

大學叢書
直流電機原理

蘭司獨夫著
顧毓琇譯

中國電機工程師學會叢書之一

商務印書館發行

中華民國二十六年二月初版

(64911精)

大學叢書
(教本) 直流電機原理 一冊

Principles of Direct Current

Machines

每冊實價國幣伍元

外埠酌加運費匯費

原 著 者 A. S. Langsdorf

譯 述 者 顧 毓 琇

發 行 人 王 雲 五

印 刷 所 商 務 印 書 館

發 行 所 商 務 印 書 館

*** 版 翻
*** 權 印
*** 所 必
*** 有 究

三三三上

(本書校對者朱仁寬)



原 著 者 照 相

SPECIAL PREFACE

The selection of this book for translation into the Chinese language is a gracious compliment and a distinguished honor which the author appreciates most sincerely. It is a genuine pleasure to be able to contribute, however humbly, to the training of young men in the technical subject matter represented in these pages, and, what is far more important, to the inculcation of habits of accurate thought and logical reasoning. It is an even greater pleasure and privilege, when, as in this instance, the contribution is made to the youth of a nation which long ago gave to the Western world the fruits of a rich and venerable culture.

To Doctor Ku and his associates in the University of Chekiang, to whose painstaking labor this translation is due, the author extends cordial good wishes for the success of their enterprise.

Alexander S. Langsdorf

Alexander S. Langsdorf

March 6, 1931

原著者爲中文譯本特撰之序文

選擇拙著以譯成中文，鄙人認爲非常榮幸，非常感激。此書若不但可以供給學者以專門之知識，且因此而使青年得到思想準確理路通達之訓練，則鄙人之貢獻雖小，實是引以爲愉快者。貴國豐富之文化，久爲人所共仰，對於西方世界之貢獻，實至偉大，今鄙人得有此特殊機會，答報貴國之青年，實更不勝愉快之至。

貴國顧博士及浙江大學諸同人苦心孤詣，翻譯此書，鄙人謹致敬意，並祝成功。

蘭司獨夫

一九三一年三月六日

譯者序

蘭司獨夫教授所著直流電機原理爲美國「電機工程教科書」之一種，1915年初版，1919年再版，1923年三版，1931年四版。此書我國各大學，如交通大學，中央大學，浙江大學，清華大學，南開大學等處，凡有電機系者，無不用之。日本「電氣工學名著叢書」中亦採用此書，譯成日文（昭和三年出版），惜所根據者乃爲1923年版。

鄙人在民國十八年（1929），始囑國立浙江大學電機科民二十級同學試譯此書（1923年版）經一年餘之努力，得完初稿。旋即詳加校改，於十九年九月先將第六章在電工雜誌第一卷第三期發表，以求國內電工學者之批評與指正。嗣後第七章第一章亦分期在電工發表。二十年三月得蘭教授爲中文譯本特撰之序文，本擬即將全稿付印，後又接蘭教授來信，云第四版不久即將出版，遂即延期，以待根據新版修訂；二十年底四版問世，鄙人始得將第二第三第四第五各章分別改譯，先後在電工第三卷（1932）第四卷（1933）發表。二十二年間，本擬將稿付印，後以是年春間，教育部正召集天文數學物理討論會，對於物理各名詞正有所擬定，而中國工程師學會亦有委托鄙人重訂電機工程名詞之舉，故爲鄭重起見，又加擱置。今年春初，物理名詞草案擬定，鄙人所改訂之電機工程名詞，亦得於四月出版。半年以來，復將譯稿根據增訂電機工程名詞加以改正，故遲遲至今，方告完成。計自始業至此，瞬經五載，未嘗不引以爲憾。但因遲延之故，一則可以參照新版增補，一則可以採用最新擬訂之

物理名詞及電機名詞，則亦聊可以自慰也已。

本書初擬爲中國電工雜誌社叢書之一，現中國電機工程師學會於本年十月十四日成立，即改爲中國電機工程師學會電工叢書之一。本書承商務印書館賜予承印，不勝感謝。

譯者於校改期間，承國立清華大學教授(前國立浙江大學教授)倪俊、章名濤二先生，及國立浙江大學教授楊耀德先生賜助校閱，並承國立浙江大學電機科民二十級同學供給初稿，並此誌謝

顧毓琇

民國二十三年十二月

國立清華大學工學院

目 錄

第一章 定律及定義

1-1. 引言	1
1-2. 磁鐵,磁場.....	1
1-3. 單位磁極	4
1-4. 磁場強度,勻布與不勻布磁場.....	5
1-5. 磁力線及磁力管	6
1-6. 磁導係數	9
1-7. 應電流及電勢	10
1-8. 應電勢之方向	12
1-9. 磁場中電流發生之力之方向	12
1-10. 電流在磁場中發生之力.....	15
1-11. 單位電流,單位電量	19
1-12. 應電勢之大小.....	19
1-13. 電阻,歐謨定律,焦耳定律.....	23
1-14. 電勢與電位差.....	27
1-15. 普通化之歐謨定律.....	29
1-16. 啓旭夫定律.....	32
1-17. 磁位.....	40

1-18. 等位線與等位面	43
1-19. 圓線圈之磁場強度	43
1-20. 螺管軸上之磁場強度	44
1-21. 圓圈軸上之磁位	46
1-22. 任何形狀之線圈在任何點之磁位之一般方程式	47
1-23. 磁勢	49
1-24. $B-H$ 曲線	51
1-25. 磁滯	57
1-26. 磁路定律及磁阻	60
1-27. 磁路定律之應用	61
1-28. 自感	65
1-29. 互感	68
1-30. 磁場之儲能	71
1-31. 電磁鐵之曳引力	72

第二章 電機

2-1. 電機, 發電機與電動機	80
2-2. 簡單交流發電機之電勢	83
2-3. 交流發電機電勢之一般情形	85
2-4. 交流電勢之矯正	87
2-5. 分布線捲之效用	88
2-6. 直流電樞之平均電勢	90

2-7. 電勢脈振之量	92
2-8. 樞捲之電阻	96
2-9. 電機之構造	96
2-10. 雙極及多極機	98
2-11. 整流器	98
2-12. 電樞鐵心, 渦流	100
2-13. 齒及齒槽之形式	102
2-14. 磁極鐵心及極靴	103
2-15. 軛	104
2-16. 電刷, 刷握, 及搖環	105
2-17. 電動發電機組, 發電電動機	106
2-18. 渦輪發電機	108
2-19. 整流磁極電機	109
2-20. 單極電機	110
2-21. 電機之磁激	111
2-22. 別激	111
2-23. 自激	112
2-24. 串激	112
2-25. 分激	114
2-26. 複激	115
2-27. 磁場捲之構造	117
2-28. 磁場變阻器	120

2-29. 發電機之極性.....	121
2-30. 電動機迴轉之方向.....	122

第三章 電樞線捲

3-1. 電樞之各式.....	127
3-2. 線捲之各式.....	129
3-3. 環捲與鼓捲.....	129
3-4. 線捲單位.....	133
3-5. 摺捲及波捲.....	134
3-6. 所需之電刷組數.....	138
3-7. 單重捲與多重捲,重入次數	139
3-8. 一般討論.....	142
3-9. 導線數,線捲單位數與整流片數	142
3-10. 線捲節距,整流節距與槽節距.....	143
3-11. 磁場位移	144
3-12. 電樞路之數	146
3-13. 普通定則	147
3-14. 重入次數之通則	151
3-15. 線捲定則摘要	152
3-16. 線捲單位之構造	154
3-17. 單重摺捲與波捲實例	156
3-18. 多重線捲實例	161

3-19. 雙整流器線捲	164
3-20. 等位或均壓連接	165
3-21. 多重捲中之均壓連接	170

第四章 場捲及樞捲之磁化效應

4-1. 磁化曲線及飽和曲線	177
4-2. 主要磁路	178
4-3. 飽和曲線之實驗測定	179
4-4. 磁化曲線及飽和曲線之預定	182
4-5. 磁漏	184
4-6. 電樞之磁化作用	186
4-7. 整流	188
4-8. 電樞反作用之組成分	189
4-9. 交磁與去磁安匝數	190
4-10. 多極機中之交磁與去磁作用	191
4-11. 反安匝去磁作用之改正式	194
4-12. 樞流所生磁場之形狀	198
4-13. 總磁場分布概況	199
4-14. 交磁化之去磁成分	200
4-15. 有載狀況時所需之磁激	201
4-16. 磁流分布之實驗決定法	205
4-17. 電位曲線	206

4-18. 氣隙中磁流分布之預定法	207
-------------------------	-----

第五章 磁化曲線及漏磁之預計法

5-1. 總論	212
5-2. 氣隙所需之安匝數	212
5-3. 極弧之改正	215
5-4. 軸長之改正	216
5-5. 齒部所需之安匝數	217
5-6. 樞心所需之安匝數	221
5-7. 極心與極靴所需之安匝數	221
5-8. 軛部所需之安匝數	221
5-9. 漏磁之簡單公式	222
5-10. 電機極數甚少時之磁散係數	225

第六章 發電機之運用特性

6-1. 用途需要	231
6-2. 特性曲線	232
6-3. 調整	233
6-4. 別激發電機之特性曲線	233
6-5. 旋轉速度對於外特線之影響	238
6-6. 負載特線	239
6-7. 電樞特線	240

6-8. 串激發電機之特線.....	241
6-9. 特線形狀依速度之關係.....	242
6-10. 穩定運用之條件	243
6-11. 定流之調整法	244
6-12. 分激發電機之特線	246
6-13. 特線形狀依速度之關係	251
6-14. 特線形狀依分激場捲阻之關係	252
6-15. 分激發電機特線之近似數學分解	253
6-16. 複激發電機之特線	257
6-17. 串聯分流器	260
6-18. 數發電機合用之連接法	261
6-19. 屠利電系	261
6-20. 發電機之並行運用	263
6-21. 三線發電機	267
6-22. 提利爾調整器	272
6-23. 反電勢調整器	274

第七章 電動機

7-1. 用途需要.....	279
7-2. 反電勢, 轉力及功率	279
7-3. 電動機之起動.....	284
7-4. 別激電動機之特線.....	286

7-5. 分激電動機之特線	290
7-6. 串激電動機之特線	292
7-7. 複激電動機之特線	296
7-8. 電動機特線之比較	300
7-9. 起動變阻器之分組	301
7-10. 手動羅盤式起動電阻器	309
7-11. 鼓式控制器	311
7-12. 自動磁性起動器	312
7-13. 反電勢,倒轉電動機	322
7-14. 差複激電動機之起動	324
7-15. 分激電動機速度之控制	325
7-16. 分激及複激電動機之應用	332
7-17. 串激電動機之應用	334
7-18. 串激電動機特線之方程式	335
7-19. 電氣鐵道電動機之工作週	345
7-20. 混聯控制法	347
7-21. 電氣鐵道之控制器	349
7-22. 電動機加速及減速之力學	354
7-23. 電動機加速所需之時間	356
7-24. 電動機速度之減小	361
7-25. 動力制動法,再生控制法	363
7-26. 飛輪之均載作用	365

7-27. 數電動機負載之分擔	366
-----------------------	-----

第八章 整流

8-1. 基本觀念.....	370
8-2. 整流理論之物理基礎.....	372
8-3. 電感理論用於簡單環捲之通用方程式.....	373
8-4. 基本之數學關係.....	375
8-5. 通用方程式之討論.....	377
8-6. 火花標準之修改式.....	379
8-7. 直線整流.....	381
8-8. 整流片之電流密度一般情形.....	383
8-9. 電刷局部電流密度之變化.....	387
8-10. 其他各例	387
8-11. 相鄰線圈之同時整流	389
8-12. 一槽內數線圈短接之各形相	392
8-13. 波捲中之選擇整流	396
8-14. 短接之時間	396
8-15. 刷寬對於平均電抗電壓及大概整流情形之影響	397
8-16. 刷寬間位落之變化	402
8-17. 整流電勢, 電抗電壓及電刷位落之關係.....	403
8-18. 整流磁場之脈振	408
8-19. 短接電流對於主磁場之反作用, 飛閃.....	409

8-20. 火花常數	411
8-21. 樞磁理論	412
8-22. 有槽電樞中自感係數 L 之計算法	413
8-23. 互感係數 M 之計算法	420

第九章 整流裝置,補償捲及整流極

9-1. 電機無輔助裝置時之整流	425
9-2. 最早時之整流裝置	429
9-3. 補償原則	431
9-4. 補償線捲	432
9-5. 整流極	435
9-6. 氣隙間之磁流分佈	437
9-7. 整流極之線捲	438
9-8. 整流極之複激作用	440
9-9. 整流極機之磁漏	442
9-10. 整流極對於線圈自感之影響	443

第十章 效率,定額及發熱

10-1. 慣例及測定效率	445
10-2. 直流發電機及電動機之損耗	448
10-3. 恆電位恆速度電機之效率及損耗	450
10-4. 變換之效率,電氣與機械效率	457

10-5. 最大效率之條件	458
10-6. 最大效率點之所在	461
10-7. 全日效率	462
10-8. 變磁流變速度電機中之效率及損耗	463
10-9. 電阻耗	465
10-10. 鐵心耗	468
10-11. 機械耗	476
10-12. 負載雜流耗	478
10-13. 定額及容量	480
10-14. 溫度限制	482
10-15. 美國電機製造業公會之定額	486
10-16. 鐵道電動機之發熱	487
10-17. 整流限制	488
10-18. 過速限制	489
10-19. 出量方程式	489
10-20. 發熱及降冷曲線	491
10-21. 電樞之發熱	495
10-22. 場圈之發熱	499
10-23. 整流器之發熱	500
10-24. 封閉式電動機之定額	501

第十一章 昇壓機及平衡機, 列車電矽制

11-1. 昇壓機	504
11-2. 串激昇壓機	504
11-3. 分激昇壓機	505
11-4. 恆流昇壓機或單向昇壓機	507
11-5. 雙向昇壓機	510
11-6. 昇壓機之輔助控制	511
11-7. 赫巴特反電勢制	511
11-8. 恩芝制	512
11-9. 畢蕉制	514
11-10. 平衡機	515
11-11. 列車電矔	516
11-12. 列車電矔制中之電壓調整法	518
11-13. 電阻調整法	518
11-14. 發電機磁場調整法	519
11-15. 磁場與線路調整法	521
11-16. 利用電樞反作用之調整法	524
11-17. 盧森堡列車電矔發電機	524
11-18. 盧森堡電機作為電動機之運用法	531
11-19. 盧森堡發電機之改良	532
11-20. 第三電刷式之發電機	534
11-21. 特種弧鍛發電機	549
11-22. 分磁極發電機	551

直流電機原理

第一章 定律及定義

1-1. 引言 電機之設計，與其運用之特性均基於一定之學理，欲求對於此學理獲一明晰之概念，則須先於電磁學中之根本物理現象，以及關於此現象之種種定律及定義，均能徹底明瞭而後可。本章之目的，即將此種現象，定律及定義，擇其可應用於直流電機原理上者，作一簡約之敘述。若讀者願於此基本原理上得一更詳盡之了解，則請參閱其他參考書。

1-2. 磁鐵，磁場 磁鐵之名，原自磁石而來。磁石為一種氧化鐵 (Fe_3O_4)，即今所謂磁鐵礦是。此物早有人發現能吸引鋼鐵細屑，且如以鐵或鋼與磁石相磨擦，則吸引之特質即傳至鐵或鋼上，而成磁鐵。但至十九世紀，方知用絕緣線圈 (coil) 環繞鐵質物體，通以電流，即得人造磁鐵。鋼之合金中，如鉻鋼等磁化後能保持此種特質永久不變者，謂之為永久磁鐵。如欲增加持久性，可使該磁鐵受適當限度之交變冷熱，蓋如此可收人工陳老磁鐵之效。純粹之軟鐵，雖受電圈之電流極強磁化，

然若將電圈之電流截斷，或將軟鐵取出電圈外，則磁性立失。大率鋼鐵愈堅，則磁化之持久性亦愈顯。此種用通電流電圈製成之磁鐵通常均稱爲電磁鐵，所以別於永久磁鐵。磁鐵與尋常鐵間所生之力常爲吸力。

最簡單之磁鐵爲直棒形，故謂之條形磁鐵。若將此磁鐵投入鐵屑中，鐵屑即附着其上，兩端呈草結形，而中間則甚稀。故人或以爲磁性集在磁鐵兩端，稱曰磁極。然若將均勻磁鐵分成細塊，則可證明磁化之性質，實均布於全磁鐵，無論在任何處折斷，每部均各有其相等磁極，而自成一磁鐵故。磁鐵可看作多數極小磁鐵，依次排列，而磁軸皆在同一方向。此說雖不甚闡明詳盡，但實爲磁鐵學之基本原理。

設在條形磁鐵之重心處以絲線懸掛之，則條形磁鐵即自旋轉，直至與磁子午線相切爲止。普通在北緯度，則北端下向而南端上升。若用錘以保持其平衡，則得一指南針。今若將此磁鐵任意旋轉而待其靜止，則兩端所指永爲原指方向而不變。

兩條形磁鐵，懸掛在相近時，兩北極或兩南極恆互相推拒，但一磁鐵之北極與另一磁鐵之南極，則互相吸引，因此吾人得一定則：同極相拒，異極相吸。

指南針之所以能指定南北之故，因地球本身即一大磁鐵，其兩磁極之位置，約在地球極之附近。因指南針所指之北極，爲磁鐵之南極所吸，故指南針之指北極，實爲磁針真正之南極，但爲便利故，吾人仍稱之爲指北極，或簡稱爲北極。由磁鐵兩極之相對特性，又生正極負極二名詞，正極所指者爲指北極，而負極所指者爲指南極。

當一磁鐵置近鐵屑時，鐵屑即因感應作用而磁化，而發生相異之二

極。其靠近感應磁鐵之一端者，與感應磁極相反，故發生吸力。其在另一端者，則發生拒力。但後者距感應磁極之距離，較前者為遠，故在受感應磁鐵後之合力，仍為吸力。

在磁鐵週圍，其區域內有上述現象者，謂之磁場。但前述磁性現象，僅及一磁鐵對於另一磁鐵之作用，及對於尋常鋼鐵之感應磁性。奧斯特 (Oersted) 於 1820 年發現電流亦足影響指南針，可見電流通過導線，其四週亦即生一磁場。此種事實，可用以解釋鋼鐵因電圈而成磁鐵之原理。更進而論，若有一連合導線在磁場中（磁場由磁鐵或電圈發生均可）移動，使與導線相鏈之磁流時時變易，導線上即有電流流過。此現象為法拉第 (Faraday) 在 1831 年所發現，稱為電磁感應。更若有一載電流之導線，位於磁場中（磁鐵或電圈所生），則導體上亦即受有一力。故以普遍而言，磁場之定義，可定為一種區域，此中 (a) 磁鐵受吸拒力；(b) 磁性物質可因感應而磁化；(c) 連合導線移動時可感應電流；及 (d) 載電流之導線受吸拒力。

鐵與鋼具感磁性最強，其他如鎳 (nickle) 鈷 (cobalt) 等次之。此類物質，均能受磁鐵之吸引，又能在磁場中使其長軸順隨磁場之方向，故謂之順磁質 (paramagnetic)。但尚有一種物質，如鉍 (bismuth)，磷 (phosphorus)，與鋅 (zinc) 等之類，皆與磁鐵之任何極相拒，在磁場中則使其長軸與磁場之方向垂直；此類物質，概稱之曰反磁質 (diamagnetic)。鐵及鐵之合金，既稱為最好之順磁質故此類通常稱為鐵磁質 (ferromagnetic)，或簡稱磁性質。但有一堪注意者，即為黑司勒合金 (Heusler alloys)，此合金毫無鐵質，而具強烈磁性幾等於最低等之生

鐵。查此合金之成分，實爲銅、鋁及錳三者，此三者均非磁性質，然若依其原子量而配合，則可得極好之磁性。

近年裴耳電話試驗所，●發見一類鎳鐵合金，名爲普美洛 (permalloy)，有顯著之磁性，在極弱磁場內，其特性尤著。用以製造海底電纜及電話減畸變線圈之鐵心等，甚爲適用。另有一類鈷鎳鐵合金，其名爲普明凡 (perminvar)，將於第 1-25 節內詳細論之。普美洛乃以 78.5% 之鎳與 21.5% 之鐵混合之，再加熱至適當溫度而成。此種磁質在薄弱磁場內，極易感受磁性，如將此條兩極指向南北，則其感應磁性，足以吸取輕小鐵片。若將其兩極轉向東西，則磁性立即完全消失。

1-3. 單位磁極 凡磁化物體，均有磁性現象，即有一正極，同時亦必有一負極。磁鐵全部均有磁性，但強度則各點每有不同。通常爲便利計算起見，吾人假定磁極爲磁性集中之點，實則磁性并不如此。在一細長如針之磁鐵，其磁性幾全集合於針之兩端，故此種磁鐵，最可代表集中點之磁極(或簡稱點極)。設將此種磁鐵之一端放入磁場中，其他一端相距甚遠，磁場作用之力幾無，故吾人可得一單磁極，而研究磁場作用於此單極之力。

欲量磁性之強弱，須先定磁極之單位。單位磁極乃爲一點極在空氣中作用於相距一浬(cm.)之同樣磁極之力，爲一達因 (dyne)，或簡稱達。如單位極爲同符號，則爲拒力，異符號則爲吸力。通常如無特別聲明

● Elmen, G. W., "Magnetic Alloys of Iron, Nickle, and Cobalt," The Bell Syst. Tech. Jour., Vol. VIII, No. 3, p. 435, July, 1929.
Arnold, H. D., and Elmen, G. W., Jour. Franklin Inst. p. 621, May, 1923.

時。單位磁極，恆假定爲指北極(即正極)。

沒有一磁極不知其強度，但知置在空氣中距單位磁極一呎時，兩極間有 m 達之力，則此磁極之強度即爲 m 單位。換言之，即磁極之強弱，可以其在空氣中對於距離一呎之單位磁極所生之力(達數)而定。由此類推，可知若有兩磁極，其強度各爲 m 及 m' ，則在空氣中相距一呎時，兩極間之力，必爲 mm' 達。

庫倫(Coulomb)在 1800 年試得兩磁極間相拒或相吸之力與其間之距離之平方成反比例。故設 m 與 m' 間之距離爲 r ，則其間之力爲

$$f = k \frac{mm'}{r^2} \quad (1)$$

若力之單位爲達，距離之單位爲呎，磁極強度之單位如上所述，則當 m, m' 及 r 皆等於一時，照上定義， f 亦當爲一，故在空氣中 $k=1$ ，而

$$f = \frac{mm'}{r^2} \text{ 達} \quad (2)$$

1-4. 磁場強度，勻布與不勻布磁場 在空氣中，某一點之磁場強度，可以單位磁極在該點所受之力之達數量得之。惟單位磁極(試極)引入磁場時，原來磁場之強度，及其勻布須不致變更。磁場強度，通常均用 H 代表之。設有一磁場在空氣中與一單位磁極間之力爲一達，則此磁場之強度，即爲單位強度。磁場強度之單位稱爲奧斯特(oersted)，^① 或簡爲奧。故稱磁場強度爲 H 奧，即謂該磁場在空氣中與單位磁極作用之

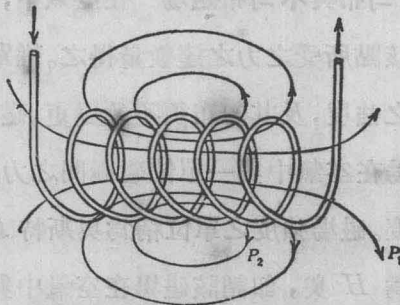
① 此磁化力(magnetizing force)單位，爲 1930 年 7 月國際電氣專門委員會(I. E. C.)在 Oslo 開會時通過採用。按美國向以此名作爲磁阻之米克秒(c. g. s.)單位，故磁化力單位如用奧，則磁阻單位之定名尙付闕如。

力有 H 達，或與 m 單位之磁極有 mH 達之力。

在磁場之任何處，其作用於試極上之力處處相等而方向相同者，則此磁場謂之勻布磁場。在確定範圍內，磁場之強度均勻，而方向在各點不同者，則此磁場謂有勻布強度。尋常磁場強度在各點均不相同，其方向亦殊者，謂之不勻布磁場。

1-5. 磁力線及磁力管 若將一單位磁極在空氣磁場中移動，普通對於此極之力及其方向在各點均各不同。在此磁場中各點之力，均可以直線表示之，線之長短表其量，而方向依力之方向。換言之，各點之磁場強度可用矢量(vector)表示之。若在各點上作曲線，使其切線在各該點與強度矢量之方向相同，則此曲線謂之磁力線。一磁場之點無窮，故磁力線之數亦無窮。磁力線不能相交，亦殊顯然，蓋否則可在交點得不同之切線切於二磁力線，若以一點磁極置此交點，則同時可有數種力作用於此點——此為不可能也甚明。

設有電流通過一空氣心之螺管 (solenoid) 如第 1 圖，則在管軸平

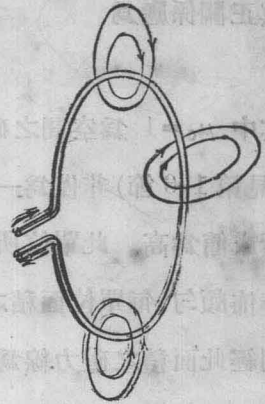


第 1 圖 螺管中電流所生之磁力線

面上磁力線之分佈，約如圖上所示。此可以實驗證之，法以紙片上灑鐵

屑，而以螺管之線匝 (turns) 穿繞其上，輕輕將紙片彈動，則得如圖。任何平面經過線圈之軸者，均可得同樣情形之磁力線之分佈。由此可注意磁力線皆為連合曲線，且每連合之迴環 (loop) 均與通電之線圈相鏈一匝或數匝。

磁力線與通電線圈匝相鏈之情形，第 2 圖表示更為清楚。圖中示電線一匝及數磁力線，彼此相穿，宛如一鏈條，鏈 (linkage) 之名稱，蓋即由此而來。



第 2 圖 一匝線圈中電流所生之磁力線

電流之方向與電流所生磁場之正方向有一定之關係；磁場之正方向，即指一自由正磁極，置於磁力線上時所受作用之方向。設有一右旋螺旋，以釘帽之旋轉依電流之方向，則釘尖移動之方向即磁力線之正方向。尚有他法

以決定磁力線與電流方向之關係者如下：(1) 設以右手掌置線圈上使四指順電流之方向，而將拇指伸直，則拇指所指之方向，即磁力線之正方向；(2) 設將右手握導線，拇指順電流之方向，則四指即依磁力線之正方向與導線相鏈。

在第 1 圖中所示之磁力線甚稀少，但已可窺見磁力線之在螺管中者較兩端及四周之空氣中者略多。依試驗結果，螺管內部之磁場強度亦較兩端及外面為大。故由空氣中磁力線之密度，亦可量得磁場之強度。磁場之磁力線可畫無數，但為便利起見，可僅畫數根。通常吾人使所作垂直於磁場單位面積中之磁力線數，等於其強度之值。

每單位面積(1方呎)之磁力線數,常用 B 代表之,其磁場之強度以 H 代表之。故在空氣中,如僅比較其數量,則

$$B=H$$

1930年國際電氣專門委員會(I. E. C.)^①通過空氣中 B 與 H 之真正關係應為

$$B=\mu_0 H$$

其中 $\mu_0=1$ 為空間之磁導係數,約等於空氣中之磁導係數。磁導係數(見第1-6節)非僅為一數,故 B 及 H 之單位並不相同。 B 之單位為高斯或簡為高。此單位所代表之數量,謂之磁流密度。設磁場在空氣中之分佈頗勻,每單位面積之磁力線為 B ,而與磁場垂直之面積為 A 方呎,則經此面積之磁力線為 BA ,此即謂之磁流(magnetic flux)。磁流常用 Φ 代表之,因此

$$\text{或} \quad \left. \begin{array}{l} \Phi = BA \\ B = \frac{\Phi}{A} \end{array} \right\} \quad (3)$$

磁流 Φ 之單位為馬克士威(maxwell),或簡稱馬。故

$$1 \text{ 馬[克士威]} = 1 \text{ 磁力線}$$

此單位用時過小,用 10^8 馬較便,故國際電氣專門委員會近通過一實用單位名曰『實用馬』或『彌』(pramaxwell)即等於 10^8 馬。

若磁場之分佈不勻,則各點之密度 B 均不同,而與磁力線垂直之 A 面積內經過之磁流即為

^① International Electrotechnical Commission, Oslo (1930).

$$\Phi = \int B dA \text{ 馬}$$

此積分及於全面積。若面積不與磁場垂直，而磁場與單位面積 dA 垂直線之角度為 α ，則磁流總數為

$$\Phi = \int B \cos \alpha dA \text{ 馬} \quad (4)$$

一束之磁力線經過某面積時，其集聚或離散須視磁場強度之增加或減少而定。此束磁力線之外邊由磁力線合組而成爲管狀(如第3圖)，故有磁力管之稱。若磁力管在空間，而不含磁性物體，則在此管各截面之磁流爲常數，即

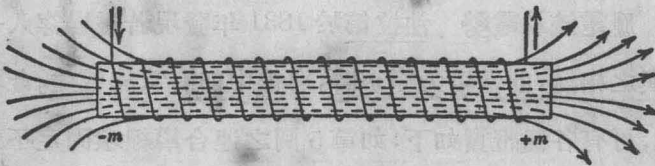


第3圖 磁力管

$$\Phi = \int B_1 \cos \alpha_1 dA_1 = \int B_2 \cos \alpha_2 dA_2 \quad (5)$$

磁力管之縱邊既由磁力線組成，而磁力線又不能互交，故無另外磁流可穿入管內，而磁力線在此管中之一橫截面者，終其全長，亦必在此管內。換言之，穿過磁力管邊之磁流爲零。

1-6. ^{透磁率}磁導係數(permeability) 設將鐵心插入第1圖之螺管中，如第4圖。通以適當之電流，則電磁鐵兩端之磁場強度較無鐵心時增加甚多，蓋鐵心受感應作用而磁化，兩端即發生 $+m$ 及 $-m$ 之磁極強度，



第4圖 有鐵心之螺管

故原來磁流之外，又加此磁極發生之新磁流。所有新磁力線，皆自北極發出，經過其四週之介質 (medium) 而至南極，再經過鐵心復回至北極，以成完全之通路。故在鐵心中，即磁場強度 H 仍與無鐵心時相同，而每單位截面所有之力線，則大為增加。換言之，鐵心中之 B 並不如空心時即等於 H ，而比 H 大得多，如用鐵或鋼，有時可大至二三千倍。如用鎳鐵合金， H 雖甚小，而 B 比 H 可增至 87,000 至 250,000 倍。

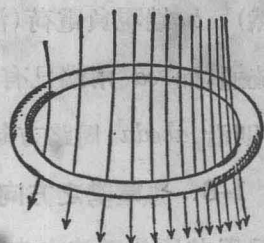
以鐵心代空氣心，其磁流即大為增加，可以下例解明之：設以水或其他種流質壓過一砂層之管，或其他有孔物體，其水流之多少，依壓力與水頭及砂層孔之多少而定。若砂層中有數空隙，則水即向此聚集流出，故壓力雖未變，而流出之水量則已大增，蓋因空隙阻力較少之故。同理，鐵即磁之空隙，可使磁流較在空氣中易於透導。故 B 與 H 之比

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (6)$$

謂之磁導係數，即物質對於磁之傳導率。空氣中 $B=H$ ，故空氣(或應作真空)之磁導係數為一。普通非磁質與空氣作用相同，因其磁導係數亦為一。他如反磁質與任何磁極相拒，磁力線之經過其中者較空氣中為難，故其磁導係數當小於一。但磁導係數等於零之物質則無；設或有之，則吾人可得絕好之磁性絕緣體矣。

1-7. 應電流及電勢 法拉第於 1831 年發現若磁場穿入一連合導線圈，或與之相鏈，則當場力變更時，導線中即有電流感生。此現象謂之電磁感應，可有各種證實如下：如第 5 圖之連合導線環固定不動，而將穿過其中之磁力線數時時變更，則導線環中即有電流通。又如磁場不

變而將導線環依直徑轉動，使導線環與磁流忽鏈忽否，則亦有電流發生。再者，若使磁場不動而將導線環按原來位置並行移動至另一磁場強度不同之處，則亦能發生電流；但在勻佈磁場中則否。

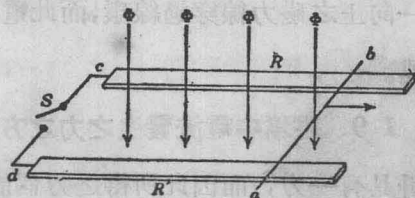


第5圖 磁場中之導線回路

上述各法之使導線中有電流，吾人須注意其周路 (circuit) 必須連合。是故由磁場之變動而所生之應電流 (induced current) 已為第二部現象，蓋須先有應電勢 (e. m. f.) 而後始能發生應電流，如第5圖之環，在某處截斷，即電路中斷，電阻為無窮大，電流不通。但其所應之電勢，仍與此環未切斷時一樣。開斷線環或線圈中之現象，可以電子論解釋之，則更為明晰。

導線在磁場中推動，導線體內之自由電子，即生移動，其方向與磁力線及推動之方向，互相垂直。電子移動時，即組成一微弱之『移流』 (displacement current)，在開斷電路中，線圈一端，聚有多量電子，他端則短少，故兩端即有電荷而生電位差，電路閉合時，電子流通，即達平衡狀態。

電磁感應之程序，可更以第6圖表明之。圖中 ab 線沿 RR' 軌條移動，漸次將垂直於軌條平面之磁力線 Φ 截切。如連接線 cd 間之開關 S 開斷， ab 線中電子，沿 ab 方向移動， b 端乃現正電荷 (沿軌條 R 及 c 線



第6圖 電勢之發生

亦然)， a 端現負電荷（沿軌條 R' 及 d 亦然）。是以 ab 線中雖無電流通，而 cd 兩端已有電位差。將開關 S 閉合時，如 ab 線仍繼續推動，則沿 $abcda$ 周路方向，即有電流通。

1-8. 應電勢之方向 (a) 弗來明 (Fleming) 右手定則 欲決定應電勢與其所生電流之方向有一便於記憶之法，即弗來明氏之右手定則，其法如下：將右手之拇指，食指及中指伸直，使互成垂直角，如空間坐標然（如第 7 圖）；使食指指磁力線之方向，拇指指導線在磁場中移動之方向，則中指所指者，即為應電勢之方向。



第 7 圖 弗來明右手定則，發電機作用。

如參看第 6 圖，若右手之食指向下，拇指向右，則中指即指示自 a 至 b 之方向，故電流通動之方向為 $abcd$ 。

(b) 侖茲 (Lenz) 定律 從試驗之結果，得知應電流與發生該應電流者作用適相反，是即所謂侖茲定律。換言之，應電流之方向，乃所以阻止導線圈中磁流之變動，蓋磁流之變動，實為發生電勢而使電流通之源也。再參看第 6 圖，則知 ab 線之向右移動時，乃使 $abcd$ 線環包含之磁流漸漸加多。依侖茲定律，應電流將阻止磁流之增加，故應電流將發生一向上之磁力線穿過線環，而此電流之方向應為 $abcd$ ，如第 1-5 節所述。

1-9. 磁場中電流發生之力之方向 奧斯特發見電流對於隣近之磁針具有一力，而因此所得之力偶能使磁針偏斜。推之，將電線（有電流通過之導線）置入磁場中，磁場對於此電線亦具有一力。此力之方向，

須視磁場之方向而定，其法如下：

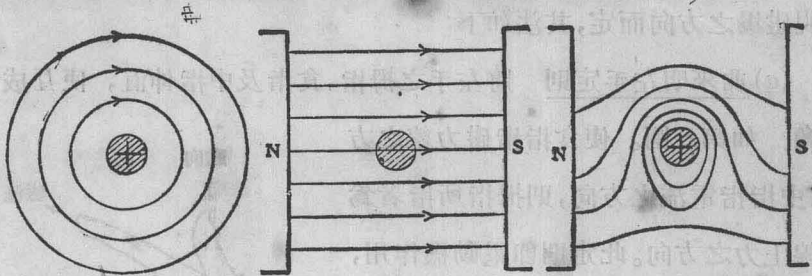
(a) 弗來明左手定則 將左手之拇指，食指及中指伸直，使互成垂直角，如第 8 圖。使食指指磁力線之方向，中指指電流之方向，則拇指所指者為導線上力之方向。此定則即電動機作用，與弗氏右手定則之於應電勢或發電機作用相似，惟所用左右手不同耳。故前者亦可謂為後者之反影，反之亦然，蓋以第 7 圖置於鏡前，鏡中之影，即第 8 圖也。



第 8 圖 弗來明左手定則，電動機作用。

(b) 依第 6 圖，設用電池或其他電源，使電流依 $abcd$ 方向流動，則此線環之各邊均具有一力。設 ab 可在 RR' 上自由滑動，則 ab 即依力之方向移動。照 (a) 所述之左手定則推測， ab 當向左邊移動。但 ab 之移動截切磁力線而生電勢與原來電流之方向相反。此與倫茲定律適合，蓋線環內原有電流使 ab 移動，而 ab 既移動之後，則發生應電流以阻止 ab 之移動。如此，因 ab 移動發生之應電勢既與原有電流方向相反，則通過線環之電流必將減少；欲免減少，則電池供給之電勢必須增加，以抵償此反電勢 (counter e. m. f.)。

(c) 設空間有一直導線，與任何磁場相距甚遠，通以電流，則此直導線之週圍，必為其電流所發生之磁力線圍繞；在第 1-10 節中將證明此種磁力線皆為圓形，其平面與導線軸垂直，其中心即在導線軸上。欲證明此事實，可以導線穿過一片紙或玻璃，上撒鐵屑，而輕輕彈動之，鐵屑即排列成圓圈形，圍繞電線四週，如第 9 圖 (a)。今有一勻佈磁場，與導



第9圖(a) 電線有電時
之截面及其磁場

第9圖(b) 電線在勻布
磁場中

第10圖 圖9(a)與(b)之
總合磁場

線之軸垂直，如第9圖(b)。若導線帶電，磁場即變化而呈第10圖之狀。依作此圖時之假設，導線上磁力線之兩部分互相加強，而導線下者適相反。故磁力線對於導線恰似有彈力之帶，兩端拉住，因有縮至最短尺寸之趨向，而於導線有向下之力。

第1-8及第1-9兩節所述者，可總結如下：

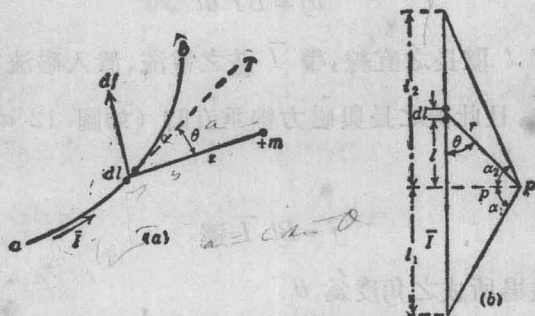
1. 若將導線置磁場中，而用機械力移動之，使其截切磁流，則有電勢感應；若電路連合，則有電流流動，此電流與磁場之作用。即發生反動力與原來使導線移動之力相反。如此利用機械能以變成電能，謂之發電機作用。

2. 若將導線置磁場中，由電源供給電流，則電流與磁場相作用而發生動力，可使導線移動。其移動之方向，即欲使應電勢阻制原來之電流，如此利用電能以變成機械能，謂之電動機作用。尚有一事實必須注意者，即導線在磁場中移動，其移動之方向，必須能截切磁力線始能發生應電勢。同理，磁場內帶有電流之導線，其線長必須有一組成部分(component)能與磁力線交叉，或磁場強度須有一成分與線之方向垂

直，始能發生力之作用。

1-10. 電流在磁場中發生之力 奧斯特既發見通有電流之導線，置於磁場中，即覺力之作用，其力之大小與電流及磁場強度之關係，拉撥拉司 (Laplace) 首用數學程式以表示之。

設第 11 圖 (a) 中之 dl 為 ab 導線之一小部分。線上通有電流 \bar{I}



第 11 圖 電流在磁場中發生之力

達^①(絕對安培 abamperes), m 為磁極, 其磁強度即為 m 單位, 則作用於 dl 之力為

$$df = \frac{m}{r^2} \bar{I} dl \sin \theta \text{ 達} \quad (7)$$

式中 θ 為半徑矢 r 與切線 T 間之角度。依照第 1-9 節之定則, 第 11 圖 (a) 中之力為向上, 與 r 及 T 所成之平面成垂直角。反之, dl 中之電流作用於磁極 m 亦有同等之力向下。

第 (7) 式完全為實驗所得之公式, 並不能有數學上之導求證明, 但

- ① 參看顧毓琇「電磁單位靜電單位名詞之擬議」電工第一卷第二期第 241 頁。
- ② 此式曰 Biot-Savart 定律。

從各種實驗所得之結果，皆與此相符。

第(7)式中之 $\frac{m}{r^2}$ 為磁極 m 在 dl 處發生之磁場強度 H 。若導線及磁極均在空氣中(如圖 11 a)，則 $H=B$ ，是以作用於 dl 之力為

$$df = B\bar{I} dl \sin \theta$$

設 r 與 dl 垂直，則 $\sin \theta = 1$ ，如此

$$df = B\bar{I} dl$$

由此可知若有 l 呎長之直線，帶 \bar{I} 安之電流，置入磁流密度為 B (高) 之勻佈磁場中，且此線之長與磁力線垂直時(如圖 12 a)，則此線所受之力為

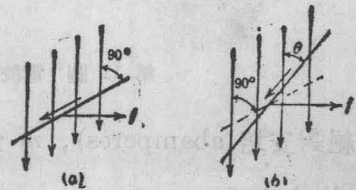
$$f = Bl \bar{I} \text{ 達} \quad (8)$$

但設此線與磁場所成之角度為 θ

時(如圖 12, b) 則

$$f = Bl \bar{I} \sin \theta \quad (9)$$

從第(8)式可得一電流絕對單位(安)之定義。設 B, l 及 \bar{I} 皆



第 12 圖 電流在磁場中發生之力

令其等於一， f 亦必為一，故以長 1 呎之直電線，置於磁流密度為 1 高(即每方呎有一磁力線)之磁場中，與磁力線垂直，如有電流經過而電線所受之側力為 1 達，則此電流之量為一安。以後可知一安等於十安，即

$$1 \text{ 安} = 10 \text{ 達}$$

第(7)式亦可用以決定電線周圍磁場之強度。設在第(7)式中令 $m=1$ ，則 df 即等於作用於單位磁極之力，依定義亦即在單位磁極處之磁場強度。故

$$dH = \frac{dB}{\mu} = \frac{\bar{I} dl \sin \theta}{r^2}$$

或

$$dB = \mu \frac{\bar{I} dl \sin \theta}{r^2} \quad (10)$$

式中 μ 為電線週圍介質之磁導係數，今假設其為常數。

設於圖 11(b) 中，欲求 P 點之磁流密度，直線之長為 $(l_1 + l_2)$ 呎，與 P 點垂直距離為 p 呎， l_1 及 l_2 為在垂直線 p 各邊之長，若此線上之電流為 \bar{I} 安，則從第(10)式可得 dl 在 P 點發生之磁流密度為

$$dB = \frac{\mu \bar{I} dl \sin \theta}{l^2 + p^2} = \frac{\mu p \bar{I} dl}{(l^2 + p^2)^{\frac{3}{2}}}$$

而總磁流密度為

$$B = \mu p \bar{I} \int_{-l_2}^{+l_1} \frac{dl}{(l^2 + p^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{\mu \bar{I}}{p} (\sin \alpha_2 + \sin \alpha_1) \quad (11)$$

若線之兩端之長無限，則 $\sin \alpha_2 = \sin \alpha_1 = 1$ ，故

$$B = \frac{2 \mu \bar{I}}{p} \quad (12)$$

若此線在空氣中 ($\mu = 1$)，則(12)為

$$B = H = \frac{2\bar{I}}{p}$$

是即距此線之軸等距離之各點，其磁場強度均相等，而磁場之方向，則與以此導線軸為中心而其平面與此線垂直之圓週相切，故此種圓圈即為磁力線圈。

例：有一蓄電池粗其放電定額 (discharge rating) 為 10,000 安，

用 1×10 吋之匯電條 (bus-bar) 接至電鑰板 (switchboard) 上, 兩匯電條中心之距離為 6 吋, 其 10 吋之面相並豎立。假設電流皆集於截面之中心, 問支持匯電條之托架, 須相距若干, 庶匯電條不致偏斜過 $1/4$ 吋?

設第 13 圖為匯電條之截面。假定匯電條甚長, 為通常之用, 即作為無限長度計算。電流之方向如圖所示, 一點為矢頭, 代表電流流出, 十字為矢尾, 代表電流流入。因 a 條上電流之作用, 故 b 條中點之磁流密度, 依 (12) 式, $\mu=1$, 得

$$B = \frac{2\bar{I}}{p} = \frac{2 \times 10,000}{6 \times 2.54 \times 10} = 131.2 \text{ 高}$$

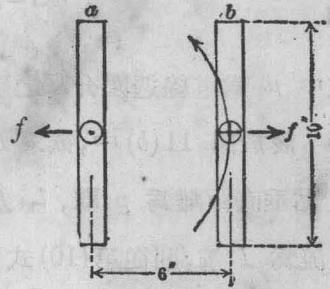
磁力線之方向如曲線矢。應用弗來明左手定則, b 受向右之力, 同理, a 受向左之力, 此兩力適相反。實際上兩並行導線通以不同方向之電流時, 各相推拒, 理論與事實相符。

在 b 條上每吋長度所受之力, 依 (8) 式為

$$\begin{aligned} f &= Bl\bar{I} = 131.2 \times 2.54 \times \frac{10,000}{10} = 333.333 \text{ 達/吋} \\ &= 0.749 \text{ 磅/吋} \end{aligned}$$

此處之匯電條乃相當於一勻布負載之梁 (beam)。今為簡單起見, 更假設其兩端固定 (此兩端即與托架連接之點), 則照力學上之公式, 其偏斜為

$$\delta = \frac{wl^4}{384 EI}$$



第 13 圖 匯電條之截面

式中 w 爲每單位長度間之負載， l 爲兩支點之距離， E 爲彈性係數 (modulus of elasticity)， I 爲轉動慣性 (moment of inertia)。此處 $I = \frac{1}{12}bh^3$ ， b 爲匯電條之寬度 (10 吋)， h 爲深度 (1 吋)。將 $\delta = 1/4$ 吋， $w = 0.749$ 磅/吋， $E = 15 \times 10^6$ (硬紫銅之值) 及 $I = 1/12 bh^3 = 5/6$ ，代入上式中，得 l 之長爲 200 吋 = 16 呎 8 吋。

1-11. 單位電流，單位電量 電流之絕對單位爲安，已如前述，但實際上通用之單位，則爲安[培]，即十分之一安。照以前之定義，電流不能精確量得，故今另有一定義如下：安[培]之定義爲不變之電流能於每秒鐘內自純粹之硝酸銀 (silver nitrate) 溶液中澱積 0.001118 克之銀。同樣，一安之電流，每秒鐘可自硝酸銀溶液中澱積十倍之銀。

電量絕對單位之定義，爲以一安之電流通過導線截面時一秒鐘內經過之電量。此單位謂之絕對庫侖或連 (abcoulomb)。但在實際上常用之單位爲在一秒間一安電流通過導體之電量。謂之庫侖 (或簡作庫)。故

$$1 \text{ 連} = 10 \text{ 庫}$$

普通而言，若導體之截面中之電流時時變動，則電流爲

$$I = \frac{dQ}{dt}$$

若電流不變，則上式變爲

$$I = \frac{Q}{t}$$

1-12. 應電勢之大小 用絕對電磁單位時，如在電場或電路中之兩點，以一單位之電量 (即連)，自此點移至彼點，須用一單位之工作 (即爾[格] erg)，則此兩點間即有一絕對單位之電位差，謂之絕對伏特或

迭(abvolt)。如是，若有 \bar{Q} 連，自一點移至另一點，兩點間之電位差設為 \bar{E} 迭，則其工作為

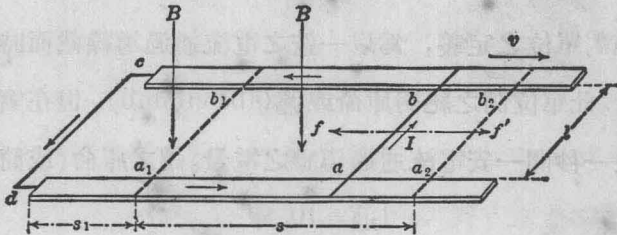
$$W = \bar{E}\bar{Q} \text{ 爾}$$

若此工作在 t 時間內完成之，則工率(power 或 rate of doing work)，當為

$$P = \frac{W}{t} = \bar{E} \frac{\bar{Q}}{t} = \bar{E}\bar{I} \text{ 爾/秒} \quad (13)$$

蓋 $\bar{Q}/t = \bar{I}$ ，已於第 1-11 節中論及之。

如第 14 圖，磁場之力線 B 與 $abcd$ 平面垂直。設 ab 之長為 l



第 14 圖 磁場中之移動導體

，經過此力線 B 向右移動之速度為 $v = ds/dt$ 呎/秒。磁場之均勻或速度之固定，並不重要，僅磁力線 B 在極微時間 dt 經過極微距離 ds 時，必須均勻。依照法拉第之定律，其間當發生電勢 \bar{E} 迭，而有 \bar{I} 迭之電流流通。如此工率為每秒 $\bar{E}\bar{I}$ 爾，而在 dt 時間之工作將為

$$dW = \bar{E}\bar{I}dt \text{ 爾}$$

在電線 ab 中之電流 \bar{I} ，發生向旁之力為

$$f = Bl\bar{I} \text{ 達}$$

而其作用向左，因之欲勝此力經過 ds 之工作當爲

$$dW = f ds = Bl \bar{I} ds$$

若照能力不滅之定理，

$$\overline{EI} dt = Bl \bar{I} ds$$

或 $\overline{E} = Bl ds / dt = Blv$ 伏 (14)

方程式(14)內 $Bl ds$ 表示在 dt 時間內所切磁力線之數；故電勢之絕對單位，即等於磁力線每秒被切之數。如磁強度與電線速度，均勻不變。即 B 與 v 均爲常數，從方程式 $\overline{E} = Blv$ ，可知絕對電勢，即等於每秒鐘所截切磁力線之數。普通 B 與 v 每處每時均有變更，即其電勢亦時時變換，但其絕對值恆等於該時間磁力線之截切率。其關係可以方程式代之如下：

$$\overline{E} = \frac{d\phi}{dt}$$

式中 $d\phi = Bl ds$ 即爲在 dt 時間內，所截切磁力線之數，此爲法拉第電磁感應定律之普通方程式。

設此線自 $a_1 b_1$ 起移至 $a_2 b_2$ 。起初與周路 $a_1 b_1 c d$ 相鏈之磁流爲

$$\phi_1 = Bl s_1$$

至最後點所包含之磁流則爲

$$\phi_2 = Bl (s_1 + s)$$

故因此線移動而得磁流之變更爲

$$\phi = \phi_2 - \phi_1 = Bl s$$

若此變更之時間爲 t 秒，則平均之變更率當爲

$$\frac{\phi}{t} = Bl \frac{s}{t} = Blv (\text{平均值}) = \overline{E} (\text{平均值})$$

換言之，應電勢之平均值，即等於電路所鏈之磁流之平均變更率。

若與磁流相鏈之電路有 N 匝。則在任何時間因磁流變更而感應絕對電勢之數值為

$$\overline{E} = N \frac{d\phi}{dt} \text{ 迭}$$

但依侖茲定律，所應之電勢，可發生一電流，其方向與發生感應作用者相反，由此可知當磁流之變更為「正」（即漸漸增加時），電路中即感應有「負」電勢，反之亦然。因之

$$\overline{E} = -N \frac{d\phi}{dt} \text{ 迭} \quad (15)$$

電勢之絕對單位，可依(14)及(15)兩式中決定之。依(14)式，設一導線每秒間截切一磁力線，則應電勢為 1 迭；或依(15)式，則一匝連合之導線內，若所鏈流之變化，為每秒鐘一磁力線，則感應之電勢為 1 迭。

迭在實用上殊覺太小，故常用之單位為伏特（或簡作伏），即 10^8 倍於迭；故

$$1 \text{ 伏} = 10^8 \text{ 迭}$$

化第十五式為實用單位，得

$$\overline{E} = -N \frac{d\phi}{dt} \times 10^{-8} \text{ 伏} \quad (16)$$

按直流電路中之工率為

$$P = \overline{EI} \text{ 爾/秒}$$

其中 \overline{E} 與 \overline{I} 皆為絕對單位。若 E 與 I 皆為實用單位時，即得

$$P = (E \times 10^8) \left(\frac{I}{10} \right) = EI \times 10^7 \text{ 爾/秒}$$

但 10^7 爾/秒即等於一瓦〔特〕(watt)故

$$P = EI \text{ 瓦} = \frac{EI}{1000} \text{ 瓩}$$

電勢之標準，可用「伏特電池」(voltaic cell)；此種電池，校準電壓計時常用之。標準衛司登電池 (Weston cell) 在 20°C . 斷路時，其電勢為 1.01830 伏。克拉克電池 (Clark cell) 在 15°C . 斷路時，則有 1.4328 伏。此種電池之構造說明。見美國標準局報告第四卷 (1907)。

1-13. 電阻，歐謨定律 (Ohm's law) 焦耳定律 (Joule's law) 若將原電池組或次電池組插入電路中，使電流得由電池組與外電路流通，此電流同時使電路各部生熱，而此耗損之能力，即由電池組中之化學能力供給之。熱之發生，乃因電流經過電路時遇有電阻，此電路中之電阻，亦猶水力中之磨擦阻力然。在一均勻導線，設其長為 l ，截面為 a ，則電阻與長度成正比例，而與截面成反比例，

$$r = \rho \frac{l}{a} \text{ 歐} \quad (17)$$

式中 ρ 為常數，謂之電阻係數 (resistivity)。照此公式，若 l 及 a 均等於一，則 $r = \rho$ ，是故電阻係數即為單位截面及單位長度之物質之電阻。一種物質在一定之溫度時，其電阻係數不變，但溫度變更時，即隨之而變。電阻係數與溫度之關係，可以近似式表之如下：

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha t) \quad (18)$$

其中 ρ_0 爲 0°C . 時之電阻係數, t 爲攝氏表 ($^\circ\text{C}$.) 相當於 ρ 時之溫度 α 爲一常數, 曰溫度係數。此係數在某種物質爲正數, 在他種物質爲負數; 更有數種合金, 其係數幾爲零, 故常用以製造儀器, 俾電阻不因溫度而變更。

設於方程式(17)中, 長度爲呎, 截面爲平方呎, 則 ρ 爲每立方呎之電阻。在溫度 20°C . 時, 煉銅爲 1.724×10^{-6} 歐。美國通用呎爲線長單位, 圓呎(circular mil) 爲截面單位, 故 ρ 將爲每圓呎呎(或簡稱每呎呎)之電阻。如一圓直徑爲一呎(0.001 吋), 其面積卽爲一圓呎, 如直徑爲 d 呎時, 其面積卽爲 d^2 圓呎。在 0°C . 時, 商用煉銅每呎呎之 ρ 值爲 9.59 歐, 在 20°C . 時, 爲 10.40 歐。

在(18)式中, 商用銅溫度係數爲 0.00427。溫度降低時, 電阻亦減。如(18)式能適用於任何溫度, 則 $(1+0.00427 t) = 0$, 或 $t = \frac{-1}{0.00427} = -234.5^\circ$ 時, 電阻可減至爲零。實際上在此溫度電阻不能爲零, 故方程式(18)不能適用於極高或極低之溫度。但在普通常用溫度內, 此式已甚精確, 將 α 數值代入(18)式中, 可得

$$\rho = \rho_0 \frac{234.5 + t}{234.5}$$

或可寫作

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{234.5 + t_1}{234.5 + t_2}$$

上式中 ρ_1, ρ_2 各爲在 t_1, t_2 溫度時之電阻。

美國線規(A. W. G.)各號線之標準尺寸數值, 茲列如下表:

表 I 美規銅線表

線規號數 A. W. G. 或 B. & S.	直徑 (吋)	截面 (圓吋)	每千呎 (磅數)	每千呎 歐數 (75°F.)
0000	460.0	211,600	639.3	0.04906
000	400.6	167,805	507.0	0.06186
00	364.8	133,080	402.1	0.07801
0	324.8	105,538	318.9	0.09838
1	289.3	83,694	252.9	0.12404
2	257.6	66,373	200.5	0.15640
3	229.4	52,634	159.0	0.19723
4	204.3	41,742	126.1	0.24869
5	181.9	33,102	100.0	0.31361
6	162.0	26,250	79.32	0.39546
7	144.3	20,816	62.90	0.49871
8	128.5	16,509	49.38	0.62881
9	114.4	13,094	39.56	0.79281
10	101.9	10,381	31.37	1.0000
11	90.74	8,234	24.88	1.2607
12	80.81	6,530	19.73	1.5898
13	71.96	5,178	15.65	2.0047
14	64.05	4,107	12.44	2.5278
15	57.07	3,257	9.84	3.1150
16	50.82	2,583	7.81	4.0191
17	45.26	2,048	6.19	5.0683
18	40.30	1,624	4.91	6.3911
19	35.88	1,287	3.88	8.0654
20	31.96	1,022	3.09	10.163
21	28.46	810.1	2.45	12.815
22	25.35	642.7	1.94	16.152
23	22.57	509.5	1.54	20.377
24	20.10	404.0	1.22	25.695
25	17.90	320.4	0.97	32.400
26	15.94	254.0	0.77	40.868
27	14.20	201.5	0.61	51.519
28	12.64	159.8	0.48	64.966
29	11.26	126.7	0.38	81.921
30	10.03	100.5	0.30	103.30
31	8.928	79.71	0.24	127.27
32	7.950	63.20	0.19	164.26
33	7.080	50.13	0.15	207.08
34	6.304	39.74	0.12	261.23
35	5.614	31.52	0.10	329.35
36	5.000	25.00	0.08	415.24
37	4.453	19.83	0.06	523.76
38	3.965	15.72	0.05	660.37
39	3.531	12.47	0.04	832.48
40	3.144	9.89	0.03	1,049.7

如無上表,若能記憶下列關係,則可推知其大概:

1. 十號線有直徑 100 呎(0.1 吋), 截面為 10000 圓呎, 在普通室內溫度, 每千呎電阻為一歐(注意十位數關係)。

2. 線規每大三號截面大一倍, 每小三號則減半。

3. 線規每大十號, 截面增大十倍。

設在一簡單之通路中, 其電阻不變, 而電勢常使其變動, 則通過之電流, 即與電勢成正比例。此實驗之結果, 謂之歐謨定律。更可用方程式表之如下:

$$\left. \begin{array}{l} I = \frac{E}{R} \\ E = IR \end{array} \right\} \quad (19)$$

或

式中 R 為電路之電阻。若 I 與 E 各為安及伏數, 則電阻為歐謨或簡作歐(ohm); 但若 I 為茲, E 為迭, 則電阻亦為邁(abohm), 因此可得單位電阻之定義如下: 如有一單位之電勢加於一電阻之兩端, 而能使電阻中有一單位電流經過者, 此電阻為一單位電阻。

自(19)式, 可知電勢, 電流及電阻三種單位, 互有關係。若三者中已定其二, 則他一單位即依之而定。萬國公議, 僅規定電流及電阻兩種單位為基本。電流之單位(安), 前節已詳述之, 即在規定之情形中, 每秒能澱積銀 0.001118 克所需之電流。電阻單位(歐)之定義如下: 如以恆流經過長 106.300 呎, 重 14.4521 克之水銀柱(其截面均等, 且溫度在溶冰點), 其所呈之電阻即為單位電阻。

設在電路中有 E 伏電勢, 可使 I 安之電流通過, 則工率為

$$P = EI \text{ 瓦} = EI \times 10^7 \text{ 爾/秒}$$

但依歐謨定律 $E = IR$, 故

$$P = I^2 R \times 10^7 \text{ 爾/秒}$$

此式乃表示 R 歐電阻體中所耗之工率。若電流不變, 則在 t 秒間電路所供給之能, 完全變成熱氣而四散, 即

$$W = Pt = I^2 R t \times 10^7 \text{ 爾}$$

但 10^7 爾等於 1 焦(耳) (Joule) 而 1 焦/秒等於一瓦。故上式可寫作

$$\left. \begin{aligned} W &= I^2 R t \text{ 焦} \\ P &= I^2 R \text{ 瓦} \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

以上二方程式, 皆為焦耳定律之數學方式。若以文字表之, 則曰: 在一定之時間內, 電阻體所發生之熱, 與其電阻及電流之平方成正比例。約在 1843 年, 焦耳 首先宣佈此定律, 同時實驗結果, 又求得熱之機械當量或等值, (或稱焦耳當量 Joule's equivalent), 即 4.19×10^7 爾之工作可使一克之水升高攝氏一度。

1-14. 電勢與電位差 設有一電池組, 無論其為原電池組或次電池組, 當其在斷路時。電池中因化學作用, 發生電勢, 結果此電勢遂排擠一種不可再分之負電小點名曰電子者, 使自正極向負極移動。至此若與平常時電池中無電解液者比較, 則此電子移動之結果, 遂使陰極上較原來增多電子, 而陽極上之電子則逐漸減少。兩電極間不同之情形, 正如兩氣箱間以抽氣機 (pump) 联接, 將空氣自一箱抽出而打入另一箱者然。如是兩箱之壓力既殊, 則高壓之氣, 必有欲回向半空箱流通之勢。然當抽氣機運用時, 此種作用, 必為抽氣機所阻, 而不克實現。同理, 陰極之電子因逐漸加多, 亦有欲流向電子稀少之陽極之傾向, 但為電池中之化

學作用所阻，而亦不能實現。在緊壓氣箱中，每個空氣小點均為箱中之其他小點所排斥，而呈現折裂之趨勢，若抽氣機運用不已，則結果必使氣箱爆裂。在電氣方面亦然，由以前之證明，知同性者相拒，故在陰極之負電子，與其他負電子亦必互相反抗，而呈電氣破裂之傾向，若此作用進行不已，則必致絕緣（insulation）破損，而構成一火花放電現象（spark discharge），以均和其間之電壓。

在以上所討論之氣壓（pneumatic）狀態中，尚無一專門名詞，以狀此抽氣機之作用。上述之抽氣機，僅用以傳送空氣，自抽開箱（suction chamber）至壓入箱（compression chamber），待緊壓箱中放氣之傾向，適與抽氣機之壓力相抵，則空氣傳送之工作即停止，而入於平衡狀態。但在電氣現象中，其電池組之作用，使電子自正極流向負極之因，謂之此電池組之電勢，而兩極所呈之電壓之差，謂之電位差，或簡稱位差，（p. d.）。由此可知兩極間，若有電位差時，即有發生電流之趨勢，蓋純由負極上之電子，互相排拒，有以致之。

當兩極間之電壓舉行均和現象時，則連接兩電極之導線上，即有電子自負極流至正極。但普通所認為電流之方向，以為自正至負，不幸恰與事實相反。然吾人使用自正至負之習慣，相沿已久，牢固人心，實遠在最新電子論進化之先也。

同時尤有一不幸之事，即上述『電勢』據原文 electromotive force 當直譯為『電動力』，然實際上，電勢并非如力學上所稱之力。此處電動力之力，僅足以示其作用，蓋如上所論，當電子由正極傳至負極時，必須用力以抗原先已移電子之拒力，猶之高壓箱之壓力增加時，則抽氣機所

施之壓力亦當增加也。故電勢為傳送電子之因，而兩極間之電位差，則為其果。此二者皆採用同一單位量之，在絕對單位制中為迭，在實用單位制中為伏。試回觀第 1-12 節，可知兩端間伏之電位差，即謂 1 連之電量，自一極移至另一極須用 1 爾之工作；同樣，若兩極間之電位差為一伏，則移動一庫電量所需之工作，當為 1 焦。由此可知，電勢及電位差，皆為每單位電荷 (charge) 之工作，而絕對與力不同。

上述關於電池組內電勢之種種，亦得適用於因電磁作用而生之電勢。在電池組方面言，此作用之成因，純由於電池組兩極之物質，發生化學反應而起；在電磁感應方面言，則此傳送電子之因，係由於導線內之電子與組成磁場之以太應力 (ether stresses) 間，具有一種不可思議的反應，有以致之。

電路中『正』『負』二字之稱，來自電氣雙流體說 (two fluid theory)。最近之電子學說，與富蘭克林 (Franklin) 之單流體說 (one fluid theory) 相仿；所不同者，僅富氏以為正電者，現已多方證明其為負電耳。依電子論，負極之電位，當較正極為高，故在連接兩極間之電路，電子之流向為自負至正。但在普通術語中，因相沿成習，則仍定電子流動之方向，為由正至負，而假定正極之電位高於負極。如此，當電流由電池組內流出，經過一接合導線周路，而再回歸電池中時，在電池外之周路中，必有一電位落，其方向為由正至負；同時在電池內，必有一電位昇，其方向為由負至正，而此位昇即由於電勢。

1-15. 普通化之歐謨定律 設圖 15(a) 為一簡單之電路，有一電池組 (或其他電源)，其電勢為 E 伏，內阻 (internal resistance) 為 r 歐，

其外電路之電阻為 R 歐，則總共電阻為 $(r+R)$ 歐。依歐謨定律，經過全路之電流為

$$I = \frac{E}{r+R} \text{ 安}$$

此方程式可寫作

$$E = Ir + IR$$

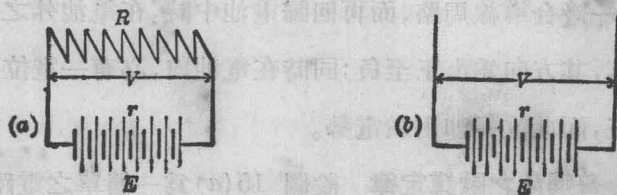
由此可知電源所發生之電勢，乃用以供給：(1) 電源自己之電位降落 Ir ，此與抽水機使水環流時之壓力降落相似；(2) 外電路之電位降落 IR 。後者即等於兩端之電位差，可用伏計 (voltmeter) 量得，其式可表之如下：

$$V = IR = E - Ir \quad (21)$$

故兩端之電位差等於電池組之電勢，減去其內部電位降落。如圖 15(b)，外電路開斷(外電路之阻 R 為無限大)，電流等於零，則 $V = E$ 。方程式(21)又可寫作

$$E - Ir - IR = 0 \quad (22)$$

即謂經過電源時，因有效電勢(active e. m. f.)而電位 E 上昇(設為正)，經過電阻 R 及 r 時，則電位降落 IR 及 Ir (設為負)。



第 15 圖 簡單串聯電路

以上所述，爲一電路含有效電源之電勢，及吸收電量之外電路之情形。設圖 15(b)之蓄電池組有內電勢 E 伏。今欲另用一不變之電源向之充電，且使電線兩端之電位差保持爲 V 。電池組之有效電勢 E 既與 V 相反，故 V 之一部分應與 E 相抵，而另一部分須足以供給經過電阻 r 之電位降落；即

$$V = E + Ir \quad (23)$$

(21) (22) 及 (23) 各式皆較(19)式普通，故可謂爲普通化之歐謨定律。

如上所述之簡單串聯電路，在電機工程中時常遇到，惟大電路皆較複雜，含有串聯，並聯及混聯 (series parallel) 各種電路。

串聯路 當數電阻體串聯時，如圖 16，其總電阻爲各小部分電阻之和，或

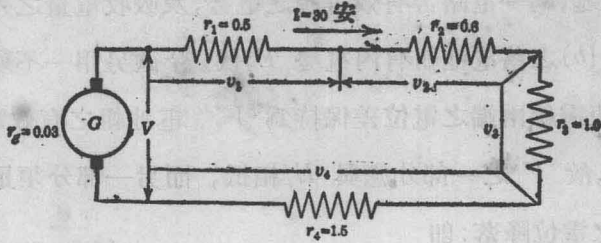
$$R = r_1 + r_2 + r_3 + \dots \quad (24)$$

