡時間之一瞬間發生。又命*i_f*及*q_f*表自由電流⁴⁾及自由電荷⁵⁾，其與永久值之和即為實有值。是以

$$i = i_d + i_f, \quad (1) \quad q = q_d + q_f, \quad (2)$$

若在電路內祇含有串聯之電阻*R*及電感*L*，則在各瞬間之電壓依據第199面第1方程式為 $u = i \times R + L \times di/dt$ 或 $u = i_d R + L di_d/dt + i_f \times R + L di_f/dt$ 。

今由測定永久電流之電壓為 $u = i_d R + L di_d/dt$ 。故

$$i_f R + L di_f/dt = 0$$

今求 di_f/i_f 並積分之，再命其常數等於一對數 $K \times \frac{1}{0.4343}$ 。據是

得

$$\int \frac{di_f}{i_f} = -\frac{R}{L}t = (\text{對數}_f - \text{對數}K) \times \frac{1}{0.4343} \quad \text{即 } i_f = K e^{-\frac{R}{L}t} \quad (3)$$

R/L 謂之阻尼因數⁶⁾ 而 L/R 謂之時間常數⁷⁾。如加自由電流於由第3方程式導出之永久電流則得實有電流。從在 $t=0$ 時間之實有電流乃確定常數 K 。

1) 瞬間現象; Ausgleichvorgang; transient phenomena; phénomène transitoire. 2) 瞬間波; Wanderwelle; transient wave; onde transitoire. 3) 永久值; Dauerwerte; permanent value; valeur permanente. 4) 自由電流; freier Strom; free current; courant libre. 5) 自由電荷; freie Ladung; free charge; charge libre. 6) 阻尼因數; Dämpfungsfaktor; damping factor; facteur d'amortissement. 7) 時間常數; Zeitkonstante; time constant; constante de temps.

設在電路內含有串聯之電阻 R 及電容 C ，則依據第204面 $u = iR + \int di/dt \cdot C$ 。此方程式既可單獨由永久電流 i_d 決定，故若代以自由電流則 $i_f R + \int i_f dt/C = 0$ 。若命 $i_f = dq_f/dt$ ，則如以上相同得

$$q_f + RCdq_f/dt = 0, \quad \text{即 } q_f = K e^{-\frac{t}{RC}} \quad (4)$$

阻尼因數為 $1/RC$ 。設加由第4方程式之自由電荷 q_f 於已知之永久電荷，則得實有電荷。由在 $t=0$ 時之電荷乃確定常數 K 。

設在電路內含有串聯之電阻，電感及電容，則依據第204面 $u = iR + Ldi/dt + \int idt/C$ 。此方程式既復可單獨由永久電流決定，故若代以自由電流，則 $i_f R + Ldi_f/dt + \int i_f dt/C = 0$ 。若命 $\int i_f dt = q_f$ ，則得

$$Rdq_f/dt + La^2q_f/dt^2 + q_f/C = 0. \quad (5)$$

此方程式依據 $R^2 : 4L/C$ 之比例可有種種解法。在是處則就 R^2 小於 $4L/C$ 之情形而解。為此依據容易經微分證明之學理由應用以後仍須確定之二常數 A 及 α 得

$$q_f = e^{-at} A \sin(bt + \alpha). \quad (6)$$

其中

$$a = R/2L \quad b = \sqrt{4L/C - R^2} : 2L.$$

α 為阻尼因數。今由第6方程式

$$i_f = dq_f/dt = -aAe^{-at} \sin(bt + \alpha) + bAe^{-at} \cos(bt + \alpha).$$

今命

$$b/a = \tan \gamma \quad a/\sqrt{a^2 + b^2} = \cos \gamma \quad b/\sqrt{a^2 + b^2} = \sin \gamma.$$

依據關於 a 及 b 之方程式得 $\sqrt{a^2 + b^2} = 1/\sqrt{LC}$ 。若將 $\cos \gamma$ 及 $\sin \gamma$ 二方程式中之 a 及 b 值代入關於 i_f 之方程式中，則得

$$i_f = \frac{-Ae^{-at}}{\sqrt{L \times C}} \sin(bt + \alpha - \gamma). \quad (7)$$

今將由第6及第7方程式之自由電荷及自由電流之值加於相當定值並由是得關於實有電荷及實有電流之方程式。從在 $t=0$ 時間之實有電

荷及電流強度乃確定 A 及 α 二常數之值。

在是處（即在 $R^2 < 4L/C$ 之情形中）自由電荷及電流強度可視為角速度 b 之在永久值以上並經阻尼之正弦形振動。為表示此種振動可與阻尼因數及時間相應減小未經阻尼之振動。當電阻 R 微小時，固有振動之角速度（固有頻率¹⁾）依據關於 b 之方程式為 $1/\sqrt{LC}$ 。

92. 關於直流之例。接電手續²⁾。

1. 電阻 R 及電感 L 互相串聯並與直流電壓 U 相連接。此時永久電流等於 U/R 。若加永久電流於依第3方程式而計算之自由電流中，則得實有電流 $i = U/R + Ke^{-\frac{R}{L}t}$ 。當 $t=0$ 時， $i=0$ 。由等比此方程式中之二值得 $K = -U/R$ 。電流故為

$$i = U/R - e^{-\frac{R}{L}t} U/R. \quad (8)$$

當 $t=L/R$ 時， $i = U/R - e^{-1}U/R = (1 - 1/e)U/R = 0.63U/R$ 。故在此情形中 L/R 指出電流增長至末值之 0.63 倍所須之時間。

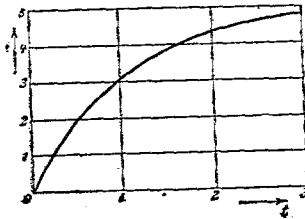


圖317. 電路開閉時之直流。

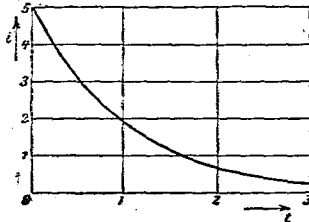


圖318. 電壓消滅時之電壓。

例如命 $U=16$ 伏， $R=2$ 歐及 $L=2$ 亨。於是永久電流 $I=U/R=$

¹⁾固有頻率: Eigenfrequenz; natural frequency; fréquence naturelle.

²⁾接電手續: Einschaltvorgang; switch on process; opération de la mise en circuit.

5安而當成均衡時電流之瞬時值 $i = 5 - 5e^{-t}$ 。第317圖示在此情形中電流強度與時間之關係。電流之末值其實祇可在無限時間後實現。然電流經過短時間之後却可達到近末值之值。今計算例如為達到永久電流祇差1°/00餘之時間，即已經過4.995安電流所須之時間。據第8方程式 $4.995 = 5 - 5e^{-t}$ ，即 $e^{-t} = 0.001$ 。由此得 $\varepsilon^t = 1000$ ，故 $t = (\text{對數}1000) : 0.4343 = 6.9$ 秒。

2. 經直流 I 激發之某電磁鐵除有依第62圖之繞組外復並聯一電阻。今將其主電路開斷。繞組及分接分路之串聯電阻之總和假定為 R 。電感假定等於 L 。在磁鐵繞組中，永久電流為零，故依據第3方程式有效電流： $i = i_T = Ke^{-\frac{R}{L}t}$ 。當 $t = 0$ 時， $i = I$ 。由是得 $K = I$ ，即 $i = I \times e^{-\frac{R}{L}t}$ 。當 $t = L/R$ 時， $i = Ie^{-1} = 0.37I$ 。故時間常數 L/R 示電流降至初值之0.37倍所須之時間。因分接分路內祇含有效電阻，其中電流轉瞬間倒轉其方向。是處之說明對於由捷接其接線螺旋致不通電之電磁鐵亦有效。第318圖示 $I = 5$ ， $R = 2$ 及 $L = 2$ 時之電流曲線¹⁾。此曲線為第317圖電流曲線之像。

3. 試將一直流電機之磁鐵繞組與一直流電壓 U 相連接。電感並不固定。一極對之通量 Φ 與磁鐵電流 i 之關係假定由第319圖左半之磁化曲線表明。此曲線與尋常一般所示者發生 90° 之旋轉。假定在全數極對上之總匝數為 w 而極上磁鐵繞組之總電阻等於 R 。於是

$$U = iR + \frac{w d\Phi}{dt}, \quad \text{即} \quad \frac{dt}{w/R} = \frac{d\Phi}{U/R - i}. \quad (9)$$

今依鉛直方向表 $OA = U/R$ 並依以後尚須確定之比例尺表 $OP = a = w/R$ 。次作水平線通過 A 及 P 點。

在 Δt 時間內通量自零值增長至 $\Delta\Phi = AB$ 。當時之電流強度 i 等於未表明之高度 D ，故 $DB = U/R - i$ 。設與 AD 平行作 OQ 並在 Q 作一鉛直

¹⁾ 電流曲線；Stromkurve；current curve；courbe d'intensité ou de courant.

線以達F, 則OF:QF = AB:DB. 故依據第9方程式 OF = $\Delta\phi$ 或等於電流達 i 強度所須之時間 t_1 ——當初既從 $t=0$ 開始。經過D點之水平線與經過F點之鉛直線之交點示電流強度為時間之函數。

在此後 $\Delta\phi$ 時間內, 通量增長 $\Delta\Phi = BC$. 其時之電流 i_2 等於E點之高度, 即 $EC = U/R - i_2$. 今與BE平行作FR線, 則恰如上述情形中FG等於 $\Delta\phi$. 依同法終則得一示電流強度與時間

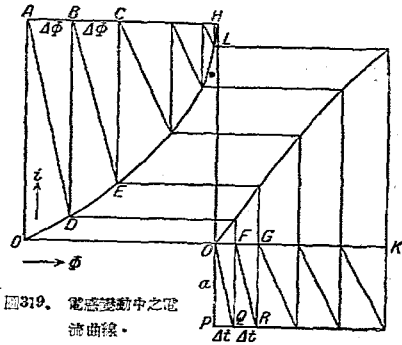


圖319. 電感運動中之電流曲線。

關係之曲線。關於電流, 時間及通量之比例尺可隨意選定。例如命

$$1 \text{ 厘米} = c_i \text{ 安}, \quad 1 \text{ 厘米} = c_t \text{ 秒}, \quad 1 \text{ 厘米} = c_\phi \text{ 伏秒}.$$

此時間關於由OP表示之 $u = w/R$ 量之比例尺及 a 同依第9方程式由相關量計算而為 $c_a = c_i c_t / c_\phi$ 。

在第319圖中例如 $U = 120$ 伏, $w = 4500$, $R = 15$ 歐姆。選定 $c_i = 3$, $c_t = 2$, $c_\phi = 3 \times 10^{-2}$. 於是 $c_a = 200$. 電流 OL 達其終值 0.9 倍所須之時間等於 $3.1 \times 2 = 6.2$ 秒——OK 既等於 3.1 厘米。據理論終值 OH 須在無限時間後實現。

磁化曲線當初大都背表激發強度之軸而凸出, 致電流曲線呈一完全不規的形狀。

4. 電容 C 與電阻 R 串聯並與直流電壓 U 相連接。命電感等於零。永久電荷 $q_d = CU$, 故總電荷等於永久電荷及依第4方程式算出之自由電荷之總和: $q = CU + Ke^{-t/RC}$. 當 $t=0$ 時, $q=0$, 故 $K = -CU$. 準此

$$q = CU - CUe^{-\frac{t}{RC}} \quad \text{及} \quad i = dq/dt = e^{-\frac{t}{RC}} U/R \quad (10)$$

在電路關閉之瞬間，即當 $t=0$ 時，電流強度依方程式等於 U/R 。故電阻小時，電流強度非常之大，雖然電路依普通意義並不關閉。其實其時尚有自感應，其作用使電流於電路關閉之瞬間不等於 U/R 但自零增長。此電流仍可極強，故最好不令電纜立即與全電壓相連接，但將電壓緩緩增加，或令電纜與一經過一電阻之保護開關¹⁾相連接，以後將電阻緩緩被短接。

5. 令帶固定電感 L 之抗流線圈與一帶電容 C 之容電器相串聯並於 $t=0$ 時間令與一直流電壓 U 相連接。有效電阻 R 假定極小。因與 $R^2 < 4L/C$ 之條件相符，故由第6方程式自由電荷 $q_f = e^{-at} A \sin(bt + \alpha)$ 。依據第352面 $a=0$ 及 $b=1/\sqrt{LC}$ ，永久電荷 q_d 既等於 CU ，故有效電荷

$$q = q_d + q_f = CU + A \sin(t/\sqrt{GL} + \alpha),$$

$$\text{即 } i = dq/dt = \cos(t/\sqrt{GL} + \alpha) A/\sqrt{GL}.$$

$t=0$ 時， $q=0$ 及 $i=0$ 。由是， $A \sin \alpha = -CU$ 及 $A \cos \alpha/\sqrt{GL} = 0$ 。

或 $\alpha = \pi/2$ 及 $A = -CU$ ，準此

$$q = CU - CU \cos \frac{t}{\sqrt{LC}} \quad (11) \quad i = \frac{U}{\sqrt{L/C}} \sin \frac{t}{\sqrt{LC}} \quad (12)$$

電流為帶 $U : \sqrt{L/C}$ 巔值之交流。角速度為 $1/\sqrt{LC}$ ，故頻率等於 $1 : 2\pi\sqrt{LC}$ 而一振動之時間 $T = 2\pi\sqrt{LC}$ 。設命電阻等於零，振動當連續不已。第320圖示電流，永久電荷，自由電荷及總電荷之依時間的變動。

在第一四分之一週期間，電流增長至達 $i_m = U : \sqrt{L/C}$ 之巔值，而在抗流線圈中儲蓄之能達 $L \times i_m^2/2 = CU^2/2$ 之值（據第60面第25方程式）。同時據第11方程式容電器之電荷達 CU 之值，在容電器之電壓達 U 值，而電能達 $CU^2/2$ 之值（依據第83面第17方程式）。在第一

¹⁾ 保護開關；Schutzschalter；protection switch；Interrupteur de sécurité。

四分之一週期間電源供給電能 CU^2 。

在與 π 弧相當之時間 $T/2$ ，依據第12方程式電流為零，抗流線圈故已給出其所需之能。

同時容電器之電荷依據第11方程式等於 $2CU$ ，故容電器電壓

等於 $2U$ ，換言之，即等於直流電壓之二倍。準此則電能 $G(2U)^2/2 = 2CU^2$ 。其中 $CU^2/2$ 部分係出於抗流線圈而 CU^2 部分在第二四分之一週期間由電源供給。

在第三四分之一週期間，容電器之電能大部分已不復存在，其故因當此之際容電器儲蓄磁能並回給電能於電源。終則在末後四分之一週期間，抗流線圈之磁能及容電器電能之剩餘部分均回給於電源，此後第二週期遂開始。

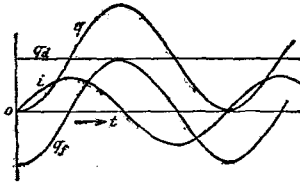


圖320。一抗流線圈及一容電器與一直流電源連接後之電流。

93. 關於交流之例。

1. 設令一帶固定電感 L 及極小有效電阻之線圈在 $t=0$ 時與一帶 $u = u_m \sin(\omega t + \psi)$ 電壓之交流電源相連接。當有效電阻為零時，永久電流既以 $\pi/2$ 角落在電壓之後，故其值為 $i_m \sin(\omega t + \psi - \pi/2)$ 。又因阻尼因數依據第 3 方程式等於零，故自由電流之強度不變而等於 K 。有效電流是以為 $i = i_m \sin(\omega t + \psi - \pi/2) + K$ 。當 $t=0$ 時， $i=0$ ，申言之，此時表不變電流之固定值為 $K = -i_m \sin(\psi - \pi/2) = i_m \cos\psi$ 。有效電流故為有 $i_m \cos\psi$ 值

之直流，其上重疊一正弦形交流。第 321 圖示一電壓之波（其源點以 ψ 角落在始點之後）及一補以 $\pi/2$ 角落電壓

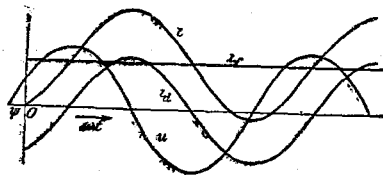


圖321。在無阻尼線圈中之補時電流。

波之後之永久電流。自由電流由一直線表示。其高度係以 $t=0$ 時 $i=0$ 之條件決定，是以永久電流與自由電流相反而相等。有效電流曲線之變動與永久電流曲線之變動相同，但以自由電流之永久值 K 依鉛直方向移動。若有效電阻等於零——在實際情形中自然決不可能——，則曲線當不致變動，申言之，總電流恆含有一直流。

通電後電壓通過零點時自由電流最強而與永久電流之巔值 i_m 相等。又在此情形中總電流亦最強，係等於 $2i_m$ 。此值於半個週期後達到。

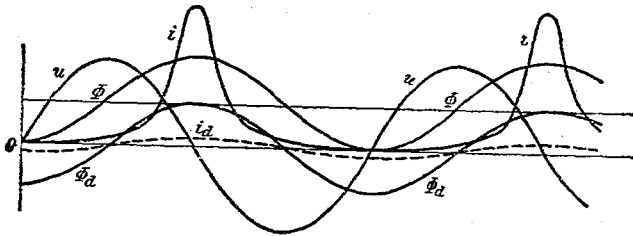


圖322. 飽和鐵中之通量曲線及電流曲線。

總電流曲線故恆在水平線以上或以下，是以電流之方向並不變動。

最後若將電路於電壓最大時關閉，則 $\psi = \pi/2$ ，故自由電流 K 等於零。因此總電流之曲線與永久電流之曲線脗合。

2. 令一無阻感應圈與一呈正弦形之交流電壓相連接。圈內含有一鐵心，後者磁化至達強飽和狀態。被導入之電壓惹起一相反但相等之自感應電壓並因此惹起與穩定狀態相同之通量變動。依據第193面以 $\pi/2$ 角落在導入之電壓之後之永久通量 ϕ_d 之曲線此時須依鉛直方向令其移動，使其當 $t=0$ 時通過零點並由是得有效通量。第322圖即示此情形，其中假定當 $t=0$ 時電壓通過零點，由是通量達最大永久通量之二倍。

設以鐵之橫斷面積分除通量使每厘米所須之激發可依據第46圖確定，則可求得電流 i 。尋常為簡單起見，依鉛直方向表示激發，此時電流由曲線 i 表明。為比較起見，作永久電流之相當曲線。此電流在日

前與當初時不同，對於總電流之穩定不再惹起影響。作圖時假定感應強度之巔值在穩定狀態時等於8000高斯而在過渡狀態時等於16000高斯。為惹起每厘米16000高斯既頭有35安匝而為惹起每厘米8000高斯祇須有2安匝，故當連接之際發生之通路電流之巔值為永久電流之17.5(!)倍。因此當插入帶強飽和鐵之大變壓器或三相交流電動機時常應用在第256面說起之保護開關。該開關之電阻當在穩定狀態並當電動

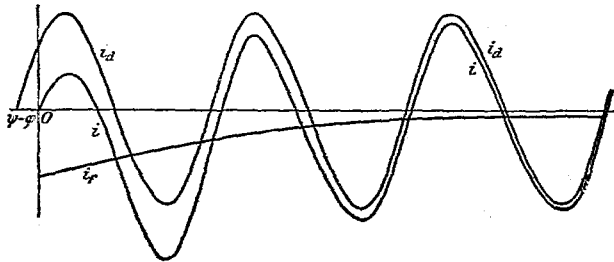


圖323. 有電阻及電感時之通路電流。

機或變壓器無負載時可消耗網絡電壓之若干百分率，但在移動開關時已被捷接，經其阻尼作用，電流之巔值於初現之際即被抑下，且因除鐵內有通量外在空氣中復有雜散通量，通路電流之理想的強度亦略許減小。職是之故，通路電流至多為永久捷路電流之二倍。

電路通時永久電流通過零點或當電壓有巔值時，有效電流之曲線復與永久電流之曲線相符合。

又當微飽和有感負載發電機與一強飽和變壓器相連接而二者例如在發生捷接而自動與副磁電條分開時，磁化電流如以上之遞增亦發生。此後依據第117節在發電機內促成電壓之上升¹⁾，並因而惹起變壓器之磁化電流（如在第322圖中），後者惹起過高電壓。

3. 令帶固定電感 L 及電阻 R 之電路在 $t=0$ 時與電壓 $u = u_m \sin \omega t$

¹⁾ 電壓之上升; Spannungserhöhung; voltage elevation; élévation de tension.

+ ψ) 相連接。命 i_m 表永久電流之巔值又命 $t_g \varphi = L\omega/R$ ，故永久電流之臨時值爲 $i_d = i_m \sin(\omega t + \psi - \varphi)$ 。其值由第323圖中之 i_d 曲線表明。依據第3方程式自由電流 $i_f = K\varepsilon \frac{R}{L} t$ ，至有效電流則等於永久電流及自由電流之總和

$$i = i_m \sin(\omega t + \psi - \varphi) + K\varepsilon \frac{R}{L} t$$

當 $t=0$ 時， $i=0$ ，申言之， $K = -i_m \sin(\psi - \varphi)$ 。自由電流故由 i_f 曲線表明。此時有效電流

$$i = i_m \sin(\omega t + \psi - \varphi) - \varepsilon \frac{R}{L} t \times i_m \sin(\psi - \varphi)$$

此電流經由 i 曲線表明而後者由加 i_d 及 i_f 二曲線之鉛直距離而得。經過多次振動之後——嚴謹言之，其振動數當無限之大——電流過渡而爲永久電流。今須解答者爲有效電流巔值究在何種狀況下實現。設依 ψ 及 t 偏微分上面之方程式並命微分商等於零，則得

$$\cos(\omega t + \psi - \varphi) - \cos(\psi - \varphi) \varepsilon \frac{R}{L} t = 0$$

$$\omega \cos(\omega t + \psi - \varphi) + \frac{R}{L} \sin(\psi - \varphi) \varepsilon \frac{R}{L} t = 0$$

如消去 $\cos(\omega t + \psi - \varphi)$ 並命 $L\omega/R = t_g \varphi$ ，則得 $L\omega \cos(\psi - \varphi) = -R \sin(\psi - \varphi)$ ，申言之， $t_g \varphi = -t_g(\psi - \varphi)$ 。由是得 $\psi = 0$ 或 $\psi = \pi$ 。準此以觀，恰如在第257面之第1例中，若於電壓通過零點時關閉電路，電流遂達其巔值。

4. 令一帶電感 L 之抗流線圈與一帶電容 G 之容電器相串聯，二者在帶可忽略之有效電阻之狀況下並在 $t=0$ 時與電壓 $u = u_m \sin(\omega t + \psi)$ 相連接。永久電流 i_d 此時爲呈正弦形曲線之交流且視 $L\omega$ 較 $1/G\omega$ 爲大或小，以 $+\pi/2$ 或 $-\pi/2$ 之角度落在電壓之後。永久電荷亦呈正弦形且以 $\pi/2$ 角落在電流之後。是項之計算方法與前節第5項相同。所得之電流爲帶角速度 ω 之正弦形永久電流，其上重疊帶固有角速度 $1/\sqrt{LC}$ 之正弦形自由電流。

今假定電路係當電壓達其巔值 v_m 時接通。其實一般通用之開關概在此時間關閉。又設想固有角速度 $1/\sqrt{LC}$ 與電源之 ω 角速度相較頗大。此時可假定在電源之電壓顯然變動以前已完成多數固有振動。故可假定當初有一固定電壓。容電器之電壓之巔值此時與以前相同亦等於 $2v_m$ ，而電流之巔值依據第12方程式為 $i_m = v_m / \sqrt{L/C}$ 。同時因假定 ω 與 $1/\sqrt{LC}$ 相較極小， ω^2 與 $1/LC$ 相較亦極小，故 $L\omega$ 與 $1/C\omega$ 相較極微而可忽略之。總電阻於是為 $1/C\omega$ ，申言之，永久電流之巔值 i_{dm} 為 $v_m C\omega$ 。由是得

$$\frac{i_m}{i_{dm}} = \frac{v_m / \sqrt{L/C}}{v_m C\omega} = \frac{1/\sqrt{LC}}{\omega}$$

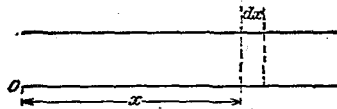
電路通接電流巔值對於最大永久值之比恰如固有角速度對於電源頻率之比。因有大通路電流，電纜之電路通時亦須用保護開關。

94. 瞬間波¹⁾

以上假定在電路之分離部分內有自感應及電容。其實此種假定決不致完全實現。雖然近似之情形常有之。例如在電機及變壓器之繞組中電容與自感應相較極小而幾乎可忽略之。其相反之情形往往見於電纜中，是種分離的電感及電容在以前二節中大都由過度電壓²⁾及過度電流³⁾表明。又在第76節之共振中電感與電容分離。今恰如在第78節中，須討論各部分（例如一導線之全路）均具自感應及電容之電路。（分佈自感應及電容。）

命 l 表導線單位之長， L 每單位長之電感及 C 每單位長之電容。同時假定電阻為零。又假定除位移電流外在電介體內並無電流通過，故其絕緣完全。今確定隨位置及時間而異之電壓及電流強度，例如距導線始端 x 處之電壓 v 及電流強度 i (圖324)。偏微分商此時經由一圓形

¹⁾ 瞬變波；Wanderwelle；transient wave；onde transitoire。 ²⁾ 過度電壓；Überspannung；over (or excess) voltage；surtension。 ³⁾ 過度電流；Überstrom；excess current；surintensité du courant。

圖324. dx 長之導線部分。

表明。

每單位長之電壓消耗自必極小而係由 $L \partial i / \partial t$ 表示之。此消耗等於沿每單位長

之電壓之負增加，故等於 $-\partial u / \partial x$ 。準此

$$L \partial i / \partial t = -\partial u / \partial x. \quad (13)$$

一方面因位移電流似通過電介體，每單位長之電流之遞減等於 $C \partial u / \partial t$ 。此種遞減等於電流沿每單位長之負增加，故等於 $-\partial i / \partial x$ ，即

$$C \partial u / \partial t = -\partial i / \partial x. \quad (14)$$

將方程式(13)依 x 及方程式(14)依 t 偏微分，得

$$L \frac{\partial^2 i}{\partial t \partial x} = -\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad \text{及} \quad C \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -\frac{\partial^2 i}{\partial x \partial t}.$$

若消去 $\frac{\partial^2 i}{\partial t \partial x}$ 並應用一固定值 v ：

$$\partial^2 u / \partial t^2 = v^2 \partial^2 u / \partial x^2 \quad (15) \quad v = 1 / \sqrt{LC}. \quad (16)$$

據理論以解第15方程式得

$$u = \varphi(x - vt) + \psi(x + vt). \quad (17)$$

其中 $\varphi(x - vt)$ 表 $x - vt$ 之一函數及 $\psi(x + vt)$ 表 $x + vt$ 之一函數。

今確定電流強度並將方程式(17)依 t 微分，其中以 φ 代 $\varphi(x - vt)$ 及以 ψ 代 $\psi(x + vt)$ ：

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -v \frac{\partial \varphi}{\partial (x - vt)} + v \frac{\partial \psi}{\partial (x + vt)}.$$

將此值代入於第13方程式中得

$$-Cv \frac{\partial \varphi}{\partial (x - vt)} + Cv \frac{\partial \psi}{\partial (x + vt)} = -\frac{\partial i}{\partial x}.$$

積分之，得 $i = Cv\varphi - Cv\psi$ 。此時依第16方程式 $Cv = \sqrt{C/L}$ 。其反值謂之導線之振動阻。今以 Z 表示之，即

$$Z = \sqrt{L/C}. \quad (18) \quad i = \{\varphi(x - vt) - \psi(x + vt)\} Z. \quad (19)$$

函數 φ 及 ψ 係隨時間及位置而異。然當 $x - vt$ 達到一任意固定值 p

時， φ 之值不再變動。又當 $x+vt$ 達到一任意固定值 q 時， φ 之值亦不再變動。茲命 $x-vt=p$ ， x

$+vt=q$ 並依 t 微分之得關於 φ 之方程式： $dx/dt=v$ 及關於 q 之方程式： $dx/dt=-v$ 。



圖325. 向前及向後移動之波。

函數 φ 此時依第325圖為一瞬間波。此波以不變的形狀帶 v 速度前進。反之， q 表另一波。此波依原形帶傳播速度¹⁾ v 而後退——瞬間波之反射²⁾。就架空線而言，依據第16方程式並由利用第56面之第20方程式及第86面之第14方程式並略去導體內部之磁場，每秒之速度 $v=3 \times 10^8$ 呎厘米，故即等於光之速度。波之形狀係由當初之條件（參考第96及第97節）。依據第19方程式電流波與電壓波之差別僅在是處為真實之電阻 Z 。

95. 反射定律。

1. 導線末端開者。命 φ 及 q 表在導線末端之向前及向後移動之波之臨時值。今據第19方程式 $\varphi - q = i \times Z$ 。在開導線之末端，電流既

等於零，故 $\varphi = q$ 。故設有一電壓波依第326a圖向該末端移動，則勢必另有一背該末端後移之 q 電壓波，後者成依在導線末端之鉛直線而言之像。在導線各點，電壓 $u = \varphi + q$ ，申言之，因重疊之故，電壓大於與 φ 波相當之電壓。又在導線各點之電流依 $iZ = \varphi - q$ 之方程式由 φ 與

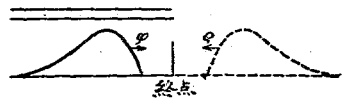


圖326a. 導線末端開者。

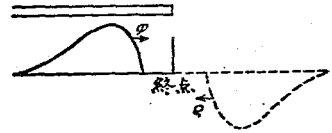


圖326b. 導線末端被連接者。

¹⁾ 傳播速度；Fortpflanzungsgeschwindigkeit；speed of propagation；vitesse de propagation. ²⁾ 瞬間波之反射；Reflexion von Wanderwellen；reflection of transient waves；réflexion des ondes transitoires.

ϱ 之決定。

2. 導線末端被捷接者。在被捷接之末端電壓既等於零，是以 $u = \varphi + \varrho = 0$ 之方程式係有效。申言之， $\varrho = -\varphi$ 。設有電壓波 φ 依第326b圖向導線末端移動，則同時當有一背該末端而移動之波 ϱ ，後者為依鉛直軸及水平軸之像。

3. 導線末端經R電阻連接者。關於該末端，下列方程式當有效：

$$\left. \begin{array}{l} u = \varphi + \varrho = iR \\ \varphi - \varrho = iZ \end{array} \right\} \begin{array}{l} 2\varphi = i(R+Z) \\ 2\varrho = i(R-Z) \end{array} \quad \text{即} \quad \varrho = \frac{R-Z}{R+Z}\varphi.$$

今命

$$(R-Z) : (R+Z) = p \quad (20)$$

其中 p 曰反射因數¹⁾。如 R 大於 Z ， p 為正。其時之波為一向後移動之波，其形狀如在第326a圖中但略低。由重疊亦惹起對於 φ 波而言之較高電壓。

若 R 小於 Z ， p 為負。其時得一向後移動之波，其形狀如在第326b圖中但略高。 $R=Z$ 時，後退波等於零。

4. 從第1導線向第2導線之過渡。任一電壓波 φ_1 以 v_1 之速度沿第1導線向連接點移動。在第2導線中移動之波命為 φ_2 。此線中向後移動之波既等於零，故依據第17及第19方程式在連接點 $u_2 = \varphi_2 = i_2 Z_2$ 。又在二線之連接點電壓及電流強度既相同，故在連接點 $u_1 = i_1 Z_1$ 。當時之情形恰如將帶 Z_1 波電阻之第1導線與 Z_2 歐姆電阻相連接。故反射因數 p 及在第1線內向後移動之波 ϱ_1 依據第20方程式為

$$p = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}, \quad \varrho_1 = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \varphi_1.$$

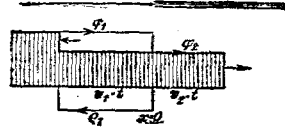
至於符號則與第3項下相同。因在連接點以 φ_2 表示之電壓在二線中相等，

$$\varphi_2 = \varphi_1 + \varrho_1 = \frac{2 \times Z_2}{Z_2 + Z_1} \varphi_1.$$

¹⁾ 反射因數；Reflexionsfaktor; reflection factor; facteur de réflexion.

其中 $\frac{2Z_2}{(Z_1+Z_2)}$ 稱曰折射函數¹。

在第 2 導線內侵入之 φ_2 波以與第 2 導線相應之速度 v_2 進行。當 $Z_2 > Z_1$ 時，此波大於 φ_1 波。例如當一波離開一電纜而入於一架空線內時即呈此情形。反之，若 $Z_2 < Z_1$ ，則在第 2 導線內離去之 φ_2 波小於到來之 φ_1 波。第 327 圖即示有均勻高度及鉛



直波前之長波 φ_1 之情形，其中 Z_2 ：

Z_1 假定等於 $1/3$ 。又由圖表示 $\varphi_2 = \frac{2}{3} \times \varphi_1$ 及 $\varphi_r = -\varphi_1/3$ 。在由圖表明之瞬間，此二波分別以 $v_2 t$ 及 $v_1 t$ 起在以 $x=0$ 表明之連接點之前。

圖 327. 在連接點之反射及折射。

5. 導線末端經由 R 電阻及 L 電感連接者。在此情形中在導線末端 $u = \varphi + q = iR + L di/dt$ 及 $\varphi - q = iZ$ ，故 $2\varphi = i(R+Z) + L di/dt$ 。準此，則就此末端視之，導線之性質恰如一電路（其末端有 2φ 電壓）而被阻恰如一歐姆電阻。

在有等高度之長電壓波 φ 之情形中， 2φ 為一固定值而在末端之電流由應用第 32 節中之第 8 方程式為

$$i = \frac{2\varphi}{R+Z} - \frac{2\varphi}{R+Z} \varepsilon^{-\frac{R+Z}{L}t}$$

向後移動之 q 波於是為

$$q = \varphi - iZ = \frac{R-Z}{R+Z} \varphi + \frac{2\varphi Z}{R+Z} \varepsilon^{-\frac{R+Z}{L}t}$$

第 328 圖示 $R=0$ 時開始自右沿導線移動之 q 波。此時 $\varphi + q$ 之總和為經一條線面內鉛直線表示之電壓。又 $\varphi - q$ 之差亦由一條線面內之鉛直線表明而係等於 iZ ，故為一種表示電流強弱之量。設想此二條線面自右側沿導線移動。如第 328 圖所示，電壓波先經一電感增長至達加倍之值，故電感當初之作用如一開導線末端。

¹ 折射函數; Brechungsfaktor; refraction factor; facteur de réfraction

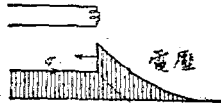


圖328. 在一電線內之反射。

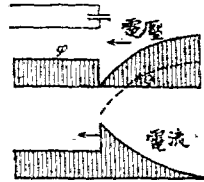


圖329. 在一電容線內之反射。

面之鉛直線復示 $\varphi + \psi$ 電壓，而下條線面表 $\varphi - \psi = iZ$ 之量。故二面復須設想自右沿導線移動。由此可見電容之作用如一捷路而電壓在最初瞬間降至零值。

6. 導線末端經電阻 R 及電容 C 連接者。命 φ 表達導線末端之波，則據以上關於導線末端之定則： $2\varphi = i(R+Z) + \int idt/C$ 。依據第92節中之第10方程式所示之情形， φ 波為一帶均勻高度之波，故 φ 有一固定值：

$$i = \frac{2\varphi}{R+Z} \varepsilon \frac{t}{(R+Z)C}$$

$$\psi = \varphi - iZ = \varphi - 2\varphi \frac{Z}{R+Z} \varepsilon \frac{t}{(R+Z)C}$$

第329圖示無電阻 ($R=0$) 之 φ 波在 $t=0$ 時開始沿導線向後移動之情形。上條線面之鉛直線復示 $\varphi + \psi$ 電壓，而下條線面表 $\varphi - \psi = iZ$ 之量。故二面復須設想自右沿導線移動。由此可見電容之作用如一捷路而電壓在最初瞬間降至零值。

96. 導線內之通路過程。

一無載導線係與帶電壓 U 之直流電源相連接。導線之長為 l ，其電阻及絕緣層之電導假定均為零。在第330圖中命 A 表導線之始端， B 表其末端， φ 函數經一實曲線之鉛直線表明而 q 函數經一虛曲線之鉛直線表明。

在將電路接通以前，即當 $t=0$ 時，在導線各點之電壓及電流強度均等於零。故當 $t=0$ 時，依據第17及第19方程式： $0 = \varphi(x) + q(x)$ 及 $0 = \varphi(x) - q(x)$ 。準此則當 $t=0$ 時不拘 x 值之大小， $\varphi(x)$ 及 $q(x)$ 均等於零，申言之，兩曲線與 AB 水平軸相符合。然為清楚起見，圖中二者略許上下位置。

在目前惟知 φ 及 q 二曲線之在水平軸上 AB 長之部分一俟電路接通之後即以 v 速度前進，而其中 φ 曲線向右而 q 曲線向左移動。在 $T/8$ 時

各進占一半導線長之徑路。

在導線始端之電壓恆等於 U 。此電壓既滿足第17方程式之要求而向後移動之 φ 波與 MR 相應既等於零，故在 $t=0$ 時從 A 向前移動之 φ 波有 U 之固定高度。

今可由圖表示 $t=0$ 時從左向右沿導線移動之全波。左邊實曲線之一鉛直線與右邊虛曲線之離 A 點等遠之一鉛直線相併而示 U 值。在導線末端 B ，電流係等於零。故依據第19方程式在左邊實曲線及右邊虛

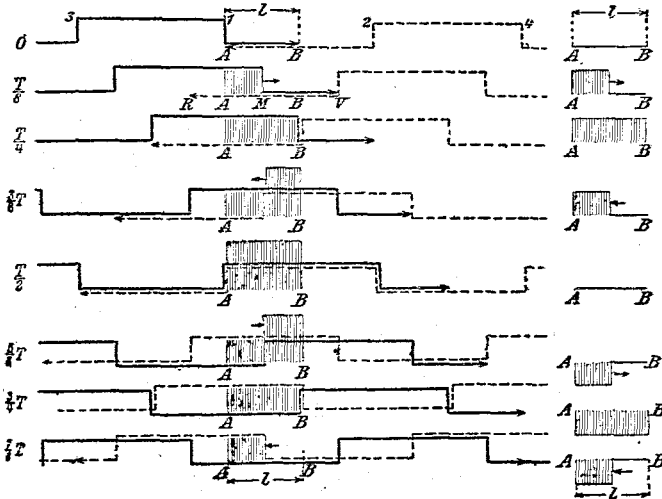


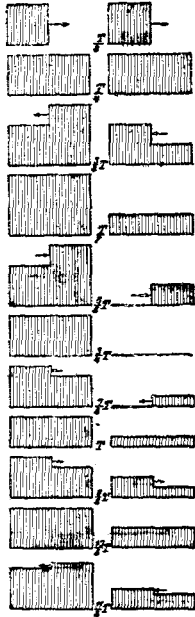
圖330. 一閉導線電路接通時之瞬間波。

曲線之距 B 等遠之二鉛直線必等，換言之，二曲線為依 B 點而言之像（參考第95節中之反射定律）。由第1角得第2角，並由後者得第3角，餘類推。由是表示帶 l 波長之二直角波，其對稱線移在與 AB 相符合之水平線之上而達 $U/3$ 之高度。

今命 T 表波前進一波長（故即 $4l$ 距離）所須之時間。上圖表示相隔 $T/8$ 秒之二波。設沿 l 之長合計二波之鉛直線，則依第17方程式該合

成線當示在各點之電壓。此種電壓係由在右邊條線面之鉛直線表明。

向前及向後移動之二波相合即成爲總波。其運動之過程如下。當初帶U高度之充電波自始端向末端移動。在T/8時間後，此波達導線之中點而在T/4時間後到達末端並在是處其電壓增加一倍。此後此帶U高度之充電波向始端移動。在是處當T/2時，電壓仍復減至單次



電壓 電流
圖331. 帶電阻之導線開路時之反射波。

之值，申言之，其時有帶U高度之放電波¹⁾自始端向末端移動。設在3/4×T時間已達末端，則因電壓減至零值，該波再被反射而向始端移動。如此重演不已。因導線電阻之阻尼作用，φ及ψ二波之鉛直線依其水平對稱線而言逐漸減小，故波終則消滅而全部導線在2U/2之電壓T。對於電壓之充電波及放電波，反射定律亦有效。

依同法電流強度等於φ及ψ各波之差。其強度由在圖右端之條線面內之鉛直線表明。

今導線間每長單位之電能等於Cu²/2，其磁能等於Li²/2。如第330圖所示，有時藉着由電源給出之能而有時則回給電能於電源中。又有時磁能變爲電能，有時則反是。

今命開線經R電阻接通。此後就該端而言，依據第95節 $q = \frac{\phi(R-Z)}{R+Z}$ 。在一電纜內例如命 $Z = \sqrt{L/C} = 100$ 歐。命插在導線末端間之電阻 $R = 300$ 歐。於是在末端： $q = \frac{\phi(300 - 100)}{(300 + 100)} = \frac{\phi}{2}$ 。此時恰如第330圖所

示，φ及ψ各波之差在於右邊虛曲線之鉛直線應等於左邊實曲線內離B等遠之鉛直線之半。與前相同，兩曲線內離

¹⁾放電波；Entladungswelle; discharging wave; onde de déchargement.

A等遠之鉛直線相併而成U。

循AB導線之二曲線之鉛直線之總和表示電壓而其差經 $Z=100$ 分除後表示電流 (圖331)。與前相同，電壓及電流由條線面內之鉛直線表明。在是處亦由 φ 及 q 各波示電壓之充電波及放電波，此二者服從反射定律。除 $T/4, T/2$ 等時間外，在其他各時間，末端之電流強度等於電壓與電阻 R 之比。

97. 二導線之連接。

設令一長而閉之第二導線與一長而帶電壓 U 之第一線相連接。假定在二線中電感及電容均不同致在二線中振動電阻 Z_1 及 Z_2 以及前進速度亦不一致。又假定開關係在 $x=0$ 之處 (圖332及333)。當 $t=0$ 時，開關尚閉，其時在第一導線之各點： $u_1 = \varphi_1 + \varphi_2 = U$ 及 $i_1 = (\varphi_1 - \varphi_2)/Z_1 = 0$ 而在第二導線之各點： $u_2 = \varphi_2 + \varphi_1 = 0$ 及 $i_2 = (\varphi_2 - \varphi_1)/Z_2 = 0$ 。由是可知

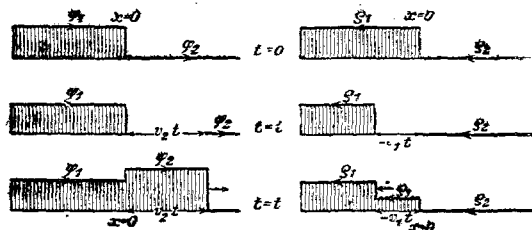
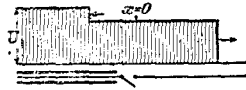


圖332. 二導線相連時之各波。

當時在二導線之各點： $\varphi_1 = \varphi_2 = U/2$ 及 $\varphi_2' = \varphi_2'' = 0$ 。此狀況在第332圖之上部已表明。

在 t 時， φ_1 前進 $v_1 t$ 而 φ_2' 後退 $v_2 t$ ，又 φ_2' 前進 $v_2 t$ 而 φ_2'' 後退 $v_2 t$ (圖332，中)。吾人知 φ_1 及 φ_2' 之各位置，但僅知 φ_2' 及 φ_2'' 之由圖所示之位置。所缺之部分可根據下列之關係決定，即當 $x=0$ 之各瞬間，故即在連接之處，下列之方程式當有效： $u_1 = u_2$ 及 $i_1 = i_2$ 。申言之， $\varphi_1 + \varphi_2' = \varphi_2'' + \varphi_2$ 及 $(\varphi_1 - \varphi_2')/Z_1 = (\varphi_2'' - \varphi_2)/Z_2$ 。今依第332圖中部在 $x=0$ 之處： $\varphi_1 = U/2$ 及 $\varphi_2' = 0$ 。設將此值代入於上列二方程式中並以 $\alpha = Z_1/Z_2$ ，則得 $0.5U$

$+q_1 = q_2$ 及 $0.5U - q_1 = \alpha q_2$ 。由是：



$$q_2 = \frac{U}{1+\alpha}, \quad q_1 = \frac{1-\alpha}{1+\alpha} \times \frac{U}{2}$$

此值為當各瞬間 $x=0$ 時之值。因 q_2 及 q_1 移動不已，遂得第 333 圖中下部之曲線。



當作此圖時，假定 Z_1 小於 Z_2 ，故 α 小於 1。此情形當以一電纜饋電於一架空線時有之。如令各線之上 q 及 q 相加，則得第 333 圖之上部。觀圖可知帶 $U/(1+\alpha)$ 高度之一波在迄今目前未曾帶電壓之第

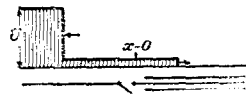


圖 333. 二導線相遇時之電壓波。

導線中向前進行，致後者部分的充電。反之， $U-U/(1+\alpha)$ 之波在饋線中向後移動，致後者部分的放電。

第 333 圖中部示關於二相等線連接之相同情形。在此情形中充電波及放電波係等大。至第 333 圖下部係關於一電纜由一架空線之充電。

在諸想像情形中，波均呈直角形，申言之，有一鉛直波前。若依實際之情形波前逐漸趨於平坦，電壓難免飛躍，即導線中與波相遇之一點對於同線中未與波相會之隣近點呈一強電壓，後者有時竟等於二倍電路電壓（或工作電壓）。因為電機，變壓器或儀器之繞組亦具有分佈自感應及電容，是種強電壓帶有危險性。設令電機等與導線相連接，則瞬間波可侵入於其內。其時二隣線匝間之電壓可極大，致突破絕緣體。為防是種危險，乃增加在首之數線匝之絕緣強度，但最好增加全數線匝之絕緣強度。此外復於發電機或變壓器之前插入保護抗流線圈且常帶一插於導線與地間之電容。瞬間波之波前因而趨於平坦而波被拒退。至在電力廠中則概以連接發電機及匯電條之電纜充電容。終則由裝置角形避電器亦可和緩過度電壓。

然為防過度電壓(過度電壓保護¹⁾)莫善於設法阻止帶危險性強波

¹⁾ 過度電壓保護；Überspannungsschutz；over (or excess) voltage protection；protection contre la surtension.

之發生。爲此除用整步時所用之開關外，常用帶各電阻階段之保護開關。再由裝置炮弧圈及炮弧變壓器（參考下節）以阻礙激起瞬間波之斷續的接地。又由適當配置導線網絡使波不致瀆澤電感但經歐姆導線電阻之阻尼作用終於消滅。以是之故，例如安培計上之變流器或自動斷路開關上之釋放圈均經歐姆電阻捷接。是種電阻極大，故尋常導線大部分之電流不能通過之。爲消滅瞬間波顯然以用環形網絡爲最佳，但其中導線支路之自動開斷較爲複雜。

98. 零點之接地¹⁾。

在交流裝置中，極端工作之主因爲斷續接地²⁾。設在架空線內第 1 線之絕緣體上發生一落地之閃絡，則常可生成一光弧，其電阻假定等於零。設想在閃絡之後繼以一穩定狀態。命 \bar{u}_1, \bar{u}_2 及 \bar{u}_3 表一變壓器之線電壓，其中以沿導線連零點之值爲正，故 \bar{u}_1 亦可由 \bar{u}_0 表明，其餘類推。零點之電位假定固定

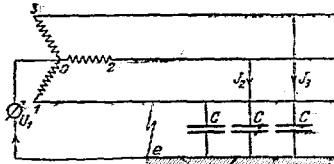


圖334. 從第1導線至地的網絡。

，故各線之電壓係對稱。導線與地間之磁場假定由帶 C 電容之容電器表明（圖334）。第 1 線上之容電器不帶電。在其他二容電器中之電流假定爲 \bar{J}_2 及 \bar{J}_3 而光弧中之電流等於 \bar{J}_0 。今以向地流動之電流爲正。第 1 導線既經光弧與地相聯絡，是以地與零點間之電壓等於 \bar{u}_0 。

今就第 2 接線螺旋經過電容 C 以連地之電路言之。在此路上之電壓消耗爲 $\bar{J}_2(-j\frac{1}{C\omega})$ 。此消耗等於由第 2 接線螺旋向 0 並從是處經過伏特計以達地之消耗，故等於 $\bar{u}_0 - \bar{u}_1$ 。據是， $\bar{J}_2 = j(\bar{u}_0 - \bar{u}_1)C\omega$ 。茲將各

¹⁾ 零點之接地：Erdnung des Nullpunktes; neutral grounding; mis à la terre du point neutre. ²⁾ 斷續接地：aussetwender Erdschluss; intermittent grounding; mis à la terre intermittente.

方程式列之如下：

$$\begin{aligned}\bar{J}_1 &= 0 \\ \bar{J}_2 &= j(\bar{u}_2 - \bar{u}_1)C\omega \\ \bar{J}_3 &= j(\bar{u}_3 - \bar{u}_1)C\omega \\ 0 &= \bar{J}_1 + \bar{J}_2 + \bar{J}_3 + \bar{J}_e\end{aligned}$$

\bar{u}_2 與 \bar{u}_3 之和既等於 $-\bar{u}_1$ ，故加積之得接地電流

$$\bar{J}_e = j\bar{u}_1 \times 3C\omega \quad (21)$$

光弧電流故超在電壓 \bar{u}_1 之前 90° 。當光弧電流通過零值之際，光弧呈被消滅之勢。在此瞬間，電壓 \bar{u}_1 達其 u_{1m} 巔值。如時間從此瞬間算起，則得關於 \bar{u}_1 之正弦曲線（圖335），後者為清楚計，係以 u_{10} 表明。

在地與零點間之電壓 u_{e0} 。當光弧電流通過之瞬間等於 u_{1m} 。此電壓並非突然減至零點，但循一指數曲線徐徐減小。

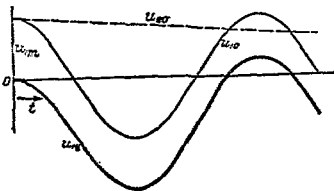


圖335. 光弧消滅後之電壓。

今確定消滅後病線與地間之 u_{1e} 電壓。為此命

$$u_{1e} = u_{10} + u_{e0} = u_{10}$$

$-u_{e0}$ 。

以圖表示此相差，則得

曲線 u_{1e} 。

由圖知病線與地間之電

壓經過半個週期之後幾乎等於相線電壓巔值之雙倍。此時在病處既尚未冷却且尚在強度游離狀態，致惹起回燃，此後再消滅。其時對於地之電壓為工作電壓之數倍，致裝置有被損毀之危險。更可慮者為在病處斷續波或瞬間波反覆不絕之釋放。變壓器及電機之繞組容易受是種波之害。

職是之故，常須使有危險之斷續接地變為永久的接地。其法為令網絡之零點接地，而於電壓適中時經過電阻，電壓極高時則直接。地因此變為一捷路。網絡之捷路電流通過病處，病線是以永久與地連接，以後由網絡之過度電流保護開去帶病之部分。

然尋常所遭遇之困難並非因有受損之絕緣體但因經大氣的擾亂及由瞬間波或由鳥及樹枝等所惹起之暫時接地。在是種情形中若用由零點接地所惹起之捷路仍屬無益，其時依據沛地生方法須在零點及地之間插入一抗流線圈(沛地生圈¹⁾)或吹弧圈²⁾(接地圈³⁾)。

在第336圖中命 \vec{J}_r 表光弧之電流及 \vec{J} 抗流線圈之電流。二者依矢首方向均為正。光弧燃時在抗流線圈之電壓，申言之，即地與零點之電壓復等於相線壓 \bar{u}_1 。故

$$\begin{aligned}\vec{J}_1 &= 0 \\ \vec{J}_2 &= j(\bar{u}_2 - \bar{u}_1)C\omega \\ \vec{J}_3 &= j(\bar{u}_3 - \bar{u}_1)C\omega \\ \vec{J} &= \vec{J}_1 + \vec{J}_2 + \vec{J}_3 + \vec{J}_r\end{aligned}$$

既然 $\bar{u}_2 + \bar{u}_3 = -\bar{u}_1$ ，故由加積得

$$\vec{J}_r - \vec{J} = j3C\omega\bar{u}_1.$$

設若不計抗流線圈之歐姆電阻，則當光弧燃時抗流線圈之電流(假定當時有 L 電感)： $\vec{J} = -j\bar{u}_1 : L\omega$ 。準此，視為剩餘電流之光弧電流

$$\vec{J}_r = j\bar{u}_1(3C\omega - \frac{1}{L\omega}).$$

設若 $1/L\omega$ 約等於 $3C\omega$ ，則光弧電流近於零。同時 $\vec{J} = -j\bar{u}_1 : L\omega \approx -j\bar{u}_1 \times 3C\omega$ 。故

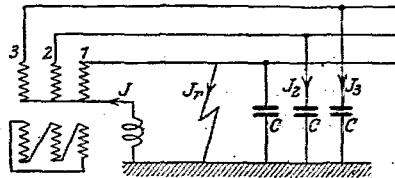


圖336. 沛地生接地圈。

依據第31方程式抗流線圈電流之強度近於在光弧中不帶抗流線圈時所發生者。故抗流線圈內大部分之電流係從光弧導出。

¹⁾沛地生圈； Petersenspule； Petersen coil； bobine de Petersen. ²⁾吹弧(熄弧)圈； Löserspule； blow-out coil； bobine souffleuse d'etincelles. ³⁾接地圈； Erdungsspule； Petersen coil； bobine de prise de terre-Petersen.

然抗流線圈之主要價值並不在此。其重要利用係在光弧消滅之後。今地與零點間之電壓 u_{e0} 係與抗流線圈之電壓相似。此電壓當光

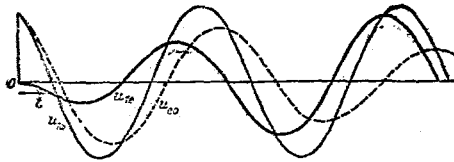


圖337. 光弧消滅後之電壓。

弧尚燃時係等於 u_{10} 而消滅之後則下降。此電壓當時不循一指數曲線但講學理依一被抑制之正弦曲線。當抗流線

圈之有效電阻小時，其頻率約等於網絡頻率（圖337）。

如以上所述之情形中在是處 $u_{10} - u_{c0}$ 之差復等於光弧消滅後病線與地間之電壓 u_{1e} 。此差起自零值，以後逐漸增至 u_1 之永久值。故導線病處有充分時間冷卻而回燃可無慮。

據經驗抗流線圈無經校準致使 $C\omega = 1/L\omega$ 之必要，申言之，不必恰使其電流（當有線電壓時）等於接地電流 J_e 。縱使有30%之差亦並不阻止滅弧作用。且準確的校準實不可能，蓋經天氣變動及網絡部分的插入及擷去，網絡之電容變動不已。

為防於抗流線圈準確校正時因電感及電容之串聯發生共振，令抗流線圈有一定之構造，俾當由電壓饋電時其在磁化曲線之際屈作工。

一種與由地生圈相同之作用亦可由飽克¹⁾之吹弧變壓器²⁾（亦稱熄弧器）惹起之。

第十七章 變壓器

99. 變壓器之構造及接法。

變壓器³⁾ 係由帶二繞組之一鐵體繞成。為便於冷卻及絕緣起見，

¹⁾ 飽克; Bauch. ²⁾ 吹弧變壓器或熄弧器; Léschtransformator; blow out transformer; transformateur souffléuse d'étincelles. ³⁾ 變壓器; Transformator; transformer; transformateur.

該器常浸在油中。——油冷變壓器（或曰油浸變壓器¹⁾）。

為減少渦流損失，其鐵體概由含矽分之合金鐵片所組成並因此祇帶有小損失指數。變壓器之構造或呈心式（內鐵式）或呈殼式（外鐵式）（圖338及339）。

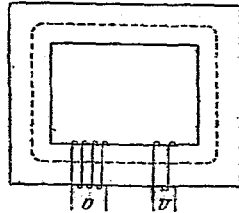


圖338. 單相交流適用之內鐵式變壓器。

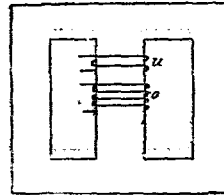


圖339. 單相交流適用之外鐵式變壓器。

其二繞組一組受取交流他組供給交流。供變壓用之變壓器之第一繞組係與外電路或通電網絡連接。在變流器²⁾（或曰串聯變壓器）中此繞組由無給電流通過。二繞組之匝數不等。其含有較多匝數者曰高壓圈(O)，其他曰低壓圈(U)。

圈之始端及末端往往由 A_1 及 E_1 或 A_2 及 E_2 表明。當繞向相同時，二組之始端在一處而末端在另一處。故正號計算方向均自A向E，雖則在二圈內電流之方向互向反對也。

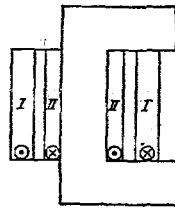


圖340. 框形繞法。

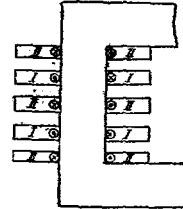


圖341. 層形繞法。

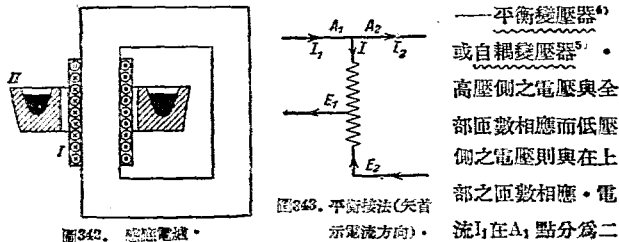
¹⁾油冷變壓器或曰油浸變壓器；Öltransformator；oil cooled transformer；transformateur à l'huile. ²⁾單相交流變壓器；Einphasentransformator；single phase current transformer；transformateur du courant alternatif monophasé. ³⁾變流器；Strom-oder Reihentransformator；current transformer；transformateur de courant.

在桶形繞組¹⁾中(參考第340圖),二圈分內外層位置而以僅略與鐵心絕緣之低壓圈在內層,為防隣近二區間電壓相差過大起見,高壓圈常細分為若干並置之單獨圈。

在盤形繞組²⁾中(參考第341圖),各繞組係由呈盤形之若干單獨圈組成,二組之各盤交換重疊成層,為便於與鐵絕緣起見,其中最外之盤係屬於低壓圈並為減少雜散起見,外盤之匝數僅及他盤之一半。

充感應電爐³⁾用之變壓器其第二圈係由含熔融金屬之槽所成,槽內之金屬經電流之熱維持而為熔融體(圖342)。

通常二圈須互相絕緣,二圈內電壓之數量級雖相差不大,然為減少售價及損失起見可依平衡接法令低壓圈成高壓圈之一部分(圖343)



一部分直接流入二次網絡內而剩餘部分則流入原線圈及副線圈公匝內。

又供昇壓用之變壓器尋常亦為成平衡連接之變壓器,在第344圖中假定在一鐵心上之二線圈之繞向係相同,恰如第343圖所示,此時二圈依同方向串聯而在網絡內共同惹起高電壓。

1) 桶形繞組; Röhrenwicklung; barrel winding. 2) 盤形繞組; Scheibenwicklung; disk winding. 3) 感應電爐; Induktionsöfen; induction furnace; four α induction. 4) 平衡變壓器; Sparttransformator; balancing transformer; transformateur diviseur de tension. 5) 自耦變壓器; Autotransformator; auto-transformer; auto-transformateur.