其中 R 爲總電阻， r_1, r_2, r_3 等爲各部之電阻。設有 I 安之直流電經過此電路，則正極至負極總共之電位降落爲

$$\begin{aligned} V &= IR = Ir_1 + Ir_2 + Ir_3 + \dots \\ &= v_1 + v_2 + v_3 + \dots \end{aligned} \quad (25)$$

其中 v_1, v_2, v_3 等乃各部分電阻體之電位降落。

例如圖 16 串聯電路內，發電機 G 以外之總電阻爲 $R = r_1 + r_2 + r_3 + r_4 = 3.6$ 歐，兩端電位差爲 $V = IR = 108$ 伏。各電阻體 r_1, r_2, \dots 等之電位降落爲 $v_1 = 15, v_2 = 18, v_3 = 30, v_4 = 45$ 伏，發電機自身電位降落爲 $Ir_g = 30 \times 0.03 = 0.9$ 伏，故所發電勢 $E = V + Ir_g = 108.9$ 伏。此即等於



第 16 圖 串聯之電阻

$$E = I(r_g + r_1 + r_2 + r_3 + r_4) = 30 \times 3.63 = 108.9$$

此與歐謨定律相同。

並聯路 當數電阻體 (其中無電源者) 並聯時,其總電導 (conductance) 為各部電導之和。按電路之電導為其電阻之倒數,故得

$$\therefore \frac{1}{R} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} + \dots \quad (26)$$

電導之值常用 G 或 g 代之,故

$$G = g_1 + g_2 + g_3 \dots$$

設兩端之電位差為 V 伏,

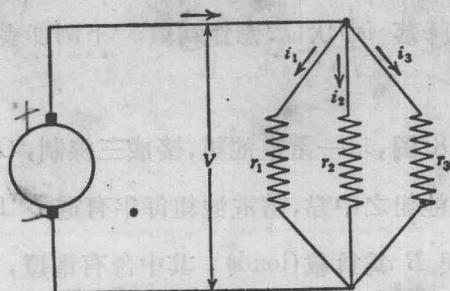
$$I = \frac{V}{R} = GV = V(g_1 + g_2 + g_3 + \dots)$$

$$= \frac{V}{r_1} + \frac{V}{r_2} + \frac{V}{r_3} + \dots$$

$$= i_1 + i_2 + i_3 + \dots \quad (27)$$

其中 i_1, i_2, i_3 等,皆為各部電路中之電流。

1-16. 啓旭夫定律 (Kirchhoff's Laws) 配電路及電動機或發電機中之線路,謂之網絡 (network)。網絡者即複雜電路中有多數連合迴



第 17 圖 並聯之電阻

環或線絡 (loop or mesh) 及其接點者，如圖 21 所示。但無論何種情形之下，各部網路之電阻體或他種傳導電體，均為串聯，並聯成混聯。計算網絡中各部導線之電流可根據二實驗之結果，所謂啓旭夫定律是也。

1. 網絡中諸導線之接點，其電流之代數和等於零。

2. 網絡中任何連合電路中電位降落之代數和等於零。

第一定律即謂於網絡之任何接點，電流之流向是點者，其和適等於由是點流出之量。不然，則此點之電荷，即將更變，而此點之電差亦隨之而變，然實際上在穩定狀態下並無此種現象。

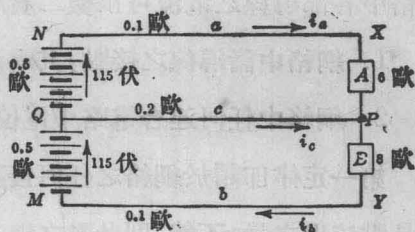
第二定律，即為普通化之歐謨定律。確言之，此普通公式包含在特種情形下之歐謨定律。

應用第二定律時，最好先繪一表示網絡之圖，於每一有效電勢處（電池組或發電機），作一記號以示其數量，並畫一矢以示其作用之方向；並於每一導線上作一記號表示電流之量，並畫一矢以假定電流之方向。設在連合迴線中以順時針向 (clockwise) 為正方向（雖有時為便利計，亦有以反時針向為正方向者），則任何有效電勢之順時針向者為正，即在正方向有一電位具高。若有 i 安之電流，依正方向經過 r 歐之電

阻體，則得一電位降落 i_r 伏，故應作為負。下例即表明以上二定律之應用。

例 1：第 18 圖，示一蓄電池組，接成三線制， G 為中線 (neutral wire)，接於蓄電池組之中點，蓄電池組每半有電勢 115 伏，方向如圖中矢向所示。 A 與 B 為負載 (load)，其中含有電燈，電爐或其他不含有效電勢之電氣用品，而電阻各為 6 及 8 歐。電線 a 及 b 各有 0.1 歐之電阻，中線之電阻為 0.2 歐。蓄電池組每半部電阻 0.5 歐。試求各線中之電流。

題中有三未知數，須立三獨立方程式，方可解答。設在 P 點應用第一定律立一式，其二式可就右圖之上下兩迴環 (loop) 內應用第二定律求得之，故三式為



第 18 圖 導線網絡

$$i_a + i_c = i_b$$

$$+115 - i_a(0.5 + 0.1 + 6) + 0.2 i_c = 0$$

$$+115 - 0.2 i_c - i_b(8 + 0.1 + 0.5) = 0$$

從以上三獨立方程式，即得求得 $i_a = 17.31$ ， $i_b = 13.47$ 及 $i_c = -3.84$ 。 i_c 為負號，故知電流 i_c 之方向與所假定者適相反。根據第二定律立式時，對於連合電路選擇須特別注意，否則最易混亂。如圖 18 所示之 MQN $XPYM$ 電路內，照第二定律可立式如下：

$$+115 - i_b(8 + 0.1 + 0.5) + 115 - i_a(0.5 + 0.1 + 6) = 0$$

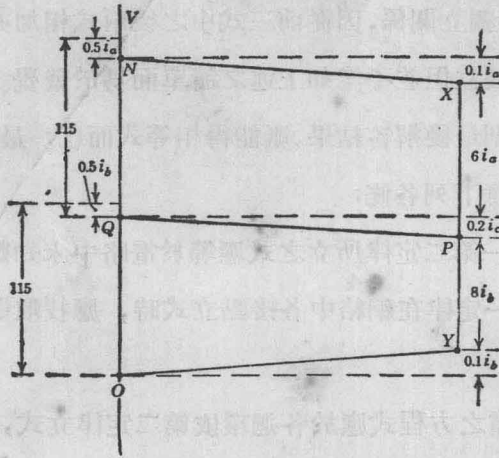
此式並不能表示獨立關係，因從前三式中之後兩式相加亦可得之。有時所立之式，不能獨立但並不能如上述之簡單而易於發覺。若諸式中有一二式不能獨立，則最後解答結果，祇能得相等式而已。最複雜之網絡之正當解法，應注意下列各條：

(a) 應用第一第二定律所立之式應等於電路中未知數之數目。

(b) 應用第一定律在網絡中各接點立式時，應找取關係獨立之式，而免去重複者。

(c) 其餘必需之方程式應於各迴環依第二定律立式，每迴環所佔網絡，必有一新部分為已往立式迴環中未曾包括者。

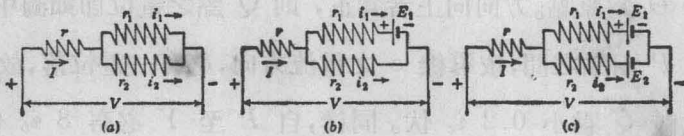
於書寫及校對此種普通方程式時，若能作一電位圖 (potential diagram) 以資對照，頗為有用。如第 18 圖之蓄電池組，假下端 M 之電位為零 (此點作為通地)，則上端在無電流時電位當為 $+115$ ，若有電流則較低。此有電流與無電流時電位之差，乃代表蓄電池組內部之電位降落；在上例中，此值為 $0.5 i_b$ 伏。設第 19 圖中之直線 OV 代表電位 (伏)， O 為原點。方向向上者為正，則 Q 點之電位即如圖中所示。在 Q 與 P 兩點之間，依導線 c 之電流方向，必有一電位落，故 P 點之電位當較 Q 點小 $0.2 i_c$ 伏。同樣，自 P 至 Y 必有 $8 i_b$ 伏之電位降落， Y 至 O 有 $0.1 i_b$ 伏之電位降落；此乃按電流 i_b 之假定方向而言。至作圖之起點 O ，依啓旭夫第二定律，必有最後之閉合，庶成一完全周路。同理，自 Q 至 N 有一電位昇，其值等於 115 伏減去蓄電池 QN 內之位落 $0.5 i_a$ ；而 N 至 X 之位落為 $0.1 i_a$ 伏， X 至 P 為 $6 i_a$ 。 P 點既為一定點，故多邊形至此必須閉合。第 19 圖不僅可以列



第 19 圖 圖 18 中周路之電位圖

出若干方程式予吾人以解決習題之援助，且能表示其物理意義：如改變電路中之常數，則影響於 PX 與 PY 之電位差，殊為顯然。由此且可知 PX 或 PY 之一邊有時或可超過發電機之電勢，亦屬易事。

例 2：試表明第 20 圖中 (a) (b) 與 (c) 各部電路支路中所含之有效電勢之影響。



第 20 圖 混聯周路

(a) 第 20 圖中 (a) 之總電阻為

$$R = r + \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}$$

其總電流為

$$I = \frac{V}{R} = \frac{V}{r + \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}}$$

而

$$i_1 = \frac{V - Ir}{r_1} = \frac{V}{R} \frac{r_2}{r_1 + r_2}$$

$$i_2 = \frac{V - Ir}{r_2} = \frac{V}{R} \frac{r_1}{r_1 + r_2}$$

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{r_2}{r_1}$$

(b) 應用啓旭夫定律於第20圖(b),

$$I = i_1 + i_2$$

$$V = Ir + i_1 r_1 + E_1$$

$$V = Ir + i_2 r_2$$

於是

$$i_1 = \frac{V r_2 - E_1 (r_1 + r_2)}{r (r_1 + r_2) + r_1 r_2}$$

$$i_2 = \frac{V r_1 + E_1 r}{r (r_1 + r_2) + r_1 r_2}$$

$$I = \frac{V - E_1 \frac{r_2}{r_1 + r_2}}{r + \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}}$$

由上列三式,可知支流 i_1 與 i_2 不復與支路電阻成反比,而總電流亦不等於外加電壓除以總電阻之商數。

(c) 應用啓旭夫定律於第 20 圖(c),

$$I = i_1 + i_2$$

$$V = Ir + i_1 r_1 + E_1$$

$$V = Ir + i_2 r_2 + E_2$$

於是

$$i_1 = \frac{V r_2 - E_1 (r + r_2) + E_2 r}{r (r_1 + r_2) + r_1 r_2}$$

$$i_2 = \frac{V r_1 - E_2 (r + r_1) + E_1 r}{r (r_1 + r_2) + r_1 r_2}$$

$$I = \frac{V (r_1 + r_2) - E_1 r_2 - E_2 r_1}{r (r_1 + r_2) + r_1 r_2}$$

以上表明並聯之支流，若其中 E_1 與 E_2 之值不同時，即不能與其電阻成反比。倘 E_1 與 E_2 之數值相等，符號相同，即

$$E_1 = E_2 = E$$

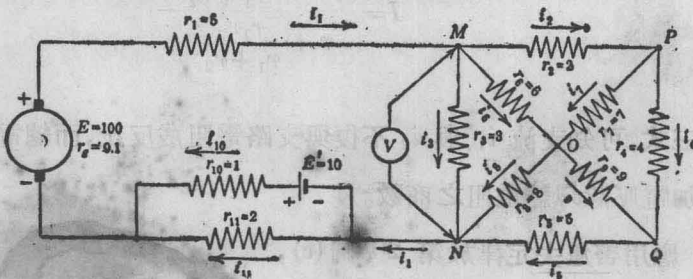
則

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{V r_2 - E (r + r_2) + E r}{V r_1 - E (r + r_1) + E r} = \frac{r_2}{r_1}$$

$$I = \frac{V - E}{r + \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}}$$

在此種情形下，可按方程式(24)與(26)式，將電阻合併之。

例 3： 試從第 21 圖中繁複電路，求其各支路之電流。此中有十



第 21 圖 網絡——混聯之周路

一個未知數，故須有十一個聯立方程式，方可依照上法解答之。圖上右方之八個電阻可視作一簡單電阻體 R ，其電阻須適合。

$$R = \frac{V}{i_1}$$

如 V 與 i_1 均為已知，則八個支路內電流，即可從八個方程式內求得之。

如在以下各接點 M, N, P, Q 應用第一定律立式，可得

$$(M) \quad i_1 = i_2 + i_6 + i_8$$

$$(N) \quad i_1 = i_3 + i_8 + i_5$$

$$(P) \quad i_2 = i_4 + i_7$$

$$(Q) \quad i_5 = i_4 + i_9$$

在各迴環應用第二定律立式可得，

$$(MON) \quad -6i_6 - 8i_8 + 3i_3 = 0$$

$$(MPO) \quad -2i_2 - 7i_7 + 6i_6 = 0$$

$$(PQO) \quad -4i_4 + 9i_9 + 7i_7 = 0$$

$$(QNO) \quad -5i_5 + 8i_8 - 9i_9 = 0$$

(注意，在接點 O 應用第一定律立式，並不能得獨立方程式)。

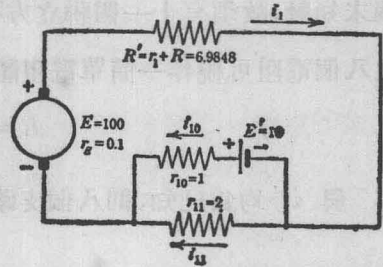
解方程式時應注意 M 至 N 間電位差，或 $i_3 r_3 = 3i_3$ ，必等於 V ，此即

$$i_3 = \frac{V}{3}$$

將 i_3 之值代入，其他電流值，即可從 V 求得之。依此可得

$$\frac{V}{i_1} = R = 1.9848$$

此即上圖右方網絡 MN 兩點間之當量電阻 (equivalent resistance)。圖 21 可完全以相當圖 22 表之，應用啓旭夫定律可得。



第 22 圖 相當於圖 21 之周路

$$i_1 = i_{10} + i_{11}$$

$$E + E' - i_1(r_g + R') - i_{10}r_{10} = 0$$

$$E - i_1(r_g + R') - i_{11}r_{11} = 0$$

或

$$110 - 7.0848 i_1 - i_{10} = 0$$

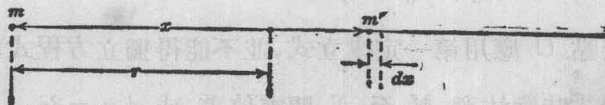
$$100 - 7.0848 i_1 - 2i_{11} = 0$$

故 $i_1 = 13.76$, $i_{10} = 12.51$, $i_{11} = 1.25$ 。此外各值，讀者可自解答之。

1-17. 磁位 (magnetic potential) 圖 23 示強度 m 與 m' 單位之二磁極，相距 x 呎，兩極之相拒力 $\frac{mm'}{x^2}$ 達。設 m' 磁極，在此力影響下

移動 dx 距離，則所做之工作當為

$$dU = \frac{mm'}{x^2} dx \text{ 爾}$$



第 23 圖 二磁極之位能

將二極自 r 呎分開至無窮遠時，其間所需之工作總量為

$$U = \int_r^\infty \frac{mm'}{x^2} dx = \frac{mm'}{r} \text{ 爾} \quad (28)$$

此中所做之工作，既非外加力所致，則 $\frac{mm'}{r}$ 所代表之工作，當係取自

$$mm' / x^2 dx = mm' \frac{x^{-1}}{-1} = -mm' \frac{1}{x} = -mm' \left(\frac{1}{r} \right)$$

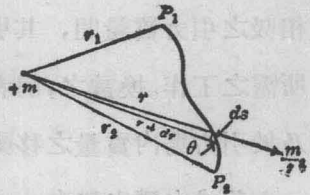
磁極之本身。故此工作即為二極間之儲藏能或位能 (potential energy)，亦即代表將一磁極自無窮遠移至與另一磁極相距 r 呎所需之工作，蓋上式亦可寫作

$$U = \int_{\infty}^r \frac{mm'}{x^2} (-dx) = \frac{mm'}{r}$$

而結果與前相同。若 $m'=1$ ，則 $U = \frac{m}{r}$ ，為一單位磁極與另一磁極 m 相距 r 呎時之位能；或即磁極 m 於 r 呎距離之磁位。

在磁場內，將一單位磁極自一點移至另一點，其所需之工作，可計算之如下：

設第 24 圖中， P_1 為單位磁極之始點， P_2 為其終點，二點間之途徑，為



第 24 圖 磁場中二點之磁位差

一任意曲線，則在曲線上之任一點，如與 m 相距 r 呎，其力必為 $\frac{m}{r^2}$ 。

此力之方向與 dx 所成之角度為 θ ，故經過 ds 距離所做之工作為

$$dU = \frac{m}{r^2} ds \cos \theta = \frac{m}{r^2} dr$$

而自 P_1 至 P_2 所需之總工作必為

$$U_{1-2} = \int_{r_1}^{r_2} \frac{m}{r^2} dr = \frac{m}{r_1} - \frac{m}{r_2} \quad (29)$$

但 $\frac{m}{r_1}$ 為 P_1 之磁位， $\frac{m}{r_2}$ 為 P_2 之磁位。故將一單位磁極自一點移至另一點，其間所需之工作，即二點間之磁位差，至其所經之途徑若何，實無關係。

若將一單位磁極自低磁位移至高磁位，則必須有外力加入，而所做

工作即為增加位能之用。若兩極可自由移動，且具有上述之位能，此潛藏之能力必將漸次消失，而用於彼此分離之拒力中。

以上所敘，若磁極 $+m$ 以一等磁而相反符號之 $-m$ 代之，則磁力與磁位各式之符號俱相反。前之推拒者，今則變為吸引，外加於磁極之工作，轉變為磁極所做之工作。此現象與二物體間之吸力同，其相吸之力與質量 (mass) 之乘積成正比，而與距離之平方成反比。在相吸之磁極間，其磁位能乃係使一磁極移至離另一磁極無窮遠時所需之工作。在相吸之引力質量間，其引力位能乃係使一質量移至離一質量無窮遠時所需之工作。換言之，前者所作之工作，乃由於磁場內磁極之移動；後者乃於引力場內質量之移動。

由前式之導出觀之，一點上磁位之值與方向無關，故磁位為一無向量 (scalar quantity)，非如磁場強度及力等之為有向量或矢量 (vector quantity)。但磁位與磁場強度間之關係，甚為有趣，可敘述如下：

一點與一磁極相距 r 處，其磁場強度為 m ，則此點之磁位為

$$U = \frac{m}{r}$$

$$= r^{-1} m = m(-1) r^{-2} = -\frac{m}{r^2}$$

將 U 對 r 取微分，則得

$$\frac{\partial U}{\partial r} = -\frac{m}{r^2}$$

但 $\frac{m}{r^2}$ 乃為磁極 m 在此點所生之磁場強度 H_r ，故

$$H_r = -\frac{\partial U}{\partial r} \quad (30)$$

通常如 U 為一點之磁位，而以此點之坐標函數表之，則此函數之第一

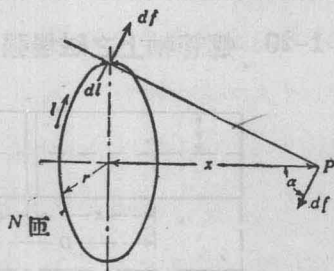
次導微，無論其對於任何方向 ρ ，即等於磁場強度沿方向 ρ 之成分，加一減號；即

$$H\rho = -\frac{\partial U}{\partial \rho} \quad (31)$$

1-18. 等位線與等位面 磁場內磁位相等之各點之軌跡，謂之等位面。等位面上連接等磁位各點之直線或曲線，謂之等位線。在等位面或線上，將磁極自一點移至另一點，可不須外加工作。因此，磁力線必與等位面直交，否則將有一分力沿交點之切線作用，而當磁極沿此面移動時，必需外加工作，但此乃違反假定，故不可能。

1-19. 圓線圈之磁場強度 第

25 圖中，設 P 代表單位磁極，在一 N 匝之平面圓線圈軸上，其圓圈之半徑為 r 呎。 P 與此線圈平面之距離為 x 呎。圈內之電流為 \bar{I} 安，故作用於圈上 dl 之力為



第 25 圖 線圈軸上之磁場強度

$$df = \frac{1}{r^2 + x^2} N\bar{I} dl$$

其作用之方向如圖所示；同時此極亦為一相等而相反之力所作用。將此力作二分力，其一與圈軸平行，其一垂直，垂直分力之和必等於零，因線圈兩對徑之元素 (element)，各有一垂直分力，彼此相等而相反。

df 之軸向分力為

$$dH = \frac{N\bar{I} dl}{r^2 + x^2} \cos \alpha = \frac{Nr\bar{I} dl}{(r^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}}$$

$$\frac{r}{r^2 + x^2} = \cos \alpha$$

於是

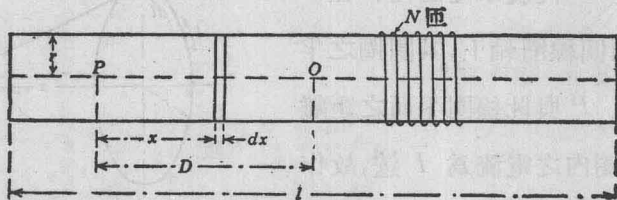
$$H = \frac{N \bar{I} r}{(r^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}} \int_0^{2\pi r} dl = \frac{2 \pi N \bar{I} r^2}{(r^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}} \\ = \frac{2 \pi N I r^2}{10 (r^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (32)$$

若 P 點在線圈之中心, $x=0$, 則

$$H = H_0 = \frac{2 \pi N \bar{I}}{r} = \frac{2 \pi N I}{10 r} \quad (33)$$

由此可得電流絕對單位(達)之定義如下:一達之電流,當其流過一匝半徑一呎之圓圈時,其對於在中心之一單位磁極所作用之力為 2π 達。

1-20. 螺管軸上之磁場強度 第 26 圖代表一 N 匝勻捲之螺管,



第 26 圖 螺管軸上之磁場強度

其長度為 l 呎。設 P 點在螺管軸上而距螺管中心 D 呎, 求此點之磁場強度。

在螺管上任取一元素截面段 dx , 與 P 點相距 x 呎。此元素可視為一 $\frac{N}{l} dx$ 匝之平面圓圈, 由此元素環在 P 點所生之磁場強度, 可依方程式 (32) 得之, 為

$$dH = \frac{2 \pi \left(\frac{N}{l} dx \right) I r^2}{10 (r^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}}$$

而總磁場強度即為

$$H = \frac{2\pi}{10} \frac{NIr^2}{l} \int_{-(\frac{l}{2}-D)}^{\frac{l}{2}+D} \frac{dx}{(r^2+x^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{2\pi}{10} \frac{NI}{l} \left[\frac{\frac{l}{2}+D}{\sqrt{r^2+(\frac{l}{2}+D)^2}} + \frac{\frac{l}{2}-D}{\sqrt{r^2+(\frac{l}{2}-D)^2}} \right] \quad (34)$$

若 P 點在螺管之中心，則 $D=0$ ，此方程式即化為

$$H_0 = \frac{2\pi NI}{10\sqrt{r^2 + \frac{l^2}{4}}}$$

若 l 較 r 甚大，即可寫作

$$H_0 = \frac{4\pi NI}{10l} \quad (35)$$

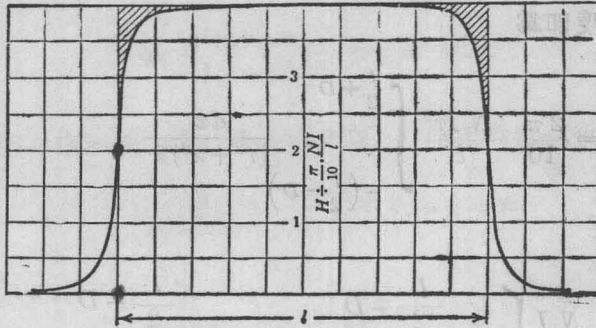
在螺管之兩端， $D = \frac{l}{2}$ 。若 l 較 r 甚大，則

$$H = H_e = \frac{2\pi NI}{10l}$$

即為中心點，磁場強度之半值。

第 27 圖表示沿螺管軸上 H 之變更，螺管軸長為其半徑之二十五倍，即 $\frac{r}{l} = 0.04$ 。 H_0 之真值為 $\frac{3.9872\pi NI}{10l}$ ，僅稍小於 $\frac{4\pi NI}{10l}$ ；

而 $H_e = \frac{1.9984\pi NI}{10l}$ 亦近 $\frac{2\pi NI}{10l}$ 。由此可見在螺管軸上之 H 大部



第 27 圖 磁場強度沿螺管軸之變更

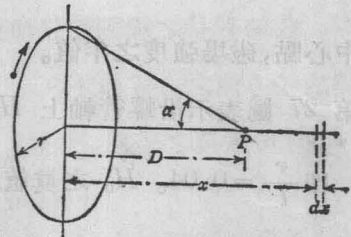
分均無變更，惟於兩端突然降落。

沿軸 H 變更之物理意義，可釋之如下：螺管捲內之磁力線，與中心相近者，類皆互相並行，故其中之磁場頗近均勻，而 H 幾為一常數；近螺管兩端之磁線其發散之情狀與第 1 圖同，發散度 (divergence) 愈大，則 H 之降減亦愈速。

1-21. 圓圈軸上之磁位 第 1-19 節曾論及圓線圈軸上距線圈面 x 點之磁場強度為

$$H = \frac{2 \pi N I r^2}{(r^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}}$$

此乃作用於 P 點單位磁極之力，而力之單位為達。第 28 圖中，設電流方向如矢頭所示，則單位磁極 (正極) 必受一向左 (即向圈) 拖曳之力。故欲使此極向右移 dx 之距離，當需



第 28 圖 圓圈軸上之磁位

$$dU = Hdx = \frac{2\pi N\bar{I}r^2 dx}{(r^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}} \text{ 爾}$$

之工作。欲將此極自距圈面 D 點移至無窮遠時，則所需之總工作必為

$$\begin{aligned} U &= 2\pi N\bar{I}r^2 \int_D^{\infty} \frac{dx}{(r^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}} \\ &= 2\pi N\bar{I} \left(1 - \frac{D}{\sqrt{r^2 + D^2}}\right) \\ &= 2\pi N\bar{I}(1 - \cos \alpha) \end{aligned} \quad (36)$$

其中 α 為圓圈對 P 點所成之圓錐之半角。但 $2\pi(1 - \cos \alpha) = \omega$ 為圓錐體頂點之立體角 (solid angle)，故

$$U = \omega N\bar{I} \quad (37)$$

若試極之磁場強度為 m 單位，則所需之工作當為上值之 m 倍，或

$$U_m = \omega m N\bar{I} \quad (38)$$

方程式 (37) 乃圈軸上任一點之磁位。若電流依圖中所示，此磁位即代表將一單位磁極移至無窮遠時所需之工作。若電流方向相反，則 U 為將單位磁極自無窮遠移至定點所需之工作。

1-22. 任何形狀之線圈在任何點之磁位之一般方程式 方程式 (38) 可變成較方便之方式如下：

自 m 單位強度之磁極，所流出之總磁流為

$$\Phi = 4\pi m \text{ 馬}$$

蓋磁極若在空氣中，相距 r 點處之磁場強度為 $H = \frac{m}{r^2}$ ，而其磁流密

度爲 $B = H = \frac{m}{r^2}$ 高。距 m 極 r 處各點之軌跡爲一圓球面，其面積爲

$4\pi r^2$ 方呎。故得經過此球面之總磁流爲

$$\Phi = B \times \text{面積} = \frac{m}{r^2} \times 4\pi r^2 = 4\pi m$$

磁流 Φ 既勻佈於全球面，故在立體角 ω 內之磁流 φ ，對於全部磁流之比，等於 ω 比 4π ，即

$$\frac{\varphi}{\Phi} = \frac{\omega}{4\pi} \quad m = \frac{\Phi}{4\pi}$$

或

$$\varphi = \omega m$$

故

$$U_m = \varphi NI = \lambda I \quad (39)$$

式中 $\lambda = \varphi N$ ，爲磁流與磁流所鏈匝數之乘積，謂之磁流鏈 (flux linkage)。換言之，電流在磁場中因某種作用而生之位能，等於電流 (迭數) 與磁流鏈之相乘積。

以上導得磁極位能與電流之關係，係假定磁極在圓線圈軸上移動，但吾人不難證明方程式 (37) 及 (38) 實有普遍性。蓋若第 29 圖之線圈，不論如何形狀，不限在一平面，而令 ω 爲任何處點極 (point pole) m 與此圈所成之立體角，則自 m 流出之磁流與此線圈相鏈者，爲



第 29 圖 任何形式線圈
所生之磁位

$$\varphi = \omega m \quad \text{馬}$$

今若使磁極移動，在 dt 之時間內，其立體角之變動爲 $d\omega$ 則與線圈相鏈磁流之變更爲

$$d\varphi = m d\omega$$

而線圈中所應之電勢為

$$\bar{E} = -N \frac{d\varphi}{dt} \text{ 迭}$$

若此磁流變化時，線圈中所流之電流為 \bar{I} 迭，則其所做之工作為

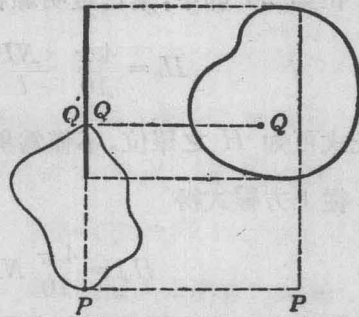
$$dW = -\bar{E}\bar{I} dt = N\bar{I} d\varphi = m N \bar{I} d\omega \text{ 爾}$$

若將此磁極自無窮遠處 ($\omega = 0$) 移至與線圈相近之一點 ($\omega = \omega'$)，則其間所需之工作為

$$W = m N \bar{I} \int_0^{\omega'} d\omega = m \omega' N \bar{I} = \varphi N \bar{I} = \lambda \bar{I}$$

以上二式與方程式(38)及(39)全同。

1-23. 磁勢 (magnetomotive force) 第 30 圖，表示一任何形狀平面線圈之側面圖及正面圖，此線圈中載有 \bar{I} 迭之電流。設在 P 點有一單位磁極，位於線圈之平面上，而在線圈邊境之外。自磁極射出之磁流，均不能穿過線圈，故在 P 點之磁位為零。今設將此單位磁極，繞任何途徑而至與線圈之平面相距甚近之一點 Q ，則 Q 與線圈所得之立體角為 2π 。故 Q 點之磁位當為 $2\pi N\bar{I}$ ，而 P 與 Q 間之磁位差 (即將此極自 P 點移至 Q 點所需之工作) 為 $2\pi N\bar{I}$ 爾。若將此極再依任何途徑而移回至 P 點，使此極完全穿過其線圈，如 $Q'P$ 。此時必須更耗 $2\pi N\bar{I}$ 爾之工作。故使一單位



第 30 圖 與線圈相纏之閉路

磁極穿過電圈，而成一閉合途徑，所需之總工作為 $4\pi N\bar{l}$ 爾 此之謂磁勢 (magnetomotive force — m. m. f.)，普通以 F 表之。磁勢之單位為吉柏 (gilbert) 或簡作吉。

但在此處必須特別注意者，磁勢與電勢相同，亦非一種之力。磁勢之定義為每單位磁極之工作，猶之電勢之定義為每單位電量之工作也 (見前第 1-14 節)。

以上導求得 $4\pi N\bar{l}$ 之結果，雖係假定 N 匝之線圈皆在一平面上，但此理論，亦得適用於任何形狀之線圈。如第 1 圖之螺管，設使一單位磁極，沿一連合途徑 P_1 繞行一週而與 N 匝相鏈，其所需之工作為

$$4\pi N\bar{l} = \frac{4\pi}{10} NI$$

同理，若使單位磁極沿連合途徑 P_2 而繞行一週，其所需之工作為 $\frac{4\pi}{10} NI$ ，此處 N 為 P_2 曲線之所包含之匝數。

在第 20 節中，業已證明螺管軸中點之磁場強度為

$$H_0 = \frac{4\pi}{10} \frac{NI}{l} = \frac{\text{磁勢}}{\text{長度}} = \frac{\text{吉數}}{\text{呎數}}$$

由此式可知 H 之單位，不僅為奧，並可以每呎之吉數表之。

從上方程式得

$$H_0 l = \frac{4\pi}{10} NI = \text{磁勢 (以吉計)}$$

此方程式即指若在螺管軸之磁場強度不變，而等於 H_0 ，則將單位磁極自螺管之一端移至彼端所需之工作必為

$$\text{力} \times \text{距離} = H_0 l = \frac{4\pi}{10} NI$$

但若沿螺管軸上各點之磁場強度不等，則經過全途徑 P_1 如第 1 圖所示，所需之工作為

$$\frac{4\pi}{10} NI = \int H dl \quad (40)$$

即謂磁勢實為磁力 (H) 之線積分 (line integral)。

尤有一極有趣味之點，值得吾人注意者，即第 27 圖 l 範圍內之曲線以下之面積，係代表一單位磁極，經此螺管，自一端移至他端所需之工作；而在同範圍內，包含此曲線之長方形面積，則代表使一單位磁極，繞一連合途徑，而與全數線匝相鏈所需之工作。由此可知，在此長方形內，曲線上部有斜紋之面積，必係代表使磁極在螺管外，自一端移至他端所需之工作。

1-24. $B-H$ 曲線 在第 26 圖螺管之中心，其磁場強度為

$$H = \frac{4\pi}{10} \frac{NI}{l} \text{ 高}$$

若所有之磁力線皆直接經過螺管而與其軸相並行，且勻佈於全截面 A ，則在任何截面所經過之磁流為 (假設螺管中為空氣心)

$$\phi = AH = \frac{4\pi}{10} \frac{NI}{l} A \text{ 馬}$$

今設螺管中易以鐵心，鐵心之長為 l 呎，橫截面積為 A 方呎，如第 4 圖；則此鐵心之兩端必各感有 $+m$ 及 $-m$ 強之磁極，而每極將於螺管中心各發生 $\frac{m}{(l/2)^2}$ 之磁場強度，但方向與 H 相反。故結果，中心所得之磁場強度等於

$$H = \frac{4\pi}{10} \frac{NI}{l} - \frac{2m}{(l/2)^2} = \frac{4\pi}{10} \frac{NI}{l} - \frac{8m}{l^2} \quad (41)$$

換言之，即因磁場而感應之磁極，對於原來磁場生一去磁作用 (demagnetizing effect)，或「端作用」(end effect)。若螺管及鐵心之長，大於直徑約四十倍以上，則此作用極微而不可計。若鐵心為環形，則此作用全消。

自 $+m$ 極發出 $4\pi m$ 磁力線均各覓其相當途徑，經過空氣而回至 $-m$ 極。此種磁力線可假定為連續之磁線，經過鐵心而復回至其起點。故在鐵心內之總磁流，含有 HA 磁力線及 $4\pi m$ 感應線，即

$$\Phi = AH + 4\pi m$$

設此磁流皆勻佈於全截面 A ，則磁流密度當為

$$B = \frac{\Phi}{A} = H + 4\pi \frac{m}{A} = H \left(1 + 4\pi \frac{m}{AH} \right) = \mu H \quad (42)$$

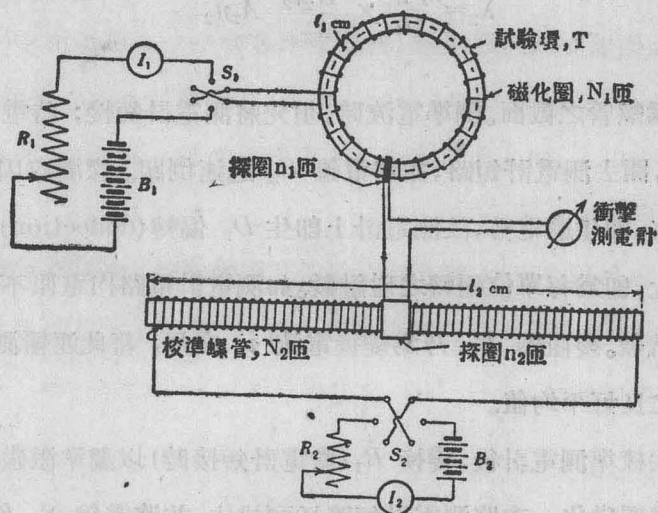
其中

$$\mu = \frac{B}{H} = 1 + 4\pi \frac{m}{AH} \quad (43)$$

為鐵心之磁導係數 (permeability)。此磁導係數為一物質之磁流密度與其所感之磁場強度之比，而所以量此物質之「比磁導」(specific magnetic conductance)者。此數之大小須依 $\frac{m}{AH}$ 或 $\frac{m}{H}$ 之比而定，換言之，即視其應磁極強度與其感磁場強度間之比而定，在磁學立場上言，物質愈好 (即磁化愈易) 者，則在一定感磁場內，其所應之磁極強度亦愈大。故 $\frac{m}{AH}$ 之比例，可呼之曰磁納係數 (susceptibility)。

關於 m 與 H 間之關係，吾人尙未能決定，故 μ 或 B 之對 H ，亦不能有簡約的方程式表示。此關係須將各類物質實驗得之。

第 31 圖示求 $B-H$ 曲線之一法。 T 為圓截面之試驗鋼環或鐵環，



第 31 圖 測驗磁化及磁滯時之接線圖

有 N_1 匝線圈勻繞其上，並有電流自電池組 B_1 經換向電鑰 (reversing switch) S_1 ，調整變阻器 R_1 ，及安培計 I_1 ，流入此圈。在鐵環 T 上，再勻繞 n_1 匝探圈 (exploring or search coil)。此圈接至衝擊測電計及繞於校準螺管中段之另一 n_2 匝探圈。此校準管為長 l_2 之螺線管，其上勻繞 N_2 匝線圈，並可有電流自電池組 B_2 經換向電鑰 S_2 ，調整變阻器 R_2 及安培計 I_2 輸入。此螺管鐵心質料須在溫度或濕度變化時，均不起扭曲或伸縮現象為要。

如校準螺管上 N_2 匝線圈內，通以電流 i_2 安，則在中段截面之磁場強度為

$$H = \frac{4\pi}{10} \frac{N_2 i_2}{l_2}$$

故試探圈內之磁流鏈為

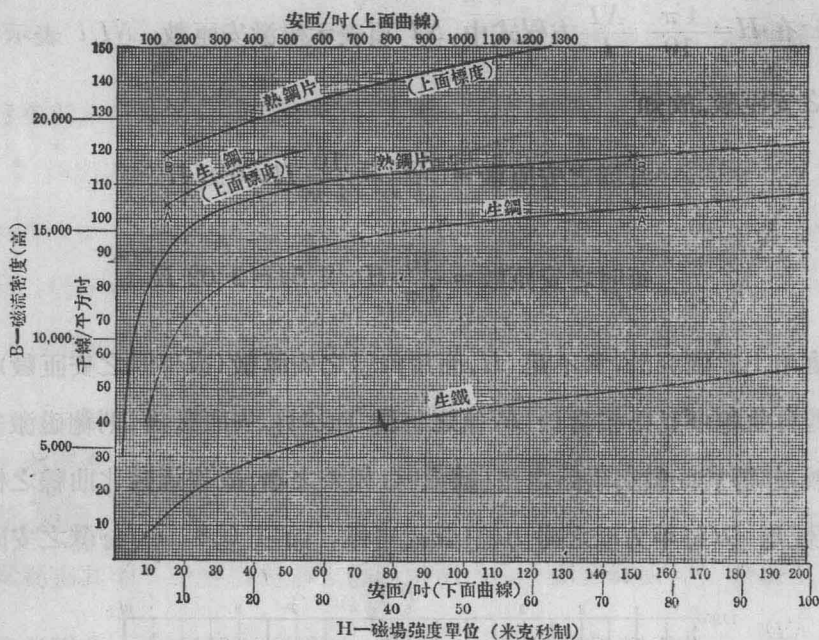
$$\lambda_2 = \frac{4\pi}{10} \times \frac{N_2 i_2}{l_2} A_2 n_2$$

其中 A_2 為螺管之截面。調準電流時，須先將測電計短接；待電流為穩定值 i_2 時，開去測電計短路，並將電鑰 S_2 迅速倒關。探圈內因有 2λ 磁鏈之變化，即生應電勢，故測電計上即生 D_2 偏轉 (deflection)。 $K = \lambda_2 / D_2$ 之比，即為每單位偏轉之磁鏈數。如測電計電路內電阻不變，此比值亦為常數。變阻器 R_2 乃為變換電流 i_2 之用，藉此連續測驗，以得此比值之良好平均值。

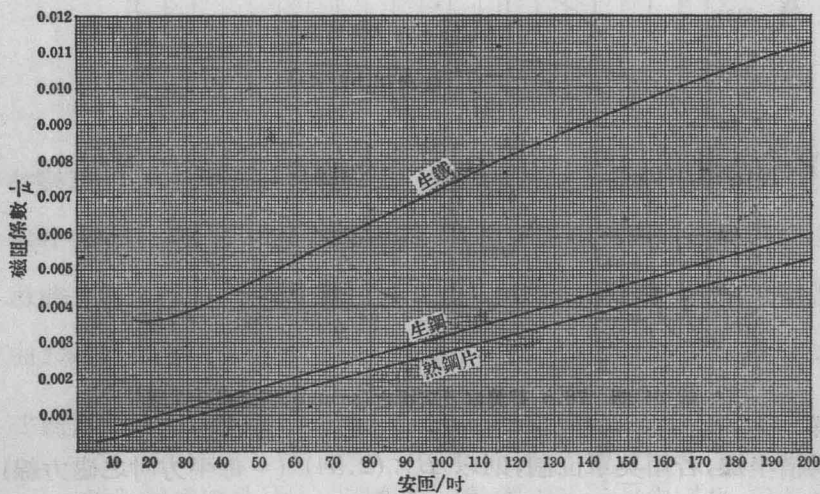
照上法校準測電計後，變換 R_1 (當電計短接時) 以調準激磁電流 i_1 而使試驗鐵環磁化。次將測電計短路插頭拔去，並將電鑰 S_1 倒關，測電計上偏轉 D_1 即為探圈 n_1 內所須測驗之磁流鏈變化，而其磁流為 $\phi = \frac{KD_1}{n_1}$ 。若以鐵環之截面 A_1 除之，即得磁流密度 B 。其相當值之 H 為

$$H = \frac{4\pi}{10} \frac{N_1 i_1}{l_1}$$

其中 l_1 為鐵環平均長度。照此測驗，次第變換激磁電流 i_1 ，其變換值之限度可較廣，則可得甚多之 B 值與其相當之 H 值。今將各值作一曲線表示 B 與 H 之關係，即可稱之為 $B-H$ 曲線或磁化曲線 (magnetization curves)。第 32 圖所示，為數種常用之鐵與鋼之曲線，第 33 圖所示，為磁阻係數 (reluctivity) $\frac{1}{\mu}$ 對於每吋所需磁激安匝數之關係，此圖中所示之物質，即 32 圖 $B-H$ 曲線中所示者。



第 32 圖 B-H 曲線



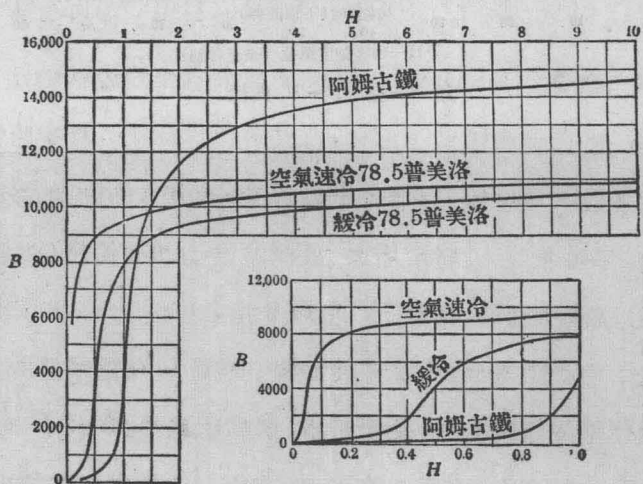
第 33 圖 磁阻係數曲線

在 $H = \frac{4\pi}{10} \frac{NI}{l}$ 方程式中, NI 項表示磁激安匝數, NI/l 表示每
 呎之安匝數。故知

$$\text{每呎之安匝數} = \frac{NI}{l} = \frac{10}{4\pi} H = 0.8 H$$

而 $\text{每吋之安匝數} = \frac{10}{4\pi} H \times 2.54 = 2.02 H$

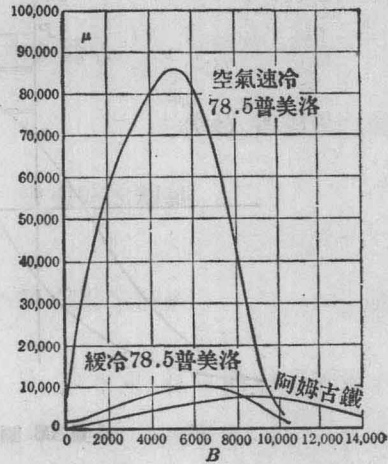
在實用上為便利計,常不用 H ,而用每呎之安匝數(或每吋之安匝數)。蓋若自曲線中覓得相當於 B 值之每呎(或吋)安匝數後,則總磁激安匝數,即等於此數與磁路之長(呎或吋)相乘之積。故普通磁化曲線之構造,恆用 B (每平方呎之磁力線)為縱坐標,而以 $0.8 H$ (每呎之安匝



第 34 圖 78.5 普美洛及阿姆古 (armco) 鐵之磁化曲線

數) 為橫坐標;若用英單位制,則以 $B \times (2.54)^2$ (=每平方吋之磁力線) 為縱坐標, $2.02 H$ (=每吋之安匝數) 為橫坐標。

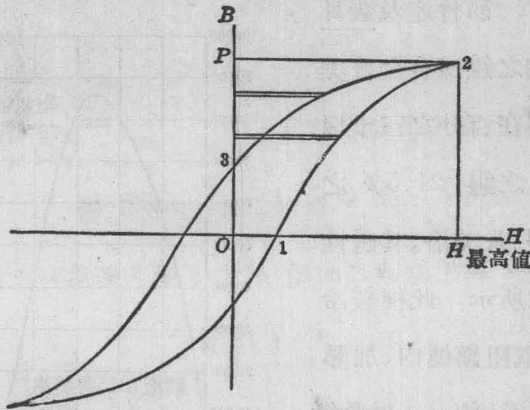
上面第 1-2 節曾述及裴耳電話試驗所發明之鎳鐵合金普美洛，此中約含鎳在百分之三十以上。若含 78.5% 之鎳，21.5% 之鐵者，名為 78.5 普美洛。其磁性如第 34 及 35 圖所示。此種緩冷合金，乃先置於電阻鎔爐內，加熱至 900° 至 1000°C 。約一小時後，然後將電流停止，聽其在爐內冷至室溫。空氣速冷 (air quenched) 法，乃照上法緩冷後，再加熱至 600°C 。約十五分鐘後，即取出電爐，置露天銅板上使之速冷。



第 35 圖 78.5 普美洛及阿姆古鐵之磁導係數曲線

1-25. 磁滯 (hysteresis) 前節所述求磁化曲線試驗法，須每次將激磁電流反接以讀測電計上偏轉。此法可代之如下：將變阻器 R_1 (如第 31 圖) 各段次第短接，以增大激磁電流，至其方向則固定不變。每次電流稍增，即磁激加大，磁流增強，故測電計上即有偏轉 (注意從測電計偏轉，計算磁流增加時，常數 K 須以 2 除之)。

今依上法漸增電流，中途不使減降，直至 H 已達最高點 (第 36 圖)，然後將磁化電流逐漸減少，使至於零。照試驗結果， B 及 H 回減時之曲線不與原曲線相重合，而略在其上，如圖所示。當磁化電流已減至零值後，用反向電鍵 S_1 (第 31 圖) 將線圈 N_1 與電源之連接改向，再如上法使電流漸漸增加 (此時電流之增加作為負號，因其方向與前適相反) 直



第 36 圖 磁滯迴環

至 H 又達最高之值。至此復將電流步步減少，以至於零。然後倒關 S_1 使電源與 N_1 圈之連接反換，徐徐增加電流，待磁化力又至 H 最高值止。在此完全一循環間， B 與 H 之關係，有如第 36 圖之迴環所示。

此迴環之形狀，表示鐵心之磁化變更，較磁化力變更為落後，此現象謂之磁滯（西名 hysteresis 自希臘文而來，即落後之意）。磁滯之現象乃由於分子間之磨擦，故表示能之耗失。若磁化力之變化甚速，如磁化交流然，則分子之磨擦，可使鐵心之溫度上昇。

在一完全循環中，所消散之能量，可證明與磁滯迴環之面積成比例。如在第 36 圖，設磁化力自 H 增加至 $(H+dH)$ 時，其所生之磁流密度自 B 增至 $(B+dB)$ 。故與磁化線圈所鏈之磁流，將有 $d\phi = AdB$ 之變更，其中 A 為鐵心之截斷面積。而在線圈中所應之電勢為

$$E = -N \frac{d\phi}{dt} \times 10^{-8} = -AN \frac{dB}{dt} \times 10^{-8} \text{ 伏}$$

線圈中之電流既為

$$\frac{E}{R} = \frac{AN}{R} \frac{dB}{dt}$$

$$I = \frac{10}{4\pi} \frac{HI}{N}$$

在 dt 之時間內，此路中所耗之能為

$$dW = -EI dt \times 10^7 = \frac{Al}{4\pi} HdB \text{ 爾}$$

但 HdB 為第 36 圖中原素之面積，故自 1 至 2 所消耗之能為

$$W = \frac{Al}{4\pi} \int HdB$$

其中 $\int HdB$ 為 $O12P$ 之面積。

在 2 至 3 間，磁流漸漸減低而電流方向如故，故磁路中放出能力，而不如前之吸收。放回之能為

$$W' = \frac{Al}{4\pi} \int_{B=\text{最高值}}^{B=0} HdB$$

其中之積分值，即 $23P$ 之面積。是故在此一部循環間之淨能耗與 $O123$ 環之面積為比例。此迴環之他半，亦同是理。故其總能耗為

$$W = \frac{Al}{4\pi} \int_{-B_{\text{最高值}}}^{B_{\text{最高值}}} HdB$$

其中 Al 為鐵心之體積，而其積分值與迴環之面積成比例。

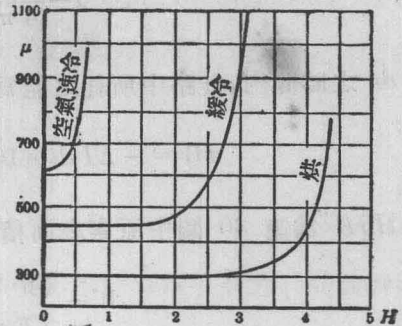
以上所述諸積分式，均不能求解，蓋因 B 與 H 之關係尙未知曉；但司坦麥茲 (Steinmetz) 氏已發現每立方呎在每一循環中之磁滯能耗與磁流密度最高值之關係為

$$W = \text{常數} \times (B_{\text{最高值}})^{1.6} \quad (44)$$

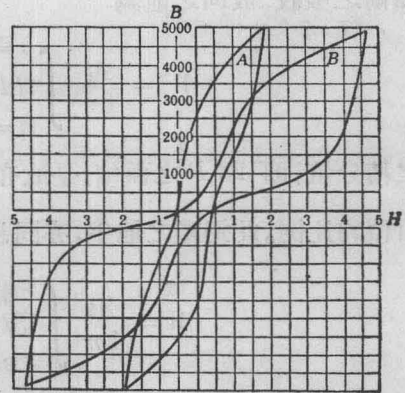
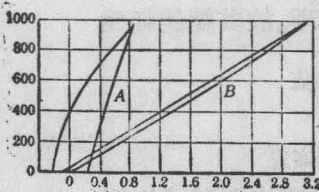
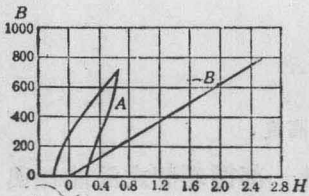
其中之常數須視鐵心物質而變化(參觀第十章第十節)。

普明凡一類之鐵鎳鈷合金，在低磁化力時，磁導係數不變，且磁滯耗亦極小。此合金成分，約有百分之 10 至 40 為鐵，10 至 80 為鎳，10 至 80 為鈷。如將 45 分之鎳，25 分之鈷及 30 分之鐵合成者，其磁導係數曲線如第 37 圖。磁滯迴環如第 38 圖。圖中有『烘』

(baked) 字記號者，乃經緩冷後再保持 425°C. 溫度長時間者。



第 37 圖 普明凡(45%鎳, 25%鈷, 35%鐵)之磁導係數曲線



第 38 圖 普明凡(45%鎳, 25%鈷, 30%鐵)之磁滯迴環

1-26. 磁路定律及磁阻(magnetic reluctance) 參看第 1-24 節(方程式 41), 可知第 4 圖中鐵心兩端之去磁作用, 可以使之減去。其法即將鐵心繞成連環如第 31 圖然, 則 H 值在線圈之圓軸各部均相等,

即為

$$H = \frac{4\pi}{10} \frac{NI}{l}$$

此中 l 爲鐵心之平均長度，以呎計。經過鐵心之總磁流將爲

$$\Phi = AB = A \mu H = \frac{4\pi}{10} \frac{NI}{l} \mu A$$

或

$$\Phi = \frac{\frac{4\pi}{10} NI}{\frac{l}{\mu A}} \quad (45)$$

方程式(45)之分子爲螺管之磁勢而其分母爲磁路之磁阻。可注意者，磁阻性質與電路中之電阻相同，蓋磁阻亦與長度成正比而與其切斷面積成反比例。且磁導係數之對於磁阻關係與比電導之對於電阻完全相似，故第 1-24 節稱之爲『比磁導』。磁阻之倒數 $\frac{\mu A}{l}$ 謂之磁導 (permeance)。

方程式(45)可寫爲

$$\text{磁流} = \frac{\text{磁勢}}{\text{磁阻}}$$

此方程式與電路之歐謨定律相似，即

$$\text{電流} = \frac{\text{電勢}}{\text{電阻}}$$

方程式(45)即表示所謂磁路定律。

1-27. 磁路定律之應用 磁路與電路相同 亦能成串聯，並聯或混聯而其各部之計算亦與電路中之方法完全相同。此種習題在實用上時常遇到者有下列二類：即在一磁路中，求其所需之安匝值，以維持一定之磁流；或反之，有已知之安匝值，而求其所生之磁流。

磁路之式樣，有如第 39 圖所示， a 爲一簡單之串聯磁路， b 爲兩磁路相並聯者，其各該相似之電路，示於圖之下方。

以下諸例乃表示計算簡易習題時之應用方法，其他詳細方法，則在

第四章計算發電機與電動機之特性時再申述之。

1. 串聯磁路 在磁路中有數磁阻相串聯者，其總磁阻如下式

$$\frac{l_1}{\mu_1 A_1} + \frac{l_2}{\mu_2 A_2} + \dots + \frac{l_n}{\mu_n A_n}$$

而其結果，磁流之經此路者將為

$$\Phi = \frac{\frac{4\pi}{10} NI}{\frac{l_1}{\mu_1 A_1} + \frac{l_2}{\mu_2 A_2} + \dots + \frac{l_n}{\mu_n A_n}}$$

其中 NI 為作用於全周路之安匝數。此方程式可寫為

$$\frac{4\pi}{10} NI = \Phi \frac{l_1}{\mu_1 A_1} + \Phi \frac{l_2}{\mu_2 A_2} + \dots + \Phi \frac{l_n}{\mu_n A_n} \quad (46)$$

如此則方程式右邊之各項，乃為使磁流存在於各該局部磁路中所需之磁勢，以吉計。故其總磁勢等於各局部所需磁勢之和。在相似之電路中

$$I = \frac{E}{R_1 + R_2 + \dots + R_n}$$

及

$$E = IR_1 + IR_2 + \dots + IR_n$$

即使電流通過電路所需之電勢，為其各部電位降落之和。

上述之安匝數，磁流及磁阻之關係，皆絕對準確。惟如方程式(46)所示之關係，其中含有各部磁路之磁導係數，故不適用實際應算，蓋磁導係數為磁流密度與磁路各部物質之函數，(即因密度及物質之不同而變)，故須先自 $\mu = \frac{B}{H}$ 之關係算得後，方可代入也。在實際上較簡捷之法，即將安匝值自方程式(46)計算得之，如下：

(46)式右邊各值均有下列之形式

$$\Phi \frac{l_x}{\mu_x A_x} = \frac{\Phi}{\mu_x A_x} l_x = H_x l_x$$

其中 H_x 為 l_x 部磁路之奧數。但

$$H_x = \frac{4\pi}{10} \frac{(NI)_x}{l_x}$$

其中 $(NI)_x$ 為使磁流存在於 l_x 部磁路所需之安匝數，而 $\frac{(NI)_x}{l_x}$ 乃為每呎之安匝數（安匝/呎）。以之代入方程式 (46) 中，而消去其共因數 $\frac{4\pi}{10}$ ，即得

$$NI = \left(\frac{\text{安匝}}{\text{呎}}\right)_1 l_1 + \left(\frac{\text{安匝}}{\text{呎}}\right)_2 l_2 + \dots + \left(\frac{\text{安匝}}{\text{呎}}\right)_n l_n \quad (47)$$

若用吋為單位，則

$$NI = \left(\frac{\text{安匝}}{\text{吋}}\right)_1 l_1'' + \left(\frac{\text{安匝}}{\text{吋}}\right)_2 l_2'' + \dots + \left(\frac{\text{安匝}}{\text{吋}}\right)_n l_n'' \quad (48)$$

若某物質之磁流密度為已知，則其每吋安匝值，可自第 32 圖直接覓得。例如第 39 圖 (a)，設鐵心為生鑄鐵，欲使其中有 160,000 馬之磁流，求其所需之安匝數。假定磁力線之平均路線經過其截面之重心，而於經過邊角時，其平均路徑乃以邊角為圓心所畫圓週之四分之一。

$$\therefore l_1 = \text{生鐵磁路之長度} = 2(6+4) + 2\pi - 0.125 = 26.15 \text{ 吋}$$

$$l_a = \text{氣隙之長度} = 0.125 \text{ 吋}$$

$B =$ 在鐵中及氣隙中之磁流密度

$$= \frac{160,000}{4} = 40,000 \text{ 磁力線/平方吋}$$

自第 32 圖，可覓得生鐵中磁流密度等於每方吋 40,000 磁力線時之磁激值為每吋長 79 安匝。故鐵心所需之安匝數為 $79 \times 26.15 = 2060$ 。

同時更求此磁流在氣隙中所需之安匝，因其中之 $\mu=1$ ，故 $B=H=\frac{4\pi}{10}$

$\frac{NI}{l}$ (其中各值均用米制)。從此關係，可得

$$\begin{aligned} NI &= \frac{10}{4\pi} Bl = 0.8 \frac{\text{每方吋之線數}}{(2.45)^2} \times \text{氣隙之長 (吋)} \times 2.54 \\ &= 0.3133 B'' l'' \end{aligned}$$

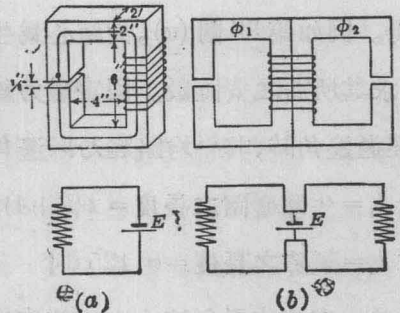
此中 B'' = 每平方吋之磁流密度，而 l'' 為氣隙長度，以吋計。故氣隙所需之安匝為

$$NI = 0.3133 \times 40,000 \times \frac{1}{8} = 1567$$

而全路所需之總激磁為 $2060 + 1567 = 3627$ 安匝。

2. 並聯及混聯磁路 第39圖(b)中有二磁路並聯，每路與第39圖(a)同式。激磁磁勢，作用於各並聯路，與電池組之電勢作用於各並聯電路同。在第39圖(b)之情形，計算每局部之磁流時，其他諸部均可置之不論，若有兩部或數部完全相同者，其磁流亦均相等。

例如第39圖(b)左邊之磁路與第39圖(a)完全相同，但右邊之磁路，大小雖似，而其物質則為生



第 39 圖 磁路與電路

鋼以代生鐵。假定經過左部之磁流仍為 160,000 馬，則磁激需有 3627 安匝。但在生鋼中之磁流未必為 160,000 馬，蓋因生鋼之磁阻較生鐵為小。此習題為已知有 3627 安匝，而求經過此生鋼磁路之磁流。今用下

述之試探法以求之：

先假定各種總磁流之值，而計算其所需之總安匝數。將各磁流值及其相當之安匝數，作圖繪成一曲線，而將已知安匝數包含在內，則相當於已知安匝數之磁流值，可自此曲線中直接讀得。上述習題用此法求之，則得經過生鋼磁路中之總磁流約為 303,200 馬。

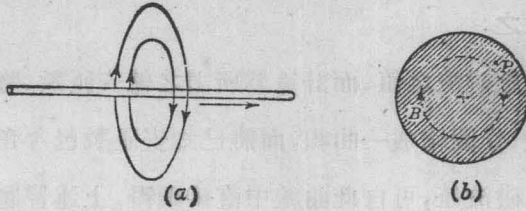
在此種情形，如本習題所述者，因生鋼之磁阻與氣隙之磁阻比較其數甚微，故可先假定略去經過生鐵之磁阻而全部激磁皆為維持磁流通過氣隙之用，據此，每方吋之磁流密度線為

$$3627 = 0.3133 \times B'' \times \frac{1}{8}$$

或 $B'' = 92,800$ 線/方吋，及 $\Phi = 371,200$ 。參照第 32 圖之曲線，可知使此磁流經過生鋼路需 1635 安匝，而全路共需 $3627 + 1635 = 5262$ 安，較已知安匝數為大。故須略減 B'' 之值，再照上法計算，直至試得已知安匝數而止。

啓旭夫定律可用於磁路，與用於電路同。在磁路之接點，感應線 (line of induction) 之向此點流來者，應等於自此點流去者。蓋感應線均為連合迴環，故適與電路中之啓氏第一定律相合。再在一連合磁路中，各局部之磁位降落之代數和等於零。若連合磁路之任何部中有磁流 Φ 及磁阻 R ，則其磁位落為 ΦR ，而其全周路各部之磁位落之和須等於各激磁磁勢之總和，其正負號依第 1-16 節之規則而定。

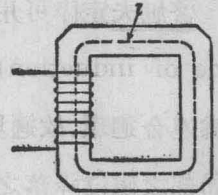
1-28. 自感 (self-induction) 有一直線，帶有電流，其方向如第 40 圖 (a) 所示，則導線四週有磁力線圍繞之，如圖所示。如此線之週圍為空氣或他種非磁介質，當電流自零增至任何值，磁流亦隨之自零值增加，



第 40 圖 導線四周之磁力線

此種磁線可設想自導線中心發出而向外擴大，如池中投石後之水紋然。第40圖(b)表示此磁力線展發時截切此線之情形，此即圖(a)自左面看時之導線截面。磁力線 B 展發時在 P 點截切此線之縱絲(filament)。至於磁力線移動之方向，則依半徑自內向外。此作用即等於此絲依半徑向內移動；是故應用弗來明右手定則，可知其應電勢，乃自紙面向外而出。換言之，乃與電流之方向相反。此作用乃與倫茲定律相符；因電流本身之變化，所以變易磁流者，同時即生一相反之電勢，以延阻電流之變更。反之，同理可以證明電流之減低，可應一相反之電勢，保持固有之電流。此電勢為自應者，故謂之自感電勢。

設第 41 圖為一線圈，繞於一鐵心，其磁導係數 μ 不變，截面為 A 平方呎，磁路平均長度為 l 呎，且其平均磁路(mean path)經過截面之重心。



第 41 圖 有感電路

今若有 i 安之電流經過線圈，則磁流為

$$\phi = \frac{\frac{4\pi}{10} Ni}{\frac{l}{\mu A}} = \frac{4\pi}{10} \frac{Ni}{l} \mu A$$

而電流如有 di 之變化，磁流之變化將為

$$d\phi = \frac{4\pi}{10} \frac{Ndi}{l} \mu A$$

此磁流變化將感應一電勢

$$E = -N \frac{d\phi}{dt} \times 10^{-8} = -\frac{4\pi}{10} \frac{N^2 \mu A}{l} \frac{di}{dt} \times 10^{-8} = -L \frac{di}{dt} \quad (49)$$

其中
$$L = \frac{4\pi}{10} \frac{N^2 \mu A}{l} \times 10^{-8} \quad (50)$$

L 謂之自感係數或簡稱自感，其通用單位為亨[利](henry)。自方程式(50)乃知自感與磁流相鏈之匝數之平方成正比，且與磁路之形狀，大小及其物質均有關係。其量之大小，於更變電流之電路中甚為重要，例如直流發電機或電動機整流時之線圈受此作用甚鉅(參看第八章)。

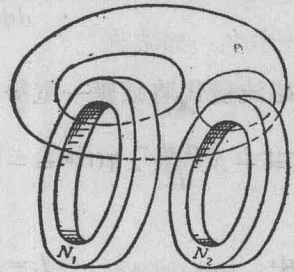
自方程式(49)中可知一電路中之自感係數 L 之值，等於電流之變更率為每秒 1 安時($\frac{di}{dt} = 1$)所應之電勢；換言之，即若一電路中之電流每秒有一安之變化而能感應一伏之電勢者，此電路中之自感係數為一亨。自感係數之定義，可另述如下：自方程式(49)

$$L \frac{di}{dt} = N \frac{d\phi}{dt} \times 10^{-8}$$

故
$$L = N \frac{d\phi}{di} \times 10^{-8} \quad (51)$$

在此方程式中 $\frac{d\phi}{di}$ 等於磁流隨電流之變更率，或即每安所生之磁力線數。方程式(51)表明一安所生之磁力線與其所鏈匝數之乘積除以 10^8 ，即等於自感係數。每安所生之磁流與其所鏈線圈之積，謂之每安之磁鏈數。簡言之，自感係數，等於每安之磁鏈數，除以 10^8 。

1-29. 互感(mutual induction) 若有兩電路各有 N_1 及 N_2 匝, 如第 42 圖, 而其位置可使一電路中所生之磁流, 一部或全部與他電路相鏈, 則第一電路中有電流變更時, 第二電路中即有互感電勢。所應之電勢須視電路之形式, 電路間相對位置及感電路中之電流變更而定。



第 42 圖 二圈間之互感

設第一電路中有 i_1 安之電流而生磁流 Φ_1 , 則

$$\Phi_1 = \frac{\frac{4\pi}{10} N_1 i_1}{\frac{l_1}{\mu_1 A_1}} = C_1 N_1 i_1 \quad (52)$$

此磁流之一部,

$$\varphi_1 = K_1 \Phi_1 = K_1 C_1 N_1 i_1 \quad (53)$$

(其中 $K_1 \leq 1$), 將與第二電路中 N_2 匝相鏈。是故與第二電路之總磁鏈為

$$\lambda_{21} = N_2 \varphi_1 = K_1 C_1 N_1 N_2 i_1 \quad (54)$$

依第 1-22 節, 若第二電路中有 i_2 安之電流時, 則因第一電路所生之位能為

$$U_{21} = \lambda_{21} \frac{i_2}{10} = \frac{1}{10} K_1 C_1 N_1 N_2 i_1 i_2 \quad \text{爾} \quad (55)$$

同樣, 第二電路中之電流 i_2 將生一磁流

$$\Phi_2 = \frac{\frac{4\pi}{10} N_2 i_2}{\frac{l_2}{\mu_2 A_2}} = C_2 N_2 i_2 \quad (56)$$

此中之一部磁流

$$\varphi_2 = K_2 \Phi_2 = K_2 C_2 N_2 i_2 \quad (57)$$

(其中 $K_2 \leq 1$) 將與第一電路 N_1 匝相鏈。是故與第一電路之總磁鏈為

$$\lambda_{12} = N_1 \varphi_2 = K_2 C_2 N_1 N_2 i_2 \quad (58)$$

第一電路中因第二電路而生之位能為

$$U_{12} = \lambda_{12} \frac{i_1}{10} = \frac{1}{10} K_2 C_2 N_1 N_2 i_1 i_2 \quad \text{爾} \quad (59)$$

但因此間僅能有一位能值，故 U_{21} 應等於 U_{12} ；

$$\therefore K_1 C_1 N_1 N_2 = K_2 C_2 N_1 N_2 \quad (60)$$

依 (54) 式

$$K_1 C_1 N_1 N_2 = \frac{N_2 \varphi_1}{i_1}$$

即第二電路因第一電路中單位電流，而得之磁鏈數；而自 (58) 式

$$K_2 C_2 N_1 N_2 = \frac{N_1 \varphi_2}{i_2}$$

即第一電路因第二電路中單位電流而得之磁鏈數。故自方程式 (60)，可知甲電路中有單位電流時，對於乙電路所生之磁鏈數，與乙電路中有單位安時，對於甲電路所生之磁鏈數，乃相等

當 N_1 電路中之電流變更時， N_2 電路中所應之電勢為

$$e_2 = -N_2 \frac{d\varphi_1}{dt} \times 10^{-8} = -K_1 C_1 N_1 N_2 \frac{di_1}{dt} \times 10^{-8}$$

而當 N_2 電路中之電流變更時， N_1 電路中所應之電勢為

$$e_1 = -N_1 \frac{d\varphi_2}{dt} \times 10^{-8} = -K_2 C_2 N_1 N_2 \frac{di_2}{dt} \times 10^{-8}$$

依 (60) 式，此種方程式可寫作

$$\left. \begin{aligned} e_2 &= -M \frac{di_1}{dt} \\ e_1 &= -M \frac{di_2}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (61)$$

$$\text{此中} \quad M = K_1 C_1 N_1 N_2 \times 10^{-8} = K_2 C_2 N_1 N_2 \times 10^{-8} \quad (62)$$

M 爲一電路中有單位電流（以安計）時對於另一電路之磁鏈數，除以 10^8 。此之謂兩電路之互感係數或互感。互感係數之性質與自感係數相同，其理甚明，故亦以亨爲單位。依方程式(61)，可知兩電路之互感乃等於一電路中有 1 安/秒之電流變更率時在其他一電路所應之電勢。

由方程式(52)，可知 N_1 電路中之自感係數爲

$$L_1 = \frac{N_1 \Phi_1}{i_1} \times 10^{-8} = C_1 N_1^2 \times 10^{-8} \quad (63)$$

而自方程式(56)，可知 N_2 電路中之自感係數爲

$$L_2 = \frac{N_2 \Phi_2}{i_2} \times 10^{-8} = C_2 N_2^2 \times 10^{-8} \quad (64)$$

故自方程式(62)，(63)及(64)，得

$$M^2 = K_1 K_2 L_1 L_2 \quad (65)$$

若兩電路之相互位置可使其中無漏磁現象，即一電路中所生之磁流完全與其他電路之匝數相鏈，則

$$K_1 = K_2 = 1$$

及

$$M = \sqrt{L_1 L_2}$$

故知兩或完全耦合電路中之互感，爲各該自感係數之中比例數 (mean proportional)。 $\sqrt{K_1 K_2}$ 有時謂之耦合係數 (coefficient of coupling)。

互感現象，常應用於感應圈及交流變壓器中，兩者皆有一鐵心，上

捲以互相絕緣之線圈(與鐵心亦絕緣),名曰原線圈(primary coil)及副線圈(secondary coil)。原線圈中有斷續電流及交流時,可生一時時變更之磁流,此磁流即在其他線圈中應生一交流電勢(alternating e. m. f.)。互感在直流電機整流順序中亦甚重要。

1-30. 磁場之儲能 如線圈或電路有自感 L 亨,通以一變更電流,則應生電勢

$$e = -L \frac{di}{dt} \text{ 伏}$$

若電流之變更率為 $\frac{di}{dt}$,則在電流為 i 安時,變更此電流所需之功率為

$$(-e)i = Li \frac{di}{dt} \text{ 瓦}$$

而在 dt 時間之工作為

$$dW = (-e)i dt = Li di \text{ 焦}$$

使電流自零增至 i 值所需之工作當為

$$W = \int_0^i Li di = 1/2 Li^2 \text{ 焦} \quad (66)$$

此能力並未耗損,乃儲在磁場中,待磁場降至零值時漸漸放出。開斷一有感電路(inductive circuit)時之火花或弧光,即此儲能之作用。

試將方程式(66)與一行動物體之動能(kinetic energy)方程式相比,若 m 為物體之質量,而 v 為其速度,則

$$W = \frac{1}{2}mv^2$$

在電流中電流 i 為經過一定點每秒間之電量,故與速度相似;自感係數 L 因其延阻電流之變更,或電流之速度變更,故表示電之慣性(elec-

trical inertia), 與機械系統中之質量相似; 是以 $\frac{1}{2}Li^2$ 之能, 可作為電之動能。

若有兩電路各有自感 L_1 及 L_2 , 而其間之互感為 M , 則若兩電流之磁化方向相同者, 其所儲之能為

$$W = \frac{1}{2}L_1i_1^2 + \frac{1}{2}L_2i_2^2 + Mi_1i_2 \text{ 焦} \quad (67)$$

此方程式前兩項之導求, 自方程式(66)可知; 至其末項, Mi_1i_2 , 則可用下法推得:

一電路因他電路而生之位能, 依方程(55)及(59)得

$$W = 1/10K_1C_1N_1N_2i_1i_2 = 1/10K_2C_2N_1N_2i_1i_2 \text{ 爾}$$

而以方程式(62)之關係, 可變為

$$\begin{aligned} W &= 1/10(M \times 10^8)i_1i_2 = Mi_1i_2 \times 10^7 \text{ 爾} \\ &= Mi_1i_2 \text{ 焦} \end{aligned}$$

若兩電路之磁化方向相反, 則其相互之位能當為負號, 是故其間之儲能為

$$W = 1/2L_1i_1i_2 + 1/2L_2i_2^2 - Mi_1i_2 \quad (68)$$

1-31. 電磁鐵之曳引力 設有一單位磁極置於第 43 圖之 P 點。此點在一半徑 r 呎圓柱條形磁鐵之軸上, 而與此條形磁鐵之一端相距 a 呎。此磁鐵之極設為 m 單位, 並假定在圓柱體端之面積上各點磁場均相等, 則每單位面積之極強, 或磁化強度, 為

$$\sigma = \frac{m}{\pi r^2} = \frac{m}{A} \quad (69)$$

於磁鐵之端面上, 取一半徑 x 及寬 dx 之小面積, 則此對於單位磁極

P 之力為

$$dF = \frac{2\pi\sigma x dx}{a^2 + x^2} \cdot \frac{a}{\sqrt{a^2 + x^2}}$$

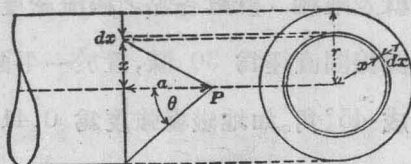
而磁鐵所生之總力為

$$F = 2\pi\sigma a \int_0^r \frac{x dx}{(a^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}} = 2\pi\sigma(1 - \cos\theta) \quad (70)$$

此中 θ 為電磁端在 P 點所伸正錐體之半角。若 a 對於磁鐵端之面積為極微， $\cos\theta$ 幾近於零，則

$$F = 2\pi\sigma \quad (71)$$

設兩條形磁鐵之兩端相距甚近，而其隣近面之磁化強度為 $+\sigma$ 及 $-\sigma$ ，則一磁極對於另一磁極上 dA 面積之吸力，將為 $dF = 2\sigma\pi \times \sigma dA$ ；



第 43 圖 條形磁鐵軸上之磁場強度

而兩極間之總吸力將為

$$F = 2\pi\sigma^2 A \quad \text{達} \quad (72)$$

自方程式 (69)，得 $\sigma = \frac{m}{A}$ 。但 m 單位磁極所發出之磁流為 $\Phi = 4\pi m$ ，

故得 $\sigma = \frac{\Phi}{4\pi A}$ 。因此，方程式 (72) 可寫作

$$F = \frac{\Phi^2}{8\pi A} = \frac{B^2 A}{8\pi} \quad \text{達} \quad (73)$$

此方程式為設計曳引或起重電磁鐵之基本方程式。

習 題

習題 1-1. 今有二細長條形磁鐵 A 與 B , A 長 25 呎, B 長 10 呎, 兩磁鐵並行安置於同一平面, 且各與磁子午線並行。 A 與 B 相距 3 呎, 而 B 之北極與 A 之南極, 相距為 5 呎。 A 磁極之強度為 150 奧而 B 為 50 奧。 試分別求 A 對 B 之力偶矩, 如 (a) A 完全疊蓋 B 上, 或 (b) A 祇一部分疊蓋 B 上。

習題 1-2. 一磁力管兩端為兩同心圓球面, 半徑各為 10 呎與 20 呎。 其側面為一截頭直角錐, 此錐頂點與球面圓心相合, 且其半角為 30 度。 如垂直於內球面之磁流密度為 1000 高, 試求沿磁力管軸平行之方向, 并離錐頂點 12 呎及離軸 3 呎處各點之磁流密度應為若干?

習題 1-3. 一圓線圈直徑為 30 呎, 置於一平面與磁子午線平面成 60° 角, 與水平面成 45° 角。 如地磁場強度為 0.41 米, 克, 秒, 單位, 且羅盤針之傾角為 60 度時, 問經過此線圈磁流共有幾何?

習題 1-4. 試解本章第 1-10 節已解之題, 假定 (a) 每匯電條 (bus-bar) 中之電流經中軸 (central axis) 並沿垂直平面均勻流通, (b) 電流勻布於各匯電條之截面。

習題 1-5. 一直徑 16 呎之飛輪, 其平面與磁子午線成 30° 角, 每分鐘轉 120 次。 設軸之直徑為 1 呎, 問輪緣與輪軸之電位差若干?

習題 1-6. 一百匝之圓線圈, 共分十層, 每層有十匝, 均用 B. & S. 26 號線繞成。 其絕緣層厚 6 呎。 此線圈中相近各線之排列法, 乃使各線中點位於正方形之角上。 其最裏層直徑為 12 吋, 此線圈裝於轆耳軸

承 (trunnion bearings) 上,其直徑與此輪軸相合,並與磁子午線垂直。此線圈平面原與地磁場之磁力線垂直,磁場強度及方向與第 1-3 題同。如線圈與所接電路之總電阻為 150 歐,而將此圈速轉 180° ,問所放電量幾何?

習題 1-7. 茲有一 $0.2'' \times 0.5''$ 長方截面之電線,長為 55 呎,溫度為 115°F 。如在溫度 60°C 時,問美規 (B. & S.) 26 號線須長若干,其電阻方可與前線相等。

習題 1-8. 一絕緣線線圈,有電阻 300 歐,置一管內。管內有溫度 15°C 之水流通,其速度一定。當線圈內電流為 1.1 安,水流經調整後,其溫度高於空氣 24°C 之值適與原來低於空氣溫度者相等;問水流速度應為若干?

習題 1-9. 有三電池之蓄電池組,放電後每池有 1.8 伏。其內阻各為 0.005 歐,規定充電率為 10 安。如此電池組接至 125 伏電路,問須外加串聯電阻若干,方得照規定充電率充電。充電終了時,各電池均有 2.5 伏,問此時充電電流若干?

習題 1-10. 一個秀伏計,其電阻連引線在內共為 20 歐。如通以 0.01 安電流,即達滿標度偏轉。問如何可將其接至 150 伏電路而得滿標度偏轉?如將此表用作電流計,問接至 100 安電路時,如何可得滿標度偏轉?

習題 1-11. 一 220 伏 10 馬力電動機,與電源相距為 500 呎。如此電源電壓為 220 伏,若用線接至此電動機,而欲此線之電位降落不超過供給電壓百分之八,問應用何號電線?

習題 1-12. 有電阻體 $r_1, r_2, r_3, \dots, r_s$ 均相並聯。如將電路中任何電阻 r_p 斷聯，並接入電壓 V ，則電阻體 r_q 內將有電流 i_q 。如將 V 自 r_p 電路內移去 (r_p 仍接好如初)，將 r_q 電阻斷聯，而將電壓 V 接入，則 r_p 內有電流 i_p ，試證 $i_p = i_q$ 。

習題 1-13. 參看圖 18，如 a, b, c 三線各有電阻 0.8, 0.8 及 1.4 歐。設三線電路之上迴環，加一 110 伏電動機與電阻體 A 並聯，此機須耗電流 10 安，試作此電路之電位圖，並計算三線內各線之電流及負載間之電位差。

習題 1-14. 今有一 220 伏電動機，耗電 10 安，接於第 18 圖內之 X, Y 兩端。設三線內電阻，仍與 1-13 題同，試求各線內電流及負載間電位差，並作電位圖。

習題 1-15. 一單軌電車線長二哩，其軌即用作電流回路，每哩有電阻 0.03 歐。在電車線之一端由 550 伏發電機送電。電車線之截面，相當於美規 (B. & S.) 0000 號線。茲有一車離發電廠四分之一哩，耗電 50 安，另一車在電車線末端耗電 100 安。若自發電廠至電車線中點，加掛一輔助饋線，使電車線末端之電位降落，較以前情形減低一半。設空氣溫度為 70°F ，問此輔助饋線應採用幾號線？

習題 1-16. 一電車線長 l 哩，每哩有電阻 r_1 歐，車軌每哩有 r_2 歐。電車線一端用一發電機供電，電線車軌間電壓為一定值 V 伏。車線另一端用一蓄電池組供電，其電勢為 E ，內阻為 r_f 歐。問一耗電流常為 100 安之電車，在何處則所受電壓為最小？

習題 1-17. 第 21 圖中接於 M 與 N 兩點之發電機線，若改接

至 P 與 Q 兩端，試求網絡中各部之電流。

習題 1-18. 第 1-1 題之 B 磁鐵，若在垂直平面內，沿 B 至 A 方向依順時針向轉 45° 時，問需多少工作？

習題 1-19. 一個二匝長方形線圈，寬 25 呎，長 50 呎，圈中通 5 安電流，置於磁子午線平面而以其 50 呎之邊垂直於磁子午線。取一小羅盤針，置於與線圈面中心之垂直距離 15 呎處，若地磁強度及方向與第 1-3 題同，問此針之偏轉角若何？若有一個一匝圓線圈，帶有電流 10 安，與長方形線圈平行安置。欲使磁針偏轉角減至零，此圓線圈應距方線圈幾何？

習題 1-20. 一細長條形磁鐵，長為 20 呎，集中於磁極之強度為 150 米，克，秒，單位。若置此磁鐵於一圓線圈之中心軸上，此圈有二匝，半徑為 15 呎。此磁鐵近線圈平面之一端為南極，距離為 10 呎。圈內電流 15 安，電流方向從安置磁鐵處看去，為順時針向。若將此磁鐵倒置，問需工作幾何？

習題 1-21. 有一左繞 250 匝之螺管，其平均直徑 6 呎，長為 30 呎。此螺管之軸與地磁場之方向平行（參看第 1-3 題）。如螺管中有電流 10 安，流向南端，若將此螺管之軸轉至東西向，問需工作若干？

習題 1-22. 若將單位磁極，從第 1-21 題之螺管一端，經 (a) 螺管中心，或螺管外方移至另一端，問各需工作若干？

習題 1-23. 一圓截面之生鐵圓環，平均直徑為 10 吋，截面半徑為 $\frac{1}{2}$ 吋。若使此鐵磁導係數為 250 時，需安匝若干？其相當之磁流及磁阻各若干？

習題 1-24. 1-23 題之圓環，若切一長 $\frac{1}{16}$ 吋之氣隙 (air gap)，其二隙面與圓環之半徑平行。同時磁激照 1-23 題增加一倍，問環內磁流及磁導係數各為若干？又問此氣隙所耗之磁激為百分之幾？

習題 1-25. 有一磁路由穿孔鋼片砌成，其形與第 39 圖 (b) 同，但尺寸均為第 39 圖 (a) 所示之一倍。鐵心淨厚僅為全厚百分之九十；因鋼片生銹且各片間均有空隙也。若繞在鐵心中股之線圈內發生相當於 6500 安匝之磁勢時，問穿過每氣隙之磁流當有若干？試求此鋼之磁導係數，及計算氣隙間與全磁路之磁阻。

習題 1-26. 如 1-23 題中之生鐵環，繞有線圈 500 匝，試計算其自感係數。如磁流在 0.001 秒內以均勻速度遞減為零，問此圈內所生應電勢幾何？

習題 1-27. 兩圓線圈 A 及 B 同心相套。 A 圈中有電流時，所生磁流有百分之七十與 B 圈相鏈，而 B 中有電流時，所生磁流，有百分之八十五與 A 圈相鏈。當兩圈串接而磁化方向相同時，兩圈之總自感為 0.4 亨；當磁化方向相反時總自感為 0.3 亨。試求 (a) 每圈之自感係數，(b) 兩圈之互感係數，(c) 若兩圈串接而有 50 安之電流，欲將 B 圈由磁化方向相同時之位置轉過 90 度，需工作若干？

習題 1-28. 如 1-27 題中 A 與 B 兩線圈，同心相套，並磁化方向相同。 A 圈電阻較 B 圈大百分之五十。如兩圈並接，其總自感係數若干？如 B 圈轉過 90 度，則總自感係數應為若干？

習題 1-29. 1-27 題中 A 圈內有兩個完全偶合而相等之部分 A_1, A_2 。 B 圈內亦有兩個完全偶合相等之部分 B_1, B_2 。照下列各種接法，

試各求其自感係數：(a) 串聯之 A_1, A_2 串接於並聯之 B_1, B_2 ; (b) 並聯之 A_1, A_2 串接於串聯之 B_1, B_2 ; (c) 並聯之 A_1, A_2 串接於並聯之 B_1, B_2 ; (d) 並聯之 A_1, A_2 並接於並聯之 B_1, B_2 。

習題 1-30. 若 1-23 題之生鐵環，斷成兩半圓環，如須將此二半圓環拉開至其相接處之氣隙為 0.001 吋時，問須拉力若干磅？磁激照舊而氣隙增至 $1/32$ 吋時，其間拉力幾何？

習題 1-31. 問 1-25 題中每氣隙面間之拉力為若干磅？

第二章 電機

2-1. 電機，發電機與電動機 電機 (dynamo) 者，乃一變機能為電能，或變電能為機能之機器。前者曰發電機 (generator)，後者曰電動機 (motor)。換言之，電機為發電機及電動機之總稱。

發電機電動機之計劃及構造，係根據於下列事實：(1) 如一導線 (或一組導線) 受一變易磁場之作用而截切磁力線，則導線中發生電勢；(2) 如一導線 (或一組導線) 載有電流而適當位置於磁場內，則導線受機械力之作用。前者為發電機作用之特徵，後者則為電動機作用。

每一發電機，含有一導線或一組導線，受磁場變化之影響，而感生電勢。如導線與外部接通成一周路，則生電流。反之，電動機之作用，則由於外部電源供給電流於磁場內導線之結果。

用作發電機時，各導線均為感應電勢之處，其電勢值為

$$\bar{E} = Blv \text{ 迭} \quad (1)$$

其中 l 為導線長度 (呎)， B 為磁場密度，而 v 為垂直於磁場及導線方向之速度 (呎/秒)。如以電路接通，則得 \bar{I} 迭之電流，其值依歐氏定律視電路之電阻而定。如是導線將受

$$F = Bl\bar{I} \text{ 達} \quad (2)$$

之力，適與運動之方向相反。因此，為維持原有動作起見，必須有一外加之推動力施於導線，而作 $Fv = Bl\bar{I}v = \bar{E}\bar{I}$ 爾/秒之工作。

用作電動機時，設於每導線通過 \bar{I} 迭之電流，則所受之側推力為

$$F = Bl\bar{I} \text{ 達}$$

結果將導線推動，而因磁場密度 B 及速度 v 之影響，於線中感應電勢

$$\bar{E} = Blv \text{ 伏}$$

其方向適與電流相反。為維持原有電流起見，外加電壓必須足以抵過所感生之反電勢，而電源必須供給 $\bar{E}\bar{I} = Blv\bar{I} = Fv$ 爾/秒之工作。

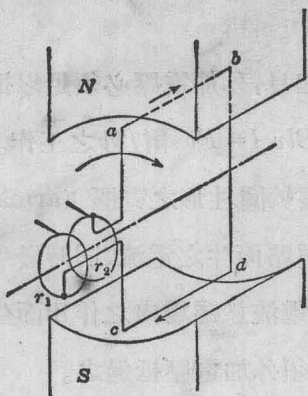
按之實際，發電機含有多數導線，繞於圓柱形之電樞 (armature) 上，互相聯接，其感應電勢，作用於外通電路而生之電流，同時發生一反轉力，以反抗原動機之推動；電動機則因電流於磁場內之作用而生轉力，使電樞轉動，而感應反電勢，此反電勢則須外加電壓抵過之。

以上所論，乃假定一理想上之條件，即所有供給之能，經電機轉變後，盡為有用之能。其實此種條件決難實現；供給之能必大於轉變後所得之有用能，因於轉變時，有不可避免之能耗在焉。

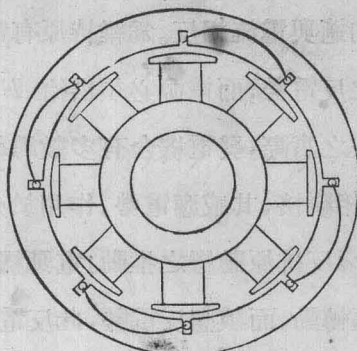
電機之電樞乃為發電機發生電勢之部分，而於電動機中則為動作電流通過之部分。電機中發生磁流之部分，即為磁場。欲得電樞與磁場間之相對運動，可轉動任何一部，故二者普通皆為同心之圓柱形。如電樞轉動。則謂之樞轉機，如磁場轉動，則謂之場轉機。

依照電勢及電流之性質，可將電機分為兩種：(1)交流機，(2)直流機。第一種用作發電機時名曰交流發電機 (alternator)，所生電勢之方向交相變換，故於電樞周路接通時，電流之方向亦依之交變。第二種所生電流，則僅為單方向。直流電雖方向不變，但其量之大小可以時刻不同，即作脈振之狀態，或則方向與大小完全不變。前者謂之直流，後者謂之連流 (continuous current)。

交流發電機或電動機為電機之最簡單者。第 44 圖示一最簡之形式，含有一線迴環， $abcd$ ，旋轉於由 N 極通至 S 極之磁場。極片 N



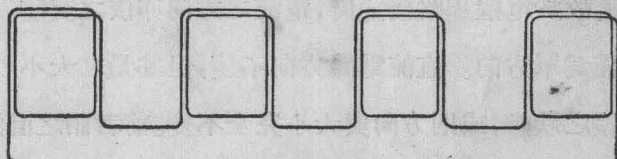
第 44 圖 最簡單之交流發電機



第 45 圖 多極場轉交流發電機

與 S 為磁場之兩端，磁鐵之激磁乃自適當電源之直流電經磁場線圈而發生。電樞線圈之兩端，則附着於絕緣之匯電環， r_1, r_2 。如圖示之位置， ab 線內，感生自前向後之電勢，而 cd 線之電勢則自後向前；故電刷與 r_1 相觸即得正電，與 r_2 相觸即得負電。但半轉以後，兩端之極性適反，故各端或正或負，交相更換。

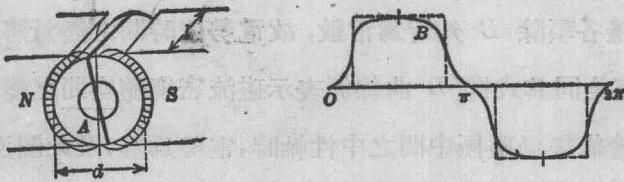
實際上交流機之磁極常在一對以上，即為多極式，如第 44 圖；其線捲乃由多數線圈組成，互相串聯，使各圈之電勢相加。第 45 圖略示一八極場轉機，其固定電樞之線捲分列於八槽中。第 46 圖為此種線捲之展開式。



第 46 圖 交流機框捲之展開式

除下面第 2-20 節所述單極機外，所有直流電機含有一電樞，繞以銅線或銅條，轉動於正負交互列置之內伸磁極間，如第 14 圖所示。故每一電樞導線，即為交流電勢發生之處，此電勢於導線自此極移至另一極時即變更其方向，欲將內生之交流電勢於外周路變成直流，則有賴於整流器 (commutator) 之功用；但以樞捲而論，則凡直流電機 (單極機除外) 本即一交流機，故欲知直流機之詳細情形，必先分析交流發電機內電勢之感生。

2-2. 簡單交流發電機之電勢 今先研究一最簡單之交流發電機，如第 47 圖，其樞捲含有一集心線圈，在樞心 A 之外周面上共有 Z 導線



第 47 圖 電樞周圍之磁流分布

(或 $N = \frac{Z}{2}$ 匝)。通常直流機極面 N, S 與樞心間之氣隙均勻 (極尖除外)，故磁場之力線將沿徑線而橫過氣隙，而磁極下各處之磁強亦大致均勻；惟於極尖則力線散放，逐漸減弱，直至兩極之間磁強為零。此種情形，見第 47 圖 所示，其中 B 線之縱坐標代表電樞周面氣隙間之磁流密度，而電樞周面則展開成一平面。如極尖之磁流不致散放，則磁流分布當作長方形如圖中斷線所示。

設電樞直徑為 d 呎，其有效長度為 1 呎，而使其依 n 轉/分之速度轉動，則導線之周速度當為

$$v = \pi d \frac{n}{60} \text{ 呎/秒 (277) } \omega$$

設沿徑線之磁流密度爲 B (高), 則當導線截切磁場時, 每導線所感生之電勢爲

$$e = Blv \times 10^{-8} = \pi dl \frac{n}{60} B \times 10^{-8} \text{ 伏} \quad (3)$$

上面既假定 Z 導線均集中於一直徑面上, 且電樞周圍之磁流分布互相對稱, 故在同一瞬時, 各導線之電勢均同, 而感生電勢瞬時之總值當爲

$$e = \pi dl \frac{n}{60} ZB \times 10^{-8} \text{ 伏} \quad (4)$$

(4) 式右邊各項除 B 外皆爲常數, 故電勢依時間之變量將與圖 47 之曲線 B 完全同其式樣 (B 曲線係表示磁流密度隨空間之變量)。當線圈之有效邊緣經過磁極中間之中性軸時, 電勢爲零, 及此圈邊經過磁極之下, 則電勢驟增, 旋經極面而無大變, 線圈再到中性平面時, 則又降至零值。更進則線圈之電勢在另一方向經過同樣之變更。以後依此週變, 循環不絕。

如氣隙間之磁場強度確係均勻而沿徑線之方向, 且磁尖無散放之力線, 則磁場分布將作長方形, 如第 47 圖中虛線所示。因此, 其所生電勢之波形亦將爲長方形, 而長方形之高度乃依 (4) 式之規定。如將電勢與時間之關係繪出, 則第 47 圖中橫坐標之角度應易以時間, 而電樞全轉之時間 T , 適將相當於 2π 之角度。但 $T = \frac{60}{n}$, 故如磁極佔有磁極間距離之 $\psi\%$, 則半轉中波形之有效時間實爲 $\psi \frac{T}{2}$ 。因此半波形之平

均電勢值，乃為長方面積除以半週波之時間，即

$$e_{\text{平均值}} = \frac{e \psi \frac{T}{2}}{\frac{T}{2}} = \pi dl \psi B Z \frac{n}{60} \times 10^{-8}$$

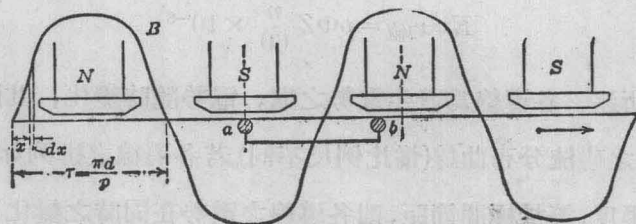
但 $\pi dl \psi$ 為雙極面之面積，而 $\pi dl \psi B$ 適等於雙極之磁流， 2Φ (按 $\Phi =$ 每極磁流數)，故平均電勢值將為

$$e_{\text{平均值}} = 2 \Phi Z \frac{n}{60} \times 10^{-8}$$

此與每導線每轉斷切 2Φ 磁線或每秒鐘截切 $2 \Phi \frac{n}{60}$ 磁線之事實適相符合。

2-3. 交流發電機電勢之一般情形 上節所討論者，乃根據雙極磁場及全節距樞圈之假定。全節距者，即線圈所張之弧形，乃由此極之中心至彼極之中心。就一般言，磁極之數均在一對以上，而線圈之伸張或大或小於極間之節距。

第 48 圖表示一 p 極交流發電機 (如第 45 圖) 之部分展開式。設



第 48 圖 多極交流機，非正弦磁流分布

電樞表面之磁流分布如 B 曲線所示，電樞之直徑為 d 呎，導線在與軸並行方向之有效長度為 l 呎，轉速為 n 轉/分，則每導線所感生之瞬時

電勢適如方程式(3)之值,即

$$e = Blv \times 10^{-8} = Bl\pi d \frac{n}{60} \times 10^{-8}$$

而電勢之圖,亦適與磁流勻布之曲線相同,惟比例尺相異耳。故每導線電勢之平均值爲

$$\begin{aligned} E_{\text{平均值}} &= \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \frac{\pi d}{p} e dx = \frac{1}{\tau} \frac{n}{60} \pi d \int_0^{\tau} B dx \times 10^{-8} \\ &= p \frac{n}{60} \Phi \times 10^{-8} \end{aligned} \quad (5)$$

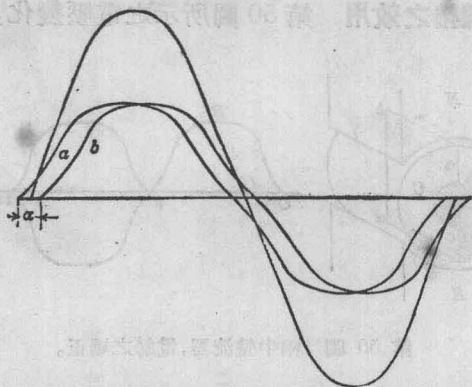
其中 $\Phi = \int_0^{\tau} B dx$ 爲每極之磁流。以上結果,亦可由下述事實預測得之,蓋平均電勢乃等於每秒所截切之磁力線數,除以 10^8 ; 故每導線於每轉截切每極之 Φ 線,即每轉共切 $p\Phi$ 線,或每秒 $p\Phi \frac{n}{60}$ 線。又 Φ 爲 B 函數之積分,而 B 爲磁流函數之第一導微,亦堪注意。

如電樞繞有 Z 導線,各相串聯,如第 46 圖,而各圈皆爲全節距,則平均電勢之總值爲

$$E_{\text{平均值}} = p\Phi Z \frac{n}{60} \times 10^{-8} \quad (6)$$

如上所述,各導線爲發生電勢之處,電勢隨時變化,其圖適如第 48 圖所示之磁流分布曲線(惟比例尺不同)。若各導線之排列如第 45 圖,且線圈之張度,等於極間節距,則各導線之電勢在同時之變化乃爲同相(phase),而瞬時電勢之總和即爲 Z 倍於每導線所生電勢之值。然若線圈之伸張,異於全節距,如第 48 圖中 ab 圈所示,則每圈兩邊之瞬時電勢,即爲異相, a 圈邊依第 49 圖中之 a 曲線,而 b 圈邊依 b 曲線,

而兩曲線間之移置為 a ，適相當於第 48 圖 ab 線圈邊間距離與極間節距之差。線圈瞬時電勢之總值，得自各電勢曲線縱坐標之和，故自第 49 圖可知「分數節距」線捲之電勢最高值，必較導線數同而全節距者為小。



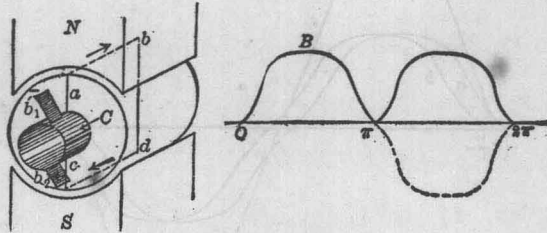
第 49 圖 短節距線圈中之電勢

2-4. 交流電勢之矯正 設第 44 圖中基本交流機之兩端， a 與 c ，各與整流器 C 之二絕緣截片相連，如第 50 圖而固定電刷 b_1 及 b_2 與旋轉之整流截片相滑觸，電刷之平面適與通過轉軸及極軸之平面相重合，則 b_1 刷常為負極性， b_2 刷常為正極性。線圈電勢之改向適與電刷經過整流器截片間之罅隙同時。若磁流分布如第 47 圖所示之 B 曲線，則電刷電壓之變化將如第 50 圖所示；就外部周路而論，則原有交流電壓負部之方向改變，而外周路接通於電刷 b_1 與 b_2 之電壓變為單向，但其量則忽大忽小，脈振於零與最大值之間。

第 50 圖之迴環乃由 Z 外周導線所組成。如以第 51 圖之線捲代之，而外周導線數仍為 Z ，則感生電勢之量及變化仍如前述。前者之線

捲爲鼓狀式，後者爲環狀式。鼓狀線捲每對導線成一全匝，但環狀者則每導線即得一匝。蓋環狀線捲之一部分線在鐵心內者既不截切磁力線，故與感生電勢無關。因此，以上兩式之線捲，如外周導線數相等，則其電氣特性相等，惟線之長短稍有不同而電阻亦略異。

2-5. 分布線捲之效用 第 50 圖所示之電壓變化，實非所取，故須



第 50 圖 兩半整流器，電勢之矯正。

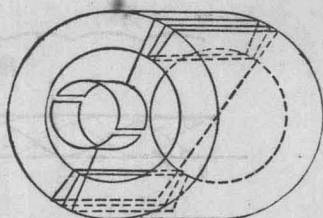
設法使其改善，圖中脈振過甚，實因每逢圈邊經過極間中性帶時（即整流時），電樞全部不生電勢之故；如線捲分爲多數組部分，每組數匝，依次經過整流，則脈振將不甚顯然，而無足介意。第 52 圖示一電樞與第 51 圖相同，惟原有之 Z 導線已排列成四組集心圈；此圈之尾接於彼圈之首，而每接點各與四部整流器之截片相接。試研究線圈發出電勢之方向，則知電刷應沿垂直於極軸之軸線安置，方可供給電流於外周路而有效。

此四組線圈對電樞內周路雖成一連合環，但對外周路則實爲兩半，互相並聯。此樞捲之每一半，則由兩組線捲串聯而成。假定磁流分布在兩極下相同而線捲相對稱，則樞捲每一半發生之電勢必相等；但對樞捲本身之接合周路而論，此二電勢之方向相反，適足相抵，故樞捲中不

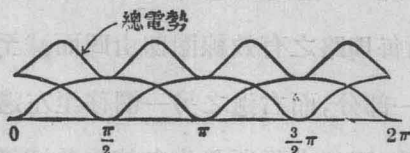
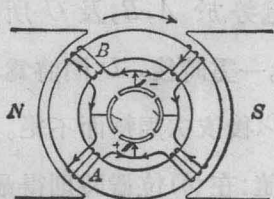
致有環流 (circulating current) 之發生。(關於磁流之分布不相對稱者,容於下章討論之)。

樞捲既由兩相同組分並聯,故電刷之電壓即等於任何一半之電壓。今姑就含 A 及 B 之半樞捲觀之, A 組所生電勢之波形,如第 50 圖,但其幅僅四分之一,蓋因 A 組所有之有效導線僅及第 51 圖線圈之四分之一。

同樣, B 組發生之電勢,適如 A 組,但此二波形之相角成 90 度,如第 52 圖所示。將此二波形之縱坐標相加,則得電刷總電壓,如圖。脈振數原為二,今則變為四,但最小值與最大值間之範圍則縮小甚多。

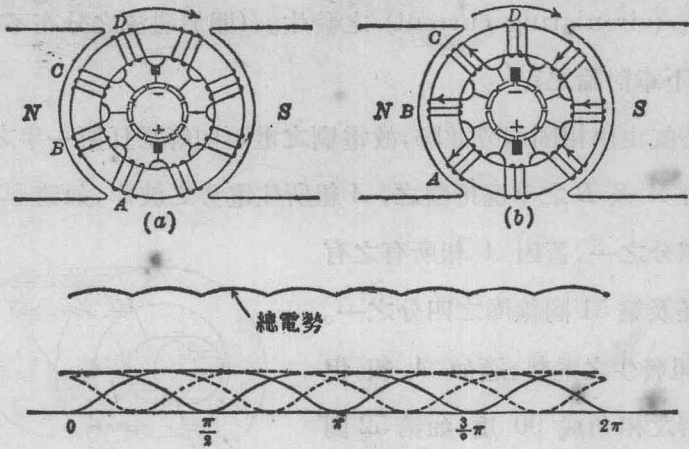


第 51 圖 簡單環捲電樞



第 52 圖 四組之環捲,電勢之脈振。

使線捲之分組更進一步,而以外周面之 Z 導線分列成八等距離之線圈,如第 53 圖,結果則環捲之每一半將由四小組串聯而成。每組所生之電勢,仍如第 50 圖 B 曲線所示,隨時刻而變化,但其最大值僅及八分之一;每半環四串聯圈之電勢,在無論何時皆相差 45 度,如第 53 圖,故電刷間任何時刻之總電勢乃為四曲線縱坐標之和。脈振數原為二者,今已變為八,而其振幅大減,更為顯然。



第 53 圖 八組之環捲，電勢之脈振。

第 53 圖分示電樞在二種不同位置時之情形；(a) 圖 A, B, C, D ，串聯，每圈供給一部分之電勢；(b) 圖電樞之轉動已使 D 圈移至整流位置，如此 D 圈因為電刷所短接不再供給電勢於 A, B ，及 C 所成之周路，而每周路之有效線圈即由四而減至三。一霎時後， D 圈將為右邊周路之一部分，而右邊之另一圈移至左邊，以後依次周轉而不絕。在 (a) 位置時，四組串聯所發生之總電勢達最大值；在 (b) 位置時則得最小值。是故組數增加，則鄰近線圈之分開角度減少，而電勢值之變化亦愈小。

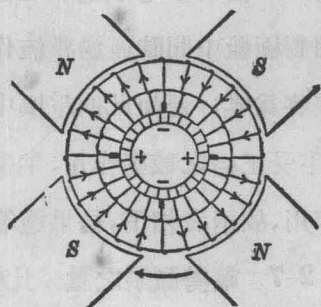
線捲組數加多，則總電勢有平勻之效，此與煤氣機情形正同。蓋如曲柄梢 (crank pin) 繞曲柄軸而勻置，則汽缸愈多，其轉力亦愈平勻。

2-6. 直流電樞之平均電勢 上節所討論之環狀線捲，如在多極磁場結構內旋轉如第 54 圖所示，每一捲組所生電勢之方向如小箭頭所表明。依此圖而論，全線捲乃依電勢之方向，而分成四帶，每極一帶，在各帶中之電勢均相累積。為充分利用此種分布起見，每中性點應放置電刷；

流車

電刷之半數爲正，半數爲負。如所有正電刷相連而接外周路之正端，負電刷亦相連而接於外周路之負端，則對於外周路而言，電樞線捲共有四路（如例），互相並聯。如電樞線捲完全相稱，每極之磁流量及其分佈均相等，則各路之電勢亦當相等，而全機之總電勢亦即等於每路之電勢。

如第 54 圖所示之特例，路徑之數適等於磁極數，此爲各種簡單環捲式之特點。但如下面第三章所論，在各種線捲中，路徑之數 a 不必定等於磁極數 p ，且如各線捲各圈適當連接，路徑之數可爲一對以上之任何雙數。



第 54 圖 多極磁場中之環捲電樞

計算直流電機樞捲所發生之平均電勢，實爲非常重要。今依下列數值，以求線捲之平均電勢：

Z = 周邊導線之總數

a = 電樞中之並行路數

p = 磁極數

Φ = 每極磁流

n = 電樞每分鐘之轉數

每導線每轉截切 $p \Phi$ 磁線或每秒 $p \Phi \frac{n}{60}$ 磁線，故每導線平均電勢爲

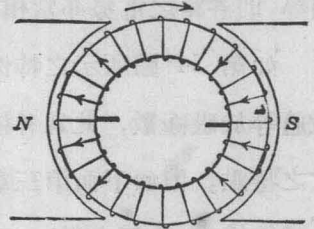
$p \Phi \frac{n}{60} \times 10^{-8}$ 伏；導線之總數既分成 a 路互相並聯，則每路串聯之導

線數爲 $\frac{Z}{a}$ ，而每路之平均電勢——亦即全電樞之電勢——乃爲

$$E = \frac{Z}{a} p \Phi \frac{n}{60} \times 10^{-8} = \frac{p}{a} \frac{\Phi Z n}{60 \times 10^8} \text{ 伏} \quad (7)$$

此即直流電機發出電勢之普通方程式。惟電刷應適當安置使捲組之每羣同時受一磁極之影響，方能得此結果。

故第 55 圖所示電樞電刷之位置，若使線圈對極靴中間時經過整流作用，則電位差將為零；蓋如此則電樞中每路之導線，半受正極之感應作用，半受負極之感應作用，故兩者相消，結果適等於零。



第 55 圖 位置錯誤之電刷

2-7. 電勢脈振之量 比較第 50, 52, 與 53 各圖中之曲線與線捲，可知線捲分布成組，則電勢脈振於平均值上下之量即大大減少。線捲愈分則脈振之量愈減，但減至某一程度時，再分之影響於減縮率較小。商用電機之線捲組數，每根據整流不生火花之條件而定，但分組亦應達相當之數，俾電勢脈振不致顯明。雖然，研究線捲組數與電壓量漲落之關係，實甚有趣。

為簡單分析起見，假定電機有二極，如第 53 圖，線捲有 Z 導線分成 s 組，每組 $\frac{Z}{s}$ 匝。又設磁流分布非如第 47 圖所示而作正弦形。此即言於氣隙中任何點磁流密度之徑向部分乃與自中心軸至此點間所成角之正弦成正比例。故如 B_m 為極面下中點磁流密度之徑向部分，則自中性軸距 θ 度之點之磁流密度為

$$B = B_m \sin \theta \quad (8)$$

在某瞬時距中性軸 θ 度之某線捲圈中，發出電勢之瞬值即為

$$e_1 = \frac{Z}{s} Blv \times 10^{-8} = \pi \frac{Z}{s} B_m ld \frac{n}{60} \sin \theta \times 10^{-8} = E_m \sin \theta \quad (9)$$

$$\text{其中} \quad E_m = \pi \frac{Z}{s} B_m ld \frac{n}{60} \times 10^{-8} \quad (10)$$

爲 $\frac{Z}{s}$ 匝合成之線捲單位發出電勢之最高值 (此係在 $\theta = \frac{\pi}{2}$, 或即線圈經過極面中間之時)。電樞周圍既有 s 捲組勻布, 鄰組間之角度爲 $\frac{2\pi}{s}$, 則當上述線圈占 θ 角度之位置之時, 在前之次圈占 $(\theta + \frac{2\pi}{s})$ 之位置, 更前者占 $(\theta + 2\frac{2\pi}{s})$, 餘類推。故在順次串聯之 $\frac{s}{2}$ 捲組中, 其所生電勢之瞬值爲

$$e_1 = E_m \sin \theta$$

$$e_2 = E_m \sin \left(\theta + \frac{2\pi}{s} \right)$$

$$e_3 = E_m \sin \left(\theta + 2\frac{2\pi}{s} \right)$$

.....

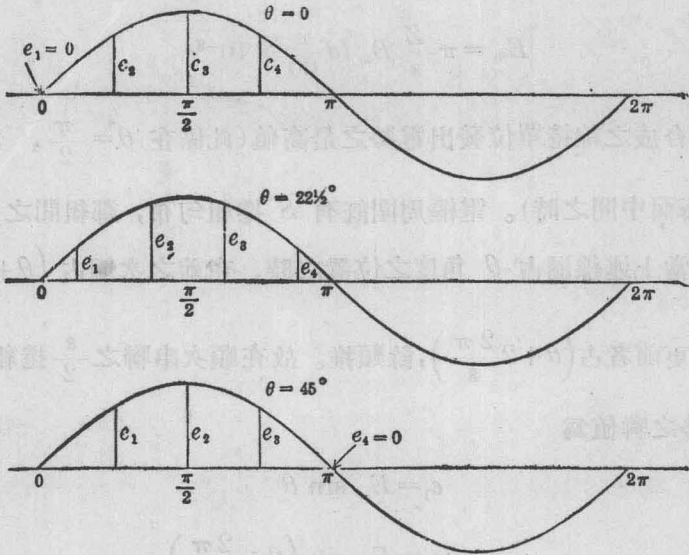
$$e_{s/2} = E_m \sin \left[\theta + \left(\frac{s}{2} - 1 \right) \frac{2\pi}{s} \right] = E_m \sin \left[\theta + \left(\pi - \frac{2\pi}{s} \right) \right]$$

如第 53 圖所示之線捲, $s = 8$, 各捲組之電勢依次相差 45 度, 其電勢各值如第 56 圖, 凡示三種不同之角度 θ , 相當於電樞轉動所得之三種位置。由此可知所有 $\frac{s}{2}$ 分組之總電勢在任何時刻皆爲

$$\Sigma e = e_1 + e_2 + e_3 + \dots + e_{s/2}$$

$$E_m \left\{ \sin \theta + \sin \left(\theta + \frac{2\pi}{s} \right) + \dots + \sin \left[\theta + \left(\pi - \frac{2\pi}{s} \right) \right] \right\} \quad (11)$$

當 $\theta=0$, 此值最小, 討論第 53 圖時已提及; 當 $\theta=\frac{\pi}{s}$, 此值最大。故



第 56 圖 八組環捲之電勢(正弦形)

$$E_{\text{最小值}} = E_m \left[\sin \frac{2\pi}{s} + \sin \frac{4\pi}{s} + \dots + \sin \left(\pi - \frac{2\pi}{s} \right) \right]$$

$$= E_m \cot \frac{\pi}{s} \quad (12)$$

$$E_{\text{最大值}} = E_m \left[\sin \frac{\pi}{s} + \sin \frac{3\pi}{s} + \dots + \sin \left(\pi - \frac{\pi}{s} \right) \right]$$

$$= E_m \csc \frac{\pi}{s} \quad (13)$$

自最小至最大之變化百分率, 依最小值為標準, 為

$$\frac{\csc \frac{\pi}{s} - \cot \frac{\pi}{s}}{\cot \frac{\pi}{s}} \times 100$$

此值依 s 各值而變，如下表所示：

s	變化百分率
2	∞
4	41.00
6	15.40
10	5.17
20	1.24
20	0.56
60	0.13

換言之，線捲分組在 30 以上(磁場為雙極式)，則漲落甚小，無關緊要。

總電勢之瞬值既自 $\theta=0$ 時之最小值，增至 $\theta=\frac{\pi}{s}$ 時得最大值，

又從此至 $\theta=\frac{2\pi}{s}$ 時降為最小，與前對稱，故平均電勢為

$$\begin{aligned}
 E_{\text{平均值}} &= \frac{1}{\pi/s} \int_0^{\pi} (e_1 + e_2 + e_3 + \dots + e_{s/2}) d\theta \\
 &= ZB_m ld \frac{n}{60} \times 10^{-8} \int_0^{\pi/s} \left\{ \sin \theta + \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{s}\right) + \dots \right. \\
 &\quad \left. + \sin\left[\theta + \left(\pi - \frac{2\pi}{s}\right)\right] \right\} d\theta \\
 &= ZB_m ld \frac{n}{60} \times 10^{-8} \left[\pi - \frac{2\pi}{s} \right] \quad (14)
 \end{aligned}$$

但若磁流密度勻布如

$$B = B_m \sin \theta$$

則半電樞面之平均值爲

$$B_{\text{平均值}} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} B_m \sin \theta d\theta = \frac{2}{\pi} B_m \quad (15)$$

而每極磁流爲

$$\begin{aligned} \Phi &= B_{\text{平均值}} \times \text{半電樞面之面積} \\ &= B_{\text{平均值}} \times \frac{\pi d}{2} \times l = B_m dl \end{aligned} \quad (16)$$

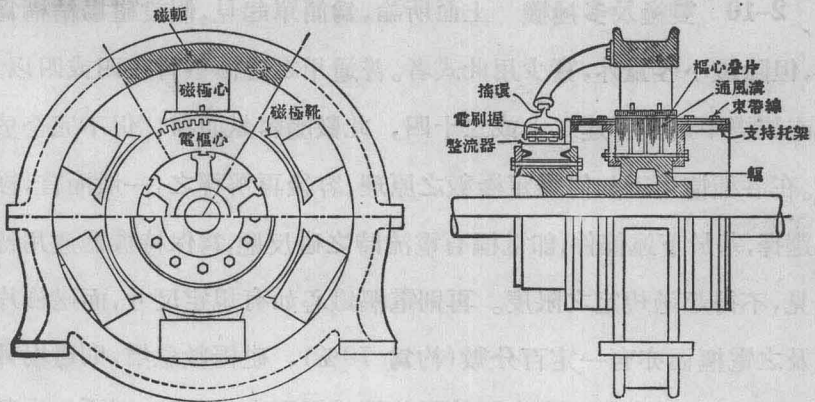
因此

$$E_{\text{平均值}} = \Phi Z \frac{n}{60} \times 10^{-8} \quad (17)$$

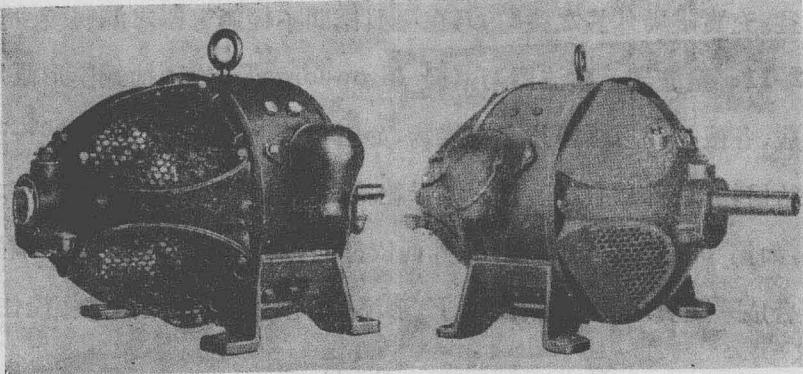
適與方程式(7)相符，蓋此處所討論者， $p=2$ ，及 $a=2$ ，故得上式。

2-8. 樞捲之電阻 若電樞有 a 電路，而每路之電阻相等，則總磁流 i_a 將均分於各路。設電樞上各線之總電阻爲 R_a 歐，則每路之電阻爲 R_a/a 歐。各路既爲並聯，故從電刷間量得之實在樞阻，將爲 $R_a/a^2 = r_a$ 歐。總電流 i_a 通過電阻 r_a 之電位降落爲 $i_a r_a$ 伏，同時等於經過任何一電路之位落，即 $i_a/a \times R_a/a = i_a r_a$ 伏。

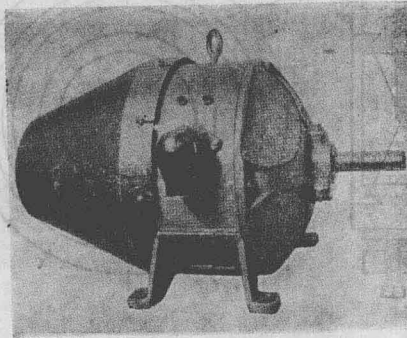
2-9. 電機之構造 電機基本上含有電周路磁周路各一，彼此置於可以互生感應的地位。磁周路包含磁軛，磁極鐵心，磁極靴及電樞鐵心。電周路包含樞捲及整流器，並附供給磁激之場捲。旋轉電樞與固定磁場間之環形空間，謂之氣隙。機器尙有其他部分，爲場捲，電刷，電刷握，電刷搖臂，電樞鐵幅及軸承。第 57 圖示開放式電機各部之普通裝配。第 58 圖示半封閉式，第 59 圖示全封閉式。機器各部之主要構造情形，除樞捲外，將於下面各節陳述之。樞捲則俟第三章再詳細討論。



第 57 圖 多極電機



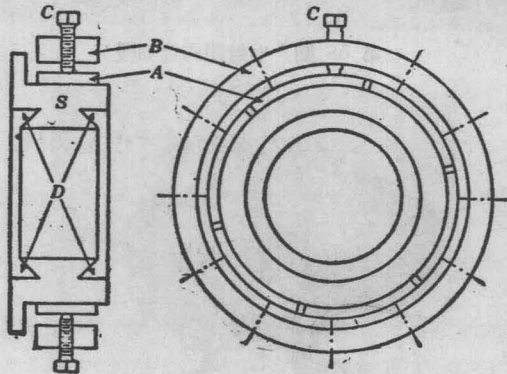
第 58 圖 半封閉式電動機



第 59 圖 全封閉式電動機

2-10. 雙極及多極機 上面所論，為簡單起見，假設磁場結構為雙極，但除最小容量外，實少用此式者。普通用之磁極數皆在四或四以上，在直流機中最多者達二十或二十四，此數隨容量而增，但不完全成比例。在各種情形下如何選定極數之原理，容後再解釋之；一般而言，極數之選擇，基於下述條件，即電樞有電流時之磁反應，為保持機器運用特性起見，不得超過規定之限度。再則電樞鐵心如有規定尺寸，而磁極片所蓋及之電樞面亦有一定百分數（約為 70%），磁極數愈增，則磁場外殼益為緊湊；但於磁極面之周圍伸長約等於極面之軸長時，則再加極數未必有益。充實磁場外殼之益處，乃在極與極間不經過電樞之漏磁較少。

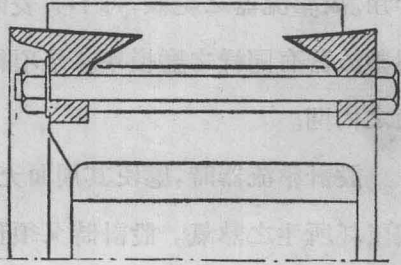
2-11. 整流器 整流器乃落鍛 (drop-forged) 或硬抽銅楔形截片所製成，各截片間以極薄片之絕緣物，如雲母等。多數截片，集成成一堅實之結構，其法殊為有趣。首以雲母絕緣之各截片置於扇形鋼環 *A* 之內周，如第 60 圖，再自鋼環 *B* 外面依徑向，通以帽式螺旋 *C*，使銅截片 *S* 合成一堅實之圓弧。然後以 *V* 形溝 *D* 刨去，與整流器鐵輻拴住，



第 60 圖 整流器之構造

再撤去輔助工作之鋼夾鉗，則外表面即可轉削成正圓柱形。

整流器與支持輪轂間之絕緣物，係範成圓錐形或圓柱形之雲母，如第 61 圖。整個整流器應受高壓試驗，俾知各截片間及截片與鐵輻間有充分之絕緣。① 但截片間之絕緣程度，並不必與截片與鐵輻間一致，蓋後者須抵禦機器之全電壓，而前者僅須抵禦截片間較小電壓。鄰近截片



第 61 圖 整流器之絕緣

間之平均電壓。在電燈用，或電車用發電機而非整流磁極式者，不應過 10—15 伏，在電車用電動機亦不過 20—25 伏。此種截片間平均電壓之限制值，乃根據於整流不生火花之條件，同時全整流器之最低截片數，亦即依此而定。例如，一六極，600 伏電車發電機，設截片間之電壓不得超過 10 伏，則反極性之鄰近兩電刷間至少應有 60 截片，即全整流器至少應有 360 截片。如每截片之最小周圍寬度確知，則整流圈之最小直徑亦即隨之而定。此最小寬度，罕有更小於 $3/16$ 吋者，其故有二：一，因外面如用更小之寬度，則截片向內漸小，內周面之截面將過薄；二，因表面如有陷穴，起炮或磨損時截片徑向應有相當深度，以便削平。

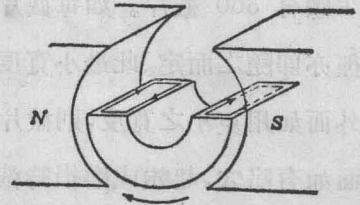
截片間絕緣之厚度約自 0.02 吋，至 0.06 吋，薄者用於低壓機，厚者用於高壓。此種絕緣材料，以琥珀雲母最相宜，蓋不特磨損率與銅相

① 美國電氣工程師會(A. I. E. E.)標準，規定各電周路間及電周路與接地之金屬部分間，皆須施以 60 秒時間久之高壓試驗。標準試驗電壓為交流電壓，其實際值(virtual value)為兩倍於受試驗機之規定電壓，加 1000 伏。但在用於 25 伏或以下電壓之各機，則為例外，而試驗電壓為 500 伏。

等，且可經高溫度而絕緣性不變，故常用之。其實，整流器上銅之損耗，由於磨擦者至少，其大部乃由於電流經截片與電刷間時所發生之電解作用。故整流器之絕緣，每不與表面相齊，而所選擇之絕緣材料，不必定與整流器有同樣之磨損率。是項絕緣材料，每於整流器裝合後，用磨機使之內凹。

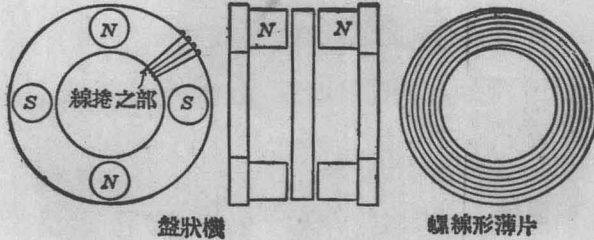
設計整流器時，應使其周面充分外露，以便發散因電刷磨擦及電刷觸阻耗所生之熱氣。設計時又須預算充分之機械力量以勝任所受之離心力。渦輪發電機在高速度轉動時，其直徑乃限於周速每分鐘不得過 8000 呎，故欲得充分散熱之面積，整流器之軸長必為甚鉅。為防止截片躍出起見，另用一鋼環以束住各截片，如第 71 圖，但鋼環與各截片應完全絕緣。

2-12. 電樞鐵心，渦流 (eddy currents) 電樞鐵心非僅供傳遞磁流自此極至彼極之用，且即在磁流中迴轉，適如電樞導線然。如鐵心為整塊，則此樞心可視為多數金屬細絲所組成，各細絲互連而與電樞導線並行。如是，每細絲因割切磁場而感生電勢，因之電流將循環於鐵心中如第 62 圖



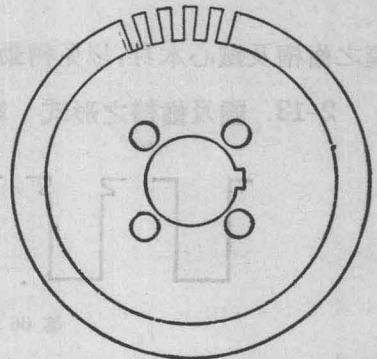
所示。此電勢於近表面處最大，蓋其周速度及磁流有效成分皆為最大。此種渦流（或稱佛科 Foucault 電流），如不阻止，則發生過度之熱量而增加工率之耗損。欲減小渦流，鐵心應由薄疊片砌成，使磁流仍可連續而渦流電路則被截斷。疊片之平面須與感生電勢之方向垂直；或依弗氏定則，疊片之平面須與磁流及運動方向

並行。通常徑向磁極式之機器，如第 57 圖，其電樞鐵心以互相絕緣而衝孔之薄鋼片 (punching) 爲之；有時各片之一側塗以一層油漆，以作絕緣物？然一般則以鋼片上所積之養化物或銹層，已足使薄片間絕緣：有時每隔一二吋加紙一層，以作絕緣。鐵心之用疊片砌成，並不能完全免除渦流，但其因渦流而損失之能耗乃依鋼片薄度之平方而減少。普通用於電樞鐵心之鋼片約爲 0.014 吋。現今罕用之盤狀電樞，如第 63 圖，其有效導線依徑向排列，鐵心乃以同心環狀或平坦螺線形之薄鐵帶組成。



第 63 圖 盤形電樞之疊片

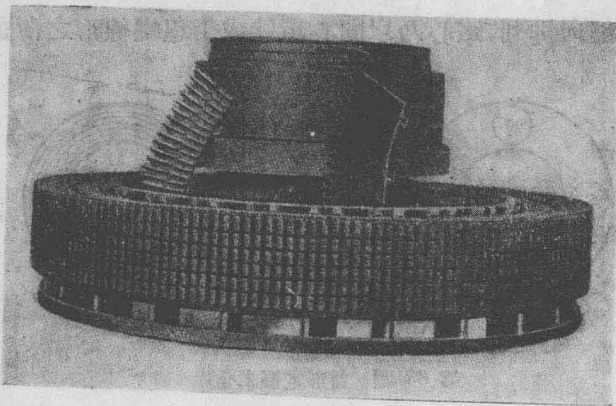
鐵心衝孔片直徑在 16 吋以下者，大概均用整片，如第 64 圖。先將鋼片切成盤形，然後用衝孔機切槽，每次切一槽或數槽。此種鐵心印模，普通即直接拴於機軸上，有時於近機軸處鑿小孔，以通空氣。大直徑之鐵心，則由多數之截片組成以鳩尾接合 (dovetail joint) 連於鐵輻 (spider) 如第 57 圖，截片間之連接每層各有參差，俾維持磁路不斷。鐵心衝孔片乃用端凸緣 (end flange) 連住；此端凸緣在



第 64 圖 電樞衝孔片

小機器中即直接以螺旋釘於機軸，在大機器中則兩端之鐵板，均用螺釘 (bolt)。惟螺釘經過疊片時，仍應絕緣，且端板之形式，須適可支持樞捲之端接(參照第 57 圖)。

通過鐵心之通風溝，以沿鐵心軸相隔 2 吋至 4 吋之間隔物組成之。此間隔物通常以銅條，用鉚釘 (rivet) 釘於甚重之衝孔鋼片上而製成，如第 65 圖所示；或在甚厚之衝孔片中，作圓球形之陷穴；或將鋼片電



第 65 圖 樞心之裝合

焊於衝孔片上。通風溝之寬度約自 $\frac{1}{4}$ 吋至 $\frac{3}{8}$ 吋，間隔物應足支持電樞之齒槽及鐵心本身，以免轉動時振動及發聲之弊。

2-13. 齒及齒槽之形式 第 66 圖示直流機齒槽之各種式樣。光心



第 66 圖 齒與槽

電樞 (smooth-core armature) 僅用於特殊機中。除極小機器外，一般

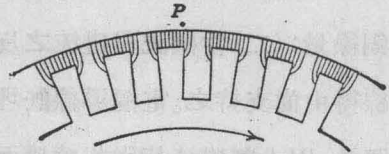
均通用並行邊壁之開口槽 (open slots), 因其在機型上所繞之絕緣線圈, 易於放入。如用半開口槽, 則線圈雖可在捲型 (winding jig) 上繞就, 而每線圈之兩邊, 不能同時置入槽內。在開口槽中, 各線圈用鋼絲或青銅絲繞於電樞上, 或用木質或纖維楔形, 釘入齒端之凹穴, 以使線圈在槽中不致移動。

電樞線捲埋置於槽中有二作用: (一) 氣隙 (即自極面至電樞鐵心表面之距離) 較同量銅線之光心構造者為小, 故可減少激勵同量磁流之磁場銅線量; (二) 當樞流與磁流之反作用使電樞導線受正切方向之力時, 導線得由齒支持之。電樞導線既埋置於槽內, 則磁場磁流之感應作用亦可避免, 因大部磁流皆從齒繞槽而過。是以有槽電樞中之感生電勢與光心電樞中者同, 初視之, 似覺驚異, 然須知在某瞬間內, 自此極面至某一齒尖之磁力線, 因電樞之轉動, 稍後必自此齒尖傳授至其次之齒尖。磁力線初與第一齒相連, 如引伸彈性之絲然, 待此力線所受之張力漸增, 此力線乃忽然破斷而與其次齒相連。此導線割切磁力線之速度增加 適足以補償磁場強度因有槽而減低之作用, 故其感生電勢完全與光心電樞者無異。

2-14. 磁極鐵心及極軛 磁極鐵心通常以鑄鋼為之。如用鑄鋼, 磁極切斷面通常為圓形, 如此磁場線捲之銅線之長度與重量, 可得最小。如極心係用疊片砌成, 則其切斷面當然應成正方形, 整塊極 (solid pole) 通常以螺柱釘於軛上, 疊片極 (laminated pole) 則以鳩尾接合與軛相連, 或鑄於軛上亦可。

極心中之磁流密度, 有高至每方吋 110,000 力線者。如氣隙中亦有

此種高值，則頗不經濟。通常氣隙中之平均磁流密度，不得超過每方吋 62,000 力線。是以極面面積必須大於極心之切斷面面積，而此增大之面積，於整塊極中則可用一極靴釘於極心，或以鳩尾接合連結之，疊片極每片一端可於穿孔時附加突出之角（作喇叭形），而得較大之極面。無論整塊極或疊片極，極面或極靴幾乎均為疊片，以減少其中因樞齒所生渦流之能耗及發熱。如第 67 圖所示，經過極面及樞心間之磁流，勢欲叢集於電樞之齒部，當齒行經極面，此等叢集磁流均向旋轉之正切方向伸引，迨所受之張力過大，力線乃自此齒躍至其次之齒，是以叢集磁流前後繼續躍動。設



第 67 圖 齒尖之叢集磁流

極面由許多細絲構成，而第 67 圖之 P 點即代表細絲之一，則各絲將割切此躍動之叢集磁流，或前或後，時相交換，因之感生與軸並行之交流電勢。欲減此電流，極面應以疊片製成，其砌成疊片之方向與電樞同，但極靴疊片不必如樞心疊片之薄。將齒與槽之大小支配得一適當比例，使極面上之磁流無分佈不均之現象，則渦流之能耗，自可大大減少。此項比例之決定，則視槽之開口與氣隙之比數與氣隙本身之長度而定。

2-15. 軛 軛為磁場之一部分，可使磁流自此極通至彼極，且同時為極心之支持物。小機器中，軛用生鐵製成，於大機器中及需要減輕重量時，則以鑄鋼為之。西屋電氣公司軛之製造，乃以平鋼板燒熱而後捲成圓形，兩端間之對頭接點則安置於極心之軸上，使於磁周路中，不致增加磁阻，中號或大號機器之軛，為便於裝合及修理計，通常就水平直徑

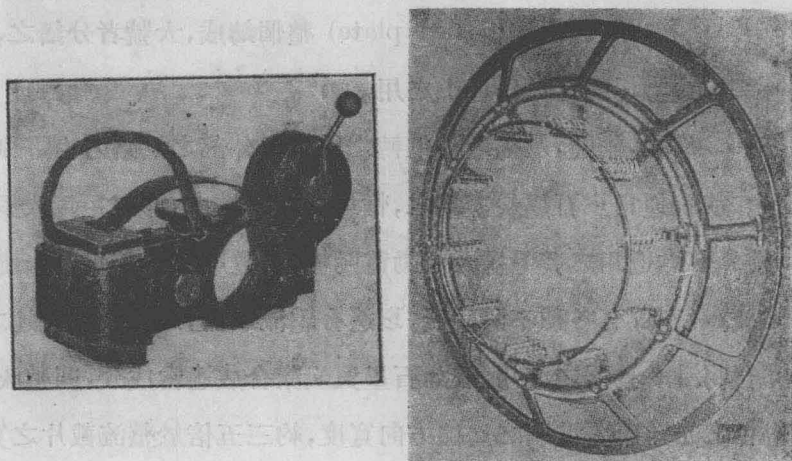
分開。中號機器之軛每與底板 (bed plate) 整個鑄成，大號者分鑄之，但附有耳突 (lug)，以便釘於底板上之用。

2-16. 電刷，刷握，及搖環 迴轉之電樞與外部之電路乃由電刷爲之連接。電刷通常以石墨炭素爲之，惟於低電壓機中，亦有用銅或銅網者。自動車內點燈用之發電機及起動電動機，其電刷大概用炭及金屬銅混合製成。炭刷可有各種不同硬度，以適合整流之需，此將於以後述之。石墨亦有潤滑整流器之作用，故如石墨與炭素合成適當成分，則整流器起暗褐色之光澤面。電刷之切線方向寬度，約三五倍於整流截片之寬，故可有數樞圈同時短路。炭刷應有充量電阻，使短路線圈中之電流減至甚小，俾於短路開斷時，不致發生火花。

電刷通常與迴轉方向取一向後傾斜之角，然如迴轉之方向可變，如鐵道電動機，則安置電刷之方向，應作徑向。

當電刷之切線方向寬度已決定時，每組電刷之軸向總長度以每通過 30 至 50 安電流應有接觸面一方吋爲準，但於有整流極之電機中，電流密度當可超過此值。每刷之切斷面不宜過大，否則全面將不易有良好之接觸。若將每組電刷分成多刷，則不致有此弊，且每刷可依次修理，而機器仍可照常負載，運用無妨。故單獨電刷之構造，僅於小電流機器中見之。

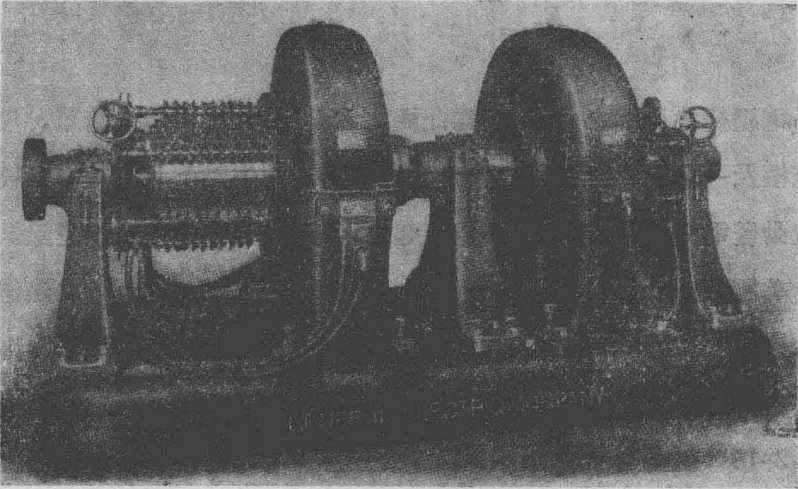
各電刷由金屬刷握支持，而刷握更以附着於電刷搖環之柱釘支之，如第 68 圖，但柱釘與電刷搖環互相絕緣。刷握之功用，乃在使電刷可依不平之整流器面自由滑動，故其構造應使電刷不致發生振動，蓋振動實爲通常發生火花之原因。電刷所以得接觸整流器面，乃電握有調節之彈



第 68 圖 刷握與搖環

簧附着，但彈簧中並無電流通過，彈簧之彈力普通調準至使電刷在每方吋之接觸面積上有 1.5 至 2 磅之力，壓於整流器。再增加電刷壓力時，接觸電阻未必可以減多少，而滑動時之磨擦阻力反大。以致能耗增加，而整流器之發熱亦增。電刷與刷握間，乃以可屈曲之編組銅線連接之，名曰豚尾 (pigtail)，此線與刷之外端，用緊夾炭刷本身之金屬帶相連。炭刷外端，通常包以銅片，使有良好接觸。

2-17. 電動發電機組，發電電動機 吾人每因事實上之需要，欲將直流電自某一電壓變至較高或較低電壓，則電動發電機組尚焉。普通結構，電動發電機組由二機器組成，一為電動機，一為發電機，兩機直接連續，且裝於同一底板上，如第 69 圖所示。電動發電機組又可用以變直流至交流，或交流至直流。此式機器之利益，即發電機之電壓可自由控制，與電動機無關。此裝置之總效率，乃為兩者效率之積。電動機之功率定額必須充分大於發電機，因其能力有兩度轉換之損失也。



第 69 圖 電動機發電機組

將電流自此電壓換至彼電壓，如不用電動發電機組，則可代以包含該二機作用之一整機，名曰發電電動機 (dynamotor)。此機之磁場結構及電樞鐵心皆僅一個。此機之電樞中，線捲凡二，各有整流器及電刷。電流可通入一線捲而得電動機作用，而另一線捲則感生電勢。此種機器僅可用於小量或中量者。其缺點為發電機端之電壓乃隨電動機外加電壓而定，不能獨自調變。蓋如電動機之外加電壓為 V_m ，則電樞旋轉於磁流 Φ 中將發生一近乎等量而相反之電勢於其樞捲中（見 2-1 節）。若電動機中無損失，則此反電勢將等於 V_m ，故依方程 (7)，

$$V_m = \frac{p \Phi Z_m n}{a_m \times 60 \times 10^8}。$$

發電機之線捲既與電動機之線捲旋轉於同一磁場內，且速度亦同，故發生之電勢為

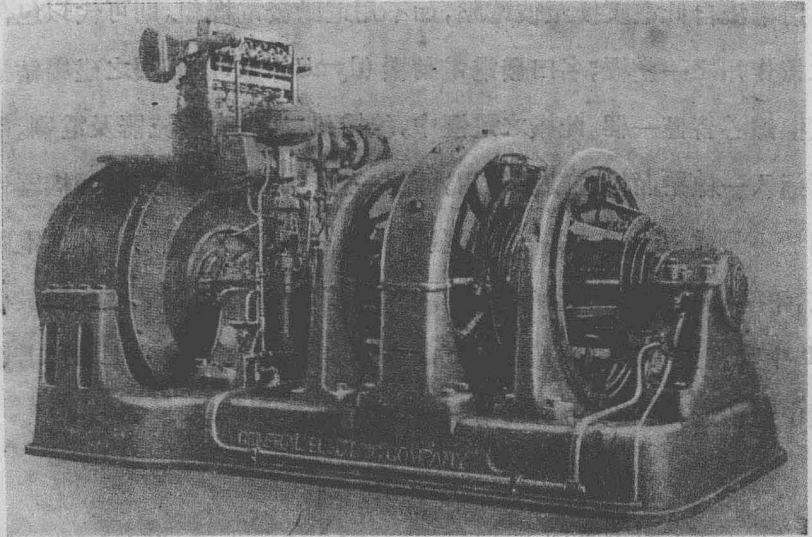
$$E_g = \frac{p}{a_g} \frac{\Phi Z_g n}{60 \times 10^8}$$

或
$$\frac{E_g}{V_m} = \frac{a_m}{a_g} \cdot \frac{Z_g}{Z_m} = \text{常數} \quad (18)$$

電壓變換比例之一定，固為此機之劣點，然其構造十分簡單，僅需一電樞及一磁場，故價格較廉，足以補償上述之劣點。且其效率亦較高於電動發電機組，因電樞反作用而起之種種毛病，亦幾盡可以免除。

美國 Delaware, Lackawanna & Western Railway 之鐵道電氣化，即用 3,000 伏之發電電動機。該電動發電機組之電動機，除拖動一供給電燈之 40 伏發電機外，並供給 1500 伏電源於壓氣機。^①

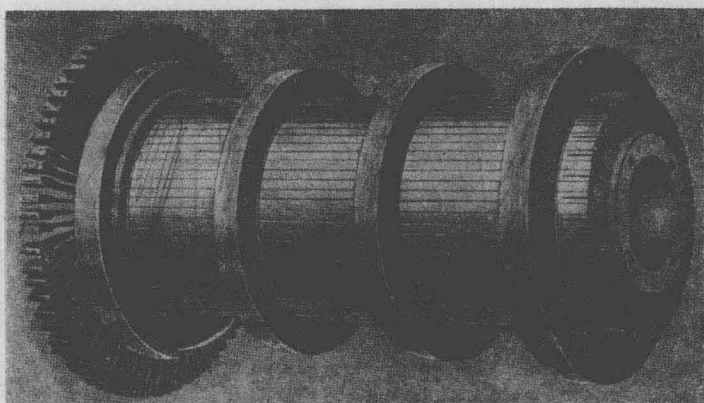
2-18. 渦輪發電機 (turbo-generator) 直接連於蒸汽渦輪機之發電機，須設計為高速度旋轉之用，蓋惟在此情形之下，汽輪機方可得最高



第 70 圖 渦輪發電機組

① Axtell, J. C., "Auxiliaries for High-voltage Direct-current Multiple-unit Cars," Jour. A. I. E. E., p. 523, June, 1930.