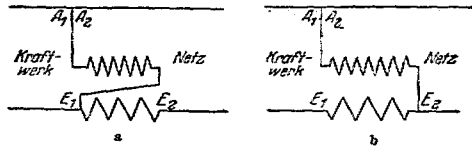


圖344a, b. 昇壓器。

在三相交流變壓器¹⁾內各相之線係分別繞在三鐵心上(見第 345 圖), 其中磁線路程少許之不整一並不發生關係, 或各相之線圈係繞在同一鐵心上並係經鐵體隔離(圖 346)。其中間線繞組之始端及末端與左右二外線之末端及始端相反對, 是以前間相隔之鐵體祇須有較小之橫斷面積。

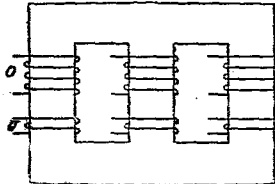


圖345. 三相交流心式變壓器。

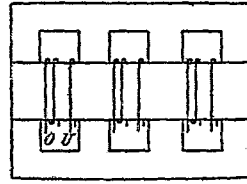


圖346. 三相交流殼式變壓器。

有時各線用一特殊單相變壓器, 俾遇發生擾亂時各器容易更換。

在三相交流變壓器上各相之原圈及副圈均可依星形或三角形或鋸齒形連接(參考第 108 節)。三相交流適用之昇壓器可依第 347 圖連接。因虛轉電流曲線畸變之故(參考第 138 面), 常用三角接法以代在原側之星形接法。

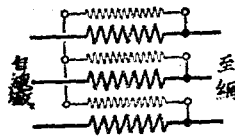


圖347. 昇壓器之接法。

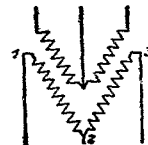


圖348. V字形接法。

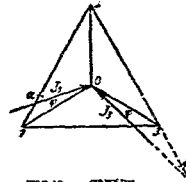


圖349. 電壓圈。

¹⁾ 三相交流變壓器; Drehstromtransformator; three-phase current transformer; transformateur triphasé.

極小三相交流變壓器爲減少售價起見可由兩單相變壓器依V字形接法¹合成。如於第348圖之二原繞組1,2及2,3中接入一對稱三相交流系之二電壓，則電壓3,1當與之對稱，同時又得三對稱副電壓而當有對稱負載時亦得幾乎對稱之副電流，後者使原電流亦對稱。

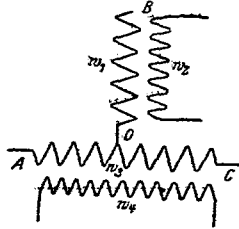


圖350a. 司谷脫接法。

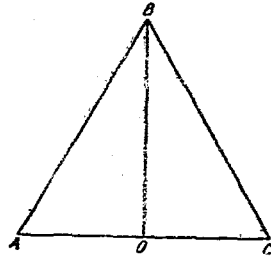


圖350b. 司谷脫接法中之電壓。

如命 φ 表三副線絡內之相差角，則兩繞組中之功率依據第349圖爲 $U_1 I_1 \cos \alpha$ 及 $U_2 I_2 \cos \beta$ 。二者恰在阿隆接法中相合而爲總功率 $\sqrt{3} UI \cos \varphi$ 。在此情形中網絡之值及相線之值係相等。同時在變壓器之12相線內之相差角等於 $30^\circ + \varphi$ ，在32相線內之相差角等於 $30^\circ - \varphi$ 。如是各線載有無用無功電流。

當工作時依三角三角連接之較大變壓器在移開有危險之高壓繞組時可成V字形連接而用之。在三角星形連接中，V字形接法唯當副星電壓呈極大非對稱時可能。

凡供變二相交流爲三相交流或反之之變相器²，依據司谷脫接法¹，係由二單相變壓器組成，其接法如第350a圖所示。在A, B, C各點，連接對稱三相交流電壓。依據第350b圖，其匝數與次列方程式相應

$$w_1 : w_2 = 0.866 w_3 : w_4.$$

¹ V字形接法; V-Schaltung; V-connection. ² 變相器; Phasentransformator; phase transformer; transformateur de phase. ³ 司谷脫接法; Scott'sche Schaltung; Scott-connection; connexion de Scott.

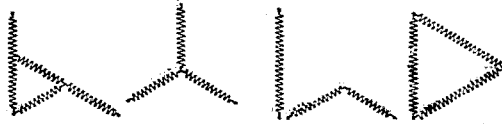


圖350c. 圖350d.

由二相交流變為三相交流。

此時在 w_2 及 w_1 之匝上得兩等大並互以 90° 相差之單相電壓，申言之，成為二相系。

德國 AEG 公司應用較廉之裝置構成如第350c及d之接法以代替司谷脫接法。在此法中用一帶三心之變壓器。如匝數適當，可發生對稱電壓。

在上述各情形中第一與第二兩圈之位置固定。其電壓間之比是以祇能由變動接點而變更。感應調整器¹ 則不然，其用單相交流時之特性與用三相交流時不同。

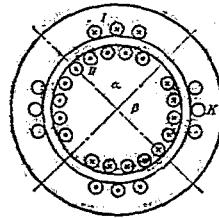


圖351. 單相感應調整器。

在單相感應調整器中，第一繞組係裝在固定子之內周（見第351圖）而第二繞組係裝在可旋轉之鐵質鼓體之全周上。二繞組之軸符合時，在第二圈內之產電壓最大。反之，若兩軸互成直角，則其值為零。就一般言，二繞組間之相互感應係經第二圈之一部分線匝對於第一圈線所惹起而此部分之線匝係在弧內。至在 β



圖352. 將電壓OB減至OA.

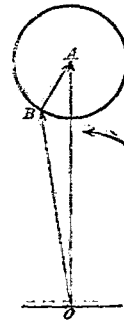


圖353. 將電壓OB昇至OA.

¹感應調整器：Induktionsregler；induction regulator；régulateur à courant d'induction.

弧內之第二線圈之線匝苟其作用不經對面固定子上之捷路繞組 K 所抵消可惹起危險自感應。

在三相交流感應調整器中依如第 123 節中所述之情形發生一旋轉磁場——可調準變壓器¹⁾。鼓體之旋轉對於第二圈內發生之電壓並無影響，但該電壓之相因此變動。此器係用在分站之昇壓器上俾導入於分站内之電壓發生漲落時網絡電壓仍可不變。今以某一定網絡電壓接於可旋轉之鼓體上之繞組並使固定子上之繞組串聯。在第 352 及第 353 圖中 OB 表由發力廠導入於分站内之電壓。依幾何法加於 OB 者又有昇壓器固定子繞組上之電壓 BA。由變動此電壓之相。網絡電壓 OA 終不變動，雖則電壓 OB 發生變動也。恰如在三相交流電動機中，在二繞組間既起相互轉矩作用，故必須有特殊裝置以鋼定可旋轉之部分。

在第 352 及第 353 圖中網絡電壓之相與發力廠電壓相較移動 AOB 角。若在網絡內須將變壓器平行插在兩邊，則此種差角必須除去。為此應用二相同感應調整器，使之先後連接而所增加之電壓對於發力廠之電壓為反向的移位。附加電壓之和或總電壓之和於是與發力廠之電壓同相。

100. 變壓器之磁化電流。

在無負載時，申言之，當第二線圈之電路開時，祇第一圈有效。導入於該圈內之原電壓惹起電流，而後者惹起一種隨時變動之影響以致發生電壓。如略去變壓器無載時常極小之內歐姆電壓耗，此電壓係與原路端電壓相等但相反。設命 Φ 表磁通量之巔值， w_1 原匝數， f 頻率，則依第 199 面第 23 方程式原電壓。

$$U_1 = 4.44 \Phi w_1 f. \quad (1)$$

磁通量係由雜散通量及在鐵體內又經副線匝包含之通量合成。雜散通量祇限於原線匝一方面，而當無負載時可以略去。故若命 w_2 表副

¹⁾可調準變壓器，Drehtransformator; adjustable transformer; transformateur réglable ou rotatif.

匝數，則在副線圈內之應電壓即所謂副路端電壓

$$U_2 = 4.44 \Phi w_2 f. \quad (2)$$

無負載時之電壓故與匝數為比例。

無載時流入之電流是以必須足以惹起由原路端電壓而定之磁通量。與額面電流相較，此電流極弱。如不計鐵損失，此無載電流為一純粹磁化電流並係以 90° 滯在原電壓之後，故為一種無功電流。茲為計算磁化電流假定 $f = 50$ 赫芝。

原電壓 $U_1 = 2000$ 伏

鐵橫斷面積 $F = 850$ 平方厘米

匝數 $w_1 = 160$ 。

鐵內之路程 $l = 110$ 厘米。

則

$$\Phi = \frac{U_1}{4.44 f w_1} = 8.5 \times 10^{-2} \text{ 伏秒。} \quad \mathcal{H}_m = \frac{8.5 \times 10^{-2} \times 10^9}{850} = 10000 \text{ 高斯。}$$

由第46圖每厘米含 3 安匝。故關於鐵部內激發之顛值為 $3 \times 110 = 330$ 安匝。

此外須加上鐵心與軛鐵間之間隙¹⁾之激發。間隙或以榫眼接合，在接合處鐵心鐵片交換與軛鐵片重疊，或夾入紙一層。

每一用榫眼接合之間隙可視為等於 0.0035 厘米之空氣長，而若為紙夾層則可視為等於 0.0135 厘米之空氣長。間隙激發強度之算法係與一發電機空際激發強度之算法相同。就上述一例而言，當一單相變壓器之四間隙以榫眼接合時其激發強度之算式如下：

$$(I_w)l = \frac{\mathcal{H}_m \times l}{\mu} = \frac{10000 \times 10^{-3} \times 4 \times 0.0035}{4\pi \times 10^{-7}} = 112 \text{ 安匝。}$$

故總激發強度等於 $330 + 112 = 442$ 安匝。當 $w_1 = 166$ 時，磁化電流之顛值為 $i_m = 442 : 166 = 4.15$ 安而有效值為 $I_{11} = 4.15 : \sqrt{2} = 3$ 安。

在帶三鐵心及一公軛鐵之三相變壓器中係依貫穿定律計算一外鐵心內之磁化電流之顛值 i_m 。若忽略三鐵心在一平面內惹起之非對稱狀

¹⁾間隙; Stossfuge; gap at joint; jeu du joint.

態，則當外鐵心內之電流達其顛值時，中間鐵心之電流等於 $0.5i_m$ ，總貫穿率故為 $1.5i_m w_1$ ——非對稱三相交流變壓器¹⁾。

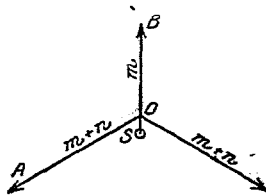


圖354. 三鐵心之無載電流。

茲假定感應之顛值為 ψ_m ，並據磁化曲線與之相應之磁場強度為 h 。外鐵心之通量之顛值既實際均分在其他二鐵心內，故中間鐵心之感應等於 $0.5\psi_m$ ，與之相應者為每單位長之激發強度 h_2 。若命 l_k 表鐵心之長， l_j 表外鐵心與中鐵心間

之軛鐵之二次長及 l_l 二間隙之空路長，則據貫穿定律

$$h_1(l_k + l_j) + \psi_m l_l : H_0 + h_2 l_k + \psi_m l_l = 2 H_0 = 1.5 \times \sqrt{3} I_m w_1 \quad (a)$$

若以伏秒/平方厘米計 ψ_m ，厘米計長 l ，安培計 I 及安/厘米計 h ，則 $H_0 = 4\pi \times 10^{-9}$ 亨利/厘米。

以上既假定僅在感應最強時存在之比較小的導磁性為全個週期內所有者，故由(a)式所示之磁化電流略許過大。

今欲確定三鐵心在無零電線之星形連接中而導磁性又固定時之非對稱之影響。命 m 表鐵心內之磁壓耗及 n 表軛鐵兩半內之磁壓耗。若忽略星點電位之位移，則當有對稱網絡電壓時，發生之反電壓及通量亦對稱。當時三磁壓耗成 120° 之角(圖354)。茲命 \vec{A} 、 \vec{B} 及 \vec{C} 表在三鐵心上之無載激發強度。今描出一閉曲線，令其自一鐵心出發，經其他一鐵心折回並因而包圍以相反符號表明之二鐵心之電流線。於是依貫穿定律

$$m_1 + n_1 - m_2 = \vec{A} - \vec{B} \quad m_2 - m_3 - n_3 = \vec{B} - \vec{C}$$

將二方程式相減，得 $\vec{A} + \vec{B} + \vec{C} = 0$ ，並因通量對稱關係， $m_1 + m_2 + m_3 =$

¹⁾ 非對稱三相交流變壓器；unsymmetrischer Drehstromtransformator；unsymmetrical three phase current transformer.

於是得

$$\begin{aligned} \bar{B} &= m_2 - \frac{n_1 + n_3}{3}, & \bar{A} &= m_1 + n_1 - \frac{n_1 + n_3}{3} \\ \bar{C} &= m_3 + n_3 - \frac{n_1 + n_3}{3} \end{aligned}$$

三鐵心之上激發是以到處含有一等大之補助激發 $SO = -(n_1 + n_3) \cdot 3$ ，後者加於為產生通量所必須之磁壓耗而其磁效應則消滅在三閉磁路內。此時 $\bar{A}, \bar{B}, \bar{C}$ 可由 SA, SB 及 SC 表明。S 係在重心，至是三電流之和等於零之條件遂驗。

相線電壓對於磁通量即對於 OA, OB 及 OC 既超前 90° ，故電流與磁壓間之角在第 1 線內成鈍角而在第 3 線內成銳角。是以第 3 線從網絡受取一功率而此功率經第 1 線回給於網絡內。

如據第 299 而在三鐵心上等大而又等相之補助激發惹起大雜散通量以致三星接電壓呈非對稱狀態，然其影響不大。

101. 飽和之影響。

1. 呈星形連接並帶原零電線之單相交流及三相交流。電壓呈正弦形時應為時間之正弦函數，第 355 圖。因飽和之結果，磁化電流

之曲線呈畸變形。其中含有一基本波 i_1 及一組諧波；諸波中以第三波 i_3 為主。在第 355 及第 356 圖中假定祇有基本波 i_1 及第三諧波 i_3 。若忽略磁滯，電流曲線係按其最大垂線對稱，申言之，當 $t = 0$ 時， i_1 及 i_3 均為零。該二曲線係由第 355 圖中之磁化曲線過出，而斜線按一定方位過出，俾該曲與磁化曲線

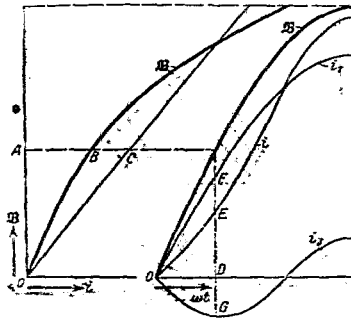


圖 355. 磁化曲線

圖 356. 電流曲線

間之最大水平距離相反而相等。當 $\varphi_1 = OA$ 時， $i = AB = DE$ ，因 φ_1 及 i_1 既互為比例， $i_1 = AC = DF$ ，故 $i_3 = CB = DG$ 。

2. 呈星形連接但不帶原零電線之三相交流。副繞組假定依星形連接。第三級之電流茲不能現出，因其在三饋線內具有 120° 之位移，故係同相，因而其和並非等於零。若忽略更高級之電流，則第 358 圖中之電流曲線呈正弦形，結果感應曲線故又相線電壓曲線呈畸變形。電流曲線此時復舍以第三諧波為主之諸波。第 358 圖係由第 357 圖導出，當時仍假定除基本波外祇有第三諧波。第 357 圖中之直線依一定方位描出，俾該線與磁化曲線間之最大垂距相反而又相等。當電流 $OA = DF$ 時，申言之，當有 AC 感應強度時，因 φ_1 及 i 互為比例之故， $\varphi_3 = AB = DG$ 及 $\varphi_3 = BC = DE$ 。

有三倍頻率之通量惹起之電壓其在三線內係等相且因每二線相反連接，其在網絡電壓內並不顯出。反之，星點對於接線端有具三倍頻率之重疊電壓，申言之，對於負載之星點或對於地有屬第三級之電壓。

在三相心式變壓器中有具三倍頻率之通量且因其同相並在中間鐵心相會之故依第 383 圖向側邊洩散而成為一大雜散通量，因其經隣近

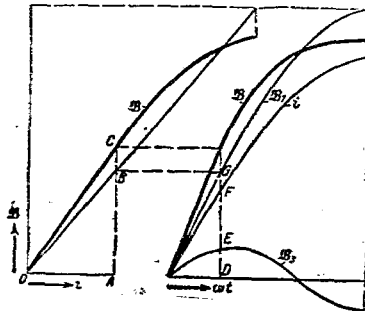


圖 357.
磁化曲線。

鐵部而閉合，例如經鍋爐殼緣而閉合並惹起額外之熱，是種雜散通量往往有害。

若副側依三角連接，則經各線內之具三倍頻率之同相電壓在三角內惹起一種屬第三級之捷路電流。此種電壓因而被消耗於內歐姆電阻內而不在網絡現出。同時捷路電流幾乎

圖 358.
感應曲線。

全阻遇具三倍頻率之磁場。此電流補充有單次頻率之電流以致磁場呈正弦形。在星形星形連接中若用成三角連接之第三繞組亦可惹起相同之結果。

3. 在原側呈三角連接者。是處若不忽略第三級以上之波，則感應及網絡電流均呈正弦形。在閉原三角內，恰如以前在副三角內，發生有三倍頻率之電流。此電流補充網絡電流，故雖飽和仍惹起所欲有之正弦形感應。

102. 鐵損失。

無載時變壓器除納取無功電流外又納取有效電流，後者供彌補因鐵損失而須之功率。是種鐵損失包括磁滯損失及渦流損失。

磁滯之影響可由第 359 圖中之磁滯迴線說明。例如就一單相變壓器作水平線表時間並作垂線表感應之時值(見第 360 圖)，則當路端電壓呈正弦形時，得一正弦形曲線。

觀第 359 圖當有 EB 感應強度時電流等於 OB，今就同一感應 EB 轉載此值於第 360 圖中。

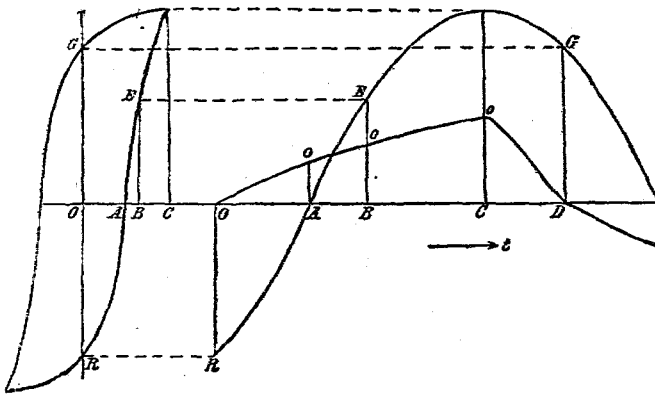


圖359。
磁滯迴線。

圖360。
磁感應及無功電流與時間之關係。

如是所成之曲線表示感及磁滯作用時磁化電流依時間之變動。此線不再為正弦曲線，故電流不能再由一線表示。依理論言，須依傅立葉¹⁾將電流曲線分解而為有各頻率之波且祇用基本波。如觀察第 360 圖即可知此基本波以一定角度趨在感應之前，可見此時之電流不再為純粹無功電流，故在無載時變壓器亦納取功率。

除磁滯損失外，又有渦流損失。第 361 圖示一變壓器鐵片之剖面

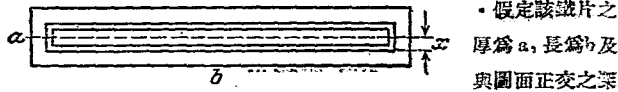


圖361. 一鐵片之剖面。

此剖面正交。渦流線之寬度為 dx ，其深為 q 及與鐵片中心之距離為 x ，其徑路如圖所示。鐵片之厚 a 與其長 b 相較既極小，故為該線包圍之最大通量當為 $\Phi = \mu_m 2xb$ 。

據第192面第23方程式當匝數 $w = 1$ 時使電流通過該線之有效電壓

$$E_x = 4.44 \Phi w f = 4.44 \mu_m 2xbf = k_1 x,$$

其中 $k_1 = 4.44 \mu_m 2bf$ 。

μ_m 表有效磁場之斯值。此磁場經變壓器之磁化電流及經渦流之磁效應發生。經此磁場所發生之電壓單獨消耗於歐姆電阻內。今寬為 dx 電阻係數為 q 之一閉渦流線之磁導為 $cdx : 2bq = k_2 dx$ ，其中 $k_2 = c : 2 \times 2bq$ 。據此則渦流損失

$$N = \int_0^{a/2} E_x^2 k_2 dx = k_1^2 k_2 \left[\frac{x^3}{3} \right]_0^{a/2} = k_1^2 k_2 \frac{a^3}{24}.$$

若代入 k_1 及 k_2 之值並以 abc 等於鐵片之體積 V ，則損失為

$$N = 1.65 \frac{(\mu_m f a)^2}{q} \times V.$$

所用之單位如次：損失以瓦數計，感應以高斯數計，頻率以赫芝數計；至鐵片厚度以毫米，體積以立方分米而電阻係數以歐姆 \times 平方毫米 \div

¹⁾ 傅立葉：Fourier.

米計算。據第33面

$$N = 1.65 \frac{(10^{-2} \eta_m^2 \times f 10^{-12})^2}{\rho \times 10^{-2}} \times 10^3 V.$$

$$100$$

但若以仟克計之重代以立厘米計之體積，則在右方復須以比重 7.7 分之。於是得

$$N = \frac{1.65}{7.7 \rho} 10^{-11} (\eta_m^2 f a)^2 G.$$

普通鐵之電阻係數 ρ 約為 0.4 歐姆 \times 平方毫米 \div 米，而在合金鐵中約為該數之五倍。

在實際情形中因鐵片絕緣不完全及因由諧波惹起之額外損失，電阻係數顯然增加。

今命 I'_h 表抵償全部鐵損失(包括渦流損失)之有效電流。此時據第363圖無載電流 I_0 係由無功電流或磁化電流 I_μ 及有效電流 I_h 組成。無功電流滯在電壓 U_1 之後 90° 並與感應同相，而有效電流則與電壓同相。設於無載時測出抵償鐵損失之功率 N_0 ，電壓 U_1 及電流 I_0 ，則得

$$\cos \varphi_0 = \frac{N_0}{U_1 \times I_0}, \quad (3) \quad I_h = \frac{N_0}{U_1} \quad (4) \quad I_\mu = \sqrt{I_0^2 - I_h^2}. \quad (5)$$



圖362. 無載。

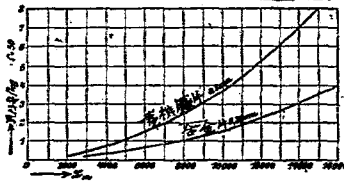


圖363. 頻率為50赫芝時之損失(瓦/仟克)。

預算時可由第363圖求得有50赫芝頻率時以瓦/仟克計之損失。在上述例題中， $U_1 = 2000$ 伏及 $\eta_m = 10080$ 高斯。據第363圖在此感應中，1仟克合金鐵片之損失等於 1.7 瓦。假定鐵重為 $G = 800$ 仟克，則無載損失當為 $N_0 = 800 \times 1.7 = 1360$ 瓦。據此，有效電流 $I_h = N_0 / U_1 =$

0.68安培。故在有 $I_{\mu} = 3$ 安培之磁化電流時，無載電流 $I_0 = \sqrt{I_{\mu}^2 + I_{\mu}^2} = 3.07$ 安培。

103. 有負載時之變壓器。

在無載時發生與路端電壓幾乎相反但相等之反電壓，故原線圈祇納取少量無載電流。然有負載時，此種自感應之效應似乎停止。其故因當時原繞組不僅在其固有自感應之影響下但又在副繞組之互感應之影響下，故由副繞組或第二圈導出電流時在原繞組或第一圈內有相當電流流入。

據功量（或能量）不滅律，若不計損失，經第二圈給出之功率當等於導入於第一圈內之功率，申言之， $U_1 I_1 \cos \varphi_1 = U_2 I_2 \cos \varphi_2$ ，若忽略少量磁化電流，則無功功率亦相等，即 $U_1 I_1 \sin \varphi_1 = U_2 I_2 \sin \varphi_2$ 。由此， $\varphi_1 = \varphi_2$ 及 $U_1 I_1 = U_2 I_2$ ，電壓既與匝數為正比，故電流當與匝數為反比——匝比¹⁾。若忽略磁化電流，則 $I_1 w_1 = I_2 w_2$ 。

若照凱普之手續注意二電流之磁效應，則所察見者頗為直觀。若忽略原電壓損失，加於第一線圈上之路端電壓惹起一種等大反電壓，

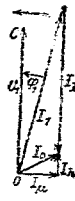


圖364.
經有效電流
之負載。



圖365.
變壓器之電流。
有額負載。

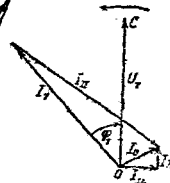


圖366.
電容負載。

故即惹起某一定量之通量，而此無論導出副電流與否均不變。為惹起是種通量，在各情形下均須有一等強之激發作用。此作用在無載時等於 $I_0 w_1$ 而當有負載時等於 $I_1 w_1$ 與 $I_2 w_2$ 之幾何的總和。後者以 w_1 分各乘

積，則無載電流 I_0 等於原電流 I_1 及電流 $I_2 w_2 / w_1$ 之幾何的總和。今令

¹⁾匝比: Windungsverhältnis; winding ratio; rapport de spires.

$I_2 w_2 / w_1$ 等於 I_{II} 並以此電流為依等匝數換算之副電流 (圖 364 至 366)

從副圈導出電流時，在原圈當有相當電流流入，俾副激發作用之磁效應被所增加之原激發作用之效應抵消。此二電流且有大致相反之相。此情形可根據下列設想而明瞭：在二圈內所發生之電流係由同一通量惹起，是以同相。今原電流恰如在電動機中係與產電壓反向，而經產電壓惹起之副電流，恰如在發電機中係與該電壓同相。

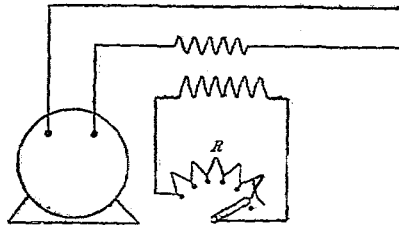


圖 367. 串聯變壓器。

在 364 至 366 圖中 CO 表在原圈內發生之反電壓及 OC 表路端電壓 U_1 。今 $U_1 = U_2 w_1 / w_2$ ，此 $U_2 w_1 / w_2$ 為依匝比換算之副電壓而係以 U_{II} 表明之。

上述之說明無論在變壓器之原線圈與一固定網絡電壓相連接之大多數情形中或如第 367 圖所示在原線圈與網絡相串聯之情形中均有效。此外假定副圈與一外有效電阻 R 相連接，此電阻可自 ∞ 變至 0 。在各情形中與第一圈相連接之電壓均如是之小，故其在變壓器上之變動不影響流入於網絡內之電流。因此 I_1 就量及相均不變動 (圖 368)。又副負載既為無感的一種，故表副電流之線依第 364 圖與表磁化電流 I_μ 之線正交，申言之， I_μ 線之末端在 I_1 直徑上描出一圓。飽和程度小時，原電壓印與磁化電流為比例並超前於該電流之前 90° ，故其線之末端亦作一

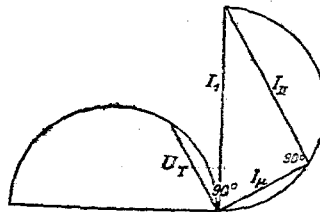


圖 368. 串聯變壓器。

圓，其直徑與 I_1 線相正交。

又 $R = \infty$ 時副線圈係開， $I_2 = 0$ ，故 $I_{\mu} = I_1$ ，原電壓當時最大，因流入於網絡內之全部電流皆起磁化作用而同時並無經副電流惹起之反磁化作用。磁通量又極大，以致繞組之絕緣質被大量鐵熱所燒毀。用變流計¹⁾時，因其副電路由一發電機所成，此電路決不開。

若 $R = 0$ ，恰如用變流計為計器時，副線圈被捷接而 I_{II} 等於 I_1 ，其時磁化電流及電壓幾乎均等於零。故在是處捷接不使電流之強度增加，但使變流計之原電壓沉降而為零。

104. 電壓損失考慮。

電壓損失首由二圈之有效電阻 R_1 及 R_2 所惹起。此外因除有穿過二圈之公共有用通量外又有僅與一圈相連繫之雜散通量，故由自感應亦惹起一種有害電壓損失。若原圈及副圈分別繞在二鐵心上，例如第359圖所示，則雜散通量極大而有負載時副電壓可降至零值。

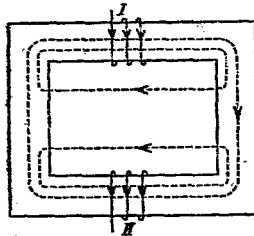


圖359. 有用通量及雜散通量。

雜散通量與惹起該通量之電流強度為比例。茲命經此雜散惹起之有感電阻為 x_1 及 x_2 。假定測得原電壓，電流強度及功率並因而又原電路內之相差角。又假定匝比為1。

從原電壓 $U_1 = OA$ (圖370)減去與 I_1 同相之 $I_1 R_1 = GA$ 及超在 I_1 之前 90° 之

$I_1 x_1 = EO$ 。原電壓之剩餘 OE 為抵消經公通量惹起之電壓 $E_1 = EO$ ，後者滯在 I_{μ} 之後 90° 。

當匝比為1時，在副圈內發生之電壓 E_2 亦等於 EO 。從此壓減去超在 I_2 之前 90° 之 $I_2 x_2 = CF$ 及與 I_2 同相之 $I_2 R_2 = FB$ 。剩餘之 BO 為經副圈惹起之路端電壓。此電壓有與原電壓相反對之相。然 U_2 須作從副網絡壓

¹⁾變流計；Stromwandler; current transformer, transformateur du courant.

入於變壓器內之電壓設想，故係由OB表示且與原電壓大致同相。

今若匝比不為1，則 $EO = E_1 = E_2 w_1 / w_2$ 及 $I_{II} = I_2 w_2 / w_1$ 。第370圖在此情形中亦適用，惟須代入依匝比換算而得之副電流及副電壓之值。

• 例如

$$EB = I_2 R_2 \frac{w_1}{w_2} = \frac{I_2 w_2}{w_1} R_2 \frac{w_1^2}{w_2^2} = I_{II} R_{II}$$

其中 R_{II} 表依匝比1換算之副電阻。又準此則 $EF = I_{II} x_{II}$ ，其中 $x_{II} = x_2 w_1^2 / w_2^2$ 。

第370圖旋轉 90° 後同時復為一通量圖。其中OC表原圈內之通量。若由此通量減去原雜散通量EC，則剩餘之通量為OE，後者在第371圖中由在A及B鐵內通過之磁力線表明。從OE減去副雜散通量FE，遂剩下通量OF。經此通量所發生之電壓抵償內歐姆電阻內及外電路內之副壓耗。

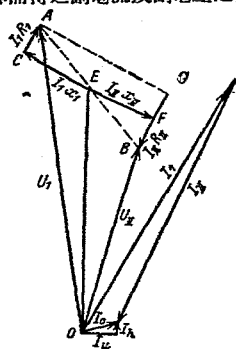


圖370. 電流圖及電壓圖。

依據第371圖又可設想副雜散通量為原圈之通量之一部分而可由副電流維持平衡之一部分原電流發生。然如在以前情形中此通量之量及相均與副電流有關，而經後者之反作用，此通量遂被壓入於雜散徑路內。

無負載時幾乎全部通量通過鐵內之徑路及副線圈。在副側導出之電流愈多時，雜散通量愈多而經副圈包圍之通量故又副電壓愈小。

成捷路時幾乎全部原電壓除去原歐姆損失均通過原雜散徑路及副雜散徑路。在副圈內僅通過為惹起與少量內歐姆壓耗相等之電壓之通量。

成理想捷路並假定 R_2 等於零時，

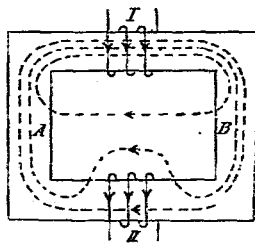


圖371. 經原電流產生之副雜散通量。

歐姆電壓故即副圈內之通量等於零，申言之，全部通量經副電流匝之反壓力壓入雜散徑路內。若忽略原圈之小電阻，則恰如在無載時原電流復僅為一種磁化電流，不過其值較無載時遠大，蓋經原電壓惹起之通量並非在穩定鐵部徑路內但在不穩定雜散徑路內發生。

今設想倒轉副電流之方向並以 I_2 為對於有效副電流效應維持平衡之一部分原電流。由是乃發生一種如第372圖所示之補充接法。依此法二繞組合併而成單獨一連接，準此可知 I_2 比較 I_1 小無載電流 I_0 ，而副電壓與原電壓僅差二繞組內之電壓損失。有感電阻 x 與無負載時之有用通量相當，歐姆電阻 R 極大，其電流熱與鐵損失相當。

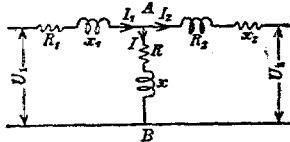


圖372. 補充接法。

若忽略少量無載電流，則 I_{II} 之量及相均與 I_1 同。第370圖中之全歐姆電壓損失遂為

$$BG = I_1 R_1 + I_1 R_{II}$$

若命 $R_1 + R_{II} = R_k$ ，又 $x_1 + x_{II} = x_k$ ，則照凱普手稿殆可視二繞組為有 $z_k = \sqrt{R_k^2 + x_k^2}$ 總電阻及為原電流通過之一單獨圈。除去總電壓損失 $U_k = I_1 z_k$ 之後，乃依第 373 圖剩下由換算而得之副電壓。

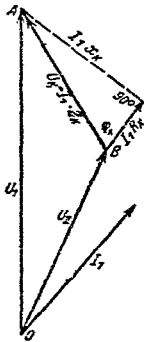


圖373. 全壓率 $I_1 z_k$ 。

關於固定原電壓及固定原電流以及關於可變動之相差於是有凱普之電壓圖（圖 374），其中表原電流之線故意置在垂軸上。OA 及 AB 當表在全部變壓器內之電壓損失。U₁ 線之末端 C 既在一圓上，而 B 因定原電流亦固定，BC 當表在各種實際狀況下由換算而得之副電壓。

電壓超前於電流之前時，C 在左象限內，由換算而得之副電壓當小於原電壓。若電壓與電流同相，則原電壓與副電壓之差極小。終至有

負號相差時，換言之，當有電容負載¹⁾（簡稱容載）時，C在右象限內，由換算而得之副電壓當大於原電壓。

R_k 及 x_k 二電阻可由實驗確定。為此將副側捷接並令原側與電壓 U_k 相連接。該電壓不大，俾由此惹起之電流等於額面電流 I_1 。當發生捷路時鐵損失既等於零，而導入之功率 N_k 祇須抵消銅損失，故

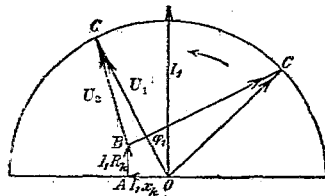


圖374. 關於固定電壓及電流強度之電壓圖。

$$\cos\varphi_k = \frac{N_k}{U_k I_1} \quad (6) \quad R_k = \frac{U_k}{I_1} \cos\varphi_k \quad (7)$$

$$x_k = \frac{U_k}{I_1} \sin\varphi_k \quad (8)$$

若不用捷路試驗，內電阻亦可經反接法確定。當匝比為1時，依據第375圖將二繞組在一側直接連接，而在他側經一伏特計連接。繞阻之繞向相同時，命在同位置之末端相連接，是以產電壓互相反接。在有負載時，伏特計祇指出電壓之差，即內壓降。為安全起見，在各情形中用一種適於二倍原電壓之伏特計。當實際測得此種電壓後，乃變動二圈之連接。今在副側連接負載。功率計之電流圈遂為原電流通過，電壓圈測出電壓損失 U_k 。命 N_k 表讀出之功率，則由上列方程式可求出 R_k 及 x_k 。

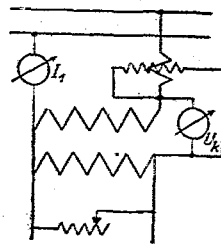


圖375. 反接； $w_1/w_2=1$ 。

隨額面電流發生並經捷路試驗或經反接法測定之內壓耗 U_k 謂之捷路電壓²⁾。凡變壓器其原側及副側分別與一網絡連接者必有等大內壓損失而此與其大小及構造

¹⁾電容負載或容載；Kapazitive Belastung；capacity load；charge capacitive. ²⁾捷路電壓；Kurzschlußspannung；short-circuit voltage；tension de court-circuit.

無關。其原側僅納取依構造而定之額面電流，其內視電阻 z_k 一定，俾額面電流與阻抗之乘積等於原網絡電壓與由換算而得之副網絡電壓之差。由利用接點可調整匝比故可調整納取之電量。

捷路電壓 U_k 又限制發生捷路時隨總網絡電壓發生之電流 I_k 。若命 I_1 表額面電流，則由 $I_k = U_1 : z_k$ 及 $I_1 z_k = U_k$ 得

$$\frac{I_k}{I_1} = \frac{U_1/z_k}{I_1} \quad \frac{I_k}{I_1} = \frac{U_1}{U_k}$$

捷路電流與額面電流之比是以等於額面電壓對於捷路電壓之比。當發生捷路時因繞組受強烈機械的影響在大高壓裝置中須有10%之強捷路電壓。為此於設計時依比例增加雜散通量。

105. 雜散之算法。

在桶形繞組中命 w_1 表原匝數， Δ 空間距離， Δ_1 及 Δ_2 二繞組之高， U_m 空間之平均周長及 h 鐵心之長。間隙以外之空氣內之磁力線路之磁導假定等於零。據第55面間之磁感。

$$L_l = w_1^2 \Lambda_l = w_1^2 \Pi_0 \frac{U_m \Delta}{h}$$

除在空氣間隙內之雜散線外又有在銅內之雜散線而後者祇與繞組一部分相連繫。在如第376圖所示之理想化磁力線循環中，通量在 dx 之寬度內與 $w_1 x / \Delta_1$ 匝相連環。此通量穿過有 Π_0 。 $U_m dx/h$ 磁導之空間。其磁感故為

$$L' = \int_0^{\Delta_1} \frac{w_1^2 x^2 \Pi_0 U_m dx}{\Delta_1^2 h} = w_1^2 \frac{\Pi_0}{h} U_m \frac{\Delta_1}{3}$$

又副雜散線亦有磁感。一鐵心原副二側之總磁感故為

$$L = w_1^2 \frac{\Pi_0}{h} U_m \left(\Delta + \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{3} \right) \quad (9)$$

當 $\omega = 2\pi f$ 時， $x_k = L\omega$ 。 x_k 係以歐姆數計而 $\Pi_0 = 4\pi \times 10^{-9}$ 以亨利/厘米，長以厘米而 f 以赫芝計。

茲舉一例爲嘗， $U_1=2900$ 伏， $I_1=6$ 安， $w_1=1300$ ， $U_m=60$ 厘米， $h=40$ 厘米， $f=50$ 赫芝， $\Delta=0.9$ 厘米及 $\Delta_1+\Delta_2=3.6$ 厘米，則

$$L = \frac{1300^2 \times 4\pi \times 10^{-9} \times 60}{40} (0.9 + 1.2) = 6.64 \times 10^{-2} \text{亨利}$$

當 $\omega=2\pi f=314$ /秒時， $x_k=21$ 歐及

$$\frac{I_1 x_k}{U_1} = \frac{6 \times 21}{2900} = 4.3\%$$

在盤形繞組中（圖377）雜散則遠遜。命 n 表一鐵心之原盤數， l

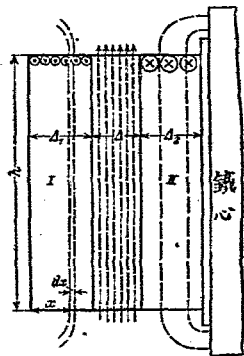


圖376. 桶形繞組之雜散通量。

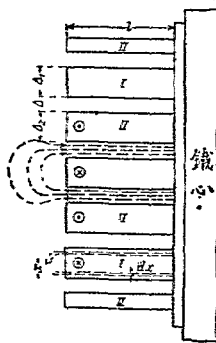


圖377. 盤形繞組之雜散通量。

表繞組高， U_m 一匝之平均周長， Δ 空氣距離及 Δ_1 及 Δ_2 繞組寬度。磁力線既往返通過 l 路，故當單獨原線圈之匝數爲 w_1/n 時，空間之磁感爲

$$L_l = \left(\frac{w_1}{n} \right)^2 \frac{\mu_0 U_m \Delta}{2l}$$

雜散線在原線部內作理想化的循環時通量沿寬度 dx 與 $2x/\Delta_1 \times w_1/n$ 匝相連環。此通量通過有 $\mu_0 U_m dx/2l$ 磁導之空間。由原繞組空間所惹起之磁感故爲

$$L^s = \int_0^{\Delta_1/3} \left(\frac{2xw_1}{\Delta_1 n} \right)^2 \frac{\mu_0 U_m dx}{2l} = \left(\frac{w_1}{n} \right)^2 \frac{\mu_0 U_m \Delta_1}{12l}$$

又雜散線在副銅部內亦惹起磁感。n 盤既互相串聯，故一鐵心之磁感為

$$L = \frac{w_1^2 \Pi_0 U_m}{\alpha^2 l} \left(\Delta + \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{6} \right) \quad (10)$$

若長以厘米及磁感以亨利計，則 $\Pi_0 = 4\pi \times 10^{-9}$ 亨利/厘米。

假定

$$\begin{aligned} w_1 &= 1300 & U_m &= 80 \text{ 厘米} & f &= 50 \text{ 赫芝} & n &= 6 \\ \Delta &= 0.9 \text{ 厘米} & \Delta_1 + \Delta_2 &= 6 \text{ 厘米} & l &= 5 \text{ 厘米} \end{aligned}$$

則

$$x_k = L\omega = \frac{169 \times 10^4}{6} \times \frac{4\pi \times 10^{-9} \times 80}{10} \left(0.9 + \frac{6}{6} \right) 2\pi \times 50 = 16.6$$

歐姆。

106. 變壓器之損失及效率。

一變壓器之損失包括電熱損失 $I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2$ 及由無功功率 N_0 測出之鐵損失。鐵損失包括磁滯損失及渦流損失。在有一定感應時，磁滯損失與頻率之一次幂為比例。反之，渦流損失與頻率之二次幂為比例，因渦流之電壓及強度均與頻率為比例也。此二種損失故可分開。變壓器可由一發電機饋電，其時由調整該機之激發強度可使變壓器於預定之頻率下供給預定之電壓。此後不變激發強度但變動轉數。電壓及頻率既均依同比例變動，故據第 280 面第 1 方程式，感應不變。終則恰如在第 160 圖中作水平線表示頻率及作垂線表示全部電壓損失與頻率之比例並恰如在直流電機中分開諸損失。

由損失求出之效率

$$\eta = \frac{U_2 I_2 \cos \varphi_2}{U_1 I_1 \cos \varphi_1} = \frac{U_2 I_2 \cos \varphi_2}{U_2 I_2 \cos \varphi_2 + N_0 + I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2} \quad (11)$$

負載小時，鐵損失占顯著部分而負載大時電熱損失占顯著部分；在二情形中效率均小。二損失約略相等時效率最高，例如可達 0.98。

效率可直接由測定輸入之功率及輸出之功率而決定。然以用第 11 方程式由損失算出為有利，而無發力廠以供給所須之功率時且為惟一

的方法，其時鐵損失為無功損失而銅損失為有額面電流時之迴路損失。

然又可採反工作法將損失於有全載時直接測出且毋須從發力廠運出與全載相當之功率。依此法(第378圖)令二個等變壓器之原繞組1及4與網絡相聯絡。

在繞組4之前連接一小輔助變壓器之副繞組6並令該器之原繞組5與一電阻R相串聯並與網絡相聯絡。欲檢驗

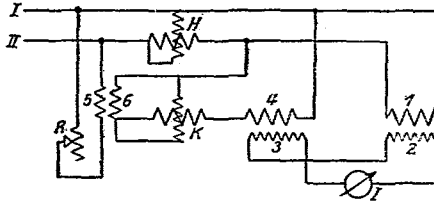


圖378. 反工作。

之變壓器之副繞組2及3係經一伏特計連接。若當時指出繞組之連接實際相反，則用一安培計代替伏特計。以後由調整電阻R俾安培計指出預定之電流I。在上述連接中，1之電壓大於4之電壓。例如認正計算方向為自I向II，則在1內及2內之正計算方向均為自右向左。又在3內及4內之計算方向亦為自右向左。至在5內及6內之計算方向為自下向上。今 $\vec{u}_1 + \vec{u}_6 = \vec{u}_5$ ，申言之， \vec{u}_1 較 \vec{u}_6 為大。故功為自1輸至2，自2輸至3，再由3輸至4，申言之，1為全連接之原線圈而4為副線圈。準此，流入繞組1內之電流，其大部分由繞組4回給。若無功電流及鐵損失皆小，則功率計測出兩變壓器之鐵損失H及銅損失K。在各情形中二偏轉之和表示全部損失。

此法自然推在輔助變壓器及R電阻內消耗之功率小時適用。設在此情形中，線圈5與主變壓器連接在同一網絡上，則其匝數與線圈6之匝數相較須大俾電流強度可小。

若倒轉輔助變壓器之網絡連接，則功率為自線圈1輸入於線圈1內。若用輔助圈提高由網絡饋電之變壓器之在副側之電壓或第二變壓器之在與網絡連接之副側之電壓，則二變壓器之全部損失顯然遠為簡單。其時毋須用輔助變壓器。

此法可用以測出在有全載但無功率消耗時之效率。在發熱問題中

法尤為重要。

107. 在有非對稱負載時之三相交流變壓器。

由佈電網絡饋電之三相交流變壓器在副側係依星形或鋸齒形連接，俾燈可用星電壓，電動機可用連環電壓。茲須檢討負載之非對稱狀態之影響。變壓器有帶無關通量與帶有關通量者之別。不相關之通量如在依第 346 圖之殼式變壓器中或在由三單相變壓器連成之三相交流變壓器中——通量之獨立¹⁾。相關之通量如在依第 345 圖之心式變壓器中。

a) 星形星形連接。通量不相關時每相線可用依第 372 圖之代用連接法代替，而消耗電路為非對稱時原星接點及副星接點之電位均可照第 233 面確定。非對稱使星點之電位離開電位三角形之重心並因而使相線電壓非對稱。

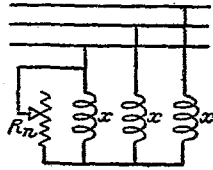


圖379. 單方面負載。

消耗電路之強非對稱且阻止負載。在如第 379 圖所示之代用連接法中，例如 x 表三有感無載電阻而係由電壓對於無載電流之比例決定者， R_m 表插在線 1 內之有用電阻。線 1 內之電流既又通過其他線，則諸線之大無載電阻有如抗流線圈之作用。因此連接於較小之有用電阻之電壓以星點電位移動之故不大。

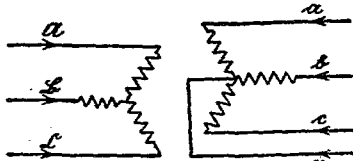


圖380. 星形星形連接。
矢首指示正數線計算方向。

故負載非對稱時星形星形連接惟當在原側亦接有一零導線或設有平衡變壓器²⁾者可能。該變壓器在原側依三角形連接，副側依鋸齒形連接³⁾。其中副星點之電位

1) 通量之獨立；unabhängigkeit der Flüsse；independence of flux；independence du flux. 2) 平衡變壓器；Ausgleichstransformator；balancing transformer, transformateur (galisateur). 3) 鋸齒形連接；Zickzackschaltung；zigzag connection；connexion zigzag.

固定，恰如第300面三角星形連接中然。

今討論三通量相關時之情形，恰如心式變壓器中（圖380）。作一閉曲線通過二鐵心及連此鐵心之軀體，一方面忽略無載電流，故以磁壓耗等於零。若依第380圖命A, B及C表三鐵心之原電流匝及a, b, c表副安匝，則依貫穿定律

$$\left. \begin{aligned} A+a-(B+b) &= 0, & B+b-(C+c) &= 0 \\ \text{或 } A+a &= B+b=C+c. \end{aligned} \right\} \quad (a)$$

今因原星形連接 $A+B+C=0$ 。反之，若命j表示副零導線內之電流與副匝數之乘積，則得

$$a+b+c+j=0.$$

將表示此二關係之方程式相加，得

$$A+a+B+b+C+c+j=0,$$

或依方程式a

$$A+a=B+b=C+c=\frac{-j}{3}. \quad (b)$$

原副兩安匝數之總和，申言之，各心之合成貫穿率故並非等於零但等於副零導線內負電流之三分之一與副匝數之乘積。

如假定僅線1帶負載。故電流b及c均為零。同時依據第381圖 $j=-a$ 。準此則依方程式b

$$A = -2/3a, \quad B = a/3, \quad C = a/3.$$

其中如不計符號，諸電流均同相。例如命 $a=30$ 安，則三鐵心上之合成貫穿率各等於 $30:2=10$ 安，其在第一鐵心上所以然者，則因30安之副電流超出20安之原電流10安培之故（圖381）。

就一般言，在三心上有一等大並同相之額外激發，其作用在鐵體閉路內消滅。然能依第382圖惹起一種激烈雜散磁場，後

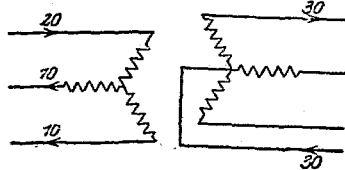


圖381. 星形星形連接。
矢首指示電流方向。

者係與二繞組相聯絡故與其他雜散磁場不同。此磁場在三線內均惹起等大電壓 E_z ，後者滯在電流 i 之後 90° 且雜散磁場之磁阻雖大，此種電壓並非不大。

在第383圖中由鐵內之通量惹起應電壓 E' , E'' , E''' ，其總和等於零，且係對稱。在各線內該種電壓上復加輔助電壓 E_z ，以致總電壓 E_1, E_2, E_3 均非對稱。在心式變壓器中在有強非對稱負載時星形星形

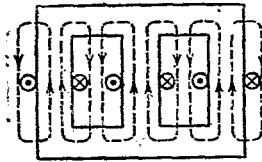


圖383. 在三心之上之合成貫穿現象。

副繞組於原繞組開時互相並聯並令單相的與有網絡頻率之電壓 U 相連接俾總流等於上述零導線內之電流。若忽略歐姆電阻，則電壓 U 等於所惹起之反電壓，即等於 E_z 。

b) 三角星形連接。在第384圖中作副電壓圖之線與相當原線平行。又正號方向務須二次符合。例如依接線圖原電壓 UV 等於副電壓 u_0 ，因二者在第一心內均自上向下計算。在電壓圖中， UV 及 u_0 之方向及正計算方向亦必一致。

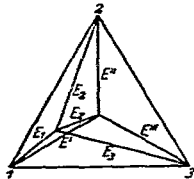


圖383. 星點電位之移位。

合成貫穿率遂為零。

然三角星形連接之應用亦受限制；即其中在各線始末之線匝務須

1) 變壓器之輔助雜散磁場；zusätzliches Streufeld des Transformators. auxiliary strayfield of transformers. 2) 維特考；Vidmar.

連接故不適用。強雜散通量（變壓器之輔助雜散磁場¹⁾，見第283及284面）且又因其進入隣近鐵體內致惹起額外熱量而不利。

維特考為測輔助電壓 E_z 令三

副繞組於原繞組開時互相並聯並令單相的與有網絡頻率之電壓 U 相連接俾總流等於上述零導線內之電流。若忽略歐姆電阻，則電壓 U 等於所惹起之反電壓，即等於 E_z 。

據是以觀，可見在三角星形連接中副星電壓由原網絡電壓決定，故係對稱。故縱使有非對稱負載時，副星點之電位亦在重心點。今若忽略無載電流，由一鐵心導出之副星電壓之磁效應全被同一鐵心之原電壓抵消而

有強絕緣以防瞬間波。

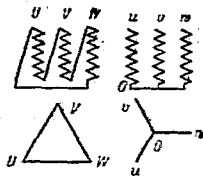


圖384. 三角星形。

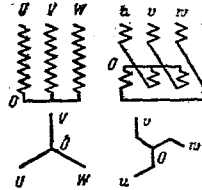


圖385. 星形星形。

o) 星形鋸齒形連接。二繞組成星形連接。然副繞組分為兩半，各半係在不同鐵心上並依相反方向串聯(圖385)。若在接線圖中原側亦循自o向u之副側徑路，則電壓 $ou = 0.5VO + 0.5OU = 0.5VU$ 。

副線電壓或星電壓是以必須與原網絡電壓相當，故係對稱而副星點係在電位三角形之重心縱使有非對稱負載時亦然。電漏¹⁾與原星點之電位之位置無關。

變壓比即原電壓與副電壓之比，但在是處不再等於 $w_1:w_2$ ，而為

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{w_1}{w_2 \times 1/2\sqrt{3}}, \quad \text{或 } w_2 = \frac{U_2}{U_1} \times \frac{w_1}{0.866}.$$

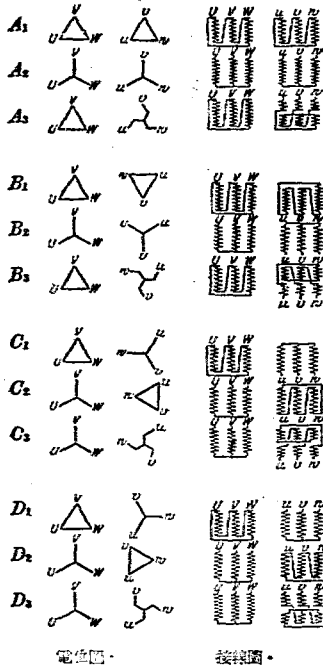
準此以觀，與星形星形連接中相較，副匝數必須依1:0.866之比例而增加。此為鋸齒形連接之一缺點。

108. 三相交流變壓器之並聯。

若干變壓器其原側及副側各與一網絡相連者在原副二側均並聯。命U, V, W 表原接線螺旋，u, v, w 表相當之副接線螺旋。因惟有等電位之接線螺旋方許連接，故變壓器分為若干羣。一羣之各份子許與同羣之各份子但不許與他羣之份子相並聯。

第386圖A羣中之在 A_1 及 A_2 之變壓器在原副二側呈相同連接(三角三角形及星形星形)而始末有相同連接。副電位各藉接線圖由原

1: 電漏; Ableitung; leakage; perditeance.



電位圖 · 接線圖 ·

圖336.

電位顯出兩次互相符合。又 A 羣在 A₃ 亦有變壓器，其原側呈三連接，副側呈鋸齒形連接。其電位圖與在星形星形及三角三角形連接中同。

B 羣係由換接 A 羣之一繞組之始端及末端而導出。因此電壓移位 180° 而電位圖倒轉。其電位圖顯然指出該羣之份子不能與他羣之份子相並聯但僅能自相並聯。

C 羣中含有呈三角星形及星形三角形連接之變壓器，在 C₃ 又有呈星形鋸齒形連接之變壓器。其中副電位亦互相符合。

D 羣係由換接 C 羣之繞組之始端及末端而導出係依如下之方法。

為令一網壓器在一網絡上與其他變壓器並聯，其法如下。將欲連接之變壓器之原側插入電路內並令其一副接線螺旋 x, y, z 與副網絡之

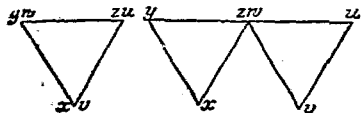


圖337. 二等電位接線螺旋之連接。

圖338. 二等電位接線螺旋之連接。

一接線螺旋 u, v, w 相連接，例如令 v 與 x 相連接。次用一伏特計試驗二接線螺旋對是否有相等電位。如若電位不等，則令 v 與 y 連接或甚至令 u 與 z 連接後再

三試驗之。設由是尙不能達到目的，則所連接之變壓器必不與網絡上其他變壓器同羣。

若不由試驗，則亦可作電位圖以代之。圖中表出之電壓等於圖面內電位之距離。爲此先確定 uvw 三角形。次例如令接線螺旋 v 及 x 連接

(圖387)。經測計確知 y 與 w 間之電壓及 z 與 u 間之電壓均等於零。於是 x 及 v 、 y 及 w 、 z 及 u 有等大電位。其時 x 須與 v 、 y 以 w 及 z 以 u 表示。

若已將 w 及 z 連接，則可用測得之電壓製出第388圖。由平行移動亦見 x 須與 v 、 y 與 w 及 z 與 u 相連接。

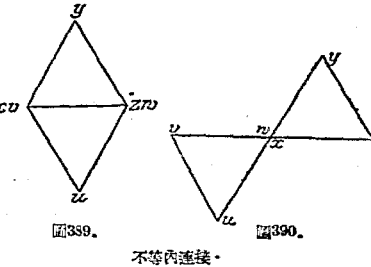


圖389. 不等內連接.

若電位圖之位置如第389及390圖中所示，則須將原繞組或副繞組之始末交換。在屬C羣及D羣之變壓器中又可交由換二原導線以代之。例如令有 C_1 連接之變壓器變爲有 D_1 連接之變壓器。其法在第391a圖中令示網絡電位之原電位圖不變，但在接線圖中令 U 與 V 交換(圖391b)而同時不變更連接。在副側作如D羣中之電位圖。至是可見副電壓 ou 依據電位關係等於原電壓 VU 。又 ov 等於 WV 及 ow 等於 UW 。其接線螺旋圖如第391b圖所示。設欲交換 U 及 V ，則必須在副側交換 v 及 w 。

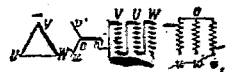


圖391 a及b. 自 C_1 移至 D_1 .

若電位圖之位置係如第392圖中所示，則所連接之變壓器係屬於A羣或B羣，而其他則屬於C羣或D羣或反是。並聯故不可能。

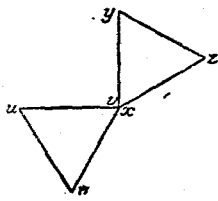


圖392. 不同羣.

第十八章 交流電機之構造及電壓。

109. 交流電機之構造。

交流電機¹⁾就其構造大別為同步電機²⁾，異步電機³⁾及帶換向器之電機。

同步發電機⁴⁾及同步電動機⁵⁾含有一固定電樞。電樞係由鐵片製出，特稱曰固定子，簡稱定子⁶⁾。由其接線螺旋通常導出或導入高壓交流。此外又有一轉動磁鐵體，其中由匯電環導入供激發用之直流。磁鐵體在慢轉電機中為一裝磁極之輪而在速轉輪機電機中為一鼓形體（圖393）。一種屬於同步電機之轉動換流機為一直流電機，其中除換向器外又帶匯電環。

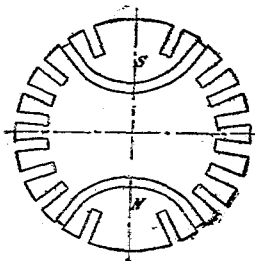


圖393 蒸汽輪機電機之磁鐵體。

異步電機均用三相交流且照例多為電動機。外面固定部分即所謂固定子係等於一同步電機之電樞並係從外面饋電。轉動子內經固定子之磁效應惹起感應電流。

帶換向器之電機為電動機，其中一個帶換向器及繞組（如在直流電機中）之電樞在一通交流之固定子內旋轉。

交流電機中之圈邊係指屬於一相線之線或一極節距之金屬條。為利用圓周並減少有害的自感應，各圈邊係置在多數槽內。

1) 交流電機; Wechselstrommaschine; alternating current machine; machine à courant alternatif. 2) 同步電機; Synchronmaschine; synchronous machine; machine synchrone. 3) 異步電機; asynchronmaschine; asynchronous machine; machine asynchrone. 4) 同步發電機; Synchron-Stromerzeuger; synchronous alternator; alternateur synchrone. 5) 同步電動機; Synchronmotor; synchronous motor; moteur synchrone. 6) 固定子或定子; Stator; stator.

單相交流電機中之圈邊之寬度¹⁾或圈節距在全部圓周繞線時係等於一極節距，然圓周大都祇一部分繞線。

在三相交流繞組²⁾中，除帶換向器之電機外，圈節距等於 $1/3$ 之極節距。圈邊尋常係分置在二槽至四槽內，在三相交流電動機之轉動子中則分置在三槽至七槽內（交流電機之槽數³⁾）。輸機電機因速度極大有極少極數，甚至有數仟瓦特功率之巨機往往仍祇有二極。因其極節距頗大之故，是種電機之圈邊須分置在較多數之槽內。在帶換向器之三相交流電機之電樞中，圈節距等於 $2/3$ 極節距。

小型電機之圈繞組⁴⁾其首（繞組首⁵⁾）概呈條帶狀，屬於一圈邊之諸槽之首長短不等（第394圖）而概綜合為一公共繞組首。在多相電機中，不同相線之首之相互接觸係依第394圖所示之方法或依相似之方法選去。

大型電機含有條繞組，恰如在直流電機中其首端連接係依第395圖呈叉狀，分為二部，分別在不同首端面內。有時呈交叉形如依第397圖。在二情形中屬於一圈邊之諸槽之首均等長。

一圈邊之首端連接又可依第396圖分作等半部分沿圓周之相反方向配置。於是可大減繞組之長。屬於是種繞組者又有依第398圖帶雙層之條繞組。在是種反向串繞法中，屬於一相線之條繞組之一半自相連接，而其他繞向相反之一半則連接於其後。在是種繞組中，圈首係

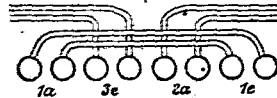


圖394. 一繞圈繞組之首。

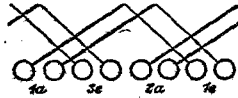


圖395. 叉狀首端連接。

1) 圈邊之寬度; Breits der Spulenseite; width of coil side. 2) 三相交流繞組; Drehstromwicklung; three phase current winding; enroulement du courant triphasé. 3) 交流電機之槽數; Nutenzahl der Wechselstrommaschine; number of slots in alternating current machines; nombre des rainures dans les machines du courant alternatif. 4) 圈繞組; Spulenwicklung; coil winding; enroulement à bobines. 5) 繞組首; Wicklungskopf; winding head; tête d'enroulements.

在三平面內。在圈邊之首依同一方向配置之繞繞中，圈首係在二平面內(圖394)。

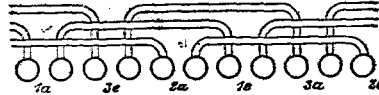


圖396. 圓繞組，其首端連接依相反方向。

就理而言，無論用線圈或條，環形繞法及波形繞法均可用。在環形繞法中，一圈邊之槽依繞徑直接順接。在波形繞組中經反覆往返串聯。

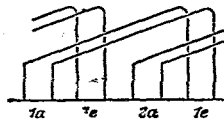


圖397. 交叉首端連接。



圖398. 棒繞組，其首端連接依相反方向。

今假定節距距等於 $1/3$ 之極節距，先指出第一相線之前圈首並假定在此線內有最強電流通過。其圈邊依據第227面係為他相線之圈邊所包圍。在他相之圈邊內則有同向但僅有一半強之電流通過。在第一線內電流矢之首尾及第二相線之槽均用粗線表明以示區別。三線之始

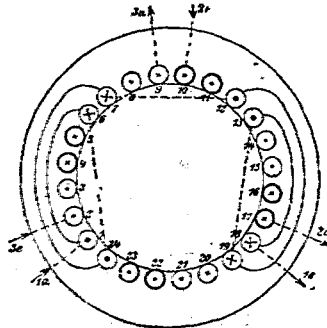


圖399. 四極線環繞組，其首同向。

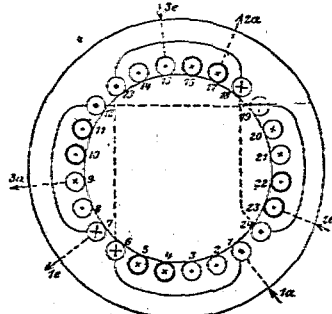


圖400. 四極線環繞組，其首異向。

部均用 a, 末部用 e 表明。各始部互以二極節距之 $1/3$ 相距離，然如在圖中所示亦可以整數極節相距離，其連接且不因此而起變化。後方之連接係用虛線表明。

第399及400圖示帶二槽之四極線圈繞組。圈邊之首在第399圖中依同向配置，但在第400圖中則依不同方向配置。在後者情形中經過 1, 6, 13, 18 之一半繞組後，前進方向遂倒轉，申言之，繞組依 34, 19, 12, 7 之方向繼續。第399圖所示之繞法係一種環形繞法而在第400圖中所示之繞法顯為一種波形繞法，其各圈邊祇含有二槽。

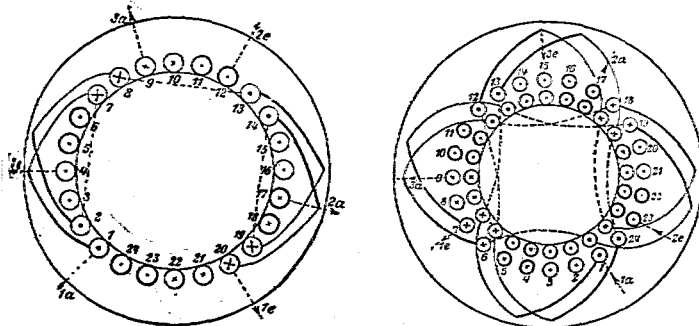


圖401. 四極線繞組，一圈邊之首同向。 圖402. 四極線繞組，一圈邊之首異向。

第401圖示帶每槽一條之四極條繞組，其中首端連接呈叉狀，係等長且恰包含一極節距。其繞法為環形繞法，而一圈邊之首端連接係依同向配置。

第402圖示一四極條繞組，帶有上下二條及容圈邊之二槽。上條之首端連接係依一方向而下條之首端連接係依另一方向。其繞法為一種波形繞法，以 1 開始後，順時針方向繼續。18 下與 24 下連接以後，前進之方向變動，俾前方面皆全依規則。

在圈節距等於 $2/3$ 極節距之三相交流轉動換流機¹⁾中，一直流電

¹⁾三相交流轉動換流機；dr:ip as:ig ar Einank: rumformer, Dreiphasen-unformer; three p as: current rotary converter; commutatrice à courant triphasé.

極之繞組在三點與匯電環相連接，致成一種呈三角連接之三相交流繞組（圖 273），後者有等於 $2/3$ 之極節距之圈節距，換向片之數須可由 3 分盡。在有二數以上之直流分路時，全部線圈須經平衡線連接。

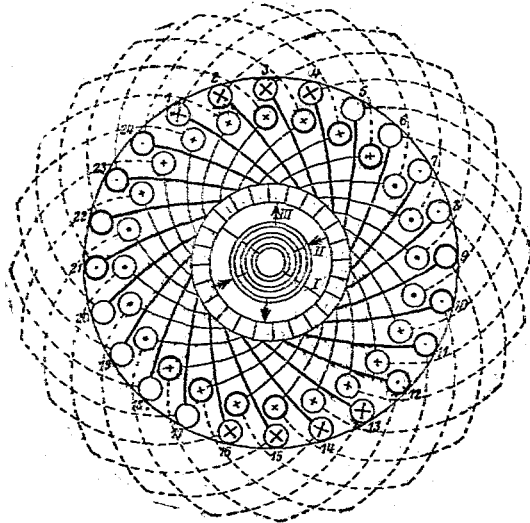
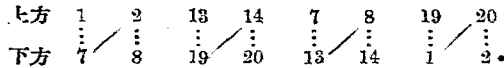


圖 408. 帶環形繞組之四極轉動換流機。

第 403 圖例如示一轉動換流機之四極環形繞組。例如自上方 1，繞組在後方經過相距一極節距之下方 7 再向前經過換向器而達上方 3，餘類似。

自網絡至內匯電環之線不通電。從網絡以達外匯電環之電流等分為二路以達換向器。各路再分為二部分，其中較強部分祇通過一線而其他一半強之部分先僅通過二線，終則達中間匯電環。三相交流之圈邊帶有四槽並占 $2/3$ 之極節距。同時可察見其相互重疊之情形。其磁效應互相增長。然電流同時在若干點如在 5 及 6 互相抵消。

以電的及磁的觀念立言，一廣闊的圖邊係屬不利。故如在多數情形中以用直流繞組供三相交流電動機之轉動子之用時常將繞組切開，如是各部僅有一半之寬度。此二部分互相串聯或並聯。例如第404圖中之繞組若占 $1/3$ 之極節距之二隣近槽內含有線者，則常須切開。圖中關於第一線之各部分如



上列各部分可令其串聯或並聯。假定選用串聯法，為此應用直流繞組¹⁾之端連接例如以a連接8下及13上，又用b連接14下及19上。如是連成之二部分由倒轉繞組方向復經c連接，後者自20下向2下移動。

若一三相交流相線之槽數不能經極對數分盡，則每極及相之槽數為一分數（短節繞組）。今命N表槽數，p表極對數。槽均帶線且線成單層繞組。槽數既恆為偶數，故線圈數等於 $N/2$ 。若線圈數與p有一最大公分數t，則全繞組等分為t部分。今依下法分別述之。

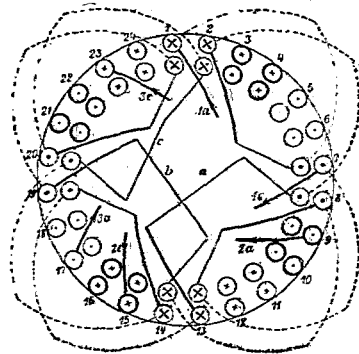


圖404. 切開直流繞組。

將在圓周上配置之槽視

其對於異極之位置共置在一

極對上。此外又須設二水平組之 $N/2$ 。磁場電角距既為空間角距之p倍，則為自1達2起見須穿過p數磁場，餘類推。故極對數為偶數時之結果與為奇數時之結果不同。

1. p為奇數。 例如 $N=24$ 及 $p=5$ ，則得下列二極配置，設其中

¹⁾ 直流繞組；Gleichstromwicklung; direct current winding; chroule ment à courant continu

磁場數為12之二倍並自1穿過磁場而向2,3,4,5及6繞進：

1.極節距 1 6.....2.....3.....

2.極節距4.....5.....

今確定自1以達右方隣近磁場之節距數為y，為此既須穿過p×y磁場，在磁場中所經過之距離當為xN+1，即

$$p \times y = xN + 1, \text{ 或 } y = \frac{xN + 1}{p}.$$

其中x為使y成爲一整數之整數。在上述情形中

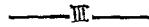
$$y = \frac{x \times 24 + 1}{5} = \frac{1 \times 24 + 1}{5} = 5.$$

由此乃直接表明二極繞組圖中槽之位置如下：

1.極節距 1 6 11 16 21 2 7 12 17 22 3 8



2.極節距 13 18 23 4 9 14 19 24 5 10 15 20



線上之號碼爲三相線之圈之始部，直下或直上之槽係與圈之始部

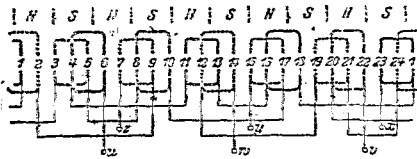


圖405, N=24 P=5.

相距π電位弧而可視爲圈之末部。其接線圖如第405圖所示，其中屬於第一相線之線圈係用粗線表示。依表此

繞法與整節繞法同值，其中每極每相線之槽數概爲 q=N/6。

2. p 爲偶數。在此情形中每二槽在一同名極前極有同一位置而在二極繞組圖中有二雙列，即 N=30及p=4時自1須經p=4節距而達2，餘類推：

1.極節距 1 • 9 • 2 • 10 • 3 • 11 • 4 • 13

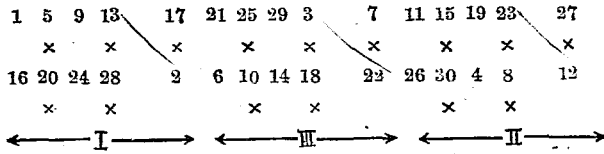
2.極節距 5 • 13 • 6 • 14 • 7 • 15 • 8

1.極節距 16 • 24 • 17 • 25 • 18 • 26 • 19 • 27

2.極節距 20 • 28 • 21 • 29 • 22 • 30 • 23 •

今因極對數爲偶數，二垂直上下位置之槽並無位相之差。今由垂

直移位將全部奇數排成第一列而將全部偶數排成第二列，於是得



今再確定自槽 1 以遠右方隣近磁場(即向 5)中間相隔之節距，知須通過 $p \times y$ 磁場或 $x \times N/2 + 1$ 徑路。準此則

$$p \times y = \frac{x \times N}{2} + 1, \quad \text{既} \quad y = \frac{x \times N/2 + 1}{p}$$

p 既為偶數，故 x 必須為奇數。為令奇數均排成一列，選出適當 x 之數，俾 y 為一偶數。在此情形中

$$y = \frac{x \times 15 + 1}{4} = \frac{1 \times 15 + 1}{4} = 4$$

已知此，槽節距即可直接錄出上面之表。下排號數比較上排號數大 $N/2$ 且與之同相。二隣近之槽是以有 $py/2\pi : N$ 之相距。此值約等於 π 。

今暫且不決定實際之連接，先設想二依斜向上下位置之槽屬於一線圈，因二上下位置之槽有同一電位，該線圈之圈節距亦等於 y 並經斜分離線分配在三相線間。其中如 27 向左與 1 為隣，故 27, 16 成一線圈。

就一般而言，在同名極前之線圈之始部係垂直上下位置且以二磁場相距，其在號數表中係相對負。其中 27, 7, 17 及 27 各有 $2\pi/3$ 之位相距。第 406 圖示相當之連接法。

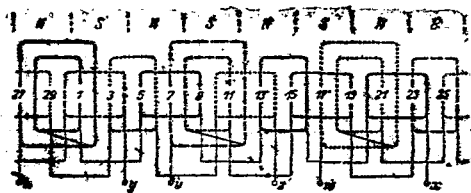


圖 406. $N=30$ $p=4$.

其繞法與一每極每相線帶 $q = N/6$ 槽並分配在 $1/3$ 極節距間並帶有 y 圈節距之整節繞法同值。

在下節中，說明短節繞法在電壓內有特別小之諧波。當極對數為偶數時，其所以然者，線圈之節距不等於直徑之故之關係尤大。因此往往選擇更短之線圈節距，其法將有較大奇數之槽在號數表中向左推進以代替單獨一槽。設 19 93 27 向左推進，則線圈之節距等於 $19 - 16 = 3$ 槽節距。

短節繞法之一種又為關於直流之波形繞法。

圈邊之寬度或節距在上述一般三相交流繞法中等於 $1/3$ 極節距而短節繞法中之合成寬度亦然。惟在帶換向器之電機中寬度等於 $2/3$ 極節距。至三相交流電動機之簡繞法或捷路繞法則相反。依是法組成之繞組含有多數條，後者係在一槽內而在兩端經環捷接。其中相線數並非為 3，但為等於一極節距之槽數。圈邊之寬度命等於零。

110. 繞組因數。

在圓周之磁場因磁極之角呈適當圓形之故概呈正弦形。令 w 表一相線之匝數及以 $\omega = 2\pi f$ ，則在整節繞組¹⁾ 中據第 173 面第 3 方程式 $e_m = \Phi_w \omega$ 。若以 $2\pi : \sqrt{2} = 4.44$ 則有效值

$$E = 4.44 \Phi_f w. \quad (1)$$

設將一圈之線圈在多數槽內，則其所受之感應並不均勻。又若以槽之距離等於 α 電角，則在諸圈邊內所發生之電壓依第 1 方程式分別計算並依據第 407 圖合成。此電壓係由 α 電弧上之 S 弦表出。據此則當每極每線有 q 槽時，其總和等於 $q \times \alpha$ 弧上之弦 S 。設 r 表半徑，則 $s = 2r \times \sin(\alpha/2)$ 及 $S = 2r \sin(q\alpha/2)$ 。

茲採用正弦形磁場之繞組因數²⁾ k ，後者表示分繞組之電壓對於在一槽對內聯合繞組之電壓之比。於是就一般而言，正弦形磁場之電壓

¹⁾ 整節繞組；Einlochwicklung. ²⁾ 繞組因數；Wicklungsfaktor；winding factor；facteur d'enroulement.

$$E = 4.44 \xi \Phi f w. \quad (2)$$

繞組因數同時等於若干槽之電壓之幾何的總和與代數的總和之比，申言之，

$$\xi = \frac{S}{qs} = \frac{\sin(q\alpha/2)}{q \cdot \sin(\alpha/2)}. \quad (3)$$

例如在一三相交流電機中每極及每相線之槽數 $q=2$ ，故槽距等於 $1/6$ 極節距，申言之， $\alpha = \pi/6$ ，則

$$\xi = \frac{\sin(2 \times \pi/12)}{2 \times \sin(\pi/12)} = \frac{0.5}{0.518} = 0.975.$$

在小槽距時，繞組可視一種光繞組，其線均勻配置在圓周上面。此時在第 407 圖中之斷線系成一圓弧而繞組因數成爲弦對於線圈之寬度之 2γ 弧之比。此比例爲

$$\xi = \frac{2\sin\gamma}{2\gamma} = \frac{\sin\gamma}{\gamma}. \quad (4)$$

舉例言之，設圈邊之寬度等於 $1/3$ 極節距，則 2γ 等於 $\pi/3$ ， γ 等於 $\pi/6$ ，申言之 $\xi = 3/\pi$ 。

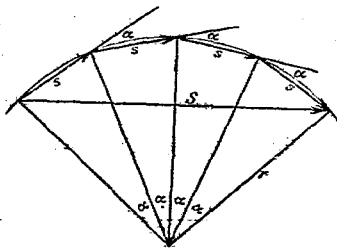


圖407。若干槽之電壓之總和。

當圈邊之寬度等於 $2/3$ 極節距時，恰如在三相交流轉動換流機中， $2\gamma = 2/3 \times \pi$ ，故繞組因數等於 $1/2\sqrt{3} : \pi/3 = 0.83$ 。

終則若圈邊之寬度恰如在關於單相交流之轉動換流機中等於一極節距，則繞組因數等於直徑對於半圓周之比，故即等於 $2/\pi$ 。

然應注意者， w 表一相線之匝數而 α 表電角。空間弧是以應以極對數乘積。

若磁場曲線不爲正弦形，則依據傅立葉可分解爲成正弦形之基本波及成正弦形之諧波（參考第 173 面）。電壓亦含有基本波及諧波。若命 v 表諧波之級數， Φ_v 表第 v 諧波之通量及 f 全波之頻率，則諧波之電壓

$$E_v = 4.44 \xi_v \Phi_v f w.$$

當 α 表關於基本波之電角度之槽距時，

$$\xi_v = \frac{\sin \frac{qv\alpha}{2}}{q \sin \frac{v\alpha}{2}} \quad (a)$$

一個帶雙層及整節繞組之四極三相交流發電機例如每極每相線含有 $q=6$ 槽，故一共含有 72 槽。空間槽距為 $360:72=5^\circ$ ，申言之， $\alpha=p \times 5^\circ=10^\circ$ 。求關於基本波及第五諧波之繞組因數。得

$$\xi_1=0.956 \text{ 及 } \xi_5=0.197.$$

若不用整節繞組但用短節繞組，則繞組因數等於全數圈之繞組因數 ξ' 與一單獨圈之繞組因數 ξ'' 之乘積。例如命 N 表槽數， p 表極對數， b 表以槽距計之線圈之寬度，則每圈

$$q=2 \quad a''=\pi-b \frac{p \times 2\pi}{N}.$$

若不顧符號並注意 v 為一奇數，則依據方程式(a)一圈之繞組因數為

$$\xi''_v = \frac{\sin va''}{2 \sin \frac{va''}{2}} = \cos \frac{va''}{2} = \sin \left(\frac{vbp \times \pi}{N} \right) \quad (b)$$

然例如在上述電動機中線圈之寬度不等於 $72:4$ 但僅等於 $b=16$ 槽距，即

$$\xi_1'' = \sin \left(\frac{16 \times 2\pi}{72} \right) = 0.985 \quad \xi_5'' = \sin \left(\frac{5 \times 16 \times 2\pi}{72} \right) = 0.643.$$

據是以觀，用短節繞組祇略許影響基本波，然減衰諧波 0.643 倍。

在短節繞組中諧波之繞組因數特小，其故因想像在一極前聯合並供計算繞組因數用之合成槽數比較整節繞組中一極之槽數遠大。極對數為偶數時線圈之寬度比較極節距略小而必要時尚可減小。當槽數 $N=30$ 及極對數 $p=4$ 時，依第310面之表， $q=5$ 及 $\alpha=\pi:15=12^\circ$ ，是以前例如據本面方程式(a)

$$\xi_1' = \frac{\sin(5 \times 12^\circ)}{5 \sin 6^\circ} = 0.954 \quad \xi_5' = \frac{\sin(5 \times 5 \times 6^\circ)}{5 \sin(5 \times 6^\circ)} = 0.2.$$

據第310面之表，線圈之寬度 $y=4$ 槽。據方程式(b)，當 $N=30$ 槽

時。

$$\xi_1'' = \sin \frac{4 \times 4 \times \pi}{30} = 0.9945, \quad \xi_5'' = \sin \frac{5 \times 4 \times 4 \times \pi}{30} = 0.866.$$

此時 $\xi_1' \times \xi_5''$ 之乘積表繞組因數。苟向前引第310面表中之19 23 27等槽，則線圈之寬度等於 $b=19-16=3$ 槽並得

$$\xi_1' = \sin \frac{3 \times 4 \times \pi}{30} = 0.951, \quad \xi_5'' = \sin \frac{5 \times 3 \times 4 \times \pi}{30} = 0.$$

第十九章 同步機之作工

111. 同步機之連接¹⁾。整步²⁾。

多數同步機與網絡相聯絡時，電流之頻率在諸機中均與網絡中同。若命 n 表轉數及 p 表極對數，則頻率

$$f = p \times n. \quad (1)$$

轉數是以由頻率確定，而電機遂同步轉動。僅在對於單獨一網絡饋電之發電機毋須有一定頻率，其轉數可隨意選定。

第1方程式對於同步發電機及同步電動機均適用。同步電動機之構造全與發電機同，是以凡交流發電機均可用充交流電動機。設令第407a圖中之磁極輪順時計之方向旋轉，則電流在北極前為自前向後。當時原動機須克服電流與磁場間所發生之轉矩。就第407b圖所示之電動機而言，此種電磁交互作用使磁極輪反時計之方向而旋轉。

瞬時之後，在所示之線之前者不再為北極，但為一南極。以是之故，其間電流必變向，俾新轉矩與舊轉矩同向。又轉數與網絡之頻率

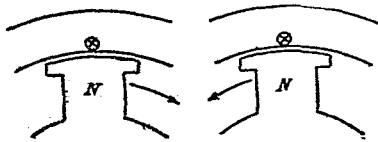


圖407a. 發電機。

圖407b. 電動機。

¹⁾交流電機之連接; Einschalten von Wechselstrommaschinen; putting in circuit of alternating current machines; mettre en circuit des machines alternatifs. ²⁾整步; Synchronisierung; synchronization; synchronisation.

相當。此種情形自始至終不變。

以下擬述將一發電機或電動機插入於有一定電壓及頻率之網絡上之情形。

若干發電機經原動機轉動而呈同步性¹⁾後再由應用示相燈²⁾(參考下文)使之互相並聯。

同步電動機在有直流電源時經與同步電動機聯軸之激發機(當時充作電動機轉動)激發以至同步,再藉示向燈互相並聯。凡具有阻尼繞阻³⁾之多相同步電動機(參考第332面)亦可用 $1/3$ 之網絡電壓由三相交流之一側起動。其中磁場繞組須分裂或被捷接,否則在磁場繞組內可惹起危險電壓。電動機先如一異步電動機起動,俟將達同步狀態時,即導入直流激發,至是電動機遂達全同步狀態。

轉動換流機當有現成直流網絡時係由直流一方面起動並藉示相燈互相並聯。如無直流網絡,則可經一比較換流機少一極對之異步原動機轉動使呈同步狀態。如用示相燈證明並聯,則俟達同步狀態之後,卸去原動機,並使換流機經過電阻與三相交流網絡連接。

若欲令轉動換流機由三相交流一側起動,其法與上面令同步電動機起動同。起動時磁鐵繞組經電樞捷接,而如在直流電機中然該種連接必須與轉向相應。由轉動子饋電之各三相交流電動機由轉動子反磁場旋轉之方向而起動。磁場在空間依磁場轉數與轉動子之差而旋轉。俟將近同步狀態時,若並不預先已與電樞相連接,令磁鐵繞組與電樞速接。換流機終則完全同步而磁場在空間停止運動。極性故即直流刷之符號初不確定。如不裝特別繼電器,須開去電樞之電路並重演上述之手續至直流接線螺旋示正當符號為止。

用示相燈或伏特計以促成並聯分為數法。先令電機作無載轉,使其有與網絡頻率相應之轉數。次如在直流電機中由變動磁鐵激發強度使電機之電壓等於網絡之電壓。然令與網絡連接以前,恰如在直流電

1) 同步性; Synchronismus (Gleichlauf); synchronism; synchronisme. 2) 示相燈; Phaselampe; phase lamp; lamp témoin. 3) 阻尼繞組; Dämpferwicklung; damping winding.

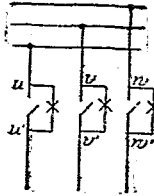


圖408. 在暗接中之示相燈。

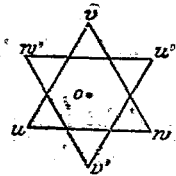


圖409. 電位圖。

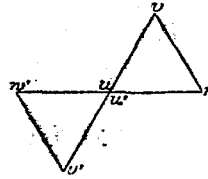
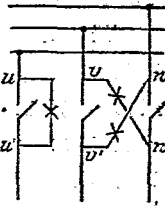


圖410. 電位圖。

機中，必須確知接線螺旋之極性並將同名接線螺旋連接，故電機及網絡相互連接。為於連接之際確定是種情形概用一示相燈(圖408)。藉此燈之助，於主開關開去時令電機接線螺旋與網絡接線螺旋連接。次使電機之電壓昇達預定

之值並調整其轉數，以致燈光緩緩閃動。在燈全暗之瞬間，網絡及電機相反連接，當時將主開關關閉。



設燈不同時放光，圖411. 同步圖¹⁾。

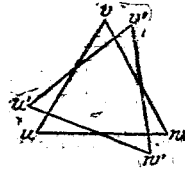


圖412. 電位圖。

則網絡之相序與電機之相序不同。此時必須交換自電機或網絡以達開關之二導線。

電機之頻率與網絡之頻率相近時，電機之電位圖 $u^*v^*w^*$ 以 o 點為中心(圖409)緩緩背網絡之電位圖 uvw 旋轉，網絡之電位圖假定固定。燈故須能耐雙倍之星電壓。

又可預定令開關之任一極例如 uu^* 關閉而祇將其他二極由燈聯絡之。於是在第410圖中電機之電位圖 $u^*v^*w^*$ 以 uu^* 點為中心旋轉。在所示之瞬間， w 與 w^* 之間有雙倍連環電壓。示相燈須能耐此電壓。

在整步之際，若欲確知電機之旋轉過速或過慢，令開關之一極作暗接而令其他二極交叉作明接(圖411)。電機之電位圖 $u^*v^*w^*$ 例如在

1. 同步圖；Synchronismusrose.

第412圖中在有較小轉數時依時針之轉向反網絡之電位圖 uvw 旋轉。在所示之瞬間，電壓 uu' 亦通過零值，電壓 vw' 略小於峰值，而電壓 wv' 則下降。在如第411圖之配置中，燈依 uu', wv' 及 vw' 之順序而照明。

轉數過分大時，電位圖 $u'v'w'$ 反向旋轉，而燈依倒轉之方向照明。

當燈 uu' 暗而其他二燈等明時，將開關按下。若三燈同時暗者，則相序有誤，當時須將自電機或網絡通達開關之二線交換。

在此情形中，接線螺旋 u 及 u' 不應被連接。反之，若相序正當，則自然可任接線螺旋 uu' 開啓，故祇須用單相明接法。

三燈之明接法惟當用變壓器使在網絡一邊之副電壓與在電機一邊副電壓作 180° 移位時（圖 413）可能。恰如在暗接法中，此時燈係接在每二相符之接線螺旋間。如二原繞組之計算矢首一致，可知同相時副電壓依代

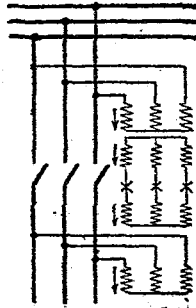


圖413. 用三燈之明接法。

數法加於原電壓之上，故不如暗接法中起反對效應。俟諸燈均明時，將開關按下。

在上述諸情形中假定示相燈係於電機尚未達同步狀態用之。一俟示相燈插入之後，各機之旋轉立即完全一致。

112. 激發強度變動時之同步機。

設命一單相交流機接在有固定電壓之網絡上。此時若不計歐姆電阻及經電樞雜散磁線芯起之有感電阻，則經磁通量發生之電壓與網絡電壓相反並相等，故有一定值。準此，縱使激發強度變動，磁通量亦有一定。

是種磁通量隨磁極上直流激發與電樞安匝二者之共同作用產生。恰如在變壓器中，合成激磁強度之值一定而係等於作無載轉或作整步

轉時賦與之磁鐵激磁強度。此種情形在帶圓筒狀磁鐵體之電機中絕對真確——其中磁導依電樞直徑之各方向均同——，但在帶突出極之電機中祇約略近似。

茲須知磁鐵之直流激發許否與由電樞之交流惹起之激發合併。在單相交流中電樞之安匝，依據第 136 節必須分為以同步轉數迴轉之二相等但相反部分。其中隨磁極輪迴轉之部分當然可與迴轉中之直流激發合併。其他相反迴轉之部分，其磁效應務須經在磁鐵極上之捷路匝阻尼，如是可不致由反磁場¹⁾——對於磁鐵繞組以雙倍網絡頻率移位——在直流繞組內惹起高壓。

在三相交流電機中，由電樞惹起之激發當初與磁極輪同步迴轉。如由第 414 圖所示，當在一邊內通過最強電流 i_m 而在隣近圈邊內通過一半強之電流之瞬間，電樞之激發強度等於 $i_m w' + 2i_m w'/2 = 2\sqrt{2} I w'$ ，其中 w' 表每相每極對之電樞安匝數。經過 1/6 週期之後，復有相同之值，但已作 60° 之位移。在中間時間內激發較弱。又在電樞上之電流線其分配與在磁鐵上者不同。由是而起之不真確茲可忽略不計，而以電樞激發強度等於磁鐵激發強度，即等於 $I w' 2\sqrt{2}$ 。

茲假定整步之際磁鐵激發強度等於 $I_\mu w_m$ 而在並聯之後增至或減至 $I_\mu w_m$ 。次以 $2\sqrt{2} w'$ 分諸激發強度並命

$$I_\mu w_m : 2\sqrt{2} w' = I_\mu' \text{ 及 } I_m w_m : 2\sqrt{2} w' = I_m'$$

遂得依匝比換算之磁鐵電流。此時在第 415 圖中之固定合成激發強度

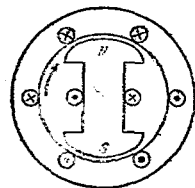


圖414. 磁鐵激發及電樞激發。

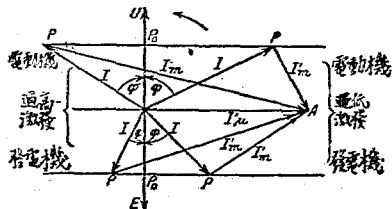


圖415. 激發強度之合成。

¹⁾反磁場；inverses Feld; inverse field.

$I'_{\mu} = OA$ ，而係等於電樞電流 $I = OP$ 及磁鐵激發強度 $I'_m = PA$ 之和

產電壓 E 既滯在 I'_{μ} 之後 90° ，故相反而相等之網絡電壓 U 必起在 I'_{μ} 之前 90° 。故表網絡電壓 U 之線在發電機中亦必與表產電壓之線相反。 U 故並非為經電機發生之電壓但為經壓入之網絡電壓。

第 415 圖之下半部係對於發電機適用，其中電樞電流大致與產電壓同相。其上半部係對於電動機適用，其中電流大致與網絡之電壓同相。

電樞電流 $I = OP$ 具有一有效成分 OP_0 。此成分與電壓共同表示功率，而如在下節中說明，不受磁鐵激發強度變動之影響。故磁鐵之激發強度變動時， P 沿與 I'_{μ} 平行且通過 P_0 點之一直線移動。

在 P_0 之右方， I'_m 小於 I_{μ} 。故並聯之後，磁鐵之激發強度減小而電機遂不充分激發（過低激發¹⁾）。同時電樞電流強化磁場，致若起視網絡電壓而定之激發強度。最小可能之磁鐵激發強度 I'_m 係當 P 在 A 直上或直下時發生，其值同 OP_0 ，申言之，等於電樞有效電流之激發強度。若被激發更弱，電機遂失步。雖然，同步機中亦有作無載轉時不經直流通激發而仍穩步者。但此種電機帶突出極而對此第 415 圖並不切實適用。

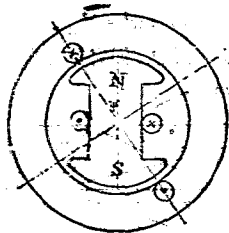


圖416. 過高激發，磁場加強。
右轉：發電機，電流滯後。
左轉：電動機，電流超前。

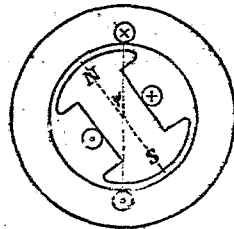


圖417. 過低激發，磁場增強。
右轉：發電機，電流超前。
左轉：電動機，電流滯後。

¹⁾ 過低激發；Unterregung; under excitation; excitation lags.

在 P_0 之左方， I'_m 大於 I'_u ，並聯之後，磁鐵之激發強度增加，電機遂被過高激發。電樞電流減弱磁場，終至復有某一定之激發強度。

今欲決定激發強度對於相位移之影響。第 415 圖明白指出：一發電機被過高激發時發生滯後電流，而被過低激發時發生超前電流。電動機被過高激發時納取超前電流，而被過低激發時納取滯後電流。此種情形係由第

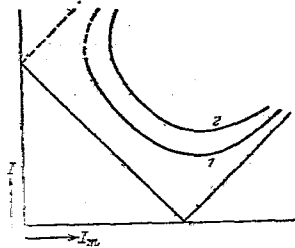


圖418. V字形曲線。

416及第417圖顯出。其中想像通過極心，空隙及電樞之一磁力線。設若電樞導磁之符號與磁鐵導磁之符號相同，則電樞電流增強磁場，電機遂被過低激發，餘可推知。由注意相之位移可知極之中心線正對槽時，槽內電壓最大，而當此之際，電流在該槽之相線內達其巔值。

為使激發強度變動時使電機之性狀更明顯起見，作水平線以表有一定功率即在第 418 圖內 P 點有一定高度時之磁鐵電流 I'_m ，又作垂線以表相應之電樞電流 I ，遂得第 418 圖中之 V 字形曲線¹⁾。功率較大時，得曲線 2。在曲線之最低點，電流最小且僅有有效電流 ($\cos\alpha = 1$) 而無無功電流。故當時電流熱損失最小而效率最大。諸曲線最低點之連接線係為關於 $\cos\alpha = 1$ 之調整曲線。此線示電機有負載時應被激發之強度，俾可維持 $\cos\alpha$ 等於 1 之值。調整曲線向右急激上昇，故為維持 $\cos\alpha$ 有 1 之定值，激發強度務須隨負載而略許增加。在轉動換流機中，此可獨立之經一在極上之通直流之額外串聯繞組為之。下方帶直角之曲線係在無負載時適用。

在右方部分，電機被過高激發，故電流在發電機中滯後，在電動機中超前。在左方部分，電機被過低激發，故電流在發電機中超前，

¹⁾V字形曲線；V-Kurve；V-curve；curve en V.

在電動機中滯後。最小可能的激發強度是在處亦等於有效電流之安匝數。

曲線依軸對稱。在實際情形中自然由 I_m 代 I'_m 表出，對稱性遂被擾亂。

就一般而言，一發力廠之全數電機經激發而有同一功率數因。此情形亦見於多數並聯之電力廠中。

以上所述者為磁鐵激發強度對於電樞總電流之影響。其實有效電

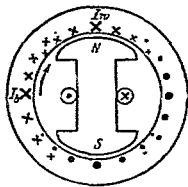


圖419. 在過高激發時分爲有效流電及無功電流之分解。

流既不變動，故僅無功電流受其影響。在發電機中其所發生之無功電流當電機被過高激發時爲正而在過低激發時爲負。又一正號無功電流對於發電機之電壓滯後 90° 而一負號無功電流則超前 90° 。

在電動機中，爲其所納取之無功電流當電動機被過高激發時爲負，被過低激發時爲正。

其實使磁場強度增減者爲無功電流之安匝數。爲明此情形，依第 419 圖將作正弦形分配之總電流分解而爲有效電流及無功電流。有效電流恆對極心而無功電流恆在中立帶內。在第 419 圖中明白顯出無功電流在過高激發時之去磁效應。

上述關於無功電流之定則有更簡單之說法。納取負無功電流之電動機可設想爲供給正號無功電流者。凡被過高激發之電機無論爲發電機或電動機均惹起正號無功電流。

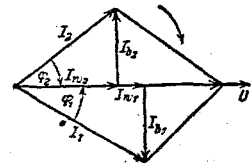


圖420. 异步電動機與同步電動機之比較。

激發過高之同步電動機故可據是以改良網絡之功率因數並使導線失却無功電流。在第 421 圖中，A 表一羣异步電動機。此種電動機恰如感應電動機除納取有效電流 I_{w1} 外，又納取正號滯後無功電流 I_b 。S 表一同步電動機，其除納

取有效電流 I_{w_2} 外，又納取負號無功電流 I_{b_2} 。設由激發同步電動機使 I_{b_2} 與 I_{b_1} 相反而相等，則依據第 430 圖總電流與電壓同相。在網絡導線內故無無功電流。

就實際而言，在此情形中被過高激發之同步電動機供給異步電動機所須之正號無功電流。若被過高激發之同步電動機除其無載轉所消耗之功外亦不另給機械功，則此機變為一移相器，後者設在耗

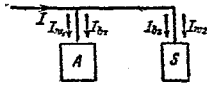


圖431. 關於平衡相之電流圖

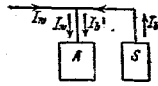


圖432. 移相器。

電之處，祇納取負號無功電流，故即等於給出正號無功電流，而如是使饋電線失去無功電流（圖 432）。無功電流與電樞匝數之乘積等於磁鐵激發強度超出整步時所有之激發強度之餘分。是種電機在歐洲依供 12000 仟伏安無功電流而在美洲依供多至 50000 仟伏安之無功電流之強度而構造。導線內失却無功電流時導線內之電壓降既變動，故是種電機亦稱調壓器。關於異步移相器見第 151 節。

在特殊情形下亦應用移相器以卸去發電機但並非卸去網絡導線之無功電流。

以上討論接在有一定電壓之網絡上之電機，其激發強度及無功電流經並聯之後可任意變動。該機之無功電流增加時，其他電機之無功電流必減，蓋總無功電流經由插在網絡內之耗電器決定。

一電機其單獨供給電流於一消耗網絡者，若電壓不應變動，其激發強度不應任意變動。雖然，在是處仍有過高激發與過低激發可言。在有有感負載時電機自行過高激發，當時電樞電流減衰磁場，故路端電壓自電機與網絡分離後即上昇。在有有電容負載時，情形則相反，其中工作時之電壓大於與消耗網絡脫離後之電壓。

同樣，在無功電流分配適宜之發力廠中各機在有有感負載時自行過高激發，而在有電容負載時過低激發。

113. 同步機之負載。

令一經原動機轉動之直流電機充作發電機與一網絡相聯絡。網絡之電壓係經若干並聯之電機確定。此後由增加磁場電流使發電機增加輸出之功率。因通量及所惹起之電壓 E 均增加，而依據 $I_a = (E - U) : R_a$ 之方程式，電樞電流亦隨之而增。

輸出之電功率對於原動機惹起反應。其情形如下：

加入之機械功率因不足應付增加之電功率，原動機之速度遂減，而此影響原動機之調整器，致有較多機械功率加入。原動機雖由此而恢復其大部分之速度，但縱使在平衡狀態時轉數較前時為小，蓋調整器繼續變換其位置也。在此過程中，發電機輸出之電功率先經調整，以致因轉數略許減少之故加入之機械功亦隨之而自動調整。故在是處須要調整供給。

在同步電機中，此過程係不可能，因各機以同步性相聯繫，故不但各機間即其原動機亦作同步的迴轉。職是之故，為增加負載祇可移動原動機之調整器，俾轉數仍舊，加入之功率則增加。移動調整器可用手或用一具從開關板（電鍵板）接出之電動機。此時輸入之機械功率超出輸出之電功率歷片刻之久。磁極輪達於短時間內作加速運動並對於導電流之電樞線作如是之位置，致輸出之電功率增加。以後輸入之機械功率與輸出之電功率成平衡。在是處先令輸入之機械功率變動，致輸出之電功率亦隨之而變，故在是處供給調整須要。

在電動機中，磁極輪亦因負載之增加而在短時間內減速迴轉並對於導電流之電樞線占如是之位置，以致電動機之力矩及功率均增加。

第 423 圖明示此種過程。電樞電流及經換算之磁場電流 $I'_{m\mu}$ 示合成激發強度 I'_{μ} 。後者滯在網絡電壓 U 之後 90° ，而其強度由通量或由網絡電壓規定。磁場激發程度既不變動，故 $I'_{m\mu}$ 線之始點 P 作一以 A 為中心之圓。

今若於發電機內輸入較多量之機械功率，則等於將磁極輪向前推

進，而線 I'_m 遂達 $P'A$ 位置。因之，有效電流增加以致輸出之電功率與增長之機械功率成平衡。

又當電動機之負載增加時，磁極輪向後移動，而 I'_m 遂達 $P''A$ 位置，因此，有效電流及加入之電功率皆增加。圖中之實線關係就一過高激發之電機而虛線關係就一過低激發之電機而言。

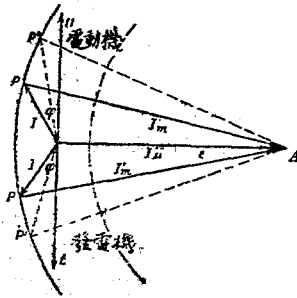


圖423. 負載變動。

在激發強度不變時，磁極輪起在無載轉位置之前之角 α 愈大時功率亦愈大。然若因移位極大，以致 P 達在 A 直上或直下之位置，則增加機械功率不但不能使電功率增加反且使之減少。至是電機遂離步。在離步情形中，有效電流等於經換算之磁鐵電流之事實遂驗（參考第 320 面）。

為確保電機於偶然遇過高負載時不致離步起見，經換算之磁鐵電流由電機之構造規定至少等於有額面負載時有效電流之雙倍。其過負載強度約為 3:1。一種強磁鐵激發作用即強感應及大空隙以及電樞上減少之匝數均對此有利。然感應經鐵損失而被限制。凡有較大空隙之電機其價亦較昂。終則依據第 345 面在有較強磁鐵激發強度時發生強度永久捷路電流。

為說明一電機經短時間加速運轉變為發電機而經短時間減速運轉變為電動機之作用，命該機與一直流電機聯軸，並令直流電機與一經其他電機或蓄電池組饋電之網絡相聯絡。直流電機依同步數迴轉。今若強激該機使產電壓超出網絡電壓之上，則此機工作如一發電機。反之，若減衰該機之激發強度，則網絡電壓較大，電機遂被轉動如一電動機。

令一交流電機通電後作無載運轉，以校減少交流電機之磁鐵電流。此直流電機當時僅納取抵償無載損失之功率。在平時聯軸之這衰當

使直流電動機之轉數增加，但在目前狀態下，此種電機組之轉數係經網絡之頻率規定，故因減衰磁場，直流電動機之產電壓 E 減小。依據 $I_a = (U - E) / R_a$ 之方程式，電流因此顯然增加而電樞之迴轉遂加速。與之聯軸之交流電機之磁極輪對於電樞遂占某一定位置，以致所輸出之電功率增加。此增長之電功率終則與直流電動機之機械功率成平衡。

今增強直流電機之磁場電流。其結果使直流電動機之產電壓增加（其轉數仍不變），終至超出直流網絡電壓以致電動機變為發電機而輸出電功率。其迴轉速度減小至片刻之久，而交流電機遂變為一電動機。

一同步發電機之轉數既經網絡頻率規定，則原動機可否省去調整器遂成爲一個問題。其實調整器惟電機之功率恆一定不變時可以省去。然若因電流消耗變動，負載應自行平均分配於諸機間，則全數原動機必須帶有調整器。此時各機均動作而頻率遂略許變動。以後若機械的令諸調整器移位，則頻率復恢復當初規定之值。

一種與直流電機不同而與在並聯時發生者相似的差別亦見於與網絡分離之際。直流電機在與網絡分離之前經減衰其激發強度而卸去負載。反之，若欲令一同步電機與網絡分離，則須移動原動機之調整器將有效電流減至零值。至仍復存留之無功電流此後由變動激發強度使其消滅。

114. 整步力¹⁾。

若干相同並經等強激發之發電機假使互相並聯且與網絡相連接。在外電路內所消耗之功率由發電機平均分擔。網絡電壓既由各機共用決定，故產電壓到處均同相。電樞線對於極之位置是以在各機中均同，而電機之迴轉依時間全均勻，申言之，即完全同步。此情形不僅指

¹⁾整步力：synchronisierende Kraft；synchronizing power；puissance synchronisante.

在一定時間內有相等之轉數，即產電壓之臨時值在各機中亦相等。

各機間轉數及相之一致如何維持不變却成爲一個問題。並聯交流電機之產電壓既互相連接，故隨時必須同相，否則當有平衡電流發生。

轉數完全的一致決不能由機外方法促成，所幸並聯同步機均有自動整步之傾向。例如一發電機因原動機迴轉不均匀之故在一定時間內略許超在別機之前。此種空間的超前係與第423圖中磁鐵電流PA之線之超前同其意義，故在一定極限內總電功率增加。輸入於原動機內之功率至是遂感不足，申言之，原動機自行制動。結果，電機之速度減小，致在迴轉中之磁體恢復對於電樞原來準確之位置。

反之，依第423圖一機對於他機之滯後使該機之電功率減少而原動功率遂占優勢，其惹起之加速迴轉使滯後電機之磁鐵回至對於電樞準確之位置。電機故規定原動機之轉數並使之作用步迴轉。

無論如何，電機祇許在依第423圖磁極輪之超前使電功率強度增加之一定範圍內工作。原動機之不可避免的超前或滯後經電機之整步作用強行消殺。其時少數空間角度之移位等於 p 倍電角度之移位。

然在由電機輸出之功率將達最大限量時，角之強增祇使功率略許增加，申言之，電機之整步力不大。俟功率超過顛值之後，電機之超前竟使功率遞減。原動功率此時超在輸出之電功率之上益顯而電機迴轉亦益速，因而電樞線對於極之位置益不準確，電機遂離步，以致整個合作爲不可能。此時在電機間自然有極強電流往返流動。

以上全視整步力爲一種經一機之超前或滯後惹起之電功率之增減。然通常以整步電流爲言而以超前電機給出過多電流，滯後電機過少電流。若與網絡相聯絡者祇有電機，則可設想在兩機間有平衡電流往返流電。此種電流認爲自滯後電機之電流減下而加於超前電機之電流。故超前機經此電流制動而滯後電機經此電流轉動如一電動機。

今計算方向力¹⁾。此力爲由整步電流當磁極輪背正常位置離開一

¹⁾方向力；Direktionskraft；direction power；puissance de direction。

空間弧單位時所惹起。依據第423圖 $I_{cos\varphi} = I'_m \sin\epsilon$ 。若命 U 及 I 表相線值，則三相交流電機之功率為

$$N = 3UI \cos\varphi = 3UI'_m \sin\epsilon.$$

磁極輪係在 $d\epsilon$ 弧，則經增加之功率為 $dN = 3UI'_m \cos\epsilon d\epsilon$ 。此時 $dN/d\epsilon$ 表每電弧單位所增加之功率。空間弧單位當大 p 倍。又 $N = M/2\pi n$ ，其中 M 表轉矩， n 表轉數。終則有額面負載時， ϵ 極表一小角，故 $\cos\epsilon$ 之值可認為 1。據是則方向力即為關於每空間弧單位之轉矩

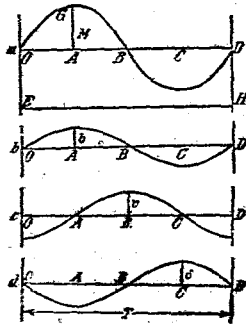
$$B = \frac{p \times 3UI'_m}{2\pi} \quad (2)$$

若 UI'_m 以瓦數計， n 以秒之逆數計，則方向力當以每弧單位之焦耳數計。在第 120 節中曾說明 $3UI'_m$ 係與成捷路時之視功率相等。

以上恆假定電機之內電阻係等於零。其實此點對於整步力及方向力祇有微弱之影響。以是在電機整步工作中概省去平時視為不可或缺之保護開關。

115. 交流電機之擺動¹⁾

一交流電機用一蒸汽輪機或一水力機轉動時，其每轉間之速度一



第424. 輔助轉矩，加速度，速度及前移。

定。然用一蒸汽機或一氣機轉動時，其每轉間之速度快慢不一，而此係由原動機之轉矩不平勻所致。若同時與他機並聯在一網絡上，則其因電樞之整步力亦受有規則的交換衝動。若為減小速度變動在極上裝有阻尼繞組，則依規則的交換衝動仍難免。

在第424a圖中，例如在 $OGBD$ 曲線之自 EH 量起之垂線表示作用於機上之總轉矩。若命 EO 表平均轉矩，則在 OGB 曲線上自 OD 量起之垂線當表輔助

¹⁾ 交流電機之擺動；Pendeln von Wechselstrommaschine.

轉矩。此曲線假定呈正弦形。茲命 M 表最大輔助總轉矩， m 迴轉部分之質量， r 慣量半徑及 T 最大輔助矩重演所須之時間。若 b 表最大速度，則最大加速力等於 mb ，故 $M = m \times r \times b$ 或

$$b = M : mr.$$

最大加速度係與最大輔助轉矩同時發生，例如在第 424b 圖中在時間 A 。加速度為正時，速度增加。例如自 0 至 B 之時間內速度自最小值增至最大值。在時間 A ，速度達其平均值。此後正號輔助速度開始而在 B 時達其最大值（圖 424a）。輔助速度之最大值 v 係等於平均加速度 $b \times 2/\pi$ 與時間 $AB = T/4$ 之乘積：

$$v = 2/\pi \times b \times T/4.$$

輔助速度為正時，在正當位置前之前移增加，此前移在 AC 時間內自最低值增至最高值。在時間 B ，其值為零（平均值）。若以平均輔助速度 $v \times 2/\pi$ 與時間 $BC = T/4$ 相乘積，則得前移之數值 $s = v \times T/2\pi$ 。今以半徑 r 分 s 並代入 v 及 b 之值，最大前移之弧，申言之，在正當位置左右之擺幅

$$\delta = MT^2 : 4\pi^2 mr^2. \quad (3)$$

若一機單獨與網絡相連接，則須以原動機之最大輔助轉矩 A 代 M 。最大前移之弧 α 依第 3 方程式遂為

$$\alpha = AT^2 : 4\pi^2 mr^2. \quad (4)$$

若對於網絡饋電者倘有其他電機，則又有整步矩。當有方向力 B 及最大前移 β 時，最大整步轉矩等於 $B\beta$ 。此轉矩係當有最大後移時發生，故依第 424a 至 d 圖係與最大輔助轉矩同時。由是可知輔助轉矩及整步矩依代數法合成而為總矩，申言之，總矩 $M = B\beta \pm A$ 。代入此值於第 3 方程式中即得

$$\beta = \frac{(B\beta \pm A) T^2}{4\pi^2 \times mr^2}. \quad (5)$$

依第 4 方程式命 $AT^2 = \alpha \times 4\pi^2 mr^2$ 並以之代入於上式中，乃得放大因數¹⁾ k 。此因數即為與他機合作時之額外前移與單獨工作時之前移之比

1) 放大因數；Vergrößerungsfaktor；magnifying factor；facteur de grossissement.

$$k = \frac{\beta}{\alpha} = \pm \frac{1}{1 - BT^2/4\pi^2 mr^2} \quad (6)$$

此方程式之上符號當 $4\pi^2 mr^2$ 大於 BT^2 時，即轉動慣量¹⁾大，整步力及振動時間²⁾均小時適用。整步矩及原動機之輔助矩此時依同向工作，申言之，轉動矩反整步矩同於有最大後移時達其正號巔值。下符號係當 $4\pi^2 mr^2$ 小於 BT^2 ，即當有小轉動慣量，大整步力及大擺動時間時適用。在此情形中，轉動機之輔助矩於有最大後移時達其正號巔值而係與整步矩反向工作。

在此二情形中，超在平均位置前之最大前移其當電機與別機同饋電於網絡時發生者較單獨饋電於網絡時發生者為大。至 $BT^2/4\pi^2 mr^2$ 擺大於2之情形自當除外，因當時須有極小動質量之故。前移隨各動而增加至近一終限界值。與此限界值相應之整步力遂與原動機之初輔助矩合作而促成有各限界值之前移，致惹起平衡。

命 G 表迴轉部分之重， g 重力加速度及 d 慣量直徑，則

$$mr^2 = \frac{G}{g} \times \frac{d^2}{4}$$

其中 Gd^2 表平衡矩³⁾。若 mr^2 應以實際量或即以焦耳 \times 秒²計算，平衡矩以仟克平方米計算及重力加速度以米/平方秒計算，則依據第84面

$$1 \text{ 仟克米}^2 = \frac{9.81 \text{ 焦耳}}{100 \text{ 厘米}} \times 10^6 \text{ 平方厘米} \cdot 1 \text{ 米/秒}^2 = 100 \text{ 厘米/秒}^2$$

$$mr^2 = \frac{9.81 \times 10^6}{100 \times 100g} \times \frac{Gd^2}{4} = \frac{9.81}{g} \times \frac{Gd^2}{4}$$

在為一串聯機轉動即每轉經二次擺動之電機中，假定 $p=32$ ，每分鐘之轉數 $n=94$ ，成捷路時之視功率為208000瓦特及平衡矩為 $Gd^2=22$ 2000仟克平方米。此時經整步電流惹起之方向力依第328面第2方程式

$$B = \frac{32 \times 208000}{2\pi \times 94/60} = 6.78 \times 10^6 \text{ 焦耳/弧}$$

¹⁾轉動慣量；Trägheitsmoment；moment of inertia；moment d'inertie.

²⁾振動時間；Schwingungszeit；time of oscillation；temps d'oscillation. ³⁾平衡矩；Stwungmoment；flywheel moment；moment d'inertie.

又 $g=9.81$ 米/秒²時， $mr^2 = \frac{222000}{4} = 55500$ 焦耳 \times 秒²。

磁極輪一次擺動所須之時間 $T = 1; 2\pi/60 = 0.32$ 秒。據此則放大因數

$$k = \frac{\beta}{\alpha} = \frac{1}{1 - BT^2/4\pi^2 mr^2} = \frac{1}{1 - 0.318} = 1.5.$$

$T^2 = 4\pi^2 mr^2/B$ 時，放大因數無限大。此時每擺動間之前移較大

。終則因發生強電流之故與他機之合作不復可能。此現象謂之共振。若設想 $4\pi^2 \times mr^2/B$ 表一擺動期間之平方，則此過程當可立時了解。與別機並聯工作時，經均勻轉動之磁極輪在整步力之影響下依此擺動期間擺動至被渦流或摩擦阻遏而復作等速圓運動。在起共振時固有振動時間¹⁾等於原動機之輔助矩重演所須之擺動時間，申言之，電機正當固有擺動告終之際，從外面之新衝動即隨之而起，故前移增加。

共振將起之際，工作已成機擺動之危險。為此務須令二擺動時間有最大可能之差，若照例電機之固有擺動時間大於原動機之固有擺動時間（第 6 方程式中用正符號），則為遠離共振狀況尚須增加二擺動時間之差，申言之，增加平衡矩。至初前移之減小為一主要利益。

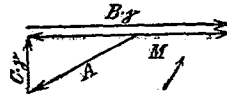
第二種方法為於電機與匯電條之間插入一抗流線圈。視徒路功率及方向力均因此減小，結果放大因數亦減小。

如交流電機之固有擺動時間自始即較原動機之固有擺動時間為短者（第 6 方程式中用負符號），則由增加平衡質量²⁾可使擺動時間接近。在此情形中以減少平衡質量為有利。

設電機具有一種由銅條組成之阻尼繞組而此繞組係在極靴之槽內，其兩端經環連接恰如在異步電動機之籠狀繞組中然。在極輪電機之筒狀磁鐵體中，阻尼繞組係由在兩端連接之金屬楔所成，後者封閉磁鐵體之槽。由電樞惹起之磁場，據第 319 面既依同步速度迴轉，是以作等速迴轉時，阻尼繞組不切磁力線。反之，作變速迴轉時，由電樞

1) 固有振動時間; Eigenschwingungszeit; time of natural oscillation; temp d'oscillations propres. 2) 平衡質量; Schwungmasse; flywheel mass; mass mobile.