效率。高轉速之電機，設計時須特別注意，使能經受離心力，及整流時不致發生火花。故樞捲之端接線，須以金屬之端殼 (end shells) 紮住，而不用通常之紮帶線；且以鋼鐵環擁夾整流截片，以免跳動。爲得滿意之整流計，此等機復用整流磁極，或稱內間極 (interpoles)，其作用乃使線圈受整流時，於整流截片經過電刷所需要之短時間內，發生一大小與方向皆甚適當之電勢，以助電流之轉向。第 70 圖表示一奇異公司所製 300 瓩，125 伏，1500 轉/分之渦輪發電機。此機有雙重整流器，整流磁極在主極之間，圖中表示甚顯。第 71 圖示圍繞一 125 伏，125 瓩機器整流器



第 71 圖 高速發電機之整流器

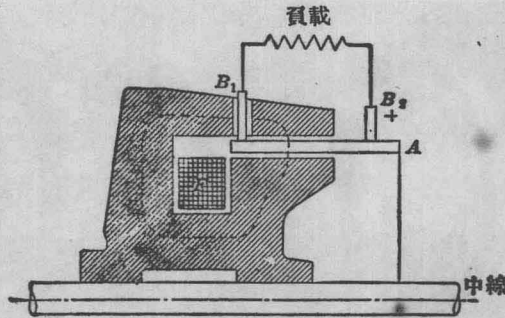
之鋼鐵環。

渦輪發電機須有較佳之電刷，俾得完善之整流。電刷磨蝕甚速，須謹慎調準之。

2-19. 整流磁極電機 整流磁極之功用將於另章詳述之。整流磁極乃置於主極間之小磁極，繞以線圈，而通過樞流之全部或一部。如渦輪發電機及可調速電動機等機器中，整流時每難避免火花之發生，則用

整流極以補救之。

2-20. 單極電機 (unipolar machine or homopolar machine) 以上各節所述之電樞中，交流電勢先由各線圈感生而以整流器矯正之。故整流器之作用，頗似複式往復運動抽水機之活門 (valve)。但在離心抽水機中，其發生之壓力祇有一方向，故無需矯流活門，此與電機中之單極發電機適為相似。單極機或可名為非循環 (acyclic) 機，其切面如第 72 圖所示。此機之原理乃由一導線於磁場中斷切磁力線，而切向皆為一致，故確係一連續電流機。其電樞為一低電阻之金屬圓柱 A 與軸絕緣，其端



第 72 圖 單極發電機

有兩組滑動接觸之電刷 B_1 與 B_2 。電樞旋轉於激磁線捲 F 所發生之磁場中。圖中虛線即示磁流之路線。磁力線經過氣隙均垂直於極面之周圍。

若在氣隙間之磁場強度為 B 線/方呎，圓柱體有效部分之軸向長度為 l 呎，而其周圍速度為 v 呎/秒，則發生之電勢為 $e = Blv \times 10^{-8}$ 伏。此式機器之最大可能電勢，乃決於 B 與 v 值之限度；同時長度 l 則限於機械上之種種條件，如穩定及無振動等。但欲得適當之電壓，旋轉速度須甚高，而與電刷良好之接觸，甚為難得。如 $B = 15,500$ (100,000

線/方吋), $l=60$ 呎(約 2 呎), $v=5,000$ 呎/秒(約 10,000 呎/分), 則 $e=46.5$ 伏。電樞既含有大切面之單導線, 此機適於需要電流較大而電壓較低之用。然當機器受載時, 電樞中巨量電流之磁化作用將使激磁圈 F 下所生之磁場減弱, 而使電壓下降甚巨。

從單極機與離心抽水機之相似點可得下述之意思。離心抽水機如用數級, 可得高壓, 故單極電機, 亦可用數感應體串聯而得高壓。此種機器, 奇異公司^①曾製造, 為 300 瓩, 500 伏, 3000 轉/分者; 西屋公司^②所製者, 則為 2000 瓩, 260 伏, 1200 轉/分。

2-21. 電機之磁激 電機中電樞感生之電勢全藉其導體於磁場中移動而得。在舊式機器中磁場乃由永久磁石發生; 此種機器稱曰久磁電機 (magneto-electric machines), 簡稱久磁機 (magnetos)。現此種式樣僅用於小電話系中之呼喚鈴, 煤氣機之着火器及試驗用之小機器中。其他各種發電機電動機之場激, 則皆用電磁鐵 (electromagnet), 磁激之方法約分別之如下:

別激 (separate excitation)

自激	{	串激 (series excitation)
		分激 (shunt excitation)
		複激 (compound excitation)

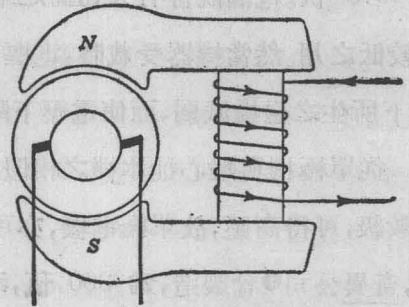
2-22. 別激 如用此種磁激法, 場捲中之電流, 乃由電機本身外任何電源供給, 如蓄電池組及發電機等是。此式之顯著者為交流發電機及

① Noeggerath, J. E., Trans. A. I. E. E., January, 1905.

② Lamme, B. G., Trans. A. I. E. E., June, 1912.

電鍍用之低壓直流發電機。第 73 圖乃示此種機之連接法。

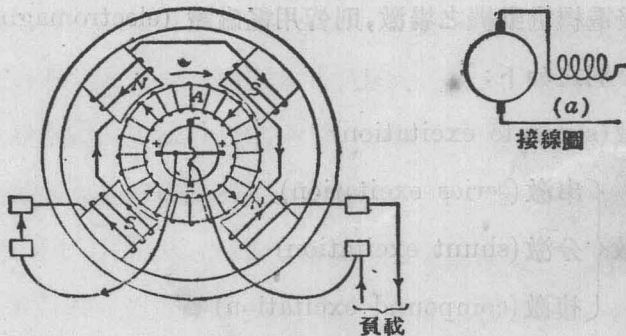
2-23. 自激 用別激之電磁鐵以發生磁場乃於 1862 年由王爾德 (Wilde) 首先應用。至 1867 年西門子 (Werner Siemens) 氏發見自激之原理，磁激法乃更進一步。自激之法即以樞流之全部或一部流過場捲而使機器發生其



第 73 圖 別激電機

自身之磁場。自激電機，依場捲與電路他部之連接法而分三類，即串激，分激及複激是。

2-24. 串激 在第 74 圖中，A 示電樞，N, S, N, S 為四極。電路各部既為串聯，故所有外部電路之電流皆通過中場捲及電樞。箭端乃表



第 74 圖 串激發電機

示用作發電機時之電流方向，其電樞旋轉之方向，則為順時針向。

若此機之磁場本未磁化，則電樞之旋轉不生電勢，而電路中將無電流。故凡機器之自激者，於磁極內須留有以前運用之剩磁 (residual

magnetism)。如在新機器時，可自適當之外部電源先輸送電流於場捲。設已有剩磁，則當電樞旋轉時可發一小量電勢，若將外部電路經負載而閉合，則有小量電流流過，此電流更能激發磁場而感生較大之電勢及電流。如此電勢及電流乃依次漸增而達一平衡狀態。此平衡狀態乃視磁場之飽和程度及周路之電阻而決定，第六章中將詳論之。

如磁場之兩端接錯，則機器將不能『建起』(“build up”)，此應切實注意者。蓋如此則電周路中因感生電勢而得之電流方向反足以將原有剩磁中和，而失其作用。又或電路之電阻超越某臨界值，則通過之電流亦不足生適當之磁化力，而電機亦遂不能建起。

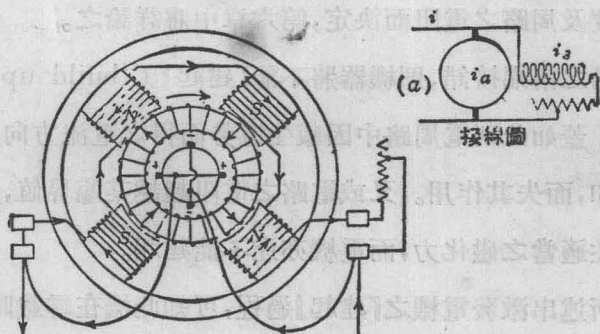
自上所述串激發電機之『建起』過程，可知此機在零載時(即外部周路未接)，僅可賴剩磁作用發生小量電勢；待外部電阻減低，電流增加，則電勢亦隨之增高，惟增高率並不與電流成正比。

串聯電機之場捲，以數匝之粗線爲之。電機輸送外部周路之總電流 i ，必須流過場捲電阻 r_f ，故場捲部分即有 $i^2 r_f$ 瓦之能耗。此損失應愈小愈佳，俾使電機之效率不致受大影響。又電流之大小既依供給之負載而定，則 r_f 應愈低愈佳；故此種場捲電線截面宜大，且不宜過長。

今再從另一方面討論之：場捲電線截面之選擇，可依下面第 2-27 節方程式(26)中之各項而定。其中一項，即爲每對磁極或每磁極於發生適當磁流(此適當磁流即足以感生所需之電壓者)時所需之安匝數。此安匝數視磁流之數值及磁路之大小與質料而定，將於第五章詳述之。設電樞及磁場之結構皆已規定，欲得某一電勢，無論何種磁激法，其所需之安匝數均相同；故依方程式(26)，場捲電線之截面應與經此線捲之電

位降落成反比例。於串激場捲中，此電位降落應使甚小以減少功率消耗，故場捲截面應相當增大。

2-25. 分激 第 75 圖所示之電樞及磁場與第 74 圖同，惟場捲為分激式。第 75 圖 (a) 示最簡單之接線圖，觀此可知磁激電流實依電刷



第 75 圖 分激發電機

間之電位差及場捲之電阻而定，其理甚明。外部電阻之變更，雖足以影響於刷間之電壓而間接及於磁激電流，但磁激電流之變更甚小，並不如串激電機中外部電阻影響之大。如外電路完全未接，則電樞、磁場分捲及磁場變阻器之連接，與前述之串激發電機完全相同。故分激發電機斷路時之『建起』，適如串激發電機在有載時相同。如不能『建起』則其原因必如前論串激發電機時所云。

分激發電機在斷路時，(即無電流供給外部電路時)，可得端電壓之全值，與串激式者不同。今以分激機與高電阻之外電路相接，並供給小量之負載電流 i 。樞流 i_a 於無載時本僅為 i_s ，今乃為 $(i+i_s)$ ，此所增之電流經過電樞阻時，將使端電壓降落，而磁激電流 i_s 及磁流與感生之電勢均將隨之而減。載流愈增則端電壓愈降。欲減少此電壓降落至最

低限度，則電樞阻應為極小，其理甚顯。負載狀態下電壓之降落，亦受電樞反作用及磁路飽和程度之影響，下面第六章中將詳論之。

分激電機之場捲應以多數細導線為之，理由如下：若機器之端電壓為 V 伏，分激磁場電流 i_s 即為 $\frac{V}{r_s}$ ，而功率消耗為 $i_s^2 r_s = \frac{V^2}{r_s}$ 。 V 值既由他種原因決定，欲使 i_s 及能功率消耗減低， r_s 應使增大。故分激場捲宜用小截面導線，且應有相當長度。

依方程式 (26)，可知場捲之截面與其所受之電壓成反比例。在分激電機中，此電壓約等於端電壓之全值，故分激機之場捲電線應比串激機所需者為細，蓋串激機中場捲之電壓降落僅端電壓之一小部分耳。

在發電機作用時，電樞電流 i_a ，線路電流 i ，及分激電流 i_s 之關係，可以下式表之。

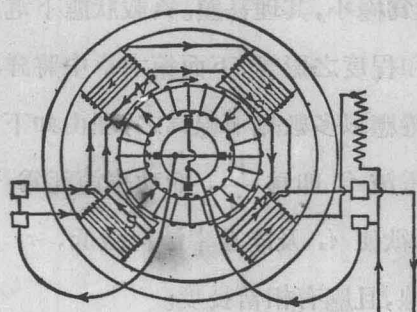
$$i_a = i + i_s \quad (19)$$

在電動機作用時，其關係當為

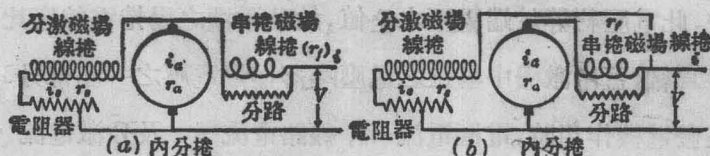
$$i = i_a + i_s \quad (20)$$

但有一點須特別注意：即分激電動機中之樞電流及磁場電流，並非依其電阻之反比例而分配，蓋當電樞旋轉時，其中即感生反電勢，磁場電流為 $i_s = \frac{V}{r_s}$ ，但樞電流則為 $i_a = \frac{V - E_a}{r_a}$ ， E_a 即代表反電勢。

2-26. 複激 直流機之最重要應用，如電燈電車等，需要在任何負載下保持定值之電位差於其供電幹線間。但負載中心通常離發電機甚遠，於外電流增加時，發電機兩端之電位差亦必有相當增加，方足以補償供電幹線間之電位降落。欲得此種特性，則磁場須採用複捲式，乃由串捲及分捲組合而成，如第 76 及 77 圖所示。第 77 圖 (a) 之連接為內分捲式，



第 76 圖 複激發電機



第 77 圖 複激電機之接線圖

圖 77(b) 則為外分捲式。分捲本身有下垂之特性 (drooping characteristic)，即當電流增加時，端電壓隨之而降，前節已述及之。但串捲所供給之磁激隨電流而增加，串捲與分捲二者之總效用乃視二種場捲磁化作用之量及向之關係而定。若依適當比例，則電壓—電流曲線可使上昇，此種情形謂之超複激 (over compounded)；若電壓於任何電流值時，均維持一定值，則謂之平複激 (flat compounded)；又若電壓—電流曲線下垂，論其下垂程度較僅有分捲者或大或小，皆謂之低複激 (under compounded)。

內分捲複激發電機中樞流 i_a ，線路電流 i 及分激磁場電流 i_f 間之關係為

$$i_a = i + i_f$$

端電壓 V 與感生電勢 E_a 之關係爲

$$E_a = V + i_a r_f + i_a r_a \quad (21)$$

分激磁場電流爲

$$i_s = \frac{E_a - i_a r_a}{r_s} = \frac{V + i_a r_f}{r_s} \quad (22)$$

外分捲複激發電機中，則得下列各關係：

$$i_a = i + i_s$$

$$E_a = V + i_a r_f + i_a r_a \quad (23)$$

$$i_s = \frac{V}{r_s} \quad (24)$$

2-27. 磁場捲之構造 設計分激，串激，複激電機之場捲時，欲於導線之匝數及截面有正確選擇，必先知發生磁流 Φ 所需之每極安匝數及磁極鐵心之大小。此種計算之原理，容於第五章中詳述之。設每極安匝數及磁極鐵心之大小均已決定，則分激場捲所用導線之大小，可用下法決定之：

命 i_s = 分捲中之電流

V = 零載時之端電壓，

v_r = 變阻器中所耗之電壓，其量約爲 V 之 10—20%。

磁場變阻器之目的乃使場路之電流可以調變。當變阻器之電阻減少時， i_s 即增加，而感生電勢亦增。

故每極線捲之電阻爲

$$r_s' = \frac{V - v_r}{i_s \rho} = \rho \frac{\frac{1}{2} n_s l_t}{A} \quad (25)$$

其中 ρ = 線捲在通常溫度(約 $75^{\circ}\text{C}.$)時之比電阻

n_s = 每對磁極之分捲匝數

l_i = 每匝線圈之平均長度

A = 導線之截面

如長度以呎計, 截面以圓呎(circular mil)計, $\rho = 12.6$ (在 $75^{\circ}\text{C}.$ 時), 則

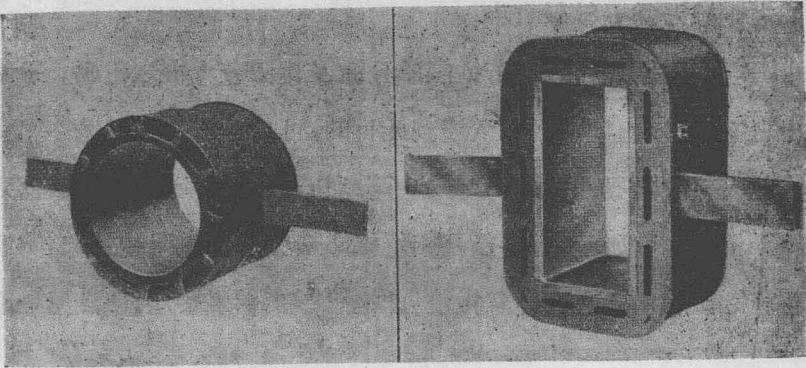
$$A = \frac{6.3(n_s i_s) l_i \rho}{V - v_r} \text{ 圓呎} \quad (26)$$

就一般言, 無論場捲之為串激或分激式, 線之大小與其他各項之關係可以下式表之

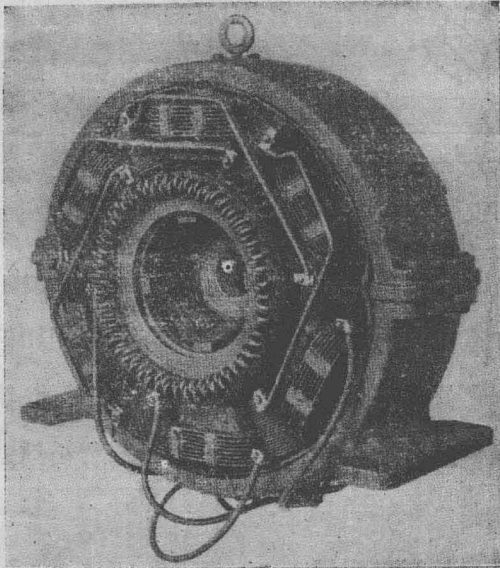
$$A = \frac{6.3 \times \text{每對磁極之安匝數} \times \text{每匝之平均長度}}{\text{每極之電位降落}}$$

假定線捲之深度為 1 至 3 吋, 今試求每匝之平均長度 l_i 。如磁極鐵心之截面為長方形, l_i 約等於鐵心之周圍長度, 加線捲深度之四倍; 如為圓形, 而其直徑為 d_c , 則 $l_i = \pi(d_c + \text{線捲深度})$ 。線捲深度不得超過定限, 否則鐵心內部發生之熱量不易傳至表面。上項計算, 可再核對如下: 線圈中功率消耗 ($i_s^2 r_s'$) 須使每方吋表面之散熱量不致超過三分之二瓦。

分激線圈通常以圓形或長方形截面之棉包線為之。時或繞於金屬架上而套於磁極鐵心; 時或繞於可移開之捲型上。而線圈之形式則以適當之絕緣材料使之固定, 且塗以避濕之油漆。當用金屬架時, 線捲常用複壁而使磁極鐵心與線捲間之空氣可以流通, 如第 78 圖所示。串激電車電動機之線圈通常先浸於絕緣之化合物中, 然後再紮帶及油漆。複激式



第 78 圖 通風扇圖



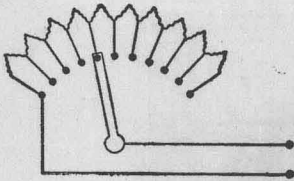
第 79 圖 內間極機，縱接之銅片線圈。

與有整流極電機之串激線圈常用銅片，匝間隔以絕緣體，而於銅片邊端縱接之，如第 79 圖所示。

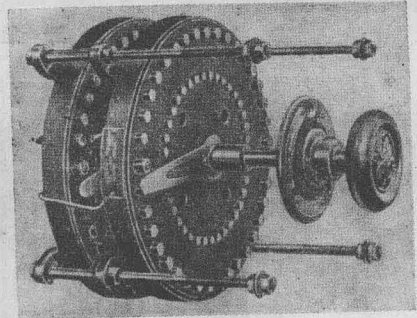
欲使鄰近磁極線圈易於連接起見，每線圈之兩端分置兩面，故每極

線圈之匝數乃爲一整數有半。

2-28. 磁場變阻器 若欲調整分激及複激發電機之電壓，分激磁場中之電流必須有所控制。欲達到此目的，可於分激捲中插入一可變電阻或磁場變阻器與分捲串聯，如第 75 與 76 兩圖所示。此電阻器之配置約如第 80 圖所示，有多數互相絕緣之接頭自高電阻線通出，另有一可移動之接觸柄與各點任意相連。此電阻器兩端之接法，使調整柄順時



第 80 圖 磁場變阻器之接法

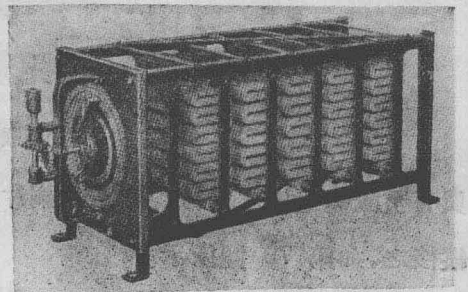


第 81 圖 磁場變阻器

針向轉動時增加電阻，減少電流，與普通活門之作用相似。

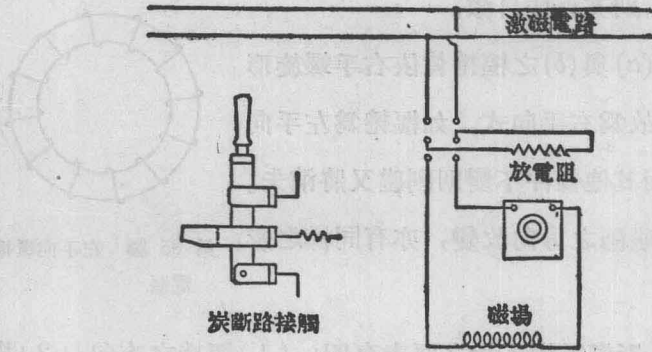
磁場變阻器常置於電鑰板之後，調整柄則在板前。第 81 圖示奇異公司所製之磁場變阻器。大電機之磁場變阻器皆由鑄鐵柵製成，如第 82 圖。

大量之分激與複激發電機中儲於磁場內之能量甚大，等於 $\frac{1}{2} L_s i_s^2$ ， L_s 即爲分捲之電感，其值可至數百亨〔利〕(henry)，若 $L_s = 600$ ， $i_s = 4$ ，則磁



第 82 圖 大變阻器

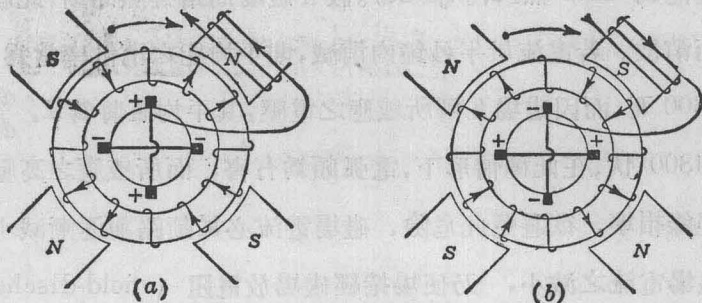
場之儲能為 4800 焦[耳] (joule)。假令磁場周路猝然間斷，此儲能將隨電弧而消散。若電流於半秒鐘內消滅，則平均能之消散率當為 $4800 \div \frac{1}{2} = 9600$ 瓦，而因磁場瓦解所感應之電壓，其平均值將為 $L \frac{di_s}{dt} = 600 \times 8 = 4800$ 伏，在此種情形下，電弧頗為有害，而所感應之高壓將使線捲之絕緣損壞，欲避免此危險，磁場電流必於斷路前逐漸減小。大電機中磁場電流之減小，乃使場捲經磁場放電阻 (field-discharge resistance) 而放電，其連接法如第 83 圖所示。



第 83 圖 磁場放電電阻之接線圖

2-29. 發電機之極性 上述各種自激發電機運用時，磁場內必須有剩磁，且激磁電流之方向亦必適足助剩磁磁場之增加。換言之，電機之極性乃依剩磁而決定。

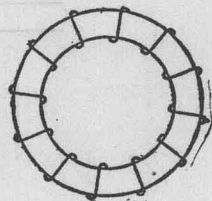
例如第 84 圖 (a) 與 (b) 所示兩分激發電機，完全相同，但第二機之剩磁適與第一機者相反。若兩機均順時針向轉動，則皆能發電，但甲機端極性適與乙機相反。如圖中所示之接法，若轉動作反時針向，則所發生之場激電流適使剩磁消失，但如互換場捲兩端之接法，而兩機仍反



第 84 圖 剩磁反向之影響

時針向轉動時，則亦可成自激。

第 84 圖 (a) 與 (b) 之樞捲皆依右手螺旋形繞於鐵心上，故為右手向式。如樞捲為左手向式，如圖 85，而其他條件不變則剩磁又將消失。再若線捲繞於磁極之方向改變，亦有同樣之影響。



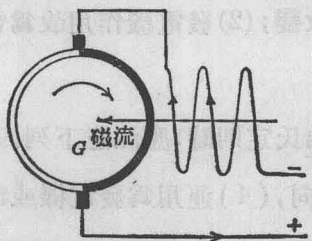
第 85 圖 左手向環捲電樞

綜上所述，影響電機極性之要素有四：(1) 樞捲之方向，(2) 場捲之方向，(3) 轉動之方向，與 (4) 場捲與電樞各端之接法。有一定之剩磁時，此機之四要素必有適當關係，方能運用。設運用情形已適當，四要素中任改其一，則剩磁將被消滅。但若同時更改二要素，則不影響於運用。在同一磁流中，一右手向式之電樞，作順時針向迴轉，如將一左手向式之電樞，作反時針向迴轉，得到相同之電刷極性。總之，如本來情形為適當，則所改之要素如為奇數時，將影響其運用之情形，而所改為偶數時，則於運用不生影響。

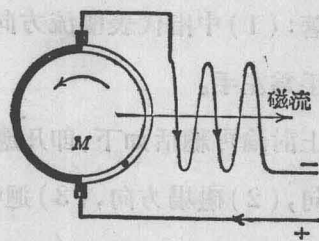
2-30. 電動機迴轉之方向 發電機中各種式樣之場捲與接法，電

動機中可得同樣之應用。串激電動機如供以一定之端電壓，則負載增加時，其速度減低甚速；反之，若去其負載，則機將「跑走」(“race”)。此種電壓固定而速度改變之特性，乃為串激發電機速度固定而電壓改變之一種反射影像。串激電動機既有變速特性，故適於電車與起重機之用。再者，分激電動機，如供以一定之端電壓，無論何種負載，其速度幾皆不變，恰如分激發電機於固定速度轉動時，能在各種負載情形下，供給恆量端電壓然(以不超過機量為限)。如複激之發電機有充分超複之特性，用作電動機，并供以一定之電壓，則增加負載時，速度亦增(參看第七章)。凡此皆表示發電機與電動機之相互關係，蓋超複發電機在恆速度轉動時，電壓乃隨負載增加而增加。

第 86 圖示一串激發電機，樞圈之黑色半部表示電流流入紙面，其他半部則適相反，若此機用作電動機，而與電源相接如第 87 圖所示，



第 86 圖 串激發電機

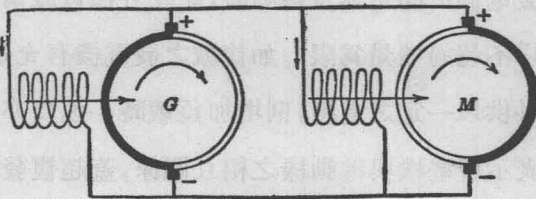


第 87 圖 串激電動機

則依弗來明氏左手定則，迴轉之方向必相反，故串激發電機如與其他發電機同連於電氣網絡時，串激發電機或有改為電動機而反其迴轉方向之可能，因此將有扭毀原動機連接桿之危險。迴轉方向改變之基本理由，乃因發電機改電動機時，樞流與場流同時反向，今從弗氏右手及左

手定則之觀察點，可注意下述三變化，即：(1)中指代表之樞流方向改變，(2)食指代表之磁場方向改變，(3)發電機之作用改為電動機作用，應以左手代右手。

今再討論二相同分激機，甲用作發電機，乙則用作電動機，如第 88 圖，二機迴轉之方向均相同，故知分激發電機與其他發電機共同供給一



第 88 圖 分激發電機與電動機

電氣網絡時，即或其原動機不再拖動發電機，此發電機即變為電動機，仍照原來方向轉動而無反轉之危險。若用弗氏定則說明，則變化凡二，甚為顯著：(1)中指代表樞流方向之改變；(2)發電機作用改為電動機，故改右手為左手。

以上討論可總括如下，即凡應用弗氏定則時，應注意下列四項：(1)樞流方向，(2)磁場方向，(3)迴轉方向，(4)運用為發電機或電動機。四項之中，如改變為奇數時，則其餘各項之一亦受改變，如改變為偶數時，則其餘各項不致更改。

是以將供給電動機總電路之極性反換，此電動機無論為串激或為分激，將改上述四項中之二，即樞流方向與磁場方向皆將改變，而迴轉方向則不發生影響。故此種式樣之電機均適於交流之用。若欲使電動機迴轉之方向改變，祇須就樞流方向或磁場方向中任改其一，但兩者均改，

則不能達此目的。

習 題

習題 2-1. 有一集中線圈，凡 100 匝，繞作橢圓形，其長徑為 25 呎，短徑為 15 呎。線圈迴轉於經過橢圓長徑之軸上，其均勻速度為 900 轉/分。線圈位於磁場強度 100 高 (gausses) 之勻布磁場內，其方向與迴轉軸成 60 度角。問其最大及平均之電勢為何？問相當於以上電勢值時，線圈平面之角度為何？

習題 2-2. 第 45 圖中之八極交流發電機，每極有磁力線 2.07×10^6 根，依正弦波形分佈於電樞之周線上。每槽含導線 20 根。樞捲中所有之導線皆串聯。如迴轉速度為 375 轉/分，問電勢之最大及平均值為若干？

習題 2-3. 設所有題材與上題相同，惟磁力線經過氣隙時為勻布徑向線。問電勢之平均及最大值為何？畫一曲線以表明每一完全週波內電勢之變化情形。

習題 2-4. 一環捲電樞上有捲線 800 匝，勻佈於樞之周面。電樞在八極之磁場內迴轉，每極有磁力線 2.5×10^6 根。如欲發生電勢 115 伏，問電樞之迴轉速度應為若干？

習題 2-5. 設上題之樞捲每匝長 2 呎，美規 (B. & S.) 6 號銅線製成。問在攝氏 85 度時，兩刷間之樞阻若干？

習題 2-6. 某機之迴轉速度為 650 轉/分，其整流器之直徑為 18 吋。電刷凡四組，每組有炭刷四個，每刷之接觸面積等於 1.5×0.25

方吋。每方吋之接觸壓力爲 1.9 磅，炭與銅之摩擦係數爲 0.3。問電刷之摩擦耗爲若干瓦？

習題 2-7. 某 220 伏分激電動機在零載時，需用場流 3.0 安及樞流 4.0 安。從實驗得知：若該機靜止時以 9.8 伏之電壓加於電樞上，即可得 115 安之滿載樞流。問樞捲及場捲之電阻各爲若干？零載時反電勢之值爲若干？又零載及滿載時，樞捲及場捲之歐耗爲若干？

習題 2-8. 設上題中之電機加一串激場捲，其電阻爲 0.038 歐，又將一磁場變阻器與分激場捲串接，今將該機作發電機運用，得載流爲 100 安，而分激電流爲 3.5 安，該機之樞捲，在此轉速時，發生電勢 280 伏。問在 (a) 依外分捲接法時，及 (b) 依內分捲接法時，該發電機樞捲，分捲，串捲及磁場變阻器中歐耗各爲若干？

習題 2-9. 第 7 題中，電動機共有四極，其分激場捲係用第 14 號銅線。場捲爲圓筒形，其平均直徑爲 12 吋。問每圈之匝數若干？（假定運用溫度爲攝氏 80 度）。

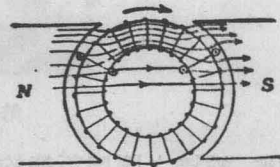
習題 2-10. 在某森林後有一魚池，該處僅有一小店，供給汽船一切用品，如火花插頭，乾電池，電線等等。該店有一小發電機供給電燈，其原動機爲一汽油機。今該發電機不能『建起』電壓，無論掉用何種接法，皆無效果，問如何可以修理？

第三章 電樞線捲

3-1. 電樞之各式 電樞可視樞心之形狀及樞心上線捲之分配量，分爲下列三式：

1. 環形電樞
2. 鼓形電樞
3. 盤形電樞

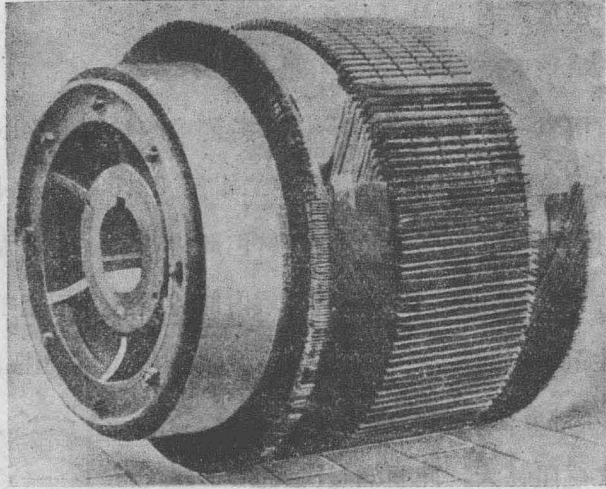
環形電樞爲一環形樞心，捲以許多線圈或線捲單位 (element)。每線捲或線捲單位繞心成螺旋形，如第二章第 52, 53, 54, 各圖。在此種線捲中，各捲首尾相接，成一連續電路，但此尚非其主要特點，且與定義無關。其特殊之點，則爲導線經過樞環內部時與磁力不相割切，故此部導線與感生電勢無關。主要磁流自此極至彼極，大都經過樞心之鐵質如圖 89。一小部分磁力線流過樞之中心，惟因空氣之磁阻甚大，此種漏磁決爲少數。但吾人須注意者，此種內部漏磁，無論多少，對於環捲皆爲有害，因漏磁在內部導線所感生之電勢適與主要電勢之方向相反。



第 89 圖 環捲中內部漏磁之影響

圖中所示環捲之樞心係光心電樞，純爲簡單起見。若用有齒樞心，亦無不可。環形線捲，現各製造廠實際上已不復用，但爲便於瞭解各式鼓形線捲起見，故略論及之。

鼓形電樞之異於環形電樞，乃在導線全部均在樞心外面，而無貫入樞心之中者，其樞心之空隙則純為通風去熱之故。線捲中有發電作用之導線乃在樞心之圓柱面上，通常置於開口槽中，前後端①用「端接」相連，此項端接即支持於伸出樞心之圓柱部分，如第二章第 57 圖所示。端接並不與有效導線分開清楚，而為有效導線之連續線。圖 90 示一尚未完全繞好之鼓形電樞，其端接沿圓柱形成雙層之佈置；此乃代表一多極機



第 90 圖 鼓形電樞(摺捲)

之電樞，端接之圓周距離約等於磁極之節距，俾使有效導線中之電勢相加。雙極機（僅有小號者）之端接，則經過樞心兩端之端面，以使與近乎對徑之兩有效導線相連。鼓形電樞可以視為環形之展開式，但將內部線捲單位移至外面，同時將線圈沿圓周引長，至約等於磁極之節距。

盤形電樞與上述兩式不同之處，乃在其有效導線不在樞心之外圓

① 前端即近整流器之一端；後端即近滑輪（皮帶輪盤）之一端。

柱面，而沿徑向安置於盤之兩扁平面。此盤旋轉於極性相反之對極間，放兩面導線皆生發電作用（參看第二章第 63 圖）。盤形電樞現已少用者。

在上述三種電樞中，現通常皆用鼓形，其他幾乎完全不用。最初用鼓形線捲一原因，即為增加全線捲之有效部分，蓋有效部分乃與磁流相切而感生電勢者。但鼓形之主要優點乃在避免環形所需之用手捲繞，因而減少製造費用；又因線圈完全在樞心之外部，可繞於捲型上，且可於未放上樞槽以前妥為絕緣。

3-2. 線捲之各式 電樞線捲，無論用於直流或交流電機，不外下列二式：開圈(open-coil)式。與閉圈(closed-coil)式。開圈式線捲乃自任何導線起，沿線捲前進，最後得一盡頭。閉圈式則經全部或一部（ $\frac{1}{2}$ ， $\frac{1}{3}$ ， $\frac{1}{4}$ 等）導線後仍回至起點。開圈式現祇限用於交流電機，茲不具論。前有一時通用於直流串聯弧焰發電機，如勃勒希 (Brush) 及湯姆孫·霍士登 (Thomson-Houston) 機。①

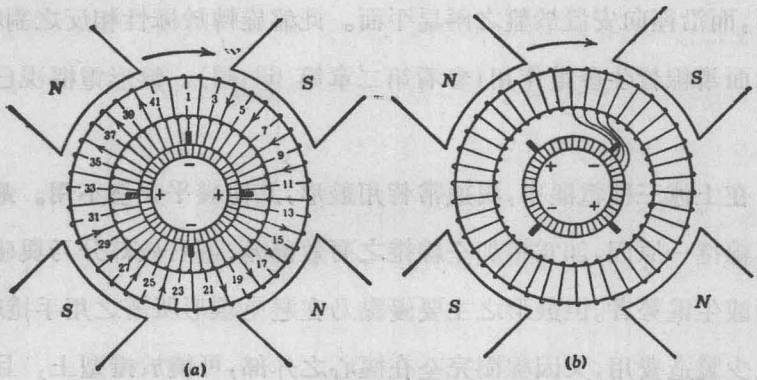
閉圈式線捲

3-3. 環捲與鼓捲 當設計一發電機或電動機之電樞時，導線之數應依下列各條件而定：

1. 電樞導線數， Z 應為雙數整數，合於下列電勢之基本方程式（第二章第 7 式）：

$$E = \frac{p}{a} \cdot \frac{\Phi Z n}{60 \times 10^8}$$

① 參看 Thompson, S. P. 著 "Dynamo Electric Machinery."。

第 91 圖 環捲, $Z=42, p=4$

2. 各導線連接之次序應使各線之電勢相加, 而得所需之總電勢。
3. 總閉合線捲, 無論在任何位置, 應與電刷相對稱。

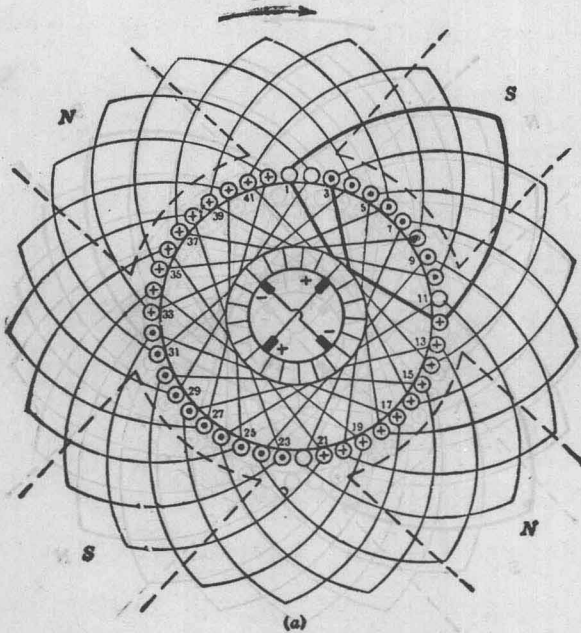
圖 91, 92, 93 示三種閉圈式之線捲, 凡有磁極四, 有效導線四十二。

圖 91 之二部表示一簡單環形線捲, (環捲), 圖 92 及 93 表示鼓形線捲(鼓捲)。圖中小圓圈代表在樞心圓柱周面上有效導線之截面。連接有效導線之端接在電樞後端(或近滑輪之一端)者, 爲方便起見, 繪於樞心面範圍之外, 實則此種端接乃在一圓柱面上, 此圓柱面乃由鐵心引伸而用螺旋釘相連者, 其直徑略小於鐵心, 如圖 90 所示。同樣在圖 92 及 93 中端接之在電樞前端(或近整流器之一端)者, 實應在圓柱面上, 但繪於樞心面之內。圖 92 及 93 所示線捲之排列, 可在一平面上展開圓周面成圖 94 及 95, 彼此對照, 較易明瞭。

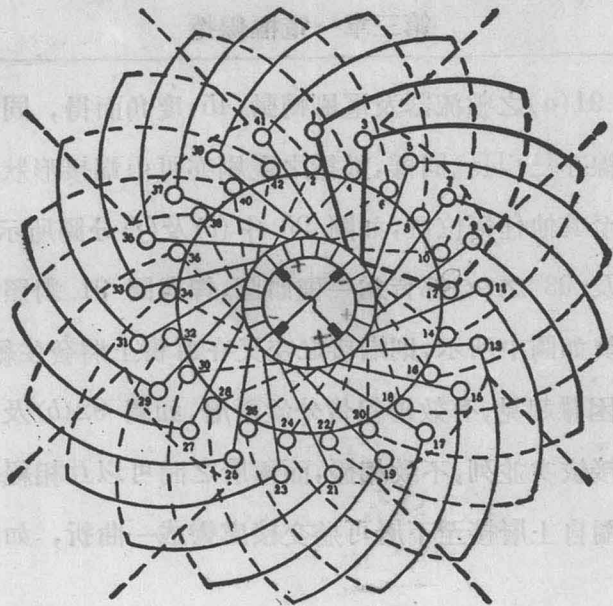
在圖 91(a) 所示之環捲中, 吾人注意其電刷所佔之位置在兩極極尖間之中線, 但在圖 92 及 93 所示之鼓捲中, 電刷則約在極面間之中線。此種分別, 完全由於連接於整流片之端接之形狀及布置。如圖 91(b)、

可作為將圖 91(a)之整流器及電刷轉動 45 度角而得，同時線捲與整流器之連接線亦已引長。同樣，鼓捲之電刷亦可由端接形狀之改變而自極面中心移至其他任何位置，如圖 96 中(c)及(f)分圖所示。

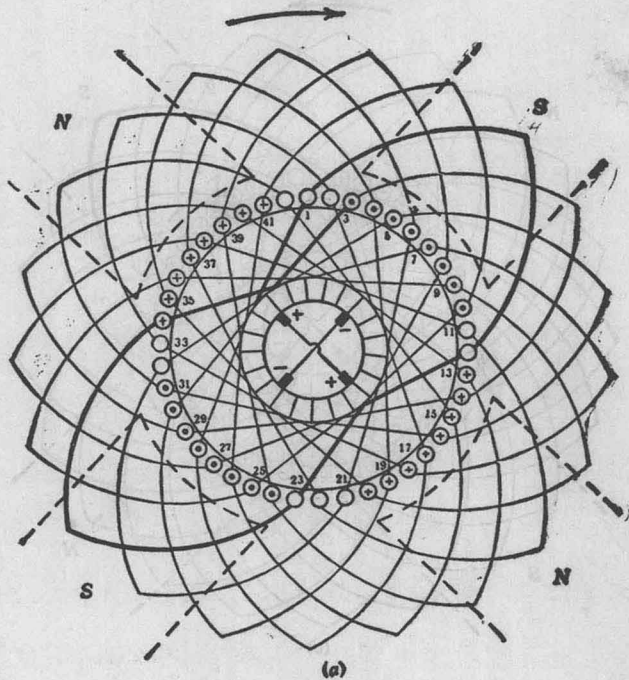
圖 92 及 93 之(a)部皆為一種簡圖，俾與圖 91 對照。如有效導線皆在一層真如圖中所示，則端接之交叉在事實上將發生絕大困難。故為免除此項困難起見，有效導線皆分置兩層，如圖 92(b)及 93(b)。如此每層之端接依次並列，不致相擾，而兩層之間可以互相絕緣，如圖 90 所示。每線圈自上層接至下層可將交接處彎成一曲折，如圖 97 中之 B。



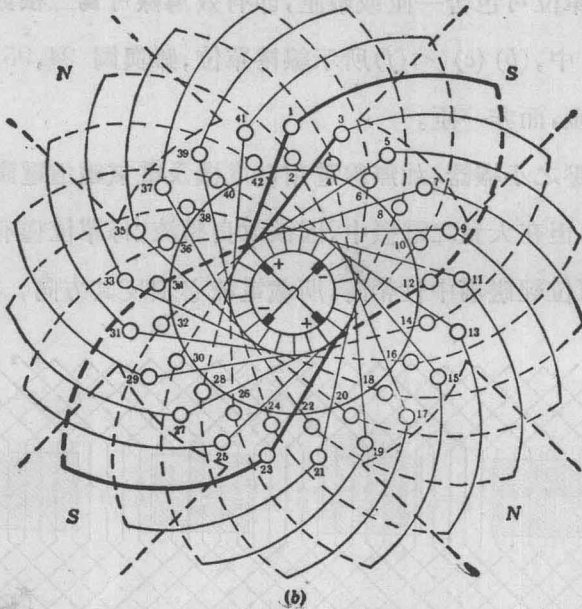
第 92 圖(a) 鼓捲(摺捲)



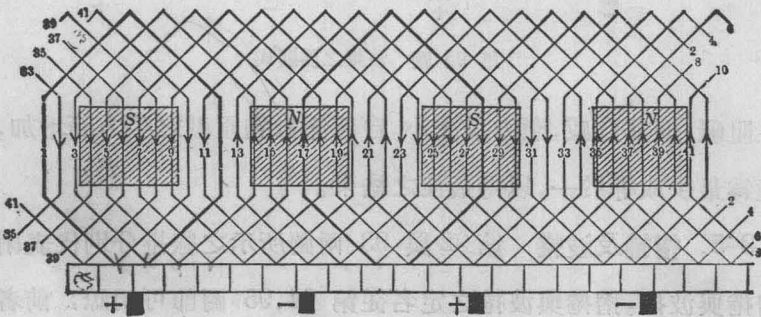
(b)
第 92 圖 (b) 鼓捲(摺捲)



(a)
第 93 圖 (a) 鼓捲(波捲)



第 93 圖(b) 鼓捲(波捲)

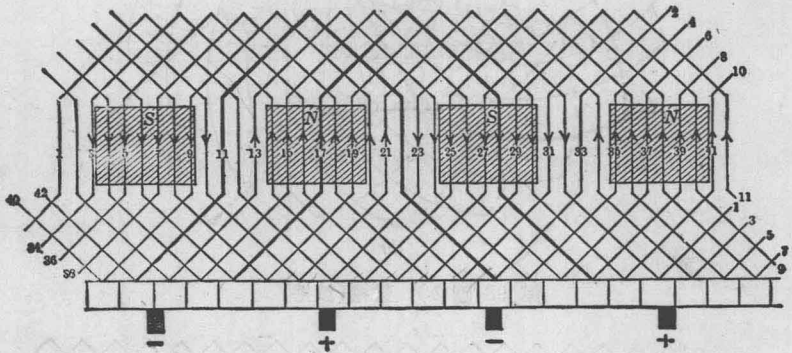


第 94 圖 摺捲之展開式

3-4. 線捲單位 觀 92 至 95 各圖, 可見每線捲皆有多數之同樣單位 (element), 如各圖中粗線所示。今可得一「線捲單位」之定義如下: 線捲之一部, 自一整流片起至另一整流片止, 即為一線捲單位。依此可

知每一線捲單位可包含一匝或數匝，即有效導線可為二根或二根以上。例如，圖 96 中，(b) (c) (e) (f) 所示線捲單位，雖與圖 94, 95 相似，但每單位皆有三匝，而非一匝。

較高電壓之小機器，如無線電用發電機及電氣鐵道電動機，通常每單位有數匝；但在大量之電機中，因欲改良整流，每單位僅有一匝，已成通例。線捲單位經磁場中性帶時，所載電流必須反其方向；欲電流反向

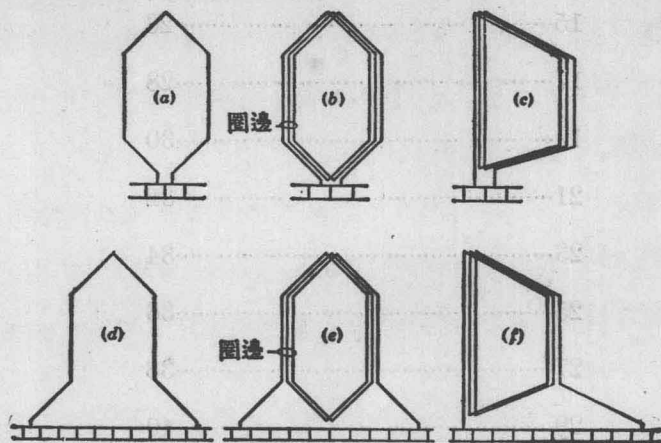


第 95 圖 波捲之展開式

不生阻礙，則其自感，應力求減小。自感係數隨匝數之平方而增加，故匝數應為最少或等於一，以得最佳之結果。

3-5. 摺捲及波捲 第 92 與 93 兩圖所示之線捲分別代表閉圈式之摺捲與波捲。摺捲與波捲之定名從第 94, 95 圖即可明瞭；前者之相連單位互相回摺，而後者則在電樞周圍不斷前進如波形。

在摺捲與波捲中，吾人可注意其每線圈或每單位之兩邊居於異性鄰極影響之下，故所生電勢為兩邊電勢之和。在簡單摺捲中，任何單位如第 x 之末端與第 $(x+1)$ 單位之首相接，而第 $(x+1)$ 單位之首端與第



第 96 圖 線捲單位之各式

x 單位之首端皆在同極之下；波捲第 x 單位之末雖亦與第 $(x+1)$ 單位之首相接，但後者與第 x 單位之首并不居同極之下，而相隔兩個整極節距(double pole pitch)。

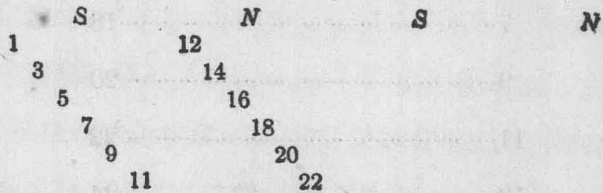
研究第 94 與 95 圖中線捲之配置，可先作一表如下，較為便易。今先討論摺捲電樞，設自第 1 導線始，則各導線連接次序為 1-12-3-14 等，可得下表：

1.....	12
3.....	14
5.....	16
7.....	18
9.....	20
11.....	22
13.....	24

15.....	26
17.....	28
19.....	30
21.....	32
23.....	34
25.....	36
27.....	38
29.....	40
31.....	42
33.....	2
35.....	4
37.....	6
39.....	8
41.....	10

1 (捲 閉)

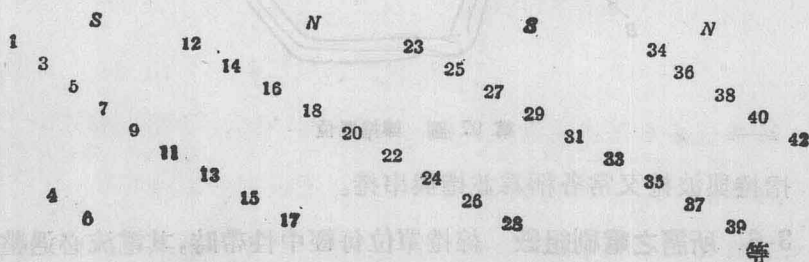
線捲在樞周循次遞進或移動，如圖 94 所示，可依下法另作一表，加以注意。設 S, N, S, N 諸字母間之距離適為一整極節距，而字母本身即在極面之中點，則得下表，但因限於篇幅，不能盡錄。



第 95 圖之波捲，依同法亦得線捲表如下：

1.....	12.....	23.....	34.....
3.....	14.....	25.....	36.....
5.....	16.....	27.....	38.....
7.....	18.....	29.....	40.....
9.....	20.....	31.....	42.....
11.....	22.....	33.....	2.....
13.....	24.....	35.....	4.....
15.....	26.....	37.....	6.....
17.....	28.....	39.....	8.....
19.....	30.....	41.....	10.....
21.....	32.....		1 (捲閉)

若將前表重行排列，以表明線捲之移動，可列一部如下：

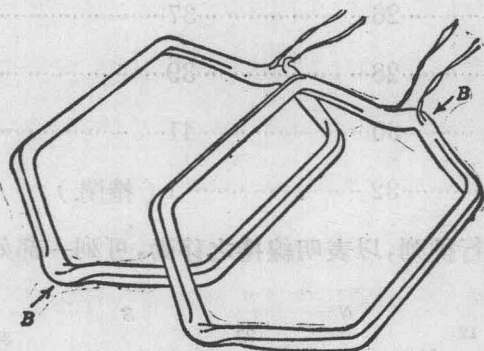


試觀第 91, 94 與 95 諸圖之電流方向，可知前二圖之電流經線捲時有四條不同之電路可通 ($a=4$)；如為發電機時，每電路須供給外路全部電流之四分之一，如為電動機時，則每電路接受外路輸入全部電流之四分之一。但如第 95 圖雖同具四極，僅有二電路經過線捲 ($a=2$)，故

若其他條件相同，依下列基本方程式

$$E = \frac{p}{a} \cdot \frac{\Phi Z n}{60 \times 10^8}$$

波捲所發生之電勢應較環捲或摺捲之電勢大二倍。換言之，波捲之導線數可較環捲或摺捲減少一半，而得同量之電勢。且上圖所示之環捲及摺捲，均需四電刷，而波捲則二電刷已足（四電刷亦可用）。因以上二事實，直流鐵道電動機均用波捲，因電車中之地位有限，電壓較高，所需之導線數應減至最少，且為便於視察及修理起見，電刷數亦以限於二組為宜。

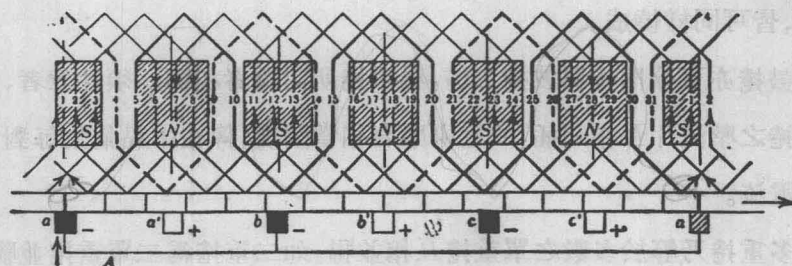


第 97 圖 線捲單位

摺捲與波捲又常各稱為並捲與串捲。

3-6. 所需之電刷組數 線捲單位每經中性帶時，其電流必遇整流一次，於每次反向時，單位即被電刷短路。中性帶與反向之數既等於極數，電刷之最多組數應適與極數同。在圖 91 之摺捲及簡單環捲中，電刷組數應即等於極數。波捲雖亦可用 p 電刷數，惟無論極數多少，二刷已足。第 98 圖乃示一 6 極之波捲機，電樞導線數為 32，其 a, b, c ，三

負電刷中，可省去任何二刷，如 b 與 c （相當之二正電刷，亦應同時除去），如此所餘電刷 a ，於接觸鄰近之二整流片時，即將互相串聯之三線捲單位短路。被電刷 a 所短路之三單位乃如粗線所示。依圖中所示之地位如正電刷中僅留 b' ，則其所短路之三單位乃如虛線所示。自第 98 圖可見二刷已足代六電刷彙集電流之用，蓋 a, b, c ，三刷不僅與外導線 A 相接，亦由短路單位互連，如粗線所示。此等短路單位既在中性帶，發生之電勢極小，或幾為零，故三電刷與由一外加導線相相同；因

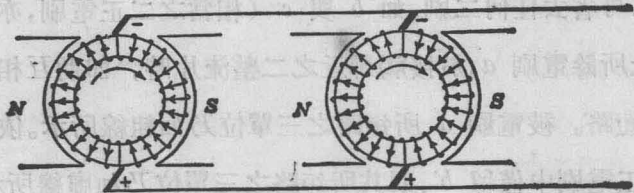


第 98 圖 六極波捲中電刷所短接之線捲單位

此外導線 A 與 a, b, c 三電刷中之任何二刷均可省去。若保存電刷 b 與 c ，及 b' 與 c' ，則見互相連成機器一端之 a, b, c 將有二刷同時短路各線捲單位。如此自感電勢可減至三分之一，而整流亦得改良。

吾人須注意波捲中僅用二電刷，材料上並不經濟，因此二刷須有多電刷同樣之電流負載容量，而整流器或且因之而增長。

3-7. 單重捲與多重捲，重入次數 今有二相同之環捲機並聯如圖 99，則連合電流輸出量將為單獨機之兩倍。但如將二單獨線捲置於同一樞心，經同一磁場之磁化作用，如第 100 圖 (a)，亦可得同樣結果，并可節省材料。此處單獨線捲之線捲單位與整流片皆夾以他單位與整流片。



第 99 圖 並接之二電樞

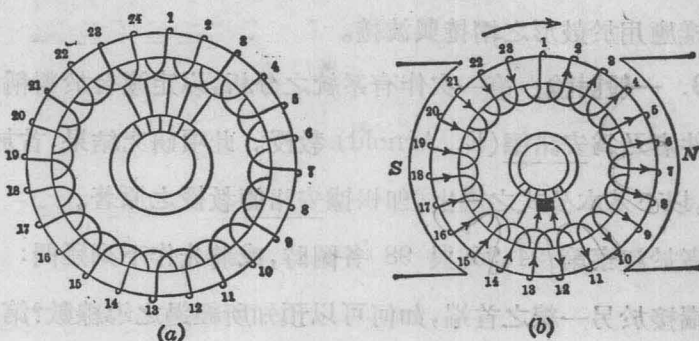
若用單獨整流器，每端各一，亦可得同樣結果。第 100 圖形式之線捲名曰雙重捲，以別於第 99 圖及以前各圖之單重捲。其他若三重捲，四重捲等，皆可同樣繞成。

鼓捲亦可分摺捲與波捲二種，與環捲所討論者相同。須注意者，各部線捲之整流片互相間插，故電刷應有相當闊度，俾在中點彙集每對電路之電流。

多重捲乃等於多數之單重捲互相並聯。如二重捲為二單重捲並聯；三重捲為三單重捲並聯；四重捲為四單重捲並聯，餘類推。除少數雙重捲外，多重之摺捲及波捲罕有製造者，其困難原因將於本章第 3-21 節詳論之。

討論第 91 圖時，吾人曾述及簡單環捲之並聯電樞路適如磁極之數。第 92 圖所示之簡單摺捲亦然，其理甚顯；蓋環捲與摺捲惟一不同之處，即在後者之相連匝圈均在樞心表面，不如前者之繞入內部。但如第 95 與 98 二圖所示之波捲，則祇有二電路經電樞，與極數無關。因此摺捲每稱為並聯或多路捲，而波捲則稱串聯或二路捲。