惹起之磁場為磁鐵體之阻尼繞組所切過。由是而發生之電流恰如異步電動機之轉動子電流惹起一種轉矩。此轉矩阻止磁場與電流導線間之位移。額外速度或位移愈大時此轉矩亦愈大（參考第 127 節）。若命 γ 表最大額外前移及 C 表一種固定值，則最大額外阻尼矩等於 $C\gamma$ 。當額外速度最大時該矩亦最大。其作用既為反對運動，其在 B 時之值為負號巔值（圖 424a 至 d）。阻尼矩故超總矩及與之同相之整步矩之前 90° 。

圖 425. $M/B\gamma$ 時之轉矩。圖 426. $M/B\gamma$ 時之轉矩。

額外轉矩可由線表示。在第 425 及 426 圖中 A 表原動機之額外轉矩， $C\gamma$ 阻尼轉矩， $B\gamma$ 整步矩及 M 與整步矩同相之總矩。視該總矩由一代數的總和或差表明，得總轉矩 $M = B\gamma \pm \sqrt{A^2 - C^2\gamma^2}$ 。茲依第 3 方程式在經阻尼及未經阻尼之電機之總轉矩間成與前移相同之比例，申言之，

$$\frac{B\gamma \pm \sqrt{A^2 - C^2\gamma^2}}{B\beta \pm A} = \frac{\gamma}{\beta} \quad \text{或} \quad \frac{\gamma^2}{\beta^2} = \frac{A^2}{A^2 + C^2\beta^2}$$

故在各情形中阻尼作用減少在平衡位置以前之前移。然須注意者，阻尼矩及整步矩二者惹起一種額外功率。此功率有時為正，有時為負，其全部可視作一種無功功率。總功率以平均值為中心而變動。此變動惹起相應的電流強度變動而後者能擾亂工作，故須明瞭是種變動經阻尼作用而增或減，功率間之比既與轉矩間之比同，額外功率在有阻尼作用時依據第 425 及 426 圖與矩 $\sqrt{B^2\gamma^2 + C^2\gamma^2}$ 相當而無阻尼作用時與矩 $B\beta$ 相應。有阻尼作用時之額外電功率之平方對於無阻尼作用時之額外電功率之平方之比由應用前式為

$$\frac{(B^2 + C^2)\gamma^2}{B^2\beta^2} = \frac{B^2 + C^2}{B^2} \times \frac{A^2}{A^2 + C^2\beta^2}$$

今據第 4 及第 5 方程式放大因數

$$k = \beta/a = (B\beta \pm A) : A \quad \text{或} \quad \beta = A(k \mp 1) : B$$

如前上符號係當平衡質量大於共振情形中之平衡質量時適用。將 β 代於上式之右方，遂得額外轉矩之平方之比如下：

$$\frac{(B^2 + C^2)\gamma^2}{B^2\beta^2} = \frac{B^2 + C^2}{B^2 + C^2(k-1)^2}$$

又功率間之比既與轉矩間之比同，當適用下符號時，申言之，當平衡質量小於共振情形中所有者時，在各情形中額外功率均因阻尼作用而減小。然在適用上符號之情形中，即當平衡質量大於共振情形中所有者時，如若 $k-1$ 大於或 k 大於 2 者，則阻尼作用反有助。又如平衡質量極大以致放大因數小於 2 者，則依據上列方程式額外無功功率及因而電流強度之變動因阻尼作用而增加。

116. 未飽和電機中電壓損失之考慮。

今考慮電樞內之電壓損失。除歐姆電壓損失 IR 外，又有有感電壓損失 II_0 。有感電壓損失經雜散線發生而雜散線係依第427及428圖

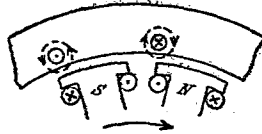


圖427. 槽之雜散¹⁾及齒之雜散²⁾。

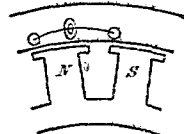


圖428. 齒面雜散。

由電樞電流單獨惹起且祇與電樞導線連繫。有感電壓損失可由經雜散線惹起之相反但相等之電壓代替。今欲將向來以為在磁鐵及電樞之公路內祇有經磁鐵激發作用及電樞激發作用共同惹起之有效通量之見解在是處暫時放棄。若嚴格言之，未飽和電機必帶有一圓筒狀轉動子。其在空際間經合成激發作用所惹起之有效感應分為二部分，其中一部分單獨由磁鐵激發作用而其他一部分單獨由電樞惹起。二者在被過高激發之機中反向。相當有效產電壓亦含有二部分。一部分 E_0 單獨由磁鐵激發作用所惹起而可由無載曲線導出，其他一部分則為由電樞電流

1) 槽之雜散；Nutenstreuung；stray of slots；dispersion des rainures。

2) 齒之雜散；Zahnstreuung；stray of teeth；dispersion des dents。

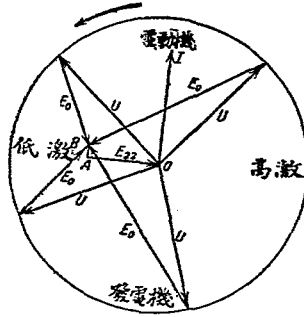


圖429. 電壓及電流不變。

在電樞及磁鐵之公路內之磁力線所惹起。此種電壓與電樞之雜散電壓合成而為總電壓 E_{22} (見第429圖)。其位置係滯在電樞電流之後 90° 。為決定此總電壓，在用鐵片製成磁鐵體及磁鐵繞組開時，導入有電壓 U' 之電流 I' 於電樞內。電壓必須極小，俾在磁鐵繞組內不致惹起有生命危險之電壓。 U' 之無功成分依額面電流與電流 I' 之比換算而係與 E_{22} 相反但相等。

今命 \bar{U} 表壓入之網絡電壓，則對於電動機及發電機適用次列公式

$$\bar{E}_{22} + \bar{U} + \bar{I}R_0 = \bar{I}R_0 \quad (a)$$

第429圖示有定網絡電壓及定電樞電流時之情形，其中 $AB = IR_0$ 。負載變動時電樞電流可由調整激發強度調整。在是處微實相之位移在過低

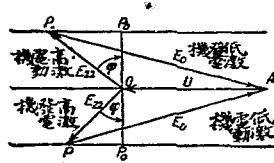


圖430. 電壓及功率不變。

激發電動機中及過高激發電機中均為正，在過高激發電機及過低激發電機中均為負。又見在發電機中 E_0 超在 U 之前，恰與原動功率增加而磁極輪作加速運動。反之，在電動機中 E_0 滯在 U 之後，恰與負載增加而磁極輪作減速運動相應。

第430圖示負載不變而激發強度變動且忽略電阻 R 時之情形。其中電流超在 E_{22} 之前 90° 。因使 OP 與 U 正交，故 POP_0 等於電流及網絡電壓間之相角 φ 。又 E_{22} 既與電流 I 為比例，當負載及網絡電壓不變時， $I \cos \varphi$ 及 OP 亦不變，而 P 則在與 U 平行之一線上運動。若不計雜散及比例尺，第430圖係與第415圖相似。

若顯及歐姆損失並命 N 表機械功率(包括摩擦)，則就電動機而言

$$U \cos \varphi = N + I^2 R.$$

設在第431圖中命 x 及 y 表電流線之終點 P 之坐標並依正坐標軸之方向設電壓 U ，則得 $I^2 = x^2 + y^2$ 及 $I \cos \varphi = y$ 。由是

$$x^2 + y^2 - \frac{U}{R} y = -\frac{N}{R}.$$

準此則當功率 N 不變而激發強度變時， P 係在一圓上，後者之半徑 r 由下列方程式表明： $r^2 = (U/2R)^2 - N/R$ 。中點之縱坐標等於 $OM = U/2R$ 。

就發電機而言，在有同一中點時， $r^2 = (U/2R)^2 + N/R$ ，其中 N 表輸入之機械功率減去摩擦。

設離 x 軸 $BC = N/U$ 之處作虛線，則由略去 U ， CP 當表電熱損失，其值在 $\cos \varphi = 1$ 時最小。

$R = 0$ 時，圓變為第430圖中之直線。

第431圖示單由磁鐵激發作用惹起之電壓 E_0 。若命 L_2 表電樞之總感應係數¹⁾，則 $\vec{E}_0 = -jL_2 \omega \vec{J}$ 。次命 $\vec{R} + jL_2 \omega = \vec{z}$ ，則由方程式(a)得

$$\vec{J} = \frac{\vec{u}}{\vec{z}} + \frac{\vec{E}_0}{\vec{z}}.$$

此時 $OA = U/z$ 及 $AP = E_0/z$ 。

今 $OA = \bar{u}/z$ 以 α 角（屬於阻抗 \vec{z} ）滯在 \bar{u} 之後。既然 $OM = U/2R$ ，故 $0.5OA : OM = R : z$ 。此值即為 $\cos \alpha$ 。據是則 OMA 三角形為一等邊三角形。

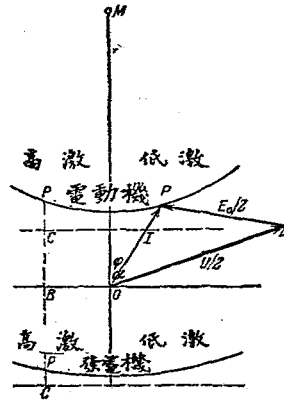


圖431. 電壓及電流圖。
 $N = \text{不變}$ ， $U = \text{不變}$ 。

117. 鐵飽和之考慮。

¹⁾ 總感應係數；Gesamtinduktivität, total inductance; inductance totale.

若磁已略許飽和，則有效磁場不能再如上分解而為單獨由磁鐵

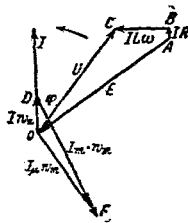


圖432. 電壓圖²⁾及電流圖³⁾。

及單獨由電樞惹起之二部分。為確定激發強度在是處利用無載曲線，例如由第433圖確定關於一電動機之磁鐵激發強度，假定已知電壓，電流強度及功率因數。嚴核言之，是種算法惟在有圓筒狀轉動子時適用。

在由圖432所示之向量圖¹⁾中，命 $AB=IR$ 表歐姆電壓損失， $BC=L\omega I$ 表由電樞雜散惹起之有感電壓損失。此時總電壓消耗 AG 等於在電樞內之產電壓 $OA=E$ 及網絡電壓 $OG=U$ 。

電壓 E 係經有效通量在電樞內發生而有效通量則為磁鐵激發作用及電樞電流二者共同合作之結果，申言之，由合成激發強度 $OF=J_\mu w_m$ 惹起。是種激發強度與產電壓 E 相應而係由無載曲線導出。其位置

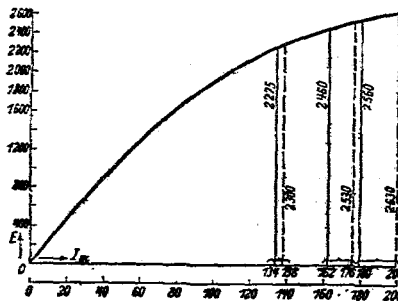


圖433. 無載曲線。

係超在 E 線之前 90° 。依電流 I 之方向作線以表依第319面計算之安匝 $OD=Iw_a$ ，於是得 $DF=J_\mu w_m$ 。一種顯明之事實為電動機與超前之電流相應被過高激發，而電樞電流則起與磁鐵激發大致相反之作用。

設欲確定一發電機之激發強度。假定該機之無載曲線如第433圖所示，而當時之路端電壓為2200伏，電流為200安，功率因數 $\cos\phi=$

1) 向量圖; Vektordiagramm; vector diagram; diagramme vectoriel.

2) 電壓圖; Spannungsbild; voltage diagram; diagramme de tension. 3) 電流圖; Strombild; current diagram; diagramme de courant.

1, 0.8 及 0. 在三情形中, 應確定有載電機與網絡分離時所增加之電壓
 • 內電阻假定為 $R=0.22$ 歐姆, 雜散之有感電阻 $L\omega=1.8$ 歐姆。又經電樞磁起之激發強度以磁鐵電流計算時假定為 20 安。

1. $\cos\varphi=1$. 有效電阻之壓耗 $I \cdot R=200 \times 0.22=44$ 伏。在有無感負載時即當 $\cos\varphi=1$ 時, 外有效電壓等於 2200 伏之端電壓。在第 434 圖中有效電壓之總和為 $AB=2200+44=2244$ 伏。

在有 200 安電流及 $L\omega=1.8$ 歐之雜散電阻時, 內壓耗 $GA=360$ 伏。

電壓 GA 及 AB 之和示產電壓 $GB=\sqrt{2244^2+360^2}=2375$, 第 433 圖之曲線示相當之總激發 $\Theta=IB=134$ 安。

又在有 200 安電流時經電樞磁起之激發為 $\Theta_2=20$ 安, 令 Θ 及 Θ_2 相加, 得磁鐵之激發 $\Theta_1=138$ 安。為簡單計, 與 GB 同向, 作表總激發 Θ 之線, 申言之, 激發及電壓係在 90° 相差之不同狀況下表出 (圖 434)。

今確定與網絡分離後所增加之電壓。在有 138 安激發強度時, 無載曲線示 2300 伏之電壓。在工作時之路端電壓既等於 2200 伏, 故所增加之電壓等於 $2300-2200=100$ 伏。此增加等於路端電壓之 4.55%, 故為一種有利之值。

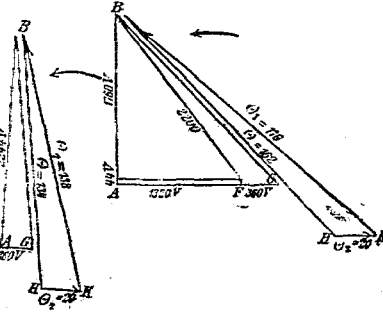


圖 434. $\cos\varphi=1$. 圖 435. $\cos\varphi=0.8$. 激發之預定。

2. $\cos\varphi=0.8$. 繪如在第 201 圖得:

$$IR=200 \times 0.22=44,$$

$$U\cos\varphi=2200 \times 0.8=1760,$$

$$I L\omega(\text{如上})=360,$$

$$U\sin\varphi=2200 \times 0.6=1320.$$

故有效壓耗之和為 $1760+44=1804$ 伏面有感壓耗之和為 $1320+260=$

1680伏。在第435圖中產電壓故為 $GB = \sqrt{1804^2 + 1680^2} = 2460$ 伏。無載曲線所示之總激發強度 $\Theta = 162$ 安。於此再加 $\Theta_2 = 20$ 安，於是得磁鐵激發強度 $\Theta_1 = KB = 176$ 安。

故在有0.8之功率因數時，為維持2200伏之路端電壓須將無載負載時之138安增至176安。此後若令與網絡分離，則電壓增加，而據第433圖當有176安之激發時，此電壓為2530伏。所增加之電壓故為 $2530 - 2200 = 330$ 伏或為路端電壓之15%。

3. $\cos\varphi = 0$ 。在有純粹有感負載時，外有感壓耗等於2200伏之路端電壓，故有感壓耗等於 $2200 + 360 = 2560$ 伏。有效壓耗既然祇有44伏且因成直角而加於其他電壓上，是以不發生影響，即產電壓仍為2560伏。於是無載曲線指出之總激發強度 $\Theta = 180$ 安。此外須加上幾乎同向之20安之電樞激發強度，遂得磁鐵激發強度 $\Theta_1 = 180 + 20 = 200$ 安。

今若再令與外網絡分離，則電壓循無載曲線昇至2630伏，故增加 $2630 - 2200 = 430$ 伏。此增加約等於路端電壓之19.5%而可視為比較有利者。

電壓之低量增加在往日頗重視。上述之電機故就高度飽和構成。復因是故，又令電機中有大空隙，使有強磁鐵激發，如是電樞之反效

應微弱。然同時電機之造價增加。自用速調整器之後，電壓之須低量的增加不復如前之重視。終則因顧及捷路電流不許有較磁鐵激發強度過小之電樞反作用（參考第345面）。



圖436。
 $\Theta_1 = I_w a \sin\psi$

總激發強度與工作時之產電壓 E 之關係因磁鐵雜散不能由無載曲線準確表明。舉證示之，假定磁鐵通量 Φ_m 相等之無載及有載二情形。磁鐵雜散全在空隙內。茲命 Φ_0 及 Φ_{s0} 分別表無載時在空隙內及雜散路內之通量；又 Φ 及 Φ_s 有載時之通量，則 $\Phi_m = \Phi + \Phi_s = \Phi_0 + \Phi_{s0}$ 。由此

$$\Phi_o - \Phi = \Phi_s - \Phi_{so} \quad (a)$$

無載時命空隙所須之激發強度等於 Θ_{I_0} ，此激發強度在雜散路內亦有作用。至齒及電樞軛之激發強度則可略去。

有載時須克服電樞反作用。設依第436圖命 $\Theta_g = I_w a \sin \psi$ ， Θ_l 表空隙本身所消耗之激發強度，則在雜散路內有效激發強度等於 $\Theta_l + \Theta_g$ 。

若命 Λ 及 Λ_s 分別表空隙及雜散路之磁導係數，則依據歐姆定律關於磁之方程式如下：

空隙

$$\text{無載時 } \Phi_o = \Theta_{I_0} \times \Lambda$$

$$\text{有載時 } \Phi = \Theta_l \times \Lambda$$

雜散路

$$\Phi_{so} = \Theta_{I_0} \Lambda_s$$

$$\Phi_s = (\Theta_l + \Theta_g) \Lambda_s$$

今將上式相減並據方程式(a)得

$$\Phi_o - \Phi = (\Theta_{I_0} - \Theta_l) \Lambda = (\Theta_g + \Phi_l - \Theta_{I_0}) \Lambda_s \quad (b)$$

求 $\Theta_{I_0} - \Theta_l$ ，得

$$\Theta_{I_0} - \Theta_l = \Theta_g \Lambda_s : (\Lambda + \Lambda_s)$$

空隙之激發強度是以比較無載時之激發強度小此量。在第437圖中作 $OA = \Theta_g \Lambda_s : (\Lambda + \Lambda_s)$ 。在A點之垂線切無載曲線於O'點。此曲線之首部既表空隙徑路之磁化曲線，故據磁之歐姆定律 $AO' = OA \times \Lambda = (\Theta_{I_0} - \Theta_l) \Lambda$ 或據方程式(b) $AO' = \Phi_o - \Phi$ 。作水平線通過O'點，得 $BC = AO'$ 及 $O'C = AB$ 。若將始點自O點移至O'點，則該曲線當表有載時通量 $\Phi = CD$ 與總激發強度 $\Theta = O'C$ 之關係。

在磁鐵激發強度預定之情形中， ψ 角為一未知值，但可切實估計而於必要時修正之。

今由上圖顯出在依曲線之直線部分而工作之電機中，磁鐵雜散之

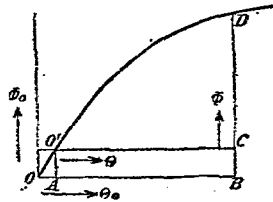


圖437. 無載激發及總激發之通量。

影響並無作用。又始點自O向O'之移動絕對不在曲線上惹起變動。

118. 有顯極時之電壓圖。

在帶顯極或凸出極之電機中由磁鐵及電樞惹起之激發強度之直接合成並不真確而在低飽和時亦然。今據勃倫台爾¹⁾法將電樞之運轉安匝 θ_a 分爲二部分。一部分爲呈正弦形之縱激發 $\theta_g = \theta_a \sin \psi$ ，其作

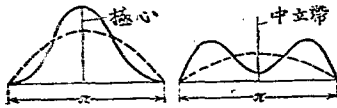


圖437a.

圖437b.

電樞縱激發之磁場。

電樞橫激發之磁場。

用與磁鐵激發反對。其他爲與之正交之橫激發 $\theta_g = \theta_a \cos \psi$ 。其中 ψ 角表電流對於縱磁場之產電壓之滯後角。第419圖僅約示有效電流及無載電流，但準確表示縱激發及橫激發。

在第19面中以 θ_a 約等於 $2\sqrt{2}Iw'$ ，其中I表有效電樞電流及 w'

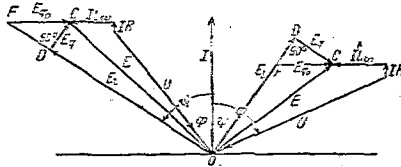


圖438. 一相電機之電壓圖(過高激發時， φ 正；過低激發時， φ 負)。

一相線之每極對之匝數。但因空氣徑路之寬度自極心向中立帶增加，經電樞單獨發生之縱磁場之曲線如第437a圖所示，而橫磁場之曲線如437b圖

所示。今僅注意是種曲線之基本波。因而命 θ_a 在縱激發中僅約等於 $2Iw'$ 而在橫激發中僅等於 Iw' 。

電樞縱激發 θ_g 與磁鐵激發 θ_m 共成縱激發 $\theta = \theta_m - \theta_g$ 而此與無載曲線中之電壓 E_L 相當。設 ψ 爲負，則 θ_g 亦爲負，申言之，合成激發大於磁鐵激發。

橫激發 θ_g 惹起一磁場。此磁場在發電機中滯在縱磁場之後 90° ，

¹⁾勃倫台爾；Flondel

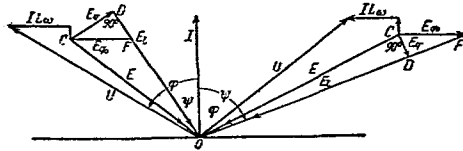


圖431. 一電動機之電壓圖(過激激發時, φ 正, 過低激發時, φ 負)。

在電動中超前在縱磁場之前 90° 。由其所惹起之電壓 E_q 依無載曲線係與激發 Θ_q 相當，而對於合成縱磁場之產電壓 E_f 在發電機中滯後 90° ，在電動機中超前 90° 。 E_f 及 E_q 兩電壓之和成爲總產電壓 E 。網絡電壓 U 不論用發電機或電動機可設想爲一種加於電機之外電壓，如是則網絡電壓 U 與產電壓 E 之和等於歐姆壓耗及經雜散惹起之有感壓耗（參考第438及439圖）。

在預算一電機之磁鐵激發時，假定已知電壓，電流，功率因數及內歐姆電壓損失及有感電壓損失並由是而確定在第438及439圖中之電壓 E 。此仍爲一未知值，故 $\Theta_q = \Theta_a \cos \psi$ 之值亦未定。故從無載曲線導出與 Θ_a 相當之產電壓 E_{q0} 並從 E 減去此電壓。 E_{q0} 係滯在電流之後 90° 。在 OF 之 C 點之垂線等於 $E_{q0} = E_0 \cos \psi$ 。於是又得 $F_f = OF$ 。在無載曲線上可求得與此相當之合成縱激發。爲得磁鐵激發須再加上電樞之縱激發 Θ_f ，當時務須注意符號。

119. 電樞激發及電樞雜散之分離¹⁾。

爲由試驗以確定電樞激發及電樞雜散，先製無載曲線次將尚未激發及以尋常轉數轉動之電機設安培計捷接，激發少許並觀察當時之電樞電流。今依水平方向表磁鐵電流及依鉛直方向表無載電壓及捷路電流（圖440）。上圖之曲線係由引用海蘭氏之結果而製出。

電機裝有抗流線圈或無載三相交流電動機或過低激發無載同步電

¹⁾ 電樞雜散之分離；Trennung der Ankerstreuung; separation of armature leakage; séparation de la dispersion d'induit.

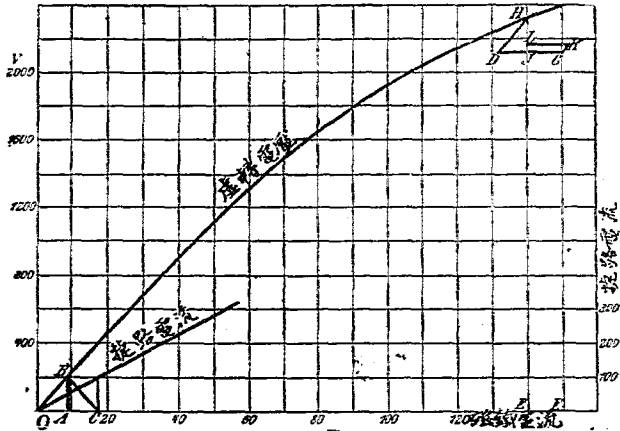


圖440. 無載曲線，捷路曲線及波蒂埃三角形。

動機之純粹有感負載。若忽略小歐姆電壓損失，則產電壓等於內有感電壓損失及外路端電壓之代數的總和。同時電樞電流之作用直接反對磁鐵激發，故合成激發等於磁鐵激發及電樞激發之代數差。

今在捷路實驗¹⁾中有感電壓損失 AB 當電流等強時與有感負載時相等，而電樞激發 CA 之作用亦直接與磁鐵激發 OG 反對。

依據波蒂埃由是可導出一種分離電樞激發及電樞雜散之方法。假定成捷路及有有感負載時，電流等於 100 安。次依下列諸值作圖：

OF = 150 安，為有純粹有感負載時之磁鐵激發。

FG = 2140 伏，為有純粹有感負載時之路端電壓。

GD = OC = 18 安，為成捷路時之磁鐵激發。

DH 與無載曲線之始部同向。

OBC 及 DHG 兩三角形 (波蒂埃三角形²⁾) 既相符合，在有 100

¹⁾捷路實驗；Kurzschlussversuch；short circuit experiment；essai de court-circuit. ²⁾波蒂埃三角形；Potiersches Dreieck；Potier's triangle；triangle de Potier.

安電樞電流時，電樞反作用等於 $GJ = CA = 10$ 安，電樞激發 Θ_a 係以磁鐵電流之安數計算及 $JH = AB = 180$ 伏等於有感壓降。圖中電壓損失及路端電壓之代數和表示虛電壓 EH 而後者為合成激發 $OE = OF - EF$ 所惹起。

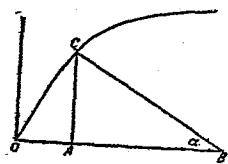
若顧及如在前節末段所述之無載曲線之始點之移位，則 G 依無載曲線始部之方向向 K 移動，且以等於 $\Theta_a \times \Lambda_s / (\Lambda + \Lambda_s)$ 之未知量向左右水平移動。如從 K 作從 G 相同之線，則達同點 H ，但電樞反作用為 LK 以代 JG 及雜散電壓 HL 以代 HJ 。準此

$$\Theta_a = LK = JG + \Theta_a \Lambda_s / (\Lambda + \Lambda_s), \text{ 申言之, } \Theta_a = JG (\Lambda + \Lambda_s) / \Lambda.$$

120. 同步機之捷路電流¹⁾。

捷路電流有永久捷路電流及衝動捷路電流之分。茲忽略二者之內歐姆電阻。捷路在三相線中均發生且係在接線螺旋處。

永久捷路電流²⁾ I_k 係經磁鐵激發 $I_m w_m$ 及電樞激發 $I_k w_a$ 二者相反對之作用所惹起之弱磁場在電樞之內雜散電阻 $L\omega$ 內促成。若為簡單起見，僅用帶圓筒狀轉動子之電機，則依第 319 面在三相機中 w_a 等於 $2w'$ ，其中 w' 表每相線每極對之匝數。各激發均就一極對而計算。



在第 441 圖中， OB 表有負載時之磁鐵激發 $I_m w_m$ ， $AB = I_k w_a$ ， OA 合成激發及

圖 441. 永久捷路。

$AC = L\omega I_k$ ，其中 L 表電樞之雜散感應係數。依所用之比例尺， $\tan \alpha$ 既等於 $L\omega : w_a$ ，則永久捷路電流不難確定。

1) 同步機之捷路電流；Kurzschlußstrom der Synchronmaschine；short-circuit current of synchronous machine；courant en court-circuit de machine synchronone. 2) 永久捷路電流；Dauerkurzschlußstrom；permanent short-circuit current；courant continu en court-circuit.

設若除去有感電阻 $L\omega$ ，則 $I_k w_a = I_m w_m$ ，永久捷路電流之電樞激發與磁鐵激發維持平衡而在電樞內之合成磁場等於零。

同時知 I_k 決不能大於 $I_m w_m / w_a$ 。凡有弱磁鐵激發之電機，申言之，凡帶小空隙及小空氣感應之電機故有一小永久捷路電流，尤其在有小空氣感應時，電樞之匝數須多，俾有負載時惹起額面電壓。

衝動捷路電流¹⁾ I_{st} 比較永久捷路電流遠大。在發生捷路之際，有負載時之全部通量尚存在極心內，而祇緩緩離開電樞。故一俟捷路發生之後，立即發生一極強之衝動捷路電流。以 E 表有載時之產電壓，衝動捷路電流之方程式如下：

$$I_{st} = \frac{E}{L\omega} \quad (a)$$

在不帶阻尼繞組之電機中，電樞內之通量立時減少，其一部分經當時發生之衝動捷路電流排出。上式中之 L 等於電樞雜散磁場及磁鐵雜散磁場之感應係數之和。

衝動捷路電流與變壓器連接時（參考第93節）可推算出之值之二倍。當時危險更甚。對於由衝動捷路電流所惹起之強機械力，線圈首部互相並經電樞之端板抵住。

為限制衝動捷路電流應用大電樞雜散。今以 I 分方程式(a)之二邊，遂得 $I_{st} : I = E : I L \omega$ 。若依規定衝動捷路電流不許超出額面電流之15倍，則因顧慮上述之二倍值，雜散電壓對於產電壓成如1 : 7.5或13 : 100之比。

若一發電機與其相連之變壓器構成一單位而若捷路係在變壓器之副接線螺旋處發生，則在方程式(a)中， L 當表電機及變壓器之雜散感應係數之和。

121. 自動電壓調整。

¹⁾衝動捷路電流；Stosskurz chlußstrom；impulse short circuit current.

用高速調整器¹⁾之自動電壓調整²⁾今日已告成功。在各高速調整器中，例如在A.E.G公司之地利爾調整器，S.S.W.調整器及B.R.C.調整器中經由意外電壓變動起一種開關過程，後者使電壓不僅向所須之強度但尚以遠大之強度依相反方向變動。電壓之過度變動復為一相反之開關過程所阻止。以下係就地利爾調整器³⁾而說明（圖442）。對於網絡饋電之交流電機或三相交流電機G在其磁極輪內由勵磁環導入激發電流。此電流係由電機M（激發機）發生而後者之磁鐵繞組 R_m 由插入電阻R與激發機之電樞相連接。電阻R經接觸k依有規則的距離捷接而為兩桿 h_1 及 h_2 作用之結果。先設想桿 h_1 固定。 h_1 桿受彈簧 f 依時針方向之作用同時又受經激發機饋電之線圈 s_1 依逆時針方向之磁效應之作用。 h_1 桿故有如一感應器之錘之動作。

接觸k閉合時，電阻R被捷接。激發機強經激發，而其電壓變大。經該機饋電之 s_1 圈，因此時其力超過螺旋 f ，拉開接觸k。電阻R遂被插入於激發機之磁路內，該機之電壓減小而由其饋電之 s_1 圈之力亦減。此時螺旋 f 之力較大，再關閉接觸k。此過程依規則反覆連演不已。

今因自感應激發機之磁鐵電流於電阻R被捷接後達其顛值之前須經過若干時間。接觸k故在此終值達到以前早開，而俟磁鐵電流於電阻R插入後將降達終值以前

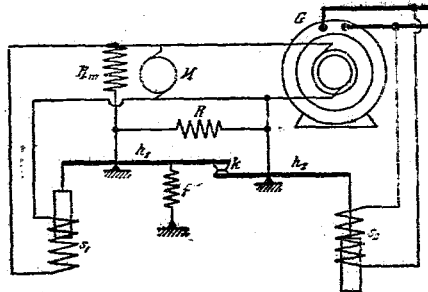


圖442. 地利爾調整器之接法。

1) 高速調整器; Schnellregler; high-speed regulator; régulateur à grande vitesse. 2) 自動電壓調整; selbsttätige Spannungsregelung; automatic voltage regulation; réglage automatique de tension. 3) 地利爾調整器; Tirrillreglere Tirrill-regulator; régulateur de Tirrill.

早閉。

電阻R永久在電路內時磁鐵電流等於OA而永久被捷接時等於OB(圖443)。接觸被捷接時，電流依曲線 C_1 增加，而當接觸開時依曲線 C_2 遞減。曲線之變動如在第317及318圖中在某一定工作狀況下，假定激發機之磁鐵電流之有規則的變動係由鋸齒形線表明。是種鋸齒形線係由 C_1 及 C_2 二曲線之等高部分合成。激發機之電壓及發電機G之電壓於是在一中間位置為相當的變動。

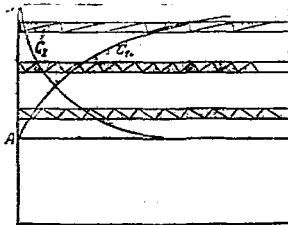


圖443. 地利爾調整器中之激發電流。

今於接觸之上部依規則運動時，以手掀起其下部並以後再固持之。接觸之二部分因當時每次上下接觸較久，電阻R被捷接較久，以是磁鐵電流達一較前為大之值。同時螺旋被張較甚，故為開斷接觸， s_1 線圈須有較大之力，申言之，激發機之電壓及磁鐵電流須較強。接觸

之上部此後在一較高平衡位置左右躍動而磁鐵電流在一較大平均值上下變動。電流之鋸齒形曲線故在第443圖中向上移動。

反之，當接觸依規則運動之際，設向下拉其下部而後仍固持之，則接觸每次開啓較久。磁鐵電流遂降至較以前為低之值。此後接觸在新平衡位置上下躍動，螺旋被張較鬆，因此磁鐵電流亦在一較小平均值上下變動。鋸齒形線是以在第443圖中向下移動。

在實際情形中，以手所司之運動自動經路端電壓之變動促成。為此利用槓桿 b_2 ，後者經 s_2 線圈之力反時針轉動方向轉動，而鐵心之重使之順時針方向轉動。線圈 s_2 係與網絡電壓相連接，而當有某一定網絡電壓時，線圈之力與鐵心在各位置維持平衡。

設因負載增加，網絡電壓下降，則鐵心之重占優勢， b_2 槓桿遂依時針方向略許轉動並抵上接觸之下部。反之，設因負載減少，路端電壓增加，則 s_2 線圈之力較大，反時針方向轉動 b_2 槓桿並向下移動接觸

之下部。如是經自動的動移，激發機之磁鐵電流變動，恰與經手移動時然。此種變動使網絡電壓隨時有等大之值。

由第 443 圖指出當接觸有與中間鋸齒形線相當之位置時躍動數最多而當有較弱及較強磁

鐵電流時減少。磁鐵電流之強度故並非全由躍動數表明。

又當有弱平均磁鐵電流時，電流增長之時間比較遞減之時間為短。反之，當有強平均磁鐵電流時，電流增長之時間較長。此種現象似並非為激發機之磁鐵電流變動之一原因但為其一結果。

依據丹厄爾遜¹⁾若用一變壓器及匯電環使網絡電流通過與發電機聯軸之直流激發機亦可使網絡電壓不變或於必要時自動增加(圖 444)。激發機

之磁極框對於迴轉電樞可扭轉，其時可忽略變壓器並認為二機互相串聯而此由聯軸節為之——丹厄爾遜換流機²⁾。

由交流發電機發生之電流(假定為三相交流)故被直接導入於激發機之電樞內。在靜止電樞內經此促成電流同步迴轉的分配。反之，若電樞反此迴轉方向迴轉，則電流——多相時——位置固定。此在轉動換流機或在電樞迴轉而極固定之各同步發電機或電動機中亦見之。

今可由扭轉磁極框使電樞電流及產電壓間有任意之相。為此依第

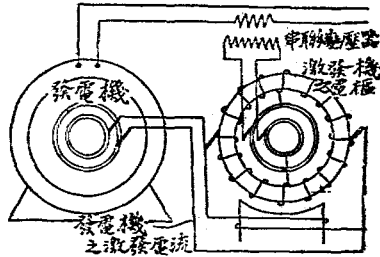


圖 444. 丹厄爾遜機之激發。

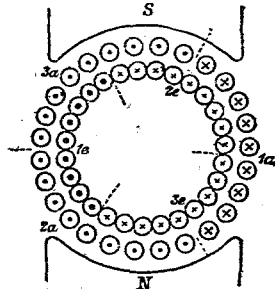


圖 445. 丹厄爾遜電機。

¹⁾丹厄爾遜; Danielson. ²⁾丹厄爾遜換流機; Danielsonumformer; Danielson's converter; convertisseur de Danielson.

445圖旋轉磁極框，致帶磁滯電流之圈邊當有純粹有感負載時在中立帶內而無電極惹起之激發有與磁鐵激發同向之作用。若外無功電流經任一負載增長，則後者增強激發機之磁場並因而激發電流。如是，經所增加之滯後電流惹起之電壓損失為之抵消而網絡電壓遂維持不變。

在丹尼爾遜轉動換流機之匯電環上之電壓由應用變壓器被加於主電機之電壓上。其時丹尼爾遜機視磁極框之位置略有同發電機或電動機之作用。

第二十章 三相交流電動機

122. 三相交流電動機之工作方法。

異步三相交流電動機¹⁾含有由鐵片合成並繞三線之固定部分，所謂固定子或定子，及其他亦由鐵片合成之迴轉部分，所謂轉動子²⁾或轉子。固定子係由三相交流網絡饋電。在轉動子之繞組內與固定子之互感應惹起電流。因此異步三相交流電動機亦稱曰感應電動機³⁾。在籠狀轉動子或捷接轉動子中，轉動子繞組係由銅條組成。各條間由兩端之環聯絡(籠狀或捷接轉動子⁴⁾)。籠狀轉動子有時由嵌入鋁之合金於沿轉動子圓周之依軸向之孔內造成，其中亦將端環一併嵌入。繞線轉動子⁵⁾(繞線電極)含有二相或三相繞組。此種繞組由匯電環與電阻相連接，而後者俟電機起動後即被捷接或為調整轉數即經改動。

¹⁾異步三相交流電動機; asynchrone Drehstrommotoren (Dreiphasenmotoren); asynchronous three phase current motors; moteurs asynchrone triphasés. ²⁾轉動子或轉子; Läufer; rotor; rotor. ³⁾感應電動機; Induktionsmotor; inductionmotor; motor d'induction. ⁴⁾籠狀轉動子或捷接轉動子; Käfigläufer (Kurzschlussläufer); squirrel cage rotor (short-circuited rotor); rotor à cage d'écureuil. ⁵⁾繞線轉動子(繞線電極); Phasenläufer (Phasenläufer); phase rotor (phase armature); rotor de phase (au dit de phase).

第 446 圖示一發電機。此機饋電於一三相交流電動機之固定子。每二相對邊構成一相線。例如發電機內第一相線之繞法在第一槽內係自後向前，再在前端面橫穿端面而達 1'，復由前向後，終在後端面自 1' 回至 1，如是往返繞繞至全數之匝繞畢為止。

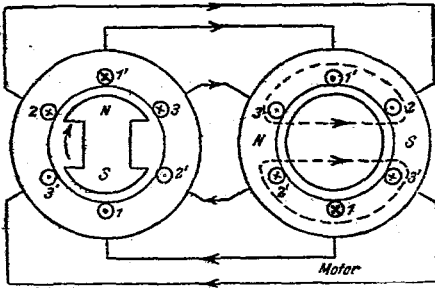


圖 446. 三相交流發電機及三相交流電動機，整節繞組。

電動機之固定子繞法全與發電機之固定子繞法相同。發電機及電動機之相當相線係互相連接。為避免交叉，電動機之線依與發電機線相反之方向表出。實際並無六導線但據第 328 面之說明僅有三線。

電動機之固定子繞法全與發電機之固定子繞法相同。發電機及電動機之相當相線係互相連接。為避免交叉，電動機之線依與發電機線相反之方向表出。實際並無六導線但據第 328 面之說明僅有三線。

在第 446 圖中磁極軸之中心正在第一相線之圈邊前。若不計相移位，此線放通最強電流而隣近圈邊據第 328 面祇帶有一半強之電流。

今隨電動機固定子內之電流可知圈邊 3', 1 及 2' 係磁的相屬而圈邊 2, 1' 及 3 亦磁的相屬。

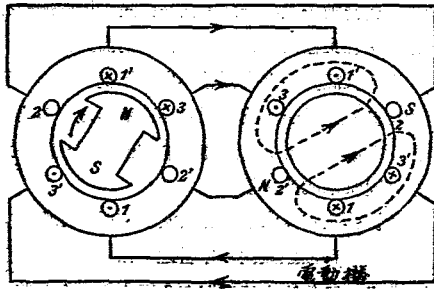


圖 447. 三相交流發電機及三相交流電動機，同第 446 圖但在 1/12 週期之後。

相線，各圈邊共同合成一圈邊，其內電流之方向均一致。依據安培定則，在電動機內發生如虛線所示之磁場及固定子中 N, S 極心之位

置。

第47圖示磁極輪迴轉 30° 後之發電機。此時第二相線正在中立帶內且不帶電，而其他二線各帶 $i_m \sin 60^\circ = 0.866 i_m$ 之電流。在電動

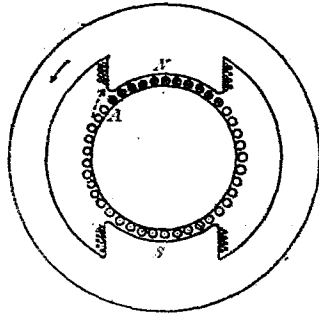


圖 443. 由迴轉中之磁極指示轉動磁場。

機內一方面1及3'圈邊相屬，而他方面3及1'相屬，故亦發生如虛線所示之磁場及磁極心N,S之位置。

故在 $1/12$ 週期之時間內，磁極心迴轉 $1/12$ 之圓周。在電動機內於是發生一個與發電機同步迴轉之磁場。若設想有多相繞組以代三相繞組，則據第

83節中之說明，在電動機及發電機內依正弦均勻分配之電流與磁極輪同步迴轉。至是轉動磁場¹⁾遂完全(轉動激發²⁾)。故實際不但有轉動磁場，且有轉動電流。為直觀的表明轉動磁場，乃以一個反時針而轉動之磁極框(圖448)代之。此情形與轉動子順時針之方向在固定磁場內迴轉相同。為表示產電壓之方向，在此極前描矢尾而在南極前描矢首。

吾人又認圖中之磁極輪不僅示單獨由固定子發生之磁場但示由固定子電流及轉動子電流共同合作而惹起之全磁場。在此情形中，轉動子內產電壓與轉動子電流間並無相位移。在極心之前，故不僅產電壓最強且同時電流亦最強。

今據楞次定律產電流有與運動相反對之作用，故有阻止磁場及轉動子線相對移位之傾向，申言之，轉動子隨磁場迴轉之方向轉動。為明瞭此點，設想依安培定則在北極之前一人自前向後，面向北極游泳。產生之力有驅北極向左手一方面移動之傾向。磁場及轉動子經此力

¹⁾ 轉動磁場; Drehfeld; rotating field; champ tournant. ²⁾ 轉動激發; umlaufende Erregung; rotation excitation; excitation rotative.

——由虛矢線指出——互相聯繫。其中情形恰如讓帶攜一非磁性鐵輪而迴轉。

設轉動子在軸承內作無載及完全無摩擦的迴轉，則其轉數（三相交流電動機之轉數¹⁾）等於磁場之轉數，申言之，係同步。因當時轉動子不切磁場，在轉動子內並不惹起電壓及電流。當時之迴轉即所謂完全無載迴轉。

反之，若轉動子帶負載，則為惹起所必須之轉矩須有某一定轉動子電流。故轉動子之轉數略許落在磁場轉數之後，申言之，當時發生退移。其轉數差即為退移轉數 n_s 。因有此差，轉動子之線可切磁場，如是在轉動子內可產生該轉矩所須之電流。恰如固定子電流，此種電流為一種轉動電流，其對於轉動子以 n_s 退移轉數迴轉。轉動子既以 n 轉數在空間迴轉，故轉動子電流必依 $n + n_s = n_0$ 之轉數在空間迴轉，故恰如固定子電流係同步。尋常為在轉動子之小有效電阻內惹起充量電流祇須有極小電壓。以是之故，退移極不大（往往祇1至2%）。

今因在普通狀況下轉動子之轉數近磁場之轉數，二極繞組在用普通頻率時概不適用。為使三相交流網絡上之燈發甯靜之光既須用50赫芝之頻率，故當固定子有二極繞組時，磁場及轉動子須有每秒50次或每分鐘3000次之迴轉。為免用此種高轉數，乃應用多極繞組。為此設想將在全圈上之線圈移集在一半圓周上並用其他之線圈繞在其他半周上並將其串聯於其後。在第449圖中，例如各匝包含圓周之四分之一部分。其中僅示一相線之端連接。至於其他相線僅指出其在槽內之電流矢之首尾，當時假定電流在以實線表示之一線內最強而在其他二線內僅一半強。第449圖示當時四個極之位置。各線內電流強度及極之位置同移位。在一週期間磁場僅迴轉半轉。

茲命 p 表極對之數， f 網絡電流之頻率及 n_0 磁場之轉數，申言之，即同步轉數或作完全無載轉時之轉數。其關係如下：

¹⁾三相交流電動機之轉數；Drehzahl des Drehstrommotors; speed of three phase current motor; nombre de tours de moteur trifasée.

$$n_0 = f/p.$$

設命 n 表有載轉動子之轉數，則無載時與有載時轉數之差等於 n_0 。

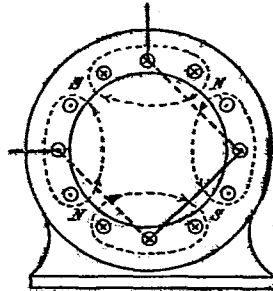


圖440. 四極繞組。

n_0 之差表示轉動子以如是多之轉數初遇個定磁場。又如命 σ 表遷移。申言之，即轉數降與磁場轉數之比，則轉動子線切磁場之頻率為

$$\sigma \times f = p(a_0 - n) \quad \text{或} \quad \sigma = \frac{n_0 - n}{n_0} \quad (1a)$$

因有負載時，轉數降下之故，普通三相交流電動機概稱曰異步電動機。

轉動子之轉向與轉動磁場之轉向同，若將成星形或三角連接之固定子之二主線互相交換，其轉向遂倒轉¹⁾。

若不在固定子內但在轉動子內饋電，被捷接之固定子繞組變成副部分，則轉動子反磁場迴轉。當時磁場依退移之頻率迴轉而在絕對無負載時完全靜止。

帶線圈繞組之轉動子大概與固定子依同一極數及大都又依同一相線數繞成。帶籠形繞組之轉動子可與有各極數之固定子合用。

123. 三相交流繞組之磁場。

三相交流繞組係分散在多數槽內而可視為配置均勻之光繞組。圈邊之寬度假定等於 $1/3$ 之極節距。又假定圓周一直展開。第1相線之框用粗線，第二相線之框用細線而第3相線之框用虛線表明。在如第450圖所示之時間，假定第1相線內電流之臨時值略小於巔值，在第2相線內則最小。一圈邊線數與電流強度之臨時值之乘積假設有 θ_1 ， θ_2 及 θ_3 之絕對值。依據第450圖其間之關係如下：

¹⁾ 倒轉；Umsternung; reversing; renversement de marche.

$$\Theta_1 = \Theta_2 + \Theta_3.$$

今欲調查在圖兩若下處之空間感應
 • 爲此循第 451 圖中之一閉線。此線在
 假定之點自固定子進入轉動子而在有相
 反等大感應之點復自轉動子回至固定子
 內。兩點故相距一極節距。如電流作對
 稱的分配恰如在第 453 及 455 圖中可使閉
 線與磁力線相符合以代包圍一極節距。

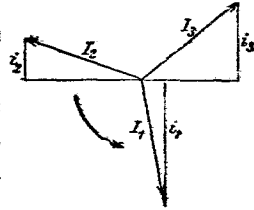


圖450. 電流之臨時值。

經閉線包圍之貫穿率依據貫穿定律等於 $\int hcdl$ 。如忽略鐵內之路程
 ，則在空腔內兩處之感應與在此二處間之貫穿率爲比例。故如在感應
 之處作垂線以表貫穿率，則得一磁場曲線。如顧及電流方向而以電流
 矢首均指正方向，則得

在B及D間 貫穿率 $\Theta_1 + \Theta_2 - \Theta_3 = 2\Theta_2$

在D及K間 貫穿率 $\Theta_1 + \Theta_2 + \Theta_3 = 2\Theta_1$

在F及M間 貫穿率 $\Theta_1 + \Theta_3 - \Theta_2 = 2\Theta_3$

是種貫穿率與第 450 圖中電流 i_1, i_2 及 i_3 之臨時值爲比例，而是種臨時值

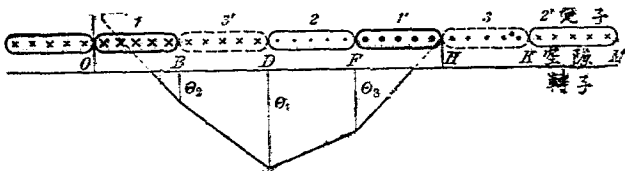


圖451. 寬度等於1/3極節距時之磁曲線。

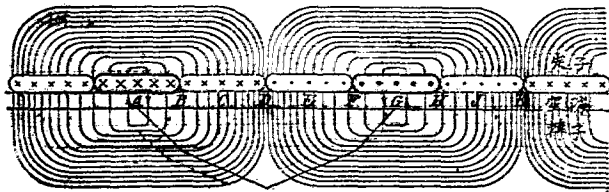


圖452. 寬度等於1/3極節距時之磁場曲線， $i_1 = i_m$ 。

可直接在各關係點由垂線表明。如是乃得在B,D及F之感應。據對稱理由須依反對方向在D設垂線 i_1 而在H設垂線 i_2 。以是各圈邊磁場曲線均呈直線形。

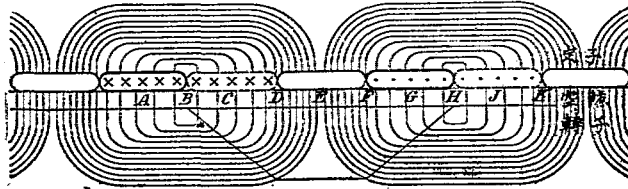


圖453. 寬度等於1/3極節距時之磁場曲線, $i_2=0$.

在所示時間略許之前, 電流 i_2 等於巔值 i_m 而電流 i_1 及 i_3 等於 $i_m/2$ 。其時磁場曲線如第452圖所示。在依同向通過之圈邊之中點A及G, 磁場通過零值並在B及F有與 i_m 相應之一半巔值, 終則在D有與 $2i_m$ 相應之全巔值。

又略許之後, 電流 i_2 等於零而電流 i_1 及 i_3 等於 $i_m \sin 60^\circ = 0.866 i_m$ 。今依第453圖第1及第3相線成一有雙寬度之公共圈邊。磁場在其中點B及H通過零值而在D及F之間有與 $2 \times 0.866 i_m$ 相應之不變值。

由此可見在如第452及453第所示之二時間之間, 即在 $1/12$ 週期間, 磁場前進 $1/6$ 極節距並由尖形變為平坦形。在此整形之間有依第

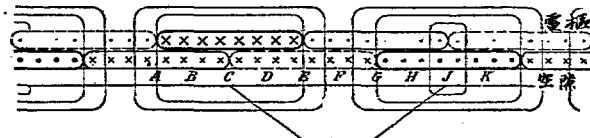


圖454. 寬度等於2/3極節距時之磁場曲線, $i_1=i_m$.

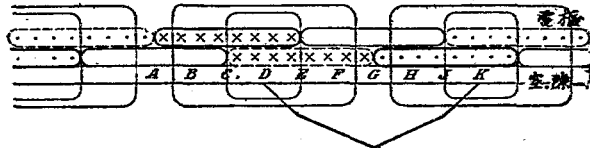


圖455. 寬度等於2/3極節距時之磁場曲線, $i_2=0$.

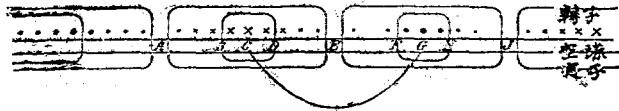


圖456. 由籠形電樞惹起之磁場。

451圖之不整形。在以後 $1/12$ 週期間，磁場由平坦形復同至尖形。磁力線與感應相應，其疎密不同。

第452圖及453圖中之磁場曲線之平均值幾乎完全相等。故在迴轉之際，磁場曲線之形狀雖變動，通量却不變動。

今設想一轉動換流機之帶有 $2/3$ 極節距之寬度之繞組。其中各相線之圈邊依第454及455圖交互重疊。在第454圖中電流 i_m 等於最大值 i_m 。在AE間第1圈邊之磁效應係經與相重疊之其他二線之半圈邊之效應輔助。在該二線內有 $i_m/2$ 電流通過，磁場在G等於零而在A及E與 $1.5 \times i_m$ 電流相應。在E與G之間其強度不變。是處經反向電流通過之二圈邊之效應互相抵消。結果得一平坦磁場曲線。

$1/12$ 週期之後，電流 i_2 等於零而電流 i_1 及 i_3 各等於 $0.866i_m$ (圖455)。感應在D點等於零，在C及E與電流 $2 \times 0.866 i_m \times \frac{1}{2} = 0.866i_m$ 相應而在A及G與電流 $3 \times 0.866i_m$ 相應。尖形磁場曲線如是形成。

上述二磁場曲線係與第452及453圖中所示者相同，惟在該時間其任務已交換。同時平均感應依 $0.866:1$ 之比亦較小。故用廣大圈邊係屬不利，因此在三相交流電動機中不適用。

最後考慮籠形電樞之轉動子電流發生之磁場。此電流之分佈呈正弦形而在第456圖中經相當粗之矢首及矢尾表明。由電流惹起之磁場在G及G均等於零，此後依正弦形遞增而終則在E達其最大值。設電流之分佈不絕，磁場亦繼續，但磁場曲線不變，故與線圈電樞不同。

124. 略去鐵電阻之磁化電流¹⁾。

¹⁾ 三相交流電動機之磁化電流 (Magnetisierungsstrom des Drehstrommotors; magnetizing current of three phase current motor; courant d'aimantation de moteur triphasé).

在第457圖中當轉動子電路開時第1固定子相線通最強電流 i_m 。設命 Λ 表在一齒前雙空際之傳導， q 每相線每極之槽數， s 每槽內串聯之線數， p 極對數，則第1相線之線匝與經 i_m 電流惹起之通量之連環：

$$p\Lambda \times i_m s^2 \{2(1^2+3^2+5^2+\dots+q^2)+2(q-1)q^2+q^2\}.$$

其中不計 y 齒，通量加倍計算。

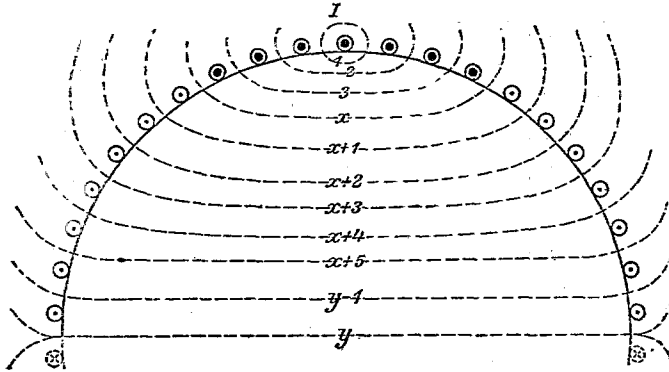


圖457. 磁力線，經三相線發生，與第1相線連環。

第1相線之線匝與由其他二相線之電流 $i_m/2$ 惹起通量之連環為

$$2p\Lambda \times \frac{i_m}{2} s^2 q \{2(1+2+3+\dots+q-1)+q\}.$$

據級數學說二連環之和為

$$\Sigma\Phi_w = p\Lambda \times i_m s^2 q (5q^2+1)2/3. \quad (a)$$

若命 w 表一相線之全匝數， F 一極節距之面積及 l 雙倍空際之長，

則

$$s = \frac{w}{p \times q} \quad \Lambda = \frac{\pi \cdot F}{3ql} \quad i_m = \sqrt{2} I_o.$$

設將此值代入(a)式內，則得有效無功電流

$$I_o = \frac{9}{4\pi I_o} \times \frac{q^2}{5q^2+1} \times \frac{p \times L \times U_1}{f \times F \times w^2},$$

其中 $U_1 = 4.44 \Sigma\Phi_w f$.

今命 $4\pi H_c(5q^2+1):9q^2=k$ 以 $H_c=4\pi \times 10^{-9}$ 亨利/厘米，則每極每相線之槽數有種種之值時， k 之值如下：

$q=$	1	2	3	4	∞
$k=$	1.05	0.91	0.88	0.87	0.86×10^{-7} 亨利/厘米

歐利根公司¹⁾之某種110仟瓦電動機例如有如下之各值：

$U_1=1910$ 伏， $f_1=50$ 赫芝， $p=6$ ， $F=763$ 平方厘米， $l=0.15$ 厘米， $w=336$ 及 $q=3$ 。於是

$$I_0 = \frac{1910 \times 6 \times 0.15}{0.88 \times 10^{-7} \times 336^2 \times 763 \times 50} = 4.5 \text{ 安。}$$

125. 鐵飽和之考慮。

在前節例題中假定一固定子齒及一轉動子齒共長6厘米，而齒節距與齒寬度之比平均等於2.5。假定磁場呈正弦形，依第313面固定子通量

$$\Phi_1 = \frac{E_1}{4.44 \times 5 \times f \times w} = \frac{1910}{4.44 \times 0.96 \times 50 \times 336} = 2.69 \times 10^{-2} \text{ 伏秒。}$$

因固定子之雜散空氣通量 Φ_d 比較固定子通量小2%，故有 2.64×10^{-2} 伏秒。空氣感應之平均值等於 $10^3 \times \Phi_d$ ； F 高斯，故顛值

$$\theta_m = \frac{\pi}{2} \times \frac{\Phi_1 \times 10^3}{F} = \frac{\pi}{2} \times \frac{2.64 \times 10^6}{763} = 5450 \text{ 高斯。}$$

今隨意選定一磁值並計算為在空間該點惹起此感應所須之關於空氣及鐵之激發強度。關於空氣之部分 $\theta_1 = 0.8 \theta_m$ 。既等於0.15厘米，故 $\theta_1 = 0.8 \theta_m \times 0.15$

$= 0.12 \theta_m$ 。在鐵內因須顧及經紙占有之空間損失，感應依2.5:0.85 = 2.95:1之比例略大，故 $\theta_2 = 2.95 \theta_1$ 。

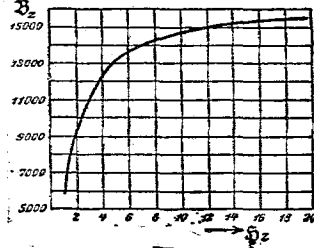


圖453. 鐵片之磁化曲線。

¹⁾ 歐利根公司；Oerlikon Gesellschaft.

第 458 圖中關於鐵片之磁化曲線示每長單位之激發強度 h_z 於是 $\Theta_z = h_z l_z$ ，其中 l_z 表齒長之雙倍值。故在本情形中 $\Theta_z = h_z \times 2 \times 6 = 12h_z$ 。 $\Theta_l + \Theta_z$ 示關於感應所須之有效激發強度 Θ 。今作表以示 h_z 在 2000 及 5200 間之各值如下：

h_z	$\Theta_l = 0.19 h_z$	h_z	h_z	$\Theta_z = 12h_z$	$\Theta = \Theta_l + \Theta_z$
2000	380	5900	1.1	13	253
3000	570	8850	1.9	23	383
4000	760	11800	3.6	43	523
4500	855	13300	5.4	65	605
5000	950	14800	10.7	128	728
5200	1002	15300	18.5	222	850

今估計無載電流因鐵阻須增加 20%，申言之， $I_0 = 5.5$ 安培以代 4.5 安培。

茲依水平方向表圓周及垂直方向表在各關係點之激發強度 $\Theta = \Theta_l + \Theta_z$ ，則得第 459 圖之曲線 Θ ，後者與第 452 圖中之第一限界情形相應。關於 $\pi/2$ 弧得最大激發強度： $2i_m \times w/p = 2\sqrt{2} \times 5.5 \times 336/6 = 870$ 。反之， $\pi/6$ 之有效激發強度等於巔激發強度之一半。

在垂軸上設 Θ 值並在各分點作水平線。次在水平線與 Θ 曲線之切點設垂線並使後者之長自水平軸算起等於上面相關之 h_z 值。

連接垂線諸末端而成之曲線係表在各關係時間有 5.5 安電流時所徵求之磁場曲線。茲依申普遜定則確定此磁場曲線與水平軸所包圍之面積並以基線分之。由是得磁化流電為 5.5 安時之平均感應強度為 3635。

第 460 圖示關於第二限界情形之同樣曲線。依第 453 圖巔激發強度為 $1.73 i_m w/p = 1.73 \sqrt{2} \times 5.5 \times 336/6 = 750$ 。今復作 Θ 及 h_z 之曲線，確定由曲線 h_z 及水平軸包圍之面積並以基線分之。由是得平均感應強度為 3583。若取此二限界情形中之平均值，則得 $h_{z平均} = 0.5(3635 +$

¹⁾申普遜：Simpson.

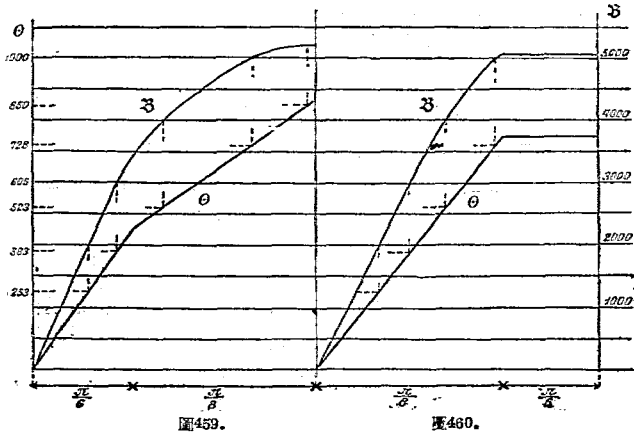


圖459.

圖460.

兼顧齒之鐵阻時之磁場曲線。

3583) = 3609。實際在轉動子內發生之通量 Φ 於是為 $\Phi = \frac{1}{2} \text{平均} F = 3609 \times 763 \times 10^{-8} = 2.75 \times 10^{-2}$ 伏秒。此值既極近所欲有之 2.64×10^{-2} 之值，故可認為電流強度及通量間有等大之比。因而為惹起 2.64×10^{-2} 伏秒激發強度所須之電流為 $I_0 = 5.5 \times 2.64 / 2.75 = 5.3$ 安。

實際測得 6 安培之無載電流。無載電流算出之值之所以仍小於測出之值者，因當計算時不計固定子心及轉動子心之鐵阻及不注意空間傳導因有槽孔而減小之事實之故。

126. 三相交流電動機之轉矩。

假定一三相轉動子之一相線之圈邊之中點照第 461 圖對於正弦形磁場之零值發生 α 角之位移。此時沿轉動子圈邊之感應之平均值及在轉動子內發生之電壓與 $\sin\alpha$ 為比例。若以轉動子內實有合成磁場為磁場——其中含有經轉動子發生之磁力線，則在電壓 e_2 與經其發生之轉動子電流 i_2 之間可無相差。準此不但感應強度即轉動子電流亦與 $\sin\alpha$ 為比例，申言之，周邊力與 $\sin^2\alpha$ 為比例。

若為第2相線及第3相線，則以 $\sin^2(\alpha+120^\circ)$ 及 $\sin^2(\alpha+240^\circ)$ 代之。今由 $\cos 2\alpha = 1 - 2\sin^2\alpha$ 得

$$\sin^2\alpha + \sin^2(\alpha+120^\circ) + \sin^2(\alpha+240^\circ) = 3/2.$$

故電動機之轉矩與 α 無關，申言之，先後不變。

為計算轉矩 M ，假定由固定子輸於轉動子中之功率為 N_p ，此功率係

經帶同步轉數 n_0 之轉動磁場所輸入，其方程式如下：

$$N_p = M \times 2\pi n_0. \quad (2)$$

轉矩故與輸入於轉動子內之功率為比例。一方面有 n 轉數時之機械功率為

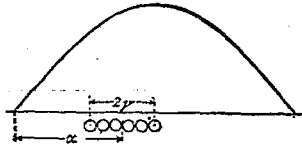


圖401. 在磁場中之轉動子位置。

$$N_m = M \times 2\pi n. \quad (2a)$$

準此則有 I_2 之轉動子電流及 R_2 之轉動子電阻時，電熱損失為

$$3I_2^2 R_2 = N_p - N_m = M \times 2\pi(n_0 - n). \quad (3)$$

由是得退移

$$\sigma = \frac{n_0 - n}{n_0} = \frac{3I_2^2 R_2}{N_p} \quad (4)$$

故恰如在直流分繞電動機中然，轉動子內之相對功率損失等於相對轉數降落

今據第319面在有正弦形磁場時

$$I_1 R_2 = E_2 = 4.44 \xi_2 \Phi \sigma f w_2,$$

其中 R_2 表一相線之電阻及 w_2 一轉動子相線之匝數。據此則依第4方程式

$$N_p = \frac{3 \times I_2^2 \times R_2}{\sigma} = 3 \times 4.44 \times \xi_2 \Phi f w_2 I_2. \quad (5)$$

由第2方程式以 $n_0 = f/p$ ：

$$M = 3p \times 4.44 \xi_2 \Phi w_2 I_2 / 2\pi. \quad (6)$$

設 Φ 以伏秒計及 I 以安培計，則轉矩當以焦耳計。為得以仟米克計之轉矩，則須以9.81分之。該方程式與關於直流電動機之轉矩之方

程式相似。

在一捷接轉動子中， $3w_2$ 表轉動子之一半係數而繞組因數為一，故捷接轉動子在相同狀況下惹起一種比較由線圈轉動子惹起者略大之轉矩。

第 6 方程式又可依次法導出。固制轉動子，其法使固着於軸上之一橫臂壓在一秤上，在外面匯電環之間插入電阻 R_n 並使在轉動子及外電路內有相同之接法，例如同有星形接法。此後如饋電於固定子內，則電動機工作如一變壓器。於是在有同一固定子電流時，轉動子電流，通量，所輸之功率及轉矩皆與作電動機而迴轉時相同。在轉動子內發生之電壓今不復與小退移但與全網絡頻率相當。此時轉動子路內之電阻不再為 R_2 但為 $R_2 + R_n$ ，故轉動子電流復與有負載時同。今如將轉動子內之電壓及電流強度互相乘積可直接得如下之值：

$$N_{12} = 3 \times 4.44 E_2 \Phi f w_2 I_2.$$

經此在靜止狀態之試驗可直接測出工作時之轉矩。既然 $N_{12} = 3I_2^2 \times (R_2 + R_n)$ ，故又可依次式計算工作時之退移

$$\sigma = \frac{3I_2^2 R_2}{N_{12}} = \frac{R_2}{R_2 + R_n}.$$

127. 無雜散之三相交流電動機¹⁾。

為簡單起見，假定忽略在固定子或轉動子之槽及圈首四周而不穿過其他部分之繞組之雜散通量。其時故祇有一種平均貫穿固定子磁，孔氣路及轉動子鐵之磁通量。此種通量係由固定子及轉動子共同激發發生且由略去固定子內之歐姆電壓損失經由常網絡電壓規定，故有一常值。其磁場方向假定在第 462 圖中為自左向右，因此在圖中表示合成激發強度 I_p 之線亦自左向右。

磁場恰如幅線然反時針方向迴轉，致在轉動子線內發生在 A 及 B

¹⁾ 無雜散之三相交流電動機；stromungloser Drehstrommotor; no leakage three phase current motor' moteur triphasé sans dispersion.

透其巔值之電流。故據法拉第定則，在此情形中在左方見有電流矢之尾，在右方有矢首。在A及B之四槽內之矢首及矢尾係屬於一相線而由特別粗之線表明。在隣近相線內，電流僅一半強，故用細線表明。

表示轉動子激發強度 I_{II} 之線既須與單獨由轉動子電流發生之磁場之線同向表出，故其方向為自上向下。今為悉起總激發強度 I_{II} ，固定子之激發強度必依相及大小等於 I_1 。固定子電流之巔值故係在C及D而CD則與 I_1 正交，在C點示電流矢之矢首，在D示矢尾。在上述情形中，固定子之各圈邊係在三槽內。在C及D圈邊之矢線最粗而在隣近圈邊之矢線僅一半粗。

第462圖表示固定子電流及轉動子電流大致相反，恰如在變壓器之第一繞組及第二繞組內之電流然。如已在第351面中說明轉動子內之最大電流位移，知為與固定子電流及轉動磁場同步。職是之故，在轉動子及固定子內無論在靜止或轉動時有同步迴轉之激發強度。為瞭解三相交流電動機自動在空間同步之迴轉，轉動子電流之意義至關重要。此意義固非極容易瞭解者，蓋有負載時，轉動子線係依轉動磁場及迴轉中之固定子電流之方向運動，故亦依固有的迴轉轉動子激發之方向迴轉。最好設想轉動子電流完全與導線相分離，故無論電流在何線內流動及導線迴轉與否均無關係。

第462圖指出在磁場最強部分內橫切磁場之轉動子圈邊之電流最強。以是在一轉動子相線內之電流滯在為該相線包含之通量之後 90° 。在A及B帶最強電流之圈邊不包含通量。亦因是故，表轉動子電流之 I_{II} 線對於被包含之通量 I_{II} 亦滯後 90° 。當時之情形故與無感或載變壓器中完全相符。

今注意磁場不但經轉動子且又經固定子切過，故在所示之時間，固定子內電壓之巔值亦係在A及B處發生。GA弧故與固定子電流及網絡電壓U之相角 φ 相當。其所以然者，網絡電壓U超在 I_{II} 之前 90° 。

三相交流電動機之所以有比較大的相位移者，因其恰如感應電動機自創其磁場，且因空氣間隙而須有一較強無載電流或磁化電流之故

• 雖然固定子與轉動子間之距離往往減至一毫米之幾， $\cos \varphi = 0.9$ 之功率因數祇在較大電動機中可有且祇在特別大的電動機中可超出此值。

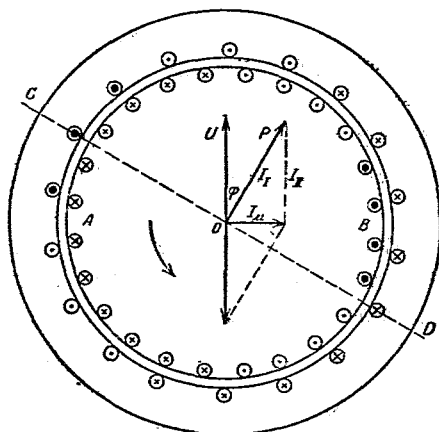


圖462. 三相交流電動機中之電流分佈。

在無雜散之電動機中， Φ 及 I_m 之值既一定，故當負載變動時，固定子電流線之終點 P 循與 U 平行之一線移動。

今欲將無雜散之電動機之最重要之各量就其與退移之關係而表示之。在固定子內發生之電壓 E_1 係與通量 Φ 有關而該通量在無雜散之電動機中為固定子及轉動子所公有。又 E_1 與頻率 f ，固定子之線數及繞組因數 k_1 有關。當圓透寬度為 $1/3$ 之極節距時此繞組因數等於 0.955 。設命 w_1 表固定子分路之匝數，則在一相線內發生之電壓： $E_1 = 4.44 k_1 \Phi \times f w_1$ 。若不計固定子有效電阻之損失，則產電壓與路端電壓相反而相等，是以一定，因此通量 Φ 亦不變。

今設想轉動子線切過帶 $\sigma \times f$ 退移頻率（移頻）或滑頻之磁場，在線內於是發生電壓 $E_2 = 4.44 k_2 \Phi \sigma w_2$ 。

設命 R_2 表轉動子相線之電阻，則轉動子電流 $I_2 = E_2/R_2$ 。據以上關

於 E_2 之方程式，此電流故與退移為比例。若命 C_1 表一常數，則 $I_2 = C_1\sigma$ 。轉動子電流之與退移為比例焉，在正常工作極限內縱在無雜散之電動機中亦屬實情。轉動子內之磁場可視為幾乎不變。

據第360面第6方程式，轉矩 M 係等於轉動子電流 I_2 與通量 Φ 之乘積。通量在是處不變而轉動子電流則與退移為比例。若命 C_2 表一常數，則轉矩 $M = C_2\sigma$ 。

輸給於轉動子之功率 N_R ，據第360面第5方程式與通量及轉動子電流為比例。通量既為一常數，該功率當與退移為比例。若 C_3 表一常數，則 $N_R = C_3\sigma$ 。

終則機械功率 N_m 等於輸在轉動子上之功率減去轉動子內之電熱損失。今此損失與電流之平方故與退移之平方為比例。若命 C_4 表一常數， R_2 一相線之轉動子電阻，則 $N_m = N_R - 3 \times I_2^2 R_2 = C_2\sigma - C_4\sigma^2$ 。

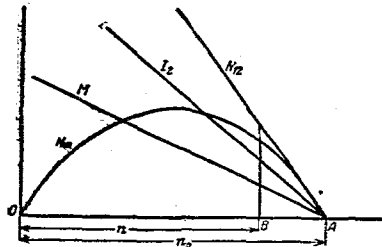


圖463. 電流速度，轉矩及功率與轉數之關係。

今於第463圖中依水平方向表明轉數並依垂直方向表明轉動子電流，轉矩，所輸之功率及機械功率。茲命 OA 表作完全無載時之轉數 n_0 及 OB 在有某一定負載時之轉數，則 OA

— $OB = BA$ 當表由退移惹起之轉數降落。轉動子電流 I_2 ，轉矩及輸於轉動子之功率 N_R 均與此轉數降落為比例，故皆由垂線表示之。反之，機械功率 N_m 由一拋物線之垂線表示。其值在 O 點即當轉數等於零時等於零——當電動機插在電路內之後但尚未運動時或被制動而停止時。又在 A 點即在作完全無載轉時亦等於零。至電動機最適當之負載則遠在右端，在是處轉動子內之退移及損失皆小而效率則大。

實際電動機與上述無雜散之電動機之主要差別在於起動時之轉矩及過量負載。在無雜散之電動機中，起動時或轉數尚為零時之轉矩特別之大。反之，在實際電動機中若不插電阻於轉動子路內，則因雜散之關係，起動轉矩特別之小。

128. 有雜散之三相交流電動機之電流圖¹⁾。

導磁係數在各工作狀況下尋常認為不變，今據羅哥斯基氏²⁾以轉動子電流及固定子電流為與磁場同步迴轉之電流。同時又忽略固定子電阻。在固定子內發生之電壓故與路端電壓相等而相反，故不變動。全部固定子通量因此亦不變且滯在路端電壓之後 90° 。故如在第 464 圖

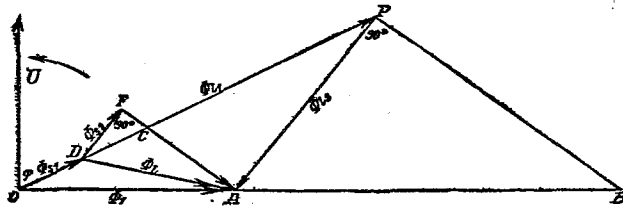


圖464. 三相交流電動機中之磁通量。

¹⁾電流圖之歷史的發展頗興味。1894年海蘭氏(Heyland)在ETZ雜誌中刊載電流圖，其中利用感應係數並同時顧及固定子電阻。此不甚明晰之工作當初全無人注意，我後海氏不得不另示一簡單圖法，其中將原電阻一併插在副電路內(Voits Sammlung el. Vorträge Bd II, 1900)。其間倍蘭(Behrend)根據勃舍舍爾(Blondel)之成法但不知有海蘭氏之工作在1895年底發表電流圖，但其中忽略固定子電阻(參考ETZ, 1896, 第63面)。倍蘭圖法中之略致的不一致以後在1900年由安姆特(Emdo)校正(ETZ 1900, 第781面)並在ETZ中發表極有價值之宏論。歐塞那氏(Ossanna)在1899年之Wiener Zeitschrift für Elektrotechnik雜誌中又於1900年於ETZ中詳論其分析之由來，其中顧及固定子電阻並示由利用功率線以讀功率之方法。愛爾諾(Arnold)及拉哥爾(La Gour)藉倒轉法(Inversion)以研究此問題而勃洛克(Bloch)在1917年應用複算法而獲得大成就。主關於實地之製圖，沛地生(Petersen)已供給重要之基礎(Kittler-Petersen; Allgem. Elektrotechnik; Stuttgart, 1910)。²⁾羅哥斯基 Rogowski。

中依垂線向上表示路端電壓U，則表全部固定子通量 Φ_1 之OA線當依水平方向向右。固定子電流之線係依OP方向。

依據第465圖全部固定子通量係等於與固定子電流同相之固定子雜散通量 $\Phi_{s1} = OD$ 及空氣通量 $\Phi_l = DA$ 之和。空氣通量係單獨由固定子電流惹起之空氣通量 $\Phi_{l1} = DP$ 及單獨由轉動子電流惹起之空氣通量 $\Phi_{l2} = PA$ 之和。故轉動子電流與PA之方向一致。

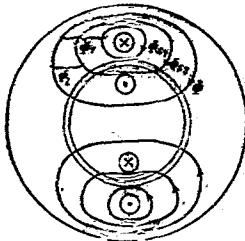


圖465. 在三相交流電動機中之磁通量。

無負載時空氣通量以全強度貫穿轉動子。有負載時依第465圖分為轉動子雜散通量 $\Phi_{s2} = DF$ 及轉動子通量 $\Phi = FA$ 。其故因在有負載時其固定子激發強度恰如在變壓器中為抵消由轉動子惹起並呈反對作用之激發強度，或與之成平衡。因轉動子激發之反壓，在副雜散路內有雜散通量歷入。

轉動子電流既依PA方向，故固定子電流之與轉動子電流維持平衡之一部分必依AP方向。此電流依第464圖使與AP同相之轉動子雜散通量 $\Phi_{s2} = DF$ 由側面穿過轉動子之雜散徑路。據此則轉動子雜散通量亦係由固定子電流所惹起，故有與轉動子電流相反對之相。

FA於是表穿過轉動子線匝之空氣通量，申言之，即有負載時之轉動子通量 Φ 。此種通量在轉動子內惹起滯後 90° 之電壓。

$\Phi = FA$ 既表穿過轉動子徑路之實有通量，故此外再無自成應通量。轉動子電流故如在第363圖中與在轉動子內經此通量 $\Phi = FA$ 所惹起之電壓同相，故恰如該電壓然滯在FA之後 90° 。準此則DFA之角等於 90° 。

今試命 Λ_{s1} 及 Λ_{s2} 表雜散場之傳導及 Λ 空氣場之傳導。次利用由下列方程式決定之雜散因數¹⁾：

¹⁾ 雜散因數；Streuungsfaktor; leakage factor; facteur de dispersion.

$$\eta_1 = \frac{\Lambda}{\Lambda_{s1} + \Lambda} = \frac{DP}{OP}, \quad \eta_2 = \frac{\Lambda}{\Lambda_{s2} + \Lambda} = \frac{PA}{FA + FD} = \frac{CP}{DP}.$$

再依FA方向設PB,則得

$$\eta_1 \times \eta_2 = CP : OP = AB : OB. \quad (7)$$

OA既有一定,故AB及OB亦不變。又APB角既等於90°,故P係

在以AB為直徑之圓上。今固定子電流與其發生之通量同相並同比例,因而固定子電流I之OP線之終端在第46

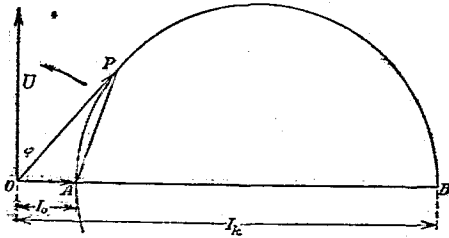


圖46,三相交流電動機之電流圖。

6 圖中係在一圓

上。又無載時及與帶無阻轉動子路成理論捷路時,在電動機中既止有感應電阻,故無載電流及捷路電流滯在電壓之後90°,申言之,OA表無功電流I₀及OB在用無阻轉動子(及無阻固定子)時之理論捷路電流I_k(海爾圖)。於是在理論捷路電流OB=I_k與無載電流OA=I₀之間發生下列關係:

$$(I_k - I_0) : I_k = \eta_1 \eta_2 \quad (8) \quad \text{或} \quad I_0 : I_k = 1 - \eta_1 \eta_2. \quad (9)$$

又轉動子電流I₂與固定子電流I₁之關係依第46圖係由次列方程式表明: I₂w₂ : I₁w₁ = PA : DP = PA : η₁OP, 故如在電流圖中OP表固定子電流I₁, 則 PA = η₁ × I₂w₂ : w_{1}. \quad (10)}

若不由通量則亦可由其發生之電壓說起。為簡單起見,假定轉動子帶線圈繞組。令L₁及L₂分別表固定子及轉動子之與三相線之作用有關之總感應係數及M固定子與轉動子間之互感係數。匝數相等時M與所受之通量為比例而L₁及L₂與總通量為比例,當時一部分被鎖單位強之電流而其他部分則閉。

靜止固定子相線被切之角速度在經固定子及轉動子惹起之二同步

迴轉之磁場內係等於固定子電流之角速度 ω 。準此則在固定子內自感應電壓 $E_{11} = L_1 \omega I_1$ 及互感應電壓 $E_{21} = M \omega I_1$ 。

自感應電壓 E_{11} 滯在固定子電流 I_1 之後 90° 。依第467圖二電壓合成而為總和OA。當不計固定子電阻時，此總和與固定路端電壓相反且相等，故AO當表路端電壓。電流滯在路端電壓之後之 φ 角遂等於 E_{11} 滯在正垂軸之後之角。

又若命 σ 表退移，則由固定子發生及轉動子發生之轉動磁場以 $\sigma\omega$ 角速度切迴轉中之轉動子相線。準此則自感應電壓及轉動子內之互感應分別為 $E_{22} = L_2 \sigma \omega I_2$ 及 $E_{12} = M \sigma \omega I_2$ 。二者相併等於轉動子電阻 R_2 內之壓耗 $I_2 R_2$ 。 $I_2 R_2$ 超在電流 I_2 之產電壓 E_{22} 之前 90° 。

今線迴轉之角速度其關於轉動子者與關於固定子者不同。 E_{11} 與 E_{21} 間之角與 E_{12} 與 E_{22} 間之角相等，因其由兩轉動磁場之位相差決定之故。故在某一瞬間 E_{22} 之方向與 E_{21} 一致而 E_{12} 之方向與 E_{11} 一致。

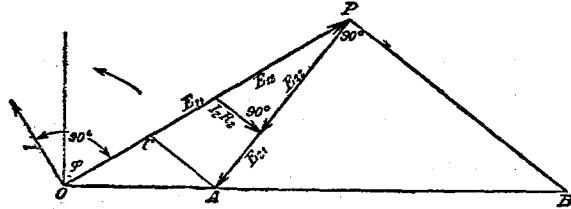


圖467. 由電壓圖導出電流圖。

設依 $I_2 R_2$ 方向作GA及PB二線，則

$$CP = \frac{E_{12} \times E_{21}}{E_{22}}, \quad \text{或} \quad \frac{AB}{OB} = \frac{GP}{E_{11}} = \frac{E_{12}}{B_{11}} \times \frac{E_{21}}{E_{22}} = \frac{M^2}{L_1 \times L_2}. \quad (11)$$

既然 $M = \eta_1 \times L_1 w_2 / w_1 = \eta_2 L_2 w_1 / w_2$ ，故AB:OB等於 $\eta_1 \eta_2$ 。 E_{11} 線之末端因此係在以AB為直徑之圓上。又既然 E_{11} 與固定子電流 I_1 為比例，則OP由變更比例尺與固定子電流為比例。因OP與垂軸間之角等於 φ ，路端電壓之線在電流圖中向上而與垂軸相符合。

依據第219面之複算法亦可得相同結果。

129. 依電流圖之電數值及機械數值。

以上曾假定定子電阻等於零並又忽略鐵損失。由是遂得一個中心在一水平軸上之圓，即所謂電流圖。若嚴密考慮固定子電阻（參考第318及325面），則亦得幾乎等大之直徑及中心之橫坐標，僅中心略在水平軸之上。在有較大固定子電阻之小電動機中可有之最大因數遂被改良。且有負載時之電流當初略強於無載電流。

然在適中及大型電動機中固定子電阻之影響極小，海蘭認為在作圓時可以略去此電阻。在468圖中， $O'A'$ 表以前由 I_0 表示之磁化電流 I_H 。中心M係在 $O'A$ 之延長線上。關於固定子內之銅損失假定此損失耗去導入之功率之一部分。

為顧及直接經網絡電壓抵償之鐵損失 V_g ，設想在圖中將固定子電流線之始端O向下移動 $OO' = V_g / 2U$ 之距離。由是可認鐵損失在各工作狀況下均不變，而此由原電壓規定固定子軛內及齒內之通量一點證明之。故此種通量縱使如成捷路時為一種完全雜散通量促成一種固定鐵損失。

為簡單起見海蘭以鐵損失加於摩擦損失而視為由加入於轉動子內之功率抵償之。此種假定但不準確。

在第468

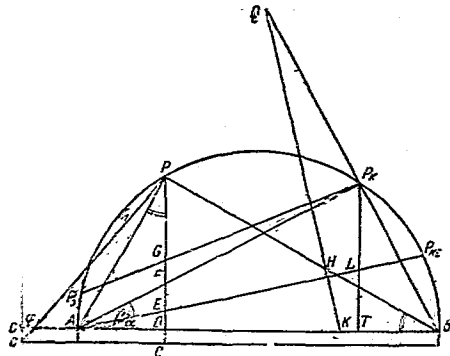


圖468. 三相交流電動機之電流圖。

圖中 OP_0 表為

若起磁化作用及抵償鐵損失及摩擦損失所須之無功電流， OB 在用無阻固定子及轉動子時之理論捷路電流， OP_{ki} 在用無阻轉動子時之理

想捷路電流及 OP_k 實有捷路電流。

電流圖示有各固定子電流 $OP=I_1$ 時相當之功率因數 $\cos\varphi$ 。OP成圓上之切線時其值最大。此最大因數依據第9方程式(OO' 既極微小)：

$$(\cos\varphi)_m = \frac{r}{r+I_0} = \frac{0.5(I_k - I_0)}{0.5(I_k + I_0)} = \frac{\eta_1\eta_2}{2 - \eta_1\eta_2} \quad (12)$$

其中 r 表半徑。最大功率因數故僅與雜散有關。下表示有各雜散因數時之最大功率因數，故又示 $I_k:I_0$ 之比例之各值，其中假定 η_1 等於 η_2 。由該表知 $\cos\varphi=0.9$ 之值不易達到而祇能偶然起出之，其故因當時 η_1 及 η_2 必須有0.97之較大值。

又由第466圖示對於功率因數有利之功率電流(其線成圓上之切線)可依次列方程式決定：

$$I_1 = \sqrt{I_0 \times I_k} \text{ 或依第9方程式 } I_0/I_1 = \sqrt{1 - \eta_1\eta_2} \quad (13)$$

在下表中 I_0/I_1 之值係就各雜散因數而列出。由此知有最小相位移時無載電流等於工作電流之1/5至1/3。此經固定子與轉動子間之空間所惹起之較高無載電流雖為一種無功電流且因此不惹起直接工作損失，然仍為一種缺點。在固定子及轉動子內僅有2%雜散時，無載電流往往仍為工作電流之0.2倍。

又由電流圖可讀出功率。設命 U 及 I 表一相線之值，則導入之功率 $N_1=3U \times GP$ 。由此須減去磁損失 $V_g=3UCD$ 。為欲從剩餘再減去固定子內之銅損失，依法描 AP_{kf} ，俾 $\tan\alpha=(AB+2I_0)R_1:U$ 。次依廣義畢泰哥拉斯

$$I^2 - I_0^2 = AP^2 + 2I_0AD = AD \times AB + 2I_0 \times AD = AD(AB + 2I_0)$$

據是，則 $3(I^2 - I_0^2)R_1 = 3U \times AD \tan\alpha = 3U \times DE$ 。

故若忽略 $3I_0^2R_1$ 小損失，則 DE 當表固定子內之電熱。損失 $3I^2R_1$ 以後可加於無載損失，尤其因作無載轉時該損失與摩擦損失及磁損失一併備定。

今命 $R_{II} = R_2 w^2 / w_2^2$ 表依同匝數換算而成之轉動子電阻。次描出

AP_k ，俾 $tg\beta - tg\alpha = AB \times R_{II} : \eta_1^2 U$ 。於是依第10方程式

$$3I_2^2 R_2 = \frac{3AP_k^2 \eta_1^2}{\eta_1^2 \eta_2^2} R_2 = \frac{3AD \times AB}{\eta_1^2} R_{II} = 3U \times AD (tg\beta - tg\alpha)$$

既然 $ADtg\beta = DF$ 及 $ADtg\alpha = DE$ ，故 $3I_2^2 R_2 = 3U \times EF$ 。

AP_k 及 AP_{ki} 稱曰歐善那¹⁾ 功率直線。

機械功率 $N_m = 3U \times FP$ ，由此減去摩擦損失。此損失在作無載轉時最大。後隨退移之增長而遞減，終至在靜止時等於零，因此故可以 AP_k 與 P_o, P_k 間之 FG 線表示之。又有用功率 $N = 3U \times GP$ 及效率 $\eta = GP : CP$ 。

輸於轉動子中之功率 $N_{12} = 3U \times EP$ 。由是則依據第 360 面力矩及有用轉矩

$$M = \frac{3pU}{2\pi f} \times EP \quad (14) \quad M_n = \frac{3p \times U}{2\pi f} (EP - AP_o). \quad (15)$$

若電壓，電流及頻率均以實用量度計算，則轉矩當以焦耳計算。

若忽略固定子電阻，總轉矩與圓之縱坐標為比例。為確定三相交流電動機之過載量²⁾，假定電動機在自額面負載時帶最小相位移而工作，故固定子電流之線與圓可接觸。準此以觀，當略去固定子電阻時，圓之相關垂線表額面轉矩之量而半徑表轉覆矩³⁾，申言之，即最大轉矩。故當 φ 表最小相角時，過載量等於 $1 : \sin\varphi$ 。下表末行即據是計算。

據該表可知加倍之過載量惟偶然超出之。電動機自然可依法構造使固定子電流可在規定負載下小於圓上之正切。如是祇略許增長 φ 角，但過載量觀諸所選之低負載自然顯明增長。

1) 歐善那; Ossanna. 2) 三相交流電動之過載量; Überlastbarkeit des Drehstrommotors; overload capacity of three phase current motor; capacité de surcharge de moteur triphasé. 3) 轉覆矩; Kippmoment; overturning or tilting moment; moment de renversement.

$\eta_1 = \eta_2$	$\frac{I_k}{I_0} = \frac{1}{1 - \eta_1 \eta_2}$	$(\cos)_m = \frac{\eta_1 \eta_2}{2 - \eta_1 \eta_2}$	$\frac{I_0}{I} = \sqrt{1 - \eta_1 \eta_2}$	透高負載量 = $1 : \sin \rho$
0.94	8.6	0.79	0.34	1.69
0.96	12.8	0.85	0.28	1.99
0.98	25	0.92	0.20	2.56

退移之圖法如第 213 面所示。然將近額面負載時，此圖不準確。從 BP_k 線上任意一點 Q 設一與 AP_{ki} 線正交之垂線。此垂線切 PB 線於 H 點及 AB 線於 K 點。於是 AEF 與 QKB 三角形及 AEP 與 HKB 三角形因相當角等大之故係相似。準此，則退移視為轉動子內之相對功率損失

$$\sigma = \frac{EF}{EP} = \frac{EF}{AE} \times \frac{AE}{EP} = \frac{KB}{QK} \times \frac{HK}{KB} = \frac{HK}{QK}.$$

設若選定 Q 使 QK 等於 100 毫米，則以毫米數計之 HK 直接示退移之百分率。

在實地製海蘭圖，其法先依電流及功率之測法確定無載電流 OP 之量及相。次減電壓，測得捷路電流並依比例依額面電壓換算之。若為線圈電樞，當其尚作無載轉時將刷移開之後立即測定無摩擦之無載電流 OA。摩擦損失並非由網絡一方面但經動能抵償，故動能減少。若為捷接轉動子，則作無載轉時賦與常頻率及可變動電壓以代之。其時因磁場同步迴轉而退移又小，轉數在廣大界限內可視為不變並可將磁損失及摩擦損失如在直流電機中（圖 163 及 164）分離，其中電壓以水平線表出。在捷接轉動子中於是亦得 A 點。此點與無摩擦之無載轉相當。

圖之中心係在通過 A 點之水平線上而其位置係由與 P、P 正交之中間線決定。至 P_{ki} 或由 $\tan \alpha$ 決定或在 P_k 點之垂線上設 $L/T = I_k^2 \times R_i / U_1$ 並從 A 設一線通過 L。

130. 例。

以下將選損失併於摩擦損失內，試作一關於歐利剛機器廠之 a 電。

動機之電流圖（參考ETZ 1900，第1087面）。該電動機係就440仟瓦之功率及每分鐘75轉之特別低轉數而構成。此種低轉數自然要求一較多極數及依第135節之說明一種較大雜散。據於此理乃用 $f=22.5$ 赫芝之頻率以代50赫芝之一般的頻率。此情形自然要求發電機與電動機同樣設計。準此則 $n=75/60$ 轉/秒時，極對數 $p=f/n=18$ 。轉動子之直徑約為300厘米，空氣間隔0.2厘米。

在依三角連接之固定子接線螺旋之電壓 $U=1900$ 伏。一相線之固定子電阻 $R_1=0.4$ 歐姆，實際轉動子電阻 $R_2=0.016$ 歐。一固定子相線之匝數 $w_1=432$ 。轉動子帶有一採線繞組，後者係分配在432槽內，故一相線之匝數 w_2 等於72。

作無載轉時，由網絡導線導出之電流為62安，故在一相線內 $I_0=62/\sqrt{3}=36$ 。又在網絡導線內之額面電流為170安，故在一相線內 $I=170/\sqrt{3}=100$ 安。總無載損失連鐵損失在內經確定為 $N_0=16000$ 瓦。又雜散因數為 $\eta_1=\eta_2=0.946$ 。

準此得 $OA=I_0=36$ ，又依第9方程式 $OB=I_k=I_0:(1-\eta_1\eta_2)=342$ 。又據第371面 $R_{II}=R_2w_1^2/w_2^2=0.58$ ， $\text{tg}\alpha=(AB+2I_0)R_1:U=0.08$ 及 $\text{tg}\beta=AB\times R_{II}:\eta_1^2U+\text{tg}\alpha=0.186$ 。

關於摩擦功率之有效電流既等於 $N_0/3U=2.8$ ，故藉D及F間之E點（在第469圖中並不表明）依第15方程式可算出有用轉矩

$$M_n = \frac{3pU}{9.81 \times 2\pi f} (EP-2.8) = 74(EP-2.8) \text{ 仟米克。}$$

有用功率為 $3U(EP-2.8)$ 而效率 $\eta=(EP-2.8):DP$ 。各線自然表費培數。

依是法由第469圖表明I有各值時之數字表。第三橫行與額面負載相當。未縱行係關於網絡電流而當固定子成三角連接時係等於 $\sqrt{3}I_1$ 。

I=OP	FP-2.8	DP	$\eta =$	$\cos\varphi =$	$M_n =$ 74(EP-2.8)	$\sqrt{3}I$
			FP-2.8 DP	DP OP		
45	21.2	24.2	0.87	0.548	1565	78
60	38.7	42.7	0.91	0.718	2900	104
100	73.5	80.5	0.916	0.805	5600	173
196.3	121.2	142.7	0.85	0.73	9520	340
220	123.9	150	0.83	0.682	10000	380
243	121.2	152.5	0.793	0.63	10100	421
(284)	113.5	150.2	0.793	0.57	9700	490

第470圖中之曲線係用此表之諸值製出，其中將有用轉矩依水平方向表明。由表知最大轉矩等於10000仟米克，而有額面負載時約等

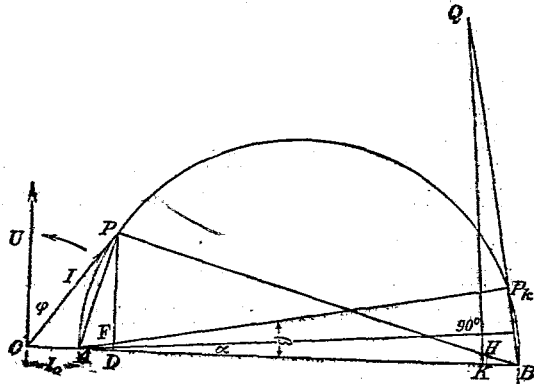


圖469. 電流圖 1毫米=4安培。

於5600仟米克。電動機故約有加倍過載量，其時網絡內之電流漲度自173安增至421安。若負載再增加，則電動機停止迴轉，因而由電流圖右方取出之值不成平衡。此種值祇於初轉時或過載電動機逐漸旋轉時有效。

當有額面負載時轉數等於73，退移故等於75之2或2.7%。負載增

加時，轉數遂緩減而當有最大負載時降至96.6。

當負載運增時，效率及功率因數之曲線依比例迅速上昇，至有規定負載時達其巔值，此後有過載量時再逐漸遞減。二曲線在巔值附近之一大線段內幾乎水平，此實為一可注意之點。一140仟瓦電動機可僅有約92%之效率及 $\cos\varphi=0.81$ 之功率因數。在第135節中且說明該

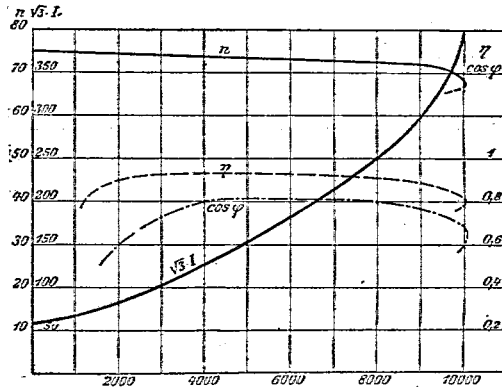


圖470. 三相交流電動機之電數量及機械數量。

電動機之特別低轉數及因此須有之大磁極數促成大雜散。職是之故，相位移依比例增加而同時效率亦不良。例如同廠之有等大功率，50頻率及370轉數之普通電動機，可有 $\cos\varphi=0.92$ ， $\eta=0.95$ 及 $\sigma=1.5\%$ 。

131. 退移及轉矩。

試先令轉動子路內之電阻不變，例如祇有內電阻，並無前置起動電阻。由是乃定在第468圖中與退移 $\sigma=1$ 相應之捷接點 P_k 。

充電動機時，即當 $0 < \sigma < 1$ 時，固定子電流線之末端係在 $P_k A$ 圓弧上。負載或轉矩愈小時，退移亦愈小，終至作完全無載轉時等於零。若以轉矩為退移之函數表出，則當轉動子電阻小時得第471圖中右方下部曲線。退移或負載小者，轉矩與退移為比例。在有某一退移

時，轉矩達其巔值。此巔值當置固定子電阻於不計時係與圓之最大垂線相當。若負載再增加，則電動機停止。當 $\sigma=1$ ，故即當起動之際或於轉動子路內不插入起動電阻而制動時，起動轉矩等於AB。在曲線上B與巔值之間，電動機尋常不穩定，因力矩隨遞減中之退移，故即隨遞增中之轉數而增長之故。此曲線部分是以僅在起動期間有效。其時電動機速度增加而於轉矩超出巔值之狀況下達其正常轉數。祇當負載矩隨遞增中之轉數之增加比較電動機力矩之增加為大時，例如用以轉動分繞電機時，電動機在第471圖中曲線右方亦穩定。

設在一繞電轉動子內，轉動子電路之電阻經一永久連接電阻增加，則依 $\sigma=3I_2R_2 : N_T$ 方程式，退移在一定負載下任意增加。應注意者，轉矩與輸在轉動子之上功率 N_T 為比例而電流 I_2 隨轉矩而變，故由變動轉動子路內之電阻僅暫時而並非永久變動。當時自然假定有常負載矩。

第471圖示關於轉矩隨退移而變動之曲線，其中下線示不帶額外

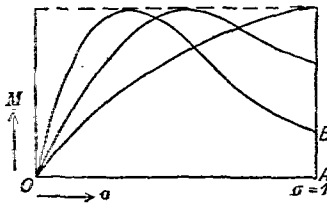


圖471. 退移及轉矩。

電阻而中間線示帶額外電阻時之情形。若額外電阻有一定之值，致電動機帶其最大轉矩而起動，則得上線。於是若轉矩不變，轉動子路內電阻愈大時退移亦愈大。故由插入電阻於轉動子路內可任意向下調整轉數。

數。

今設退移大於一之一工作狀況。將起重機依起揚方向接線時，在其轉動子路內插入如此多之電阻以致轉矩不足起揚負載，於是電動機——其轉動磁場依起揚方向迴轉——被負載依下降方向曳動。如是加入之機械功以及在固定子內加入之電功在轉動子電阻內變為電熱而電動機之轉動遂被制止(反電流下降制動¹⁾)。在是種工作狀況下，因

¹⁾反電流下降制動；Gegenstrom-Senkbremsung；counter current sink braking；freinage descendant；à contre-courant.

定子電流線之末端P係在接點 P_k 之右方，而自A點觀之， P_k 點則因轉動子路內插有大電阻之故顯然移至左方（圖472）。 AP_k 線與PD之切點F今在DP之延長線上。今如前若忽略固定子電阻，則DP表加入之電功率及同時經負載矩決定之轉矩，PF表電動機納取之機械功率及DF在轉動子電路內變為熱之功率。又

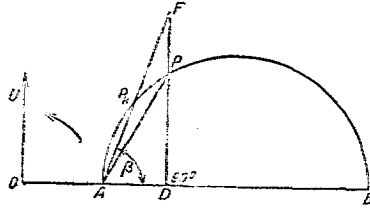


圖472。退移大於一。

DF：DP表退移，若欲增加依下降方向之轉矩，則當有一定大的負載，即當有一定之垂線DP時必須增長PF線，申言之，使 P_k 向左移動或使 β 角增加。為此依第371面祇須增加轉動子路內之電阻，此舉使轉數遞增。

其他一重要情形例如第468圖中之P點循圓向左移動至達水平軸以下。電動機由外面以過同步之速度依磁場轉動方向被轉動時即呈此情形——過同步轉動¹⁾。電動機於是變為異步發電機²⁾。此性質可用以制電力起重機之轉動。其中為使起揚轉至下降將接法變更，申言之，將電動機依下降接法被插入於電路內。設負載極小而機械摩擦大者，電機週轉如一電動機並將負載向下搬動。反之，設負載超出摩擦之轉矩，則負載以過同步速度轉動電機，使之變為一發電機。後移及功率遂均為負，申言之，電機不納取電功但由消耗機械功率回給電功於網絡，其運動遂被制止。當時若轉動子內祇含有轉動子內電阻，轉數祇略大於同步轉數。此後若於轉動子電路內插入電阻愈多，則轉數亦愈增。又負載增加時轉數亦增加。

¹⁾過同步轉動；ubersynchroner Lauf; over synchronous running; marche sur synchrone. ²⁾異步發電機；asynchroner Stromerzeuger; asynchronous alternator; alternateur asynchrone.

異步發電機因構造簡單在發力廠中亦用之。該種發電機如電動機然，亦從網絡納取磁化電流而網絡之電例如同時由一同步發電機供給。然異步發電機由連接過激發同步電動機或過激發轉動換流機亦可含有為其激發所必須之無功電流。異步發電機若依是法從網絡納取移後電流，則可發移前電流。網絡內之移後電流必由平行工作之同步發電機所供給。異步發電機以其須由同步發電機供給移後電流，其用途強被限制。

132. 三相交流電動機之起動¹⁾。

當三相交流電動機起動時，起動電流往往極小，以是並聯之白熾燈不感大電壓損失故無閃動。因此凡接在配電網絡上之帶籠形電樞之電動機迄今惟限於功率小者之一種且猶須限制起動電流以減小起動時之固定子電壓。以是之故，在固定子路內應用一變阻器，一起動變壓器²⁾或用其他方法，令固定子作星形三角連接³⁾。在後法中，固定子當初依星形連接，故當時在各相線內之電壓僅及網絡電壓之 $\frac{1}{\sqrt{3}}$ 之一部分。俟起動之後，再改接為三角形。

然應注意者帶籠形電樞之電動機之起動矩⁴⁾原極有限，故若減小固定子電壓則起動矩更小。起動矩之所以小者，其故因在小轉動子電阻內，歐姆壓耗不大，故抵償此壓耗之產電壓 E_2 亦極小。轉動磁場既以全網絡頻率切靜止轉動子線，故為惹起電壓 E_2 祇須在轉動子內有微弱通量。當時幾乎與固定子電壓相當之全部固定子通量經轉動子電流之反作用被抵在雜散路內而祇有與轉動子內歐姆壓耗相當之一極小

¹⁾三相交流電動機之起動；Anlassen des Drehstrommotors；starting of three phase current motor；démarrage de moteur triphasé. ²⁾起動變壓器；Anlasstransformator；starting transformer；transformateur de démarrage. ³⁾電動機中之星形三角連接；Stern-dreieckschaltung bei Motor；star-delta connection in the motor；montage en étoile-triangle du moteur. ⁴⁾電動機之起動矩；Anlaufmoment eines Motors；starting moment of a motor；moment de démarrage d'un moteur.

部分侵入於轉動子內。故依據 $M = \Phi I_2$ ，起動矩頗小。減小固定子電壓復使原係有限之起動矩再依電壓平方之比例而遞減，蓋通量 Φ 及電流 I_2 隨電壓皆變動故也。例如固定子依星形連接時其起動矩當較依三角連接時小三倍。

職是之故，普通籠形電樞當初概作無載轉動且裝一離心聯軸節。俟將近全轉數之際由該聯軸節或負載與電樞轉動。在星形三角連接法中，當初亦同此手續，以後固定子之連接自星形改爲三角形。

若因籠形電樞之電阻極小，電動機不會起動，則可由錘細兩端之環以增加電阻。

在特殊情形中可令帶捷接電樞之電動機與發電機同被轉動或令電動機由與之聯軸之電機轉動至達同步轉數而以後使與網絡連接。當時轉動子之轉向自然須與所發生之轉動磁場相符合。

凡大功率機往日大都帶匯電環轉動子。起動時在匯電環之間插入電阻。匯電環當時被捷接。此種起動電阻當初有減小起動電流之功效，其時海爾圖上之 P_k 捷接點愈被推至左方。然該種電阻同時又有另一種功效，即其增加起動矩，致圓之垂線被增長。固定子內之電流強度（第468圖中由 AP_k 表明）雖因此而減但所減極微。反之，固定子內之力通量增加頗多，蓋因轉動子路內電阻增加之故，在轉動子內惹起較大歐姆壓耗，故即一較大電壓 E_2 及轉動子內較大的通量。起動電阻係依星形連接。尋常應用液體起動器¹⁾，而當電極浸下愈深時，電阻減小亦愈甚。

然在今日帶匯電環轉動子之電動機遠不及帶雙籠形電樞之電動機之普通，而僅關於調整轉數一點尚保持重要地位。

爲在用匯電環電樞時免去刷之摩擦損失常於起動之後令匯電環被捷接並將刷移開（移刷器²⁾）。

電動機之有中等功率者往往又依別方法起動，例如當初令轉動子

¹⁾液體起動器；Flüssigkeitsanlasser；liquid starter；démarrreur à liquide. ²⁾移刷器；Bürstenabheber；brush lifter；relève-balais.

線匝作特種連接致發生之電壓一部分消滅。俟起動之後轉動子線匝經一離心開關改接致在一相線內所有之產電壓依同方向作用（寇治¹⁾之反接）。

為確保電動機帶所須之轉力起動，令固定子及轉動子有不同之槽數（三相交流電動機之槽數）。否則轉動子之齒與固定子之齒正相對立，難使轉動子離開此磁阻最小的位置。

又在帶捷接電樞之電動機中固定子槽數與轉動子槽數之比亦重要。三相交流電動機之磁場並非依純正弦形而變但含有諧波，申言之，含有較高級數之波，其中第 n 諧波依基本磁場之方向以基本波之 $1/n$ 速度迴轉。設若固定子槽數與轉動子槽數之比例不良，當起動之際電樞之轉數不超出 $1/n$ 之類面轉數，蓋就第 n 諧波而論，若超出此轉數，電動機變為一發電機並因此自行制動。

第471圖中轉矩曲線之右部係示此種情形。據此由減小退移或增加轉數可令轉矩小於負載矩。

133. 皮膚作用電動機。

減小三相交流電動機之起動電流及增加起動矩之努力乃促成皮膚作用電動機²⁾之製造。在第245面中已說明皮膚作用。在此作用中，帶交流之導線之內部因具有較大自感係數之故具有比較外部為疎之電密度。其結果為歐姆壓耗之增加。此現象然類與頻率有關：在有低頻率時幾乎消滅而在直流中完全消滅。



圖473. 一皮膚作用電動機之槽。

皮膚作用電動機之最簡單者其電樞含有深輻射條。如由第473圖所示，條之各部分其離槽底愈近者，其雜散感應係數亦愈大。當初起動時，轉動子電流有雜散之頻率，其大部分係在外部，

¹⁾寇治; Gorges. ²⁾皮膚作用電動機; Stromverdrängungsmotor; skin-effect motor; moteur au effet de peau.

申言之，轉動子電阻及牽引矩均大而起動電流則比例的較弱。當時之情形故與在普通籠電環電樞中由起動電阻而惹起者同。

轉動時轉動子電流之頻率近於零而皮膚作用幾全停止。轉動電流遂可平均利用各條之全橫斷面而電動機之工作情形全如一籠形電樞，申言之，帶有小退移及優良效率。

皮膚作用電動機與雙籠形電樞電動機之間復有一種雙條電動機。該機種有一外條及一內條，二者經一端環連接（圖474）。在二條之間有鐵片而內條之雜散可由此鐵片任意調整。轉動子電流當起動之初概在外條上，故電阻仍大；嗣後則分配在二條上。

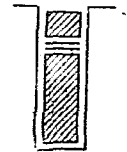


圖474. 在槽內之二條。

AEG公司之皮膚作用電動機之電樞其作用亦相似。電樞之孔有如第475圖所示之形狀，其內注滿鋁之合金，後者與同時鑄成之端環構成一金屬籠。起動時有效之外部分以橫斷面積頗小之故有大電阻，因而促成大的起動矩。內部之雜散線經金屬連接條閉合，於起動之後導電流之大部分

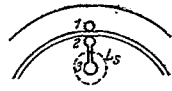


圖475. AEG公司之皮膚作用電機。 圖476. 雙籠形電樞。

進一步之裝置為雙籠形電

樞，其中二籠各有其特具的條及端環（圖476）。是種裝置已於1890年時經陀勃羅華爾斯基¹⁾，以後經蒲修羅脫²⁾說明並完成。是種電樞在所謂海瑪夫電動機³⁾中亦用之。惟該機種尚有他種特性，即外繞組具有較內繞組為多之槽數，俾可減少外繞組之雜散。

在諸情形中，起動矩因起動電流減小而增長且假定功率因數在起動之後不甚減小。

為說明作用方法茲舉雙籠形電樞為例。命

1: 陀勃羅華爾斯基; Dcbrowolski. 2: 蒲修羅脫; Boucherot. 3: 海瑪夫電動機;

Heemafmotor; Heemafmotor; moteur de Heemaf.

\bar{u} 電壓	L_s 雜散感應係數
\bar{J} 電流強度	R 有效電阻
L 總感應係數	ω 原角速度
M 反感應係數	σ 退移

假定電阻 R_1 等於零。今命

$$a = jL_1\omega \quad b = jL_2\omega \quad c = jL_s\omega \quad d = jM_1\omega.$$

若以轉動子鐵之磁阻等於零，則由導線2所產生之力線之全部包圍導線3而線1之力線其包圍線2者又包圍線3，申言之，

$$L_2 = M_{23} \quad M_{13} = M_{12}.$$

據克希荷夫定則

$$\begin{aligned} \bar{u}_1 &= \bar{J}_1 a + \bar{J}_2 d + \bar{J}_3 d \\ 0 &= \bar{J}_1 c + \bar{J}_2 (R_2 + b\sigma) + \bar{J}_3 b\sigma \\ 0 &= \bar{J}_1 d\sigma + \bar{J}_2 b\sigma + \bar{J}_3 [R_3 + (b+c)\sigma]. \end{aligned}$$

消去 \bar{J}_2 及 \bar{J}_3 並以

$$\frac{\bar{u}_1}{a} = \bar{J}_0 \quad (a) \quad \bar{J}_0 \frac{ab}{ab-c^2} = \bar{J}_\infty, \quad (b)$$

$$e_2 = \frac{ab}{ab-c^2} \times \frac{R_2}{b} \quad e_3 = \frac{R_3}{c} \quad q = \frac{R_2}{c} + e_2 + e_3.$$

則經數次換算之後得

$$\bar{J}_1 = \bar{J}_\infty + \frac{(\bar{J}_0 - \bar{J}_\infty)e_2(\sigma + e_3)}{\sigma^2 + \sigma q + e_2 e_3}. \quad (c)$$

今分解之而為偏分數，命分母等於零並假定方程式之方根。於是得

$$p = -\frac{q}{2} + \sqrt{\frac{q^2}{4} - e_2 e_3} \quad q = -\frac{q}{2} - \sqrt{\frac{q^2}{4} - e_2 e_3}.$$

而

$$\frac{\sigma + e_3}{\sigma^2 + \sigma q + e_2 e_3} = \frac{p + e_3}{p - q} \times \frac{1}{\sigma - p} + \frac{q + e_3}{q - p} \times \frac{1}{\sigma - q}. \quad (d)$$

此為圓之二幅線之總和。故據方程式(c)電流 \bar{J}_1 等於 \bar{J}_∞ 與 r'' 及 r'' 之圓之二幅線之總和。當 $\sigma = \infty$ 時，圓之二幅線均為零而 $\bar{J}_1 = \bar{J}_\infty$ 。當

$\sigma = 0$ 時，得圓之幅線 r_o' 及 r_o'' 而 J_1 遂等於 J_o 。據方程式(a), J_o 滯在 u_1 之後 90° 。又據方程式(b), J_∞ 與 J_o 同相。

p 及 q 變為正虛量，而 r_o' 及 r_o'' 遂與 $J_o - J_\infty$ 同相。就 $\sigma - p$ 及 $\sigma - q$ 分母之形式據第216面，在弦上之周角均等於 90° ——弦連接二圓內與 $\sigma = 0$ 及 $\sigma = \infty$ 相當之諸點——申言之， r_o' 及 r_o'' 均為直徑。

設命 r_1' 及 r_1'' 表 $\sigma = 1$ 時（故即靜止時）之圓幅線，則據方程式(c)

$$\frac{r_1'}{r_1' - r_o'} = p \qquad \frac{r_1''}{r_1'' - r_o''} = q.$$

以之可描出 P_1' 及 P_1'' 點。在第477圖中 $OP_o = J_o$ 及 $OP_\infty = J_\infty$ 。右方圓之幅線有初點 P_∞ 而左方圓之幅線有初點 P 。為描出屬於同一值 σ 之幅線，依第217面作退移直線。在是處情形中該線係與 r_o' 及 r_o'' 平行。在右圓內作一從 $P(\sigma = 0)$ 向退移直線一點之幅線，而此線例如與0.4退移相當。若命 A 表此幅線與右圓之切點，則 $P_\infty A$ 當表 $\sigma = 0.4$ 時之 r' 線。依同法在左圓內從與零退移相當之 P_o 點向所屬之退移直線作一幅線，此退移線與0.4相當。該幅線切左圓於 B 點

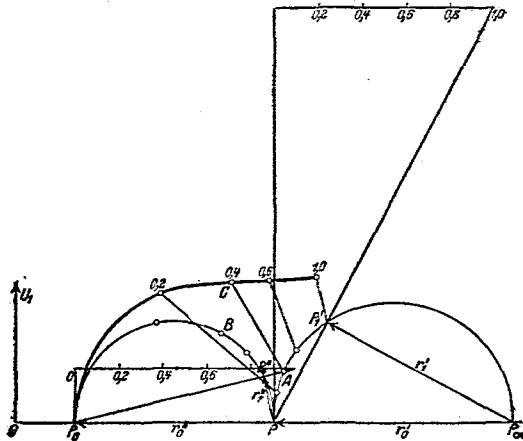


圖477. 帶複形電機之電流圖。

• 於是 $PB=r''$ 而 $OP_{\infty} + P_{\infty}A + PB = OC$ 之總和當示 $\sigma=0.4$ 時之原電流。依是法乃構成以粗線表明之電流圖。

由此圖可見起動電流($\sigma=1$)遠小於理想起路電流 OP_{∞} 。又因起動點($\sigma=1$)有大縱坐標之故，起動矩大。同時又見近無載及有實際負載時之電流圖與在 P_0P_{∞} 直徑上之普通圖相差不遠，故與普通籠形電樞相較其功率因數止略許低下。

134. 無耗轉數調整。

用插在轉動子電路內之調整起動器以調整轉數實非常不經濟。轉數減下之後，如若負載仍舊，固定子仍納取完全與前時相等之功率，以是功之一部分今則在調整起動器內變為電熱。電動機今遂失其，分繞特性¹⁾，申言之，失其轉數幾乎與負載無關之特性——此特性使之近似直流分繞電動機。負載遞增時轉數強減，但此種，自調整¹⁾並非如在直流串繞電動機中對於工作有良好的影響。

為免除用調整起動器調整之大損失，曾用二機串聯法¹⁾。其中二電動機互相聯軸。第1電動機之固定子由網絡依 f 頻率饋電而其轉動子轉動第2電動機之轉動子。第2機放在轉動子一方面取電，其固定子成為副部分。此部分於起動時經由電阻連接而成通路，而平時則被捷接。因而在串聯接法中無用匯電環之必要。然因二機有時須單獨使用，故匯電環不宜省去。第2機之轉動子之所以用充原部分者，其故不因可省去匯電環但因可將兩轉動子依低壓繞成並可令網絡電壓在工作之際單獨與第2機之固定子相連接。

今命 f 表網絡之頻率， p_1 及 p_2 表極對數。串聯機組以 n 轉數作完全無載轉。於是第1機轉動子之頻率等於 $f - p_1n$ 。此頻率復為第2機所納取之電之頻率。二電動機既依該頻率同步迴轉，故 $f - p_1n = p_2n$ 或

$$n = \frac{f}{p_1 + p_2}.$$

第1機單獨作無載轉時，轉數 $n^1 = f : p_1$ 而第2機單獨作無載轉時，

¹⁾串聯法；Kaskadenschaltung；cascade connection；couplage en cascade.

轉數 $n' = f : p_2$ ，因此故可有三種同步轉數。

串聯接法之一大缺點，在因第 2 電動機之電抗與第 1 電動機之轉動子之電抗相串聯，以致功率因數非常之小。

至關於調整組之無耗轉數調整法見第 149 節。

其他一種關於無耗轉數之調整法為用固定子之換極接法。在帶線圈電樞之電動機中，除固定子外又須換接轉動子。變極接法¹⁾是以幾乎惟在帶形電樞之電動機中適用。依不同極數而用多數特別固定子繞組既為裝置所不許，故概用同一固定子繞組換接。據達蘭特²⁾例如若倒轉一四極機中各相線繞組一半內之電流方向可換成一雙極機。

第 478 圖示一四極雙層繞組。假定其中每極每相線之槽數極多。第 1 相線之線互相串聯而在由粗線表示之框內，第 2 繞線之線在由粗線表示之框內而第 3 繞線之線則在由虛線表示之框內。

在第 1 相線內 A,C 間線與在 D,F 間之相當線構成線區。設命 i_1 表 A,C 間之電流則在 D,F 間之電流當等於 $-i_1$ 。在四極繞組中於是在 G,J 之間亦可有電流 i_1 而在 K,M 之間亦可有電流 $-i_1$ 。其他相線之電流亦可依同法表明。

今先設想 $i_1 = i_m$ 及 $i_2 = i_3 = -i_m / 2$ 時之瞬間。次自磁場為零之 B 點算起，總計沿圓周之電流線並得在 C 點之 $w'(i_1 - i_2) = 1.5i_m w'$ 之總和，其中 w' 表一半框內之線數。依據貫穿定則，此即為忽略空隙內之磁損失時在 C 點消耗之激發強度。

在 C 與 D 之間， $i_3 - i_2 = 0$ ，故自 B 起之有效激發強度恆等於 $1.5i_m w'$ 。此後與圓周為比例遞減，終至在 E 等於零（恆從 B 算起）。

今若以縱坐標表示在圓周上關於空隙之有效激發強度，則依據李思德³⁾得一種所謂磁場激發曲線（圖 479）。由忽略鐵內之路程，此線與空隙之磁場曲線之差惟在比例尺之不同而已。

經過 $1/12$ 週期之後，依第 480 圖右方之電流圖 $i_1 = 0.866i_m$ ， $i_2 = 0$

¹⁾變極接法；Polumschaltung；pole changing；changement du nombre de poles. ²⁾達蘭特；Dalander. ³⁾李思德；Richter.