按上所論，可知二重摺捲有 $2p$ 並聯之電樞路，三重摺捲有 $3p$ 並聯電路，而 x 重捲有 xp 並聯電路。同樣，二重波捲有 4 並聯電路，三



第 100 圖 二重樞捲

重波捲有 6 並聯電路，而 x 重波捲有 $2x$ 並聯電路，其電路數與極數無關。

第 100 圖 (a) 表示二單獨線捲之排列，每捲含有 12 單位，共 24 單位。若減去一單位，而使其餘之 23 單位平均排開，互相連接，則如第 100 圖 (b)。 (a) 圖中之單獨線捲各自封閉，(b) 圖中則僅合成一周路；但自 (b) 圖中箭頭所示之電流方向，可得一有趣之事實，即自電刷經電樞而至另一電刷，仍如 (a) 圖然，電路數為 4。換言之，第 100 圖之二圖所示皆為二重捲，惟前者為二次重入，而後者為一次重入。重入 (reentrancy) 之解釋如下：凡一閉合線捲可作為重入其本線；若自線捲之一點經全部導線而復返至起點者，謂之一次重入。若返至起點時，僅經過導線之半數，而必須另擇起點再繞一周路方可經過其餘之半數，則閉合周路凡二，謂之二次重入。線捲之重入次數等於分別繞於電樞上之閉合捲數。線捲可設計為三重，三次重入捲；三重一次重入捲；五重一次重入捲等等。

以上所論，為簡易起見，僅及於環形線捲，但吾人須注意，一切結論

皆可同樣應用於鼓形之摺捲與波捲。

3-8. 一般討論 第一次作有系統之分析，以定適合於對稱閉合線捲之條件者乃為安諾德(E. Arnold) 教授。此項研究結果，首於 1891 年發表。以下基本公式之導出，即根據安諾德教授之原著。

讀者於觀察第 94, 95 與 98 各圖時，或將先作下列疑問：自一導線之末端接於另一線之首端，如何可以預知所經過之導線數？第 98 圖中其次序為 1-6-11-16 等，若將次序改變，亦可能否？若將導線總數自 32 改至他數，有何影響？解答此種問題或與此有關係之問題可用一普通公式，則各種閉合線捲均可迎刃而解。此公式將於下節求之。

3-9. 導線數，線捲單位數與整流片數 在環捲中，不論每線捲單位中所含匝數多少，每單位祇有一有效圈邊(coil side)，而鼓捲則通常每單位有有效圈邊二。『圈邊』之意義，可閱圖 96 而明。且依線捲單位之定義，可知單位之數必等於整流片之數 S 。故環捲之整流片數，即等於有效圈邊之數，而鼓捲 S 則常為有效圈邊數之半。 S 之數可單可雙，惟須為整數。環捲中每單位既僅有一匝，若 S 為單數，周圍之導線亦必單數；但環捲之單位恆為雙數，於單重捲中又常為極數之倍數，俾電樞中各路在任何時皆為相同，故導線數亦必為雙數。在鼓捲則不論 S 為單數為雙數，不論每單位之匝數為何，導線及圈邊皆應為雙數。

設 z 為每圈邊之有效導線數(依圖 96 亦即為每單位之匝數)，則在鼓捲中， $Z/2z$ 必須等於單位之數，或

$$\frac{Z}{2z} = S$$

如 z 大於一，如圖 96 之 (b) 及 (c)，則對於整流器之連接而言，將原有

多匝單位分別代以(a)或(d)式之單匝單位,其效果亦相同。故分析電樞線捲各定則時,實可將每圈邊當作一根導線也。

3-10. 線捲節距, 整流節距與槽節距 從圖 94 可見第 1 圈邊之後端(或滑輪端)乃與第 12 圈邊之後端連接,而 12 之前端(或整流端)則與 3 之前端相接。此圈邊數之相差謂之線捲節距或簡稱捲距(winding pitch);故第 94 圖中之後節距 y_1 為 +11,而前節距 y_2 為 -9。第 95 圖中之前後節距均為正數,等於 11。

再者,於第 94 圖中,每單位之首末兩端均接於鄰近之整流片,其差數為 1。同樣於第 95 圖中,單位之兩端接於整流片,但其差數則為 11。每單位兩端整流片之差數名曰整流節距, y 。

於有槽電樞中,每線圈或每單位所跨越之槽數,名曰槽節距, y_s 。

摺捲為右向捲或為左向捲,視 y_1 之數值大於 y_2 抑小於 y_2 而定。換言之,若有人面向電樞之整流端,而線捲沿周路自一整流片至另一片前移為順時針向者,則此捲為右向。波捲則不然,如以一整流片為起點,經 $p/2$ 單位(p 為磁極數),而所至之整流片在起點之右,則為右向,所至之整流片在起點之左,則為左向。故第 98 圖所示為左向捲。

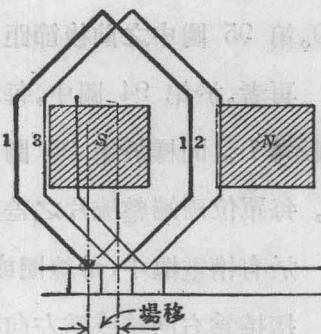
前後節距之代數和,乃所以量每線捲單位之總前進或總後退。如第 94 圖之單重捲,後節距為 11 圈邊,而節距為 -9 圈邊,故每單位之純前進為 2 圈邊。同時,單位之兩端,僅相隔一整流片,故整流片數之純前進,僅為圈邊數前進之半;此乃由於整流片數,僅總圈邊數之半。普通,在單重摺捲中,

$$\Sigma y = y_1 - y_2 = 2y \quad (1)$$

在第 95 圖之波捲中，前後節距均等於 11，故每單位之純前進為 22 圈邊。但每單位之前進以整流片計，亦僅半數，或即 11，因此整流片之數亦仍為圈邊數之半。故於單重波捲中，

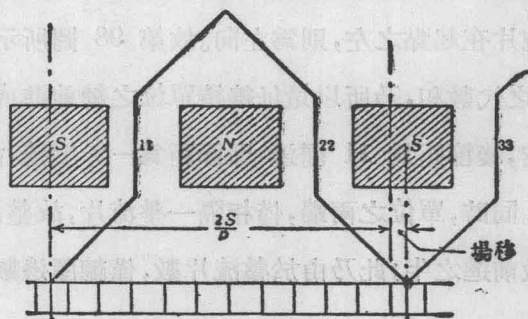
$$\Sigma y = y_1 + y_2 = 2y \quad (2)$$

3-11. 磁場位移 從第 94 與 95 兩圖可知每線捲單位兩端所連接之整流片，對於極軸並不佔完全相同地位。此種磁場之位移 (field displacement)，或線捲之前進，可以整流片數 m 表之。圖 101 乃代表第 94 圖摺捲之一部，每單位兩端之磁場位移 (場移) 為 1 整流片，故 $m=1=y$ ；在 100 圖之環捲中， $m=2=y$ 。



第 101 圖 摺捲中之場移

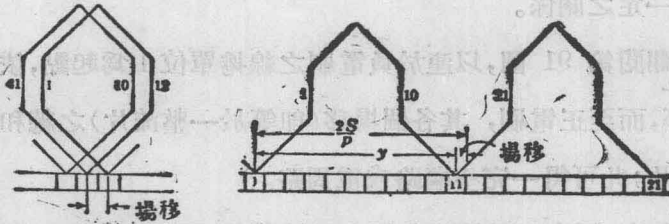
於波捲中亦有相類之事實。第 102 圖示第 95 圖波捲之一部。由此可知每單位兩端之距離雖約等於兩個極節距，俾兩端在同性極下佔類似之位置，但實際距離仍與兩個極節距略差，此相差之數即代表磁場之位移



第 102 圖 波捲中之場移

或線捲之前進。若線捲並不前進，則在波捲中經等於磁極數之圈邊後，即將自行閉合。

第 101 與 102 兩圖之場移皆為正號，即線捲依右手向前進。在第 101 圖中，如前節距仍為 +11，而後節距為 -13，則場移將為 $m = -1$ ，而線捲將左手向後退。同樣，第 95 圖之 42 圈邊可連接成一波捲，以 +11 為前節距，+9 為後節距，如此 m 將為負號，而線捲為左手向。此種後退(左手向)線捲，可參閱第 103 圖。



第 103 圖 左手向(後退)摺捲與波捲

普通波捲，如第 102 圖，其整流節距等於兩個極節距(以整流片數計)加或減場移(亦以整流片數計)之值。兩個極節距之整流片數既為 $2S/p$ ，故知

$$y = \frac{2S}{p} \pm m \quad (3)$$

在摺捲中，如圖 101 及 103 所明示，

$$y = \pm m \quad (4)$$

故普通

$$y = \frac{fS}{p} \pm m \quad (5)$$

上式用於平常波捲， $f=2$ ，用於摺捲，則 $f=0$ 。 f 可名為線捲單位之磁

場跨距(field step),其意即謂每單位兩端間之全極節距相近之整數。在波捲中,每單位之兩端之跨距約為 2 極節距,故 $f=2$; 但摺捲中每單位之兩端皆在同一磁極下,故 $f=0$ 。圖 117 所示之波捲,其 f 等於 4。

3-12. 電樞路之數 按第 91 圖之簡單環捲,每單位兩端之距離為一整流片,即 $m=1$, 於此頗易推知經過線捲之電路數與極數相等。但在第 100 圖中,二部分圖皆為雙極機之環捲,場移為二整流片 ($m=2$), 而電樞路凡四,或即二倍於極數,已如前述。於此可知場移 m 與樞路之數實有一定之關係。

試再翻閱第 91 圖,以連於負電刷之線捲單位 1 為起點,依次經 2, 3, 4 等等,而至正電刷,其各個場移(即等於一整流片)之總和即等於 S/p 整流片;此可得一完全樞路或電周路。

同樣觀察,可應用於第 94 圖之摺捲與第 95 圖之波捲。關於摺捲之研究,想無困難。即在研究波捲時,如有困難,可於第 91 與 98 兩圖中溯其路線,並注意自負極電刷至正極電刷所經過之整流片,即可了然。

總之,若吾人沿一線捲,自接連負電刷之整流片起,溯至另一整流片時,其間有 m 片之場移;再經第二單位至其他整流片,則總場移為 $2m$;以次進行至總場移為 S/p 時,則得一完全電路。設在此進行中,各單位共遇有 S' 整流片,而每單位之場移為 m 片數,故經一完全電路之總場移必為 mS' 。因此

$$mS' = \frac{S}{p}$$

或

$$\frac{S}{S'} = mp \quad (6)$$

每電路既遇有 S' 整流片，故電路總數為

$$\frac{S}{S'} = a$$

此數必為整數，故

$$mp = a$$

或

$$m = \frac{a}{p} \quad (7)$$

如此，在普通摺捲或環捲中，電路之數即等於磁極數，($a=p$)，場移為 $m=1$ ；在二重環捲或二重摺捲中，其電路之數兩倍於極數， $m = \frac{a}{p} = 2$ ；普通在多重捲中， m 即等於環捲或摺捲之多重次數。但於波捲則不然， m 恆為一分數：單重波捲中之 a 恆為 2，故四極機(圖 95)中 $m = \frac{1}{2}$ ，

六極機(圖 98)中 $m = \frac{1}{3}$ ，八極機中 $m = \frac{1}{4}$ 。餘類推；二重波捲中 $a=4$ ，

故 $m = \frac{4}{p}$ ，三重波捲中則 $m = \frac{6}{p}$ 。

3-13. 普通定則 於普通摺捲中已明示

$$y = \frac{y_1 - y_2}{2} = \pm m = \pm \frac{a}{p} \quad (8)$$

而於波捲中則為

$$y = \frac{y_1 + y_2}{2} = \frac{2S}{p} \pm m = \frac{2S \pm a}{p} \quad (9)$$

自上列各式，可推論接連圈邊次序之簡便法則，而決定線捲單位之設計。

上節已提及鼓捲之圈邊數($2S$)必為偶數。若各圈邊各指定一號數，則半為單數，半為雙數。每圈邊自一整流片起始，向外進行，回至另一整

流片時，必經過另一圈邊，故雙數各

圈邊可排成一組，均自整流片向外，

而單數者則成回至整流片之一組。

此意謂雙數圈邊之兩端將與單數圈

邊相接。故前節距與後節距必為單

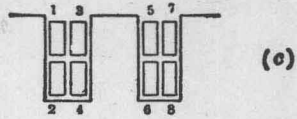
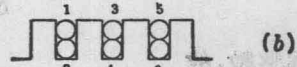
數。此為普通鼓捲之定則，假設其號

數如第 104 圖所示。

1. 摺捲或並聯捲 研究方程

式 $y = \pm \frac{a}{p}$ ，可知線捲單位數並無

限制，可單可雙。通常所用線捲，每單位大抵合兩圈邊，故



第 104 圖 圈邊之號數法

$$y_1 - y_2 = 2y = \pm 2 \frac{a}{p} = \pm 2m$$

於此可知前後節距之差必兩倍於多重次數，(m)，而兩節距，又必皆為單

數。再則 y_1 與 y_2 不能與極節距 $\frac{2S}{p}$ 相差太大，否則，相連各邊之電

勢即不能得相加之效。如就閉路 (closure) 而論，則平均節距約為 $\frac{2S}{p}$

之關係，並不重要，因在所謂弦捲 (chord winding) 或短節距 (fractional pitch) 捲，所設計之平均節距即故意小於此數。

(C) 今舉一例以證此定則。第 94 圖中

$$Z = 42, \quad S = 21, \quad p = 4, \quad a = 4$$

$$y = m = \frac{a}{p} = 1, \quad y_1 - y_2 = 2y = 2, \quad y_1 = 11, \quad y_2 = 9$$

若節距為 9 與 7，或 7 與 5。則線捲亦可閉合，但將成過短弦捲之形式。

自 $m = \frac{a}{p} = y$, 可知 m 重摺捲中之整流節距即等於多重次數。故單重摺捲中, 線捲單位之兩端接於相鄰之整流片, 二重捲則相隔一整流片, 以下類推。

2. 波捲或串聯捲 波捲之方程式為

$$y = \frac{fS \pm a}{p}$$

在通常所用波捲中, 上式可寫作 $y = \frac{y_1 + y_2}{2} = \frac{2S \pm a}{p}$ 。此處 S 及圈邊數之選擇, 顯然非復如摺捲之無限制。例如第 98 圖所示六極機之單重波捲, $a=2, p=6, 2S=32$, 故 $y = \frac{32 \pm 2}{6} = 5$ 或 $5\frac{2}{3}$ 。 y 之第二數值為不可能, 故 $y=5$ 。節距既約須為 $\frac{2S}{p} = 5\frac{1}{3}$, 吾人可選擇 $y_1 = y_2 = 5$ 。其實用 7 與 3 兩數值亦可得一閉捲, 但如此將得過分之弦捲情形。圖 98 所示之線捲中, 磁極甚多, 而單位數較少, 故非實用之設計, 蓋無待言, 惟為便於解釋起見, 故用之耳。

波捲單位數既受限制, 故恆有『偽圈』(dummy coil)之必要, 即有一二線圈不與整個線捲相連。例如設計一四極機之單重波捲, 設樞心有 65 槽, 每槽可容四圈邊, 如第 104 圖 (c)。如每圈邊祇有一根導線, 則 $Z=260$, 但此值自亦應與第二章之基本方程式 (7) 相符。總計 $2S=260$, $a=2, p=4$; 因此

$$y = \frac{260 \pm 2}{4} = 64\frac{1}{2} \text{ 或 } 65\frac{1}{2}$$

但 y 必為整數, $2S$ 之數值近於 260 而適合於方程式者為 258 ($2S=262$ 則不可能, 因圈邊最多之數能置於槽內者祇 260)。設令 $2S=258$,

則知尚有二導線所組成之一線捲單位，並不屬於整個線捲；此二導線不

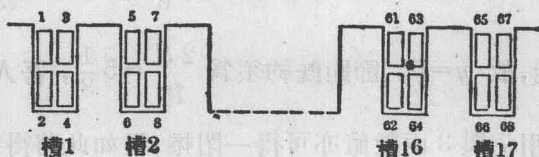
過塞滿二槽之空隙，而此二槽中，每槽祇有三根有效導線。故 $y = \frac{258 \pm \alpha}{4}$

= 64 或 65。 y_1 與 y_2 須為單數，且 $\frac{y_1 + y_2}{2} = y$ ，故下列各對節距數為

可能：

$$\begin{cases} y_1 = 65 \\ y_2 = 65 \end{cases} \begin{cases} y_1 = 63 \\ y_2 = 67 \end{cases} \begin{cases} y_1 = 67 \\ y_2 = 63 \end{cases} \begin{cases} y_1 = 65 \\ y_2 = 63 \end{cases} \begin{cases} y_1 = 63 \\ y_2 = 65 \end{cases} \dots \text{等}$$

以實際而論， $y_1 = 65$ 為最適用。若圈邊號數如第 104 圖所示，則從第



第 105 圖 圈邊之號數

105 圖可見圈邊 1 與 3 之後端可與 66 及 68 相接，因之可使每對導線一同絕緣，且可索在一起共置於槽內。關於此點之討論，可參閱本章第十七節。

單重波捲之整流節距之定式

$$y = \frac{2S \pm 2}{p}$$

可寫作

$$y = \frac{z_s N_s \pm 2}{p} = \frac{z_s N_s}{p} \pm \frac{2}{p}$$

其中

z_s = 每槽圈邊數

N_s = 槽之總數

放在極數 p 大於 2 時，如欲免去偽圈， z, N_s 之積應不為 p 之倍數。

波捲之磁場位移為 $m = \frac{a}{p}$ ，故經過 $\frac{p}{2}$ 單位或相當於繞電樞一周後，其總位移為 $\frac{p}{2} \times \frac{a}{p} = \frac{a}{2}$ 整流片。故單重波捲 ($a=2$) 中第 $\frac{p}{2}$ 單位之末端接於與起點整流片鄰近之整流片；兩重捲則多隔一整流片；餘類推。

3. 混聯捲 普通波捲之電路為 $2(a=2)$ ，與極數之多少無關。但依普通方程式選適當之 S ，亦可得多倍數之電路。波捲之電路數在 2 以上者，名曰混聯捲。設有一八極電樞，其導線為 188 根，繞成 94 單位，可排列得一 4 電路(二重)波捲；以 $f=2, S=94, a=4$ ，與 $p=8$ ，代入方程式 $y = \frac{fS \pm a}{p}$ ，其結果為 $y=23$ 或 24 ，由此可定 $y_1=y_2=23$ ，或 $y_1=25, y_2=23$ 。

3-14. 重入次數之通則 設普通方程式

$$y = \frac{fS \pm a}{p}$$

之兩邊皆可以公共因數 q 除盡，則得

$$\frac{y}{q} = \frac{f \frac{S}{q} \pm \frac{a}{q}}{p} \text{ 或 } y' = \frac{fS' \pm a'}{p} \quad (10)$$

即謂原有線捲實係 q 獨立捲所組成，每獨立捲有 $S' = \frac{S}{q}$ 單位，其整流節距 y' 即可從 S' 整流片計算而得。換言之，如線捲之 y, S 及 a 皆可以 q 除盡，則該捲將為 q 重捲與 q 次重入捲；否則為單次重入。

在普通二重波捲中， $f=2$ ，故

$$y = \frac{2S \pm 4}{p} = \frac{2(S \pm 2)}{p}$$

若 y 為雙數，則含一因數 2， S 亦必為雙數，因 $\frac{S \pm 2}{p}$ 必為整數，而 p 常為雙數。於此得一簡單定則，即二重波捲中若 y 為雙數則必為雙重入；反之，若 y 為單數，則為單重入。

在 $f=2$ 之三種波捲中

$$y = \frac{2S \pm 6}{p} = \frac{2(S \pm 3)}{p} \quad (11)$$

設 y 含因數 3，則 $y=3x$ ， x 為整數；於是從 (11) 式得，

$$3x \cdot \frac{p}{2} = S \pm 3$$

$$\frac{p}{2} x = \frac{S}{3} \pm 1$$

$\frac{p}{2} \cdot x$ 既為整數， S 必為 3 之倍數，故此捲為三次重入。於此可知：若 y 為 3 之倍數，則三重波捲必為三次重入，否則，為單次重入。

至四重波捲，則不能以此種簡單定則解決之，蓋此種捲可為單次重入，或二次重入，或四次重入。若 $f=2$ ， $a=8$ 與 $p=6$ ， $S=79$ ，則為單次重入，而 $y=25$ ； $S=82$ 時，則為雙次重入，而 $y=26$ ； $S=80$ 時為四次重入，而 $y=28$ 。四重捲足供理論之研究，而少實用者，不必再多論及之。

3-15. 線捲定則摘要 以上所述各式線捲所應滿足之條件，可綜計如下：

A. 摺捲 1. 線捲單位數 S 可為任何數，單雙均可（最好為極數

之倍數),但須適合於下列方程式

$$S = \frac{Z}{2 \times \text{每單位之匝數}} = \frac{Z}{2z}$$

其中每單位之匝數普通為 1, 雖依整流之需要, 可有二或更多之匝數; 而周圍導線數 Z , 必合於公式

$$E = \frac{p}{a} \cdot \frac{\Phi Z n}{60 \times 10^8}$$

2. 線捲節距 y_1 與 y_2 , 以跨越之圈邊數計, 應約等於 $\frac{2S}{p}$ 而均為單數。

3. 節距數值之差, 在單重捲應為 2, 二重捲為 4, 三重捲則為 6。總之, 二節距之差必為重次數之二倍, 或 $2m$ 。

4. 整流節距, 以每單位兩端之整流片數計, 在單重捲應為 1, 二重捲為 2, 三重捲為 3。總之, 其數即等於重次數。

5. 並聯之電樞周路數等於極數乘重次數, 即 $a = pm$ 。

6. 重入次數於單重捲中為 1, 在二重捲中, 若 S 為雙數則為 2, 若 S 為單數仍為 1; 在三重捲中, 若 S 為三之倍數時為 3, 否則, 仍為 1。

B. 波捲 1. 線捲單位之數 S 當適合下列公式

$$S = \frac{Z}{2 \times \text{每單位之匝數}} = \frac{Z}{2z}$$

其中 Z 之數應適合公式

$$E = \frac{p}{a} \cdot \frac{\Phi Z n}{60 \times 10^8}$$

且 S 亦應滿足以下之關係

$$y = \frac{2S \pm a}{p}$$

而 y 應為整數。

2. 線捲節距 y_1 與 y_2 應約等於 $\frac{2S}{p}$ ，且均為單數，而兩者之平均數，應等於整流節距 y 。

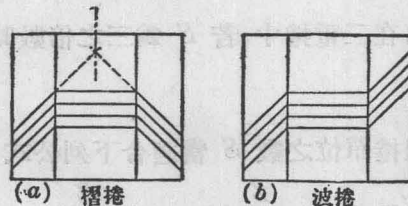
3. 電路之數 a ，代入方程式

$$y = \frac{2S \pm a}{p}$$

時應為重次數之二倍。

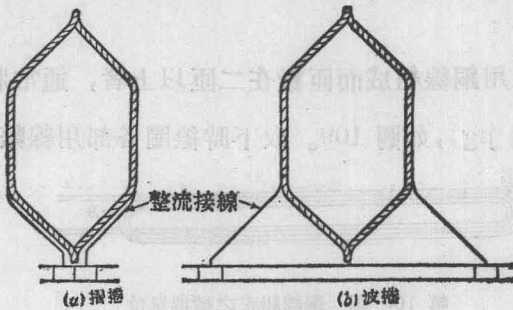
4. 重入次數於單重捲中為 1；於二重捲中，若 y 為雙數，則為 2，若 y 為單數仍為 1；於三重捲中，若 y 為 3 之倍數則為 3，否則仍為 1。

3-16. 線捲單位之構造 如導體為銅條或銅片所組成，則電樞線捲之為摺捲或波捲，可由其兩端頂接方向之相互關係，而得簡易之鑑別。若以頂端接線延長之，而與電樞中心相遇或相近，如第 106 圖 (a)，則



第 106 圖 摺捲與波捲之端接

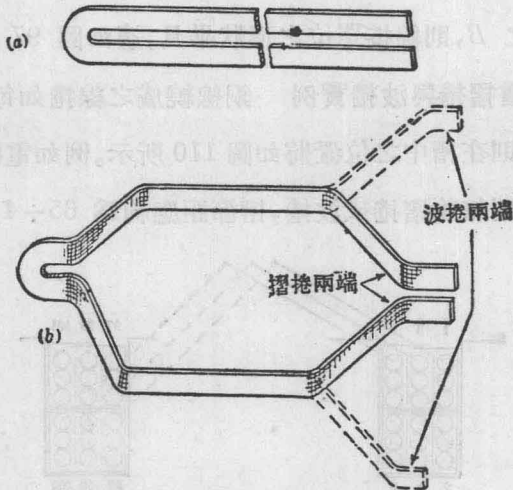
為摺捲。若頂端接線並行，如第 106 圖 (b)，則為波捲。但若每一線捲單位含有二匝或二匝以上，則端接於纏以布帶之後，將無從辨識其為摺捲或波捲，如圖 107 所示。此種線捲之散端仍與整流片相接，如平常一



第 107 圖 線捲單位

般，但既經繞以絕緣布帶及紮線，其端接之方向將不易尋見。

樞捲單位之用銅條或銅片繞成者，其構造約如圖 108 所示。此種單位僅有一匝，即有效導線凡二根。銅片於切成適當長度後，其中即用



第 108 圖 銅條組成之線捲單位

特種彎曲機彎曲之，如圖中(a)所示。如導線不大，彎曲機可用人力，但如銅片切面過大，則須用機力。然後將此髮針形之折片拉開，作圖中(b)之形狀。若為摺捲，則兩端再向內彎曲，如圖中實線所示，波捲則向外

彎，如虛線所示。

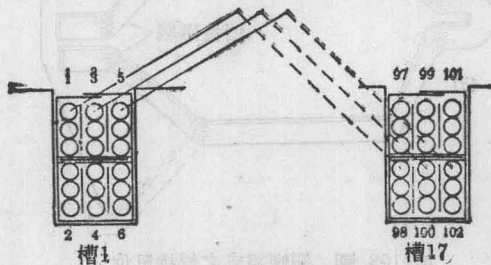
樞捲單位之用銅線組成而匝數在二匝以上者，通常將銅線繞於一種捲型(forming jig)，如圖 109。取下時線圈各部用線繫住，則不致散



第 109 圖 銅線組成之線捲單位

開。此長圓圈再由捲型機(forming machine)將其兩長邊之中部(即將置於槽中之部分)夾住，此種夾子皆可隨一中軸而旋轉，其旋臂之半徑相當於電樞長圓面(即置有效導線者)之半徑。夾子轉過某一角度，相當於線捲單位之槽節距，同時線圈兩端亦仍夾住以保持其彎曲形狀，如圖 97 及圖 109 之 B，則線捲單位之形狀畢具，適如圖 97 所示。

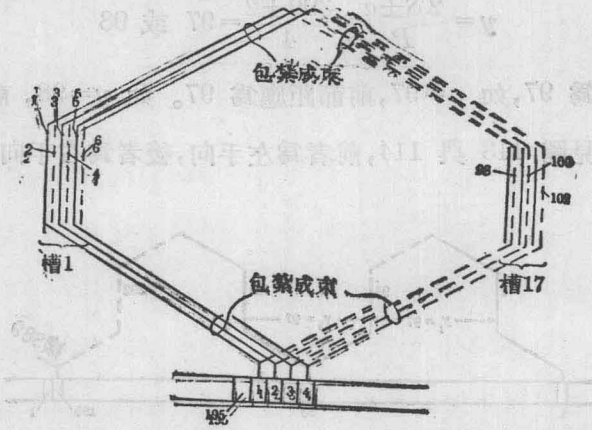
3-17. 單重摺捲與波捲實例 銅線繞成之線捲如每單位有三匝，每槽有六圈邊，則在槽中之位置將如圖 110 所示。例如電樞共有 65 槽，而磁極數為四，則無論摺捲或波捲，槽節距應約為 $65 \div 4$ ，或即 16。每



第 110 圖 三匝線捲單位每槽六圈邊

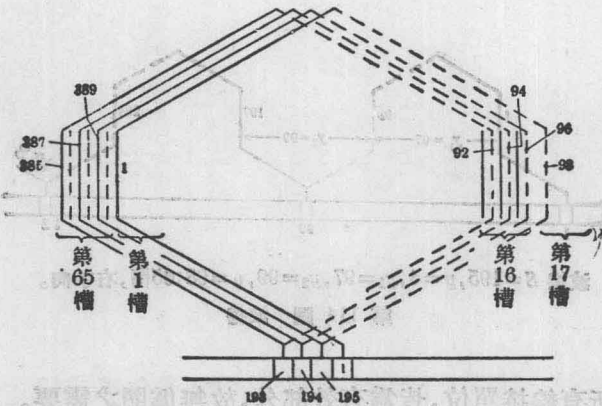
槽既有三線捲單位，總單位數即為 195，故線捲節距應約為 $\frac{2S}{p} = \frac{390}{4} = 97\frac{1}{2}$ 。如選後節距等於 97，則佔據第 1 槽上層之三圈邊將依次與第

17 槽之底層相連接；如此類推，各單位端接之形狀與大小將完全相同，故每三個單位實可紮在一起，同時放入槽中。此紮在一起之單位，將有三對端線，與圖 107 僅有一對者不同。惟為便於認出每對之雙線起見，各對應有記號，如用各色棉紗管是。



$S=195, p=4, y_1=+97, y_2=-95, y=+1; 65$ 槽；右手向。

第 111 圖 摺捲



$S=195, p=4, y=+97, y_2=-99, y=1; 65$ 槽；左手向。

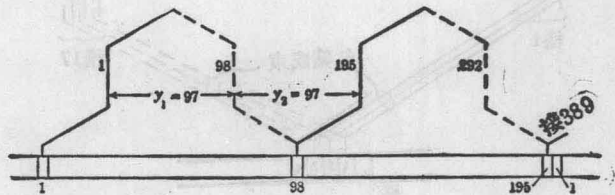
第 112 圖 摺捲

上面所論之線捲可接成摺捲或波捲。如後節距為 97，而用作摺捲時，則前節距將為 -95 或 -99，前者為右手向，後者為左手向，此二種摺捲之展開圖，分見圖 111 及 112。

如用作波捲時，整流節距應合於下列條件：

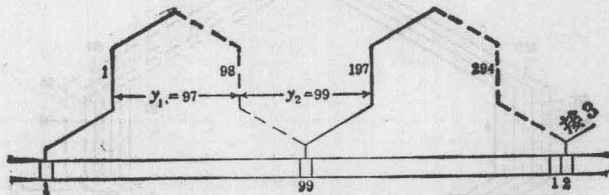
$$y = \frac{2S \pm a}{P} = \frac{390 \pm 2}{4} = 97 \text{ 或 } 98$$

後節距既定為 97，如 $y=97$ ，前節距應為 97。如 $y=98$ ，前節距應為 99。此二式見圖 113 與 114，前者為左手向，後者為右手向線捲。在上



波捲 $S=195, p=4, y_1=97, y_2=97, y=97; 65$ 槽; 左手向。

第 113 圖 波捲



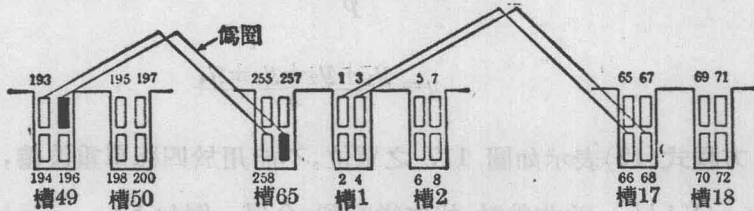
波捲 $S=195, p=4, y_1=97, y_2=99, y=98; 65$ 槽, 右手向。

第 114 圖 波捲

述情形下，所有線捲單位，皆為有效部分，故無偽圈之需要。

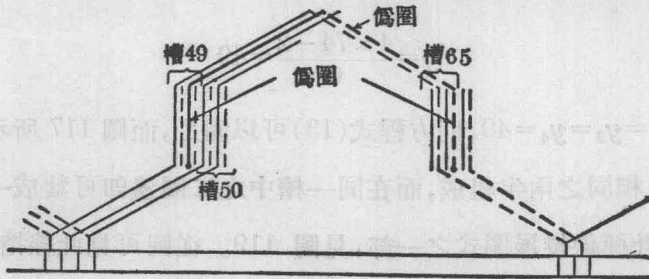
偽圈對於圈邊號數之影響 本章第 3-13 節所舉之例(圖 105), 65

槽共有 260 圈邊,但其中二圈邊純爲塞滿空槽之用。此種僞圈之存在,將使圈邊之號數發生相當之困難。如圖 115 所示(圖 115 與圖 105 相



第 115 圖 僞圈對於圈邊號數之影響

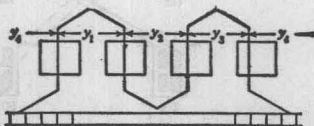
仿,但所示槽數較多),完全塗黑色者爲僞圈。僞圈之位置實可隨便,但圖中所示在第 49 及第 65 槽。僞圈不必編號數,故自第 49 槽至第 65 槽各槽中之圈邊號數並不連續。在實際與整流片連接時並無困難,因僞圈之前端接,儘可剪斷,如圖 116,而其餘各圈之前端仍可照常接於整流片之伸出夾槽(slots of the commutator risers)。



第 116 圖 有僞圈波捲之展開式

減少整流片數時之線捲 發電機

及電動機之樞捲皆設計爲每單位二有效圈邊,但有時亦需要將整流片數減至一半。在波捲時,每單位可用四有效



第 117 圖 四有效圈邊之線捲單位

圈邊，如圖 117。此時磁場跨距 f ，不為 2 而為 4，故

$$y = \frac{4S \pm a}{p} \quad (12)$$

及

$$y = \frac{y_1 + y_2 + y_3 + y_4}{4} \quad (13)$$

方程式(12)表示如圖 117 之單位，不能用於四極單重波捲，蓋此時 $y = (S \pm 1/2)$ ，並非整數，故無從辦到。今舉一例如下：

磁極數 = 6.

槽數 = 74.

每槽圈邊數 = 4.

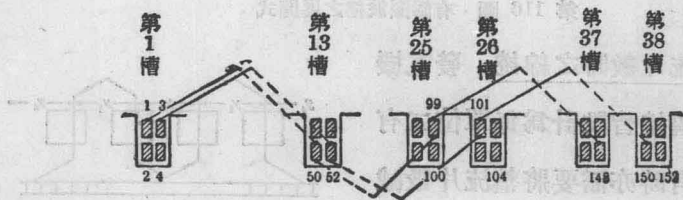
總圈邊數 = $4 \times 74 = 296$.

線捲單位數 = $296 \div 4 = 74$.

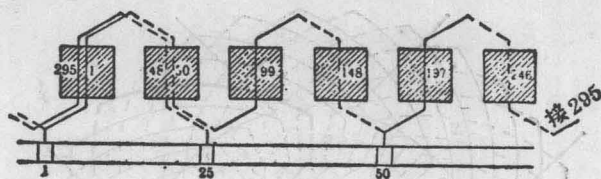
從方程式(12)， a 之符號應為負數，因此

$$y = \frac{4 \times 74 - 2}{6} = 49$$

如 $y_1 = y_2 = y_3 = y_4 = 49$ ，則方程式(13)可以滿足，而圖 117 所示之完全單位，可由相同之兩半組成，而在同一槽中之二圈邊即可紮成一對，如圖 118。此種線捲展開式之一部，見圖 119。從圖可見此線捲僅需 74



第 118 圖 槽之排列法



第 119 圖 整流器之連接法

整流片，較之每單位二圈邊時所需之 148 片僅為半數。整流片數減半，則此雙重單位中在整流時之電抗壓落約將兩倍於二圈邊之單位，此點亦應注意證實，俾得良好之整流。

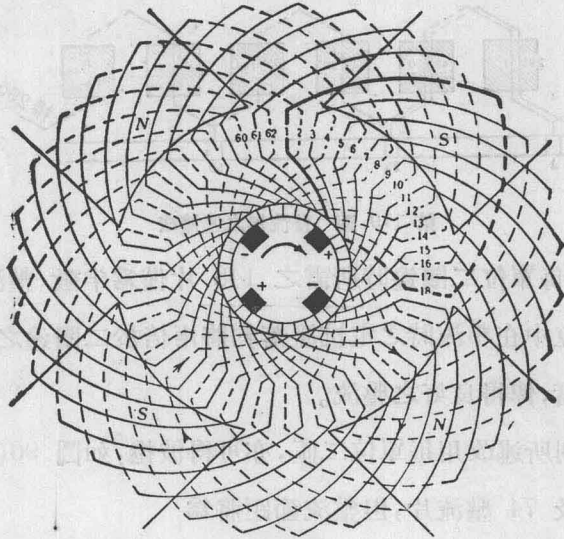
如以上例所述改用每單位二匝，亦可得波捲，如圖 96(c)。如是將有 74 單位及 74 整流片，但整流節距將為

$$y = \frac{2 \times 74 + 2}{6} = 25$$

此捲與前捲主要不同之處即在整流時線圈感應之電抗壓落。設圖 117 中單位每半之電抗為 x ，則整個單位之電抗約為 $2x$ ；但如線圈之兩半連接成一兩匝之線圈，電抗將為 $4x$ ，蓋每一線捲之電抗與匝數之平方成比例也。

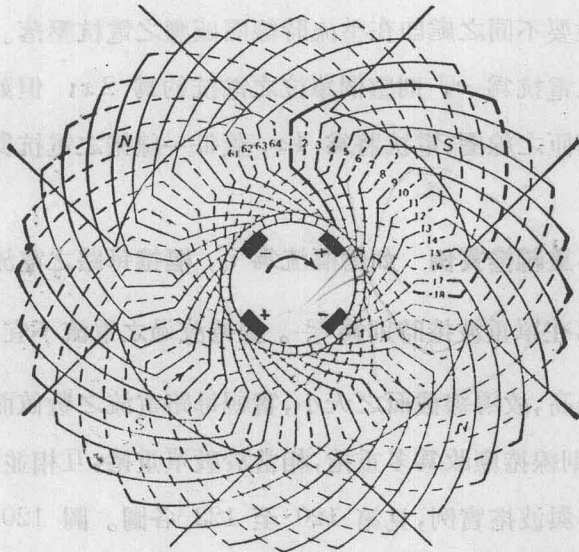
3-18. 多重線捲實例 如總樞流為 i_a ，樞捲每路之電流，在單重摺捲時為 $\frac{i_a}{p}$ ，在單重波捲時則為 $\frac{i_a}{2}$ 。線捲流過之電流不宜過大，以免發熱之溫度過高，故導線截面之大小，實視每路電流之數值而定。如所需截面過大，則線捲應改為多重捲，相當於數單重捲，互相並聯。

雙重摺捲與波捲實例，見第 120 至 123 各圖。圖 120 及 121 所示之摺捲，各有 62 及 64 圈邊，其線捲節距在前者約應為 $\frac{62}{4} = 15\frac{1}{2}$ ，



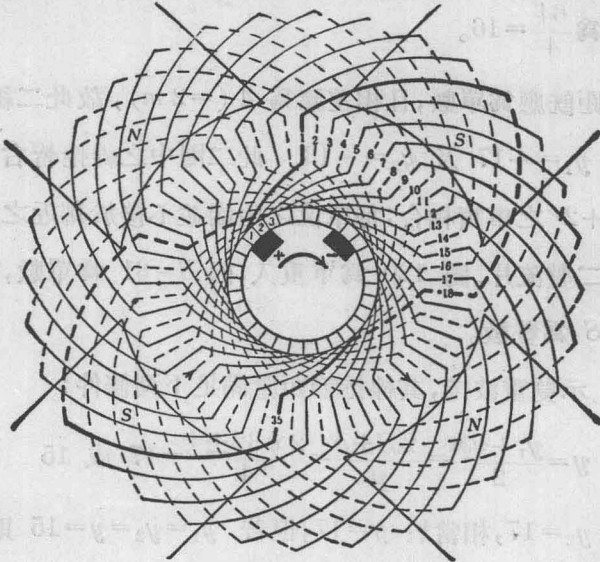
$$Z = 62, S = 31, y = 2, y_1 = +17, y_2 = -13$$

第 120 圖 雙重摺捲, 單重入。



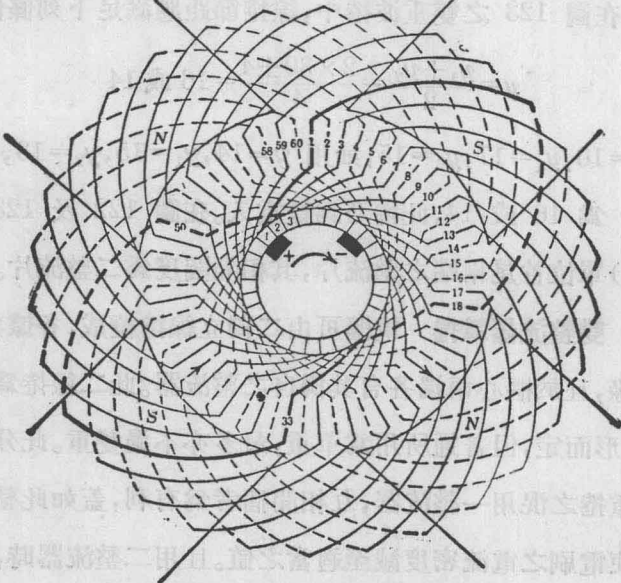
$$Z = 64, S = 32, y = 2, y_1 = +17, y_2 = -13$$

第 121 圖 雙重摺捲, 雙重入。



$Z=64, S=32, y=y_1=y_2=17$

第 122 圖 雙重波捲, 單重入。



$Z=60, S=30, y=16, y_1=17, y_2=15$

第 123 圖 雙重波捲, 雙重入。

在後者約應爲 $\frac{64}{4} = 16$ 。

前後節距既應爲單數，且相差應爲 4 ($=2m$)，故此二線捲中之節距數均應爲 $y_1 = +17$ 及 $y_2 = -13$ 。此二圈中之線捲皆右手向推進，與 $y = m = +2$ 之事實相合；每單位之兩端並不接於鄰近之整流片，而相隔闊度爲二整流片。圖 120 爲單重入，因 $S = 31$ 爲單數，圖 121 爲雙重入，因 S 爲雙數。

圖 122 示雙重波捲，其線捲節距應滿足下列條件：

$$y = \frac{y_1 + y_2}{2} = \frac{2S \pm a}{p} = \frac{2 \times 32 \pm 4}{4} = 17 \text{ 或 } 15$$

圖中用 $y_1 = y_2 = 17$ ，相當於 $y = 17$ ，但若 $y_1 = y_2 = y = 15$ 則得一絃捲（短節距捲）。此捲因 y 爲單數，故爲單重入。

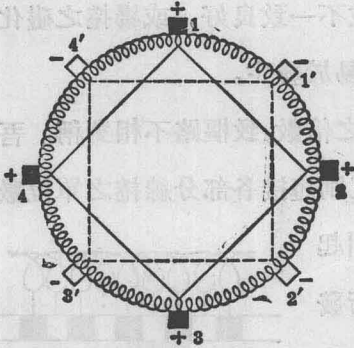
同樣，在圖 123 之雙重波捲中，線捲節距應滿足下列條件：

$$y = \frac{y_1 + y_2}{2} = \frac{2 \times 30 \pm 4}{4} = 16 \text{ 或 } 14$$

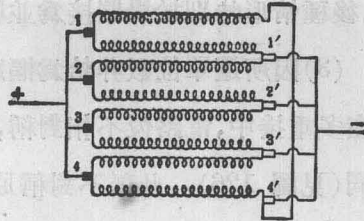
圖中用 $y = 16, y_1 = 17, y_2 = 15$ ，如用 $y = 14, y_1 = 15, y_2 = 13$ ，則得一絃捲。無論 y 爲 16 或 14，此捲乃爲雙重入。在圖 122 及 123 中，凡經過 $\frac{p}{2} (=2)$ 單位首尾兩端之整流片，其相隔闊度爲二整流片。

3-19. 雙整流器線捲 電樞可由二獨立線捲繞成，各據共同之槽，但互相絕緣，且於樞心兩端各有其獨自之整流器。此二線捲爲單重或爲多重，視情形而定，但普通所用爲單重，最多亦不過雙重。此分開之二整流器較多重捲之混用一整流器，互相間插者爲有利，蓋如此整流片不必過長即可使電刷之電流密度減至適當之值。且用二整流器時，二線捲可以任意串聯或並聯，而使電壓得 2:1 之比，利益更大。

8-20. 等位或均壓連接 圖 124 示一八極機之並捲電樞。其經電樞之八並聯電路，自此端至彼端之關係，參閱第 125 圖，更可明瞭。如欲每電路各負載適當比例之電流，則每電路所發之電勢應時刻相同，且



第 124 圖 有均壓線之並捲電樞



第 125 圖 圖 124 中電樞接法圖

其電阻亦必相等。無論如何，八路中之電流，應依啓旭夫定律而分，即：

- (1) 凡連合電路之位差和必等於零；
- (2) 凡接合點之電流和必為零。

若因任何理由，一電路所發之電勢大於他電路時，例如電路 3-2' 大於 3-3' 則 2' 與 3' 刷子之電位即有不同；但此二刷既由低電阻之導體相接連，此電位差將使電刷 2' 與 3' 間有一電流，俾發生均壓之作用。此種周路之電阻極低，故電位差雖小，而均流 (equalizing current) 仍可甚大，倘不設法防止，恐有線捲發熱及電刷間發生火花之弊。

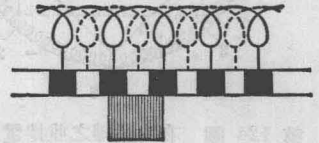
各電路中電壓不同之原因約如下列：

- (1) 因構造之不整齊，或軸承之磨損，電樞未能適位於極靴中央，氣隙因而不勻。故有數極負較多之磁流，而受其影響之線圈內所發生之電勢，比在較弱磁極下者為大。此原因於摺捲中尤為重要，因每樞路於任

一時祇處於一對磁極影響之下。波捲之每路同時受所有各極之影響，故各極磁流雖有不勻，亦無大關係。

(2) 氣隙雖均勻，而磁極之構造未能一致，則磁流亦因之不同。例如，極與軛或極心與極靴之接連處並不一致良好，或場捲之磁化力不同。後種情形特別於場圈接為並聯者易於發生。

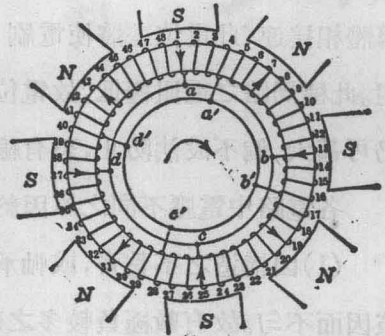
(3) 因所選單位數非恰為樞路數之倍數，致樞路不相對稱。吾人注意在多重捲中，電路恆不相對稱，因電刷短接各部分線捲之單位數每不相同(見圖 126)。此種不對稱足以引起均流(equalizing current);即各路所發生之電勢相等，而因電路中電阻稍異，均流亦不能免。



第 126 圖 多重捲中線捲單位之短接

均流增加熱量乃能耗之源，且如此種均流經過電刷，則某數電刷較其他電刷負載為多，而整流將發生火花。欲免此弊，惟有竭力於設計使磁電各部分完全對稱；其餘構造上之不整齊處，則另用均壓或等位連接(equipotential connections)，俾使整流不受影響。

電樞裝置均壓線或等位線之原理，即為凡線捲各點，通常應等位者，即接以低電阻之導體。如在圖 127 之環捲中， a, b, c, d 各點對同性各磁極之地位適相同，故可連接如圖中所示。萬一構造上未能整齊，

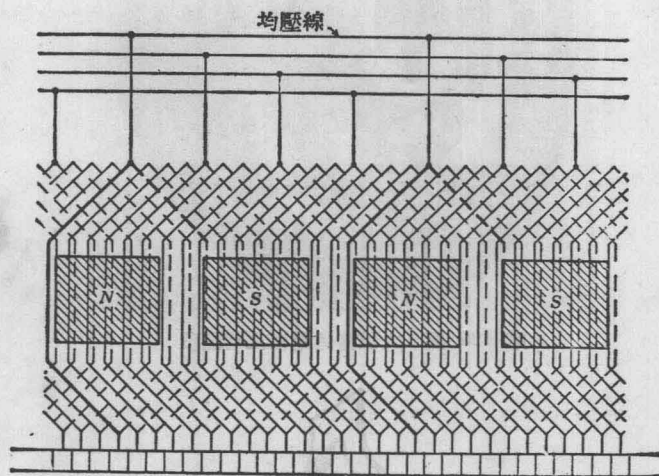


第 127 圖 並捲中之均壓線

而各點電位不同，則均流可由數周合路線中流通；例如導線2,3……12,13,再加 b 至 a 之接線，即成一電路。同樣， a', b', c', d' 各點，相隔皆為雙極距，亦可相連。從圖 127，可見如用均壓線時，導線總數應適為磁極對數之倍數。

吾人注意經均壓線之均流皆為交流電，其週波率等於每轉每對磁極之數。此交流電由於磁流分布之不均勻而產生，但依侖茲定律，應電流對於發生此電流之來源，有相反之作用，故均流之磁效用適與原來磁場之不均勻處相抵消，因此整流之困難即可避免。^①

在單重摺捲中，如槽數為磁極對數之倍數，則均壓線之裝置，將如圖 128 所示；否則線捲中當無適當點數，對於同性磁極任何時皆同樣

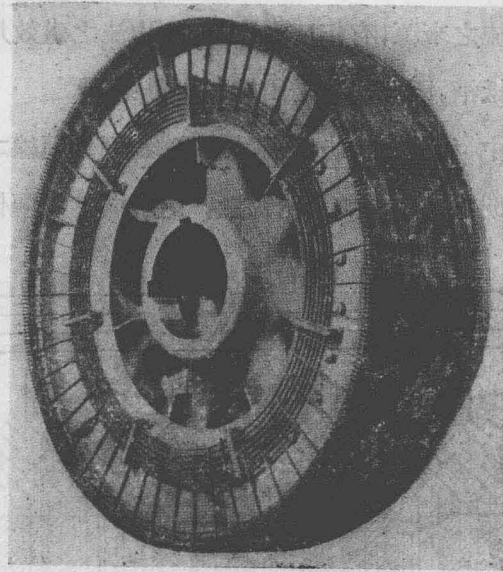


第 128 圖 摺捲中之均壓連接

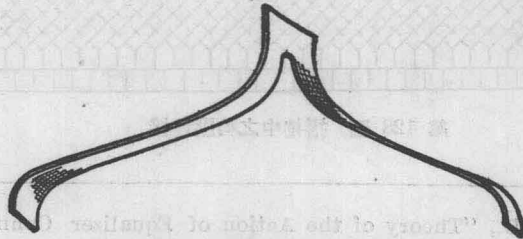
① Moore, A. D., "Theory of the Action of Equalizer Connections in Lap Windings," Elec. Jour., Vol. 23, p. 624, 1926.

相稱。在大電樞中，對整流器或即滑輪端之極心每每露開，均壓線可用若干同中心之圓圈形而將各圈用徑向銅條連至線捲各適宜之點，如圖 129 均壓環之數，視情形而定；最多之數可等於雙極距間之單位數，但如此各環過於擁擠，且成本甚貴，而效力增加較少；故普通線捲每隔三四單位方有一連接點。

如不用圖 129 所示之均壓環，則可另用一種捲葉(involute)式之



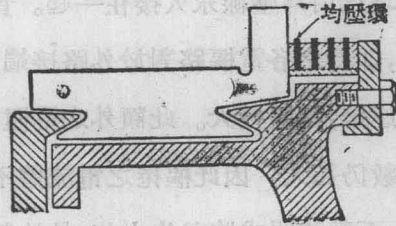
第 129 圖 大號摺捲電樞之均壓環



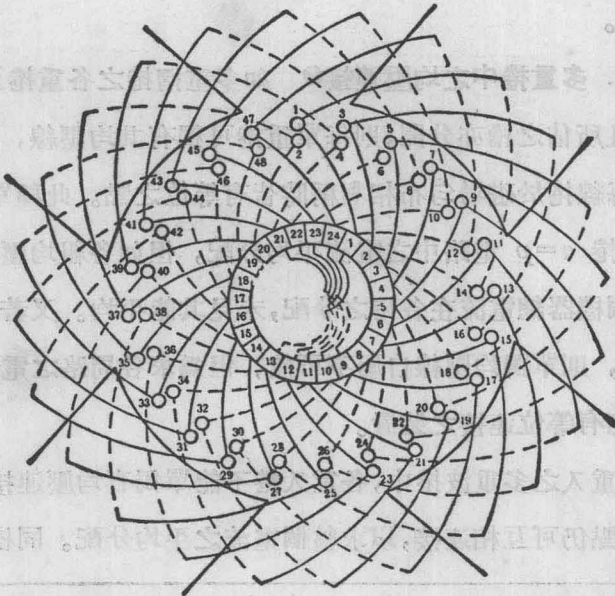
第 130 圖 捲葉式之均壓連接

銅扁帶，如圖 130。此式與線捲單位之端接相似，可分列兩層放於極心露出之一端。

均壓線可在極心之滑輪端接出，亦可在整流器端接出。在小機器中，滑輪端地位不夠故均壓環常接於整流器後端，如圖 131；此種均壓環即直接連於整流片，但整流片數應為雙極數之倍數。圖 132 示此種均壓連接法，應用於四極 24 線捲單位摺捲之情形。



第 131 圖 整流器端之均壓環



第 132 圖 整流器端之均壓連接

均壓線所接整流片之位置適相對向，但圖中爲清楚起見僅示數線。在莫岱 (Mordey) 初用此種等位或均壓接法時，其目的爲減少電刷之數；自圖 132，可見二電刷已足收集完全電流，蓋與同磁極電刷相接觸之整流片均已由均壓線永久接在一起。實際上此法甚難有效，因如僅用二電刷，並行之各電樞路對於外路接端之距離並不相同。較遠之樞路因有均壓連接，電阻較大。此額外之電阻，爲數雖微，但與樞電阻相比，所佔百分數仍甚大，因此樞捲之電流將不能得平均之分配，各電刷之負載不同，而整流器或將發生火花。是故即有均壓連接，電刷之數亦多不省去。

單重波捲不需均壓連接，因每一並聯電路各導線皆同受各磁極之感應作用。實則在單重波捲中，除與同符號電刷之接觸點外，各點電位皆不相同。

3-21. 多重捲中之均壓連接① 如多重褶捲之各重捲互相獨立，各自重入，且所佔之槽亦分開，則每單重捲可獨有其均壓線，惟各捲之設計，應使每線捲於磁場勻布相對稱時皆有等位之點。此種單獨均壓線，雖可使單捲 $a=p$ 電路中之電流平均分配，但如各組均壓線不互相連接，則整個機器總電流在各捲之分配，未見其能平均。又若多重褶捲爲單重入捲，則單獨均壓線自屬不可能，但爲求各周路之電路適當分配起見，仍應有等位連接之裝置。

在多重入之多重波捲中，各重入捲不能單獨有均壓連接，但各單捲之等位各點仍可互相連接，以求整個電流之平均分配。同樣，單重入之

① Nelson, Carl C., "Multiplex Windings for Direct-Current Machines,"
Trans. A. I. E. E., Vol. XLV, p. 976, June, 1926.

多重波捲亦可有此均壓接線。

任何線捲(多重捲在內)用均壓接線時應注意之通則,茲再綜述如下:

(1) 線捲中應有位置對稱各點,相隔雙極距或雙極距之倍數。

(2) 實用上電樞既皆有槽,均壓連接之有效導線在樞槽中之地位應適相同。

(3) 實用上每線捲單位既皆為二有效圈邊,故整流片之位置亦應與同極性之電刷相對稱。

為詳細研究上述條件起見,吾人特作圖 133,分示 4,6,8,……18 各極數之電樞,其圓圈中之多角形各示均壓連接點之最低數。在 8,12,16 及 18 極機器中,此最低數可有數值,但通常此數等於 $p/2$ 或 $p/2$ 之整因數(此因數應大於 1)。

4. 雙重摺捲 吾人今所討論,如以均壓連接各點限於相隔雙極距者,則每雙極之整流片數應為整數,甚為明顯;即

$$\frac{S}{p/2} = \frac{2S}{p} \text{ 必為整數} \quad (14)$$

又在任何線捲中

$$N_s = \text{槽數}$$

$$z_s = \text{每槽圈邊數(雙數)}$$

$$y_s = \text{槽節距}$$

$$y_1 = \text{線捲之後節距}$$

故 $N_s z_s = \text{圈邊總數} = 2S \quad (15)$

$$y_s z_s + 1 = y_1 \quad (16)$$

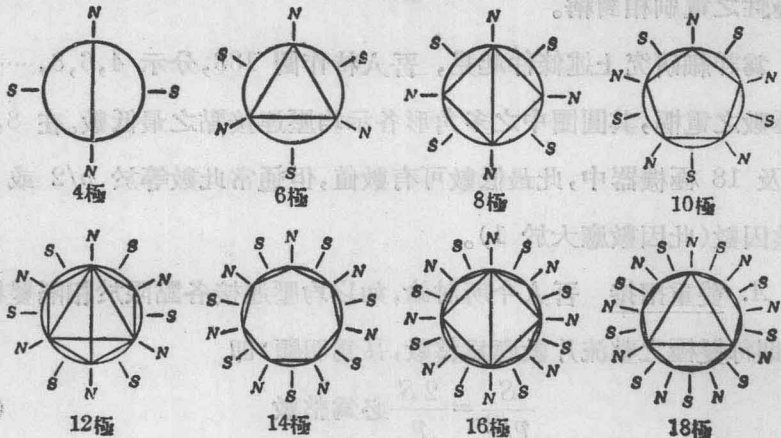
(16)式之關係參看圖 110 可知,蓋若欲第 1 槽上層之線圈,依次與第

(y_s+1) 槽下層之線圈相接，則第1槽第 (z_s-1) 圈邊，應與 (y_s+1) 槽之 $z_s(y_s+1)$ 圈邊相接，而二圈邊數適相差 y_1 。從(14)(15)及(16)各式，故知

$$\frac{2S}{p} = \frac{N_s z_s}{p} = \frac{N_s y_1 - 1}{p y_s} = \text{整數} \quad (17)$$

此普通式唯一應用之條件，為各均壓接點應相隔兩磁極之節距。

如線捲為雙重入(S 為雙數)，則均壓環(參看圖 133)之各接觸點



第 133 圖 等位點之各種接法

應先與一單捲相連再及其他，而在配置對稱之線捲中，接觸點總數必為雙數。據此則 $p/2$ 為單數($p=6, 10, 14, 18$)各機中雙重入之雙重摺捲將與條件不合；故 $p/2$ 如為單數時，雙重摺捲僅可單重入，換言之， S 應為單數。但如 S 及 $p/2$ 皆為單數，其商數〔依(14)式應為整數〕，亦應為單數，故(17)式中之 N_s 及 z_s 應加此限制。例如 $z_s=2$ ，則 $N_s=S$ ，故槽數應為單數；又如 $z_s=4$ ，則 $6, 10, 14, 18, \dots$ 極各機皆不可能，但設 $z_s=6$ ；則6極機之 N_s 為單數，而於 $2S/p$ 為3之倍數並單數時，

10 極 14 極機亦為可能。

如磁極對數為雙數($p=4, 8, 12, 16, \dots$)。而欲相隔 $\frac{2S}{p}$ 整流片之連接點，得一對稱之配置，則線捲應為雙重入，換言之， S 應為雙數。雙重摺捲之整流節距既等於 2，故單數整流片屬於一單捲，而雙數者屬於另一單捲，但自單數整流片之一單捲接至雙數整流片之另一單捲，其距離既亦須為 $2S/p$ ，故 $2S/p$ 又必為一單數；即無論 $p/2$ 為單數或雙數， $2S/p$ 不特為整數，且應為單數。

如 $p/2$ 為雙數，依(17)式槽數將視 z_s 之值而有限制。如 $z_s=2$ ， $2N_s/p$ 為單整數，故 $p=4, 8, 12, 16, \dots$ 時， N_s 應為雙數，但如 $z_s=4$ ， N_s 於 4 極時應為單數，8 極時應為雙數，12 極時又為單數，餘類推；換言之，當 $z_s=4$ 時，如 p 為 4 之單倍數， N_s 為單數，如 p 為 4 之雙倍數，則 N_s 為雙數。如 $z_s=6$ ，自(17)式可知除 p 為 6 之倍數外， $\frac{2S}{p}$ 應為 3 之倍數，方可有均壓連接之可能；又 $z_s=6$ 時，無論 p 為何值， N_s 皆應為雙數。

B. 雙重波捲 此種線捲之限制，較雙重摺捲更大，因其整流節距必滿足下列條件

$$y = \frac{2S \pm 4}{p} = \frac{2S}{p} \pm \frac{4}{p} = \text{整數} \quad (18)$$

除 4 極機外， $\frac{2S}{p}$ 不能為整數；但 4 極機中雙重波捲樞路之數適與單重摺捲相等，實無優點可言，故不具論。6 極機為不可能，自圖 133 可知，蓋線捲二部分之平衡互連無法可得；且 $2S/p = S/3$ ，依(18)式所得並非整數。

如 $p=8$, $\frac{2S}{p} = \frac{S}{4}$, 依(18)式此數應爲一整數再加 $1/2$ 。故相隔雙極距之各點無從作均壓連接, 但相距半圓周或對徑時即有可能。今設寫作

$$\frac{S}{4} = x + \frac{1}{2}$$

x 爲雙數或爲單數, 可知 S 應爲雙數($4x+2$), 但(18)式中 y 或雙或單, 視雙重入或單重入而定。且依(15)式之通式, 如 $z_s=2$ (每槽 2 圈邊), 槽數既等於 S , 應爲雙數, 但如 $z_s=4$, 槽數爲整流片數 S 之半, 或雙或單, 視 S 之值而定。如 $z_s=6$, 槽數應爲整數且須滿足下列條件

$$N_s = \frac{4x+2}{3}$$

其中 x 亦應爲整數; 如此槽數應爲單數之兩倍, 如 2, 6, 10, 14, 18……等數。

如極數較多, 經同樣分析之結果, 可知凡 p/z 爲單數時, 均壓連接皆不可能; 換言之, 如 $p=6, 10, 14, 18$ 等, 雙重波捲事實上不能用。但當 $p=8, 12, 16$ 等時, 即 $p/2$ 爲雙數, 則在(15)及(18)二式之條件下可用均壓接線。

C. 三重線捲 以上關於雙重捲之討論, 極易引伸於三重捲及更高級之多重捲, 但此種分析將留待讀者自爲之, 在實際製造上, 雙捲以上用者極少, 蓋因試驗用之線捲, 設計多不完善, 以致樞路間之互相連接未能完全, 結果因而不佳。但 Allis-Chalmers 公司所製『蛙腿』式線捲, ①可謂例外。詳捲於同一槽中, 置有一多重波捲及另一單重(或多

① W. H. Powell and G. M. Abrecht, Iron and Steel Engineer, p.345, September, 1925.

重)摺捲,樞路之數相同,故同接於一整流器。例如 8 極時,單重摺捲之樞路凡 8,波捲則 4 重捲。在此種波捲中,凡相連續之 $p/2 (=4)$ 單位之兩端,與相隔 3 整流片之整流片相接。而在 $p/2=4$ 波捲單位之兩端間,將有 4 單重摺捲之單位。此兩組線捲,各有 4 單位,互相並聯,故發出之電勢亦須相等。欲電勢相等,故甲組 8 圈邊對於磁極之位置,應適與乙組者相同。換言之,兩線捲之前後節捲應各相等。此種 8 極機之線捲實有 16 樞路,但因兩獨立捲互相連接,故外面無均壓連接之必要。

習 題

習題 3-1. 今有一四極發電機,共有 72 圈邊,其線捲為單重摺捲,試將其樞捲展開圖全部畫出。節距之選擇,應以每單位跨越一磁極節距為適合。表明電刷之適當地位並示每線圈中電流之方向。作一相當於所畫之圖之線捲表。

習題 3-2. 今有一四極發電機,共有 74 圈邊,其線捲為單重波捲,試將其樞捲展開圖全部畫出。表明電刷之適當地位並示每線圈中電流之方向。作一相當於所畫之圖之線捲表。

習題 3-3. 一鼓形電樞有 240 單位,每單位一匝。試求適合於八極機之各種可能摺捲及波捲,單重,雙重,及三重。說明每種之前後節距,整流節距,及重入次數。

習題 3-4. 一發電機之名稱板上有如下之記載:極數, 6; 定額, 100 瓩; 速度 1200 轉/分; 電壓, 230 伏。樞捲中已有斷線。對於樞捲之佈置法並無材料可供參考。惟知此機有 74 槽及 146 整流片。每個極靴

之面積爲 26.25 方吋，氣隙內之平均磁流密度可假定每方吋自 40,000 至 60,000 線。今欲將此樞捲重繞，共有幾法？各法中之前後節距及整流節距爲若干？試將各種繞法列表說明。依圖 118 之普通表示法作一樞捲圖，將線捲與整流片之接線畫出，并在各部上註明數字。表與圖均須十分完全，以便送往工場時可爲重繞樞捲之唯一指導。

習題 3-5. 一四極，30 瓩，110 伏，1200 轉/分之電機有一 49 槽之電樞及一 147 片之整流器。極靴之面積爲 18.85 方吋。試求與第 3-4 題相同之答案。

習題 3-6. 一 200 瓩，250 伏，八極發電機有一單重摺捲電樞。每極有槽 14。整流片共 224。線捲單位以長銅片製成，其截斷面爲 0.1×0.4 吋，長 88 吋。假定線捲在工作時之比電阻爲每圓吋一呎 12 歐，在樞捲兩端量出之樞捲電阻當爲若干？除去分激場路內之電流不計，樞捲在滿載時之歐耗爲若干？

習題 3-7. 依圖 115 及本章第 3-13 節第 2 部（波捲或串聯捲）下所給之繞線數據，設此機之電壓爲 220 伏，極弧與極節距之比爲 0.7 并假定極面下之磁場非但十分均勻，毫無邊緣作用，而且所有磁力線皆爲徑向，問 1 與 3 兩導線（圖 115）間之電位爲若干？1 與 2 兩導線間又爲若干？

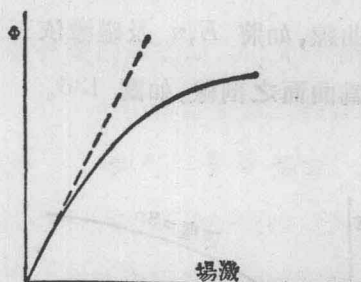
習題 3-8. 一單重摺捲電樞原依 230 伏，750 轉/分之情形而設計，今欲改用於 (a) 230 伏，1500 轉/分，或 (b) 115 伏，1500 轉/分，或 (c) 115 伏，750 轉/分之機上，試問應如何改造？

第四章 場捲及樞捲之磁化效應

4-1. 磁化曲線及飽和曲線 每一電機，無論發電機或電動機，含有一電路或多數電路與磁路相鏈。在發電機中，樞捲因在磁流中轉動，乃為電路中產生有效電勢之部分，在電動機中，因樞流對於磁流有反作用，樞捲乃生轉力。故無論作何應用，電機之運用特性與規定主要磁流強弱之特性有密切之關係。前於第一章中，嘗述及磁路中磁流之關係有如下式：

$$\text{磁流} = \Phi = \frac{\text{磁勢}}{\text{磁阻}}$$

即磁流與磁勢成正比，與磁阻成反比。如鐵之磁導係數不變，磁阻為定值，則上式可以一直線表之；但達到飽和現象時，磁阻增加甚速，而磁流與場激之關係，乃如圖 134 所示，場激愈大，曲線愈彎。



第 134 圖 磁化曲線

樞捲中發生之電勢既為

$$E = \frac{p}{a} \frac{\Phi Z_n}{60 \times 10^8} = \frac{p}{a} \frac{Z_n}{60 \times 10^8} \Phi \quad (1)$$

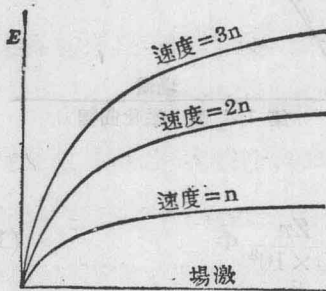
其中 Φ 為每極之磁流，故

$$E = \frac{p}{a} \frac{Z_n}{60 \times 10^8} \times \frac{\text{磁勢}}{\text{磁阻}} \quad (2)$$

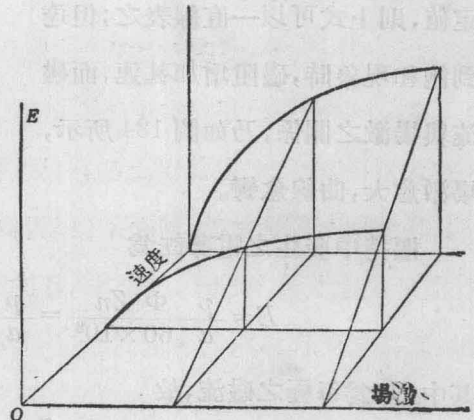
此中磁勢為發生磁流 Φ 之場激，而磁阻為磁流所經過磁路之阻力。

凡一機鐵殼之尺寸及材料已完全決定時，不論線捲之種類與聯接方法，其磁激(用每極吉柏或安匝數，或每雙極之安匝數)與所生之磁流必有一定之關係。換言之，磁場鐵及樞心鐵若已製就，則無論線捲如何，每極磁流與磁路磁激之關係，必可得一定特性線，如圖 134，此種曲線名曰磁性特線，或曰磁化曲線。

自方程式(1)及(2)可知樞捲中所生電勢與磁流 Φ 成正比，而此比例常數 $\frac{p}{a} \frac{Zn}{60 \times 10^8}$ 則依電樞導線數與其配置(即 Z 及 a)及速度 n 而定；如樞捲已定而磁流 Φ 為一固定值時，電勢 E 則與轉速 n 成正比例。今從第 134 圖所示磁化曲線而於各 n 值時求 E 與磁激之關係，則得圖 135 所示各曲線，每曲線相當於某一轉速。此種曲線名曰飽和曲線，如將 E, n 及磁激依三垂直軸線作圖，則各 n 值之飽和曲線，適為曲面之剖線，如圖 136。



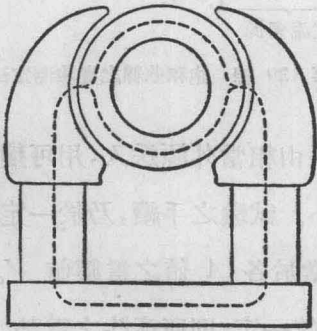
第 135 圖 飽和曲線



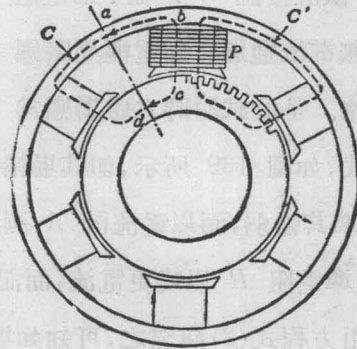
第 136 圖 飽和曲線與轉速之關係

4-2. 主要磁路 第 137 及 138 圖中虛線，示雙極及多極電機中磁

流之中路。此種線於作圖時須通過各感應管 (tubes of induction) 截面之重心。由第 138 圖 C' ，可知一完全磁周路，包括樞心，二齒，二氣隙，二極靴，二極心，及軛。圖中磁化線捲 P 僅在一極上，但因磁路並行， C 及 C' 磁路中將得同量之磁流 (假定構造上完全對稱)。依此，每隙一極設有同樣之線捲，則各極磁化必相等，而磁流通過一周路所需之磁激，即為雙極之磁激。故每極之磁激，應適足維持 $abcd$ 周路中之磁



第 137 圖 雙極機之磁路



第 138 圖 多極機之磁路

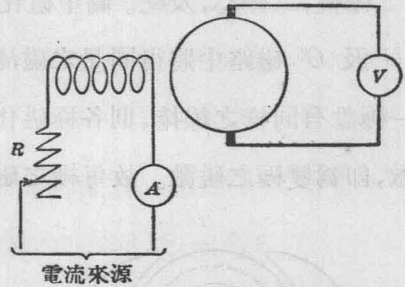
流。如圖 138 所示，此周路包括一氣隙，一齒，一極靴及極心，及通過樞心與軛之一半路線。磁場磁激普通以每極或雙極之安匝數計。

磁化曲線甚為重要。無論電機為發電機抑為電動機，從其曲線之形狀，概可決定其運用特性。換言之，若機器運用之各種條件已有規定，則磁化曲線之形狀亦隨之而定。故定此曲線，實為根本上重要問題。如機器僅在紙面設計，則磁化曲線之各點可用方法計算，詳見第五章。如機器已造好，則可由實驗所得之飽和曲線而求磁化曲線。

4-3. 飽和曲線之實驗測定 從

$$E = \frac{p}{a} \frac{Zn}{60 \times 10^8} \times \frac{\text{磁勢}}{\text{磁阻}} = kn \times \text{磁場安匝函數} \quad (3)$$

可知欲作此實驗時，祇須於一定速度 n 開動機器（即用一電動機或其他相當的原動機拖動之），而注意其歷次 E 與安匝之相當值。上面方程式(3)中之 E 為電樞在場流所發生之磁流中旋轉而生之電勢；今欲直接測 E 之值，則電樞中應無電流通過，即電樞周路應為斷路。是故試驗時之磁場應為



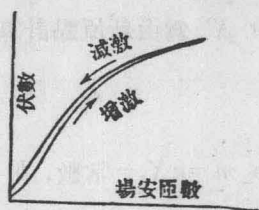
第 139 圖 飽和曲線之實驗測定法

別激式，如圖 139 所示，即其場捲電流係由相當外源送入，用可變電阻 R 調準其強弱，而以電流計 A 測其大小。試驗之手續，乃於一定速度時，調準電阻 R 以變更電流，而記其相當於各 A 值之電壓值 V 。

由方程式(3)研究之，可知如場激之值一定，則所產生之電勢，必與速度成正比。但此亦未盡然。電流通過樞捲之部分，或為電刷所短路，而此種電流，亦易至相當之大小，以與磁流反抗，而影響及於發出之電勢。今欲減少短路電流之糾紛作用至極小，必須減低生此電流之電勢；在一定場激時，如速度減少，即可達到目的。故定飽和曲線時，所用速度，最好遠在額定速度 (rated speed) 之下，而以所得之電壓數，將額定速度與所用速度之比乘之。至電樞線圈短路電流之作用，另於第八章詳論之。

在實驗時，如場捲內之激流先自零增至最高值，後自最高值減至零，此二飽和曲線之形狀並不相同，如第 140 圖所示。此兩曲線之所以

不同，乃由磁路內含鐵部分之磁滯作用 (hysteresis)，此作用即謂鐵（或其他磁性物質）之應磁性，恆後於磁力之變化。



第 140 圖 磁滯對於飽和曲線之影響

從飽和曲線各點以縱坐標之值除 $\frac{p}{a} \frac{Zn}{60 \times 10^8}$ ，則得磁化曲線。

凡電機之磁化曲線，既為其構成材料之 $B-H$ 曲線之函數，如未知 $B-H$ 間之關係，則合理之方程式必不能得到。然有一實驗式，名為弗羅里方程式 (Froelich's equation)，表示磁流（或其相當之電勢）與磁激間之關係，頗為精當，即

$$\text{磁流} = \frac{\text{常數} \times \text{磁激}}{\text{常數} + \text{磁激}}$$

此式代表一通過原點之雙曲線 (hyperbola)，如第 134 圖，其橫漸近線 (asymptote) 高出於橫坐標之值，即等於分子中之常數。另有一縱漸近線，在縱坐標之左，其距離適等於分母中之常數。弗羅里方程式及其用法，將於第六章第 15 節詳論之。但吾人可注意以上方程式，並未計及剩磁 (residual magnetism)，因式中磁激為零時，磁流之值亦適為零。但此方程式可改為含有剩磁作用之式，即將原點移至上方程式所決定原點之右。若令磁激為 X ，而以 a 及 b 代常數，則原方程式可寫為

$$\Phi = \frac{a X}{b + X} \quad (4)$$

今若將原點移至右方，至 X_0 值，則方程式當為

$$\Phi = \frac{a(X' + X_0)}{b + (X' + X_0)}$$

其中 X' 爲由新原點計算之磁激。上式又可寫爲

$$\Phi = \frac{a X' + m}{b' + X'}$$

式中 $m = aX_0 = \text{常數}$, $b' = b + X_0 = \text{常數}$; 故修正後之方程式當爲

$$\Phi = \frac{\text{常數} \times \text{磁激} + \text{常數}}{\text{常數} + \text{磁激}}$$

換言之，弗羅里方程式右項分子中，如加一常數，則剩磁亦可顧到。

4-4. 磁化曲線及飽和曲線之預定 磁化曲線上各點縱坐標及橫坐標之值，可根據第一章第 27 節所規定之方法計算。今若假定每極磁流之值 Φ 而求磁激，則計算之程序約如下述：從假定之磁流值 Φ ，將磁路各部之磁流除以該部之截面，求得其磁流密度。既知磁流密度，可從所用材料之 $B-H$ 曲線，求其每單位長度之安匝數，再乘以該部磁路之長度，則得該部所需之安匝數。各部所需之安匝數相加，則得磁路全部之安匝數。

如是類推，用其他磁流值計算，則所需磁化曲線上之各點皆易決定。而 n 速度時飽和曲線上之相當各點，則可以 Φ 乘 $\frac{p}{a} \frac{Zn}{60 \times 10^8}$ 求得之。普通祇須決定相當於全電壓之 $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$, 全電壓，及較全電壓大 10—20% 之五點，即可作一曲線。

茲將各項結果列表如下，如此計算上既有統系，較爲便捷，且所用符號亦與後文討論詳細計算時有關：

$$\text{假定磁流 } \Phi = \dots\dots; E = \frac{p}{a} \frac{\Phi Zn}{60 \times 10^8} = \dots\dots$$

磁路之部	截 面	磁 流 密 度	磁 路 長 度	每單位長度 之安匝數	安 匝 總 數
樞 心	A_a	B_a	l_a	at_a	At_a
齒, 一 組	A_t	B_t	l_t	at_t	AT_t
氣 隙, 單 個	A_g	B_g	δ	at_g	AT_g
極 靴, 單 個	A_s	B_s	l_s	at_s	AT_s
極 心, 單 個	A_c	B_c	l_c	at_c	AT_c
軛	A_y	B_y	l_y	at_y	AT_y

既知全磁路各部之安匝數，則每雙極所需安匝之總數，按本章第 2 節所述，必為

$$AT = AT_a + 2AT_t + 2AT_g + 2AT_s + 2AT_c + AT_y \quad (6)$$

然因在任何 x 路線內

$$H_x = \frac{4\pi}{10} \frac{AT_x}{l_x}$$

(所有量均以米克秒制單位表示之)，則在長度 l_x 時，所需之安匝數必為

$$AT_x = \frac{10}{4\pi} H_x l_x = 0.8 H_x l_x$$

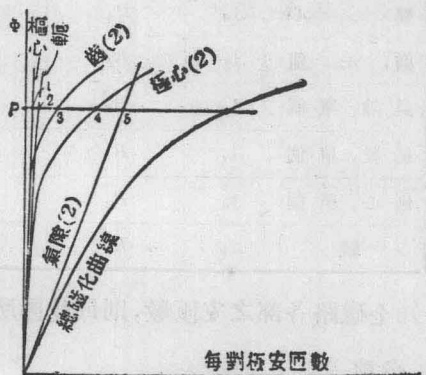
但 $\frac{10}{4\pi} H_x = \frac{AT_x}{l_x} = at_x = \text{每線之安匝數}$

$$\therefore AT = at_a l_a + 2 at_t l_t + 2 at_g \delta + 2 at_s l_s + 2 at_c l_c + at_y l_y \quad (7)$$

磁性物之磁化曲線 ($B-H$ 曲線)，通常以 B 與 at ($=0.8H$) 為坐標作圖，故磁路各部之 B 值決定後，從曲線可得相當 at 之值，再代入上式，即得 AT 。第 32 圖為普通商用磁性物之磁化曲線，其作圖坐標，係用米克秒制單位及英單位。如用英制之長度單位，則 AT 公式當為

$$AT = at''_a l''_a + 2at''_i l''_i + 2at''_o \delta'' + 2at''_s l''_s + 2at''_c l''_c + at''_y l''_y \quad (8)$$

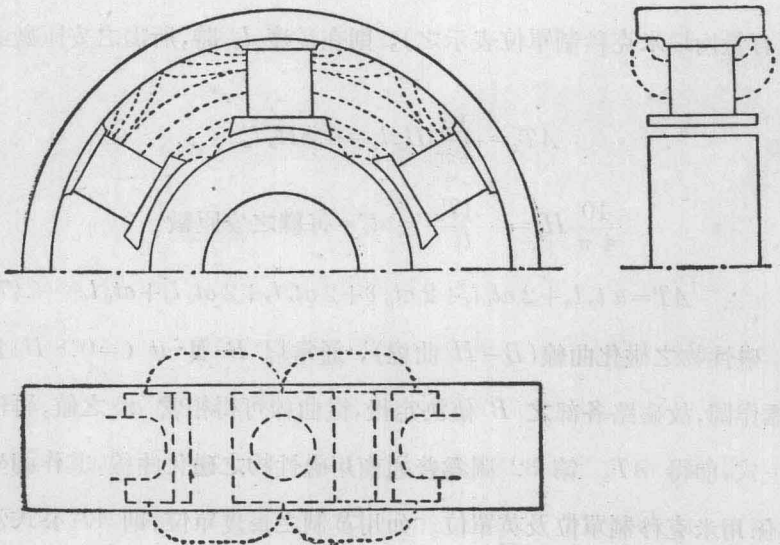
假定 Φ 各值而作此種計算數次，可作圖得磁化曲線。如圖 141 所示，總磁化曲線之外，磁路各部之磁化曲線亦分別繪入，俾知相當於某 Φ 值時各部所需之安匝數。故如 Φ 值為 OP 時，所需之總磁激（以每雙極之安匝數計）即等於 $P1, P2$



第 141 圖 磁化曲線及其組成成分

等橫坐標之和，此從上列(7)(8)方程式可知。

4-5. 磁漏 每極磁流 Φ 既與感生電勢有關，可命之曰有用磁流。



第 142 圖 漏磁

但由場捲磁化作用所生之全部磁流，非盡通過電樞，其中有一部分即自此極漏至彼極，如圖 142 所示。普通言之，凡有磁位差之各點間，皆有同樣之漏磁現象。因有此漏磁 φ ，總磁流之量必須自 Φ 值增至

$$\Phi_t = \Phi + \varphi$$

而總磁流與有用磁流之比

$$\frac{\Phi_t}{\Phi} = 1 + \frac{\varphi}{\Phi} = \nu \quad (9)$$

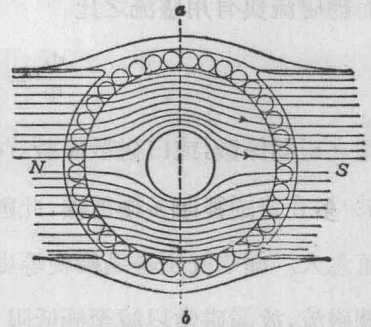
謂之磁漏係數；或曰磁散係數 (coefficient of dispersion)。此數恆大於 1，在普通徑向多極電機，此數約自 1.1 至 1.25，機身愈小，則其數值愈大。漏磁既須經過極軛等處，則極軛等處之截面必須大，始克容載總磁流，故漏磁當以減至極低限度為上。欲達到此目的，其所需之條件，即主要磁路之磁阻應甚小，而漏磁路之磁阻應為最大。就實際言，此指一短極構成之緊湊磁路，各極間之空隙甚闊而其截面則甚小。

任一電機磁散係數之值，在各種情形下，並非為常數。蓋漏磁大部在空氣中，故與磁勢成正比例，而有用磁流 Φ 在磁鐵飽和增加時，即不復與磁勢成正比例。通常 $\nu = 1 + \frac{\varphi}{\Phi}$ 約依磁激而增加。

計算係數 ν 之法，將於第五章詳述之，約言之， ν 為電機各部尺寸之函數，於此吾人可知通常設計一新電機時困難實多，因磁流密度，非俟電機各部尺寸決定後，不能預計，而各部尺寸又與 Φ_t 相關，因之亦與 ν 相關。故如遇此項情形，必須依照以往經驗假設一 ν 之值，然後從事 Φ_t 及各部尺寸之計算。由是再求 ν 之值，如與原來假定之值懸殊過甚，則再加以修正。

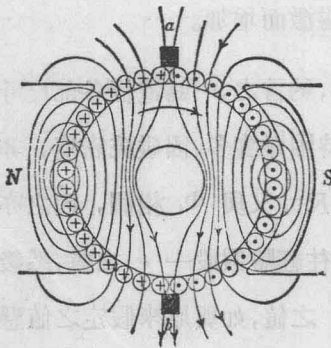
4-6. 電樞之磁化作用 以前討論電機狀況時，係假定電樞中無電流。在此種零載情形時，磁流之多寡與分布，全恃場捲之磁激與機架之形狀及材料而異。但在有載時，電樞導線中之電流，引起另外一種磁激，足以改變原有磁流之數值與分布。此電樞之磁化作用，謂之電樞反作用。

爲簡便計，先詳察兩極機之情況，倘電樞無電流，則因場激所生之磁流，將對稱分布如 143 圖。自軸心作一直線 ab ，與磁極軸線成直角，此幾何中軸線 (neutral axis)，即爲零載時磁流之對稱軸線。幾何中軸線兩邊之導線，乃發生方向相反之電勢。在零載時，倘電刷置於此幾何中軸線上之地位，則在中軸線上之線捲將於一短時間內爲電刷所短接，惟所生之電勢甚微，故無大損害。

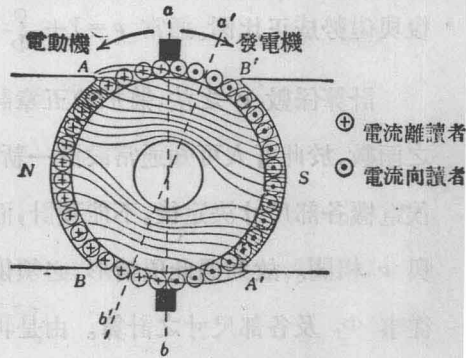


第 143 圖 磁場之分布

倘取銷場激，而以其他來源之電流供給電樞，則結果生一磁場，其



第 144 圖 樞流所生之磁場



第 145 圖 有載時磁場之分布

分布如 144 圖，而所生磁極即在電刷軸線上。大部分磁流因鐵心之磁阻較極間空隙為小，故皆集中於極靴一帶。

在有載時，樞流與場激同時存在，其總磁場之近似值可視為各分磁場（如 143 與 144 圖）所綜合而成。① 總磁場之形狀如 145 圖，此圖於發電機或電動機作用時皆相同。吾人注意用作發電機時，後極尖 A 及 A' 處之磁場加強，而前極尖 B 及 B' 處減弱。此無異以中軸線（凡在此軸上之線捲單位不切磁力線）由 ab 移至 $a'b'$ ，或即將磁流順轉動之方向變歪。在電動機時情形適相反，磁流變歪之方向適背於轉動之方向。

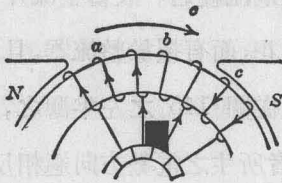
中軸線移置之結果，乃使電刷（設電刷仍在原軸 ab ）所短接之線捲單位上因割切磁力線而感生有效電勢。周路中短接線捲單位及電刷接觸之電阻，均為甚小，故此時將有大量之電流經過。故當整流片在電刷下轉動，而將此周路隔斷時，或致發生火花，而有損於整流器，且中軸線既移置，則電機不能發生全量之電勢，蓋從圖 145 之左半觀之，則串聯之 $Z/2$ 導線中，在 bb' 間者與 $b'a$ 間者所生之電勢方向適相反，故其總電勢為二者之差。上述種種，對於電機，均為不利。前者影響於整流器之壽命，且減低效率，而後者則使有用之出量減少。欲救濟此二種困難，惟有設法減少其磁場之畸斜或畸變（distortion），而使中軸線不致有明顯之移置。若此層未能做到，則可移動電刷，使近於中軸線或在中軸線上。但電刷移動時，電樞所生之磁場亦隨之而動，蓋此磁場之極軸乃

① 總磁場為各分磁場所合成之說，並不全確。實際上場捲與樞捲各生一定之磁勢，二者合成總磁勢而後生總磁場。如磁流與磁勢在任何一點均成正比例，則結果相同，否則上說實不能適用於通過鐵心之磁場，尤其在飽和磁化狀態之下。（參看下面第 14 節）。

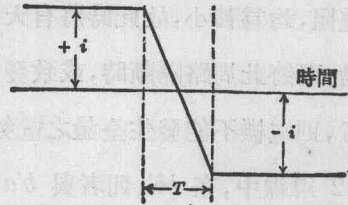
與電刷軸相重合。(圖 144)。

因電刷向中軸線移動，其結果使總磁場更加歪斜。然因磁流密度之增加，極尖 A 及 A' 處將生飽和作用，而磁場之歪斜可不顯，因此電刷可置於中軸線上，或竟可超過之。

4-7. 整流 本節中對於整流之現象，當作較詳之研究，以確定電刷位置如何纔適合於圓滿整流之條件。第 146 圖示發電機環形線捲中之 a, b, c 三單位。 a 單位將次第佔有 b 及 c 之地位，甚為明顯，且在 b 位置時，該單位中之電流，須自電刷左方各線捲中所有之值，逐漸變換至與右方各線捲中電流之值。左右兩方之電流，其大小相等，但其方向相反。此種變換，須經相當時間，而不能立即實現。理想上言之，電流



第 146 圖 整流時樞流之反向



第 147 圖 整流時理想之電流變更

須能在一單位經過電刷下所需之時間內(在此時間，此單位乃處於短路之位置，如 b 圈所示)，自始至終恰有均勻之變化，如 147 圖所示，圖中 $+i$ 與 $-i$ 為單位中最初與最後之電流值，而 T 為短路之時間，或稱整流時期。

但在整流時，線捲單位之自感作用，將使電流維持其原有之大小及方向。欲消滅此種傾向，必須有一反對方向之電勢，以平衡自感電勢。若電刷適置於中軸線上，則短路時不能感生電勢，以反抗此自感電勢，而

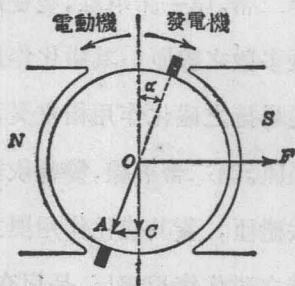
在 T 時間內電流之轉向，即不能得圓滿之結果。欲反抗此自感電勢，則所需電勢之方向，必與最後之電流方向相同，（如 146 圖 c 圈中之電流）。是故短路之線圈應超過中軸線而受隣極之影響，而於發電機中，短路線圈應順旋轉方向移過中軸線。

同理，電動機之電刷，亦須離中軸線而移置，但移置之方向與旋轉方向相反。於同一電機，用作發電機或電動機時，電刷之移置大約相同。但用作電動機時，其移置稍可較少。此因電樞每槽中常含有數線圈，依次整流，而大概以最後線圈整流之情形最為重要。如整流軸相同，發電機中最後之線圈與中軸線之距離較電動機中者為近，因此發電機之最後圈乃在較弱之磁場中，而此時電刷之移置應較大。但於電動機時，則反向之磁場將嫌過強，故宜將電刷稍移近中軸線。

電刷依旋轉方向而移置所成之角度（如於發電機時之情形）謂之前移角，依反旋轉方向移置所成之角度（如於電動機時之情形）謂之後移角。

4-8. 電樞反作用之組合成分 試想

像圖 144 電樞上之電刷，受外來定量電流之供給，而不激其主磁場。若以此刷前後移動，則電樞所發生之磁勢，將隨之而俱動，惟其值則始終不變。此可以一恆長度而位於刷軸線上之 OA 直線表之（見 148 圖）今如激其磁場，則磁勢之大小，可以 OF 表之。（樞捲與場捲中之電流，與 145 圖中所示者相同）。分 OA



第 148 圖 樞磁勢之組合成分

可以 OF 表之。（樞捲與場捲中之電流，與 145 圖中所示者相同）。分 OA

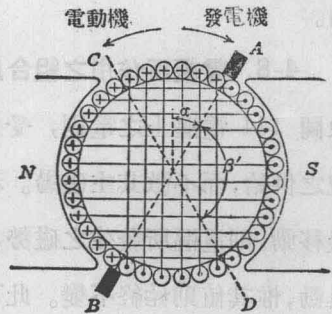
爲 OC 與 CA ，則可見電樞之磁化作用，乃等於交磁作用 OC 與去磁作用 CA 綜合而成。 OC 與主要磁勢 OF 相交，故曰交磁； CA 與主要磁勢 OF 相反，故曰去磁。去磁作用乃爲使整流良善而移置電刷所得之直接結果。

如發電機之電刷有後移角，由 148 圖可以明瞭此電樞能助磁化，因去磁成分 CA 已變爲磁化成分。同理，如電動機上有前移角，其作用亦同。惟二者之整流器均將有劇烈之火花。

設電刷之移置相反，而於整流無甚不利之處，則電樞反作用，或能用以自激其磁場。此理曾利用於火車上電矚用之盧森堡 (Rosenberg) 發電機中，但需特種設備以救濟整流之困難(參看第十一章)。

4-9. 交磁與去磁安匝數 分解圖 148 中電樞磁勢 OA 爲二成分並非準確之方法，蓋僅以性質而言，未曾論及數量。但從此直接得一結論，即如 149 圖之完全樞捲，可視爲兩帶導線所組成，在 AD 與 CB 中者爲第一帶，在 CA 與 BD 中者爲

第二帶。第一帶導線，雙雙依水平線組成多數之線匝，其磁化作用與主要激磁場捲之磁化作用相交叉，故謂之交磁匝。第二帶導線，雙雙依垂直線組成去磁匝，蓋其磁化作用與主要激磁場捲之磁化作用相反。是以在兩極機中，



第 149 圖 交磁及去磁導線帶

每雙極之去磁匝數，等於在雙移角 2α 中之電樞導線數；而其每雙極之去磁安匝數 AT_d 等於 2α 角中之電樞導線數乘以每導線中之電流。

$$\therefore AT_a = \frac{2 a Z}{360} \cdot \frac{i_a}{2} = \frac{a Z i_a}{360} \dots\dots\dots(10)$$

同樣交磁安匝數為

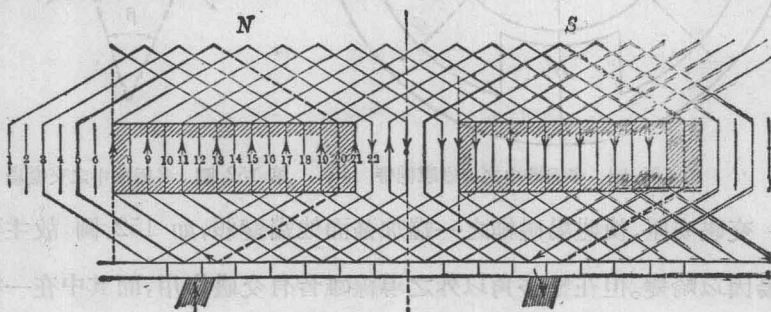
$$AT_c = \frac{\beta' Z}{360} \cdot \frac{i_a}{2} = \frac{\beta' Z i_a}{720} \dots\dots\dots(11)$$

其中 $\beta' = 180^\circ - 2\alpha$

吾人應注意去磁匝實為電樞交磁作用之結果，此關係甚為重要。如電刷原在幾何中軸線上，則電樞之磁化作用，均與主磁場直交而成一畸變之總磁場，今為改善整流而將電刷移近中軸線，則去磁匝亦即隨之而生。

4-10. 多極機中之交磁與去磁作用 以上研究兩極機時，係假定電樞為環形，故其刷軸與整流軸互相重合而無差別。但於摺捲與波捲中，當短路圈邊在中軸線時，其端接線之形式乃使電刷適正對各磁極之中央。

以兩極機中之原理推廣之，凡在雙移角內之導線，對於磁場皆有去磁作用，而其餘之導線，則發生交磁作用。此結論對於環捲，摺捲及波捲而有整節距者，皆甚準確。惟在短弦線捲中，兩極間一部分導線之電流

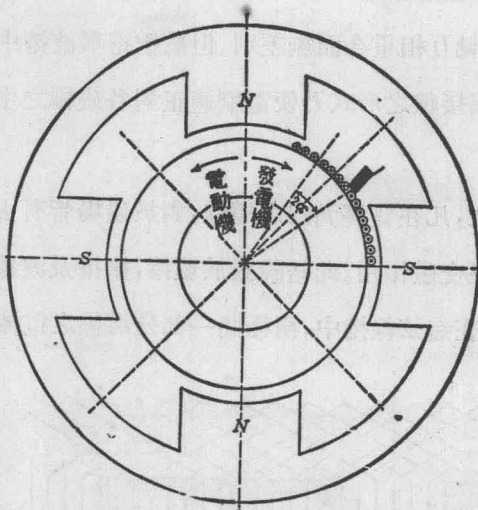


第 150 圖 短節距與去磁作用之減少

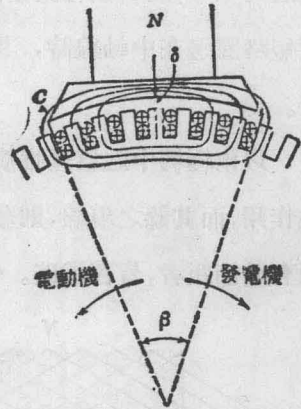
方向與他部相反，故去磁作用之一部，將彼此中和。例如，設有四極單重摺捲電機，導線數為 80；即 $p=4, a=4, Z=80, m=1$ 。令 $y_1=15, y_2=-13$ 。第 150 圖中示此線捲之一部，其磁極間各線電流之方向相間變換，甚易尋見。

短弦捲之特種情形姑置不論，每雙極之去磁安匝數可決定如下：
 (參看圖 151)。在去磁帶中之總導線數為 $\frac{Z}{360} \cdot 2a \cdot p$ ，故每雙極之去磁安匝數為

$$AT_d = \frac{1}{2} \cdot \frac{Z}{360} \cdot \frac{2ap}{p/2} \cdot \frac{i_a}{a} = \frac{aZi_a}{180a} \quad (12)$$



第 151 圖 多極機中之去磁導線帶



第 152 圖 多極機中之交磁場

交磁安匝，使磁場磁極之一端加強而他端變弱，如 152 圖，故主要磁場因以畸變。但在雙移角以外之導線雖皆有交磁作用，而其中在一極面所張之 β 角以外之導線，因磁周路大部分為空氣，磁阻甚大，故所

生之磁流甚小，可以不計。故吾人不妨專注意於磁極下之 $\frac{\beta Z}{360}$ 導線。此

等導線之磁勢為 $\frac{4\pi}{10} \frac{\beta Z}{360} \frac{i_a}{a}$ 吉 (gilbert)，其磁周路 C 磁阻之大部

分乃為二氣隙及二齒。設齒槽所消耗之磁勢為 $\frac{4\pi}{10} (2 AT_i)$ 吉，則其餘

之 $\frac{4\pi}{10} \left[\frac{\beta Z}{360} \frac{i_a}{a} - 2 AT_i \right]$ 將生一交磁場，其極尖處之強度為

$$B_c = \frac{4\pi}{10} \left[\frac{\beta Z}{360} \frac{i_a}{a} - 2 AT_i \right] \frac{1}{2\delta'} \quad (13)$$

其中 δ' 為氣隙之校正長度，對於槽之效用，已經校正。 $(\delta'$ 之計算法，詳見第五章)。

是故磁極尖端之總密度為

$$(B_g - B_c) \text{ 在 } \left\{ \begin{array}{l} \text{發電機} \\ \text{電動機} \end{array} \right\} \text{ 之 } \left\{ \begin{array}{l} \text{前} \\ \text{後} \end{array} \right\} \text{ 極尖}$$

$$(B_g + B_c) \text{ 在 } \left\{ \begin{array}{l} \text{發電機} \\ \text{電動機} \end{array} \right\} \text{ 之 } \left\{ \begin{array}{l} \text{後} \\ \text{前} \end{array} \right\} \text{ 極尖}$$

整流既於弱極尖發生，且整流磁場之方向必須與原有之磁場 B_g 同，故欲使短路線圈中感生一相當方向之電勢，以平衡自感電勢， B_c 必須小於 B_g ，即 $B_c < B_g$ 。

通常 $B_g - B_c = 2000$ 至 3000 (以每方呎之磁力線數計)， B_g 大約在 6000 至 $10,000$ 間，故

$$B_g = (1.25 \text{ 至 } 2) B_c$$

以此值代入(13)式中，遷項後，得

$$\delta' = \frac{(1.25 \text{ 至 } 2) \left[\frac{\beta Z i_a}{360 a} - 2 AT_t \right]}{1.6 B_g} \quad (14)$$

由此可以計算氣隙之適當長度，以便阻止整流處極尖之磁場轉向。如隙距 δ 已定，則此公式可以定極尖處削角(chamfer)之程度。

上式更可表示一關係，作為一完善電機之標準。設將 AT_t 略去，吾人可得

$$(1.25 \text{ 至 } 2) \frac{\beta Z i_a}{360 a} = 1.6 B_g \delta' = 2 AT_g \quad (15)$$

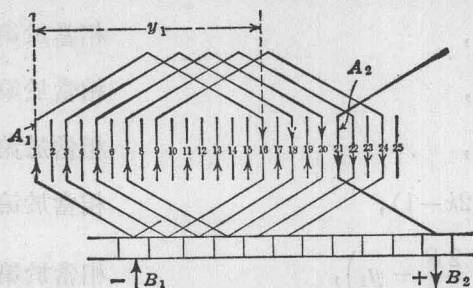
或
$$\frac{\beta Z i_a}{360 a} = (1.0 \text{ 至 } 1.6) AT_g \quad (16)$$

但 $\beta = \frac{360 \Psi}{p}$ ，其中 Ψ 為極弧對於極節距之比值，通常直流機中此比值約為 0.7；而 $\frac{Z}{2} \cdot \frac{i_a}{a}$ 為電樞安匝之總數。再者， AT_g 約為每極場捲安匝數之 0.7 至 0.9。將此種關係代入上式，則得

$$\text{每極電樞安匝數} \approx 1.1 \times \text{每極場捲安匝數} \quad (17)$$

式中因數 1.1 為最高限度，實際上多不用；通常約自 0.8 至 0.9。此種關係在初設計電機時甚為有用，可以決定電樞對於磁場之磁化性是否過甚。但吾人應注意(17)式之求得乃假定電機中並無附帶機件改善整流。設有此種附帶設備(例如整流磁極或補償線捲，詳見第九章)，則電樞之磁化性當可較(17)所規定之限度超過甚多。

4-11. 反安匝去磁作用之改正式 (a) 摺捲 第 153 圖為短弦摺捲一部分之展開形，圖中所示距離約較極距略大。從此可見中性帶線圈之電



第 153 圖 短節距摺捲

流方向並非皆同，而 $AT_a = \frac{aZi_a}{180a}$ 之值因以減少。其減少值為何，今將試求之。

(1) 如線捲為全節距，則在 A_2 左方之 $\frac{2\delta}{p}$ 圈邊，將有同方向之電流，如圖中直上方向所示。

(2) 弦捲之弦，雖可使甚短，但鄰近 A_2 右方●之圈邊（連 A_2 在內）中之電流方向必相同，如圖中直下方向所示。故反向之電流皆在 A_2 左方之一帶中，其範圍視 y_1 與極距之差而定。同樣，與 A_1 及 A_2 相似而連接於電刷所接觸之整流片上之各圈邊，其左方均將有方向互變之電流。

如以圈邊 A_1 為 1，則有反向電流之第一圈邊數為 (y_1+1) ，第二圈邊數為 (y_1+3) ，餘類推，而其最後圈邊數 n 必為 $\frac{2S}{p} = y_1 + \left(\frac{2S}{p} - y_1 \right)$ 。綜其結果：

① 第 153 圖之線捲係右手向，即 $y_1 > y_2$ ，故用「右」字；倘線捲係左手向，或即 $y_1 < y_2$ ，則「右」字應改為「左」字。

$y_1+1,$	相當於第一圈邊,
$y_1+3,$	相當於第二圈邊,
$y_1+5,$	相當於第三圈邊,
$y_1+(2k-1),$	相當於第 k 圈邊,
$y_1+\left(\frac{2S}{p}-y_1\right),$	相當於第 n 圈邊.

換言之,此中反向電流之圈邊共有 n 束,其中

$$2n-1 = \frac{2S}{p} - y_1$$

或
$$n = \frac{1}{2} \left(\frac{2S}{p} - y_1 + 1 \right) \quad (18)$$

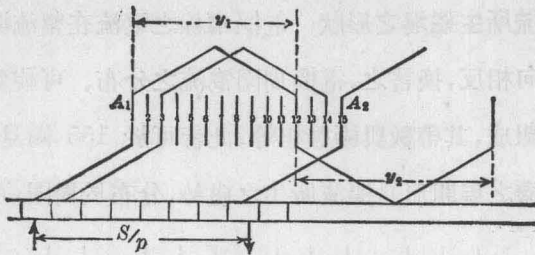
此 n 圈邊中每圈邊之電流,既與正確之方向相反,故必與 n 束有正方向之去磁作用相消,而總共減低之值為 $2n$ 束。每一線捲單位既有 $\frac{Z}{2S}$ 匝,故 AT_d 較計算所得之值應小

$$\frac{Z}{2S} \cdot \frac{i_a}{a} \left(\frac{2S}{p} - y_1 + 1 \right) \text{安匝} \quad (19)$$

然若弦捲超過一定限度,而使反向電流之 n 圈邊超於雙移角以外,則上述之改正不確。然實際上此種極端之弦多不用之,故此改正式仍可安然應用。所應注意者,即於 AT_d 及弦捲改正式計算中,電刷整流時短路之圈邊數均未顧及。

(b) 波捲(第 154 圖) 如 y_1 為樞捲之後節距(在滑輪端),而 y_2 為前節距(在整流器端),則

$$y = \frac{y_1 + y_2}{2} = \frac{2S + a}{p}$$



第 154 圖 短節距波捲

a 為正號，表示此線捲係右手向。如 y_1 較極距為短，則 $y_2 > y_1$ ，而其所差之長度可用以量『弦』之程度。全節捲中，與電刷相接觸之圈邊（如 154 圖中 A_1, A_2 ）之兩邊電流方向相反，但每邊之電流方向則為一致。

在弦捲中，有反向電流之第一圈邊為 $y_1 + 1$ ，第二為 $y_1 + 3$ ，餘類推。如有 n 圈邊，則 $y + (2n - 1)$ 為第 n 圈邊數， y_1 既必為單數，故各圈邊數均為雙數。每極節距間之圈邊數 $\frac{2S}{p} = y - \frac{a}{p}$ 為一混分數，但可作為等於 y 。如 y 為單數，則可用最末雙數 $y - 1$ 而得

$$y - 1 = y_1 + (2n - 1)$$

或

$$2n = \frac{y_2 - y_1}{2} \tag{20}$$

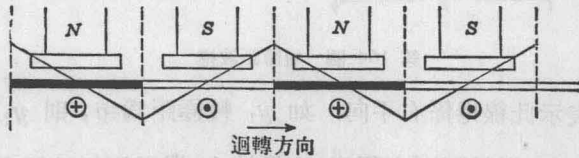
如 y 為雙數，則

$$\begin{aligned} y &= y_1 + (2n - 1) \\ 2n &= \frac{y_2 - y_1}{2} + 1 \end{aligned} \tag{21}$$

是以應從 AT_d 公式中減少之安匝數為

$$\left. \begin{aligned} \frac{Z}{2S} \frac{i_a}{a} \left(\frac{y_2 - y_1}{2} \right), & \text{ 如 } y \text{ 為單數} \\ \frac{Z}{2S} \frac{i_a}{a} \left(\frac{y_2 - y_1}{2} + 1 \right), & \text{ 如 } y \text{ 為雙數} \end{aligned} \right\} \tag{22}$$

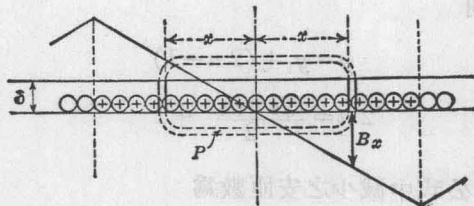
4-12. 樞流所生磁場之形狀 電樞導線之電流在整流圈之一邊者，與其他一邊方向相反，換言之，電樞周圍電流之分布，可視為由許多交向之電流帶所組成，其帶數與極數相等，此皆可於 155 圖見之。（圖中示一 4 極發電機之展開形）。樞流所生之磁勢，分布於周圍，可以斷折線



第 155 圖 樞磁勢之周圍分布

之縱坐標表之，此磁勢在電流易向之處為最大，在中間為零。如極靴完全環繞電樞，而樞面光滑，則在任何點之樞磁流，皆與磁勢成正比例。蓋因在此情形下，氣隙四周之磁阻均為相等。（磁流在鐵中之磁阻與在空氣中之磁阻相較為甚小，可以不計。

如圖 156 所示，磁流管 P 所圍繞之導線數為 $\frac{Z}{\pi d} 2x$ ，其中 d 為電樞之直徑。如 i_a 為總樞流，而每導線載有 $\frac{i_a}{a}$ 安，則作用於 P 之磁



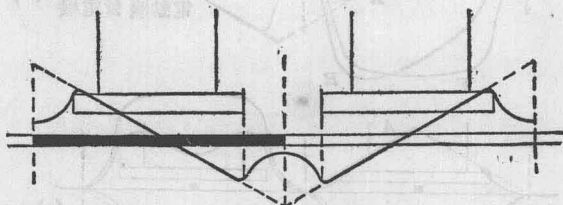
第 156 圖 樞磁流之計算

勢為 $\frac{4\pi}{10} \frac{Z}{\pi d} \frac{i_a}{a} \cdot 2x = \frac{4\pi}{10} q \cdot 2x$ ，其中 $q = \frac{Z}{\pi d} \cdot \frac{i_a}{a}$ 為每單位周圍

長度之安倍導線數。依此，距離極中心 x 處之磁流密度乃為

$$B_x = \frac{\frac{4\pi}{10} q \cdot 2x}{2\delta} = \frac{xq}{0.8\delta} \quad (23)$$

通常極靴間有相當之空隔部分，故磁流之分布，將異於磁勢之分布，在極靴之下，因磁阻相同，其分布與磁勢約同，但在極尖間之磁流，則因所增加之磁阻，較磁勢之增加為速，故極間電樞之磁流密度反而變小，如 157 圖所示。



第 157 圖 電樞磁流之分布

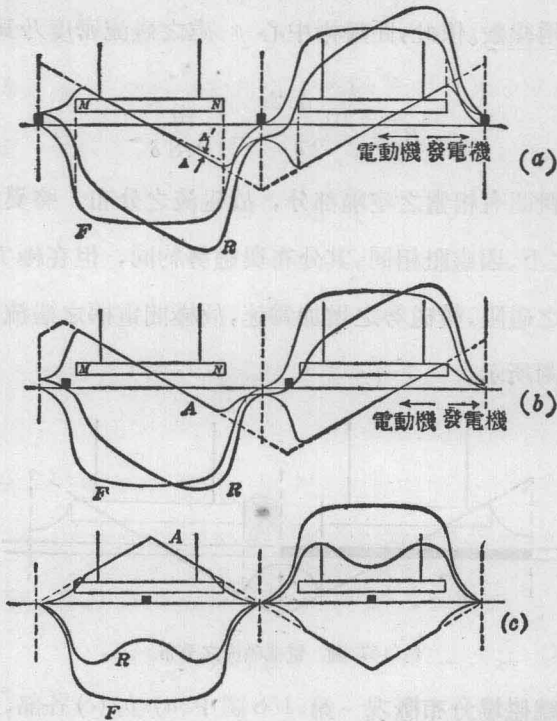
4-13. 總磁場分布概況 第 158 圖中 (a) (b) (c) 各部，表示三種不同電刷位置時樞磁場對於總磁場之大小與分布之影響。圖中 F 為場激發生之磁流分布，曲線 A 為電樞發生之磁流曲線，而 R 為 F 與 A 之總合曲線。各圖表示之整流情形如下。

(a) 電刷在極尖中間。

(b) 電刷在極尖間——但近於前端尖。

(c) 電刷在磁極中心之下。

在 (a) 之情形，總磁場之畸斜甚為明顯。但 A 與 F 相對稱，可見用作發電機時，後極尖所增加之磁流，適等於前極尖所減少之磁流，故每極之總磁流不變。在 (b) 之情形，除畸斜外，更有一去磁作用，蓋在磁



第 158 圖 電刷在各種位置時之總磁流分布

極下之磁流 A ，對於主磁流增少減多，圖中表示甚明。在 (c) 情形中，並無畸斜，而祇有去磁作用，蓋電刷移至磁極下時，所有交磁安匝皆被消滅，而去磁安匝則增至最大。

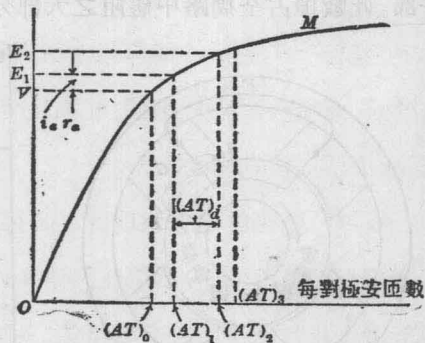
4-14. 交磁化之去磁成分 上節所論總磁場之形狀係根據理論而定，即謂 R 係由 (一) 場捲磁勢單獨作用所發生之磁場，及 (二) 電樞磁勢單獨作用所發生之磁場所組成。實際上此理論並不絕對準確。設有一生鐵桿同時受壓力與張力，且假定此二力相等，如使此力單獨作用，而張力超過彈性限度，則因張力之引長度，必較大於壓力之縮短度，故結果

必致引長。但吾人確知如此二力相等，則其合力與長度之伸縮皆等於零。由此可知前法之分析實有未合。以此譬喻磁路，則磁勢等於力，磁流等於長度之伸縮。故唯一正確之方法，必先合數磁勢為一總磁勢，然後由總磁勢而決定總磁流之大小與分布。

由以上之討論，再參照 158 圖(a)與(b)，可知在極靴 N 邊因磁勢加大而增加之磁流總數，必不能與在 M 邊因磁勢減小而減少之磁流總數相等——此因磁化力增加時，極靴與樞齒上鐵之磁導係數減少之故。是以雖在兩極中間整流之時，（即電刷位於中軸線上毫無去磁安匝時），仍有因交磁安匝而生之去磁作用。在平常時，此作用雖不甚明顯，但仍應計及。此作用之普通性質見 158 圖(a)，其中斷折線 A' 表示在 N 極一邊因 A 而增加之磁勢，與 A 約成比例而略小。關於此交磁作用之去磁成分，其數量之分析，當於下節更詳論之。

4-15. 有載狀況時所需之磁激 令 159 圖中之 OM 表示一發電機

之飽和曲線，並令 OV 為額定負載時之端電壓，則在發生零載電勢時每對磁極所需之磁激為 $(AT)_0$ 安匝。當電樞輸出電流供給負載時，欲求維持端電壓不變，則磁激必較 $(AT)_0$ 稍大，以抵償(a)電樞中 $i_a r_a$ 之位落，(b)電樞反安匝之去磁作用，及(c)電樞交磁安匝之去磁成分。



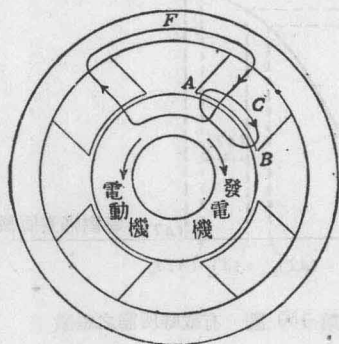
第 159 圖 有載時所需之磁激

(a) 在有載狀況時，如欲使端電壓與零載時相等，則所生電勢 E 必較 V 大 $i_a r_a$ 。此 r_a 為樞阻，故 E_1 所需之磁激為 $(AT)_1$ ，如 159 圖所示。

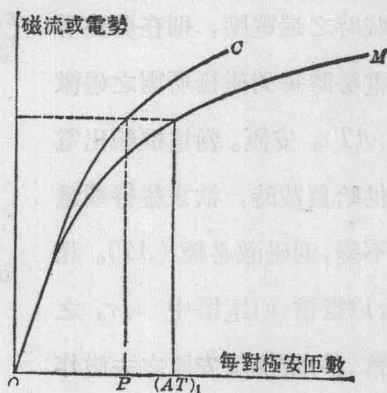
(b) 如電樞每對磁極之去磁安匝數為 $(AT)_a$ ，則場激必須更加 $(AT)_a$ 於 $(AT)_1$ ，使等於 $(AT)_2$ ，以發生 E_2 伏之斷路電勢。（在必要時應注意弦捲作用，而將 $(AT)_a$ 之值校正）。

(c) 因極尖之飽和作用，故一端減少之磁流，較他端增加之磁流為多。欲求維持有載時之端電壓與零載時相等，此場激必須更由 $(AT)_2$ 增至 $(AT)_3$ ，如圖 159 所示。欲決定此增加數，吾人應注意下列諸事實：

極面下導線發生之交磁場，使極之一端去磁，他端磁化。此交磁流之路線，乃如圖 160 中 C 線所示。依此路線作用之交磁安匝數為 $\frac{\beta Z}{360} \cdot \frac{i_a}{a}$ ，半以抵消極尖 A 之主磁激 F ，而另一半則加強極尖 B 之主磁激。磁路 C 與 F 公有之磁阻為雙氣隙，兩組齒，兩極靴，及樞心之一部。此數種占全周路中磁阻之大部分。如不計 C 與 F 間磁阻之差，

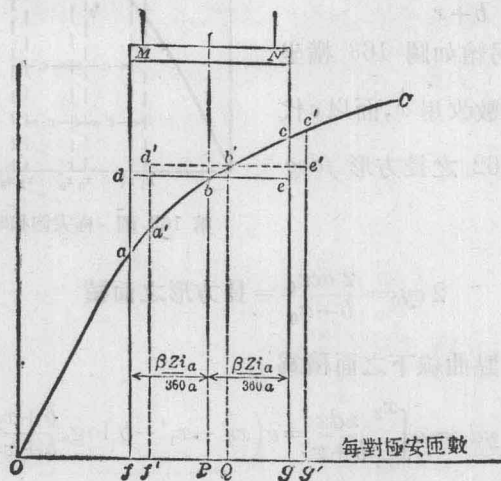


第 160 圖 主磁場與交磁場之途徑



第 161 圖 磁化曲線

則定值磁勢作用於磁路 C 與 F 時，將發生相等之磁流。在此情形，磁勢與磁流之關係，可以磁化曲線表明之。但實際上，160 圖周路 C 中磁流與磁勢之關係，應如 161 圖中磁化曲線 M 左方之 C 曲線。此曲線之縱坐標為磁流(或在該磁流中旋轉所發生之電勢)，橫坐標為磁流通過 C 路中(160 圖)之雙氣隙，兩組齒，及低阻之兩極靴與樞心所需之安匝數。在同一磁流時， C (161 圖)之橫坐標較 M 者為小，蓋周路 F 之磁阻，實較 C 路為大。前第 141 圖中，曾示相當於雙氣隙，兩組齒，雙極靴，及樞心之曲線。其各橫坐標之和即得第 161 圖 C 曲線。在圖 161 中，橫坐標 $(AT)_1$ 為發生電勢 E_1 所需每對磁極之安匝數(如 159 圖)， OP 為在 C 路中發生同樣磁流所需之安匝數(160 圖)。此種情形，可於 162 圖另行說明之。當電樞發出電流 i_a 時，電刷如在中軸線上，則 MN 極面中部之磁激不受交磁作用之影響。但 M 端之磁化作用減少



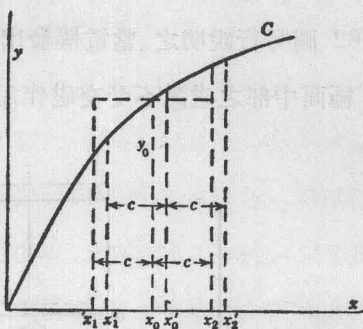
第 162 圖 極尖飽和時之去磁作用

bd 安匝，而 N 端則增加 be 安匝 ($bd = be = \frac{\beta Z}{360} \cdot \frac{i_a}{a}$)。故在 M 端氣隙中之磁流密度與曲線上 a 點之縱坐標成正比例，而在 N 端之密度，則與 c 點之縱坐標成正比例。其他各點之磁流密度，亦各與其相當之縱坐標成比例。由此可知每極之總磁流數實與 a 至 c 點曲線下之面積成正比例。此磁流數較不畸斜磁流數為少，其減少之程度乃依 $fabeg$ 與 $fdbeg$ 面積之比而定。若欲每極之總磁流不減，則磁激必須增加 PQ 使 a' 至 c' 點曲線下之面積，適與 $fddeg$ 長方形之面積相等。此處磁激 PQ 即 159 圖中總磁激 $(AT)_3$ 與 $(AT)_2$ 之差數。

如圖 162 中 C 曲線之算式已知，則磁激之增加數 PQ 可以計算而得。此種算式，在該曲線相當限度之中，約可用弗羅里氏方程式

$$y = \frac{ax}{b+x}$$

今以圖 162 另繪如圖 163 橫坐標每對極安匝數改用 x ，而以 c 代 $\frac{\beta Zi_a}{360 a}$ 。圖 162 之長方形 $fddeg$ 亦即改爲



第 163 圖 極尖飽和時之去磁作用

$$2cy_0 = \frac{2acx_0}{b+x_0} = \text{長方形之面積} \quad (24)$$

而 x_1' 至 x_2' 點曲線下之面積爲

$$\int_{x_1'}^{x_2'} y dx = a \int_{x_1'}^{x_2'} \frac{x dx}{b+x} = a \left(x_2' - x_1' - b \log_e \frac{b+x_2'}{b+x_1'} \right) \quad (25)$$

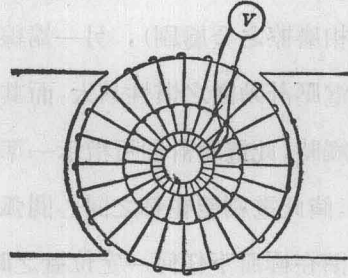
將 (24) 與 (25) 式相等，代入 $x_2' - x_1' = 2c$ ，則得

$$\log_e \frac{b+x_0'+c}{b+x_0'-c} = \frac{2c}{b+x_0} \quad (26)$$

圖 162 中所增之磁激 PQ ，乃等於 $x_0'-x_0$ ，其中 x_0 相當於圖 159 中之磁激 $(AT)_0$ 。(26) 式中 c 及 b 既皆為已知數，則 x_0' 即可計算，因此可得 $(x_0'-x_0)$ 。

4-16. 磁流分布之實驗決定法 電樞導線所發生電勢之瞬值，既與該時該地磁流密度之徑向成分成正比例，(參看第二章第二節)，故量得各點之電勢後，即可計算其磁流分布。

設有一簡單之環捲電樞(164 圖)，上具多數之整流片，樞上每線捲單位之匝數，均假定其集中於一徑向平面上；換言之，即每單位設有若干匝，則各匝均同時位於同一強度之磁場中。今取一狹條之韌性紙，其長等於整流器之周圍，而於紙上沿軸鑿一系列細孔，使其空間恰與整流片距相等。首以此紙條捲於整流器而與電刷柱釘 (stud) 相繫，務使整流器能在內自由旋轉，而無緊束之



第 164 圖 雙指引刷

弊。再用一低壓電壓計，上接二引線，而於引線之他端，各以適當硬度鉛筆為接觸點。如將此兩接觸點插入紙條上隣近之二孔中，則電壓計所讀之伏數適為該處單位所發生之電勢，減去因電流發生之電阻位落 ir (假定機器在有載狀態下)。

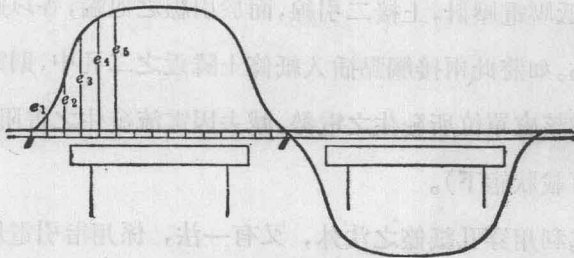
除上述利用穿孔紙條之法外，又有一法，係用指引電刷 (pilot brush)。該刷係以兩片黃銅旋於一木塊或硬橡皮之兩面，其厚度以能

將黃銅片分開之距離恰等於整流片為度。

此種裝置，在單重摺捲或單重波捲均相同（假設線捲單位為全節距）。然在單重波捲時，電壓計所量者為 $\frac{p}{2}$ 單位相串聯之值，而非僅由於一單位。又如線捲為雙重式或三重式，則接觸點之距離，必須等於兩片或三片之整流片距。普通言之，若線捲為 m 重，則接觸點應相隔 m 整流片之距離。

如上所述，當發電機負載電流時，電壓計所示之伏數，必較線捲單位中發生之電勢少去 ir 。欲改正此結果，可用一全節距之試探圈繞於電樞上，一端由軸上通地，他端接於軸端之絕緣釘上。然後以電壓計（達生瓦 D'Arsonval 式）之一端線，接於此發電機之外架，（最好接於與軸相磨擦之金屬刷），另一端線接於與絕緣柱釘每轉接觸一次之電刷。如電壓計動圈之慣性甚大，而其振動易於抑止者，則當電刷與旋轉柱釘接觸時，此電壓計即可指示一準確之伏數，與試探圈中發生之電勢成比例。倘此電刷能在軸之同心圓弧上自由移動，則接觸時間可使適合於試探圈在極面下任何一定位置之時。

4-17. 電位曲線 在 165 圖中， e_1, e_2, e_3 ，等表示個別線圈中所發

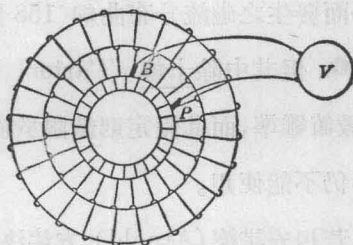


第 165 圖 每單位之電壓變更

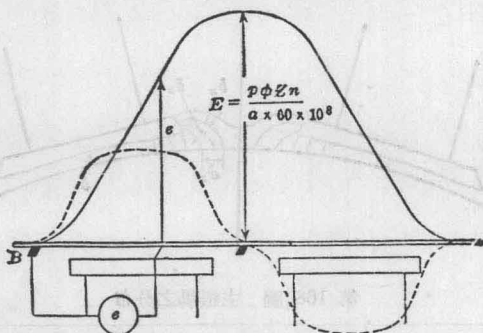
生之電勢。故

$$e_1 + e_2 + e_3 + \dots + e_n$$

等於電壓計所示之伏數。此電壓計之一端接於主電刷 B ，而他端則接於一單極指引刷，指引刷與主電刷中間之角度，即等於 n 圈數之張距 (spread)。如將此指引刷 P (第 166 圖) 在整流器圓周上移動，而同時測量各點之伏數，(如有電流則位落應加改正)，結果即



第 166 圖 電位曲線之測定法



第 167 圖 每單位之電壓與電位曲線

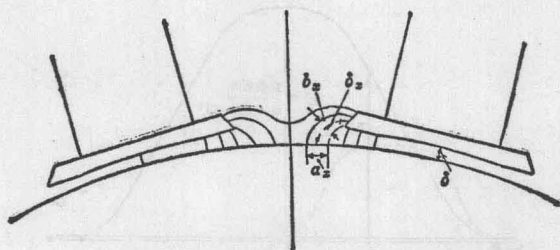
可得一電位曲線，如 167 圖實線所示。

此曲線上之任一縱坐標 e ，既為 e 點左方虛線曲線上(與 165 圖同) 諸縱坐標之和，故如線捲分成多數單位時，此代表電位曲線之函數之一次導微，即可以代表磁流分布之曲線。換言之，電位曲線上各點之斜度，即與相當各點之電勢成正比例。

4-18. 氣隙中磁流分布之預定法 氣隙中磁流，因樞流之磁性反

作用而變化，其關係至為重要，因其與整流特性，有極顯著之影響。此點在 4-7 節中已約略解釋，而於第八章中當更詳論之。故欲設計一電機，必先預定因場激而發生之磁流分布曲線(158 圖中之曲線 F)，及因電樞磁勢而發生之磁流分布曲線(158 圖之 A)。此種曲線之決定方法，已有數種^①，但其中除卡特 (Carter) 之方法外，皆屬近似值。然卡氏之方法，數值雖準，而其假定則僅限於極簡單形狀之極心及極面，故在實際情形仍不能使用。

若用安諾德 (Arnold) 方法決定磁流分布之曲線，須先畫出氣隙及極間磁力線之途徑，如 168 圖所示。此法之精確程度，須視實驗者之判



第 168 圖 主磁場之分布

① Goldsborough, W. E., Trans. A. I. E. E., 第 15 卷第 515 頁, 第 16 卷第 461 頁, 第 17 卷第 679 頁。

Thompson, S. P., "Dynamo Electric Machinery," 第 2 卷第 206 頁 (七版)。

Carter, F. W., Electrical World, 第 38 卷第 884 頁(1901)。

Arnold, E., "Die Gleichstrommaschine," 第 1 卷第 320 頁(二版)。

Lehmann, T., Elektrotechnische Zeitschrift, 第 30 卷第 996 頁及 1019 頁 (1909)。

Lamme, B. G., Trans. A. I. E. E., 第 30 卷第 3 部第 2362 頁(1911)。

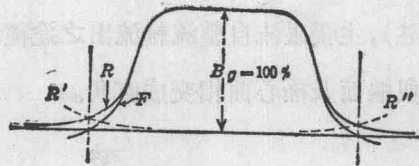
Moore, C. R., Trans. A. I. E. E., 第 31 卷第 1 部第 509 頁(1912)。

Carter, F. W., Jour. Inst. Elec. Engr., 第 64 卷第 1115 頁(1926)。

決力而定。但據經驗所得。可知磁力線皆垂直於極面與電樞之表面（即其出入磁鐵周路處），而磁流之分布，實有使周路總磁阻值變為最小之趨勢。換言之，即在極面與樞面間有一定之磁勢時，其趨向恆使其中之磁流數為最大。故如一再試驗，則所得磁流數最大者，即為比較最正確之作圖。在磁極中部之下，氣隙距(δ)極為均勻，故磁流密度(B_g)亦甚均勻，且與 δ 成反比例。在其他部分，若任取一點，其磁力管長度為 δ_x ，平均闊面為 b_x ，(沿鐵心取一單位長度)，則其磁導必為 $\frac{b_x}{\delta_x}$ ，而在樞面上之磁流密度為

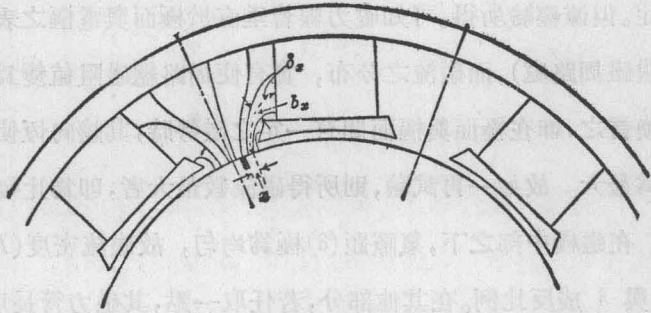
$$B_x = \frac{\text{磁勢}}{a_x} \cdot \frac{b_x}{\delta_x} = B_g \frac{\delta}{\delta_x} \cdot \frac{b_x}{a_x} \quad (27)$$

如以 B_g 為百分之 100，則 B_x 之值，即可從 δ_x ， b_x 與 a_x 之值求出。再沿電樞之展開面上畫圖，即可得如 169 圖之 R 曲線，至於曲線 R' 與 R'' ，則代表相鄰二極（異極性）曲線之一部分， R ， R' 與 R'' 相加，則得總曲線 F 。將 F 曲線每週環之面積乘以 l （樞心改正後之長度），則得 Φ 值。

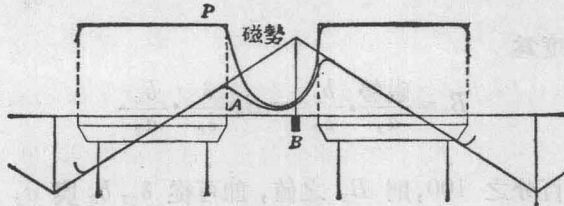


第 169 圖 磁流分布

決定因電樞磁勢而發生之磁流分布曲線(158 圖 A)，實較決定場磁流曲線為難，但亦可應用同一之方法。第 170 圖示由電樞放出磁力線之途徑。離電刷 x 距離之處，每單位軸向深度磁力管之磁導，等於 b_x/δ_x 。倘將周圍各點磁導分布狀況畫出，(如 171 圖之 P 曲線)，更以 P 之縱坐標乘樞磁勢曲線上之相當縱坐標，即得樞磁流曲線 (A)。



第 170 圖 樞電流所生之磁力線



第 171 圖 樞磁勢所生之磁流分布

樞磁勢發生之磁場，對於整流軸 B 最有影響，蘭姆氏嘗發表論文（見前註），主張磁流自整流軸流出之途徑為一圓弧，展長至於極心之中點，而與樞面及極心面相交成直角。

習 題

習題 4-1. 一發電機之磁化曲線，可以下列各值代表之：

每極磁流(以 10^6 線數計)	每對極安匝數	雙氣隙安匝數	兩組齒安匝數
4.82	3,910	3,570	13
7.30	6,050	5,350	50
9.70	8,535	7,130	226
12.20	12,670	9,000	1,290
13.30	16,320	9,850	2,880
14.60	21,860	10,800	5,540
15.80	28,470	11,700	7,700

假定此磁化曲線可代以弗羅里方程式，試求 $\Phi = \frac{a \times AT}{b + AT}$ 式中之 a 與 b 。(解題時可將方程式改寫為 $b + AT = a \frac{AT}{\Phi}$ ，而以 AT 與 AT/Φ 各值作圖。如 Φ 值甚小時所得之坐標與直線不符，可以不必顧及。)

習題 4-2. 上題所述電機，設為 12 極，550 伏，550 瓩，100 轉/分發電機。其樞捲有 1242 導線，作三重波捲，分置 207 槽，而整流片數為 621。試繪額定速度時之飽和曲線。

習題 4-3. 上述電機，如其電刷移至一處，距幾何中軸線為二整流片，而其樞流相當於滿載之值，問每對極之去磁安匝數為何？

習題 4-4. 第 1,2 題所述發電機之電樞直徑為 94.5 吋，而磁極占有樞周 70%。氣隙為 0.205 吋。當樞流為滿載值而每極磁流為 13.3×10^6 線時，試計算因電樞交磁場而在極尖所生之磁場強度。

習題 4-5. 試計上題所述交磁之去磁作用。

習題 4-6. 如上述機在無載時運用，而每對極之磁激為 16,320 安匝。試問鄰近整流片(約在兩電刷中間者)之電位差為若干？如場磁流不變，而樞流為滿載值，問電位差又為若干？(樞阻為 0.016 歐)。

習題 4-7. 以上各題中所述電機之分激場捲，每極凡 1060 匝。零載時之分激電流，適足感生 550 伏之電勢。試計算分捲之電感，及磁場之蓄能。(磁漏可不計)。

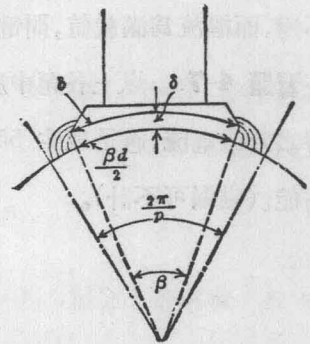
第五章 磁化曲線及漏磁之預計法

5-1. 總論 磁化曲線對於電機（無論發電機或電動機）運用特性之重要，前於第四章已曾注意及之，但其影響之全部重要性，必待下面第六章及第七章討論發電機及電動機說明如何可從磁化曲線及主要線捲數據而預知其特性曲線時，方可明顯。設計製造者對於各部比例自宜求其適當，俾合於運用之條件，故應詳知磁化曲線之計算方法。即運用電機者，亦應略知設計情形，俾於指定機器說明時，不致開列彼此衝突之條件。

5-2. 氣隙所需之安匝數 磁鐵之磁導係數，較空氣之磁導係數甚大，故氣隙磁阻約占磁路全部百分之七十至九十，而確定氣隙內所需之磁激遂為一重要問題。

實用上電樞約可分為二種：(a) 光心電樞 (smooth core armature)；(b) 有槽電樞 (slotted armature)。今分別討論之如下：

(a) 光心電樞 在 p 極電機內極距所占之角度為 $\frac{2\pi}{p}$ ，而極靴所占之 β 角恆在 $\frac{2\pi}{p}$ 之 0.55 及 0.7 間。 $\frac{\beta \times 100}{2\pi/p}$ 可稱為「極抱」(polar embrace) 之百分數。若磁流依徑向通過氣隙，則 B_g 與 AT_g 之決定，當甚簡



第 172 圖 極尖磁流之邊緣作用

單；然磁流恆擴張於極端之外，有時且擴張及於側部，如 172 及 173 圖所示。總之，磁流分布之原則，乃在使總磁阻為最小。

磁流之擴張乃等於將 b 增至 b' 值， l 增至 l' 值。故氣隙間平均磁流密度為

$$B_g = \frac{\phi}{b'l'} \quad (1)$$

但因在空氣中 $B=H$ ，故

$$AT_g = 0.8 B_g \delta \quad (2)$$

所有尺寸均以呎計算。若用英吋為單位，則

$$AT_g = 0.8 \frac{B_g''}{(2.54)^2} (\delta'' \times 2.54) = 0.3133 B_g'' \delta'' \quad (3)$$

就實際言，如以 β 角在電樞上所射弧再加 4δ 而與極弧 b 相平均，作為 b' 值，已甚準確。即

$$b' = \frac{1}{2} \left[b + \left(\frac{\beta d}{2} + 4\delta \right) \right] = \frac{\beta}{2} (d + \delta) + 2\delta \quad (4)$$

同樣，若極靴及樞心軸長（兩端間）相同，則 l' 可作為

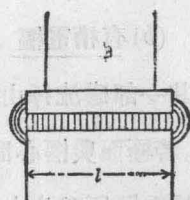
$$l' = l + 2\delta \quad (5)$$

若其長不等，則以 l_1 及 l_2 分別表之；如是 B_g 方程式內所用 $b'l'$ 之值應代以 A_g 面積，即

$$A_g = \frac{A_g' + A_g''}{2} \quad (6)$$

其中 A_g' 為極靴之面積， A_g'' 為樞心通過磁流處之面積。

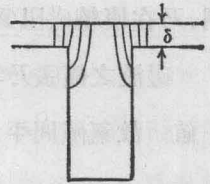
$$A_g' = b l_1 \quad (7)$$



第 173 圖 極靴側部之磁流擴張

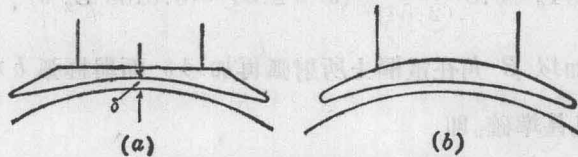
$$A_g'' = \left(\frac{\beta d}{2} + 4\delta \right) l \quad (8)$$

(b)有槽電樞 此種電樞中，磁流恆聚於齒尖(如第 174 圖所示)，且其一部磁流每由槽達於齒緣，故 B_g 之計算較繁。若極面與樞心間之電位差及氣隙距均相同，則有槽電樞所發生之磁流，自不及光心電樞之多。換言之，槽可增加氣隙之磁阻。如假設 δ 值增大，或將極弧 b 縮小為 b' ，則其影響即可計入。



第 174 圖 齒尖之邊緣磁流

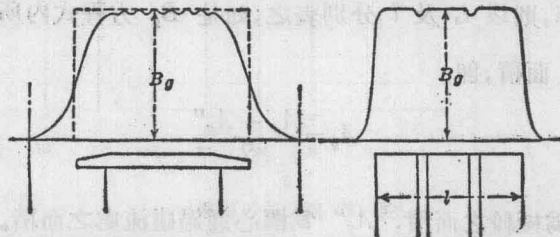
然因全極面之氣隙長度常不能一致，問題更為複雜。故為改善整流起見，尋常多削去其極端，如第 175 圖(a)部所示，或使電樞周面與極面之中心稍偏，如圖中(b)部所示。蓋增加極端氣隙之作用，在使極間



第 175 圖 極靴各式

發生邊緣磁流，如第 176 圖之磁流分配所示。此曲線之縱坐標，代表電樞周邊各點磁流密度之徑向成分。其頂際之波紋，則由於槽及齒之關係。

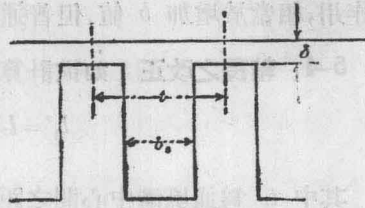
同樣，如 177 圖所示，樞心之兩端，具有邊緣磁場。如備有通風溝，



第 176 圖 磁場強度之周圍分布

第 177 圖 磁場強度之軸向分布

則沿軸磁流分佈曲線之凹度，恰如第 176 圖所示，與槽之陷落相當。蓋因通風溝增加磁阻之作用，雖等於將軸長 l 減少若干，而側部邊緣磁流之作用，乃等於將 l 增加若干，故兩種作用有互相抵消之傾向。



第 178 圖 齒與槽

5-3. 極弧之改正 卡特氏^①(F. W. Carter)謂槽之存在，乃將氣隙之有效長度自 δ 增至 δ' 即

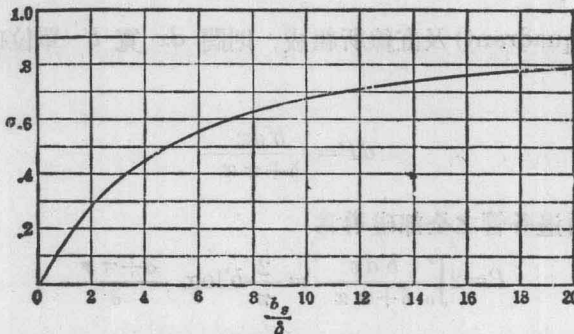
$$\delta' = \delta \frac{t}{t - \sigma b_s} \quad (9)$$

上式中 t = 齒距， b_s = 槽口之闊，

$$\sigma = \frac{2}{\pi} \left[\arctan \frac{b_s}{2\delta} - \frac{\delta}{b_s} \log_e \left(1 + \frac{b_s^2}{4\delta^2} \right) \right] \quad (10)$$

如不加長氣隙而縮短極弧，俾將槽之作用加入計算，則 $b' = b - \frac{\sigma b_s}{t}$

σ 之值與 $\frac{b_s}{\delta} = \frac{\text{槽口}}{\text{隙距}}$ 之關係，可作圖如第 179 圖。極尖邊緣磁場



第 179 圖 改正因數 σ

① "Air-gap Induction," Elec. World, 第 38 卷第 884 頁 (1901).