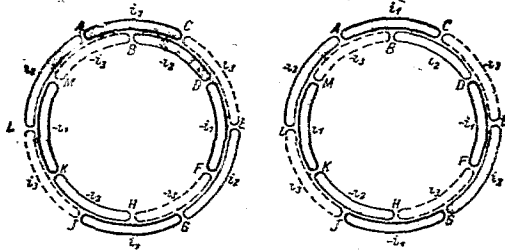


圖478.

圖482.

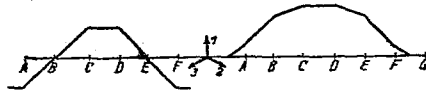


圖479.

圖483.

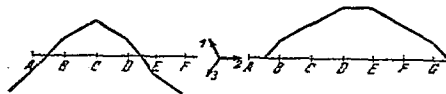


圖480.

圖484.

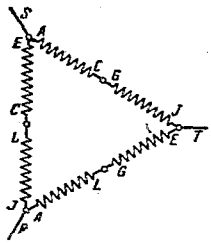


圖481.

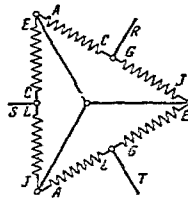


圖485.

變極接法。

及 $i_3 = -0.866i_m$ 。此時磁場在 A, B 中間通過零值。此後關於在 B 之一空隙之激發強度為 $\frac{1}{2}w'(i_1 - i_3) = 0.896i_m w'$ 及在 C 之一空隙之激發強度為 $0.896i_m w' + w'(i_1 - i_2) = 1.73i_m w'$ 等。如是乃得第480圖之磁場激發曲線。其與第479圖相較已向左移位。

今由變極之接法使各相線之一半繞組內之電流方向倒轉。因此，

在GJ及KM, LA及BD,終則在CE及FH內之符號改變(見圖482,與第478圖中比較。

茲復定 $i_1 = i_m$, 故 $i_2 = i_3 = -i_m/2$. 在經電流通過之線之中間故即在M及A間之中點, 磁場通過零值。由計算得在A點之激發強度為 $1/2 \times w'(-i_2 - i_3) = i_m w'$, 在B點之激發強度為 $1/2 \times i_m w' + w'(i_1 - i_2) = 2i_m w'$, 終則在C點之激發強度為 $2i_m w' + w'(i_1 + i_2) = 2.5i_m w'$. 由是乃成第483圖中之磁場激發曲線。

再 $1/12$ 週期之後, 如前 $i_1 = 0.866i_m$, $i_2 = 0$, $i_3 = -0.866i_m$. 磁場今在A及B間之中點通過零值。設由是點算起, 則得在B點之激發強度為 $1/2 w'(i_1 - i_3) = 0.866i_m w'$. 在C之激發強度為 $0.866i_m w' + w'(i_1 + i_3) = 1.73i_m w'$. 最後得在D之激發強度為 $1.73i_m w' + w'(i_2 - i_3) = 2.6i_m w'$ 及第484圖中之磁場激發曲線。

如是將一4極電機變成一雙極電機, 且帶有並非特別不規則之磁場激發曲線。然由變更接法, 轉向與前時不同, 故在變更連接時須將二主線交換。

變更連接之最簡單之方法係將四極繞組依第481圖改三角連接, 其中例如在AC及GI內之電流係同向。二極繞組依第485圖成星形連接, 其中在AC及GJ內(注意活字母之順次)之電流反向流動。注意在第485圖中已將二主線交換。

關於用換向繞組之無耗調整見第150節。

135. 雜散因數.

三相交流電動機在工作時之特性大都係經雜散因數 η_1 及 η_2 決定。今研究雜散因數如何由試驗而確定。

設想轉動子帶有線圈繞組, 於轉動子開時命固定子與電壓 U_{11} 相連接並測在轉動子匯電環之電壓 U_{12} . 依同法於固定子開時命轉動子與電壓 U_{21} 相連接並測在固定子之電壓 U_{22} . 假定轉動子之接法與固定子之接法相同, 依據第367面得關於 η_1 及 η_2 之值

$$\eta_{11} = \frac{U_{12}}{U_{11}} \times \frac{w_1}{w_2}, \quad \eta_{22} = \frac{U_{21}}{U_{22}} \times \frac{w_2}{w_1}, \quad \eta_{11}\eta_{22} = \frac{U_{12}}{U_{11}} \times \frac{U_{21}}{U_{22}}.$$

因 $\eta_{11}\eta_{22}$ 之乘積不隨固定子及轉動子之接法而異，故不問接法如何，此結果不變。此種決定雜散因數之方法須用精確伏特計。

然應注意者，在是處磁飽和復有擾亂的影響。縱使在固定子軛內，轉動子體內及齒內之飽和不大，齒根部之飽和能強度影響此根部之磁阻及其雜散通量。此雜散通量飽和既與電流強度有關，故雜散路內之磁阻在有負載時比較無負載時為大。因此，空氣阻對於雜散阻之比在有負載時比較無負載時為小。故電機在有負載時之效率比較無負載時為大。

嚴格言之，海爾電流圖之功效已為其限制。雜散因數有經假定而為一常數之必要，其大小等於在有額面負載時所有者。在規定工作狀況下之雜散因數故須先行決定。為此如為帶小固定子阻及轉動子阻之電動機，將轉動子捷接並測定轉動子靜止時固定子之捷路電流。電阻小時捷路電流之幅線 OP_k （第409圖）與幅線 OB 符合。依是法乃得 $OB = I_k$ 並依第367面第8方程式得 $\eta_{11}\eta_{22} = (I_k - I_0) : I_k$ 。

在普通電壓下捷路電流之強度實過大。然縱使電動機能耐受此種大電流強度，測得之結果仍不適用，蓋當時齒根部之飽和遠大於有負載時所有者。因此連接固定子之電壓須有適當強度俾成捷路時恰有規定的工作電流通過固定子。於是成捷路時在齒根部內之雜散通量故又雜散磁場磁阻與有用磁場之磁阻之比與有規定負載時所有者同大。依是法而決定之 $\eta_{11}\eta_{22}$ 並非一般有效，但至少在規定工作狀況下適用。其時 I_0 當表電壓小時之無載電流。

在第373面之電動機中例如其固定子並不連接1900伏之網絡電壓，但先接連接以390及600伏電壓。其中一相線之捷路電流為83.7及116安。無載電流在有1900伏電壓時為36安，故有390及600伏時可有7.4及11.4安。依據第376面第8方程式得有83.7及116安固定子電流時之雜散因數

$$\eta_1\eta_2 = (63.7 - 7.4)/63.7 = 0.884 \text{ 及 } (116 - 11.4)/116 = 0.901.$$

測得之結果顯示因齒根部之飽和，固定子電流增長時相對的雜散

通量。但雜散通量之絕對值自然隨電流強度而增加。

在一相線內當有 100 安之規定工作電流時，經由 $I_k = 63.7$ 與 116 間及 $\eta_1\eta_2 = 0.884$ 與 0.901 間之內推法得 $\eta_1\eta_2 = 0.896$ 之值。假定 $\eta_1\eta_2$ ，則由是得

$$\eta_1 = \eta_2 = 0.946.$$

如須顧及固定子電阻及轉動子電阻，則不能再假定捷路電流等於第 469 圖中之 OB。在此情形中，電流圖依第 318 面製出或如在第 486 圖中逐步描出並以 $\eta_1\eta_2$ 為直徑對於最大橫坐標之比而計算。第 486 圖係當轉動子靜止時描出。

功率因數及過載量既隨雜散因數 $\eta_1\eta_2$ 而變，故在計劃一三相交流電動機時，首應儘量限制雜散通量。因雜散路內電阻頗小之故，在閉槽內切不可按置繞線，故一般以用全開槽為最有利，因其中雜散路內之電阻當最大。然是種槽一方面增加空隙之磁阻，因而須增加磁化電流，功率因數極為不利。曠是之故，在歐洲多用半閉槽。

為可將現成繞就並絕緣之線圈置在槽內，槽初全開以後用由鐵片製成之楔封閉，後者依槽之方向含有縫隙。

在各種情形下，然須用多數槽以容圍透，如是由一槽內之電流惹起之雜散通量可儘量之小。同時包圍全數圍透之雜散通量亦較小。因槽數增加，齒數亦增加，而一齒之齒面則較用少數槽時為小。包圍全數圍透故特別有害之一部雜散通量此時係從小齒面發出，因而依比例的不大。

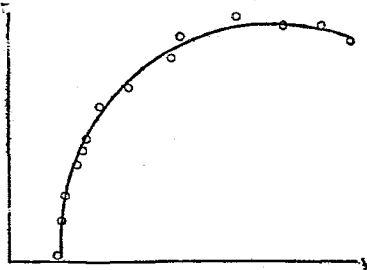


圖 486. 三相交流電動機之電流圖。

槽數之增加自然不能無限制，否則絕緣所占之空間過大，以故固定子圈邊最多分裝在3至5個槽內，轉動子圈邊最多在4至7個槽內。在帶少數（極數¹⁾）故即帶大轉數之電機中，因極節距較大之故，一圈邊之線可分配在多數槽內，其雜散通量之影響減輕。又比較大的直徑或短的電樞亦有益，但因此電機之價格增加，又端雜散之影響復較大，致小槽雜散之良好影響一部分為之抵消。

其他一減小雜散之方法為減小空隙。若磁化電流不變，空氣通量與空隙之大小為反比，故相對的雜散與空隙為比例。

今空隙大小對於電動機作用方式之影響自然有討論之必要。為此比較有不同大空隙之兩電動機，但在構造上此外並無不同之處，尤其關於槽之配置完全無異。

空隙愈小時，相對雜散亦愈小，而功率因數 $(\cos\varphi)_m$ （參見第370面）亦愈大。又帶較小空隙之電動機有較小無載電流，因今由較弱的磁化電流已足激發由路端電壓規定之通量。

今論空隙之大小對於最大轉矩之影響。據第367面第8及第9方程式 $I_k - I_s = J_0 r_1 r_2 / (1 - r_1 r_2)$ 。其中 $1 - r_1 r_2$ 表總相對雜散。帶較大空隙之電動機既具有較大無載電流及比例的較大相對雜散。故直徑及最大旋矩隨 $r_1 r_2$ 而變，即當空隙增加時最大轉矩略許減小。

對於雜散有特別之影響者厥為轉數不變時之頻率或頻率不變時之轉數。今設想二電動機，其鐵樞有等尺寸並含有同多槽數且兩者復有等大電壓及功率。二機之頻率均有 $f = 50$ 赫芝。其中一機係就600轉數，其他就1000轉數而繞成。又二機中關於槽橫斷面積之利用及圓周每長單位之電流密度及電流線數均相等。

若忽略二電動機之不同功率因數，則有等大功率及電壓時，工作電流亦相等。此時圓周每長單位等多線數之條件與等總線數同其重要。若槽數相等，則一槽內之線數亦必相等。

反之，兩電動機之極對數則不同。依據 $p = f \times 60 / n$ 之方程式，

¹⁾極數；Polzahl；number of poles；nombre des pôles.

在有600轉數時，電動機必有5極對，而當有1000轉數時，必有3極對。兩機之圓周既相等，故其極節距成3:5之比。例如在第一機(圖487)內，每圈邊三槽或每極節距九槽。在第二機內，每圈邊五槽或每極節距15槽(圖488)。圈邊之線數故成3:5之比。



在有等大電壓時，兩電動機之總線數及通量之頻率既相等，但極節距成3:5之比，即感應強度成5:3之比。故帶較小轉數及較大極數之電動機

圖487. $f=50$, $p=5$, $n=600$.

機有較大磁滯損失及渦流損失。

又作無載轉時為惹起較大感應強度須有較強激發強度。在有較小轉數時，一圈邊之線數既僅及有較大轉數時之 $3/5$ ，故無載電流當有 $(5/3)^2$ 倍大之強度。

若以雜散因數而言，則較難評論。在有600轉數(與極之較小寬度相當)時之空氣磁場之阻抗對於有1000轉數時之空氣磁場之阻抗成5:3之比。今據第390面，相對雜散幾乎與空氣阻抗為比例，故與轉數為反比例，其時且假定兩

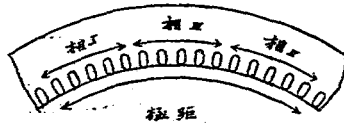


圖488. $f=50$, $p=3$, $n=1000$.

電動機之雜散磁場之阻抗相等。由此觀之，凡有大轉數之電動機必須有小相對雜散。然能否用雜散磁場之同一

阻抗計算則尚屬疑問，蓋在第488圖中首端雜散¹⁾因端連接較大之故大於第487圖中所示者。

以上認由固定子惹起之通量之一部分並不穿過轉動子或反是。其實雜散以作通量連環之損失解釋較為準確，故不應僅視為一種磁通量損失。經固定子惹起之通量雖然通過轉動子但因槽數不同之故與轉動子線匝之連繫比較與固定子線匝之連繫為少，故其影響如一雜散損失

¹⁾首端雜散；Kopfstreuung；head leakage.

。此現象謂之雙連環雜散¹⁾——，但此名稱不甚切貼。

設想電動機並不具有雙連環雜散及前端雜散²⁾，故定子及轉動子之感應係數 L_{11} 及 L_{22} 並不包括是種雜散在內。今於轉動子開時饋電於固定子內並計算在固定子之電壓 U_{11} 及轉動子之電壓 U_{22} ：

今依等面數換算，算出 $U_{12}w_1/w_2$ 之值。此轉動子電壓於是可小於固定子電壓。依同法在固定子開時饋電於轉動子，測定在轉動子之電壓 U_{22} 及固定子之電壓 U_{11} 並算出 $U_{21}w_2/w_1$ 之值。次如在第367節命

$$\eta' = \frac{U_{12}w_1/w_2}{U_{11}} = \frac{M_{12}}{L_{11}} \times \frac{w_1}{w_2} \quad \eta'' = \frac{U_{21}w_2/w_1}{U_{22}} = \frac{M_{21}}{L_{22}} \times \frac{w_2}{w_1}$$

準此以觀， η' 及 η'' 之計算根據感應係數 M_{12} 及 L_{11} 及 L_{22} 之計算。舉例解之，假定某固定子內有三槽而在轉動子內有二槽。電機從轉動一方面磁化。次計算在固定子第一相線內發生之通量連環，假定此相線經轉動子惹起之最大通量所穿過。又如在第123節中假定此最大值依第4-9圖係經帶最強電流之一轉動子相線及帶一半強電流之其他二轉動子相線所發生。命與固定子相線I相對得之轉動子相線內之電流等於一。在其他轉動子相線內之電流僅一半大。固定子及轉動子之槽各含一線。

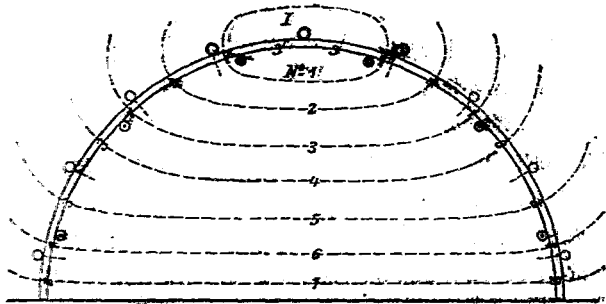


圖488。轉動子發生之通量，與一固定子分路連環。第一位置。

1) 雙連環雜散; doppelverkettete Streuung; double interlinked leakage; dispersion enclainée double. 2) 前端雜散; Stirnstreuung; front leakage; dispersion frontale.

今沿圖周確定一固定子槽與一轉動子槽之距離。兩轉動子槽間之距離等於 $1/6$ 極節距，兩固定子槽間之距離等於 $1/3$ 極節距。一固定子槽及一轉動子槽間之最小距離為 $(1/6-1/9) \times 1/2 = 1/36$ 極節距。設每一極節距之弧分為36等分部，則一固定子槽與一轉動子槽間之最小距離等於1，兩固定子槽間之距離於4是等於4，而兩轉動子槽間之距離等於6。第489圖中一固定子槽與一轉動子槽間之距離即本此而記入。若命鐵體依軸向之長等於一，則此長同時示經由1至7表明之通量所穿過之面積F。

若不計常數，感應係數經通量包圍，故等於惹起通量者之電流 Θ 乘以經通量穿過之空氣橫斷面積之一部分F再乘以假想之相線之線匝之經通量穿過之w部分。據是乃得第489圖之數值表。今就以關於上半部者列之如下：

通量之符號	經包含之磁化轉動子電流 Θ	面F	相線1之經通量穿過之匝 w	$\Theta \cdot F \cdot w$
(1)	2×1	1	1	2
(2)+(3)	2×1	4+1	3	30
(4)+(5)	$2 \times 1 + 2 \times 1/2$	3+3	3	54
(6)+(7)	$2 \times 1 + 4 \times 1/2$	1+2	3	36
				<u>MI=122</u>

若完成第490圖中關於轉動子第二主位置之計算，其時轉動子二

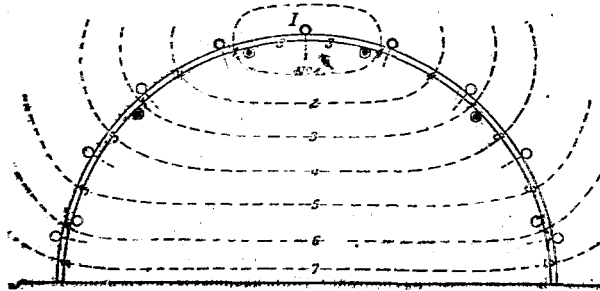


圖490. 磁通線于發生之通量，與一固定子槽並連。第二主位置。

相線各帶有 $0.866 \times I$ 電流，則得 $M = 121.24$ 。故轉動子與固定子間連環之平均值： $M = 0.5(122 + 121.24) = 121.6$ 。

依同法由第 489 圖示經轉動子發生之通量與一轉動子相線匝之連環及與固定子與自身之連環為 $L_2 = 84$ 及 $L_1 = 184$ 。

已知 L_1, L_2 及 M 之值，又既然 $w_1 : w_2 = 3 : 2$ ，則可算出： $\eta' = Mw_1 / L_1 w_2 = 0.993$ 及 $\eta'' = Mw_2 / L_2 w_1 = 0.967$ 。通量連環之相對的損失放為 $1 - \eta' \eta'' = 0.04$ 。此損失係加在經槽雜散及端面雜散惹起之損失中。有較多槽數時經不同槽數規定之雙連環雜散較小。在有 5, 6 槽時降至 0.01。在帶換向器之交流電動機中（見 403 面）復有雙連環雜散。在是處算出之 k 值無異等於 $\eta' = \eta''$ 。

第二十一章 單相感應電動機

136. 單相電動機之反迴轉激發。

除普通多相感應電動機外又有異步單相感應電動機¹⁾。是種電動機之固定子祇含有單獨一繞組，其照例約占 $2/3$ 極節距。此繞組連接交流，故當初發生一振盪磁場，其軸在空間不動。轉動子概為籠形轉動子或為起動時免除強流起見依帶多數匝電環之多相式構成。

設從外面導電流於固定子內使閉轉動子不拘方向幾乎達同步迴轉，則該轉動子惹起一轉矩。此結果與由開斷在迴轉中之一三相交流電動機之一饋線使三相電動機變為單相電動機時同。是種轉矩之由來初

頗不易了解，尤其因經固定子惹起之磁場之軸在空間不動之故。又此轉動矩之方向係從外面選定之轉向決定，亦似奇異。

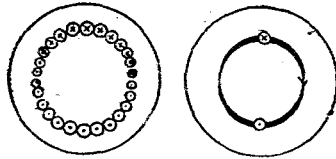


圖 491。

圖 492。

依正弦形齒線分佈之激發。

依據費來利斯²⁾之方法將

由固定子電流惹起之交流磁場

¹⁾ 異步單相感應電動機；asynchroner Einphasenmotor; asynchronous single phase motor; moteur monophasé asynchrone. ²⁾ 費來利斯; Ferraris.

分解而為兩相反迴轉磁場。是種分解在單相發電機中亦用之。若再進一步不但將磁場但又將固定子之安匝分為兩相反迴轉中之激發。其時必須假定線沿圓周依正弦形分佈，如在第 491 圖中經不同大之槽表明者是。結局，此情形要求有無限多數之無限細線。

一種正弦形分佈之在迴轉中之激發可依第 493 圖之方法表明。其中矢線並不指繞組自身迴轉但指在圓周均勻分佈之靜止線內有依正弦形分佈之電流流動。今欲證明交換激發之作用在各瞬間及在各點正與二相反迴轉且不變之正弦形激發之作用相等。是種正弦形激發強度等於有最強電流時實際激發強度之一半。

在第 493 圖中實際固定子電流達其巔值。當此之際，含同向電流迴轉之圈邊互相重疊，其作用互相輔助，故其值與在外表明之達最大值時之靜止激發相等。

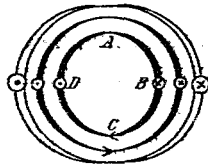


圖493.

$$i = i_m$$

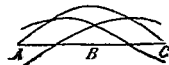
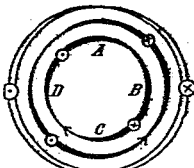


圖494.

相反迴轉電流之位置。

$$i = i_m \sin 45^\circ$$

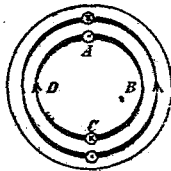


圖495.

$$i = 0$$

依 $1/8$ 週期之後實際固定子電流等於 $i_m \sin 45^\circ = 0.707 i_m$ (見第 494 圖)。此時在迴轉中之二激發在 A 及 C 互相抵消。在圖下部分之合成示一正弦形曲線，其巔值復在 B 點。其垂直線與第 493 圖中相較成爲 $0.707 : 1$ 之比，故略小，因此其作用復等於實際之激發。

再 $1/8$ 週期之後，實際固定子電流變爲零(圖 495)。在此瞬間含反

向迴轉電流之圈邊互相重疊，故其激發作用互相抵消。

對於反向迴轉之激發，轉動子有幾乎 200% 之位移。以是在轉動子內發生一強捷路電流，後者在無阻轉動子中正與反向迴轉中之固定子激發相反並將反向迴轉中之轉動子通量推擠在轉動子之雜散路內。若轉動子電阻等於零，則為惹起與反向迴轉中之固定子激發維持平衡之轉動子電流，實祇須切過一無限弱之磁場。故侵入於轉動子內之反向迴轉中之通量等於零或有小轉動子電阻時近於零。

據此則所剩下者祇有一同轉磁場，後者由固定子電流之同轉部分與一感應同轉轉動子電流共同惹起。

因反向迴轉磁場經一反向迴轉轉動子電流之作用消滅，單相電動機故帶有一轉動磁場。

137. 利用固定子激發之分解而成之電流圖。

設將固定子電流 I 分解而為相反迴轉並有 $I/2$ 強度之二電流。如第 493 圖所示，固定子繞組在同一瞬間包括由二電流產生之最大通量，故二電流在電流圖中係同相。

假定轉動子電阻為零，則經由相反迴轉之電流 $I/2$ 所惹起之磁場為一純粹雜散磁場，恰如在一三相交流電動機之完全捷路內是。此雜散磁場不問其依何方向從固定子繞組發出均可被加入於同轉激發之固定子雜散磁場內。

命 Λ , Λ_{s1} 及 Λ_{s2} 分別表空氣路，固定子雜散路及轉動子雜散路之磁導。同轉之固定子激發之固定子雜散通量是以等於 $\Lambda_{s1}I/2$ 。次加上亦等於 $\Lambda_{s1} \times I/2$ 之相反迴轉之固定子激發之固定子雜散通量。最後加上依第 465 圖亦經由向反迴轉之固定子激發所惹起之轉動子雜散通量。此通量與固定子電流同相，恰如在三相交流電動機之完全捷路內然。又其先後穿過空氣路之電阻 $1/\Lambda$ 及雜散路之電阻 $1/\Lambda_{s2}$ 。故穿過總電阻 $1/\Lambda + 1/\Lambda_{s2}$ 。其值故為

$$\frac{I}{2} : \left(\frac{1}{\Lambda} + \frac{1}{\Lambda_{s2}} \right) = \frac{I}{2} \times \frac{\Lambda \times \Lambda_{s2}}{\Lambda + \Lambda_{s2}}.$$

由於同轉激發而起之雜散通量之總和在第 496 圖中故為

$$OD = \frac{I}{2} \left(2\Delta s_1 + \frac{\Lambda \times \Delta s_2}{\Lambda + \Delta s_2} \right) .$$

此固定子雜散約等於三相交流電動機或變壓器中之三倍。

在第 496 圖中於是得與第 464 圖中同一之通量。DA 表同轉空氣通量而係等於分別由固定子及轉動子惹起者之 DP 及 PA 兩空氣通量之和，DF 表同轉轉動子雜散通量，EA 表轉動子內之通量及 OA 固定子內之通量。今依第 367 面命 $\eta_1 = \Lambda : (\Lambda + \Delta s_1)$ 及 $\eta_2 = \Lambda : (\Lambda + \Delta s_2)$ 並得：OD = I/2Λ(2 - η₁ - η₁η₂)/η₁。據是則空氣通量 DP = Λ × I/2 與由固定子惹起之全部通量之比等於

$$\eta' = \frac{DP}{OP} = \frac{DP}{OD - DP} = \frac{\eta_1}{2 - \eta_1\eta_2} .$$

今已導入 η' 以代 η₁，其餘則全

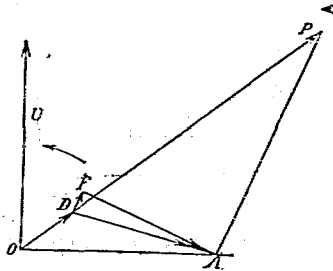


圖 496. 單相電動機之通量。

與三相交流電動機中同。P 現今又在一圓上，據第 367 面在此圓中：
AB : OB = η' × η₂ = η₁ × η₂ : (2 - η₁η₂) .

OP 與電流 I/2 為比例，故又與電流 I 為比例。據是遂成關於電流之第 497 圖。在閉轉動子內之無載電流¹⁾ OA 依方程式為

$$OA = OB - AB = \frac{2 - \eta_1\eta_2}{2 - \eta_1\eta_2} OB .$$

其中 2 - η₁η₂ 既略大於單位，故依第 367 面第 9 方程式轉動子閉時（故迴轉時）之無載電流幾乎等於轉動子開時（故靜止時）之兩倍，以是在工作時之功率因數極不良好。

¹⁾ 單相交流電動機之無載電流；Leerstrom des Einphasenmotors; no-load current of single phase motor; courant à vide de moteur monophasé.

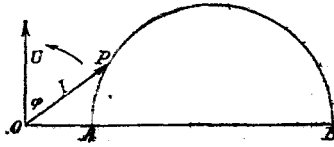


圖497. 單相電動機之電流圖。

又在無阻轉動子內退移既等於零，故不拘負載大小，轉數恆不變。轉矩故與功率為比例，申言之，即與圓之垂線為比例。過載量且較三相交流電動機中遂小。

單相電動機縱使由插入電阻於轉動子路內亦不會起動。為使該種電動機起動須用一輔助圈而後者對於主圈成 90° 之位移。在輔助圈內

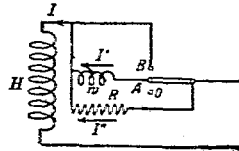


圖498. 關於起動之接法。

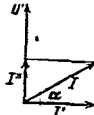


圖499. 起動時之電流。

饋與主電流異相之交流電。

其連接法如第 498 圖所示。

其中 H 表主圈，W 表與主圈

串聯之輔助圈。當換向開關

在起動位置 A 時與輔助圈平

行插入歐姆電阻 R。若命 U'

表輔助圈之電壓，則依第 499 圖有感輔助圈之電流 I' 潛在 U' 之後 90°，而歐姆電阻 R 內之電流 I'' 則與 U' 同相。二電流之和等於主圈之電流。此電流對於輔助相之電流成 α 角之位移。電動機是以如雙相電動機¹⁾ 起動，其中二相線成 90° 角有時 α 角之位移。

在工作位置 B，輔助圈已被開去，其時務令輔助圈與電阻 R 之連接中斷，否則轉動磁場當在輔助圈內蓋起電壓並使電流通過電阻。

往往又用一容電器以代電阻。

單相起動電動機²⁾ 如帶換向器之電動機起動（參考 141 節），以後自動換向而為感應電動機。

又縱使顧及轉動子電阻，固定子電流綫之末端亦在一圓上（參考 Thomälen, ETZ 1905, 第 1111 面）。在第 138 節中又經簡單說明（參考 Gorges, ETZ 1903, 第 271 面）。

1: 雙相電動機; Zweiphasenmotor; two phase current motor; moteur bi-phase. 2: 單相起動電動機; Einphasen Anzugsmotor; single phase hoisting motor; moteur d'élevateur monophasé.

138. 根據橫磁場之電流圖。

依第500圖而可有正弦形變動之固定子電流 I 當初經由變壓作用由匝電係並有 R 電阻所成之轉動子繞組內惹起呈正弦形變動之轉動子激發強度 I_y ，其軸固定且與固定子線匝之軸同向。今任電流 y 通過一特別繞組 Y 之內。 I 及 I_y 兩電流之反作用在轉動子內發生一種有通量 Φ_y 之正交磁場。

當迴轉之際，因轉動線切正交磁場，在線內發生運動電壓，以致惹起轉動子電流 I_x 。

此電流之依空間的及時間的巔值係在一線匝內。此線匝之軸在500圖中係水平並簡稱曰 X 線匝。呈正弦形變動而有永久水平軸之轉動子激發強度 I_x 在轉動子內惹起一種帶 Φ_x 橫通量之水平磁場。此磁場與對於正交磁場成 90° 之空間位移。

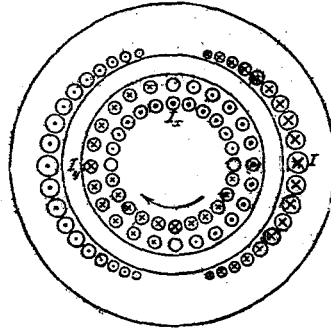


圖500. 單相電動機內之電流分配。

令固定子電阻等於零並製成關於 Y 繞組之電壓圖，恰如變壓器或三相交流電動機之電壓圖然。設固定子及轉動子之匝數相等，在第501圖之固定子路內：OP表固定子之兼散電壓，OD經固定子電流在固定子內發生之總電壓，

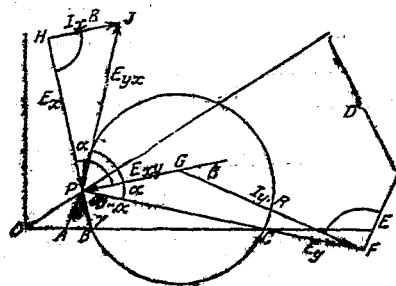


圖501. 單相電動機之電壓圖。

DE轉動子對於固定子之互感應電壓及EO固定網絡電壓。

在轉動子之Y繞組內互感應電壓PD及自感應電壓DF合成而為PF之總和。此總和表示經通量 Φ_y 發生之靜止電壓 E_y 。其與由通量 Φ_x 惹起之運動電壓 $GP=E_{xy}$ 合成歐姆壓耗 $GF=I_y R$ 。

在轉動子之X繞組內，自感應電壓 $HP=E_x$ 與由通量 Φ_y 惹起之運動電壓 $PJ=E_{yx}$ 合成歐姆壓耗 $HJ=I_x R$ 。

又GP與HJ平行。由一弧表出之角等於 90° 。次與DE平行作線PA。於是由PD:OD之固定比例表示A為一固定點。再

$$\frac{AC}{CE} = \frac{PA}{EF} = \frac{PA}{DE} \times \frac{DE}{EF}.$$

此比例故亦有一常值，申言子，C亦為一固定點。

今延長HP至與OE相切於B點。次由反覆應用正弦律—— α 角既與 β 角相等。

$$\sin\beta = \frac{AB}{PA} \sin\gamma = \frac{PF}{I_y R} \sin\sigma \quad \sin(90^\circ - \alpha) = \frac{BC}{PC} \sin\gamma.$$

由是成：

$$\frac{AB}{BC} = \frac{AP}{I_y \times R} \times \frac{PF}{PC} \operatorname{tg}\alpha.$$

今容易證明右方之三因數均為常數，又B為一固定點。以是P在一圓上並在BC之固定弦上成 $90^\circ - \alpha$ 周邊角。

茲固定子電流 I_1 與OP為比例。據是，電流圖亦為一圓，其中電壓 U_1 與縱坐標軸相符合，又OB表無載時之電流及OC表理想捷路電流。轉動子電阻愈大時，圓心向上之位移亦愈甚。

第二十二章 帶換向器之單相交流電動機¹⁾

139. 產電壓。

單相感應電動機因其低過載量，不良功率因數且因缺乏起動轉矩

¹⁾帶換向器之單相交流電動機；Einphasenmotoren mit Stromwender；single phase motors with commutator；moteur monophasé avec commutateur.

不適於多種工作。其一應用例如在電車上。三相交流電動機之工作則較良。然其在電車上之一般應用因須有多數架空線並因調整速度耗功頗大之故亦有缺點。

帶換向器之單相電動機之構造實為一種極重要的進步。是種機種具有高牽引矩及簡單無耗起動及調整之優點。為此應用帶有級開關或感應調整器之變壓器。

然帶有換向器之單相電動機僅能構成而為帶串繞組特性之電動機，蓋若欲將其構成而為如分繞電動機之一種，則因磁繞組之自感應在磁通量與路端電壓之間發生近於 90° 之位移。況在此種情形下電樞電流大都為有效電流且與路端電壓幾乎同相，因此對於磁通量亦幾乎有 90° 之依時間的位移，故轉矩極小。

為便於研究電動機之作用方式，先計算在電樞內及一般情形中適用之靜止電壓及運動電壓。所謂一般情形即指電樞之安匝軸對於固定子匝軸成 α 角位移時之情形。同時假定有分佈均勻之固定子繞組（圖502）。鐵飽和且須小，然實際不如是。

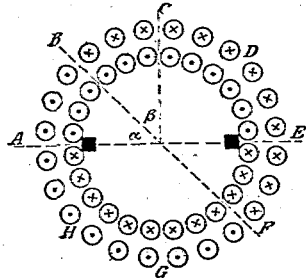


圖502. 分佈固定子繞組及轉動子繞組（其軸成 α 角之位移）。

今首先計算固定子與電樞間之互感係數。在第503圖中圓周被展開。固定子之圈節距BF恰如電樞之刷之距離係等於一極節距。一極節距之串線數其在固定子上者假定等於 a_1 ，在電樞上者假定等於 a_2 。若命 i_1 及 i_2 分別表在固定子上及電樞上之總線數，則有 $2p$ 極與 $2a_1$ 及 $2a_2$ 並聯電流分路時

$$s_1 = \frac{i_1}{2p \times 2a_1}, \quad s_2 = \frac{i_2}{2p \times 2a_2}.$$

空隙之磁導假定為 Λ 。當極面為 F ，雙空氣隙 l 及空氣之導磁係數為

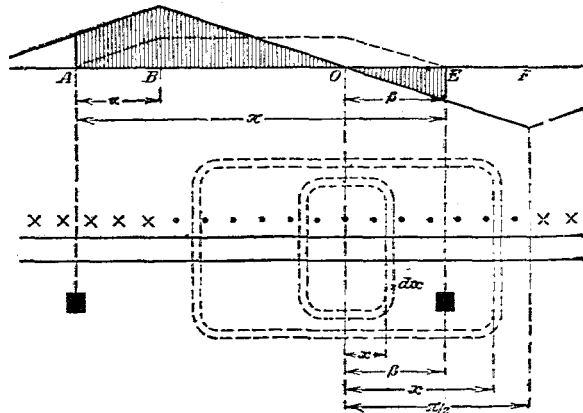


圖503. 經固定子惹起並穿過電樞之通量。

II. 時，依第44面第9方程式， $\Lambda = \Pi_0 F/L$ 。

今考慮第503圖中離固定子繞組寬度之中點O在x遠處之弧寬度dx。極節距既與弧π相當，故dx弧之磁導等於 $\Lambda dx/\pi$ 。因O及 $\beta = \pi/2 - \alpha$ 限界之間經固定子發生並穿過dx弧之磁線包圍固定子上之 $s_1 \times 2x/\pi$ 線數及電樞上之 $s_2 \times 2x/\pi$ 線數。在O及 β 間之弧依據第58面第23方程式發生一部分之互感係數

$$M' = \int_0^{\beta} s_1 \frac{2x}{\pi} s_2 \times \frac{2x}{\pi} \Lambda \frac{dx}{\pi} \cdot$$

在 β 及 $\pi/2$ 限界之間經固定子發生並穿過dx弧之磁線包圍固定子上之 $s_1 \times 2x/\pi$ 線數但祇包圍電樞上之 $2\beta s_2/\pi$ 線數。電樞之餘線係隸屬於其他線匝，後者之兩圈邊依相反方向而被成。是以經 β 及 $\pi/2$ 間之弧發生之互感係數

$$M'' = \int_{\beta}^{\pi/2} \frac{2xs_1}{x} \times \frac{2\beta s_2}{\pi} \Lambda \frac{dx}{\pi} \cdot$$

有 $2p$ 極時當有 $2p$ 倍之感應係數。積算並總和兩部分，再以 $2p$ 乘積並以

$$k = 3\beta/\pi - 4\beta^2/\pi^2 \quad (1)$$

於是得互感係數

$$M = 1/3 \times k s_1 \times s_2 p \Lambda \quad (2)$$

今由是可分別導出固定子及電樞之自感係數 L_1 及 L_2 。命 $\alpha = 0$ ，故 $\beta = \pi/2$ ，因而 k 之值等於1。此外並於固定子中以 s_1 代 s_2 而在轉動子中以 s_2 代 s_1 ，若類及雜散（參考第367面），則得

$$L_1 = \frac{M}{k\eta_1} \times \frac{s_1}{s_2} \quad (3) \quad L_2 = \frac{M}{k\eta_2} \times \frac{s_2}{s_1} \quad (4)$$

在是種方程式中， η_1 或 η_2 表有效雜散， k 表變連環雜散，申言之，即表因固定子圈邊及電樞圈邊成 α 角位移而起之不完全的通量連環。

今計算電樞內因運動而發生之電壓 E_b ，設命 Φ 表存於電樞內兩電樞刷之間之通量之依時間之巔值，則運動電壓之巔值依據第102面等於 $e_{bm} = \dot{\Phi} n s_2 p / 2s_1$ 。

次算通量 Φ 並於第503圖之上部內描出經固定子電流發生之磁場之感應與 α 之關係。磁場呈三角形而其空間的巔值係在B點。茲命 i_m 表外導線內固定子電流之依時間之巔值，則磁感應之依空間的及時間的巔值當為

$$\mathcal{H}_m = \mu_0 s_1 i_m / l$$

又同時類及符號製出條線面，當時從全三角面 $\mathcal{H}_m \pi/2$ 減去OE下之三角形之雙內容，即減去 $\beta \mathcal{H}_m \beta : \pi/2$ 。或由另一方面說起，在第503圖中BD= 2β 弧上之固定子線不惹起與運動電壓有關之磁場而產生運動電壓之垂直磁場係單獨由DF= 2α 弧上之固定子線所發生。此磁場呈不等邊四邊形並有經虛線指出之形狀（圖503）。此不等邊四邊形且對稱，其右角普通不在O點上。磁場虛曲線與水平線之間之面積此時與上相同亦等於 $\mathcal{H}_m (\pi/2 - \beta^2 \times 2/\pi)$ 。

以極面 F 與弧 π 之比乘此面積並用上面之 Λ 及 \mathcal{H}_m 值得經電樞線切過之通量之依時間之巔值如下：

$$\Phi = \Lambda/2 \times s_1^2 I_m (1 - 4\beta^2/\pi^2).$$

今假定轉數 n 與同步轉數 p 之比等於 v 。再由第401面關於 s_2 之方程式求得 z_2 之值，於是得

$$p \times n = v\omega = v\omega/2\pi \text{ 及 } z_2 = 4p\alpha_2 z_1.$$

在關於 e_{bm} 之方程式內代入已算出之 Φ ， $p \times n$ 及 z_2 諸值並於二邊取有效值。運動電壓於是變為

$$E_b = \frac{\Lambda}{2} s_1 I_1 \left(1 - 4\frac{\beta^2}{\pi^2}\right) \frac{v\omega}{2\pi} 4p \times s_2. \quad (5)$$

今命

$$h = (1 - 4\beta^2/\pi^2) 3/\pi$$

並藉第2方程式算出經固定子與轉動子互感而起之靜止電壓 E_{12} 。其值為

$$E_{12} = M\omega I_1 = 1/3k \times s_1 s_2 \times p\Lambda\omega I_1.$$

準此

$$E_b / E_{12} = vh/k. \quad (6)$$

若固定子繞組祇占極節距之一部分，例如 $2/3$ 極節距，則感應係數亦依相似方法計算。

140. 適用交流之串繞電動機。

除磁鐵樞必須由鐵片合成者外，適用交流之串繞電動機與適用直

流之串繞電動機並無基本的差別。設導交流於直流串繞電動機內，則電流在電樞及磁鐵繞組內開時換向而轉矩之方向在交流全個週間恆不變。

為令電流與電壓間之相不致有大位

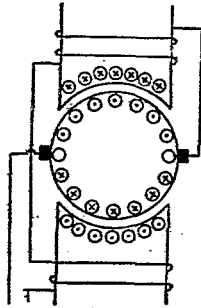


圖04. 帶核繞組之串繞電動機。

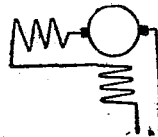


圖05. 突電樞串聯之核繞組。

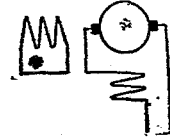


圖06. 核繞組被並接。

移，電樞電流之磁效應須用一補償繞組或橫繞組抵消（圖504）。橫繞組可依第505圖與磁鐵繞組及電樞繞組相串聯，然亦可依第506圖被捷接，其時其電流經電樞之變壓器作用自電樞一方面發生。電樞於是表串聯變壓器之第一繞組，其第二繞組被捷接。兩繞組之電流既互相抵消，故除雜散外並不惹起靜止電壓。

在大電動機中補償繞組及大都存在之換向極繞組係分開。在小電動機中缺少補償繞組。因此其換向極繞組之線圈相當粗。

第507圖示關於串繞電動機之電壓圖。電流係由 I 線表明。茲命 $L\omega$ 表磁鐵感抗與電樞繞組及橫繞組之雜散電阻之總和， R 總歐姆電阻，則超在電流前 90° 之 OA 等於有感壓耗 $IL\omega$ ，而與電流同相之 AF 等於 $I R$ 。故線 $OP = I\sqrt{R^2 + L^2\omega^2}$ 當表總電壓損失。於此加上與由運動發生之電壓維持平衡之電壓 PB 。此運動電壓當通量最大時故即當產生該通量之電流最強時最大。其方向與電流之方向相反，恰如在直流電動機中然。與之成平衡之電壓 PB 故與電流同相。諸電壓之總和 OB 即等於以 φ 角超在電流前之路端電壓 U 。

今 $\tan\gamma = L\omega/R$ ，故不變。準此， P 在一圓上，其中 $OB = U$ 為 $\pi - \gamma$ 弧上之弦。設命 OC 表直徑，則 COB 角等於 $\pi/2 - \gamma$ ，申言之，直徑 OC 等於 $U/\sin\gamma$ 。在圖中直徑係水平。今 BOC 及 POA 二者皆等於 $\pi/2 - \gamma$ 。準此， POC 等於 AOB ，故等於 $\pi/2 - \varphi$ ，即 OP 以 φ 角滯在垂軸之後。

今以 $\sqrt{R^2 + L^2\omega^2}$ 分各線並由是得第508圖，其中 OP 線表電流 I 末端 P 於是係在以

$$OG = \frac{U/\sin\gamma}{\sqrt{R^2 + L^2\omega^2}} = \frac{U}{L\omega}$$

為值徑之圓上。

線 $OB = U/\sqrt{R^2 + L^2\omega^2}$ 表捷路電流。 OP 既以 φ 角滯在垂軸之

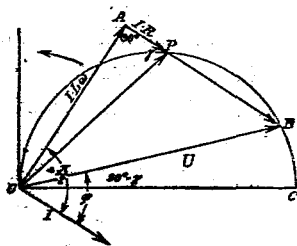


圖507. 串繞電動機之電壓圖。

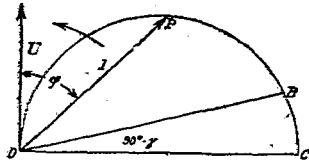


圖 508. 串繞電動機之電流圖。

中之運動電壓 $E_0 = BP$ 而得。若假定有全負載時飽和程度低下——但此不切實，則通量當與 OP 線為比例。轉數故與 $BP : OP$ 之比為比例，申言之，若忽略 R 電阻，係與 $\cot\phi$ 之值為比例。故轉數增加時功率因數 $\cos\phi$ 亦增加。其另一解釋為當轉數增加時有效電流對於無功電流之比增加而 P 在第 508 圖中向左移動。是以電動機之工作在作過步轉時較良。

若依水平方向表第 508 圖中之電流強度並依垂直方向表示轉矩及轉數，則得與直流串繞電動機中相似之曲線。該電動機種故具有良好固有調整作用（參第考 156 面）。

恰如在直流電動機中然，在經刷捷接之圈內亦發生自感應電壓。此電壓之強度與電流強度及轉數為比例。但因是處用交流，自感應電壓隨電流之時值而變動，而當刷對下之線圈內有顛強電流換向之際，其值最大。在是種情形中，自感應電壓絕對與電流同相且如在直流機中亦可經換向極抵消之。

同時在被經磁通量所通過而對於磁鐵繞組成爲一變壓器之第二繞組捷接之圈內，發生靜止電壓。此電壓滯在通量之後 90° 而係與此通量及頻率為比例。其值當起動之際最大，因當時電流故即磁通量最大之故。

在被捷接之圈內發生之靜止電壓惹起一強捷踏電流，其作用可於刷處發生火花。職是之故，靜止電壓務須可能的最小，因而須運轉通量及頻率相當的低下。串繞電動機故祇得 15 或 16% 週期。其刷亦以小而硬者爲宜。必要時於電樞線圈及換向器之間插入電阻，使後

後，電壓 U 之線在電流圖中當在此軸內。

轉矩係與通量及電流強度為比例，故當飽和度低時與電流強度之平方為比例。

轉數係以通量分第 507 圖

概作板狀，而如換向片然，係在夾絕緣板之間，故全部外觀如一換向器。

其他一抵消捷接圈內靜止電壓之方法係用輔助極，後者係由分圈激發。經輔助極分圈激發作用發生之磁場，如產生該磁場之電流然，因分圈激發之自感應滯在路端電壓之後 90° ，故幾乎滯在固定子電流之後 90° 。此種磁場在被捷接之圈內惹起一種運動電壓而此電壓亦約滯在電流之後 90° ，故適於抵消上述之靜止電壓。然此種抵消電壓之方法惟在有一定轉數時始完全。靜止時經輔助極分圈激發作用發生之運動電壓係等於零，故當起動之際，在刷下之捷路電流不應除去。且同一輔助極不應同時再裝主電流繞組以產換向磁場及副繞組以抵消捷接圈內變壓器之電壓，因兩繞組由互感而互相影響之故。

141. 推斥電動機。

在推斥電動機¹⁾中惹起牽引力之電流並不由刷導入於電樞內。其電流係被越刷捷接之電樞內由固定子一部分繞組——所謂橫繞組——之互感應而發生且同時由此繞組部分補償（圖509）。固定子繞組分解而為橫繞組 BD 及激發繞組 DF。實際二者合成而為一單獨繞組，其軸依第 502 圖對於電樞之軸移相。固定子繞組可依第 502 圖同時分佈在全部極節距上或祇分佈在 $2/3$ 極節距內。如在第 509 中，第 502 圖中之 BD 表一橫繞組而 DF 表一激發繞組。

在第 502 圖中發生一種與時針相反之轉矩，其方向恆與電樞之磁軸對於固定子軸移位之方向一致。所謂位移角係指一銳角。轉數可由移動刷之位置而調整。

然應注意者，推斥電動機係自某一定刷位置起動，當時電樞及固定子之磁軸互以 90° 相移位。固定子對於電樞之

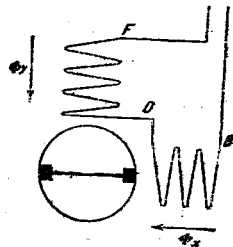


圖509. 推斥電動機之接線圖。

¹⁾推斥電動機; Repulsion motor; repulsion motor; moteur de répulsion.

感應作用當時等於零而固定子繞組為一純粹抗流線圈。因自感應作用故電流極弱。當起動之際，將刷移至工作位置，當時電樞之軸與固定子之軸約成 10 至 30° 之角。刷之離開靜止位置之位移角於是等於軸之位移角之補角，而電動機依與刷離開靜止位置相反之方向而旋轉。為控制轉向將刷移回至靜止位置並俟電動機靜止之後將刷依反對方向移動——推斥電動機之變轉向之作用¹⁾。

若欲使電樞繞組變為橫繞組之一真確像，如是其就磁性言僅占有圓周之一部分，則可依第 101 圖應用一縮短之繞組節距。然亦可應用雙刷恰如在台利電動機中(圖 510)——帶雙刷之台利電動機。依第 510 圖當時祇電樞之 BD 及 FH 二部分有作用而其他 DF 及 BH 部分則被開去。因此固定子電流及電樞電流之依橫方向之反作用較良，申言之，電樞雜散較小。

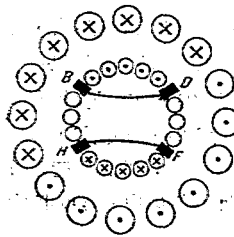


圖 510. 帶雙刷之推斥電動機。分數階級調整。

在固定子磁極上 D 及 H 之刷係固定而
其他兩刷則可移動(圖 510)。靜止時在
B 之刷係在 D 而在 F 之刷係在 H，故電樞開
• 當起動之際可移動之刷被移至工作位置
• 其時可令電樞軸及固定子軸間之 α 角依
特別細之階級變動，蓋增加刷之位移祇使
磁軸間之位移增加一半。轉數可依是法細

今欲確定在帶簡單或複刷組之電動機中經固定子激發繞組 DF (圖 509 及 510) 發生之激發通量 Φ_y 及經橫繞組與電樞共同惹起之變壓器通量 Φ_x 。其中一方法係由將鉛直磁場之通量 Φ_y 由一線表明並使該線與垂軸一致。為達此目的假定產生此 Φ_y 通量並與之同相之固定子電流 I_1 係鉛直向上(圖 511)。

¹⁾ 推斥電動機之變轉向之作用； Umsteuerung von Repulsionmotoren; change of direction of repulsion motors; renversement de marche des moteurs de répulsion.

鉛直磁場之激發通量 Φ_y 在電樞內發生一運動電壓 E_b ，其值當發生 Φ_y 通量之固定子電流 I_1 最強時最大。經運動發生之電壓，恰如在直流中，既與電樞電流相反且電樞電流及固定子電流既反相，運動電壓與固定子電流當同相，其在圖中經由線 E_b 表明。

經固定子之 BD 部分及電樞電流之反作用惹起之水平磁場之變壓器通量 Φ_x 在被捷接之電樞繞組內發生一靜止電壓 E_x 。當忽略電樞電阻時，此靜止電壓與運動電壓成平衡。其幅線故鉛直向下。其位置係滯在通量 Φ_x 之後 90° ，是以表該通量之線係向右水平。此二成 90° 空間位移角之通量故又有 90° 之時間位移，申言之，推斥電動機具有一轉動磁場。

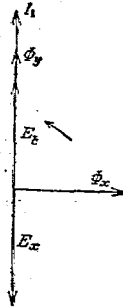


圖511. 推斥電動機之通量及電壓。

今靜止電壓 E_x 係經 Φ_x 通量在有與 f/p 同步轉數相應之頻率時發生。反之，運動電壓 E_b 經 Φ_y 通量在有 n 轉數時發生。若認電壓係與通量及轉數之乘積為比例當可無大誤差。二電壓既相等，故由代入 v (見第 404 面) 得

$$\Phi_x f/p = \Phi_y n, \quad \text{申言之, } \Phi_x = v\Phi_y. \quad (7)$$

作同步轉時。即 $v=1$ 時，兩通量相等而轉動磁場完全。靜止時 ($v=0$) 水平磁場等於零，因恰如一捷接三相交流電動機起動之際全部水平磁場經電樞電流之反作用離開電樞並被推擠在雜散路內。依上列方程式，轉數增加時，水平磁場顯然較鉛直激發磁場為強。

今製電壓圖及電流圖。固定子電流在第 512 圖中由 I_1 線表明。固定子之自感應電壓 $E_{11}=OP$ ，係滯在固定子電流之後 90° 。其與電樞與固定子間之互感應電壓 E_{21} 構成總和 OA 。若忽略固定子電阻此總和與路端電壓 $AO=U$ 相反對。在圖中表示路端電壓之線 AO 係水平向左。 OP 於是依電流 I_1 滯在電壓 U 後之 φ 角滯在垂軸之後。

固定子於電樞間之互感應電壓 E_{21} 係與電壓 E_{11} 同相，因二者均由

同一電流惹起之故。其與電樞之自感應電壓 E_{22} (復與 E_{21} 同相) 合成總和 OC 。若忽略電樞電阻，此總和與運動電壓 E_b 成平衡。又運動電壓既與通量及電流同相，故 E_b 之方向與電流 I_1 一致，申言之， $\angle COP$ 角係等於 90° 。

今依 OC 方向作 PB 並延長 PA 至 D ，次由利用下列方程式： $E_{11} = L_1 \omega I_1$ ， $E_{22} = L_2 \omega I_2$ ， $E_{12} = M \omega I_2$ 及 $E_{21} = M \omega I_1$ 得：

$$\frac{AB}{OB} = \frac{E_{11}}{PD} = \frac{E_{21}}{E_{22} \times E_{11}/E_{12}} = \frac{M^2}{L_1 L_2}$$

AO 既表固定路端電壓，則 AB 及 OB 亦必固定。又因 $\angle OPB$ 角等於 90° ， P 當在經過 O 點之圓上。此圓之中心係在 OA 之延長線上。

今以 $L_1 \omega$ 分諸線。於是線 OP 在第 513 圖中當直接表示固定子電流

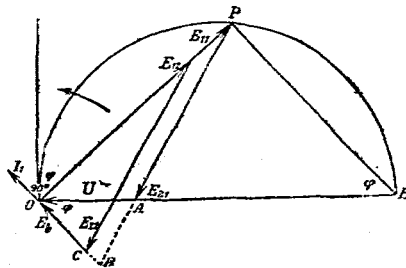


圖 512. 推斥電機之電壓圖。

推斥電流 I_1 。而其末端恰如在第 512 圖中係在一圓上。

• 設命 I_0 表電樞開時或磁軸作 90° 位移時之無載電流，則一有效方程式為 $U = L_1 \omega I_0$ 。又既然同樣亦以 $L_1 \omega$ 分 $OA = U$ ，故在電流圖中 A 當表無

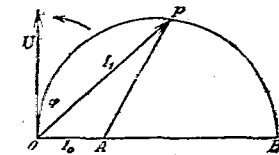


圖 513. 推斥電機之電流圖。

載電流 I_0 。由上列之比例 $AB : OB$ 決定直徑。應注意者此同一比例於決定三相交流電動機之電流圖時及當計算雙速環雜散時皆見之。其實在第 404 面計算感應係數時同時顧及實際雜散及因磁軸位之不良通量速環。此種不良通量速環有如雙速環雜散之作用。

在電流圖中 $PA = E_{21}/L_1 \omega = I_2 M \omega / L_1 \omega$ ，由此關係得電樞電流 I_2 。

設固定子繞組係均分在全極節距上，則轉數依第 6 方程式由次列關係求得：

$$\frac{vh}{k} = \frac{E_b}{E_{11}} = \frac{OD}{E_{11}} = \frac{OD}{PB} \times \frac{PB}{E_{11}}$$

今 $OD/PB = OA/AB = (L_1 L_2 - M^2)/M^2$ 及 $PB/E_{11} = \cot\varphi$ 。據此則 $vh/k = \cot\varphi(L_1 L_2 - M^2)/M^2$ 。轉數故與 $\cot\varphi$ 為比例。

最後依下列方程式計算轉矩：

$$M = \frac{U I_1 \cos\varphi}{2\pi n}$$

如前命 n 等於 vf/p 並代入上面確定之 v 之值。於是得轉矩與 $I_1 \sin\varphi$ 為比例，申言之，與固定子電流之 OP 線之在水平軸上之投影為比例。依據測面術之一定律，轉矩又與固定子電流之平方為比例。其時假定飽和度低小，但與實際情形不相應。

在第 514 圖中電流強度依水平方向，而功率因數，速度及轉矩（以仟米克計）依垂直方向表明。又軸之位移角 α 等於 10° ， 20° 及 30° 。為簡單起見，假定 I_0 及 $vU/f = 1$ 及 $(L_1 L_2 - M^2)/M^2 = 0.9$ 。由圖知推斥電動機之作用亦如一直流串繞電動機。

今考慮其電流換向方法。當初在被捷接之圈內發生一種自感應電壓，其強度與轉數為比例。此自感應之作用與在直流電動機中相同。

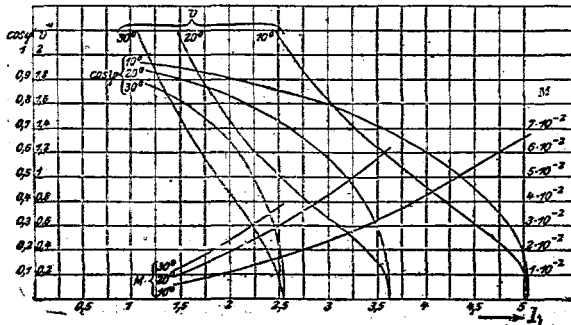


圖 514. 轉矩，速度及功率因數與電流強度之關係。

此外在被捷接之圈內經通量 Φ_x 惹起一種同相運動電壓並經通量 Φ_y 惹起一種滯在該通量後 90° 之靜止電壓。依據第511圖在被捷接之圈內之靜止電壓與運動電壓起反對之作用。當電動機作同步轉時，此二者完全互相抵消，蓋其時 $v=1$ 而據第409面二通量係相等。又就另一方面解釋，當起同步轉時發生一完全轉動磁場，此磁場亦同步週轉，是以對於被捷接之圈不惹起影響。在此情形中故祇剩被捷接圈之自感應。

在有小於同步轉之速度時，鉛直激發通量 Φ_y 較著。其在被捷接之圈內惹起之靜止電壓抵消被捷接之圈內一部分之自感應，故在有小於同步轉之速度時，就其不帶火花之電流換向作用而言，推斥電動機處於有利的地位。

在有大大於同步轉之速度時，依據第409面通量 Φ_x 較通量 Φ_y 顯著。又因 $v>1$ 在被捷接之圈內運動電壓顯然超過靜止電壓。此外在有大大速度時，在被捷接之圈內之自感應電壓特著。此電壓係加在被捷接之圈之運動電壓上而當速度愈大時其間之角度亦愈小。

故有較大轉數時三種不利的事情共同合作。第一速度過大，次之通量 Φ_x 過大，終則自感應電壓與運動電壓在一銳角下互相增積。此二種電壓祇一部分被在圈內由通量 Φ_y 惹起之靜止電壓所抵消。

142. 愛雪包電動機及拉多爾電動機。

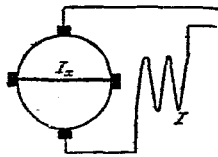


圖515. 愛雪包電動機及拉多爾電動機之基本接法。

愛雪包電動機¹⁾及拉多爾電動機²⁾與推斥電動機之基本的差別在因此二種電動機係依第515圖藉固定子電流 I 從電樞一方面激發。此種電流係被導入於電樞內並惹起一種垂直通量 Φ_y 。在實際構造中通常電樞並非直接由固定子電流 I (圖515)

¹⁾愛雪包電動機；Eichberg-Motor；Eichberg-motor；moteur d'Eichberg.