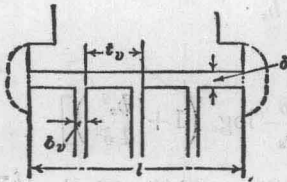
之作用，相當於增加 b 值。但普通極尖氣隙空間增加，可以相互抵消。

5-4. 軸長之改正 如欲計算通風溝之磁阻作用，可將軸長 l 減至

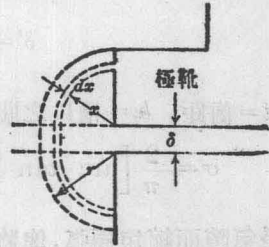
$$l_1' = l \frac{t_v - \sigma b_v}{t_v} \quad (11)$$

其中 t_v 為通風溝中心間之距離， b_v 為通風溝之闊（第 180 圖）， σ 見第 179 圖（圖中橫坐標可作為 b_v/δ ）。若計入由極靴側部至樞心旁之磁流（如為 180 圖虛線所示），則 l_1' 更應增加 l_2' 而得

$$l' = l_1' + l_2' \quad (12)$$



第 180 圖 軸長之改正



第 181 圖 軸長之改正

今將 l_2' 之值估計如下：假定邊緣磁流之磁力線如第 181 圖所示為兩象限(quadrant)及直線所組成，則闊 dx 寬 b' 單位磁力管之磁導為

$$dP = \frac{b' dx}{\delta + \pi x}$$

故在樞心兩邊各管之全部磁導為

$$P = 2 \int_0^r \frac{b' dx}{\delta + \pi x} = \frac{2}{\pi} b' \log_e \frac{\delta + \pi r}{\delta}$$

其中 x 之積分限乃自 0 至 r 。今若令磁導等於 δ 長及 $b'l_2'$ 橫截面磁力管所有之磁導，則

$$\frac{b'l_2'}{\delta} = \frac{2}{\pi} b' \log_e \left(1 + \frac{\pi r}{\delta} \right)$$

及
$$l_2' = 1.5 \delta \log_{10} \left(1 + \frac{\pi r}{\delta} \right) \quad (13)$$

若 r 值自 1 至 5 倍於 δ 值時， l_2' 值約在 0.9δ 至 1.8δ 之間。通常令 $l_2 = 1.5\delta$ ，已甚準確。

既知 b' 及 l' 後，則氣隙內磁流密度之改正值爲

$$B_g = \frac{\Phi}{b'l'}$$

故若磁流密度用每方呎線數計，氣隙用呎計，則爲

$$AT_g = 0.8 B_g \delta,$$

如磁流密度以每方吋線數 (B_g'') 計，氣隙以吋 (δ'') 計，則爲

$$AT_g = 0.3133 B_g'' \delta''$$

5-5. 齒部所需之安匝數 齒與槽既互相並行，其磁位差相同，故各有磁流發生。在齒未過飽和時，其磁導甚大，故通過於槽之磁流甚少，可以不計。但許多機器中之齒鐵，故意使其磁流密度甚高，以限制電樞反作用。此時齒之磁導減少至甚小，可與槽之磁導不相上下。故若以每極全部磁流作爲經過位於極下之齒（極尖磁流分佈作用可酌量計入），則齒之總磁流密度，當比實際爲高。而相當於此推測密度值之每單位長度安匝數，必超過實際數值甚多。蓋因磁鐵達到高度飽和時，磁化曲線恆爲平坦。由此可知實際齒之密度 B_t ，與推測值 B_t' ，不宜混而爲一。

決定磁流密度實際值與推測值關係之條件如下：(1) 每極總磁流等於齒鐵，槽隙，通風溝及疊片間絕緣空間種種磁流之和；(2) 磁鐵及空氣中磁流之分配視其磁導之比例而定。故

$$\Phi = \Phi_{\text{鐵}} + \Phi_{\text{空氣}} \tag{14}$$

$$\frac{\Phi_{\text{鐵}}}{\Phi_{\text{空氣}}} = \frac{\mu \times \text{鐵之截面}}{\text{空氣之截面}} = \mu K \tag{15}$$

式中 μ 為相當於齒尖在實際密度

B_t 時之磁導係數。自第 182 圖，

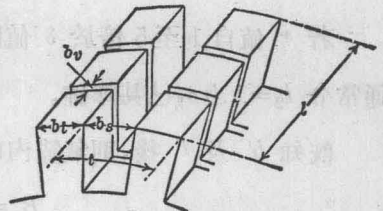
$$\text{鐵之截面} = b_t(l - n_v b_v)k \tag{16}$$

式中 k 為疊片因數(通常約為 0.9)

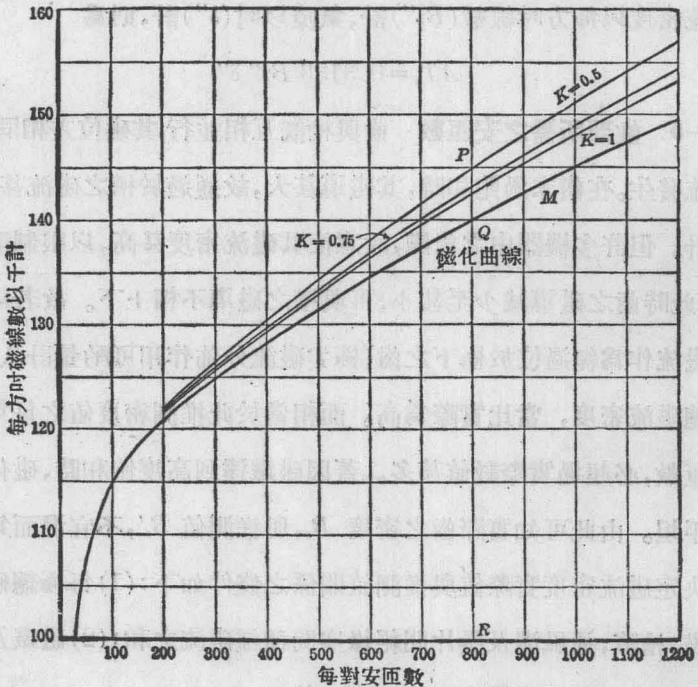
而

$$\text{空氣之截面} = b_s l + b_t n_v b_v + b_t(l - n_v b_v)(1 - k) \tag{17}$$

若機器之尺寸已定，則由方程式(16)及(17)，即可決定 K 值。故



第 182 圖 齒與槽



第 183 圖

$$\frac{\Phi}{\Phi_{鐵}} = \frac{\Phi_{鐵} + \Phi_{空氣}}{\Phi_{鐵}} = \frac{1 + \mu K}{\mu K} = \frac{B'_i}{B_i} \quad (18)$$

K 值既定，可由極心物料之磁化曲線求得相當於 B_i 各值之 μ ，以代入方程式(18)，則許多 B_i 與 B'_i 之同時值即可求出。第 183 圖 M 曲線示普通鋼片 B_i 及 at_i 之實際關係，其他曲線，示各種 K 值之 B'_i 值。

如 B'_i 已知，用上法可決定齒尖之 B_i ，但 K 值或與曲線上之值不同，則頗感不便。然無論 K 為何值，由 B'_i 求 B_i 可直接從磁化曲線 M (第 183 圖)得之，其法如下：

由 $\frac{B'_i}{B_i} = \frac{1 + \mu K}{\mu K}$ 之關係，若 B 以每方線數計，則

$$B'_i = B_i + \frac{1}{K} \frac{B_i}{\mu} = B_i + \frac{H}{K} \quad (19)$$

令第 184 圖中 C 代表一磁化曲線，其坐標為 B 及 H ，且 B 及 H 單位之比例尺相同。今於原點

O 之左方以任意比例尺作 K 值，

並作 ON 線等於與 K 同比例尺

之單位。由是，若 OM 為 K 之任

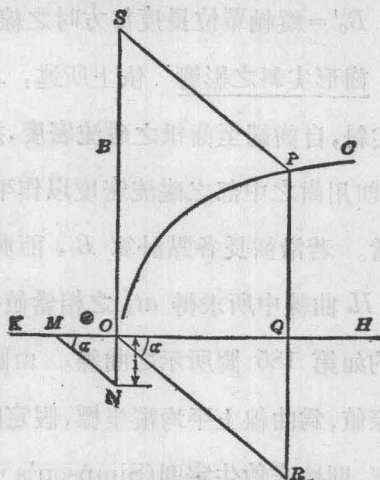
何值，則 $\frac{ON}{OM} = \frac{1}{K} = \tan \alpha$ 。

又若作 OR 線與 MN 並行，則

相當於 $H=OQ$ 之 QR 截線，必

與 $\frac{H}{K}$ 相等。吾人既知 $PQ=B_i$ ，

則 $PR=OS=B'_i$ 。是以欲自 B'_i



第 184 圖 齒之實際磁流密度與推測磁流密度

求 B_i 時，僅須於縱坐標上取 OS 等於 B'_i ，經過 S 作線與 MN 並行，而與曲線 C 相交於 P 點。如是縱坐標 PQ 即為齒之實際密度 B_i ，而 OQ 為其相當之 H 值。

通常作圖， B 與 H 之比例尺不同，且磁化曲線恆以 B 及 at 為坐標，故上述作圖方法應有相當修改。如 B 以每方呎之線數計， at 以每呎之安匝計，則 ON 之長必依 K 之比例尺使等於 $\frac{4\pi A_0}{10 B_0}$ ，其中

A_0 = 橫軸單位長度每呎之安匝數；

B_0 = 縱軸單位之長度之高 (gauss) 數。

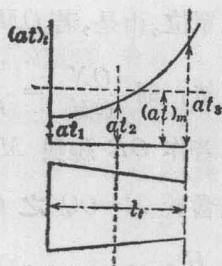
設 B 為每方吋之線數， at 為每吋之安匝數，則 ON 必須照 K 之比例尺使等於

$$2.54 \times \frac{4\pi A'_0}{10 B'_0} = 3.19 \frac{A'_0}{B'_0}, \text{ 其中}$$

A'_0 = 橫軸單位長度每吋之安匝數；

B'_0 = 縱軸單位長度每方吋之線數。

齒形尖斜之影響 依上所述， $AT_i = at_i l_i$ ，似可直接計算。然因齒形尖斜，自齒端至齒根之磁流密度，逐漸增加，而各點之 at_i 值遂亦不同，即用齒之中部之磁流密度以作平均值，亦屬不當。若沿齒長各點計算 B_i ，而與第 183 圖 $B-H$ 曲線中所求得 at_i 之相當值作圖，其結果約如第 185 圖所示之曲線。由圖知 at_i 之實際值，為曲線上平均縱坐標，假定曲線為拋物線形，則按辛伯生定則 (Simpson's rule)，其平均縱坐標為



第 185 圖 沿齒軸磁流之變更

$$(at_i)_{\text{平均值}} = \frac{at_1 + 4at_2 + at_3}{6} \quad (20)$$

由是 $AT_i = (at_i)_{\text{平均值}} l_i \quad (21)$

5-6. 樞心所需之安匝數 由前章第 137 及 138 圖, 可知齒根下之樞鐵負載每極有效磁流之半, 故

$$B_a = \frac{\Phi}{2A_a} \quad (22)$$

若齒下鐵之徑向, 深度為 h , 則

$$A_a = kh(l - n_v b_v) \quad (23)$$

如是決定之 B_a 值亦必有其相當之每單位長度安匝數 at_a , 由此

$$AT_a = at_a l_a \quad (24)$$

5-7. 極心與極靴所需之安匝數 極靴及極心所負載之磁流, 各截面並不相同, 但假定磁流一致, 且等於 $\nu\Phi$, 亦無顯著之差誤。於是

$$B_c = \frac{\nu\Phi}{A_c} \text{ 及 } B_s = \frac{\nu\Phi}{A_s} \quad (25)$$

而相當於以上磁流密度之磁激為 at_c 及 at_s , 故

$$AT_c = at_c l_c \text{ 及 } AT_s = at_s l_s \quad (26)$$

5-8. 軛部所需之安匝數 軛部所負載之磁流, 等於 $\nu\Phi$ 之全數或半數, 視機器之種類而定。前章第 137 圖示第一例, 第 138 圖示第二例。最新式機器多屬於後者, 故通常

$$B_y = \frac{1}{2} \nu\Phi \quad (27)$$

而相當於此值之每單位長度安匝值為 at_y , 因此可得

$$AT_y = at_y l_y \quad (28)$$

5-9. 漏磁之簡單公式 代入方程式 $\nu = 1 + \frac{\psi}{\Phi}$ 之漏磁, 包括各雜散路徑中之磁流, 而不經過電樞者, 故與主要磁流或有效磁流不同。此種漏磁之分布, 已於前章第 142 圖表明之。今欲計算每部漏磁之值, 則應將各路線之磁勢除以磁阻 (或乘以磁導)。漏磁路線之幾何圖形, 每甚不規則, 磁導幾無從計算; 即能計算, 其所需之高深算學^①, 亦非本書所能論及。但通常可用近似值計算, 較為便捷, 而亦有相當之精確。下面將擇常用之數例討論之。

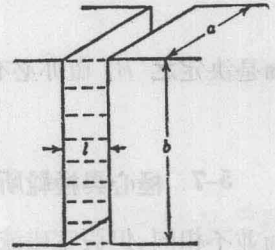
第一例 並行而面積相同之平面 (圖 186)。如鄰近平面之邊緣磁流不計, 則磁路之磁導為

$$P = \frac{\text{面積}}{\text{長度}} = \frac{ab}{l} \quad (29)$$

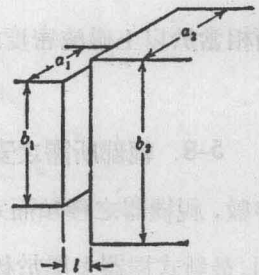
其中各尺寸皆以呎計。上式於 l 較小於 a 及 b 時可通用之。

第二例 並行而面積不同之平面 (圖 187)。如 l 較小於相對各面之尺寸, 而兩平面之面積相差不多, 則磁路之磁導可作為

$$P = \frac{\text{平均面積}}{\text{垂直距離}} = \frac{1}{2} \frac{a_1 b_1 + a_2 b_2}{l} \quad (30)$$



第 186 圖

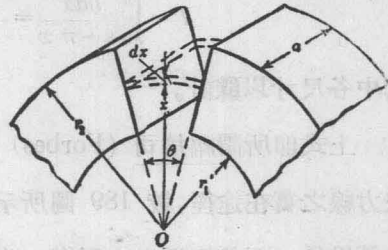


第 187 圖

① 欲知其詳, 請參看 "The Reluctance of Some Irregular Magnetic Fields," by John F. H. Douglas, Trans. A. I. E. E., 第 34 卷第一部第 1067 頁 (1915)。

其中各尺寸以呎計。

第三例 非並行而面積相同之平面(圖 188)。設相傾斜之平面相交於 O ，由此作各圓弧，即可假定為磁力線之途徑。距軸 x 呎，可得一磁力管，其面積為 adx 方呎，而磁導為



第 188 圖

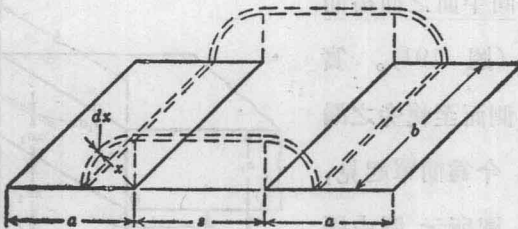
$$dP = \frac{adx}{x\theta}$$

故總磁導為

$$P = \int_{r_1}^{r_2} \frac{adx}{x\theta} = \frac{a}{\theta} \log_e \frac{r_2}{r_1} \quad (31)$$

其中 θ 以弧度 (radian) 計。

第四例 同平面而同面積之平面(圖 189)。假定磁力線係半徑 x



第 189 圖

之兩象限及直線 s 所組成，則圖中單位磁力管之磁導為

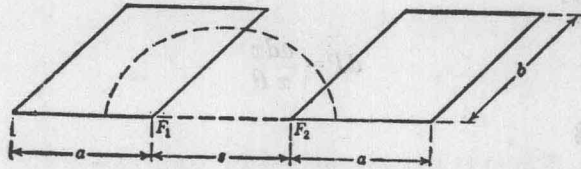
$$dP = \frac{bdx}{s + \pi x}$$

而總磁導為

$$P = \int_0^a \frac{b dx}{\pi s + \pi x} = \frac{b}{\pi} \log_e \left(1 + \frac{\pi a}{s} \right) \quad (32)$$

其中各尺寸以釐計。

上式即所謂福培司 (Forbes) 公式,其結果初視之似失之過小,因磁力線之實在途徑,較 189 圖所示擴張甚多。但磁流外擴,僅足使磁力管增長,而截面增大之影響,將使上式所得之值反嫌其大。芬聶司 (Finnis) 氏曾假定磁力線作橢圓形,其橢圓之中心點(foci)在 F_1 及 F_2

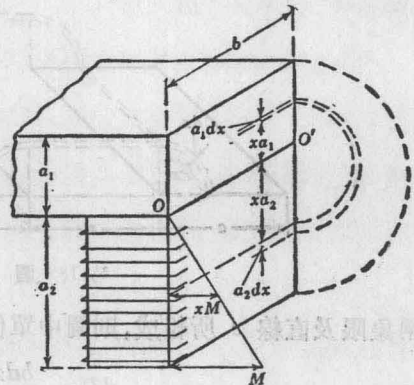


第 190 圖

(圖 190), 而得下列較正確之公式:

$$P = \frac{b}{\pi} \log_e \left[2 \frac{a + \sqrt{a^2 + sa}}{s} + 1 \right] \quad (33)$$

第五例 同平面之面積而
電位差變換者 (圖 191)。實際機器中極心側面至軛旁之漏磁,殊為複雜。今為簡單起見,可作為如 191 圖所示。圖中極心 a_2 繞以一勻布線捲,故沿極心各點之磁位差乃如 OM 線所示。而 O 點及沿軛 a_1 各點之磁位皆為零。



第 191 圖

假定磁力線爲半圓形，且從 a_2 距 OO' 下 xa_2 處發出之磁力線，假設由 OO' 上 xa_1 處重入 a_1 ，其中 x 爲一分數，自 0 至 1。如是在圖中所示單位磁力管，磁位差(或磁勢)爲 xM ，路徑長 $\frac{\pi}{2}x(a_1+a_2)$ ，截面爲 ba_1dx 與 ba_2dx 之平均值。故單位磁流爲

$$d\phi = xM \frac{\frac{b}{2}(a_1+a_2)dx}{\frac{\pi}{2}x(a_1+a_2)}$$

而總磁流爲

$$\phi = \frac{Mb}{\pi} \int_0^1 dx = \frac{Mb}{\pi} \quad (34)$$

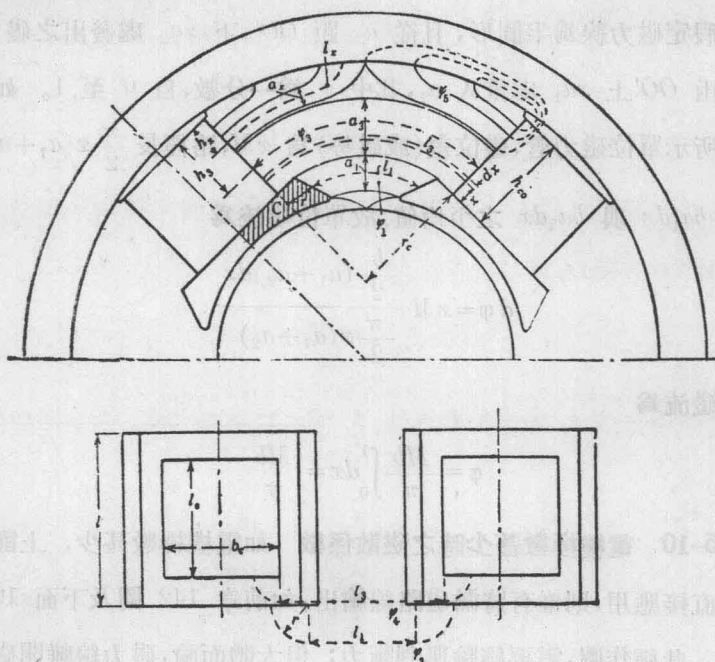
5-10. 電機極數甚少時之磁散係數 如電機極數甚少，上節所論不能直接應用，則惟有將漏磁路線繪出，如前章 142 圖及下面 192 圖所示。此種作圖，需要經驗與判斷力；但大體而論，磁力線離開磁鐵或回至磁鐵時，恆與鐵面垂直，且在比較各種磁力線分布配置時，其總磁導最高者，即爲最正確之繪法。

所有漏磁路線，皆爲周合曲線，與激磁捲匝之一部或全部相鏈。磁力管之磁阻，大部由於空氣部分，磁鐵部分可以不計，磁力管之僅與激磁捲之一部相鏈者，其磁勢亦相當減少。例如鄰極極尖間之磁勢，乃爲送有效磁流通過雙氣隙，兩組齒，及樞心所需之安匝數，即

$$X = AT_a + 2AT_g + 2AT_i \text{ 安匝} \quad (35)$$

因此在鄰近兩極心上而相當於軛及靴中間各點之磁位差，約等於 $\frac{1}{2}X$ 安匝。

第 192 圖所示各部之漏磁，茲將分別計算如下：



第 192 圖

$$\text{極靴內面間之漏磁 } \varphi_1 \quad \varphi_1 = \frac{4\pi}{10} X \frac{a_1 l}{l_1} \quad (\text{長度以呎計}) \quad (36)$$

$$\text{或} \quad \varphi_1 = 3.2 X \frac{a_1 l}{l_1} \quad (\text{長度以吋計}) \quad (36a)$$

其中 a_1 及 l_1 之尺寸，可以從圖中量得。如假定磁力線為以樞軸為中心所作之圓弧，則亦可計算得之。

極靴側面間之漏磁 φ_2 漏磁 φ_2 係從一極靴之半側面(如 192 圖有斜紋線之部分所示)至另一極之半側面。此路徑之截面，可作為等於極靴側面之半面積 A_s ；長度可作為等於半徑 r 之半圓，再加 l_1 。半徑 r 乃為從極尖量至斜紋線面積之重心。

$$\varphi_2 = \frac{4\pi}{10} X \frac{A_s}{l_1 + \pi r} \quad (\text{長度以呎計}) \quad (37)$$

$$\varphi_2 = 3.2 X \frac{A_s}{l_1 + \pi r} \quad (\text{長度以吋計}) \quad (37a)$$

極心內面間之漏磁 φ_3 若極心爲圓形，而其直徑爲 d_c ，則可代以等截面之方形極心，此時

$$b_c = l_c = \frac{d_c}{2} \sqrt{\pi} = 0.89 d_c \quad (38)$$

路徑之平均長度 l_3 及平面截面 $a_3 l_c$ 均可從圖中量得。平均磁勢既爲

$$\frac{4\pi}{10} X \frac{h_3}{h_c},$$

故
$$\varphi_3 = \frac{4\pi}{10} X \frac{h_3}{h_c} \frac{a_3 l_c}{l_3} \quad (\text{長度以呎計}) \quad (39)$$

或
$$\varphi_3 = 3.2 X \frac{h_3}{h_c} \frac{a_3 l_c}{l_3} \quad (\text{長度以吋計}) \quad (39a)$$

如 φ_3 之磁力線作爲以樞軸爲中心之圓弧形，則 φ_3 之計算，將成爲前節第三例之特別方式，因與第 188 圖所示之各單位情形，除沿極心各點之磁勢不同，大致相似。如圖 192 所示，單位磁力管 dx 所受

之磁勢爲 $\frac{4\pi}{10} X \frac{h_c - x}{h_c}$ ，其截面爲 $l_c dx$ ，長度爲 $\frac{2\pi}{p} (r_c + x)$ ；故

$$\begin{aligned} \varphi_3 &= \frac{4\pi}{10} X \int_0^{a_3} \frac{h_c - x}{h_c} \frac{pl_c dx}{2\pi(r_c + x)} \\ &= \frac{4\pi}{10} X \frac{pl_c}{2\pi h_c} \left[(h_c + r_c) \log_e \frac{r_c + a_3}{r_c} - a_3 \right] \quad (40) \end{aligned}$$

極心側面間之漏磁 φ_4 極心側面之漏磁，一部分 φ_4 通至鄰極最

近之一半，另一部分 φ_6 則通至軛旁之露面，約如圖 191 所示。 φ_4 所通過路徑之闊，可假定為 a_3 ，與 φ_3 者同。其平均長度為半徑 $b_c/4$ 之半圓，再加 l_3 。故

$$\varphi_4 = \frac{4\pi}{10} X \frac{h_3}{h_c} \frac{a_3 \frac{b_c}{2}}{l_3 + \frac{\pi}{4} b_c} \quad (41)$$

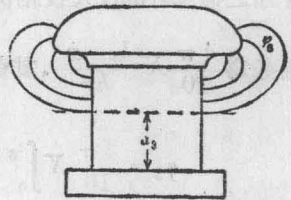
其中尺寸以默計。

極心與軛之內面間之漏磁 φ_5 為計算 φ_5 起見，圖中應先繪多數磁力管，以便量得各磁力管之平均長度 l_x 及平均深度 a_x 之值。每磁力管之平均磁勢為 $\frac{1}{2} \frac{4\pi}{10} X \frac{h_x}{h_c}$ ，故總加各磁力線時可得

$$\varphi_5 = \sum \frac{1}{2} \frac{4\pi}{10} X \frac{h_x}{h_c} \frac{a_x l_c}{l_x} = \frac{1}{2} \frac{4\pi}{10} X \frac{l_c}{h_c} \sum \frac{a_x h_x}{l_x} \quad (42)$$

極心與軛之側面間之漏磁 φ_6 如軛懸越 (overhang) 極心並不甚多，則漏磁可用(34)式計算，而代入 $M = \frac{1}{2} \frac{4\pi}{10} X \frac{h_c - a_3}{h_c}$ 。但普通軛皆懸越極心，則 φ_6 最好用計算 φ_5 之同樣方法求得。如 193 圖所示， φ_6 之各磁力管皆已繪出，則各管之長度及截面皆可量得，而後代入(42)式。

$$\varphi_6 = \frac{1}{2} \frac{4\pi}{10} X \frac{b_c}{h_c} \sum \frac{a_x h_x}{l_x} \quad (43)$$



第 193 圖

漏磁總計 各部之漏磁既已求得，故漏磁總計為

$$\omega = 2\varphi_1 + 4\varphi_2 + 2\varphi_3 + 4\varphi_4 + 2\varphi_5 + 2\varphi_6 \quad (44)$$

此值即可用以求磁散係數

$$\nu = 1 + \frac{\varphi}{\Phi}$$

吾人注意以上 φ_1, φ_2 等各式中, 皆有 X 值。此值既包括齒之磁激, 而齒部每達甚高之飽和程度, 故 X 約視負載而略變。因此 ν 在各種負載下, 亦非完全固定。大約言之, 負載愈高, 磁散係數亦愈大。

習 題

習題 5-1. 今有一 12 極, 550 伏, 500 瓩, 100 轉/分之發電機, 其尺寸如下, 試計算其磁化曲線(假定 $\nu=1.15$)。

樞心之外直徑	94.50 吋
樞心之總長度	14.2 吋
通風溝數	3
每通風溝之闊度	0.25 吋
槽下樞心之徑向深度	7.25 吋
槽數	207
槽之尺寸	0.66 × 1.60 吋
每槽導體數	6
氣隙	0.205 吋
極抱, 百分數	70
極心(生鋼)之直徑	14.25 吋
極心之徑向長度(包括極靴及軛之凸部)	12.25 吋

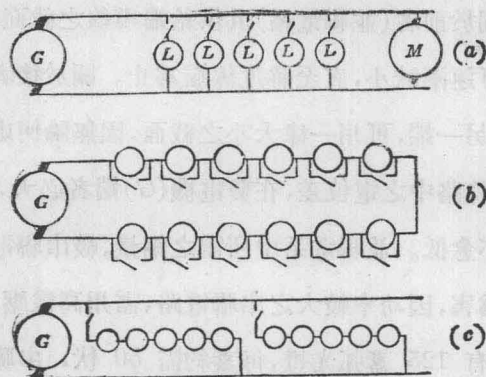
極靴中間之厚度	1.00 吋
軛(生鋼)	5.5×17.5 吋
整流器之直徑	57 吋

習題 5-2. 試計算第一題所述電機之磁散係數(ν)。

和 03.10	於高長文心副
和 09.11	於高長文心副
和 02.0	於高長文心副
和 02.7	於高長文心副
和 00.1 × 00.0	於高長文心副
和 002.0	於高長文心副
和 02.11	於高長文心副
和 02.01	於高長文心副

第六章 發電機之運用特性

6-1. 用途需要 電燈, 電動機及其他應用裝置, 其電能由配電路供給者, 可與幹線並聯, 串聯, 或混聯, 如第 194 圖 (a), (b), (c) 所示。



第 194 圖 並聯, 串聯與混聯電路

並聯(a)適用於負載各單位需要恆位差時, 如是任何負載單位可以斷連, 不致擾及其餘各單位之運用。戶內用燈即為此類用途之一例; 又如有軌電車, 其架空線與軌道間之電位差為一定量。

串聯(b)主要用處在於弧光燈及街市中之串聯白熾燈, 每燈所需之電流相等。其與並聯不同之點, 在於若有某一負載單位不用時不可任意斷連, 但須如上列第 194 圖 (b), 用一跨接(jumper)短接其間, 俾其餘各單位, 可以繼續運用。

混聯(c)乃上述二者併合而成, 其原理與並聯及串聯相同, 勿庸贅敘。通常用混聯者, 例如電車中之燈路, 每用幾串五盞 110- 伏電燈串

聯，再並接於 550- 伏之供給路線上。

定位(並聯)電系中，如有 N 只電燈(或其他負載單位)，每燈需電流 i 安，則供給總電流為 Ni 安。如線路電壓為 V ，線路中之損失不計，則所需功率當為 NiV 瓦。定流(串聯)電路中，如 N 只電燈每燈需 v 伏與 i 安，則總供給電壓為 Nv 伏，仍略去線路損失，所需功率當為 Nvi 瓦。關於前者(並聯電系)其供給端導線之截面須有負載 Ni 安之容量，以次可逐漸減小，直至將近線端為止。關於後者(串聯電系)其導線自一端至另一端，可用一律大小之截面，因無論何處電流皆為等量故也。但供給線路中之電位差，在發電機(G)端者必大，至距發電機愈遠，其電位差亦愈低。並聯電系中所需之銅量，較串聯電系中所需頗多，但此殊不足為害，因功率較大之串聯電路，需用高電壓，故其用亦僅限於戶外。今設有 125 盞弧光燈，每盞約需 50 伏，串聯後所需之總電壓為 6250 伏，再加線路損失，發電機之電勢非七八千伏不可，其不適於戶內安全之用，已自顯然。

並聯電系之配電通常雖稱為定位電系，但導線各點之位差仍各稍有變動，距發電機愈遠，電位愈小，因線路電阻消耗一部分電位故也。此種阻耗位落，可由導線截面之增大而隨意減低，但導體增大價格猛增，故為經濟限制，亦殊顯然。若電燈(或其他用電裝置)距發電機甚遠，無論饋線電流之大小若何，欲其電壓不變，則惟有增加負載時，發電機之電壓亦隨之而增，俾足補償線路之位落。

6-2. 特性曲線(characteristic curve) 由上述各種用途需要觀之，最重要者厥為如何可知通常一般發電機之運用特性，然後因性適宜，擇

其當者而施之於用途。幾經研究之結果，最簡便之方法，莫如製成各種特性曲線，以表示發電機動作之各種相互關係。例如發電機之外特線 (external characteristic) 表示端電壓與路流之關係。作曲線時，以路流為自變數，端電壓為依變數。其他各種特性曲線，以下各節當逐步討論之。

6-3. 調整(regulation) 在發電機之情形時，通常滿載與零載之端電壓不同，二值之差，即測定電機對於定壓調整近切之程度。依照美國電機工程師會規定直流電機之標準(1925年六月)，調整之定義為『滿載與零載之電位差，但有時調整亦可對於其他負載情形而言。直流發電機之調整，乃指負載逐漸變換時之電壓差，如負載驟變，而電壓有較大之瞬時變更，則不在定義範圍之內。』電壓調整，有時以百分數計，即以滿載與零載之電位差，除以某一電壓值(普通為滿載值)，再以 100 乘之。

6-4. 別激發電機之特性曲線 以下記號表明：

E = 發出電勢

V = 端電壓

r_a = 樞阻，包括電刷與刷觸

r_f = 場捲阻

R = 外路負載電阻

i = 載流(即路流)

i_f = 場激流

n_f = 每對極之場匝數

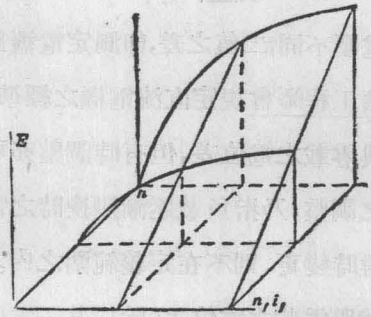
n = 每分時之轉數

零載狀態 在零載狀態下，電樞旋轉為其額定速度，電樞內之發出電勢與場捲內之激流關係，已於第四章飽和曲線中論及之。（參看第 135 圖）發出電勢之方程式既為

$$E = \frac{p}{a} \cdot \frac{\Phi Z n}{60 \times 10^8}$$

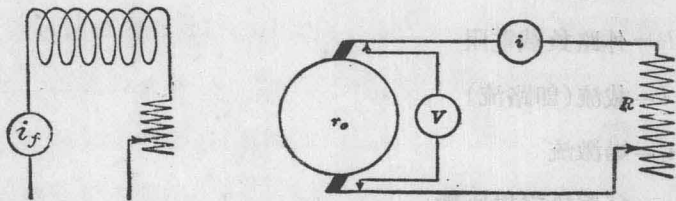
若 i_f 之值不變，則 Φ 亦不變，發出電勢即與速度成正比。今若將 E ，

$n_f i_f$ ，與 n 沿坐標之三軸繪出，結果則得如第 195 圖（與第 136 圖同）中之曲面。與 (E, n) 面並行之各平面截此曲面所成之剖線皆為直線，距原平面 (E, n) 愈遠其斜度亦愈大，初則變更甚速，以後漸緩。與 $(E, n_f i_f)$ 面並行之平面所截之剖線為飽和曲線，相當於距坐標原點之距離所代表之速度。



第 195 圖 速度對於飽和曲線之影響

外特線 負載狀態 第 196 圖所示之連接法，設發電機旋轉至其額定速度，激流之值 i_f 不變，電刷置於適合整流之地位，其前移角為 α ，路流（此處等於樞流）則隨外路負載電阻而變。如 i_a 為樞電阻之



第 196 圖 測定別激發電機零載特線之連接法

消耗，則端電壓 V 小於發出電勢之值為 ir_a 伏，即

$$V = E - ir_a \quad (1)$$

此式中之 r_a 不僅為樞捲電阻，並包括電刷與其連接之電阻，電刷與整流器間之觸阻亦在內。當工作溫度至某種限度時，樞電阻為一常數，觸阻則不然，約與電流成反比；是以電刷與整流器間接觸面之總電位落約為一常數。如用普通炭刷，而接觸面每方吋通過之電流不超過 45 安（或每方呎 5 至 7 安），則總電位落約為 2 伏。

低電壓之發電機多用銅刷，其接觸面之電位落約為 .04 伏，每方吋之電流密度自 65 至 160 安（或每方呎 10 至 25 安）。故

$$V = E - ir_a' - \Delta e \quad (2)$$

r_a' 為不變之樞電阻， Δe 為可變之觸阻電位落。為簡單起見，以後此項校正，不再計入。

第 197 圖中，設 $O'M$ 為額定速度時之飽和曲線，橫坐標代表每對極之安匝數 ($n_f i_f$)，縱坐標為發出電勢 (E)。如用一變阻器於激磁場（第 196 圖）以變換磁激，直至橫坐標為 OF_0 所代表之值，則發出電勢為 $F_0 G_0 = OP_0$ ，即為發電機運用於斷路時之端電壓 ($i=0, R=\infty$)。

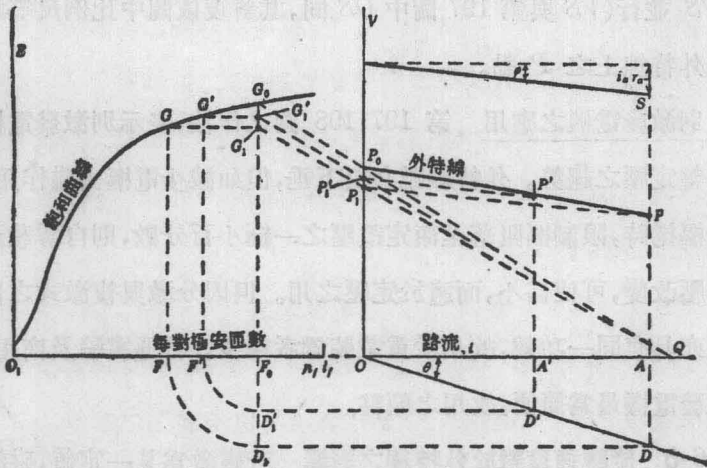
若外路連以載阻 R ，其電阻足使發電機供給電流 i 安，則端電壓必低於零載時之電壓，其故有二：(1) 因電樞去磁作用使有效磁流 Φ 減少，故電勢 E 亦隨之降低；(2) 因電樞內之 ir_a 使電位降落。第 197 圖中，設 OA 為任一載流 (i) 之值，作 AH 直線，使與 OA 所成之角為 45 度，則 $OH=OA=i$ ；或直接沿 OH 及 OA 各截取一等於路流之線，亦無不可。在 H 點作橫線 HD ，其長為 $\frac{aZi}{180a}$ = 每對極之去磁安匝

所作之縱線交於 P 點。此交點即在此發電機之外特線上。此外各點，如 P' 點之作法，參看圖中，均易求得。

此種作圖方法，尙有少許錯誤，因交磁作用(第四章)與整流時樞圈內短路電流所發生之去磁，俱未計入。前者如必須計入時，可將 θ 角稍微加大。

外特線 P_0P 之形狀，視飽和曲線之形狀，以及 θ 與 φ 二角之大小而定。如磁激 OF_0 不同，外特線亦隨之而異，學者可作一圖，擇一磁激之值，使 G_0 點稍下於飽和曲線之膝彎，則可得不少啓迪。

第 197 圖之作圖法，曾明示決定外特線各點時各變數之關係。實則根據基本理論之加減乘除，可用其他幾何方法代求，上圖不過其中之一法。第 197 圖中飽和曲線 $O'M$ 適反於普通所見，似嫌不大自然，且如第 198 圖所示，飽和曲線中電勢之比例尺或需與外特線中者不同，



第 198 圖 別激發電機之外特線

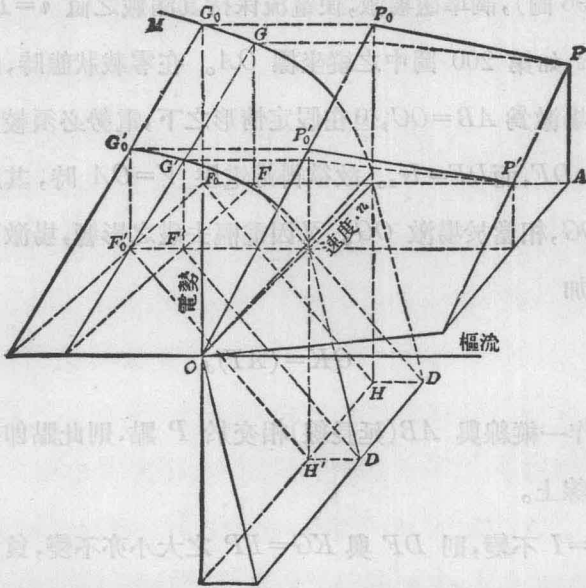
亦有不方便處。若欲免除上述各弊，則可用 198 圖之作法如下。

作 OD 線使相當於路流 $i=OA$ 之截線 AD 等於 $AT_d = \frac{aZi}{180 a}$ 安匝，其安匝數之比例尺與飽和曲線者同。如飽和曲線繪於另一紙上，則可同釘於繪圖板上，而使兩圖之橫坐標成一直線。如調準發電機之場變阻器使磁激為 O_1F_0 ，則去磁 AD 可從 O_1F_0 減去，其法為作一直線 DD_1 ，再以 F_0 為中心繪一象限 FD_1 。是以淨磁激為 O_1F ，而其相當之電勢為 FG 。同樣，相當於路流 OA' 之淨電勢為 $F'G'$ 。

今如在外特線上，斷路電壓 F_0G_0 將作為 P_0 點。吾人可先將 G_0 及 P_0 連接成直線，再引長至與橫軸相交於 Q 點。其他各點之電勢，如欲依 OV 之比例照改，則可用下列作圖方法。例如電勢為 FG ，先作 GG_1 ，橫線與 F_0G_0 相交，再將 G_1 與 Q 連接。 G_1Q 與 OV 相交之點，即為 P_1 ，而 OP_1 即為依 OV 比例尺之電壓值。然後作 P_1P 線與 VS 並行 (VS 與第 197 圖中 OS 同，其斜度依圖中比例尺等於 r_a)，即得外特線上之 P 點。

別激發電機之應用 第 197, 198 圖之作法，表示別激發電機有自然調整定壓之趨勢。外特線雖必須下垂，但如減少電樞去磁作用，或於設計樞捲時，限制樞阻落至額定電壓之一極小百分數，則自零載至滿載之電壓改變，可使甚小，而適於定壓之用。但因分激與複激式之自激發電機亦具有同一功效，故用於重載裝置者極少。普通實驗及商用試驗，別激發電機最為簡便，故用之頗夥。

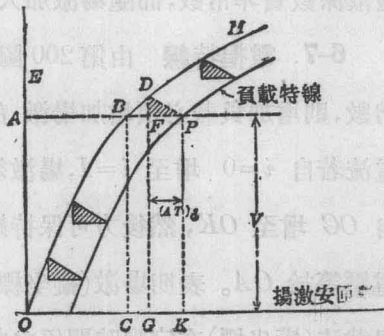
6-5. 旋轉速度對於外特線之影響 若磁激為某一定值，磁流亦有定值，則發出電勢與速度成正比。倘發電機運用於任一速度時，則第 197,



第 199 圖 速度對於別激發電機外特線之影響

198 圖之飽和曲線，須另以新曲線代之，其原縱坐標與新縱坐標之比，為額定速度與新速度之比，如第 199 圖之三向圖所示，（即 197 圖之展開式）。此圖表明各種速度時外特線之軌跡為一楔形面， OP_0P 。（磁激為一定值）

6-6. 負載特線 負載特線乃表示定量電流時端電壓（縱坐標）與場激（橫坐標）關係之一曲線。倘負載電流等於零，此曲線即為零載特線或飽和曲線， OM ，如第 200 圖。今若變動外路之電



第 200 圖 別激發電機之負載特線

阻 R (第 196 圖),調準磁場激,使電流保持其滿載之值 $i=I$,則端電壓爲 $V=IR$,如第 200 圖中之縱坐標 OA 。在零載狀態時,此發出電勢所需之磁場激爲 $AB=OC$,但在假定情形之下,電勢必須較大於 OA ,所大之值爲 DF ,而 $DF=Ir_a$ 。故欲得端電壓 $V=OA$ 時,其所需發出之電勢爲 DG ,相當於場激 OG 。又因電樞去磁之影響,場激更須加大至 OK 即增加

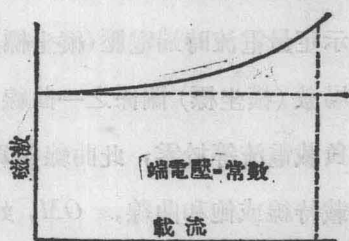
$$GK=(AT)_d$$

由 K 點作一縱線與 AB (延長線)相交於 P 點,則此點即在滿載電流之負載特線上。

如 $i=I$ 不變,則 DF 與 $KG=FP$ 之大小亦不變,負載特線與零載特線之形狀完全相似,惟稍向右側下傾,其下傾之定距爲 DP ,如圖中斜紋線之三角形所示。

此圖作法,亦不甚準確,因增加磁激,交磁之去磁成分隨之俱大,在磁鐵已飽和後,影響尤甚;換言之,如曲線上升, FP 亦同時增大。再者,磁散係數實非常數,而隨場激加大(見第五章),故 FP 亦必分外加長。

6-7. 電樞特線 由第 200 圖所示,若使端電壓在任何載流時,皆爲常數,則增加負載必須增加場激。故電流若自 $i=0$ 增至 $i=I$,場激須自 OC 增至 OK ,然後方可保持端電壓等於 OA 。表明場激(縱坐標)與載流(橫坐標)在定壓時關係之曲



第 201 圖 電樞特線或調整曲線

線謂之電樞特線(第 201 圖),或名之「調整曲線」,較為適宜。

6-8. 串激發電機之特線 外特線

令 E = 發出電勢

V = 端電壓

i = 路流

r_a = 樞阻,包括電刷與刷觸

r_f = 串聯場捲阻

n_f = 每對極之串聯場匝數

R = 外路電阻

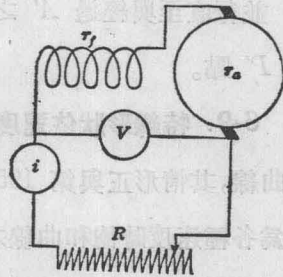
n = 每分時之轉數

通過樞捲,場捲與載路之電流既為相同,如旋轉速度保持其額定值,則場激及電勢,均隨負載而增加,而外特線之形狀,必如第 203 圖之第三曲線。若第三曲線之縱坐標加以損失線之縱坐標,則得第二曲線。第二曲線為內特線,表示發出電勢與樞流之關係,因

$$E = V + i(r_a + r_f) \quad (3)$$

如無電樞反作用,第二曲線即為發電機之飽和曲線,但事實上電樞反作用難以避免,由圖中第二曲線移至第一曲

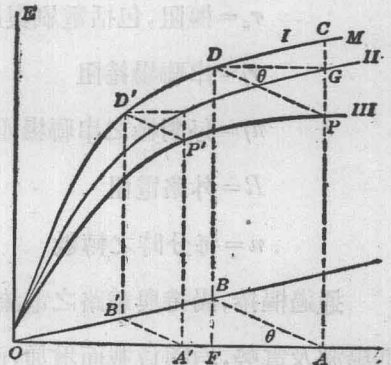
線方得飽和曲線。故發生端電壓 AP 與電勢 AG 之場激 OA , 其中一部份 DG 乃抵償電樞反作用中去磁成分之用,所餘 OF 方為發出電勢之場激,因比 D 為飽和曲線上之一點。



第 202 圖 測定串激發電機外特線之連接法

若用此法求其他各點，例如 D' ，可知三角形 PDG 之大小，必須隨特線上之各點而變動。但因 PG 與 DG 皆與電流 i 成正比，則二者之比例，即 DP 之斜度，必為一常數。故若已知發電機之飽和曲線，外特線可簡易作圖如下①。

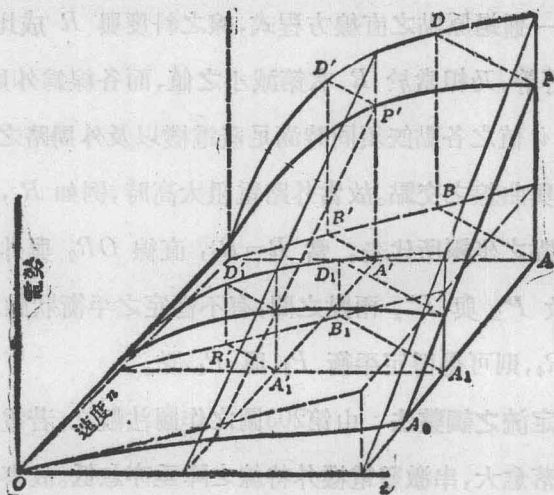
相當於任何電流 $i=OA$ 之去磁影響 AF 依電流之比例尺則為 $\frac{\alpha Zi}{180 a n_f} \frac{1}{n_f}$ ，而 FB 之長依電壓之比例尺等於 $i(r_a+r_f)$ 。此二長度，即定 B 點與 OB 線，如第 203 圖所作。今欲求外特線上相當於電流 OA' 之 P' 點，可作 $A'B'$ 與 AB 並行，從 B' 作 $B'D'$ 縱線，使與 M 曲線相交於 D' ，再作 $D'P'$ 與 $B'A'$ 並行直至與經過 A' 之縱線交於 P' 點。



第 203 圖 串激發電機之外特線

6-9. 特線形狀依速度之關係 串激發電機之速度變換，影響於飽和曲線，其情形正與第 195 圖之別激發電機相同。如第 204 圖， $OD'D$ 面為各種速度時飽和曲線之軌跡。每一飽和曲線即可作一相當之外特線，如第 203 圖，集各外特線之軌跡，則得一 OA_0P 面，如圖中粗線所示。當發電機短路時 ($V=0$)，此面與底面 (n, i) 之交線為 OA_0 曲線。

① 此法與 Arnold, "Die Gleichstrommaschine," 3rd. ed., Vol. I, p. 469 所述相同。

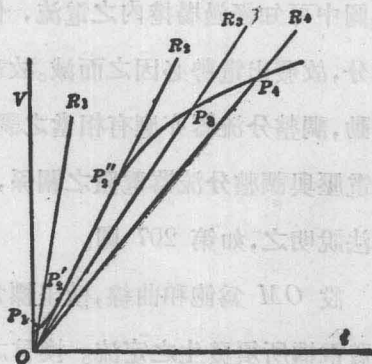


第 204 圖 速度對於串激發電機外特線之影響

6-10. 穩定運用之條件 依第 202 圖，當發電機在額定速度旋轉時，載阻 R 有一臨界值，高於此值，則發電機不能『建起』而失其作用。若載阻較此值稍低，則端電壓與電流始而速升，繼則緩增，直至平衡狀態為止；但在開始與終了之運用情況中，發電機係處於不穩定的電平衡狀態。若 R 值再減低，則使電流與電勢均將變更，但不再發生顯著之不穩定狀態。

此種情況之原因，可於第 205 圖中得之，圖中曲線代表發電機之外特線，由第 202 圖可知歐謨氏定律必可應用於外路，即

$$V = iR$$

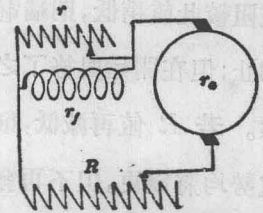


第 205 圖 串激發電機穩定運用之條件

此式爲一通過原點之直線方程式，線之斜度與 R 成比例，故 $OR_1, OR_2, OR_3,$ 等等，乃相當於 R 次第減小之值，而各線爲外周路之特線，代表 V 與 i 值之各點既須同時滿足發電機以及外周路之特線，平衡點必爲直線與曲線之交點。故當外路電阻太高時，例如 R_1 ，端電壓與電流必爲 P_1 點之坐標所代表。當 $R=R_2$ ，直線 OR_2 與外特線相合之線段甚長，故 P_2 與 P''_2 兩點之間，有不穩定之平衡狀態。如 R 之值爲 R_3 或 R_4 ，則可得穩定平衡 P_3 與 P_4 點。

6-11. 定流之調整法 由第203圖之作圖法觀之，若電樞反作用與內部電壓降落愈大，串激發電機外特線之降垂亦愈低。故事實上可將二數故意加大，使特線曲至近於垂直。在此種情形，發電機有自然調整定流之傾向。串聯電弧路即需要此種特性，他如舊式之勃勒希(Brush) 弧光發電機，即根據此理而設計。

串激發電機定流調整之另一方法，爲置一可變電阻與串聯場捲並聯，如第 206 圖。由圖中可知經過場捲內之電流，僅樞流之一部分，故發出電勢必因之而減。故載電阻每一變動，調整分流器亦應有相當之調準。發電機端電壓與調整分流器電阻之關係，可以簡單方法說明之，如第 207 圖。



第 206 圖 定流發電機之連接法

設 OM 爲飽和曲線，橫坐標爲場捲電流（代安匝），又設 $OA=i$ 爲發電機所須發生之定流。換言之，即外特線爲垂直線 AY 。截取 AB （任擇一比例尺）等於串聯場捲之電阻 r_f ，再依此比例尺截取 BC 等

$=AQ$ 。欲用圖解法求 MP ，其作法如下：連接 C 與 D 而作 BF 與 CD 並行；於是 $DF = i \frac{r r_f}{r + r_f}$ 而 $NF = i \left(r_a + \frac{r r_f}{r + r_f} \right)$ 。故連接 M 與 N 而作 FP 與 MN 並行即得 P 點，而 AQ 遂為相當於分流電阻 $r = BC$ 之端電壓。其他各點，可以同樣方法求得之。

由上討論，可知串激發電機之電壓，亦可用電刷位置之改變以控制之，蓋改變電刷之位置，即改變 α 角，而影響於 KL 之長度，如第 207 圖所示。

串激發電機之應用 串激發電機之特線表示，如載流增加，電壓即須相當增加，而增加之值並非絕對互成比例；但利用適當之輔助裝置，可使輸出量調整為定流。故串激發電機多供給串聯弧光燈之用，即至今日仍不乏用之者，不過因電機工程之技術日益進步，串聯弧光燈路現已改由汞弧矯流器 (mercury arc rectifiers) 供給電流，而此種汞弧矯流器之電源乃經過定流變壓器之交流電。歐洲各國現尚有以串激發電機調整為定流之用者，如屠利電系 (Thury system) 之長距離電力輸送。(見第 6-19 節)。

如設計串激發電機時，使其磁路不至飽和，則飽和曲線與外特線俱近似通過原點之直線，於是此發電機所生之端電壓，實際上即與電流成比例。利用此種特點，串激發電機頗適於昇壓機 (booster) 之用，詳見第十一章第 11-2 節。

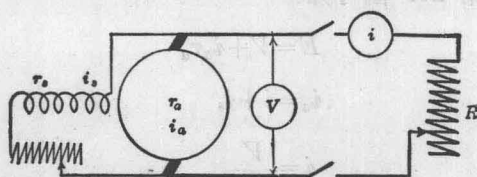
6-12. 分激發電機之特線 斷路情形

令 E = 發出電勢

V = 端電壓

i_a = 樞流 i = 路流 i_s = 分激場流 r_a = 樞阻 r_s = 分激捲阻包括調整變阻器 R = 載阻 n_s = 每對極之場捲匝數 n = 每分時之轉數

當一分激發電機之負載電路或受電路斷連時，如第 208 圖，電樞



第 208 圖 測定分激發電機外特線之連接法

與分激場捲成一簡單之串聯路，如第 202 圖。故分激變阻器改變時， V 與 i_s 亦必隨之而變，其情形已於 6-10 節討論串激發電機之穩定運用時詳言之。換言之，如一分激發電機在額定速度轉動，外路斷連，而調整變阻器之電壓過高，則雖其接法不錯，且有適當極性之剩磁，端電壓亦無從建起。

但分激機斷路時之建起情形，與串激機亦有不同。此因分激場捲之電阻太高，可以限制電流 i_s ，較電樞之電流負載容量為甚小。在此種假定情形之下，實際上所能量出之 V 與發出電勢 E ，並無大區別。故

如外路斷連時，

$$E = V + i_a r_a \cong V \quad (6)$$

其中 i_a 與 r_a 之值俱甚小。況電樞內之電流既小，則所發生之電樞反作用必微，亦可以略去不計，而 V 與 i_a 之關係，即可以發電機之飽和曲線代表之。

因 $i_s = \frac{v}{r_s}$ ， r_s 如有變更，即影響於端電壓，其情形正與第 205 圖中所示相同，故電勢之建起，必須經過一不穩定之平衡區域。

外特線 表明端電壓 V 與路流 i 之外特線之形狀，可以下述方法決定之^①，由第 208 圖可知

$$E = V + i_a r_a \quad (7)$$

$$i_a = i + i_s \quad (8)$$

$$i = \frac{V}{R} \quad (9)$$

$$i_s = \frac{V}{r_s} \quad (10)$$

第 209 圖中之飽和曲線， M 表示發出電勢， E ，與場激， $n_s i_s$ （每對極之安匝數）之關係。如發電機之外路斷連，（ $R = \infty$ ），而調準磁場變阻器，使磁激為 OF_0 ，則發出電勢必為 $F_0 L$ ；此電勢約與斷路之端電壓等，因電樞內之電壓落（ $i_s r_a$ ）甚小，可以略去不計。 ON 線為「場捲電阻」線，其斜度為 $\frac{V}{n_s i_s} = \frac{r_s}{n_s}$ ，與 r_s 成正比；此線相當於第 205 圖中之 OR_1 ，

① Franklin and Esty, "Elements of Electrical Engineering," Vol. I.