²⁾拉多爾電動機；Latour-Motor；Latour-motor；moteur de Latour.

但由一變壓器之第二繞組饋電而變壓器之第一繞組與固定子線匝相串聯。為使起動不帶火花並為調整轉數，變壓器之變壓比可以變動。若命 u 表第一繞組匝數對於第二繞組匝數之比，則在鉛直激發繞組內之電流 I_y 等於 uI 。

惹起牽引力之電樞電流 I_x ——其線匝在圖中帶一水平軸——如在推斥電動機中係從固定子一方面經靜止電壓在被越刷捷接之電樞內發生。帶水平軸之電樞匝成一變壓器之第二繞組而固定子匝成變壓器之第一繞組（圖516）。

在索雪包電動機及拉多爾電動機之電樞內有兩種通量。鉛直通量 Φ_y 係經激發電流 uI 發生並與該電流同相。其於帶鉛直軸之繞組內惹起一種靜止電壓 E_y 。此電壓滯在通量 Φ_y 之後 90° 而在帶水平軸之繞組內惹起一種運動電壓 E_{yx} 。此運動電壓與通量 Φ_y 同相。若令第517圖中固定子電流 I 之線及激發電流 uI 之線均鉛直向上，則運動電壓 $E_{yx} = OF$ 之線亦鉛直向上而靜止電壓 E_y 之線則水平向右。

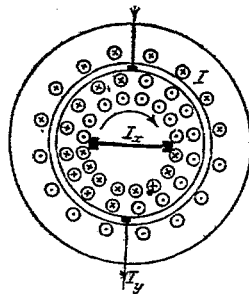


圖516. 索雪包電動機內之電流分佈。

水平通量 Φ_x 係經固定子電流 I 及電樞電流 I_x 之相互作用而發生而電樞電流亦係由固定子電流之變壓器作用所惹起。此水平通量在被捷接之水平電樞繞組內惹起一種靜止電壓 E_x 而此電壓當忽略電樞之有效電阻時與電壓 E_{yx} 成平衡。其線故鉛直向下並等於 FO 。又因其滯在通量 Φ_x 之後 90° ，該通量係水平向右。此二種有 90° 空間位移之通量故有 90° 時間位移，申言之，電動機具有一轉動磁場。

水平通量 Φ_x 又在電樞之鉛直繞組內惹起一種運動電壓 E_{xy} 。此電壓與通量 Φ_x 同相或反相。作同步轉時轉動磁場不切電樞，故運動電壓 E_{xy} 及靜止電壓 E_y 起反對之作用。 E_{xy} 故水平向左。

在固定子內命 OE 表接在固定子之上路端電壓， BD 由電流 I 惹起

是則在 X 繞組內之兩相反並相等之電壓 (E_y 既然等於 $L_2\omega I$):

$$E_x = E_{yx} = vF_y \frac{3}{\pi} = vL_2\omega nI \frac{3}{\pi}$$

在鉛直激發繞組內之運動電壓為

$$E_{xy} = vE_x \frac{3}{\pi} = v^2L_2\omega nI \frac{9}{\pi^2}$$

若依第 517 圖命 $GD = M\omega IM/L_2$, 則

$$U \sin\varphi = u(E_y - E_{xy}) + L_1\omega I - I\omega M^2/L_2, \quad U \cos\varphi = E_{yx}M/L_2$$

今代入上列關於 E_y , E_{xy} 及 E_x 之值並命

$$(L_1 - M^2/L_2 + u^2L_2)\omega = a \quad u^2L_2\omega \frac{9}{\pi^2} = b \quad uM\omega \frac{3}{\pi} = c$$

於是得 $U \sin\varphi = (a - bv^2)I$, $U \cos\varphi = cvI$ 及 $\tan\varphi = (a - bv^2)/cv$. 在各速度時故可算出 φ 角及電流·位移角 φ 等於零時之速度係由上列關於 $\tan\varphi$ 之方程式表明而係等於 $v_0 = \sqrt{a/b}$. 其值係在同步值之上. 若速度再增加, 則位移角變為負. 其故因有較大速度時在鉛直激發繞組內之運動電壓較相反之靜止電壓為強, 故其差為負. 因此之故, 在固定子繞組內及水平電樞繞組內之自感應被過度抵消, 故電樞可納取超前電流.

由應用關於 $U \cos\varphi$ 之方程式得

$$M = \frac{U \cos\varphi}{2\pi n} = \frac{cpI^2}{2\pi f}$$

關於 $L_1\omega = L_2\omega = 6.3$ 及 $M\omega = 6$ 歐姆以及關於有 500 伏電壓, 50 赫芝及 $p=3$ 時之與速度有關之電流, 功率因數及轉矩(以仟米克計)均可依是法算出, 其中並以 $u=0.25$ 及 0.5 . 次在第 518 圖中指出電流, 功率因數及速度與轉矩之關係. 其中實線表 $u=0.25$ 時之情形而虛線表 $u=0.5$ 時之情形. 曲線指出如在串繞電動機中之性質並係與實驗曲線相符合. 相位移在曲線之極左部分為負.

值得注意者為在各不同工作狀況下兩通量之比及在固定子與在激發刷之兩電壓之比.

當起動之際, 電流最強, 故當時鉛直激發通量亦最強. 反之, 在電樞內之水平通量係等於零, 蓋自固定子發出經過空間之水平通量被

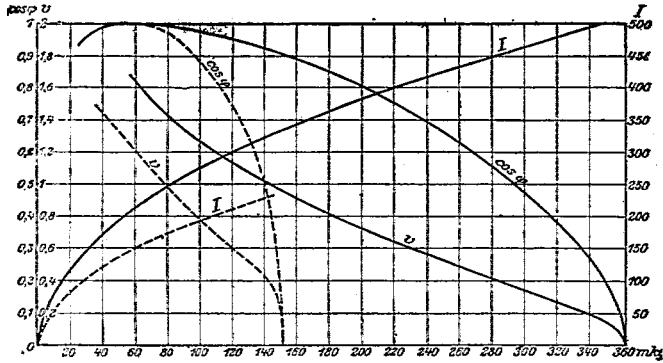


圖513. 同步電動機之曲線。

擠入於電樞之雜散路內。故在固定子之全部電壓祇為經固定子之雜散通量及水平電樞總組決定之較小部分；反之，其在激發繞組中之電壓占由空氣通量及該繞組之雜散通量決定之較大部分。

轉動時發生一種徑電樞匝包圍之水平通量。靜止電壓 E_x 與 E_y 之比既等於產生該電壓之通量間之比，故依據第 414 面關於 E_x 之方程式得 $\Phi_x = v\Phi_y \frac{\delta}{\pi}$ 。

速度較小時，鉛直激發通量較強。同時在激發刷之電壓仍較在固定子之電壓為大。

作同步轉時， $v=1$ 而兩通量幾乎相等。此時轉動磁場完全且因電樞與磁場等速迴轉，故在電樞內不發生電壓。在激發刷之電壓故等於零。其所以然者，亦可由激發繞組內靜止電壓 E_y 與運動電壓 E_{xy} 正相抵消（參考第 517 圖）之事實解釋之。網絡電壓因此全在固定子上且可於不變的電狀況下使電樞越激發刷而被捷接。由是乃發生一種帶電樞縱繞組及橫繞組之單相感應電動機（參考第 138 節）。恰如感應電動機然，該電機於是呈並聯特性，申言之，帶幾乎不變的轉數。

速度更大時，水平通量較強。同時在激發刷之電壓滯在電流之後，是以經水平軸內雜散惹起之在固定子刷之電壓前移為之抵消。電流

與總電壓間之相位移當初為零至以後有較大速度時變為負。

電流在鉛直激發刷之換向並不困難。經是種刷捷接之圈既有一水平軸，是以在圈內之靜止電壓與 Φ_x 為比例而運動電壓與 $v\Phi_y$ 為比例。又據以上所述， Φ_x 既約等於 $v\Phi_y$ ，故兩電壓之值相等。其相反並相等之情形係由第 517 圖中之通量線及同步轉時之完全轉動磁場表明，故該磁場在被捷接之圈內不惹起電壓。據是則在被激發刷捷接之圈內，靜止電壓及運動電壓隨時互相抵消而與速度無關。此情形縱使在運動電壓等於零之靜止狀況下亦然，蓋其時經固定子發生之完全水平通量被摺在雜散路內。經被捷接之線圈包圍之水平通量及因而靜止電壓故均等於零。

被捷接之繞組之水平刷捷接帶鉛直軸之線圈。在是種線圈內，靜止電壓與 Φ_y 為比例，運動電壓與 $v\Phi_x$ 為比例。又據以上所述， Φ_x 約等於 $v\Phi_y$ ，故在電壓間成 1 : v^2 之比。當起動之際，祇有經激發通量 Φ_y 所惹起之靜止電壓。因當時激發電流 i 不大，即變壓器之變壓比 u 皆小，靜止電壓對於刷處火花之不利的影響可被消滅。電動機於是帶小激發通量 Φ_y 及相當強的電流而起動。達同步轉之後，靜止電壓復與運動電壓相抵消。速度過同步時，運動電壓頗占優勢。故有較大速度時，該種電動機工作不良而串繞電動機則當速度超同步轉數愈甚時工作反愈良好。職是之故，串繞電動機今已全被變壓包電動機打倒。

1.43. 複繞電動機¹⁾。

交流複繞電動機含有一個帶換向器之電樞，一個在固定子上而其磁軸與電樞磁軸成 90° 相位移之磁場繞組及一個亦在固定子上之橫繞組。此橫繞組之磁軸係與電樞之磁軸反向。磁場繞組或依第 519 圖與電樞串聯或依第 520 圖與橫繞組串聯。電樞電路及橫繞組電路係藉一平衡變壓器與同相電壓相連接。變壓器之變壓比可變動。另一依第

¹⁾ 複繞電動機；Doppelschlussmotor；compound wound motor；moteur compound.

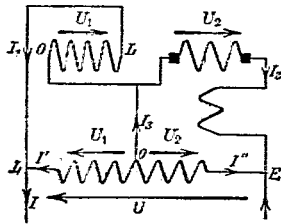


圖519。磁場與電樞串聯。

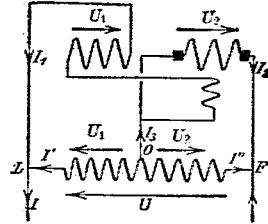


圖520。磁場與橫繞組串聯。

矢線示正方向，並非示同時的瞬間值。

519 圖之特種構造謂之亞歷山大遜電動線¹，其中電樞匝數僅有橫繞組匝數之一半。此少數匝數祇被覆電樞圓周之一部分而電樞因繞組節距縮短之故成爲橫繞組之準磁電像。

爲確定關於電壓及電壓之正方向，依如描線圖之方法描出電樞，且使有如橫繞組中之繞向。經連接之後，在自橫繞組流入電樞內之電流在兩繞組內依相反之方向流動。又既然橫繞組表變壓器之第一圈，電樞表第二圈，故以¹命橫繞組及以²命電樞。

因繞向相同，在二繞組內電流及電壓之計算方向亦無二致。祇於是種條件下其由一電流惹起之自感應電壓及互感應電壓可有相同而非相反之相。電樞繞組及橫繞組內之正方向在圖中假定爲自左向右，故一正電壓之作用在橫繞組內爲自O向L而在電樞內自O向F，至該電壓是否爲一種由外接入或爲一種在內發生之電壓則不同也。電流 I_1 及 I_2 之正方向亦經矢線同時確定，其在兩繞組內與電壓之方向相同。

又變壓器之路端電壓 U_1 與 U_2 及電流 I' 與 I'' 亦依同法確定，在是處亦自O向L及自O向F計算。最後選定中間線內電流 I_3 之計算方向爲向電動機而總電流 I 爲自F向L。於是得：

$$\vec{u} = \vec{u}_1 - \vec{u}_2 \quad \vec{j} = \vec{j}_1 + \vec{j}_2 = -\vec{j}_2 - \vec{j}' \quad \vec{j}_3 = \vec{j}_1 + \vec{j}_2$$

¹ 亞歷山大遜電動機；Alexanderssonmotor; Alexanderson-motor; moteur Alexanderson.

今命 L_1 表橫繞組(在第520圖中包括前置磁場繞組)之感應係數。又命 L_2 表電樞(在第519圖中亦包括磁場繞組)之感應係數。茲假定橫繞組及電樞間之互感應係數為 M ，又命 $r_1 = M/L_1$ 及 $r_2 = M/L_2$ 。至有效電阻及鐵內損失則不顧及。飽和度復假定低下。

首先討論磁場依第519圖與電樞相串聯之電動機。在第521圖中作表路端電壓 U 之線 FL 使取水平並自右向左之方向。依此方向設表橫繞組之電壓 U_1 之 OL 線。如圖所示，橫繞組之電流 I_1 滯在電壓 U_1 之

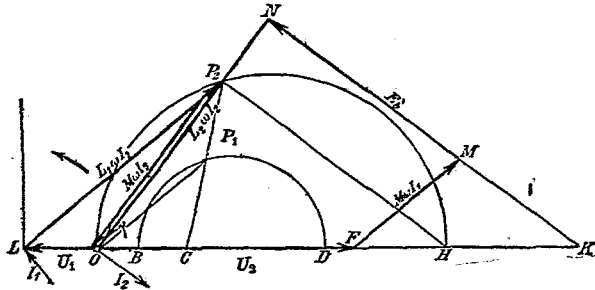


圖521. 複繞電動機之電壓圖。磁場與電樞串聯。

後。此電流在橫繞組內惹起滯後 90° 之電壓 $LP_1 = L_1 \omega I_1$ ，此外電樞電流 I_2 在橫繞組內惹起互感應電壓 $P_2O = M \omega I_2$ 。如圖所示，三電壓 U_1 、 $L_1 \omega I_1$ 及 $M \omega I_2$ 之和等於零。

在電樞電路內，刷電壓 U_2 經由 OF 線表明而電流經由對於 $M \omega I_2$ 移前 90° 之 I_2 線表明。加於刷電壓 $U_2 = OF$ 之上者有互感應電壓 $FM = M \times \omega I_1$ ，由運動發生之電壓 $MN = E_b$ 及由自感應發生之電壓 $NO = L_2 \omega I_2$ 。此四電壓之總和亦等於零。其中 $M \omega I_1$ 與 $L_1 \omega I_1$ 同相，又 $L_2 \omega I_2$ 與 $M \omega I_2$ 同相。若不顧符號，運動電壓 E_b 與惹起該電壓之通量同相，故又與惹起該通量之電樞電流同相。運動電壓之符號指出該電壓與產轉矩之電流 I_2 反向。恰如在直流中， E_b 與 $L_2 \omega I_2$ 之間故成 90° 之角。

今依 E_b 之方向作一線通過 P_2 點。水平軸遂經此線切於 H 點並經 E_b 之延長線切於 K 點。於是

$\eta_1 = M\omega I_1 : L_1\omega I_1 = FK/(U_1 + OH)$ 及 $\eta_2 = M\omega I_2 : L_2\omega I_2 = OH/(U_2 + FK)$ 。

將第二方程式中之FK代入第一方程式中並求OH,則得

$$OH = \frac{\eta_1 \eta_2 U_1 + \eta_2 U_2}{1 - \eta_1 \eta_2}$$

故如已知總電壓及變壓器之變壓比,則可決定OH。據是 $P_2O = M \times \omega I_2$ 之線之始點 P_2 係在以OH為直徑之半圓上。

設命 OP_1 就數值及方向均等於 $M\omega I_1$, 則 $\eta_1 = OP_1/LP_2 = CO/(CO + U_1)$, 申言之, $CO = \eta_1 U_1 / (1 - \eta_1)$, O點故固定, OP_1 對於 CP_2 之比

既等於 η_1 ,故 P_1 係在一圓上。此圓與在OH上之圓有一相似點C,其直徑BD經決定下:

$$CB : CO = CD : CH = \eta_1$$

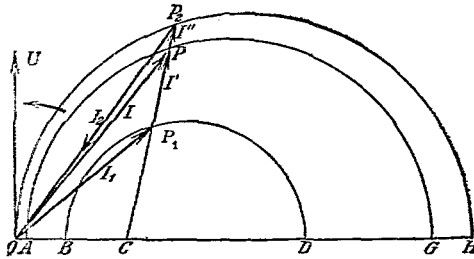


圖522. 復繞電動機之電路圖·磁場與電樞串聯·

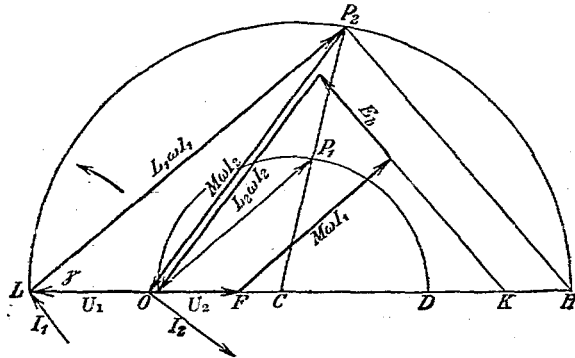


圖523. 復繞電動機之電路圖·磁場與橫樞串聯·

今為製電流圖，以 $M\omega$ 分諸線及距離。由是遂得第 522 圖，其中 P_1 及 P_2 復在圓上而 OP_1 表示縱繞組內之電流 I_1 及 P_2 電樞之電流 I_2 。在是處諸線（例如電流 I_1 之線）對於第 521 圖既均向後旋轉 90° ，是在第 521 圖中經 FL 表明之路端電壓今則鉛直向上。

今確定網絡電流。依據第 519 圖 $\bar{J} + \bar{J}'' = -(\bar{J}_1 + \bar{J}_2)$ ，故等於 P_1P_2 。變壓器內電流間之關係與電壓間之關係相反。今分 P_1P_2 ，俾符次列之條件： $P_1P : PP_2 = U_2 : U_1$ ，此時 P_1P 等於 \bar{J}' 及 $PP_2 = \bar{J}''$ 。是以網絡電流 $\bar{J} = \bar{J}' + \bar{J}''$ 等於 OP ，其中 P 點係在以 AG 為直徑之圓上。此直徑與下列條件相符： $BA : AO = DG : GH = U_2 : U_1$ （圖 523）。

至論磁場繞組依第 520 圖與橫繞組相串聯之電動機，其情形亦復相似（圖 523），祇在是處表運動電壓之線並非鉛直在 $L_2\omega I_2$ 線上但係在 $L_1\omega I_1$ 線上。又線之長亦變，蓋磁場繞組之有感電阻今並非含在 $L_2\omega$ 內但係含在 $L_1\omega$ 內。結果 H 及 K 點之順次倒轉。其餘概仍舊並如上得 H, C 及 D 各點。在第 523 及 524 圖中 P_2 點劃成一個以 LH 為直徑之圓，又 P_1 亦劃成一個以 OD 為直徑之圓。網絡電流線 OP 之末端 P 係在一個以 AG 為直徑並與次列方程式相當之圓上： $OA : AL = DG : GH = U_2 : U_1$ 。 P 既又在鉛直軸上或可在該軸之一側，故 $\cos\varphi = 1$ 或可有一負位移角。

在磁場與電樞串聯時，轉數係由 E_b 對於 $L_2 \times \omega I_2$ 之比表明，而在磁場與橫繞組串聯時由 E_b 對於 $L_1 \omega I_1$ 之比表明。經若干換

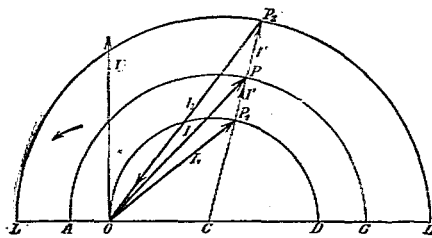


圖 524. 複繞電動機之電流圖。磁場與橫繞組串聯。

算之後，可知在兩電動機中轉數均隨 γ 角之正切增加。轉矩由功率對於轉數之比而決定。

兩電動機具有經繞組及電樞之共同作用而惹起並對於電流換向有利之橫磁場。其強弱及相可依據電流換向之需要由變更變壓器之變壓比而調整。橫磁場連同主磁場惹起一個不完全轉動磁場。

第二十三章 三相交流串繞電動機¹⁾

144. 連接法及電流分佈法。

在普通三相交流電動機中轉數之調整祇由插入電阻於轉動路內為之，其中功經消耗而變為熱。然吾人希望在用三相交流時轉數仍可不耗功而調整。此希望促成帶換向器之三相交流電動機之製造。是種電動機具有一個普通三相交流電動機之固定子及一個直流電機之電樞。在換向器上每極對有刷三枚，互以 120 電角度相位移。電動機可構成而為串繞電動機或分繞電動機。以下然僅就串繞電動機而言且忽略磁飽和，雜散，電阻及刷下之拖路電流。

固定子繞組依據第 525 圖為非連環之一種。始端 1a, 2a, 3a 係與網絡連接，末端 1e, 2e, 3e 與電樞換向器上之刷連接。在關閉電鍵以前，刷有一定位置，俾電流正依同一方向磁化固定子及電樞。

在第 526 圖中固定子繞線 1 內之電流達其顛值 i_m 。此電流分為等

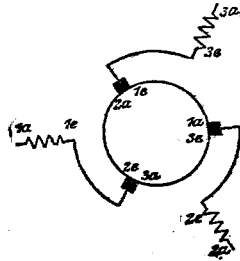


圖 525. 三相交流串繞電動機。

強部分，分別通過一電樞相線及 2, 3 固定子相線。其中一電樞相線不帶電流。

在第 527 圖中假定電流在固定子相線 1 內降至 $0.866 i_m$ ，在固定子相線 2 內昇至 $0.866 i_m$ 而在固定子相線 3 內變為零。在固定子相線 1 內之電流於是在電樞內分為二不等部分。較強部分通過一電樞相線而達固定子相線 2，而其他一半之電流先後通過二電樞相線，終則亦達

¹⁾ 三相交流串繞電動機；Drehstrom-Reihenschlussmotor; three-phase series wound motor; moteur triphasé à moteur série.

固定子相線。

電流之分佈其屬於第一情形者如在第 528 圖中所示，其屬於第二情形者如在第 529 圖中所示。設若電樞之匝數，恰如在第 528 及 529 圖中，比較固定子中多一倍，則固定子之激發在各點均與等大之電樞激發相對待，故兩部分之磁化作用係相等。

如第 528 圖及 529 圖所示，在通電位置時一電樞繞線板正在兩固定子相線之前面。此線與固定子相線依第

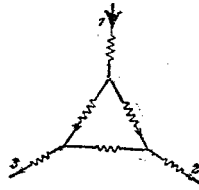


圖526. $i = i_m$.



圖527. $i = 0.566 i_m$.

525 圖相串聯，是以連環網絡電壓須克服在此電樞線內及在相屬兩固定子相線內所發生之電壓。

今以單獨在一固定子相線內發生之電壓 E_1 代替兩固定子相線電壓之幾何的總和。又以起動時在與該固定子相線相對待之半個電樞相線內所發生之電壓 E_2 代替在一電樞相線內所發生之電壓。終則以網絡之星電壓 U 代替網絡電壓。此星電壓即簡稱之網絡電壓，其與在一固定

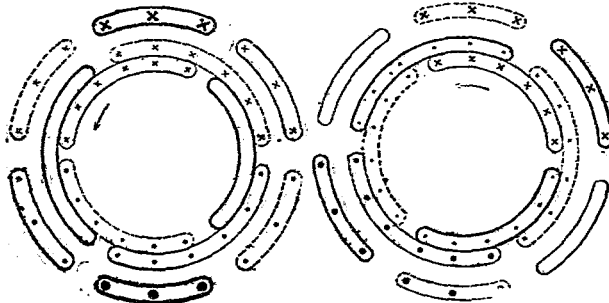


圖528. $i = i_m$.

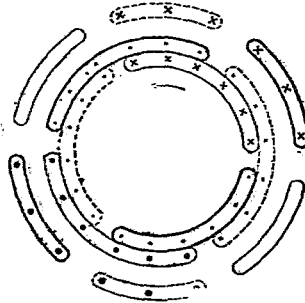


圖529. $i = \frac{1}{2} \times \sqrt{3} i_m$.

在通電位置時三相交流串繞電動機中之電流，整路繞流。

子相線內及相屬半個電樞相線內之兩電壓 E_1 及 E_2 之總和相反但相等，此外依第 528 圖及 529 圖該半個電樞相線有與固定子相線等多之匝數。

145. 電壓圖及電流圖。

在第 530 圖中電流及磁場可逆時針方向而迴轉。今將電樞刷反迴轉之方向從閉電鍵位置移開 β 鈍角。固定子激發 Θ_1 及等大電樞激發 Θ_2 於是起大都相反對之作用並共同發生一總激發 Θ 。其時假定呈正弦形之固定子激發 Θ_1 以 β 角超在電樞激發 Θ_2 之前。

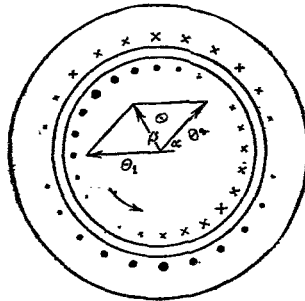


圖530. 三相交流串機電動機。

如由安培游泳定則指出，強度及相與總激發 Θ 相應之磁場與電樞電流共同惹起一種依第 530 圖之轉矩。其方向與時針方向相反，故與轉動磁場之轉向一致，而此正為減小渦流損失及磁滯損失所必要者。

今網絡之星電壓 U 與一固定子相線及一半相屬電極相線之電壓 E_1 及 E_2 之總和係等於零。然當

磁場迴轉之際，電壓 E_2 依第 530 圖比較固定子相線內之電壓先 β 角發生，故 E_2 以 β 角超在 E_1 之前。

電樞刷電壓之頻率，故即在一半電樞相線內之反電壓 E_2 之頻率係等於固定子電流內之頻率。若認兩刷間之線為一全體，則無論電樞迴轉與否及線在此全體內之作用轉換快慢如何均無關係。

在一半電樞相線內之電壓 E_2 係與退移相應，申言之，與磁場及電樞間之轉數之差相應。反之，在一固定子相線內之電壓 E_1 與網絡之頻率相應。此二電壓既由同一磁場所惹起而線數又相同（參見前節時段），故退移 $\sigma = E_2 : E_1$ 。

等於電壓 $E_{11} = BO$ 及 $E_{21} = PB$ 之總和而在後兩電壓則分別由於固定子激發及電樞激發。據第493面此二激發既相等，是以 OBP 三角形為一等腰三角形。

此外 E_{21} 滯在 E_{11} 之後，其滯後角 β 等於依第530圖因刷移位電樞激發對於固定子激發之滯後角。 PBO 故等於 $\pi - \beta$ 及 POB 等於 $\beta/2$ 。

今固定子電流 I 起在由其所惹起之電壓 $E_{11} = BO$ 之前 90° ，申言之，依第531圖以 $\pi/2 - \beta/2$ 角滯在壓入於固定子線內之電壓 $U_1 = OP$ 之後。又網絡電壓 $U = OG$ 以 φ 角超在電流之前。有加倍同步速度時 ($U_1 = OA$)，此超前等於零，因 ΔOG 等於 $\pi/2 - \beta/2$ 之故。有與 AO 弧相應之更大速度時，超前角變為負。

命固定子單獨成星形連接時之固定子電流為 I_0 。其在一固定子相線內惹起與網絡之星電壓 U 相反但相等之電壓。由是： $E_{11} = U = I : I_0$ 。今依第531圖 $E_{11} = E_1 : 2\cos\beta/2$ ，故電流

$$I = \frac{I_0}{2U\cos\beta/2} E_1. \quad (1)$$

作同步轉時， $E_1 = U$ ，故電流 $I_g = I_0 : 2\cos\beta/2$ 。

靜止時， $E_1 = KO = U : 2\cos\beta/2$ ，故據關於 I 之方程式捷路電流 $I_k = I_0 : 4\cos^2\beta/2$ 。

為確定功率依第531圖命 $\angle POK = \beta/2 - \varphi + \pi/2 - \beta/2 = 90^\circ - \varphi$ 。

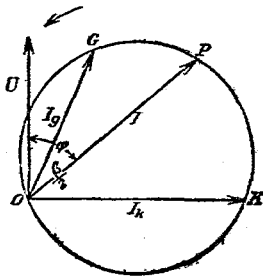


圖532. 三相交流半繞電動機之電流圖。

設作垂線 PH 與 OK 正交，則 $PH = E_1 \cos\varphi$ 而加入之功率由利用第1方程式等於

$$N = 3UI \cos\varphi = \frac{3I_0}{2\cos\beta/2} PH$$

瓦特。

若略去損失，則輸出之功率等於 N 轉矩故由以 $2\pi n$ 分功率而得。作同步轉時， G 點之垂線代替 PH ，即 $U \sin\beta/2$ 及 n 均等於 f/p 。

第531及532圖係僅就某一定刷之位移而設。就此一方面而言，第533及534圖比較有利。其中在固定子內發生之電壓 $E_1 = OP$ 之線固定而固定網絡電壓之線之末端 G 在以 $U = OG$ 為半徑之圓上移動。在有 β 之一定刷之位移角時電樞內發生之電壓 E_2 之線在各工作狀況下皆同向。電流復以 $\pi/2 - \beta/2$ 之角滯在 OP 之後。其線故固定。

OG 在速度次於同步轉時在 OP 之左方而在速度大於同步轉時在 OP 之右方。作同步轉時 P 與 D 及 OG 與 OD 相符合。

靜止時在固定子內發生之電壓等於 HO ，在轉動子內發生之等大電壓等於 FH 及網絡電壓等於 OF 。今延長 PG 至 A 並依同向作線 DB 、 ODB 及 OPA 。於是與 OHF 均為等腰三角形而退移 $\sigma = GP$ ； $PO = CD$ ； $DO = CD$ ； BD 。

β 變動時 OF 之方向亦變。此新圖容易製出，蓋 B 係在以 D 為中心並以 U 為半徑之一圓上。在有相同負載故即有等大轉矩時例如 β 增長而為 β_1 。既然依第3方程式轉矩與 $I^2 \sin\beta$ 為比例，即依第1方程式與 $E_1^2 \tan\beta/2$ 為比例，故在固定子內發生之電壓 P_1O 在第534圖中由 $\overline{P_1O}^2 \times \tan\beta_1/2 = \overline{PO}^2 \tan\beta/2$ 表示。此時若依刷移位後所取之方向作 $DB_1 = DB$ ，則可見退移依 DC_1 與 DC 之比而減小，故轉數因刷位移增加而增。

146. 功率因數及起動之改良。

以上均假定電樞及固定子有等強磁效應，即假定在一固定子相線內及半個電樞相線內有同多匝數。此外依第535圖（與第531圖相符

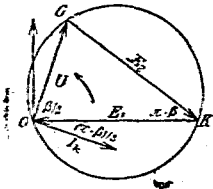


圖535。

$$w_2 = 2w_1.$$

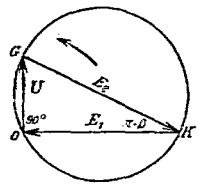


圖536。

三相交流串繞電動機靜止時之電壓圖。

$$w_2 = 7/2 w_1.$$

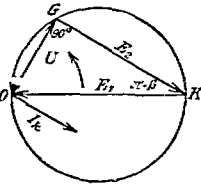


圖537。

$$w_2 \angle 3w_1.$$

合)，又認起動時或靜止時在固定子及電樞內發生之電壓 E_1 及 E_2 係相等。

今欲增加電樞之匝數使其顯然超過固定子之匝數，俾依第 530 圖在靜止時電壓三角形內 E_2 線對面之角可等於 90° 。

在靜止時電動機之作用既恰如一抗流線圈，是以起動電流滯在網絡電壓 U 之後 90° ，其方向故為OK，申言之，其相與壓入於固定子分路內之電壓之相無異。如在前節中因電流及固定子電壓間之位移不變而在靜止時既等於零，此種位移在各工作狀況下亦等於零。此外又因作同步轉時在電樞之電壓等於零，故即固定子之電壓等於網絡電壓，其時在電流及網絡電壓間之相位移亦等於零。故一之功率因數並非如前在有加倍同步轉時但在有單次同步轉時始可達到。

是種電動機然亦充分指示固定子及電樞有等磁作用時所起之現象，即在起動之際由OK表示之電流當時增長而P循圓向上移至工作位置。一般可能的最強電流係由從O點所設之圓直徑（見圖532）表示。凡OP線其末端在該直徑以下之弦上者復在直徑以上現出。以是每一轉矩或電流強度在圓上當有相當之二不同P點。故又有二不同轉數。其中與在直徑下面之P點相當之轉數並不穩定。其時電動機自動達較大之轉數。其轉矩如在帶捷路轉動子之三相交流電動機中同時亦隨轉數而增長。結果，其起動呈脈搏狀態。

為達一種特別寧靜的起動，可將電樞之匝數比較固定子之匝數大量遞減，俾依第537圖在 E_1 線之對面發生一直角。電流於是在靜止時最強，以後電動機迴轉至有工作時之轉數時電流強度逐步增加。

無論如何，是種電動機在作同步轉時之功率因數比較固定子及電樞有等匝數之電動機中為小。在靜止時，滯在網絡電壓之後 90° 之電流今依第537圖在靜止時亦一般以 $\pi - \beta$ （以代 $\pi/2 - \beta/2$ ）之角滯在固定子電壓之後，後者在作同步轉時等於網絡電壓。若電壓三角形在靜止時呈鈍角者，則功率因數更小。職是之故，有利之情形係將電樞匝數祇適度減小俾三角形適呈一直角形。其時依第537圖 $E_2 = F_1 \cos \alpha$

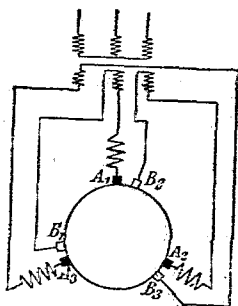


圖538. 在複刷組中之接線圖。

電，其中第二繞組之各相線之始末與電動機之一固定刷及一可動刷連接。固定刷 A_1, A_2 及 A_3 係在固定子繞組之軸上。至在其他一平面內之可動刷 B_1, B_2, B_3 在通電之際係與相當固定刷在同一換向片上，以是在電樞內並無電流通過。當令電動機起動時將可動刷移在工作位置。

若令 β 復如前表刷之位移角，則若不計符號（依第539圖），磁軸之位移並非如前為 $\pi - \beta$ ，但為 $\pi/2 - \beta/2$ ，故僅一半大。刷之大位移祇促成一小之軸位移，故轉數可經精細調整。然在電壓圖中所採用者並非為刷之位移但為軸之位移，電壓三角形在靜止時呈直角形之條件為： $E_2 = E_1 \sin \beta/2$ 。

今據第110節有正弦形磁場時在有 w 匝之靜止電樞相線內發生之電壓

$$E_2 = 4.44 \Phi_T w \frac{\sin \beta/2}{\beta/2}$$

在是處情形中， $w : \beta/2$ 不因可動刷 B_1 之位移而變動，故所發生之電壓與 $\sin \beta/2$ 為比例。設由增加電樞之匝數使 $\beta/2 = \pi/2$ 時，在靜止電樞內發生之電壓與固定子內發生之電壓相等。此時在電樞內發生之電壓不拘刷之位置均等於 $E_1 \sin \beta/2$ 。據是則在靜止時，不拘刷之位置，

$(\pi - \beta)$ 。匝數比例故必等於 $\cos(\pi - \beta)$ ，申言之，在所述之串繞電動機中，此匝數比例祇當刷有某一定位置時適用。夫如是在靜止時之電壓三角形方為一直角形。如若刷之位置依負載及轉數須變動者，則此比例不適用。

在經西門子廠造成之帶刷組（圖538）之電動機中，匝數比例可自動變動，致靜止時之電壓三角形不拘刷之位置均呈直角形。該種電動機係經由一變壓器饋

電壓三角形均呈直角形而電動機之起動得被安全控制。然增加刷數係一缺點，於是種機種現今惟就大功率構成。

若增加電樞之匝數至略許超出與 $F_2 = F_1 \sin \beta / 2$ 相當之值，則此祇略使起動變動，但功率因數則變為較良而此當將平時固定之刷反可動刷之方向移動時尤為顯著。電樞之全數匝可在兩相點之刷間。在關於轉數，電流強度及轉矩之方程式中是以須顧及在電樞及固定子上之已經變動或可變動之匝數的比例。

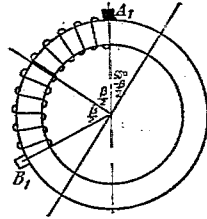


圖539. 在兩相點刷間之電樞繞線。

第二十四章 補償三相交流電動機

147. 在固定子饋電之電動機。

在補償三相交流電動機中為改良功率因數——相位移之補償¹⁾——應用一換向器而其激發不再從原方面進行。

在海蘭氏之電動機中具有由網絡饋電之一普通三相固定子1及一籠形繞組2 (圖540)。在固定子上復有一個由極少數匝組成之三相繞組3。此繞組藉互以 120° 相距之3刷供給電流於換向器繞組2。其依平衡接法或自耦接法亦可成為繞組1之一部分。因刷有一定位置，故由刷導入於換向器繞組內之電流為一種磁化電流。

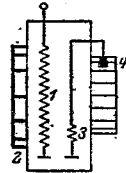


圖540. 在定子饋電之電動機。

假定已知在有某一刷位置時各繞組之感應係數在繞組3內不絕流動之電流惹起一種與繞組4內相反之磁化作用。視各感應係數命

$$s_{11} = jL_1\omega, \quad s_{22} = jL_2\omega, \quad s_{33} = jL_3\omega, \quad a_{44} = jL_4\omega, \quad a_{12} = jM_{12}\omega, \text{等。}$$

又假定刷以 α 角背固定子電流之轉動磁場而移位。繞組4遂依 α 角

¹⁾ 相位移之補償；Kompensation der Phasenverschiebung；compensation of phase displacement；compensation de déphasage.

較繞組3先被感應。繞組4之感應電壓故須以 $\varepsilon^{j\alpha}$ 乘積。電流 \bar{J}_4 之磁化作用則以 α 角滯在 \bar{J}_3 之後，故須以 $\varepsilon^{-j\alpha}$ 乘積。

此後依據第二克希荷夫定則可分別製出關於四電路之方程式並由消去 \bar{J}_2 , \bar{J}_3 及 \bar{J}_4 得一示電流 \bar{J}_1 與 α 之關係之方程式。此種方程式含有 α^2 之部分，故並非為關於圓之方程式。其處置或如第 133 節之方程式(c) 或限制退移於一極小值之內，如是可忽略 α^2 並可令電流曲線與圓相適合。

較簡單之方法假定繞組1與3之間及2與4之間以每二繞組同在一磁心上之故，其雜散等於零。因此關於該電動機之電流圖為一個圓。又因當時之計算並不穩妥，故將計算限於作同步轉時之電流而由此可概觀工作時之狀態。原電阻 R_1 假定等於零。在作同步轉時 \bar{J}_2 既等於零，故關於電路1適用下列方程式

$$\bar{J}_{1R1} + \bar{J}_{3R3} + \bar{J}_{4R4} \varepsilon^{-j\alpha} = \bar{u}_1. \quad (a)$$

繞組1與3間之雜散及電阻 R_1 既認為均等於零，故繞組3內發生之電壓等於 $-\bar{u}_1 w_3 / w_1$ 。又既然作同步轉時繞組4內發生之電壓等於零，故在3及4閉電路內，若以 $R_3 + R_4 = R$ 及 $\bar{J}_4 = -\bar{J}_3$ ，則

$$\bar{J}_3 R = -\bar{u}_1 \frac{w_3}{w_1}. \quad (b)$$

在(a)式中若以作同步轉時之電流 \bar{J}_s 代替 \bar{J}_1 並以 $w_1 : w_3 = \bar{J}_s : \bar{J}_\mu$ ， $a_{33} w_3 / w_1 = a_{33}$ 及 $a_{44} w_3 / w_1 = a_{44}$ ，則得

$$\bar{J}_s = \bar{J}_\mu \left(1 + \frac{a_{33} - a_{44} \varepsilon^{-j\alpha}}{R} \right). \quad (c)$$

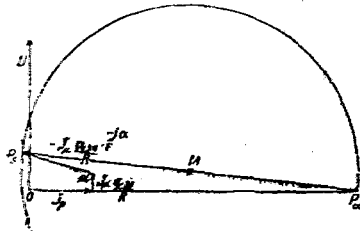


圖 541. 同步電動機之電流圖。

第 541 圖示相當三線之合成，其中 a_{33} 及 a_{44} 視作正虛量。 $-\bar{J}_\mu a_{33} / R$ 滯在 \bar{J}_μ 之後 90° ，若以 $\varepsilon^{-j\alpha}$ 相乘積，即等於合其再後移 α 角，致共有 $90^\circ + \alpha$ 之位移。

當 $\alpha = \beta$ 時，算出之原電流殆與非補償電動機中相等。又由計算示在 $P_s P_\infty$ 上之周角等於 90° 。如是遂得第 541 圖中之圖。退移角恰如第 218 面所示

148. 在轉動子饋電之電動機¹⁾。

在轉動子一方面饋電之電動機或薩克生廠電動機²⁾ (圖 542) 中，原電流係被導入在轉動子匯電環內。在固定子上副繞組 2 之電路內附加一補助電壓。此種電壓係由一個帶換向器之特別補助轉動繞組 3 所發生。其相經刷之位移而調整，致在副電流內含有一磁化成分。原電流因此與電壓同相或竟超前。

如在各三相交流電機中，凡在轉動子一方面饋電者，其轉動子反轉動磁場之方向而週轉。轉動磁場在空閒或對於固定子依差額週轉。又在換向刷之電壓 K 亦依此差額。反之，此電壓之強弱與磁場對於轉動子線移動之速度，故即與網絡頻率有關。據此則為產生此小電壓 K ，換向繞組祇須有非常少的匝數而此對於換向

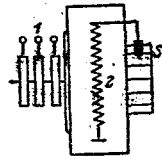


圖 542. 在轉動子饋電之電動機。

作用有利。電動機之所以依構造在轉動子一方面饋電者其理由即在此。據薩克生廠之利歇德³⁾ 之計劃，電壓 K 可依第 543 圖在開繞組⁴⁾ 內發生。其中電樞條在一方面與一端環在他方與換向片相連接。各相線故僅會有經刷與固定子繞組連接之條對並經此插在電路內。

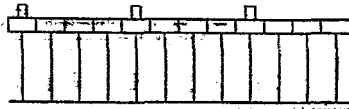


圖 543. 依利歇德氏之計劃。

¹⁾ 轉動子饋電電動機; *Lauferspeisest Motor*; rotor fed motor. ²⁾ 薩克生廠電動機; *Sachsenwerk-motor*; *Sachsenwerk-motor*; *motor de Sachsenwerk*. ³⁾ 利歇德; *Lieber*. ⁴⁾ 開繞組; *offene Wicklung*; open winding; *enroulement ouvert*.

所謂刷之原位置即指一連續電流之磁作用繞組2及3內正向反對之位置。論感應係數時亦就該原位置而言。

假定刷反轉動子之轉向故即依轉動磁場之方向為 α 角之位移，則輔助繞組3較繞組2被感應較遲而感應壓耗在此繞組內須以 $\varepsilon^{-j\alpha}$ 乘積。反之，電流 \bar{J}_3 須以 $\varepsilon^{j\alpha}$ 乘積。

依第二克希荷夫定則而設之方程式於是在各情形中表示一圓之方程式。為簡單起見，命 $R_1=0$ 並假定在繞組1及3內之雜散等於零。若命 K 表壓入於繞組2及3內之電壓，則由應用第431面之符號得：

$$\begin{aligned}\bar{J}_1 a_{11} + \bar{J}_2 a_{12} + \bar{J}_3 a_{13} \varepsilon^{j\alpha} &= \bar{v}_1, \\ \bar{J}_2 R_2 + \sigma (\bar{J}_1 a_{12} + \bar{J}_2 a_{22} + \bar{J}_3 a_{23} \varepsilon^{j\alpha}) &= K, \\ \bar{J}_3 R_3 &= K - \varepsilon^{-j\alpha} \bar{v}_1 \frac{w_3}{w_1}.\end{aligned}$$

其中 $\bar{J}_3 = -\bar{J}_2$ 。今消去 K 及 \bar{J}_2 並應用下列之關係——在繞組1及3間之雜散既假定等於零

$$\frac{w_3}{w_1} = \frac{a_{33}}{a_{11}} = \frac{a_{33}}{a_{13}} \quad \text{及} \quad a_{11} \times a_{23} = a_{12} \times a_{13}.$$

又命 $R = R_2 + R_3$ ，則得

$$\bar{J}_1 = \bar{v}_1 \frac{R + \varepsilon_{33} - a_{23} \varepsilon^{-j\alpha} + \sigma (a_{22} - a_{23} \varepsilon^{j\alpha})}{a_{11} R + \sigma (a_{12} a_{22} - a_{12}^2)}.$$

$\alpha=0$ 並以 $\bar{v}_1: a_{11} = \bar{J}_\mu$ 時得同步電流

$$\bar{J}_s = \bar{J}_\mu \left(1 + \frac{a_{33} - a_{23} \varepsilon^{-j\alpha}}{R} \right).$$

若令 ε_{33} 與 a_{23} 交換，此方程式與在固定子饋電之電動機中同。又若因匝數 w_3 不多而與 a_{23} 相較可以忽略 a_{23} ，則當 $\sigma = \infty$ 時，有與非補償電動機中相等之電流。

既然 $a_{11} a_{22} - a_{12}^2$ 之相角等於 π ， $a_{11} R$ 之相角等於 $\pi/2$ ，故在 $P_s P_\infty$ 之周角等於 $\pi/2$ 。以是所成之電流圖恰如第541圖。

應注意者為在補償電動機中之大轉覆矩而此經由圓之最大垂線決定。又另一值得注意之事實即在該機種中可選擇比較在普通三相交流

電動機中遠大之空氣間隙。

第二十五章 三相交流電動機¹⁾

149. 轉數之調整。

為免除調整三相交流電動機之轉數時耗功可用一種所謂後電動機²⁾。依最簡單裝置，在三相交流電動機之軸上裝一帶換向器之三相交流電動機以充後電動機。後電動機或依串繞電動機構成並經刷之位移調整或依分繞電動機構成並經電壓調整。此機由主電動機之轉動子饋電。

在其他經夏比烏斯³⁾說明之裝置中，充作後電動機而亦帶換向器之三相交流電動機係與主電動機分開裝置。此機轉動一具與網絡相連接之異步發電機。由主電動機之轉動子輸出之電功故並非有機械的但僅有電的應用。

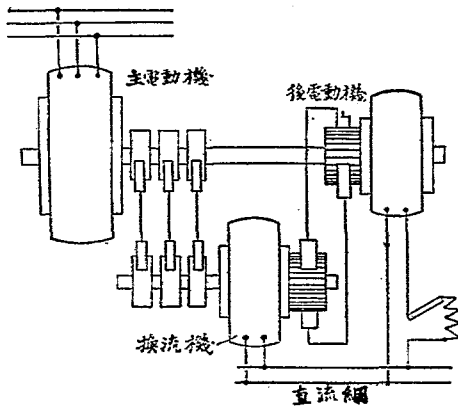


圖544. 帶直流後電動機之調整組。

其他另一種方法將主電動機之轉動子電流依第 544 圖導入於一轉

1) 三相交流調整組; Drestrom-Regelsätze; three phase current regulating set; composition de réglage à courant triphasé. 2) 後電動機; Hintermotor; hind or rear motor; moteur arrière. 3) 夏比烏斯; S:herbins.

動換流機內。充作後電動機之直流電動機係與主電動機聯軸並由換流機之直流側饋電。轉數由變更直流電動機之激發而經調整。

一換流機之在三相交流一側之作用既恰如一步電動機，故可經換流機中之適當激發使功率因數達 1 之值。在後面各不同工作狀況下假定均使有此情形。如第 152 節所示，在轉動換流機內三相交流電壓與直流電壓間成一不變的比例。又因輸入之功率與輸出之功率相等，在換流機內之三相交流與直流之溫度間亦成一不變的比例。

今欲更進一步假定主電動機轉動子內之通量在各工作狀況下皆相等。此假定在忽略雜散後正與實際情形相符而關於海蘭圖之左部縱使頗及雜散亦極準確。在依第 544 圖排列之三機中其損失均可不計，而主電動機匯電環上之電壓遂與退移 σ 為比例。

就別方面言，直流電動機之電壓與該機之通量 Φ 為比例。因二電動機聯軸之故轉數與 $1-\sigma$ 為比例。

二電壓既同在一換流機上，故其比例不變。若以 k 為一常值，則

$$\Phi(1-\sigma) = k\sigma, \quad \text{則 } \Phi = k\sigma/(1-\sigma). \quad (1)$$

又據第 126 節輸入於主電動機固定子內之功率 N_1 之 σN_1 部分在轉動子路內變為電功率。當時並無與轉動子匯電環相連接之電阻內之電熱但僅有輸入於換流機內之功。此功再經輸入於直流電動機內而該電動機之功率遂為

$$N_g = \sigma N_1. \quad (2)$$

據此則由三相交流電動機直接輸至軸上之機械功率

$$N_d = N_1 - N_g = (1-\sigma)N_1. \quad (3)$$

如第 1 方程式所示，直流電動機之激發不變時，退移及轉數不拘負載大小亦不變。此種聯動之性質故恰如一分繞電動機。又第 2 及第 3 方程式示經直流電動機及三相交流電動機輸至軸上之功率之比例，當直流電動機之激發不變時亦與負載無關。

為明示直流電動機機械變動時之影響，在第 544 圖中映米平方向表直流電動機之通量 Φ 及換流機方向表按第 1 方程式算出並與轉數相

應之相屬之 $1-\sigma$ 值。如是所成之曲線示有各通量時之轉數。此曲線切垂軸於1之高處，查當 $\psi=0$ 時， σ 亦等於0。今於切點作一水平線，則AB當表有任何OC激發時之退移 σ 。依據第2及第3方程式，AB及BC表經直流電動機及三相交流電動機納取之總功率之兩部分。

又該曲線示後電動機之激發遞增時，轉數則遞減。因當激發增時，在後電動機刷上之電壓及經過換流機之迂路在主電動機刷上之電壓均增加。就一般而言，在三相交流電動機轉動子內之電壓損失等於轉動子內發生之電壓及匯電環電壓之差。故匯電環電壓增加時主電動機之主轉動子電流及經是惹起之轉矩皆減。同時轉數遞減，終至因退移增長之故，電流之強度復敷惹起所需之轉矩。

因在換流機直流一側及交流一側之電流強度之比例不變，直流電動機之電流與主電動機之轉動子電流為比例。此電流故依第367面第466圖及第10方程式近於與原有電流為比例，是以即與輸入於主電動機內之功率或總機械功率為比例。此種功率自然不僅與當時之負載，申言之，不僅與經電動機共同克服之負載矩且又與可在大範圍內調整之轉數有關。

若於後電動機上添設一補助串繞圈則可使聯動裝置具有轉數隨負載而下降之複繞電動機之特性，因此裝置飛輪頗為有利(緩衝作用)。

若不用後電動機，轉數不耗功之調整又可依海蘭氏用一換頻機為之(參考第151節)。

150. 自激移相器¹⁾。

為改良三相交流電動機之功率因數常用一自激移相器²⁾。此器具有

¹⁾移相器, Phasenschieber; phase shifter; decalcur de phases. ²⁾換頻機; Frequenzwandler; frequency changer; changeur de fréquence.

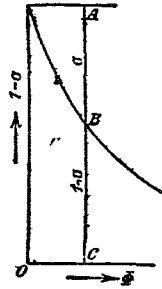


圖545. 轉數BC與後電動機激發之關係。

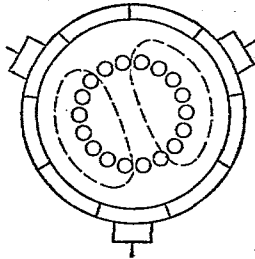


圖546. 不帶固定子之移相器。

一個帶一直流繞組之鼓形電樞。電樞帶換向器而係由外方轉動。三相交流電動機之轉動電流經由固定刷導入於換向器內。在功率較小之移相器中依第 546 圖可省去固定子。但在功率較大之一種中為免除火花須裝一不繞線之固定子以充磁場線之回路。

在移相器內經轉動子電流發生之磁場以 n_s 之轉數在空間緩緩迴轉。

此轉數與三相交流電動機退移為比例而與移相器迴轉與否無關。在二刷間發生之電壓故恆有差頻。其有效值却與迴轉速度有關。其當移相器靜止時最大而當移相器依其轉動磁場之方向迴轉時漸漸減小。若作同步轉時其數等於磁場之轉數，則產電壓等於零。在靜止與同步轉之間之產電壓實為一自感電壓而係滯在轉動子電流之後 90° 。

今命移相器依轉動磁場之方向以一定轉數過同步轉動。於是在兩刷間之繞組內所發生之電壓之符號變換，但此電壓仍超前在電流之前 90° ，且可抵消由三相交流電動機之雜散惹起之自感應或仍可供給一相反過剩電壓。移相器遂有如一容電器之作用。其連接在主電動機之匯電環上使該電動機之原電路內之相位移變為零或竟使其為負。今命

V_1 表固定網絡電壓，

L_1, L_2, L_p 固定子，轉動子及移相器之總感應係數，

M 固定子與轉動子間之互感應係數，

R 包括移相器電阻在內之轉動子電路之總電阻，

ω 與移相器固定轉數相當之角速度，

σ 主電動機之退移

次命

$$a = jL_1\omega, \quad b = jL_2\omega, \quad c = jM\omega, \quad d = jL_p\omega,$$

並忽略原電阻，則依第二克希荷夫定則得：

$$\bar{u}_1 = \bar{J}_1 a + \bar{J}_2 c,$$

$$0 = \bar{J}_1 c \sigma + \bar{J}_2 (R_2 + b \sigma + d(\sigma - \alpha)).$$

由此經消去 \bar{J}_2 之後得：

$$\bar{J}_1 = \bar{u}_1 \frac{R_2 - \alpha d + \sigma(b+d)}{a(R_2 - \alpha d) + \sigma(a(b+d) - c^2)}.$$

此為關於一圓之方程式。當 $\sigma = 0$ 時， $\bar{J}_0 = \bar{u}_1 : a$ 。此即等於不帶移相器之電動機之無載電流。當 $\sigma = \infty$ 時

$$\bar{J}_\infty = \frac{\bar{u}_1}{a} \frac{a(b+d)}{a(b+d) - c^2}.$$

設 d 與 b 相較小者， \bar{J}_∞ 幾乎與在不帶移相器之電動機中相等。

今 a 之相角等於 $\pi/2$ 而 $R_2 - \alpha d$ 或 $R_2 - jL_p \omega$ 之相角等於一弧 $\text{tg} L_p \omega / R_2$ 。依據第 216 面故 $\gamma = \pi/2 - \text{弧} \text{tg} L_p \omega / R_2$ 。同樣 δ 為 $a(b+d) - c^2$ 之相角，故等於 π 。據是

$$\eta = \delta - \gamma = \pi/2 + \text{弧} \text{tg} L_p \omega / R_2.$$

在 P_0 之正切於是以 η 角起在 $P_0 P_\infty$ 之前（圖 547）。在有某一定負載時，原相位移角為零或竟為負。在後者情形中，電動機在網絡內供給正無功電流。然當作無載轉時及負載小

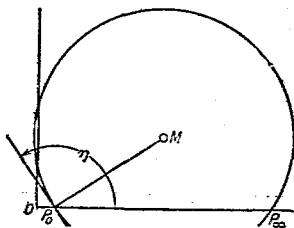


圖 547. 帶自激發移相器之電動機之電流圖

時恆有正相位移。欲免除是種相位移必須用一分激發移相器（換頻機，參考第 151 節）。

退移直線依通常方法表出。

若主電機由過同步轉動變為發電機，則在移相器內磁場之轉向對於週轉部分而言倒轉。於是必須將換向器之二導線交換或使移相器之轉向倒轉。因此 α 在上面方程式中變為零。又其時所成之電流圖為對於第 547 圖就水平軸而言之像而其下部分為關於發電機之部分。

151. 換頻機。

由應用經勒勃郎克¹⁾說明之換頻機可使轉數之調整不帶損失或在有各負載時達到相補償之目的。換頻機含有一直流電樞。此電樞係在一個不帶繞組而僅成爲通量磁路之固定子內旋轉而有最簡單之美置時係裝在主電動機之軸上。電樞又帶換向器及匯電環。換向器經刷與主電動機之匯電環連接而匯電環則由一可調整變壓器與網絡連接。

電機組依某一定退移而轉動。換頻機經過換向器而納取與退移相應之頻率。雖然電樞迴轉，由三刷輸入於換向器內之電流正有如一不動繞組之電流之作用，恰如被輸入於一普通三相交流電動機之固定子

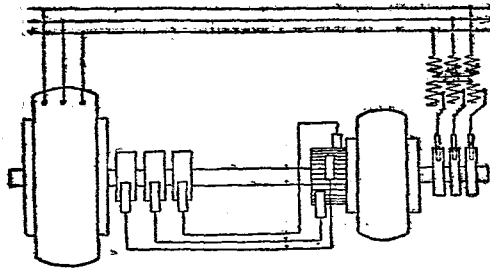


圖548. 換頻機之基本的排列。

之接線螺旋內。在換頻機內故發生一種在空間帶差別而轉之磁場。此外因依法選定主電動機匯電環與換

向器刷之連接，在換頻機內之磁場反電機組之轉向而迴轉。電樞各線對於磁場之速度故等於與機組轉數相當之頻率及主電動機之差頻之和。因此換頻機之匯電環上之電壓及電流正有網絡之頻率而電流可由換頻機之匯電環供給於網絡內。

換向器側及匯電環側之頻率雖然不同，在兩側之電壓却相等，因二者均由磁場對於電樞線之速度決定之故。換頻機之匯電環電壓是以不直接適合網絡，但必須先用變壓器變至網絡電壓。

換頻機之作用既恰如一變壓器，故有等大電壓時兩側之電流亦等大。

換向器電壓之相可故意由移動換向器之刷而調整。如依刷之位置

¹⁾ 經勒勃郎克；Le Blanc.

，在換向器之電壓(或曰星電壓)及電流互相同相，則換頻機之作用恰如一段焊電阻。換頻機之匯電環電壓由變動調整變壓器而使其愈大時，由換頻機表示之歐姆電阻亦愈大而主電動機之轉數愈小。是種轉數調整不帶損失，因當時退移功率並非變為熱但經由調整變壓器復被輸入於網絡及主電動機內。

反之，若換向器刷之位置移動之後在換向器之電壓對於流入換向器內之電流滯後 90° ，則換頻機之作用恰如一個與主電動機之轉動子相串聯並使固定子電流之相位移減小或變為負之容電器。主電動機且一部分或全部分由轉動子一方面磁化，蓋由匯電環一方面給出超前電流，其意義正與輸入滯後電流同。因此故亦稱換頻機為“激發機或分激移相器”。

正無功功率自然必從網絡經過調整變壓器而流入於換頻機內。然須注意者，無功功率係輸入在帶匯電環一側之小電壓之換頻機內，且因主電動機有小差頻之故，此功率極小。

就一般而言，當刷及調整變壓器有一定位置時命在換向器一側之電壓等於 K ，又命

- \bar{v}_1 表網絡電壓，
- L_1 及 L_2 固定子及轉動子之總感應係數，
- M 互感應係數
- R_2 轉動子電阻，
- ω 原角速度。
- σ 退移。

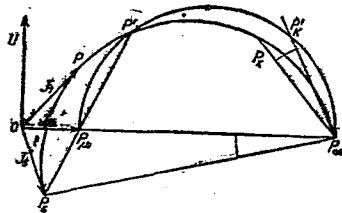


圖64b. 帶換頻機之電動機之圖樣圖。

若命 $jL_1\omega = a$, $jL_2\omega = b$ 及 $jM\omega = d$ ，則當略去固定子電阻時依據第二克希荷夫定則

$$\bar{v}_1 = \bar{j}_1 a + \bar{j}_2 d \tag{a}$$

$$K = \bar{j}_2 d + \bar{j}_1 (b_1 + b_2) \tag{b}$$

若稍去 \bar{j}_2 則得圖之方程式

$$\bar{J}_1 = \frac{\bar{u}_1 R_2 - \bar{K}d + \sigma \bar{u}_1 b}{R_2 a + \sigma(ab - a^2)} \quad (c)$$

當 $\sigma = 0$ 時，電流為同步時之電流 \bar{J}_s 。若命 $\bar{u}_1 : a$ 等於不帶換頻機時之無載電流 \bar{J}_μ ，則

$$\bar{J}_s = \frac{\bar{u}_1 R_2 - \bar{K}d}{R_2 a} = \bar{J}_\mu - \frac{\bar{K}}{R_2} \times \frac{M}{L_1}$$

在第549圖中 OP_μ 表不帶移相器時之無載電流 \bar{J}_μ 。 $P_s P_\mu$ 等於 $\bar{K}M : R_2 L_1$ ，故與 \bar{K} 同相。於是 $OP_s = \bar{J}_s$ 。今將刷移位，同時令 \bar{K} 之大小變動，則 P_s 劃成一個以 $P_\mu P_s$ 為半徑之圓。

$\sigma = \infty$ 時，依方程式(c)

$$\bar{J}_\infty = \frac{\bar{u}_1}{a} \times \frac{ab}{ab - a^2} = \bar{J}_\mu \frac{ab}{ab - a^2}$$

此電流與不帶移相器之電動機中同。今據第216面 γ 為 $R_2 a$ 之角，故等於 $\pi/2$ ，及 δ 為 $ab - a^2$ 之角，故等於 π 。據此則 $\eta = \delta - \gamma = \pi/2$ ，申言之，該圓有 $P_s P_\infty$ 之直徑

又 $\sigma = 1$ 時，依方程式(c)

$$\bar{J}_z = \frac{\bar{u}_1(R_2 + b) - \bar{K}d}{a(R_2 + b) - a^2}$$

今若作 $\bar{J}_s - \bar{J}_\infty : \bar{J}_z - \bar{J}_\infty$ 之比，則經若干換算之後，知此比與 \bar{K} 無關。設命 $P'z$ 表不帶移相器之電動機之捷路點，則

$$\bar{J}_z P_z P_\infty P_s = \bar{J}_z P'z P_\infty P_\mu$$

退移度遂依第217面表出。

今據方程式(a)，當 $\bar{u}_1 = \bar{J}_\mu a$ 時

$$\bar{J}_2 = (\bar{J}_\mu - \bar{J}_1) \frac{a}{d}$$

\bar{J}_2 故有 $P P_\mu$ 之相。今以直徑 $P_\mu P_\infty$ 作關於不帶換頻機之主電動機之圓。在 P 與二圓之切點 P' 相符合之特殊情形中， \bar{J}_2 之相係與 $P_s P_\mu$ 相反，故帶有壓入於匯電環內之電壓 \bar{K} 。換頻機此時有如一歐姆電阻

之作用，調整轉數。為計算在此工作狀況下之退移，依據第 216 面命

$$\sigma = \frac{\bar{C}}{D} \times \frac{P_0 P'}{P' P_\infty}$$

依據方程式 (c)， \bar{C} 及 D 與 K 無關及 $P' P_\infty$ 無論電動機帶換頻機與

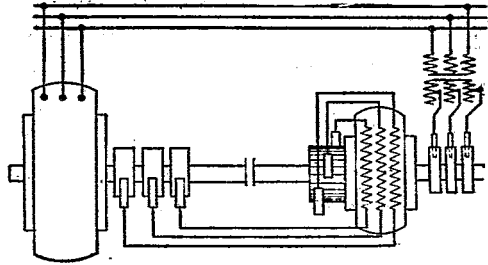


圖550. 依哥西斯¹⁾之三相交流調整組。

否均不變。 P_0 。當不帶換頻機時以 P_μ 而帶換頻機時以 P_s 代之。據此則在目前情形中退移經換頻機依 $P_s P' : P_\mu P'$ 之比例遞增。且因 P_s 在橫軸下面，轉覆矩經換頻機減小。

相被補償時，電動機之作用較良，是處因 $P_\mu P_s$ 繞 P_μ 點旋轉致 P_s 在橫坐標軸之上，且 $P_s P_\mu$ 運定較 I_μ 為大。於是帶 $P_s P_\infty$ 直徑之圓示一特別大之轉覆矩。若當時 P 在橫軸之下面，則電動機變為達某一定負載以前供給滯後電流之發電機。

設欲令電機組純如一移相器工作，則由變動換向器刷之位置使 P_s 向左位在橫軸上。電機於是納取純粹超前無功電流，申言之，其作用如一異步無功電流發電機。其與同步移相器相較之優點在其毋須用直流激發且當網絡內發生捷路時迅速失去電流。

經哥西斯所創之關於換頻機之一重要改良為使主電機之轉動子電流在被導入於換向器內以前先依第 550 圖通過換頻機之一固定子繞組內以抵消換向器電流之磁效應。結果從變壓器祇流入一磁化電流於匯電環內。此電流惹起一種與匯電環電壓相當之磁場。匯電環及變壓

¹⁾哥西斯；Kozisek.

器僅含有弱磁化電流。同時換頻機不再為讓有效功率或無功功率通過之器具但變為一分激三相交流電動機，其電樞繞組經一固定子繞組補償。在調整轉數之作用中，例如主電動機之退移功率不變為熱恰如在普通繞圈電樞中，又亦不同入網絡內恰如在普通換頻機中，但變為機械功率。然為調整轉數或相，刷之任意的移位此時因網有換向器電流及輔助機固定子電流之反作用不復可能。當時之調整由應用一可移動聯軸節於兩機之間兩致。

他如作用方式及電流圖皆與前同。除在輔助機匯電環一側卸去負載外又有較良換向作用之優點。又調整轉數時發生之轉覆矩之遞減今則因有輔助機之轉矩加入於主電動機之轉矩中全被制止。

第二十六章 轉動換流機

152. 電壓及電流比例。

轉動換流機為一直流電機，其電樞繞組除與換向器連接外又與匯

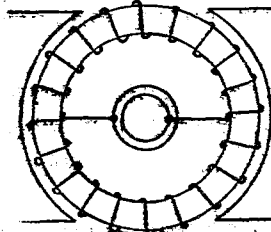


圖551. 單相交流轉動換流機。

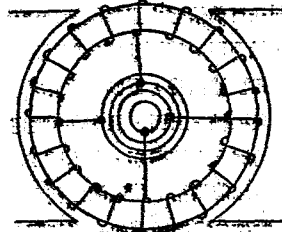


圖552. 二相交流及四相交流轉動換流機。

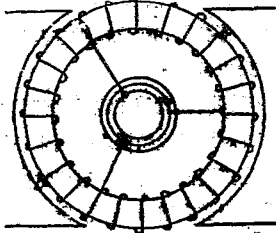


圖553. 三相交流轉動換流機。

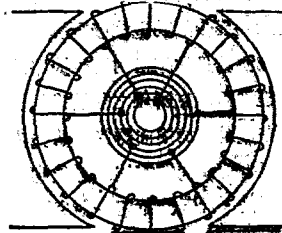


圖554. 六相交流轉動換流機。

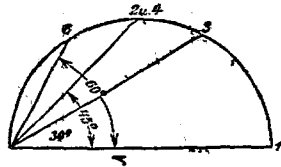
電環相連接。依據匝電環之數，換流機有單相，三相及四相及六相之別（圖551至553）。

為得六相交流，如在第538圖中，祇須不將三相交流變壓器之第二繞組連環。於是共有六線通至換流機。其實六相交流換流機不過為一三相交流換流機。此機種可視為含有三分部，其各側有如一全極節距之寬度，係互以 120° 相位移並一部分互相重疊。

轉動換流機在交流側為一普通同步電機。其在此側之工作普通如單相或多相電動機而在直流側如一發電機。然其在直流側亦可作電動機轉動（起動電動機¹⁾）而在交流側如一發電機工作。如插入有感負載則據第322面轉動換流機之磁場減衰，故當轉動換流機單獨饋電於交流網絡時須用特殊方法阻止轉數之增長。

轉動換流機又可同時供給直流及交流但當時之總功率必減減。

此機種或可由一比較其少一極對數之特種異步發動機轉動或由直流側使其達規定之轉數而以後如一普通同步機使其與網絡相連接。至關於由交流側之起動參考第316面



轉動換流機之重要特性為其直流及交流之電壓經同一磁場並在同一轉數下發生。至在是處所言之磁場並非指單獨由磁鐵發生之磁場但 圖555。換流機之有1,3,4及6相時之電壓。指在磁鐵激發及電樞激發之影響下實際存於電樞內之磁場，其中且包括電樞之雜散磁場。

如無特殊之預防，交流之路端電壓與直流之路端電壓成一完全一定之比例。此比例與電樞之分路數 ν 有關。在單相交流中此數等於2，二相及四相交流中等於4，在三相交流中等於3及在六相交流中等於6。

依據第313面，一分部之電壓等於在各樞內發生之電壓之幾何

¹⁾起動電機；Anwurfmotor; starting motor; moteur de lancement.

的總和，故在二極代表圖中經由一圓之弦表示之，最大弦（即直徑）係與單相電壓 E_1 相當。當連接匯電環之接點係在中立帶時， E_1 之值最大並等於直流電壓 E_g 。由此得 $E_g = 1.414E_1$ 。依據第555圖乃成數字表如下：

$$E_g : E_1 : F_3 : F_4 : E_6 = 1.414 : 1 : 0.866 : 0.707 : 0.5. \quad (1)$$

因直流電壓及交流電壓有同一等級，故將高壓交流變為直流須用一靜止變壓器，以是其設備費較大，但與由一交流電動機及一直流發電機組成之機組之設備費相較仍較廉。

今計算在交流側及直流側之電流強度之比例。如命 I_w 表一電樞分路之有效交流， φ 電壓及電流間之相位移，則諸分路之交流功率之和： $N_w = vEI_w \cos\varphi$ 。又如命 I_g 表二直流分路之一分路內之直流及 E_g 直流電壓，則直流功率： $N_g = 2 E_g I_g$ 。設依功之不減定律並忽略損失令此二功率相等，則

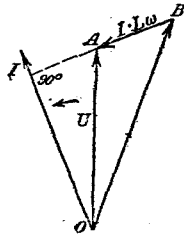


圖556. 由相流線圖增長電壓。

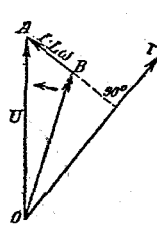


圖537. 由相流線到減少電壓。

得交流對於直流之比例如下：

$$\frac{I_w}{I_g} = \frac{2}{v \cos\varphi} \times \frac{E_g}{E}$$

當以 γ 表交流分路一半之寬度時， $E_g : E_1 = \sqrt{2} : 1$ ，

申言之， $E_g : E = \sqrt{2} : \sin \gamma$ 。由是以 $v\gamma = \pi$ ：

$$\frac{I_w}{I_g} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi \cos\varphi} \times \frac{\gamma}{\sin \gamma}. \quad (2)$$

電流為三相交流時此比例為 $1.09 : \cos\varphi$ ，為六相交流時為 $0.94 : \cos\varphi$ 。該方程式對於多極電機亦適用。

如在各同步電動機中功率因數 $\cos\varphi$ 可由變動激發強度任意調整之。在有一定交流電壓時，即有一定有效磁場時，因激發變動之故，交流之強度及相亦變動且因依一定方法，由直流激發及交流電樞反作用表示之總激發仍不變。至直流電壓則因激發強度之變動而強受影

率。

為調整轉動換流機之直流電壓可將換流機之交流電壓使通過帶可變匝數比之變壓器。

然電壓又可由插入一抗流線圈於交流側之前而調整。若須用一靜止變壓器以減低交流電壓，則為若起有感電阻可用一種帶大雜散之變壓器。設命 U 表交流網絡之電壓及 $L\omega$ 抗流線圈之有感電阻。若將換流機過度激發則機納取超在匯電環電壓之前之電流 (圖556)。在抗流線圈內之有感壓耗 $IL\omega = BA$ 今超在

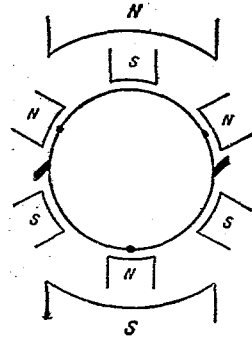


圖558. 主極及輔助極，與不同激發之分裂極同位。

電流之前 90° 並與匯電環電壓 OB 合成網絡電壓 OA 。據另一種說法，匯電環電壓 OB 可視為網絡電壓 OA 及在抗流線圈內發生之電壓 AB 之和。故過高激發之作用為使匯電環電壓對於網絡電壓而言增加。同樣由過低激發作用依第 557 圖亦可使匯電環對於網絡電壓而言減小。

在有一定交流電壓時變動直流電壓之另一方法係將直流刷移開中立帶，俾電流之一分部位在反對極之前。且為不使經刷捷接之線圈在一強磁場內，有將極分裂之必要——分裂極¹⁾。

分裂極又常供直接變動直流電壓對於交流電壓之比例之用。在此情形中，分裂極不等強激發。此種額外極之數故意選定，故其影響祇及直流電壓而與交流電壓無關。在雙極三相換流機中 (見圖558) 例如一三相交流電樞分路之邊覆在額外極兩整極節距之上，故經該種極所發生之電壓在正弦形磁場中隨時均等於零。反之，直流之一電樞分部受主極及二等名輔助極及一異名輔助極之影響，故電壓可由諸輔助極之激發強度之均勻變動而被調整。在是處毋須用兩分離極樞，而可令

¹⁾ 分裂極; Spaltpole; splitpole; pole à fente.

二者之磁效應上下重疊。爲此故將主極分裂爲三部分並令在中間之部分激發較強或較弱。

若將各極分裂爲兩部分並令二者不等強激發亦可達到相同之目的。此時直流電壓對於交流電壓之比例之調整基於由兩獨立極發生之電壓，其關於直流者係代數的合成而其關於交流者係幾何的合成。

往日爲調整電壓亦用一同步補助機（昇壓機），此機與換流機聯軸，其電樞插在換流機電樞之接點及與壓電機之間且不等強激發。

153. 在轉動換流機內之電熱。

今復設想一換流機，其工作如交流電動機及直流發電機。經發生之直流電壓及交流電壓在電樞線內殆有同一方向。電動機電流與所發生之電壓相反而發電機電流則與之同向。電樞線內之交流及直流大致相反且一部分互相抵消。就電樞內之電熱而論，此情形實爲一重要優點。此外因交流電壓及電流隨度間位移不大自然亦有利。熱縱使位移等於零，常因一交流電樞繞線之兩邊同時在異極之前，兩電流或在電樞繞線之一部分內異向，而在其他部分內則同向。惟換向片數繞線線數無限多時兩電流始可抵消。

爲便於了解及計算起見，假定換向片數極多而每一線匝係與二換向片相連接並注意在單獨一匝內之電流依時間之變動。次選定在交流電樞繞線之中點之線匝並假定相位移等於零，後者之情形恆可由適當激發促成之。

一俟該中間匝之線（見第 559 圖）通過中立帶之後，直流及交流均反方向。第 560 圖中之直角形曲線即示當時在該匝內之直流之依時

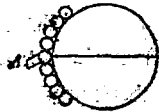


圖559. 電樞分路之點在刷下通過。

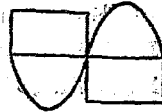


圖560. 在電樞分路中點之直流及交流。



圖561. 在電樞分路中點之實有電流。

間之乘積，其中正弦曲線表交流之變動。若將及二者之符號將二者相加之，則得第 561 圖中之電流曲線。總電流之諸值 i 須令其自乘並再與匝之電阻 R 相乘積，如是遂得由電熱表出之損失之臨時值。

一線匝其邊以 ϵ 弧與電樞相線之中點相距者（圖 563）係處在不利的狀況下。一俟其在 A 點之線通過中立帶之後，即發生交流之交變。相位移既假定等於零，故交流之交變須遲 ϵ 弧，當時電樞相線之中點

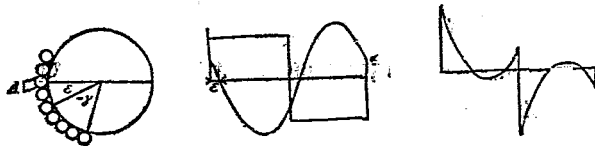


圖562. 與電樞分路之中點相距 ϵ 之線在圖下通過。 圖563. 在與中點相距 ϵ 處之電流。 圖564. 在與中點相距 ϵ 處之實際電流。

通過中立帶。交流之曲線在第 563 圖中故似向右移位而將時值合成時得一如在第 564 圖中之曲線。此曲線示在該匝內電流之依時間的變動。今據一般而論，電流以 ϕ 角滯在產電壓之後，故電流曲線似依 ϕ 弧更向右移位（圖 565）。

在設想之匝內之電流之臨時值在此以 a 等於 ωt 之最普通情形中為 $i = I_g - \sqrt{2} I_w \times \sin(\alpha - \epsilon - \phi)$ 。令此值自乘，再令與該匝之電阻 R 相乘積並取 0 及 π 間之平均值。其中 ϵ 及 ϕ 均視作不變值。依是法遂得該匝內之依時間的平均損失

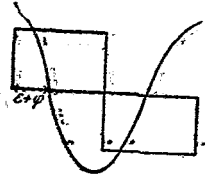


圖565. 有相位移時在 ϵ 處之電流。

$$\frac{R}{\pi} \int_0^{\pi} i^2 da = R \left\{ I_w^2 + I_g^2 - \frac{4\sqrt{2}}{\pi} I_g I_w \cos(\epsilon + \phi) \right\}$$

今假定一弧單位上之線數等於 c ，在 dc 弧上之線數故當等於 $cd\epsilon$ 。設以此數與以上之一匝之平均損失相乘積，則得帶 dc 寬度之一電樞分部之臨時間均損失。為得總損失，須在 $\epsilon = -\gamma$ 及 $\epsilon = +\gamma$ 之間積算，

其中 γ 表電樞分路之一半寬度。依是法遂得換流機之一電樞分路之損失：

$$N_v = R_c 2\gamma \left(I_g^2 + I_w^2 - \frac{4\sqrt{2}}{\pi} I_g \times I_w \cos\varphi \frac{\sin\gamma}{\gamma} \right).$$

如以 I_w 表在 446 面由第 2 方程式所示之值，則得換流機一分路之損失：

$$N_v = R_c 2\gamma I_g^2 \left\{ \left(\frac{\gamma}{1.11 \sin\gamma \cos\varphi} \right)^2 - 0.62 \right\}. \quad (3)$$

今 $R_c 2\gamma I_g^2$ 表電機在有等強電流 I_g 並作直流發電機而被轉動時之一分路之損失。據此則

$$a = \left(\frac{\gamma}{1.11 \sin\gamma \cos\varphi} \right)^2 - 0.62$$

當表換流機損失對於有等強直流之發電機之損失之比。

其他一問題為轉動換流機之電樞不致過分發熱時可有之最大負載。為解決此問題乃確定發等大熱量時換流機內之直流 I_g 與依直流發電機工作之電機中之電流 I 之比 b 。發電機之損失與 I^2 為比例而換流機之損失則與 $a I_g^2$ 為比例。如二損失應相等，則 $a I_g^2 = I^2$ 。據是則換流機許有之功率與發電機許有之功率之比： $b = I_g / I \sqrt{a}$ 。

下表示關於 a 及 b 之值之一覽。

	單相	三相	二相 及 四相	六相	
電樞分路數 ν	2	3	4	6	
半寬度 γ	$\pi/2$	$\pi/3$	$\pi/4$	$\pi/6$	
$a = \frac{\text{換流機內之損失}}{\text{發電機內之損失}}$	$\cos\varphi = 1$	1.38	0.56	0.38	0.27
	0.8	2.5	1.23	0.94	0.77
	0.6	4.93	2.68	2.15	1.85
$b = \frac{\text{換流機之功率}}{\text{發電機之功率}}$	1	0.85	1.33	1.62	1.93
	0.8	0.63	0.9	1.03	1.14
	0.6	0.45	0.61	0.68	0.74

如關於 a 之一橫行所示，當 $\cos\varphi = 1$ 及直流等強時，轉動換流機內

之損失為直流發電機損失之1.38倍，在六相換流機內之損失僅為0.27倍。

再依b組當 $\cos\varphi=1$ 及電熱相等時單相換流機之功率為直流發電機功率之0.85倍，而六相換流機之功率為1.93倍。

同時ab二行示不良功率之不利的影響，因此須令換流機充分激發俾 $\cos\varphi=1$ 。

154. 串聯換流機。

由勃拉克斯塔脫¹⁾及拉哥爾²⁾說明之串聯換流機³⁾包括一普通三相交流電動機及與之聯軸之一轉動換流機。轉動換流機之交流側藉一組連接線從三相交流電動機之轉動子一方面饋電。極對之數假定在電動機中等於 p_m 而在換流機中等於 p_u 。頻率假定在電動機之固定子中等於 f 而在轉動子及換流機中等於 of 。因而成次列二方程式： $of=p_u n$ 及 $f-of=p_m n$ 。由此二方程式得： $n=f/(p_m+p_u)$ 。轉數故與一具帶二機極數之和之同步電動機之轉數相等。

隨較少極數而起之小轉數或隨經工作狀況規定之轉數而有之少極數為其一重要優點。

如二機具有等多之極對數 p ，則 $n=f/2p$ 。 f/p 既為三相交流電動機中磁場之轉數，故退移等於50%。輸入於三相交流電動機之轉動子內之功率之一半供旋轉轉動子之用並經軸傳至直流電機，致後者被轉動而如一發電機。其他一半恰如在帶起動電阻之三相交流電動機中由轉動子輸至轉動換流機內，如是後者一方面納取交流而一方面供給直流。恰如在轉動換流機中電樞內損失微小之優點在是處亦存在。無論如何，直流電機今則祇變為一半轉動換流機。然因此仍有其優點，即轉動換流機電樞相線之數不難增加而關於損失及負載量較諸第450面中所示者更為良好。又導電流既毋須有刷及匯電環，故如用12相電樞

¹⁾勃拉克斯塔脫; Bragstadt. ²⁾拉哥爾; La Gour. ³⁾串聯換流機; Kaskadenumformer; cascade converter; convertisseur en cascade.

，其售價不致特別增加。在轉動換流機中所須之變流器在是處則省去。

三相交流電動機之轉動子相線在一側與換流機連接而在他側當起動之際仍開。起動時三相線經過匯電環及電阻相結於一星點，俟起動之後諸線在一星點被捷接。

第二十七章 水銀整流器¹⁾

155. 構造及接法。

一熾熱陰極在真空內發出負荷電子。若陰極係由水銀所成，則同時生成水銀蒸汽而此蒸汽經電子分解而為正荷游子及負荷電子。正游子向陰極而負電子向陽極移動，致有電流自陽極向陰極通過。如是遂成水銀光弧之活門作用。

電流強度達數百安培之整流器²⁾其瓶係由玻璃製成。在其千數小時之壽命期間，器內真空——約 0.001 毫米水銀柱——維持不變。在有較大電流強度時，瓶係鐵製並用水銀，橡皮或鉛密封。真空隨時用轉動唧筒及汞汽噴射唧筒更新。鐵質之瓶與地絕緣並用水冷卻。

陽極係由石墨或鋁所成。在鐵整流器中瓶外突出之陽極部分圍有一冷卻套以防陽極受熱過甚。

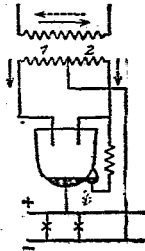


圖566. 單相交流水銀整流器。

陰極成直流電路之正接線螺旋。直流之回線係與一變壓器之副零點連接。此變壓器饋電於陽極而其變壓比可由變動匝數調整之。

玻璃整流器含有一水銀輔助極。此極經過一電阻與一陽極連接而當成閉直流電路時由傾側可使其與主陰極相接觸(圖 566)。向後傾側時，在輔助陰極及主陰極之間發生輔助光弧，以致水銀蒸發，電流通過，但其時假定輔助光弧存在之際，水銀確成為負極，否則須重行傾側。在鐵整

¹⁾ 水銀整流器; Quecksilbergleichrichter; mercury rectifier (converter) redressur (convertisseur) à mercure. ²⁾ 整流器; Gleichrichter; rectifier (convertisseur).

流器中爲惹起着火之光弧應用一條與一陽極連接之實質着火棒。此棒移近陰極後復被移開。在鐵與水銀間之光弧既緩緩斷裂，故恆有水銀成負極之一瞬間，因此毋須一再着火。

至所謂回燃¹⁾，發生之原因及防止法有特別注意之必要。設因其原因，一陽極一時具有負電位，則在此極與其他陽極之間殆成爲一捷路。是種回燃係經不良真空，光弧及污穢物之作用陽極過度之發熱及汞汽在一陽極上之凝結而致。陽極之用金屬板之電屏已證實有益。陽極抗流線圈²⁾除以後擬說明之作用外又有減少捷路電流之優點。

大整流器除含有主陽極外又含有經一特別單相變壓器饋電之二激發陽極³⁾。其與主陰極成爲一特殊整流器，後者在其直流電路內恆有一感應係數及歐姆電阻之負載。縱使主光弧因直流負載除去而消滅時，其光弧亦存留。此後若再導入直流負載，可毋須再燃



圖567. 關於單相交流，三相交流及六相交流之電壓曲線及電流曲線

對於單相交流適用之整流器具有與變壓器副繞組之接線螺旋相連接之二陽極。直流之回線係與副繞組之中點相連接。當原電流依實矢線所示之方向自左向右流動時(見第566圖)，左陽極通電。在此後與虛矢線相當之半個週期間，右陽極活動。如是發生一種如第567圖中之作脈搏式變動之直流。在實際情形中必須用一陰極抗流圈(參考第459面)以防電流降至零值並由是阻止光弧之息滅。

三相整流器含有三陽極，此三陽極係與變壓器之成星形或鋸齒形連接之副繞組相連接。副繞組成星形連接時，原繞組必須成三角連接而不該成星形連接，因否則原電流勢必繼續通過其他繞組之大無載電

1)回燃; Rückzündung; back ignition. 2)陽極抗流線圈; Anodendrossel; anode choke-coil. 3)激發陽極; Erregeranode; excitation anode; anode d'excitation.

阻內。在陽極中其對於星點之電壓恰比較其他繞線之電壓為高者始終通電。由是遂得如第 568 圖中之直流曲線。

六相整流器之直流曲線如在第 569 圖中所示。變壓器之副側或如在第 573 圖中成六相星形，其時在原側復如前不備用星形連接，或成鋸齒形連接（圖 574 及 575）。A. E. G 公司應用一種叉形連接（圖 576）而勃郎波威利公司將六相星形分為二個三相星形（圖 580）。在帶 12 陽極之整流器中，每二陽極互相並聯，故可視為帶 6 陽極之整流器。

156. 電壓及電流之比例。

假定在陽極電路內並無電感。於是光弧在一陽極飛躍至其他陽極而陽極電流不致重疊。又假定直流電路為無感的一種並又忽略整流器瓶內之電壓損失。電壓認為呈正弦形而直流電路內有歐姆電阻之負載。茲命：

- n 表異相陽極之數，
- U_2 有效副星電壓，
- i_m 陽極電流之巔值，
- I_a 陽極電流之有效值，
- $M(i_g)$ 直流之平均值，
- I_g 直流之有效值，
- u_m 陽極星電壓之巔值。
- U_g 直流電壓之有效值，
- N_g 直流功率，
- α 弧，自最強電流之瞬間算起。

直流之曲線既由有 $3\pi/n$ 寬度之若干等分部構成而各部既由含具 πn 寬度之對稱的兩半，則

$$M(i_g) = \frac{1}{\pi/n} \int_0^{\pi/n} i_m \cos \alpha d\alpha = \frac{n}{\pi} i_m \sin \frac{\pi}{n} \quad (a)$$

$$I_g^2 = \frac{1}{\pi/n} \int_0^{\pi/n} i_m^2 \cos^2 \alpha d\alpha = i_m^2 \left(\frac{1}{2} + \frac{n}{4\pi} \sin \frac{2\pi}{n} \right) \quad (b)$$

再者

$$U_g^2 = u_m^2 \left(\frac{1}{2} + \frac{n}{4\pi} \sin \frac{2\pi}{n} \right), \text{ 即 } U_g = U_2 \sqrt{2} \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{n}{4\pi} \sin \frac{2\pi}{n}} \quad (c)$$

各陽極僅在 n 分之一週期內通電，故 $I_a^2 = I_g^2 : n$ 或

$$I_a = I_g : \sqrt{n} \quad (d)$$

又直流功率

$$N_g = \frac{1}{\pi/n} \int_0^{\pi/n} \sqrt{2} U_2 i_m \cos^2 \alpha d\alpha = U_2 i_m \sqrt{2} \left(\frac{1}{2} + \frac{n}{4\pi} \sin \frac{2\pi}{n} \right)$$

或由利用方程式(b)及(c)

$$N_g = U_g I_g \quad (e)$$

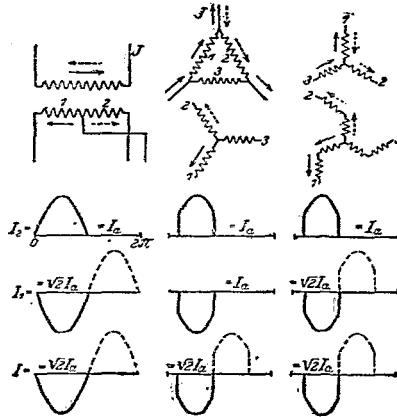


圖570. 單相交流。

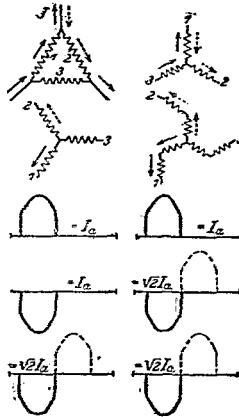


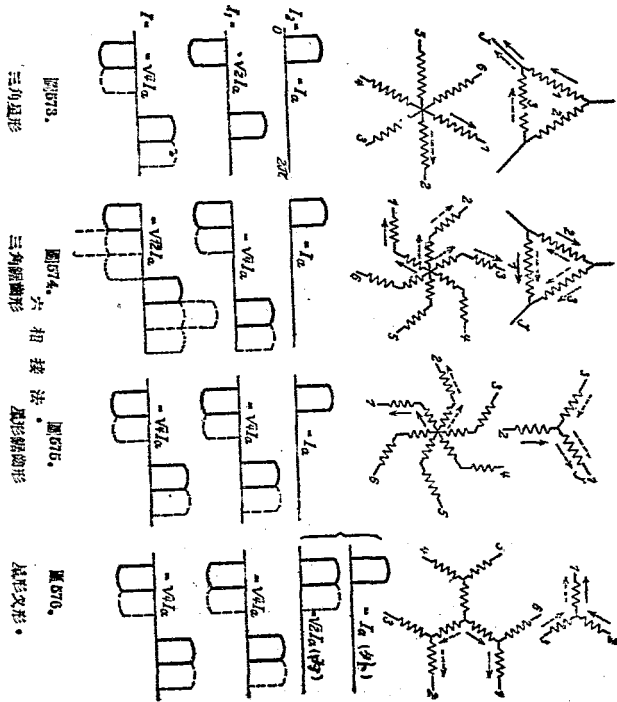
圖571. 三相交流。
三角形⁽¹⁾、星形接線形。

⁽¹⁾ 三角星形接法；Dreiecksternschaltung；delta-star-connection；montage en triangle-étoile。

由是得：

	$M(i_g):i_m$	$I_g:i_m$	$I_g:I_a$	$U_g:U_2$	$U_g I_g:U_2 I_a$
n=2	0.637	0.707	1.414	1	1.414
n=3	0.830	0.841	1.73	1.19	2.06
n=6	0.955	0.956	2.45	1.35	3.3

副繞組內陽極電流之一時的負載惹起相屬原繞組內一相反電流之負載。在第 570 至 576 圖中假定副相線 1 內帶有電流 I_2 而係由實矢線



表明。同軸原繞組帶有反向有效電流 I_1 ，俟 $1/n$ 週期後相線 3 帶由虛失線表示之電流。在第 574 圖中在後各時期之電流亦經虛線表明。

電流 I_2 及 I_1 之臨時值以及兩原網絡電流 I 之臨時值在接線圖之下成 ωt 弧之函數表明。由選定某一定匝數比例，原電流及副電流之幅值相等。網絡電流係指導線 J 內之電流，其自網絡以至原繞組之方向為正。由電流曲線之面積表明電流在圖中註明之有效值與陽極電流之有效值之比例。

157. 變壓器之大小及畸變因數¹⁾。

今略去電感及損失計算變壓器之視功率。設命 N_{s1} 表原視功率及 N_{s2} 副視功率，則變壓器可有 $0.5(N_{s1} + N_{s2})$ 之視功率。再假定原電流及副電流相反但相等。於是由注意第 571 至 576 圖中原電流之有效值及上表之末行得次列表。

三 相	
三角星形	星形鋸齒形
$N_{s2} = 3U_2 I_a$	$6 \frac{U_2}{\sqrt{3}} I_a$
$N_{s1} = 3U_2 I_a$	$3 \frac{U_2}{\sqrt{3}} \sqrt{2} I_a$
$0.5(N_{s1} + N_{s2}) = 3U_2 I_a$	$2.9 U_2 I_a$
$\frac{0.5(N_{s1} + N_{s2})}{U_g I_g} = 1.46 \quad 1.43$	

最後之橫行示為得變壓器之視功率應該與直流功率相乘積之因數。

今計算用以規定原網絡者之視功率 $N_s = \sqrt{3} UI$ ，其中 U 表原網絡電壓及 I 網絡電流。用第 571 至 576 圖之網絡電流得：

三 相		六 相			
三角星形	星形鋸齒形	三角星形	三角鋸齒形	星形鋸齒形	星形文形
$N_s = \sqrt{3} U_2 \sqrt{2} I_a$	$\sqrt{3} U_2 \sqrt{2} I_a$	$\sqrt{3} U_2 \sqrt{4} I_a$	$\sqrt{3} \frac{U_1}{\sqrt{3}} \sqrt{12} I_a$	$\sqrt{3} U_2 \sqrt{4} I_a$	$\sqrt{3} U_2 \sqrt{4} I_a$

應用第 456 面表中末行所示之值得：

三相交流

$$\frac{U_g I_g}{N_s} = 0.84.$$

六相交流

$$\frac{U_g I_g}{N_s} = 0.95.$$

故直流功率與交流視功率之比縱使在無電感時亦小於一，此比例謂之畸變因數¹⁾，其影響與有正弦形電壓時之功率因數相同。至直流功率之所以小於視功率者係因電壓曲線與電流曲線不同之故。電流波中惟與正弦形電壓同頻率之基本波成有效功率。在有電感時，直流功率與視功率之比例自然更小。

158. 內電壓之損失.

在整流器瓶內之電壓損失 ϵ 與器之大小及電流強度幾乎無關而約

為2%伏。此即表示電流通過溝容水銀蒸汽之情形與通過金屬導線之情形根本不同。

據第 577 圖，當有一般與額面負載相符合之一定負載時，電壓損失最小。

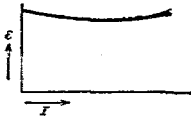


圖577. 整流器容器內之電壓損失。

為測定整流器工作時之內電壓損失，

在一陽極導線內插入一具帶可動圈（在永久磁鐵之磁場內）之安培計（動圈計）及一功率計之電流圈。功率計之電壓圈係與該陽極及陰極相連接。當陽極不帶電時其電壓係在連環

六相			
三角星形	三角鋸齒形	星形鋸齒形	星形叉形
$6U_2 I_a$	$12 \frac{U_2}{\sqrt{3}} I_a$	$12 \frac{U_2}{\sqrt{3}} I_a$	$\left\{ \begin{array}{l} 6 \frac{U_2}{\sqrt{3}} I_a \\ 3 \frac{U_2}{\sqrt{3}} \sqrt{3} I_a \end{array} \right.$
$3U_2 \sqrt{3} I_a$	$3 \frac{U_2}{\sqrt{3}} \sqrt{4} I_a$	$3 \frac{U_2}{\sqrt{3}} \sqrt{4} I_a$	
$5.12U_2 I_a$	$5.19U_2 I_a$	$5.19U_2 I_a$	$4.7U_2 I_a$
1.56	1.57	1.57	1.43

¹⁾ 畸變因數; Vergerrungsfaktor; distortion factor; facteur de distortion.

陽極電壓之下且必須用一前置電阻以防有過高電壓侵入。然此圖祇於電流週帶電流之各週期部分有效。當在 t_2-t_1 時間范弧燃時，功率計之偏轉

$$N^2 = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \varepsilon i_a dt.$$

安培計測定陽極電流之平均值，即

$$M(i_a) = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} i_a dt.$$

據是則功率計及安培計二者之偏轉之比例示電壓損失 ε 而此依第460面當陽極電流重疊時亦然。

電壓損失既幾乎不變，故當直流電壓愈大時整流器之效率亦愈大。如由直流之平均值示之，其效率

$$\eta = \frac{U_g}{U_g + \varepsilon}.$$

$M\varepsilon(i_g)$ 之乘積示在整流器內變為熱之功率。

然須注意者，除整流器之電壓損失外尚有在變壓器內及有時又抗流圈內之電壓損失。因此總電壓損失並不一定但隨負載而增長。再者當討論總效率時變壓器內之損失亦須顧及。

在第567至569圖之曲線中常電壓損失及一直流網絡之常電壓或在直流電路內之常反電壓可想像將電壓圖內之水平軸平行向上移位而解釋之。

159. 電感之影響。

為使直流電壓之曲線趨於平坦常於陰極電路內插入一種帶感應係數 L_k 之陰極抗流線圈¹⁾。當總電流遞減之際，由重疊在直流上之交流惹起一電壓。此電壓依同向加於陽極電壓上以致陽極帶電流之時間延長。如是乃得一直流電壓之曲線，其變動恰如第576圖所示。

¹⁾ 陰極抗流線圈；Kathodendrossel; cathode choke coil.

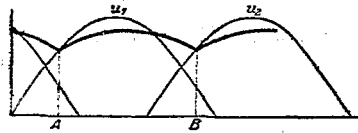


圖578. 陽極抗流線圈之影響。

2. 此後陰極抗流線圈之電壓活動，反對增長中之直流並減少電壓至最後電流達其顛值時等於零為止，當時直流電壓及交流電壓相切。同時表直流 i_g 之直流電壓之相實曲線必恆與交流電壓相差 $-L di_g/dt$ 。

在單相整流器及三相整流器中，為充蓄電池組必須插入一陰極抗流線圈，俾電流不致偶然降至數安培而光弧息滅。

又可與直流電路平行插入與一實有電阻相串聯之一電感及一電容，其強度適當決定，致發生關於電流曲線內之諧波之共振。例如在三相整流器中關於第三諧波之共振。諧波於是逐漸從直流中濾去。

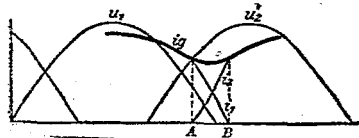


圖579. 陽極抗流線圈之影響。

在時間B，陽極1之電壓（包括依同方向作用之產電壓 $-L di_g/dt$ ）等於陽極2之電壓而在陽極1一方面之電流遂飛躍至陽極

在陽極電路內電感 L_a 之存在亦有重要影響。此外又常有變壓器之雜散電感。為增加電壓損失然仍插入陽極抗流線圈，故與

第577圖中相反，電壓損失當初隨增長中之負載而增加，負載依整流器大小之分配惟當將若干整流器並聯時可能而當多數整流器經同一變壓器饋電時，此種分配尤屬必要。

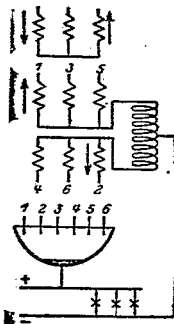
陽極電感之影響在使電流不再飛躍但緩緩從一陽極渡至他極，申言之，例如在第579圖中自A至B之時間內，二陽極同時帶電流重疊¹。電流 i_1 逐漸降至零值而電流 i_2 逐漸自零增長。在重疊期內之各瞬間 $u_1 - L_a di_1/dt = u_2 - L_a di_2/dt$ 及 $i_1 + i_2 = i_g$ 。直流之相實曲線即表示此種情形，雖然此曲線僅表示直流之約略的變動。至真確計算頗為困難。關於電壓之微分方程式雖可提出解答，但其中所用之常數必須由實

¹ 重疊; Überlappung; overlapping; recouvrement.

驗而得，尤其關於變壓器之實有電阻幾乎惟由實驗可能。至其圖解法會由費利開及海得爾說明¹⁾。

勃郎波威利公司之排漚圈²⁾復有一種影響，因其能至少使一六相整流器之二陽極同時帶電流。六相星遂分解而為二個三相星（圖580）。在六相星中由號碼表示相線1及4，3及6及5及2係相反。排漚圈之末端係與二星點連接而其中點則與直流之同線相連接。負載極小時祇單獨一陽極，（例如陽極1）活動。因此當電流遞減時，如在圖580。勃郎波威利公司之排漚圈。

陰極抗流圈中，分路1之電壓增加，但同時在尚未活動之第2相線中，電壓降下。若電流較強則兩分路內電壓可相等，申言之。直流電壓經第581圖中之粗實曲線表明而此電壓等分二先後陽極電壓之差。此差等於抗流線圈之電壓並有三倍大之頻率。自A至B，陽極6及1活動，自B至C，陽極1及2活動，餘類推。



電流強度之增長且對於抗流線圈之電壓並無影響，蓋同時工作之陽極之電流係依相反方向通過抗流線圈。

二陽極同時帶電流之優點可分為二：一則變壓器之繞組可帶電流壓加倍時間之久，故經利用較良而變壓器可較小。二則因二陽極分路之並聯故因相副繞組在變壓器內之電壓損失較小。在此情形中壓降與第581圖中之曲線相當。但一俟負載增長致排漚圈之電壓等於前後二陽極之電壓之差，直流電壓幾乎與負載無關。在電力鐵道設備中

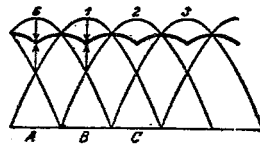


圖581。應用排漚圈時之直流電壓。

¹⁾費利開·海得爾；Pflieger-Haertel, Wissenschaftl. Veröffentlich. aus dem Siemens-Konzern 1923, Bd III S. 61. ²⁾排漚圈；Saugarrossel; drainage coil; bobine de drainage.

是以往往可毋須再用調整器。至直流電壓之因而僅有小的波動實為另一種優點。

(正文終)

漢文索引

(數字表頁數)

二 畫

力之輸送 19.

三 畫

三角形接法 455.

三角接法 327.

三相交流 225.

三相交流串聯電動機 422.

三相交流調整組 435.

三相交流電動機之起動 378.

三相交流電動機之過載量 371.

三相交流電動機之總化電流 355.

三相交流電動機之轉數 240, 351, 373, 378.

三相交流電機 249.

三相交流繞組 305.

三相交流轉動換流機 307.

三相交流變壓機 277.

三線接法 19.

工作方式 53.

四 畫

不穩零載曲線 136.

中立帶 88.

中性線 21.

互感係數 58.

丹尼爾遜 347.

丹尼爾遜換流機 347.

丹佛爾電池 31.

分子磁 46.

分佈自感應及電容 211.

分接法 12.

分接極 447.

分繞電動機 142.

分繞電機 122.

介質常數 75.

介質電阻 78.

介質傳導 75.

介質傳導係數 74.

介體 68.

化合當量 25.

化學能 27.

反工作 140.

反射因數 204.

反接法 15.

反電流下降制動 376.

反磁場 310.

夫拉查爾 178.

方向力 327, 329.

比例尺算法 169.

水銀整流器 452.

五 畫

代用接法 221.

仟瓦 18.

仟瓦時 18.

仟米克 17.

仟伏安 208.

回燃 453.

功率 18.

功率之測定 54.

功率因數 133.

加熱 8.

台利 118.

司谷稅接法 278.

可調準變壓器 250.

阻比 238.

平方平均值 159.

平行四邊形 135.

平均電流速度 179.

平衡矩 330.

平衡質量 331.

平衡變壓器 276, 296.

弗爾根發器特接法 225。
 木生電池 31。
 車管器 358。
 永久值 251。
 永久短路電流 343。
 正切定律 43。
 正交磁化 117。
 正弦曲線 172。
 皮膚作用 67, 244。
 皮膚作用電動機 380。
 瓦特 18。
 示相燈 316。

六 畫

交流 171。
 交流之平均功率 182。
 交流電阻 207。
 交流電機 304。
 交流電機之連接 315。
 交流電機之轉數 305。
 交流電機之運動 328。
 伏秒 35。
 伏特 3。
 伏特計 5。
 光繞組 90。
 光速度 75。
 冰點之下降 22。
 充電 131。
 充電曲線 30。
 共振 206, 210, 274, 331。
 合金片 67。
 同步性 316。
 同步電動機 304。
 同步電機 304。
 同步圖 317。
 同步發電機 304。
 同步轉動電流 226。
 同步機之短路電流 343。
 向徑 184。

向量圖 336。
 多重閉繞組 89。
 多磁環換向器 87。
 多路繞組 89。
 安時 2。
 安培 2, 83。
 安培計 5。
 安培游標定則 40, 50。
 有效值 180。
 有效電阻 201。
 有效電流 207。
 有效電導 209。
 有感壓降 194。
 有感電壓 90。
 有損繞組 90。
 自由交流導線 240。
 自由流電 251。
 自由電荷 251。
 自動電壓調整 345。
 自感應 54。
 自激變壓器 276。
 自激發 123, 127。
 列車照明 134。
 地利斯調整器 345。

七 畫

佛來銘電阻像 202。
 克 84。
 克卡 17。
 克希荷夫定律 9。
 克萊謀氏機 136。
 李恩德 385。
 亨利 35。
 利歐德 433。
 利歐那氏接法 153。
 串聯法 384。
 串聯接法 12。
 串聯換流機 451。
 串繞電動機 141。

串繞電機 122.
 均流 164.
 均壓連接 95,101.
 均壓機 133.
 位移電流 70.
 抗流線圈 56.
 折射因數 265.
 角速度 145,175.
 吹弧(遮弧)圈 273.
 吹弧變壓器 274.

八 畫

亞佛加德羅定則 26.
 亞遜山大器電動機 418.
 固定子 304.
 固有振動時間 331.
 固有頻率或角速度 253,261.
 定流電機 134.
 刷 87.
 法拉(法) 18.
 法拉第 24.
 法拉第之見解 89.
 法拉第游流定則 89.
 法定單位 4.
 昇壓器 154.
 湧點之上昇 22.
 油冷變壓器(油浸變壓器) 275.
 波形繞組 96.
 波埃著三角形 342.
 沛地生 219.
 沛地生窗 273.
 拉力 51.
 拉多爾電動機 412.
 拉哥爾 451.
 拉梅耶 104.
 直流電動機 141.
 直流電機之並聯 130.
 直流電機之閉斷 130.
 直流繞組 309.

放大因數 329.
 放電 131.
 放電曲線 30.
 放電波 268.
 板狀電容器(平行板電容器) 70.
 金屬 22.
 附加電導係數 166.
 附載 165.
 阿倫尼烏斯 21.
 阿勃勒華得斯基 134,381.
 阻抗 201,205.
 阻尼因數 251.
 阻尼繞組 316,332,328.
 非金屬 22.
 非對稱三相交流變壓器 232.
 非對稱負載 238.

九 畫

並聯運用 127.
 首端繞放 391.
 英爾格納換流機 154.
 保護開關 256,259,261,270.
 前端繞放 392.
 施密拉克接法 161.
 星形接法 237.
 植西諾德 87.
 相 174.
 相之位移 182.
 相之前移 183.
 相之調整 210.
 相位移之補償 431.
 相序 234.
 相角 202.
 計算方向 10.
 靜器 3.
 炭刷 87.
 厘米達因 84.
 負載 130.
 勃倫台斯 340.

勃拉克斯塔脫 451.
 鋳鉛酸電池 32.
 韋伯 45.
 韋納西門子 121.
 飛輪 153.
 變換組 90.
 後電動機 435.

十 畫

海瑪夫電動機 381.
 倒轉 352.
 倒轉法 223.
 原子量 24.
 原子價 25.
 起承機電動機 156.
 起動電阻 148.
 起動電動機 445.
 起動器 151.
 起動機 152.
 起動變壓器 378.
 退移(頻差) 218, 352, 360, 371.
 迴線繞組 93.
 容阻 204.
 容流 196.
 容電器 70.
 容積比 26.
 容壓 196.
 帶換向器之單相交流電動機 400.
 庫侖 2.
 振動阻抗 214.
 振動時間 330.
 軌跡 216.
 軌跡曲線 216.
 效率 29.
 時間常數 251.
 紙絕緣 49.
 根納利方程式 241.
 枝率 6.
 特性阻抗 214.

旋轉曲線 139.
 能向指示器 233.
 馬力 18.
 馬克士威 35 85.
 高速調整器 354.
 高斯 35.
 哥西撒克 443.
 哥爾德利 166.
 泰森拉 166.
 夏比烏斯 435.

十一畫

基本波 175.
 移相器 379.
 移相器 216, 437.
 推斥電動機 407.
 推斥電動機之變轉向之作用 408.
 接地圈 273.
 接電手續 253.
 接頭方程式 166.
 接頭負載 164.
 探照燈 136.
 控制電動機 153.
 控制電機 153.
 排液圈 461.
 桶形繞組 276.
 液體起動器 379.
 混連接法 13.
 勒克羅社電池 32.
 勒勃心克 440.
 球狀容電器 71.
 畢蘭尼機 129.
 符號算法 183.
 第一類之導體 21.
 第二類之導體 21.
 補償台利機 118.
 補償器 16.
 補償繞組 117.
 補償機 118.

通風電機 137.
 通量之獨立 298.
 陰向游子 22.
 陰極 21.
 陰極持流線圈 459.
 陰極繞組 90.
 亞明斯 113.
 應激壓 3.
 應激壓之方向 39.

十二畫

獨立業 286.
 獨立業級數 175.
 圓首 91.
 圓節距 90.
 圓繞組 305.
 圓邊 90.
 圓邊之寬度 305.
 單位極 84.
 單相繞組 89.
 單相交流電動機之無載電流 397.
 單相交流電壓器 275.
 單相起動電動機 388.
 單電池組開關 131.
 拉接實驗 342.
 捷接轉動子 345.
 捷路 89.
 捷路制動 149.
 捷路電流 293.
 換向器(整流器) 86.
 換向極 113.
 換向電壓 109.
 換向磁場 109.
 換領機 437.
 極之強度單位 84.
 極化 26.
 極節距 90.
 極數 380.
 極式繞組 91.

錫磁鐵 103.
 幾何加法 185.
 幾何減法 186.
 基斯登電機 14.
 散絡爾 134.
 斯多克維斯 242.
 斯坦利實地形法 236.
 滲流 65.
 渦流損失 66.
 渦流輪製 58.
 游子 21.
 溫度係數 8.
 溫梅瑟變換法 14.
 無火花起動器 152.
 無火花開斯 152.
 無功功率 183.
 無功功率之測定 233.
 無功功單計 234.
 無功電流 207.
 無功電壓 199.
 無感應變換法 58.
 無雜散之三相交流電動機 361.
 焦耳 16.
 焦耳定律 17.
 焦耳熱 18.
 異步三相交流電動機 348.
 異步單相感應電動機 304.
 異步電機 304.
 異步發電機 377.
 短節繞組 90.
 等位面 73.
 等位連接 85.
 絕對量度單位
 視功率 183.
 超激 210.
 準端海爾電流測 225.
 貫穿定律 47.
 貫穿率 47.
 賈來利氏 394.

聚來利氏計 182。

週期 173。

週期數 172。

量度制 82。

開機組 433。

開斯電路 57。

開關電池 132。

間隙 281。

隔向游子 23。

隔極 21。

隔極抗流線圈 453, 460。

肌管 158。

舒溫蒲尼抗流線圈 195。

舒懷克爾 169。

十三畫

傳播速度 263。

閘線圈 223。

時變因數 458。

箭線連接 131。

霍法拉 78。

微革命 69。

損失數字 67。

羅斯納 16。

感應定律 37。

感應通量 35。

感應管 36。

感應電爐 276。

感應電動機 348。

感應調整器 279。

楞次定律 52。

路端電壓 5。

過同步轉動 377。

過低放發 302, 340。

過度電流 261。

過度電壓 261, 265, 271。

過度電壓保護 270。

運載裝置 152。

透因 84。

透脫瑪 134。

透斯特 385。

零載曲線 108。

零載特性曲線 108。

零載損失 137。

零載電流 221。

零點之接地 271。

電 1。

電力制動 142, 162, 376, 377。

電力管(電場管) 69。

電力線 69。

電化當量 25。

電功 16, 40, 69。

電功率 18。

電功率計 54。

電抗 204。

電位 17, 77。

電位差 1。

電位移 68。

電位移通量(電感應通量) 69。

電位圈 237。

電角度 175。

電阻 4, 7。

電阻之測定 7。

電阻之調整 148。

電阻角 202。

電阻係數 7。

電容 77。

電容負載(容載) 293, 323。

電箱 209。

電池 31。

電池組開關 130。

電池 1。

電流之分佈 165。

電流之換向 168。

電流之測定 2。

電流曲線 254。

電流共振 219。

電流計 2。

電流密度 2.
 電流強度 2.
 電流圖 336, 363, 367, 369.
 電滯 201.
 電能密度 82.
 電密度 68, 83.
 電通量 69.
 電動勢 3.
 電動機 62.
 電動機中之星形三角連接 378.
 電動機之起動矩 378.
 電量 1.
 電量計 33.
 電極 21.
 電場 68.
 電場之能 82.
 電場強度 74.
 電場線(電感線) 69.
 電解 21.
 電解中之電比 24.
 電解平均值 179.
 電解電池 21.
 電磁 83.
 電磁鐵之起重 61.
 電磁鐵之起重力 62.
 電感係數(電感) 55.
 電感應強度 68.
 電樞之反作用 119, 318, 338, 341.
 電樞之繞法 86.
 電樞線圈之分線 341.
 電塔 9.
 電容係數 9.
 電機(發電機) 121.
 電機學原理 131.
 電機銅質 46.
 電機鐵片 46.
 電壓 1.
 電壓之上升 289.
 電壓之區分 29, 133.

電壓之測定 3.
 電壓之巔值 173.
 電壓圖 336.
 電磁盤 69.
 鼓形換樞器(鼓形控制器) 162.
 鼓形繞組 87.
 鼓形繞組之展開 82.
 愛爾包電動機 413.
 愛爾諾拉哥爾 103.
 與士丁之乘積 188.

十四畫

像 73.
 實有功率 183.
 滲透壓力 21.
 液體通量 48.
 磁力 50.
 磁力線 34.
 磁化曲線 45.
 磁化換向 46.
 磁阻 47.
 磁滯 60.
 磁能密度 60.
 磁密度 34.
 磁通連續 55.
 磁通量 35.
 磁場 34.
 磁場之畸變 115.
 磁場內之鐵 43.
 磁場強度 42.
 磁場調整 180.
 磁剩餘 64.
 磁感應強度 34.
 磁滯 64, 137, 138, 284.
 磁滯損失 137.
 磁阻(磁雜散) 43.
 磁路 47.
 磁飽和 45.
 磁導 43.

磁磁 44.
 磁鐵櫃(磁鐵架) 104.
 管狀電容器 71.
 網格之傳真 141.
 維特高 390.
 蓄電池 28.
 消作機輪 381.
 赫夫提·阿登內克 87.
 赫芝 85.
 輔助磁路電流 110.
 輔助電池 131.

十五畫

摩擦 45.
 摩擦損失 137.
 摩擦電 1.
 整步 315.
 整步力 326.
 整流器 452.
 整步磁組 80,91,83,418.
 歐立根 188,357.
 歐姆 4.
 歐姆定律 4,75.
 歐姆形 371.
 熱量 17.
 熱感計 181.
 熱磁組 276.
 線股 104.
 線股之卸載 105.
 線股電容係數 105.
 線路電流(或外電路電流) 230.
 線路電壓(或網格電壓) 238.
 線路感應係數 246.
 線路變化 109.
 線圈 41.
 緩衝作用 163.
 緩衝電磁組 128.
 衝動磁路電流 344.
 銻銀 8.

柄之形狀 114.
 柄之雜散 333.
 複乘法 190.
 複減法 188.
 複繞電機 122,127.
 複繞電動機 417.
 調整起動器 149.
 調整機 152.
 調整 125.
 輪傳發電機 114.
 轉力 53.
 鋁之提煉 23.
 鋁電池 135.
 魯倍爾條狀體 07.
 磁之雜散 333.

十六畫

導納 209.
 導磁性(導磁係數) 47.
 導磁率 43.
 導體之電軸 73.
 磁磁場 115.
 磁磁力 51.
 激發之預算 49.
 激發強度 47,43.
 激發磁極 453.
 雷斯吞電池 32.
 幅線 184.
 幅線之合成 186.
 幅線之指數式 19.
 幅線之轉向 184.
 靜電量限制 86.
 磁網 8.
 磁齒形連接 228.
 雜散磁生 140,47.
 歐克 174.

十七畫

壓降 166.

壓耗 5。
 應電壓 37。
 環形繞組 87。
 臨時值(瞬間值) 182。
 瞬間波 261 261。
 瞬間波之反射 263。
 瞬間現象 251。
 磁化作用 119。
 磁場 115。
 總感應係數 335。
 總電阻 11。
 薩克生感電動機 433。
 鉅接變 136。
 點算法 237。
 頻率 172。
 諧波 175。
 龍閉 178。
 雜放因數 386-387。
 雜放場之磁導 105。

十八畫

斷續接地 271。
 繞組因數 312。
 繞組首 305。
 繞組節距 97。
 繞組電阻 102。
 繞線電樞(繞綫轉動子) 348。
 繞線轉動子(繞綫電樞) 348。
 轉矩 53。
 轉動子(轉子) 348。
 轉動子電流(電樞電流) 219。
 轉動子饋電電動機 433。
 轉動磁場 350。
 轉動質量 330。
 轉動激發 350。
 轉實矩 371。
 鋁鋼 8。
 鋁電池 32。
 雙 T 式電樞 86。

雙相電動機 398。
 雙連環雜放 392 403 410。
 雙層繞組 90。
 雙電池組閉路 131。
 雙籠形電樞 331。

十九畫

羅森堡電機 134。
 羅蘭特 85。
 羅哥斯基 365。
 爆鳴氣 26。
 鏈線 211。
 傑爾登登分擺 66。

二十畫

饋電線之電阻 7。
 鐵損失 55。

二十二畫

鋼鐵 49。

二十三畫

變相器 278。
 變流計 290。
 變流器 275。
 變極接法 385。
 變壓器 274。
 變壓器之輔助雜放磁場 300。
 籠形轉動子(連接轉動子) 348。

二十四畫

薩基 22。
 V 字形曲線 321。
 V 字形接法 278。



中華民國二十六年一月初版

電機工程

全一冊

實價貳圓捌角

(外埠酌加郵運費)

版權所有

不許

翻印

原著者	德國Adolf Thomälen
譯者兼 發行者	杜若城 上海交通路通裕里
印刷者	勵志書局 上海交通路通裕里
發行所	勵志書局 上海交通路通裕里
經售處	各省市大書局