CG 必為樞阻 $i_a r_a$ 之值。又以電樞反作用之關係，淨磁激必較 OF 稍小，其差為 FD ，而

$$FD = \frac{\alpha Z i_a}{180 a}$$

故實際上淨磁激為 OD ，發出電勢為 $E = BD$

$$\therefore i_a r_a = E - V = BD - HD = BH$$

而 $\frac{BH}{CH} = \frac{BH}{FD} = \frac{i_a r_a}{\frac{\alpha Z i_a}{180 a}} = \frac{180 a r_a}{\alpha Z} = \tan \varphi = \text{常數}$

換言之，當場阻線 ON 上之 C 點已定後，欲求 B 點即可由 C 點作 CB 線，使與橫線成一定角 φ 。

由 B 點作橫線 BK ，再由 K 點作 KP ，使與橫線成 θ 角，此角之大小為

$$\tan \theta = r_a$$

其中 r_a 之值依圖中比例尺。由此得

$$QP = \frac{KQ}{\tan \theta} = \frac{i_a r_a}{r_a} = i_a$$

故 P 為特線上之一點，其縱坐標為端電壓 V ，橫坐標為總樞流 i_a 。路流 i 之值可由 i_a 減去 i_s 求得之；若用作圖法，可作 OP_0 線，與橫線成 ψ 角。此角之 $\tan \psi = r_s$ ，其中 r_s 之值依圖中比例尺，可由下式證之：

$$QX = \frac{OQ}{\tan \psi} = \frac{V}{r_s} = i_s$$

故 $AP = V$ ， $XP = i$ 為端電壓與路流之同時值。同樣作法，可求其他各點，例如第 209 圖中所示之 P' 點。

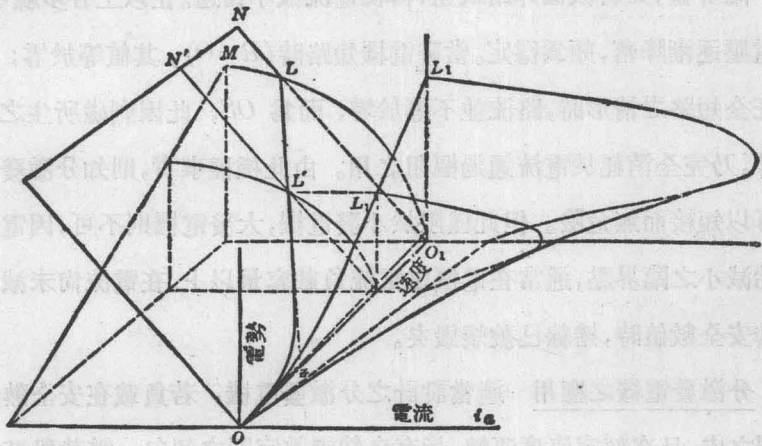
由作圖可得一注意之點，即減低載阻時，路流始而增加，俟增加至

某一臨界值，如再減低外路電阻，轉使電流減小甚速。在以上各步驟中，端電壓逐漸降落，頗為穩定。當發電機短路時($R=0$)，其值等於零；但在完全短路之情形時，路流並不等於零，而為 OS ，此因剩磁所生之小電勢，乃完全消耗於電流通過樞阻之用。由此種種事實，則知分激發電機可以短接而無危險。但此僅限於小發電機，大發電機則不可，因電流開始減小之臨界點，通常在電樞之電流負載容量以上，在電流尚未減小至其安全數值時，捲線已被燒毀矣。

分激發電機之應用 適當設計之分激發電機，若負載在安全熱度限制之內，且在額定速度運轉，皆有自然調整定壓之傾向。零載與滿載間之電壓落，雖較同樣設計之別激發電機為大，但可以使之甚小。如負載與發電機距離甚近，(例如，分激發電機用作交流電機之場路磁激器時)，線阻壓落甚小，分激發電機即適於供給定壓之用。若負載變更甚緩，端電壓之控制，即可用手調準其磁場變阻器。如負載變更甚速，可用自動調整器(詳見 6-22, 6-23 兩節)，端電壓非特可使之不變，且能與負載同時增加。

分激發電機可作蓄電池充電之用。蓄電池充電將滿時，其電勢增大，於是減低充電流之值，但以分激發電機有下垂特性(drooping characteristic)之故，電流減小，發出電勢即因而加增，如此自動得其平衡而不致有蓄電池倒充發電機之弊。

6-13. 特線形狀依速度之關係 作第 209 圖時，速度與分激場路電阻俱為常數。改變速度(i_a 不變)，特線形狀即隨之而變，而 V, i_a 與 n 三者間之關係，可以三向圖表示之，如第 210 圖。此圖中 OO_1M 面作

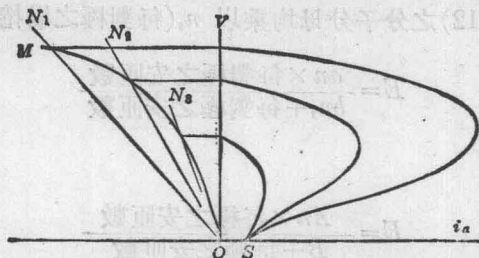


第 210 圖 速度對於分激發電機外特線之影響

於速度軸之左邊，為各種速度時，飽和曲線之軌跡，每一飽和曲線即有一相當之特線如 L_1, L'_1 等，其軌跡為一特別管狀形式，如圖中所示。

如分激捲阻為一常數。則場捲阻線 (ON) 之軌跡即為一平面 OO_1N ，此面與飽和曲面 OO_1M 之交線為一曲線 $OL'L$ 。此曲線在 V, n 面上之投影為 OL'_1L_1 曲線，表示發電機斷路時端電壓與速度之關係。若無剩磁， $OL'L$ 曲線即不通過原點，而與速度軸相交於 Z 點；此意即謂若無剩磁，而速度低於此臨界值 OZ 時，則發電機即不能建起。

6-14. 特線形狀依分激場捲阻之關係 若分激發電機之速度不變，則場路電阻可以調整變阻器變更之，而其影響於特線之形狀與大小如第 211 圖所示。 OM 為相當於發電機運轉速度之飽和曲線， ON_1, ON_2 等為相當於變阻器各值之場阻線，此數特線之作法，已於討論第 209 圖時詳述之。

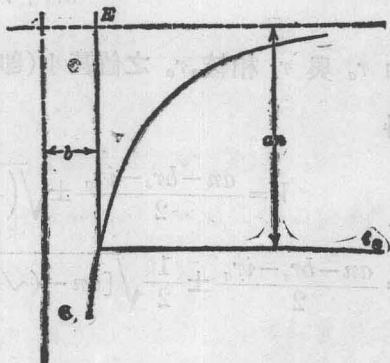


第 211 圖 調整變阻器對於分激發電機外特線之影響

6-15. 分激發電機特線之近似數學分解 由以前各節可知外特線之形狀，全視飽和曲線為轉移，故代表 V, i 與 n 之方程式，必為代表飽和曲線方程式之函數，飽和曲線既須包含磁路中鐵部分 B 與 H 之關係，而此種關係又無由詳知，故最善之法，莫若用一經驗方程式代表飽和曲線。此種方程式，弗羅里(Froelich)最先用之，即

$$E = \frac{an i_s}{b + i_s} \quad (12)$$

其中 a 與 b 為二常數， n 為旋轉速度。如速度不變，此方程式即代表一雙曲線，其漸近線如第 212 圖所示。將 a, b 二常數，各擇一相當之值，則此雙曲線與實際飽和曲線，在發電機之工作範圍內實無軒輊。惟稍有不同者，即實際曲線在低磁化時之不規則情形，雙曲線未能與之完全吻合，且在雙曲線中，剩磁亦未計入，否則上式須如第四章第 4-3 節所述，將原點移至右邊。



第 212 圖 飽和曲線之經驗方式

如方程式(12)之分子分母均乘以 n_s (每對極之場捲匝數), 則得

$$E = \frac{an \times \text{每對極之安匝數}}{bn_s + \text{每對極之安匝數}}$$

又可寫作

$$E = \frac{An \times \text{每極之安匝數}}{B + \text{每極之安匝數}}$$

在有載情形中, 代入上列方程式中之每極(或每對極)安匝數, 乃為由場激安匝減去電樞去磁安匝之淨安匝數,

若用弗羅里氏方程式如(12)式, 而不計入電樞反作用, 可得下列關係(參考方程式 7, 8, 10):

$$E = \frac{an i_s}{b + i_s} = V + i_a r_a \quad (13)$$

$$i_a = i + i_s$$

$$i_s = \frac{V}{r_s}$$

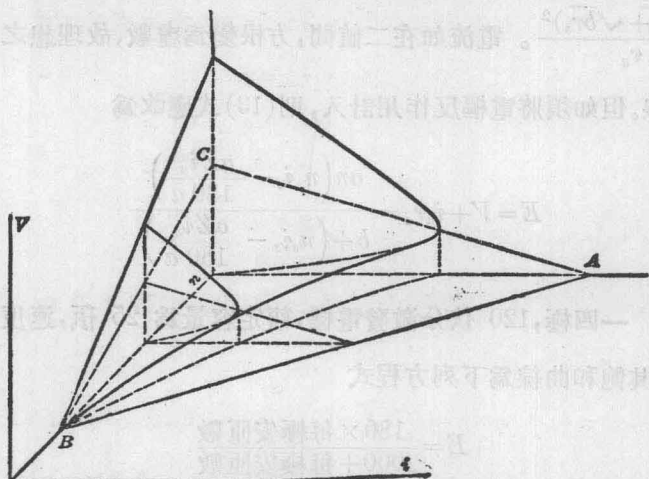
於是

$$V = \frac{anV}{br_s + V} - \left(i + \frac{V}{r_s} \right) r_a \quad (14)$$

如 r_a 與 r_s 相較, r_a 之值甚小(即 $r_a + r_s \cong r_s$), 解出 V 而化簡之, 則得

$$\begin{aligned} V &= \frac{an - br_s - ir_a}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{an - br_s - ir_a}{2} \right)^2 - ir_a r_s b} \\ &= \frac{an - br_s - ir_a}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{[an - (\sqrt{ir_a} - \sqrt{br_s})^2][an - (\sqrt{ir_a} + \sqrt{br_s})^2]} \end{aligned} \quad (15)$$

此方程式為 V, i , 及 n 三變數之二次方程式, 故代表一面(第 213 圖),



第 213 圖 分激發電機之理想外特線面

其平切面為若干圓錐曲線或直線，且此面對下列方程式

$$V = \frac{an - br_s - ir_a}{2} \quad (16)$$

所代表之平面相稱，如圖中 ABC 所示。

若在此面之一般方程式(15)中，代入 $i=0$ ，則得

$$V = an - br_s, \text{ 及 } V=0 \quad (17)$$

第一式代表斷路時之情形，第二式為短路時之情形。由前者可知如

$V=0$ ，則 $n = \frac{br_s}{a} = OB$ ，故 OB 為臨界速度，低於此速度，發電機若無剩磁即不能建起。

今以 n 為常數之條件，加於 V 之一般方程式，則得外特線之方程式，相當於所擇之速度。又由方程式可見 i 有二值能使方根等於零，故外特線與 ABC 平面相交於此二點；其一值為 $\frac{(\sqrt{an} - \sqrt{br_s})^2}{r_a}$ ，他值

爲 $\frac{(\sqrt{an} + \sqrt{br_s})^2}{r_a}$ 。電流如在二值間，方根變爲虛數，故理想之外特線

爲雙曲線。但如須將電樞反作用計入，則(13)式應改爲

$$E = V + i_a r_a = \frac{an \left(n_s i_s - \frac{aZ i_a}{180 a} \right)}{b + \left(n_s i_s - \frac{aZ i_a}{180 a} \right)} \quad (18)$$

例：一四極，120 伏分激發電機，額定容量爲 25 瓩，速度每分時 900 轉，其飽和曲線爲下列方程式

$$E = \frac{180 \times \text{每極安匝數}}{2000 + \text{每極安匝數}}$$

每極場捲爲 800 匝，熱時電阻(不包括磁場變阻器)爲 20 歐，電樞乃 194 根導線之單重波捲，每線捲單位一匝，樞阻爲 0.0245 歐。電刷前移角等於二整流片之節距。若調準磁場變阻器，使斷路電壓爲 125 伏，求發電機輸出滿載電流時之端電壓。

解法：零載時之場安匝，可由下列關係求得之：

$$125 = \frac{180 \times \text{每極安匝數}}{2000 + \text{每極安匝數}}$$

由此得 零載時之每極安匝數 = 4550

而 零載時之分激場流 = $\frac{4550}{800} = 5.7$ 安

$$\text{分激場捲總電阻} = \frac{125}{5.7} = 22 \text{ 歐}$$

$$\text{磁場變阻器之電阻} = 22 - 20 = 2 \text{ 歐}$$

再 滿載電流 = $i = \frac{25000}{120} = 208$ 安

$$\text{整流器之整流片數} = S = \frac{194}{2} = 97$$

$$\alpha = 2 \times \frac{360}{97} = 7.43 \text{ 度}$$

$$\text{每極去磁安匝數} = \frac{\alpha Z i_a}{360 a} = \frac{7.43 \times 194}{360 \times 2} \left(208 + \frac{V}{22} \right)$$

$$= 416 + \frac{V}{11}$$

$$\text{樞阻位落} = i_a r_a = \left(208 + \frac{V}{22} \right) \times 0.0245$$

$$= 5.1 \text{ (約計值)}$$

$$\text{發出電勢} = V + 5.1$$

∴

$$V + 5.1 = \frac{180 \left(800 \frac{V}{22} - 416 - \frac{V}{11} \right)}{2000 + 800 \frac{V}{22} - 416 - \frac{V}{11}}$$

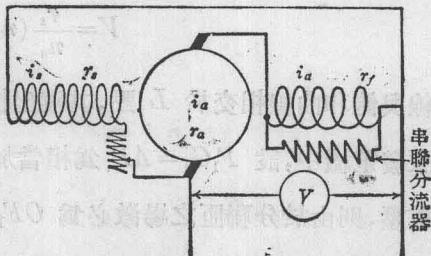
於是

$$V = 110.5 \text{ 伏 或 } 20.7 \text{ 伏}$$

大數為滿載電壓，小數相當於經過外特線彎曲後路流為 208 安之電壓。

6-16. 複激發電機之特線 外分捲接法 (long-shunt connection)

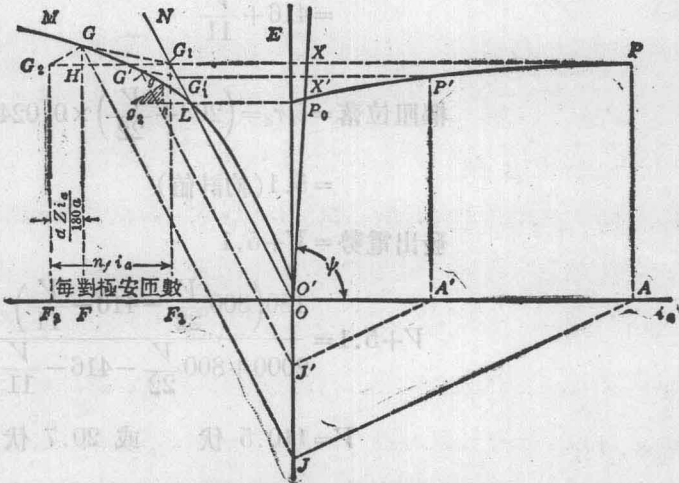
分激發電機，如加用一串聯場捲，而激以樞流，則零載與滿載間之端電壓落，可以一部分或完全補償，甚至變為超複激 (over-compounding)。按超複激之目的 (前已提及) 乃使



第 214 圖 外分捲複激發電機之連接法

遠距離點或負載分配中心點之電壓不變，蓋發電機所增高之端電壓，即為線路電阻所消耗者。通常複激發電機(第 214 圖)可視作串激發電機之上昇特線與分激發電機之下垂特線之合併作用，其總和曲線之斜度，則視二分曲線之斜度而定。

由飽和曲線 $O'M$ (見第 215 圖)為起點，外特線可以下述簡單方法作之：



第 215 圖 複激發電機之外特線

令 ON 為分激場捲之電阻線，其方程式為

$$V = \frac{r_s}{n_s} (n_s i_s) \tag{19}$$

此線與飽和曲線相交於 L 點，其縱坐標約等於零載時之端電壓。在超複激發電機中，設 $F_1G_1=AP$ 為相當於 $i_a=OA$ (設 i_a 為已知數) 之端電壓，則由於分聯匝之場激必為 OF_1 ，總場激為 OF_2 ，而 $F_1F_2=n_f i_a$ 乃為串聯匝之磁激。淨磁激， OF ，則更較 OF_2 ，小 $FF_2 = \frac{aZi_a}{180a} =$ 每對

極之去磁安匝數。故實際上電樞內發生之電勢為 FG ，而 FG 與 F_1G_1 之差 GH ，必為電樞及串聯場捲之阻落，或 $i_a(r_a+r_f)$ 。總結而言，

$$F_1F_2 = G_1G_2 = n_f i_a$$

$$G_2H = \frac{\alpha Z i_a}{180 a}$$

$$GH = i_a(r_a+r_f)$$

由此可知三角形 GG_1G_2 之三邊皆與 i_a 成比例，無論 i_a 之值如何，其比例終無變更，而三角形在各頂點之角度亦為常數。依此， GG_1 邊之斜度乃一常數，其長短與 i_a 成正比例。如欲於外特線上求相當於任何電流 OA' 之 P' 點，祇須在曲線 M 與直線 ON 間作 $G'G'_1$ 線與 GG_1 並行，而使二者之比即等於 OA' 與 OA 之比。其作法如下：

由 G 點作 GJ 線與 ON 並行， J 點乃在縱坐標之向下延長線上。連接 J 與 A ，再作 $A'J$ 與 AJ 並行， $J'G'$ 與 JG 並行直至與曲線 M 相交於 G' 點。由 G' 作 $G'G'_1$ 與 GG_1 並行， G'_1 點乃在直線 ON 上。作橫線 G'_1P' 直至與縱線 $A'P'$ 相交於 P' 點，則 P' 點即為表示 V 與 i_a 關係之曲線上之一點。

如欲求 V 與 i 之關係，則須由 i_a 減去其相當之 i_s 。作 OX 線使與橫線成 ψ 角，而依圖中比例尺， $\tan \psi = r_s$ 。於是 PX 與 $P'X'$ 即為相當於 i_a 等於 OA 與 OA' 之 i 值。

由上述作法中，可知作此圖時，須先知特線上之一點。此作圖法之主要價值在清晰表示飽和曲線與外特線之密切關係。由圖可知如飽和曲線逐漸扁平，（即 LGG_1 變為三角形之形狀）外特線即漸成一直線形。如 L 點之位置在曲線膝彎之下，則外特線漸向上凸，其曲度在負

載小時甚大，負載大時則較小。設計一複激機器時，每規定其特線與直線相差不過一定之限度，故以上討論甚為重要。

由第 215 圖，可知減少串聯匝數，即使 G_1G_2 縮短，而使特線漸近平線。如欲滿載時之端電壓等於零載時之端電壓，或即使發電機變為平複激， G_1G_2 (設相當於滿載情形) 必將降減至 Lgg_2 ，而 $g_2gh = G_2GH$ 。由作圖中可見平複激發電機之特線，亦如超複激然，因飽和曲線彎曲之故，不能成一直線。

內分捲接法(short-shunt connection) 在此種情形下，經過串捲之電流為 $i = i_a - i_s$ ，故第 215 圖作法，實不能應用。但將近滿載時， i 與 i_a 相差甚少，機器如大，則相差更微，故上述方法可得頗近似準確之結果。

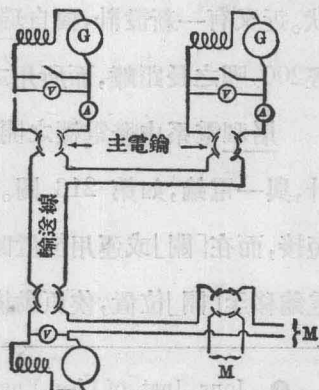
複激發電機之應用 直流發電機中以積複激發電機之應用為最廣，因其特線最合於定壓負載之需要。積複激機零載與滿載間之電壓上昇可任意調整，自零起直至相當限值，故輸送路線中之電位落可以補償。複激發電機多為供給電燈，及巨重功率之用，如電力鐵道，以及其他需要定壓之電動機。

差複激式(differential compound)發電機中，串聯磁場與分聯磁場相反，故外特線低降頗甚，宛如分激發電機之具有過大樞阻及去磁作用者。此種特線最合於電鍍之應用，因如鍍遇阻礙，則電壓自然降低，電動機不致全停而斷路器亦不開斷。又於電弧煨時，電流增加則電壓即應減低，故差複激發電機亦最適用。

6-17. 串聯分流器 實際上設計複激發電機之串聯場捲時，常使

具有充分之匝數，而獲可能範圍內之最大複激百分數。如所需之複激較少，則可接連一分流器於串捲之兩端而減低其磁化效用，如第 214 圖所示。此分流器乃用白銅片為之，其作用乃在分去主流之一部。如載流不變，或變更甚緩，則總電流將依電阻成反比，而分配於串捲與分流器。但若負載突然變更(例如電車)，則二者間之電流，即不能按電阻而分配適宜，因串捲之自感有防止電流在捲線內改變之趨勢，而無感應之串聯分流器則不然。例如，載流突然增加，正需較大電壓，而此時串捲所通過之電流，較其應分全流之值為少，故致磁激之增加反而落後。欲免除此種困難，可使串聯分流器亦有電感，即以電阻繞於疊片鐵心，如第一章第 41 圖所示之情形，但欲經過串捲與分流器之電流，在任何情形下得適當之分配，則分流器之自感與其電阻之比，必適與串捲相當值之比相同。

6-18. 數發電機合用之連接法 當電路上之負載超過一單獨發電機之負載容量時，須加用一部或數部發電機與之連接，俾供給所超過之數量。於是，在定流電系中，因電壓與負載成正比，如已在運用之發電機已達其電壓之限度，則所加之發電機必與串接，同樣，在定位電系中，如已在運用之發電機已達其安全電流容量時，則添加之發電機須與之並行連接。



第 216 圖 屠利電系

6-19. 屠利電系(The Thury system)^① 調整為定流用之串激發電機，

① 參看第七章。

多係接成串聯。此種電系，美國用者甚少，現僅有少數舊廠，其定流電動機仍由高壓弧光路供給。但在歐洲經屠利氏(M. Thury) 研究後，此種電系現已發展至其完善地步。彼依此原理而創設之發電廠甚夥，大半在瑞士，匈牙利以及俄羅斯各處。^{①②}

在屠利電系中，串激發電機之速度不變，利用調整裝置將電刷移動後，可使電流不變(如欲變更速度亦可)。調整裝置之作用，則恃乎通過路流之螺管。今以若干發電機串聯，使發生負載所需要之電壓。負載中之若干串激電動機，亦接成串聯，而轉動若干發電機(通常多為交流發電機)，以供給線路受電或配電端之電流。此種電系，不僅用之於局部分配，亦且用之於長距離電力輸送。各發電機皆合編成對，每對以水輪或他種原動力轉動之。現發電廠內所用每整流器之最大電壓為 3600 伏，但此種機器亦可設計在 500 安時發生 5000 伏，或每對發電機之電容量為 5000 瓩。Moutiers-Lyon 電廠所用之最大線路電壓為 57,600 伏。近又有一新設計，擬自瑞典之 Trollhättan 輸送至 Copenhagen，經 200 哩之長距離，而所用之線路電壓為 90,000 伏。^③

屠利電系中發電機之開關頗為簡單。每發電機備一電流計，電壓計，與一電鑰，如第 216 圖。電鑰之裝置，乃使在「開」位置時，發電機為短接，而在「關」或運用位置時，發電機與線路串聯。欲開動發電機，先將電鑰移至「開」位置，俟原動機至額定速度，電流計讀額定電流時，然後

① Jour. Inst. of Elec. Engineers (British), Vol. 38, p. 471.

② Elec. World, Vol. 63, No. 11, pp. 361 and 583 (1914).

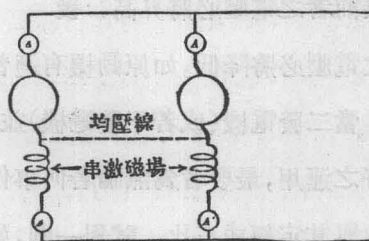
③ Elec. World, Vol. 61, p. 294 (1913).

將電鑰移至運用位置。如欲將機器停止，則手續適相反。

有載時各發電機既皆接成串聯，電路中之電位，自一發電機至另一發電機，必逐漸升高，因此各發電機對於地之絕緣，須加注意，以免破裂。

6-20. 發電機之並行運用

(a) 串激發電機 串激發電機，如依第 217 圖並聯，不能運用滿意，因其中如一機之輸出，剎那間稍微降落(如因速度倏然降低)，其電壓與電流必同時降低，此可由外特線(第 203 圖)中見之。另一發電機因此鄰機之影響，將多載一部負載，故其電流與電壓必因



第 217 圖 並聯之串激發電機

而增加；電壓增大，電流愈增大，則第二機之負載將更加重，而第一機之負載愈少，而電流與電壓亦愈降落。繼此以往，第一機必為第二機轉動如一電動機；前者之旋轉方向，當其為電動機時，必與其為發電機時之方向相反，故其拖動機之連接杆(connecting rod)必將彎屈。由此可見二串激發電機並聯時，因無適當分配負載之趨勢，遂處於不穩定之平衡狀態。此乃串激發電機上昇特線之必然結果。

串激發電機並聯時之自然不穩定性，可用一法匡救之，即如第 217 圖中虛線所示，用一均壓連接。此連接之效用，乃使二串聯場彼此並聯。今如一發電機所受之負載超過其應受之負載量，則增加之電流即分配於二場捲中。於是，負載忽降之發電機之磁激與電壓，可以增加，而負載

之分配亦得自動調整。

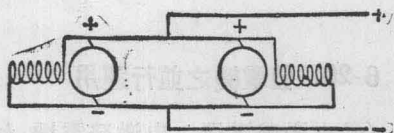
(b) 分激發電機 分激發電機外特線之下垂形式，表示發動機之負載減少時，其電壓即自動升高。故並聯之二分激發電機，如第 218 圖，其

運用乃穩定的。任何趨勢欲使一發電機失去其應負擔之電流，

而將該電流移交於其他機器時，

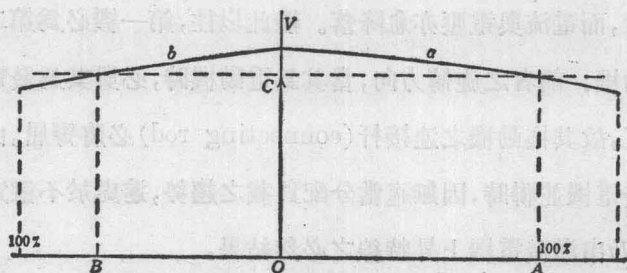
結果前者之電壓必將升高，後

者之電壓必將降低。如原動機有適當之控制，二發電機必仍恢復原狀。



第 218 圖 並聯之分激發電機

當二發電機(或若干發電機)並聯，其額定容量不必相等。但欲得良好之運用，最要者為無論若何事件發生，二者間對於全負載之分配，必須與其定額成正比。試舉一例，如二分激發電機並聯，其外特線如第 219 圖所示，曲線(a)代表一發電機之外特線，曲線(b)為另一發電機之外特線。此圖中縱坐標為伏數，橫坐標為滿載電流之百分數。因發電機係



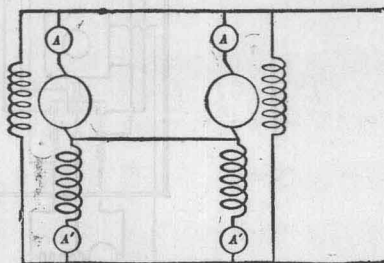
第 219 圖 分激發電機並聯時之負載分配

並聯，其端電壓必須相等，故若負載之端電壓為 OC ，則發電機(a)必將輸出其額定電流百分之 OA ，發電機(b)則輸出百分之 OB 。圖中示二機負載不同時之情形。如二機之負載依容量之比例而分配，而橫坐標皆

用滿載電流百分數，則二機之特線亦必相等。

(c) 複激發電機 複激發電機，既具有分激與串激發電機之各一部分特性，故二部或若干超複激發電機並聯時，其串捲非備有均壓線，(第 217 圖)不可。此為上昇特性之必然結果。倘二機有下垂特性。或即為低

複激時，則不須用均壓線。第 220 圖示二複激發電機之並聯情形。由圖中可見如電流計接連於 A' ，則在電流計即不能讀出發電機所輸出之電流真值，



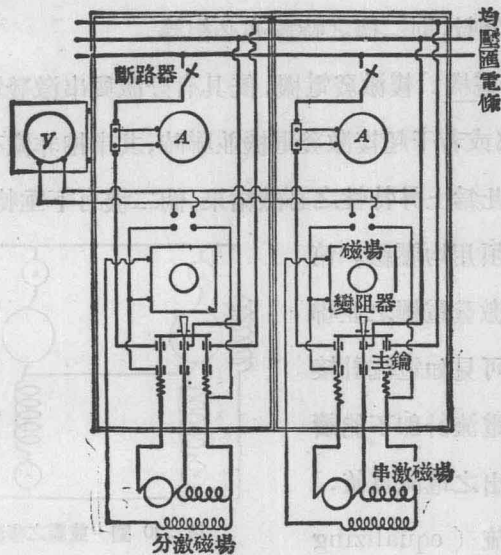
第 220 圖 並聯之複激發電機

因所示值為均流 (equalizing

current) 所影響。蓋一重載發電機供給大量均流於輕載機時，其電流計所讀出之值或為甚小，而其另一機所讀出之值反大。是故各電流計應置於 A ，即在電樞與均壓線相接之另一端。同理，如用單極斷路器，則斷路器須與電流計同結於此接頭之上。今若二發電機並行運用，各輸出滿載電流，其中一機發生剎那間之速度降落時，如斷路器連接有誤，則多量均流將使斷路器開斷，其結果全載將完全加於另一發電機之上，而其斷路器亦遂開斷。

二複激發電機之電鑰板之完全接法乃如第 221 圖所示。總鑰與均壓線鑰常併於一三極鑰上。

二複激發電機已轉動後之並行接法如下：先將新開機器之斷路器關閉，總鑰任其開斷，將原動機開至額定速度，用分激場變阻器調整新開機器之電壓使之等於匯電條之電壓，然後將總鑰關閉。在必要時，負



第 221 圖 複激發電機並聯時之電鑰板連接法

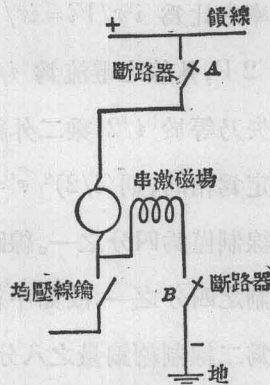
載之適當分配，可再調準磁場變阻器。數機並聯時，如欲將一機停止，可先減其分激捲內之電流，使其負載逐漸移於他機，至電流計所示之值甚小或等於零時，即可將總鑰開啓。

如二複激發電機按額定容量而分配負載，其特線形狀，必須相等，此於分激發電機中已論及之。又因串捲賴均壓線之連接而並行，故串捲場阻，包括均壓線接頭之電阻在內，須與二電機之額定電流成反比。若不注意及此，負載即不能分配適當。例如，二發電機距電鑰板之距離不等，距離遠之電機，因均壓線連接較長，串捲場阻必高，故必不能完全負擔其應分之負載。

二超複激發電機並聯時之負載分配，不能如第 219 圖所示分激發電機同樣情形決定之。蓋如二電機特性不同，二者間之負載調準，全賴

連接之均壓線，使一機之串激流較尋常為大，而另一機則較小。此種情形，可使二發電機之外特線改變，而其所以能改變者，乃由串聯安匝數之變更，參考第 215 圖之作法可知。如以第 219 圖之作法應用於超複激發電機，則上昇特線較高峻之機，所載似為較少，實則反是。

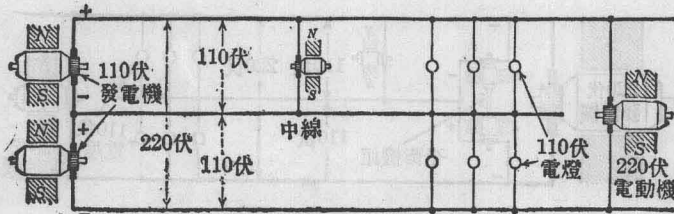
複激發電機之串聯場捲可接於電樞之正端或負端。某著名公司所造之電車發電機，其串聯場捲係與負端或接地端相接；在此種情形中，一單極斷路器 (A) 接於正端或饋線端者，殊不敷用，必須另置一斷路器 (B) 於導線中與地路相通，如第 222 圖。因如無斷路器 (B)，而樞捲經樞心通地，則通過樞捲與串聯場捲



第 222 圖 鐵道發電機之連接法

之短路電流，仍可維持磁激，保留短路，而斷路器 (A) 即失去其保護作用矣。

6-21. 三線發電機 (three-wire generators) 在電燈電力配電路中，欲求用銅之經濟，則與其用低電壓大電流，不如用高電壓小電流。但電燈之電壓，則以用 110 至 115 伏之電壓較諸用高壓效率為高。欲於



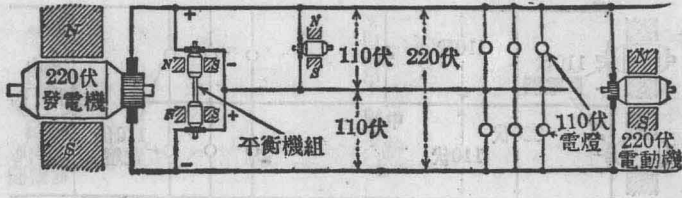
第 223 圖 三線制，二發電機串聯。

110—115 伏之電燈獲有最高之效率，而同時又可以節省銅量，故多用第 223 圖所示之三線制配電系。三線制之經濟，由下節之討論可知：

在二線制配電路中，令 V 為發電機端之電壓， r 為二線之電阻， i 為輸送電流。發電機供給總功率為 Vi 瓦，線路損失 i^2r 瓦，故損耗與總功率之比為 $i^2r/Vi = ir/V$ 。如同樣功率改用三線制輸送，發電機電壓為 $2V$ ，外線之電流為 $i/2$ 。在平衡負載分配下，中線並無電流，故線路損失乃等於 $i/2$ 乘二外線之電阻 r' 。如三線制與二線制之線路損耗假定為相同，則 $(i/2)^2 r' = i^2r$ ，即 $r' = 4r$ ，或即謂三線制外線之截面較二線制僅為四分之一。線路之長度既相同，則三線制外線之重亦僅為二線制之四分之一，故如中線與外線之截面相等，三線制所需銅線之總量僅為二線制總銅量之八分之三。

在三線制中，電燈，小電動機以及其他電氣用具皆連接於外線與中線之間，用較高壓之大電動機則與二外線相接。舊式三線制電系，其高壓乃由二串接發電機（第 223 圖）所發生，中線則接於二電機之公共接點。

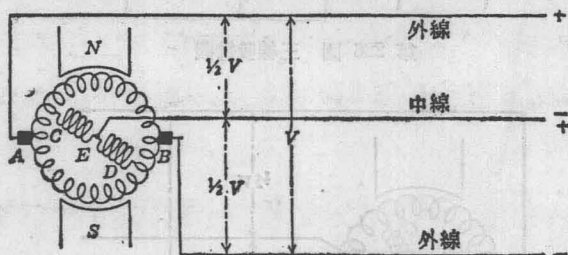
較新之裝置，如第 224 圖所示，含一主要二線發電機，其線捲足以承受外線之電壓，而在外線間另裝一套平衡機組（balancer set）。如此



第 224 圖 三線制，平衡機組。

電系兩邊之負載(即中線與外線間之負載)完全平衡時,則中線即可以省去不用;此在 220 伏電系或用之,即每對電燈接成串聯後,再連接於幹線。倘負載不均,中線內所載之電流,即等於外線電流之差。通常電系之負載每欲使之完全平衡,但不可不有預防不平衡之設備,故中線上所能通過之電流約為滿載電流百分之十。當一用平衡機組電系之負載不平衡時,則負載輕者一邊之電壓漸高,負載重者之電壓漸低;在此種情形下,輕載之電機即運用如電動機,拖動另一電機使為發電機。後者供給電系中所超出之電流,於是使此系自動平衡。若負載完全平衡則均壓機中之二電機俱運用如電動機而不擔任負載^①。

如第 223 圖與第 224 圖所示之電系,其弊在機件過多,既費人工,又佔地位,且開辦費甚大,其效率反不若一同容量之單獨發電機之高。至 Dobrowsky 電系中,則無此弊。如第 225 圖所示,繞於鐵心

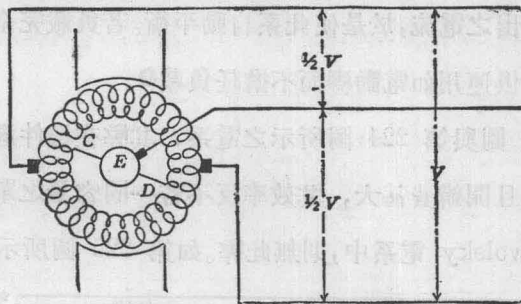


第 225 圖 三線發電機

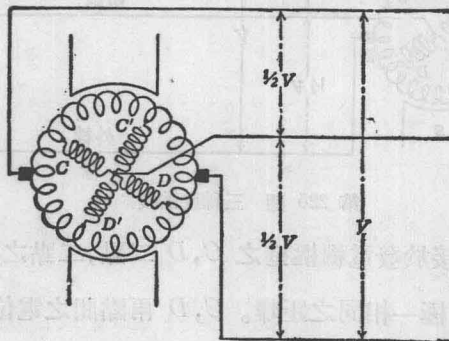
上之線圈, CED , 接於發電機樞捲之 C, D 二點, 二點之相距為 180 電周度, 且各離南北極一相同之距離。 C, D 兩點間之電位差, 互為更迭, 故經過線圈內之電流為交流, 每轉經每對極即成一周波; 因線圈繞於鐵

① 參看第十一章。

心，自感甚大，故此交流之值甚小。線圈之中點， E ，乃 C 與 D 間電位之中點，亦為 A, B 二電刷之電位中點，因 C 與 D 之電位對於 A 與 B 之電位，適為對稱。由 E 點接出之線，即為三線制之中線。美國奇異公司所造之此種電機，係將線圈繞於一鐵心上，嵌在樞心之內，經過鑲於發電機軸上之單匯電環，而將中點 E 與外路連接。蒲克電機公司 (Burke Electric Co.) 所造之三線制發電機，其中線圈 CD 乃同繞於載有樞捲之槽中，如第 226 圖所示。



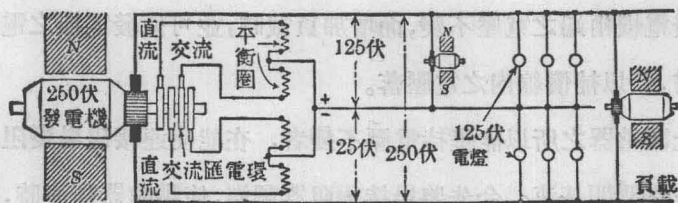
第 226 圖 三線發電機



第 227 圖 三線發電機

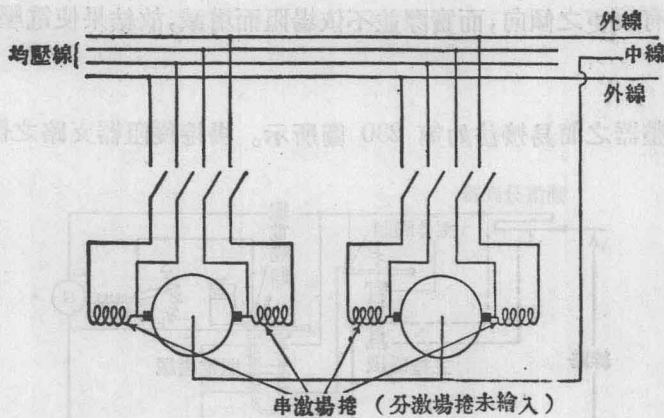
此種平衡圈 CD 亦可置於發電機之外，經過二匯電環而與樞捲連

接；或用二平衡圈與樞捲連接亦可，如第 227 圖。 C, D 與 C', D' 間之
 交電壓相距 90 電周度，一電壓最大時，另一電壓即等於零，反是亦然。
 第 228 圖表示用二平衡圈裝於發電機外邊之接法，此法西屋電機製造
 公司製造三線制電機時常用之。



第 228 圖 三線發電機

如三線發電機用複激時，串聯場捲必須分爲兩半，半與外線之一邊
 串聯，半與外線之另一邊串聯，如第 229 圖。如欲將數三線發電機並行



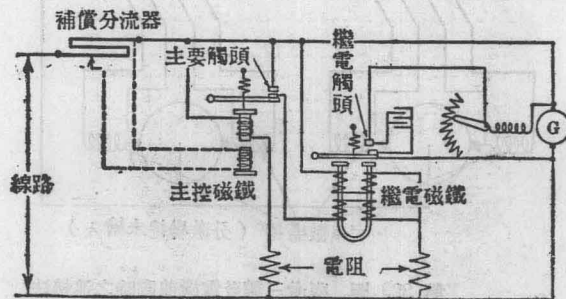
第 229 圖 複激三線發電機並聯時之連接法

運用，其串聯場捲須用二均壓線連接之，故三線發電機之總鑰多用四片
 構成。

6-22. 提利爾調整器 (Tirrill regulator) 前數節曾述及分激與複激發電機之電壓調整, 或用手調準分激場路中之變阻器, 或用串聯場捲之自動複激效用以調準之者。在電燈線路, 維持電壓不變最為緊要, 如用提利爾調整器, 即可自動調整。無論負載或速度之變更如何, 此種裝置可使發電機兩端之電壓不變, 而增加負載時, 並可使發電機之電壓亦與之俱增, 藉以補償線內之電壓落。

此調整器之所以能維持電壓不變者, 在能使連接磁場變阻器兩端之分流路開關甚速。今先將場捲變阻器調準, 使調整器斷連時, 發電機之電壓適比額定值低百分之 35; 在調整器電路通連後, 變阻器即成短接, 於是發電機之電壓因以上升。當電壓已達其預定值量時, 變阻器兩端之短路即行開啓, 於是電壓又再降落。如變阻器之短路, 開關甚速, 則電壓雖有變更之傾向, 而實際並不依場阻而增減, 故結果使電壓維持不變。

調整器之簡易接法如第 230 圖所示。場捲變阻器支路之開關, 全

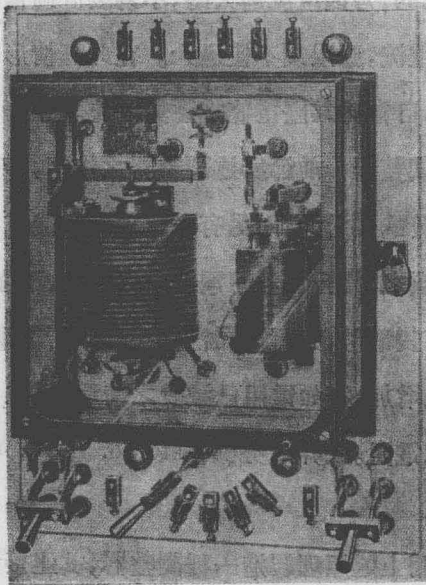


第 230 圖 提利爾調整器之連接法

賴一 U 形差捲之繼電磁鐵。繼電磁鐵上共有二線捲, 其一經限流電阻

而接於匯電條間；另一捲亦與匯電條相接，但須經過受主要控制磁鐵作用之一對觸頭。此控制磁鐵上繞有二線圈，一為電位圈，跨接於匯電條間；一為電流圈（可用可不用），其磁化作用適與電位圈所生者相反。

調整器之運用如下：若發電機之電壓降落時，則經過控制磁鐵電位圈內之電流必較微弱，於是彈簧即將主要觸頭關閉。電流經過繼電磁鐵之二線捲使之去磁，彈簧又將繼電觸頭關閉，因此場捲變阻器即成短接。當電壓升高時，控制磁鐵之樞心即為拖下，而開啓主要觸頭，繼電磁鐵則又變強，於是復將變阻器置入場路中。倘控制磁鐵之電流圈亦同時應用，其差激作用可使電壓在主要觸頭未開斷以前稍微升高，於是即得一複激作用。複激程度可以滑動觸頭變更之，此滑動觸頭係裝於與電流



第 231 圖 奇異公司之電壓調整器

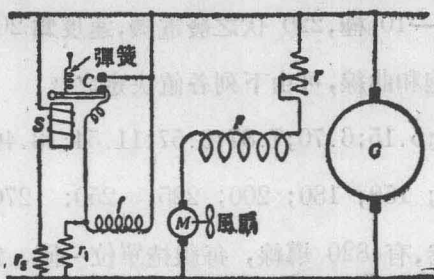
圈並接之補償分流器上。圖中所示之容電器，乃避免繼電器觸頭發生火花之用。第 231 圖為奇異公司簡單調整器之透視圖。

當若干容量較小之複激發電機並行運用時，可用一簡單調整器與其中一電機相連，餘則可任其發生『連帶作用』(trail)。負載之變更可由備有調整器之電機擔負，其餘各電機之負載可由串捲而得平均分配。調整器亦可製作控制多數並行運用發電機之電壓之用，其中繼電磁鐵之數有自兩個多至十個者，一部分用以短接一電機之場捲變阻器，其他則分用於此外各電機中，其功用仍與前同。此種調整器，頗適用於二線或三線之分激或複激發電機，且可補償線路壓落至百分之 15。

大發電機宜用別激，而調整器尤應適當連接，使之作用於激磁機之磁場。此種改變之目的，乃因電流過大時，不易裝置適當之容電器，故繼電器觸頭所阻遏之電流，應限制不使過大。在此種情形中，作用於控制磁鐵之電壓與電流，自當仍為匯電條電壓與電流。

6-23. 反電勢調整器 前節所述調整器之作用，乃恃乎發電機場路電阻之增減。如發電機過大，而另有激磁機供給發電機之磁場，則可將調整器控制激磁機之場路。但任何電路中之電流，不僅可以電阻之改變而控制，若加一可變電勢，亦可得同樣結果。此所加電勢如與原有電壓方向相同，則電流增加，宛如電阻已減少之情形；反之，如所加電勢方向相反，即等於增加電阻。故昇電勢(booster e. m. f.)等於負電阻，而反電勢等於正電阻。

奇異公司嘗利用上述原理製造一種調整器，其連接大概，如第 232 圖所示。一小電動機， M 之電樞與主要發電機 G 之場捲 F 串聯，同時



第 232 圖 反電勢調整器

拖動一風扇。電動機 M 之場捲 f 與限制電流之電阻 r ，串聯而接於匯電條間。 f 之兩端復與兩觸頭 C 相接，此二觸頭乃由經 r_2 而連接於匯電條間之螺管 S 所控制。

如發電機之電壓增高，螺管 S 可以勝過彈簧之力而開啓觸頭，線捲 f 中即有電流通過。 M 之場激既增，反電勢即加大。速度雖將減低，但因風扇之磨擦阻減少更甚，故可維持不跌。總之，磁激增加之影響可較速度減低之影響為大，故結果為反電勢增加。因此 F 中電流減少，而發電機之電壓增高得以遏止。

同理，電壓降低時觸頭 C 即互接 f 之磁流減少，而 M 之反電勢亦即減低。 M 之速度雖有增加之趨向，但為風扇所限制。 M 之反電勢既減， F 中之電流即增，而電壓即可加高。

觸頭 C 之開關甚速，故任何電壓變更之傾向均能及早阻止。吾人注意反電勢調整器實減低主要發電機之磁激，故其磁場變阻器應預先調準磁激至一較高之值。此與提利爾調整器之情形適為相反。

習 題

習題 6-1. —10 極, 220 伏之發電機, 速度為 200 轉/分, 額定容量為 400 瓩, 其飽和曲線, 可由下列各值決定之:

場流: 3.30; 5.15; 6.70; 7.87; 9.57; 11.54; 13.40。

端電壓: 108; 150; 180; 200; 225; 250; 270。

其樞捲為單重摺捲, 有 820 導線, 每線捲單位一匝, 電刷前移角等於 $2\frac{1}{2}$ 整流片距。樞阻為 0.0082 歐。分聯場捲每極 575 匝, 分聯捲總磁阻為 10.5 歐, 調整變阻器之電阻不計在內。

設此機之分激場捲, 乃自 250 伏之幹線別激之。在速度 175 轉/分時, 欲得斷路變壓(即零載電壓)為 225 伏, 問所需與場捲串聯之電阻為若干?

習題 6-2. 第 6-1 題之電機用作一 190 轉/分之別激發電機, 其場激可得 225 伏之斷路電壓。(a) 當發生 1500 安之電流時, 其端電壓為若干?(b) 如在此時將磁激增加, 使端電壓為 235 伏, 其外部周路之有效電阻仍不變, 問在斷路時之端電壓為若干? 假定有載時之電刷位落為 2 伏。

習題 6-3. 設第 6-1 題之別激發電機在 195 轉/分之速度下轉動, 而端電壓為 210 伏, 試繪其電樞特線。

習題 6-4. —4 極, 125 伏之串激發電機, 額定容量為 15 瓩, 速度為 1750 轉/分, 其飽和曲線, 可由下列各值決定之:

場流: 35; 65; 75; 85; 100; 130; 135; 150。

端電壓: 68; 100; 107; 113.2; 121; 133.3; 135; 139.5。

樞捲為 188 根導線之單重波捲, 每線捲單位一匝, 樞阻為 0.021 歐。

場捲每極 30 匝，其總電阻為 0.018 歐。電樞去磁安匝數為磁場安匝數之 4 %。當此機速度為 1800 轉/分，且供給 100 安之電流時，問端電壓為若干？(假定電刷位落為 2 伏)。計算此題於用圖解法外。應根據上列飽和曲線各值求弗羅里方程式，然後用算學分解之。

習題 6-5. 第 6-4 題發電機之串聯場捲如另有一 0.002 歐之電阻與之分接，試求其端電壓。

習題 6-6. 第 6-1 題之電機，用作一 195 轉/分之分激發電機，而調準其場捲電阻，使斷路電壓為 230 伏。當樞流為額定滿載值之半數時，問端電壓為若干？

習題 6-7. 第 6-1 題之電機，備有一串激場捲，每極 $3\frac{1}{2}$ 匝。此串激場捲之總電阻為 0.0014 歐。更有一分流器，與此場捲並聯，使此場捲之電流在滿載時減為 750 安。設該發電機之接法為外分捲複激式而其斷路電壓在 200 轉/分時為 220 伏。問電樞有額定滿載電流時，其端電壓為若干？

習題 6-8. 第 6-4 題之電機，今改作分激發電機，須於額定速度感生額定電壓，問分捲每極之匝數為若干？如極心直徑為 4 吋，長 6 吋，捲線之大小為何？

習題 6-9. 二分激發電機，其額定容量為 100 瓩，及 200 瓩。今各調準其磁場使有 230 伏之斷路電壓。假定二機之外特線，皆為直線式，100 瓩機之電壓調整為滿載端電壓之 5 %，而 200 瓩者為 4 %。設此二機互相並聯，而總負載為 250 瓩，問各機載受之負載為若干？匯電條之電壓為若干？

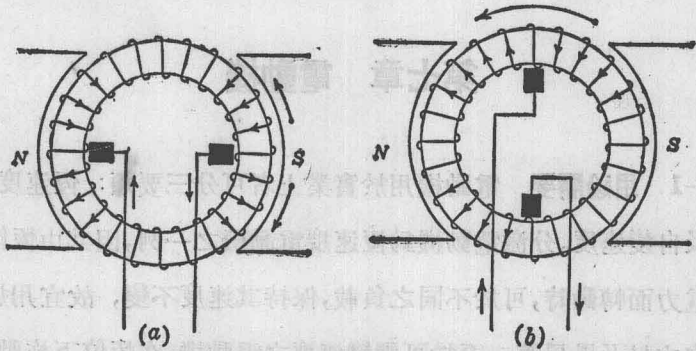
第七章 電動機

7-1. 用途需要 電動機用於實業上者可分三要類：恆速度，調變速度及自變速度。分激電動機為恆速度電動機之一例，因其由恆位幹線供給電力而轉動時，可於不同之負載，保持其速度不變，故宜用於轉動機械之主軸及風扇等。至於可調變速度之電動機，在恆位下拖動時，其速度可於最小值與最大值間。任用其一，且一經調準定後，在此機之容量內，可保持其速度不變；故此種電動機宜用於機工場之單獨拖動等。自變速度電動機之速度，本身有變更之趨向，故雖由恆位線供給電壓時，負載不同則其速度亦隨之而變，代表此類者為串激電動機及積複電動機；此類電動機之速度特性，最合宜於隨負載增加而減低速度之用途，如電車及起重機等。

欲得電動機之操縱自如，先當詳知其速度，轉力，負載及電量與磁量間之關係。此類之關係可決定其運用特性或機械特性；各式電動機之此類特性，下當分論之。

7-2. 反電勢，轉力及功率 第二章內曾述及電樞線捲受磁場影響時，如有電流送入，則線捲之各導體均受側力而起轉動。此轉動之結果，即立使導體內發生與原有電流方向相反之電勢。此種反感而生之電勢，名為反電勢，其大小可由第二章中方程式(7)求得之。

電動機中所發生之有效轉力，視乎磁流與樞電流間之適當地位關係。例如第 233 圖(a)，電刷置於樞流軸與磁流軸一致時，則無迴轉之



第 233 圖 電刷位置對於轉力之影響

傾向；但如同圖(b)，樞流軸與磁流軸成直角時，則相當於任一電流之轉力為最大。

反電勢與速度 在一別激或分激電動機中，加於電樞外端之電壓，必須勝過反電勢及樞捲電阻與電刷觸阻之位落。

$$\therefore V = E_a + i_a r_a \quad (1)$$

其中

$$E_a = \frac{p}{a} \frac{\Phi Z n}{60 \times 10^8}$$

在串激與外分捲複激式之電動機中，另有串聯場捲之阻落，故

$$V = E_a + i_a (r_a + r_f) \quad (2)$$

在內分捲複激電動機中，其關係則為

$$V = E_a + i_a r_a + i r_f \quad (3)$$

一般而論，則
$$V = E_a + i_a r' = \frac{p}{a} \frac{\Phi Z n}{60 \times 10^8} + i_a r' \quad (4)$$

或

$$n = \frac{V - i_a r'}{\Phi Z'} \quad (5)$$

其中 r' = 電樞及其串聯電路之電阻

$$\text{而 } Z' = \frac{p}{a} \frac{Z}{60 \times 10^8} \quad (6)$$

從此更可知

$$i_a = \frac{V - E_a}{r'} \quad (7)$$

此方程式，對於電動機之起動，甚關緊要，後當論述之。

(8) 方程式(1)，(2)，(3)，及(4)內所含電樞阻落及與其串聯之一部分場捲之阻落，在負載安全範圍內，與其外加電壓相較，皆甚渺小。蓋不然，則阻落與電流相乘所得之能耗將使電動機之效率，減至甚低，且同時發生非常之熱，而電機之安全負載量，亦因以減低。電樞阻落，如以外加電壓之百分數表之，則機器愈大，其值愈小。故約略言之，反電勢約與外加電壓相等而方向相反。此為各式電動機之基本原理，即交流電動機，亦正相同。大抵電動機均由恆位線供給電流，故其所發生之反電勢在工作範圍之內，常能保持，近乎不變。然吾人又知在同一設計之電機中，反電勢乃與每極之磁流及速度成比例，故在運轉狀態時，如磁流不變(或幾乎不變)則此電動機之速度亦將不變；反之，如磁流變動，則速度亦將變更，其值約依磁流變更之反比而定。

此類結論，可與由發電機特性所推斷之結果比較之。蓋別激，分激及平複激諸式之發電機當速度固定時，如磁流不變，端電壓亦將保持不變。但於串激發電機，則磁流時有變更，而端電壓亦因之而變。由是觀之，發電機與電動機間可得一相反關係，即發電機內之電壓適與電動機中之速度有相反之關係。

自方程式(5)，可知如外加於電樞之電壓不變，而磁流 Φ 減至甚小，

則速度將增高至危險值。換言之，電動機將「跑散」而損壞。此種現象，在下列情形中可得：(1)分激機之場路，因斷線或鬆接而開斷；(2)串激機之串捲忽受短接。蓋任何電動機之速度，皆有一天然傾向，即使反電勢近於外加電壓之值，故磁流減低，速度即增高。

轉力與功率 將方程式(4)乘以 i_a ，遷項後，則得

$$V i_a - i_a^2 r' = E_a i_a \quad (8)$$

式中 $V i_a$ 代表供給於電樞之功率，而 $i_a^2 r'$ 則為樞路電阻之熱耗。 $E_a i_a$ 則為兩者之差，故當為電樞所發生之機械功率。但所發生之機械功率，並非盡屬可用；因其中一部分將消耗於軸承與電刷之磨擦，空氣阻力，及樞心與極面中之磁滯，渦流諸損失。

若 P = 電樞所發出之總機械功率，以瓦計，

T = 轉力，以達駮 (dyne cm.) $\div 10^7$ 計

$$\therefore P = E_a i_a = 2 \pi \frac{n}{60} T \quad \text{瓦} \quad (9)$$

或

$$\begin{aligned} T &= \frac{60}{2 \pi n} E_a i_a = \frac{60}{2 \pi n} \frac{p}{a} \frac{\Phi Z n}{60 \times 10^8} i_a \\ &= \frac{60}{2 \pi} Z' \Phi i_a \quad (10) \end{aligned}$$

其中 Z' 之意義，如方程式(6)所示。上列之轉力單位不甚實用，今試各表以磅呎 (kg.-m.)，磅呎 (lb.-ft.)，與磅吋 (lb.-in.) 單位，則得

$$\begin{aligned} T &= \frac{60}{2 \pi} \times \frac{10^7}{980 \times 10^3 \times 10^2} Z' \Phi i_a = 0.975 Z' \Phi i_a \quad \text{磅呎} \\ &= \frac{60}{2 \pi} \frac{10^7}{980 \times 453.6 \times 30.48} Z' \Phi i_a = 7.05 Z' \Phi i_a \quad \text{磅呎} \\ &= 84.6 Z' \Phi i_a \quad \text{磅吋} \end{aligned} \quad (11)$$

由上列諸方程式，可知轉力僅有賴於磁流及樞電流，而與速度無涉。但電刷之位置，自應適使整流軸與磁流軸垂直，否則以上諸式，將不能適用。

(4)(5)(7)及(11)四方程式，乃將運用普通各式電動機之物理事實，總括成爲一解析方式。此類事實，茲述之於下：

假定一電動機，由恆電壓之電源供給電能，已於適當情形下起動，而其負載甚小。是機之機械出力或負載既爲甚小，則其所需電之入量僅須足供小量之負載及是機之能耗。此項能耗既僅可爲電動機額定容量之極小百分數，故照所述情形下，其入量甚少，而樞流當亦甚小。此電流之所以甚小，則因電樞在磁場中轉動發生一與外加電壓反對方向之電勢，有以致之。電動機之速度乃與磁流決定反電勢者。速度之自動調準乃使外加電壓與反電勢之差，容許適當電流〔參看方程式(7)〕之流入，以發生負載所需之轉力〔參看方程式(11)〕。如此時增加電動機之機械負載，則電入量必增，幹線中亦須供給較大量之電流，但電流非反電勢減低不能增加，而此又非磁流與速度之相乘數減小不可。故如電動機之磁流爲固定者，則其速度應下降。此種情形，但從負載增加之影響觀之，亦似完全合理。速度降至一適當之值後，若反電勢調準之結果，可使充分電流通過，以增加轉力，而應負載之需要，則速度將不再變。此種反應順序，頗似蒸汽機之以飛球或慣性控速器 (inertia governor) 控制者，負載增加則速度暫時減緩，但控速器之自動應響，容許多量之汽，直至再入平衡狀態而止。

但欲設計一電動機，使速度因負載之加重而增加，亦屬能事。如上

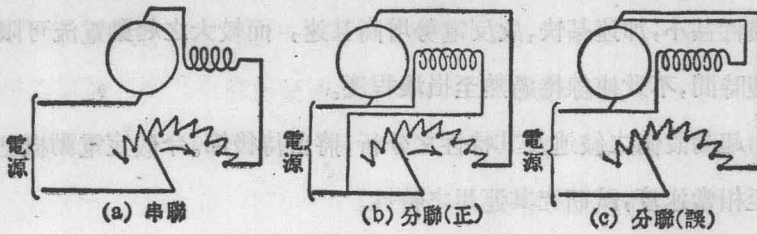
節所述，增加負載當需較多之電流輸入，因此更須反電勢減低；欲得此，可減少磁流，或減低速度，正復相同。如所減磁流之比例，較反電勢為多，則將見速度實在增加，似為負載增加之結果。此種速度升高情形，可於差複激電動機見之，詳第 7-7 節。

7-3. 電動機之起動 若一電動機受重量之負載由靜止而起動，其起動轉力，須與滿載時之運用轉力相等或竟過之。如於起動時，磁流與滿載時之值相等，則由方程式(11)，可知如欲得適當之起動轉力，起動電流當與滿載值相等或稍過之。如其餘皆不變，磁流愈大，則起動電流或可愈小。當電樞靜止時， $E_a=0$ ，由方程式(7)，起動時之電流為 $i_a = \frac{V}{r_a}$ ，當甚明晰。故於起動時，應將樞路之小量電阻 (r_a 或 r_a+r_f) 加一起動電阻器，以限制流入之電流至適當之值。例如一 10 馬力，220 伏之分激電動機，於額定負載時，約需 40 安之電流，其電樞之電阻，約為 0.5 歐。若全電壓直接加於此電樞，則最初之電流為 440 安，即十倍於滿載時之電流。欲得起動電流限至滿載值，其應串聯於電樞之電阻，

$$\text{當爲} \quad \frac{220}{40} - 0.5 = 5 \text{ 歐}$$

但通常起動電阻器之電阻，每使初入電流較發生滿載轉力所需者為大。

第 234 圖(a)表示串激電動機起動電阻器之接法，分激式電動機則見第 234 圖(b)。圖(b)中有一可注意之點，即起動電阻器祇與電樞相串聯，故無論何時(包括起動時期)，分激場捲始終受全部電壓。(c)圖中示一錯誤之接法，因於起動時，分聯磁場電流大為減少而磁流及轉力亦均隨之而減，且如負載減至零時，其速度將過高至危險程度。



第 234 圖 起動電阻器之接法

若以 234 圖所示之普通電阻器，用於商用裝置時，則難免燒壞電樞之事發生；蓋設因一時發生阻礙，是機隨而停止，則以後電壓復加時，全部電壓將直接加於小電阻之電樞（或電樞及串激磁場）而引起大量之電流。欲免此種情形發生，電動機之起動電阻器每多附加『無壓釋放器』及『過載釋放器』；前者當線路電壓低落時，將自動使電阻器之起動桿回至原處；後者當電流因任何原因而過量時，將自動開斷電路，並將起動電阻插入。

無壓釋放器之運用乃恃乎一接於外線端間之電磁鐵。（普通電磁鐵之線捲匝數不宜過多，故每串聯一電阻以限制電流）。當線路電壓為額定值時，電磁鐵發生吸力而使起動桿留於運用位置；如電壓低至某一程度，則電磁鐵失其作用，而起動桿即因彈簧或地心吸力自動回至起動或停止位置。

過載釋放器之運用亦恃乎一電磁鐵，其線捲串聯與路流（或樞流）相通。如電流過大，則電磁鐵拉動柱塞而使起動桿回至停止位置。

各種電動機，除半馬力之下者外，皆用輔助起動設備。在小電動機中，樞阻消耗外加電壓之百分數較大號機為大，故樞阻本身可有限制起動電流之功用。但小號機可不用起動設備之更大原因，乃因小號機電樞

之慣性甚小，加速甚快，故反電勢增高甚速，而較大之起動電流可限至極短時間，不致使線捲過熱至損壞程度。

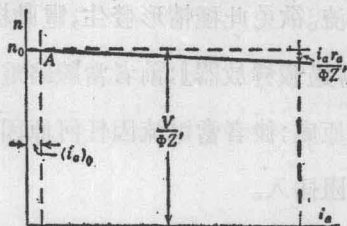
起動設備之敘述及其特性之分析，將留待後節。今假定電動機已開動至相當速度，試研究其運用之特性。

7-4. 別激電動機之特線

(a) 速度特線 假設外加電壓與磁場電流皆不變，則從速度方程式

$$n = \frac{V - i_a r_a}{\Phi Z'}$$

可知若無樞電流之去磁作用，則其分母將不變；而 i_a 增加時，速度依之漸減，如圖 235。以上假定 r_a 亦不變，換言之，即電樞保持其平常轉動時之溫度。故別激電動機之有固定磁激者，其速度可自調整。自方程式



(5) 及第 235 圖觀之，如 $i_a = 0$ 則

$n = \frac{V}{\Phi Z'}$ 。但實際上，如 $i_a = 0$ ，則既無轉力，亦不轉動。當電動機於零載時轉動，仍須稍有電流送入電樞，蓋電源應當輸入足夠之功率以供空氣阻力，磨擦力，磁滯及渦流諸能耗。圖上 A 點示樞流之最小值。速度 $n_0 = \frac{V}{\Phi Z'}$ ，可稱為理想之零載速度；如無各項能耗，則此速度可得，且 $E_a = V$ 及 $i_a = 0$ 。

改變 Φ 或 V 或二者同時改變，則速度可得大範圍內之變更，其理至為明顯。故欲速度之高昇，可以減少 Φ 或增加 V 。但用磁激之調準而改變速度，如乏特別裝置，其可能範圍至為有限；因增減磁激過一

第 235 圖 別激電動機之近似速度特線

表示每對磁極之安匝數(= $n_f i_f$)；縱坐標(由 O 而左)表示 $\Phi Z'$ 之值。吾人應注意此曲線與速度完全無關。在 OA 線上擇一樞流之適當比例尺，並在 OV 上擇一比例尺，以表示外加電壓。假設磁激不變，等於 OF_0 ，且外加於電樞之電壓 V 亦不變，等於 OE 。

由 E 點作一直線 EC 與橫線 EB 成 φ 角，而使相當於 $i_a = OA$ 時之截線 BC 等於 $i_a r_a$ ，其比例尺與 OV 同。於是反電勢為

$$E_a = V - i_a r_a = AB - BC = AC$$

同樣，作 $F_0 D$ 線與 OA 成 θ 角，使相當於 $OA = i_a$ 時之截線 AD 等於 $\frac{aZ i_a}{180 a}$ = 每對磁極之去磁安匝數，其比例尺與用於 OF_0 線者相同。

設如理想上零載情形，電樞無電流時($i_a = 0$)， $\Phi Z'$ 之值為 $F_0 G_0 = OL_0$ ，而理想零載速度為

$$n_0 = \frac{V}{\Phi Z'} = \frac{OE}{OL_0}$$

則在其他任何負載，如 $i_a = OA$ 時， DR 代表其去磁作用；其淨磁激之值減至 OF 而 $\Phi Z'$ 變為 $FG = OL$ ；同時反電勢為 $AC = OM$ ，因此速度為

$$n = \frac{V - i_a r_a}{\Phi Z'} = \frac{OM}{OL}$$

如此，相當於 i_a 各值之速度，可以算出；而欲得之 $N_0 P$ 曲線，亦由此結果而畫出。但此圖亦可完全由圖解法而得，茲述之如下：

在 $\Phi Z'$ 軸上擇一適當之點 Q 作 QN_0 線與 $L_0 E$ 相並行；於是

$$n_0 = \frac{OE}{OL_0} = \frac{ON_0}{OQ}$$

同樣，連接 L 與 M 並作 QN 線與 LM 相並行。

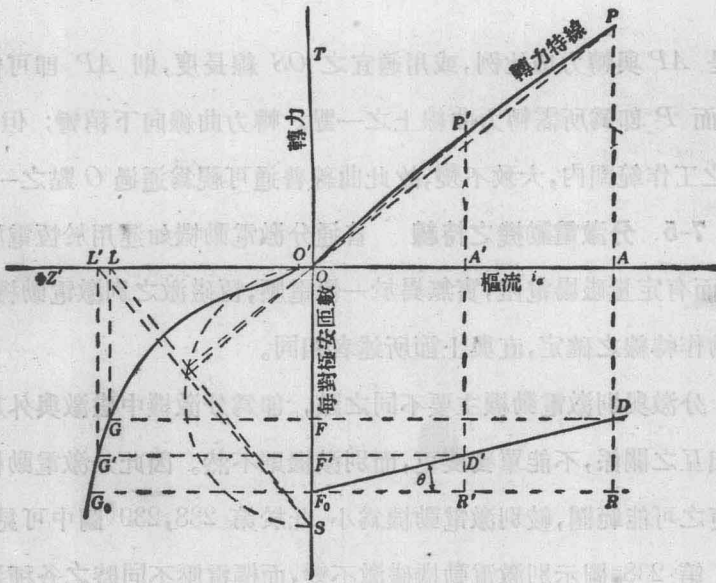
$$\therefore n = \frac{OM}{OL} = \frac{ON}{OQ}$$

OQ 既不變， ON_0 及 ON 各與 n_0 及 n 成比例，若選擇適宜之比例尺，即可用以表示速度。由 N 作橫線，與 A 點之縱線相交於 P 點，如是 P 即為所需曲線上之一點。用相同之方法，可得 P' 為相當於 $i_a = OA'$ 之點。因磁化線之屈曲，速度線當非為一完全直線。

(c) 轉力曲線 由方程式(11)，轉力為

$$T = 7.05 \Phi Z' i_a \text{ 磅呎}$$

依照第 236 圖，如 $i_a = OA$ 時，則得



第 237 圖 別激及分激電動機轉力特線之作法

$$T=7.05 FG \cdot OA=7.05 OL \cdot OA$$

或可寫為

$$\frac{T}{OA} = \frac{OL}{\text{常數}}$$

由此方程式，可作樞流與轉力關係之曲線。

在第 237 圖中，與 236 圖同式作縱橫坐標， $\Phi Z'$ 曲線及 $F_0 D$ 線。同上法決定 G 與 L 兩點，選擇任何適宜長距 OS ，作 LS 並作 OP 與 LS 垂直（用 OS 上之半圓為作圖線），使 OP 與 A 點之縱線相交於 P 點。由作法知

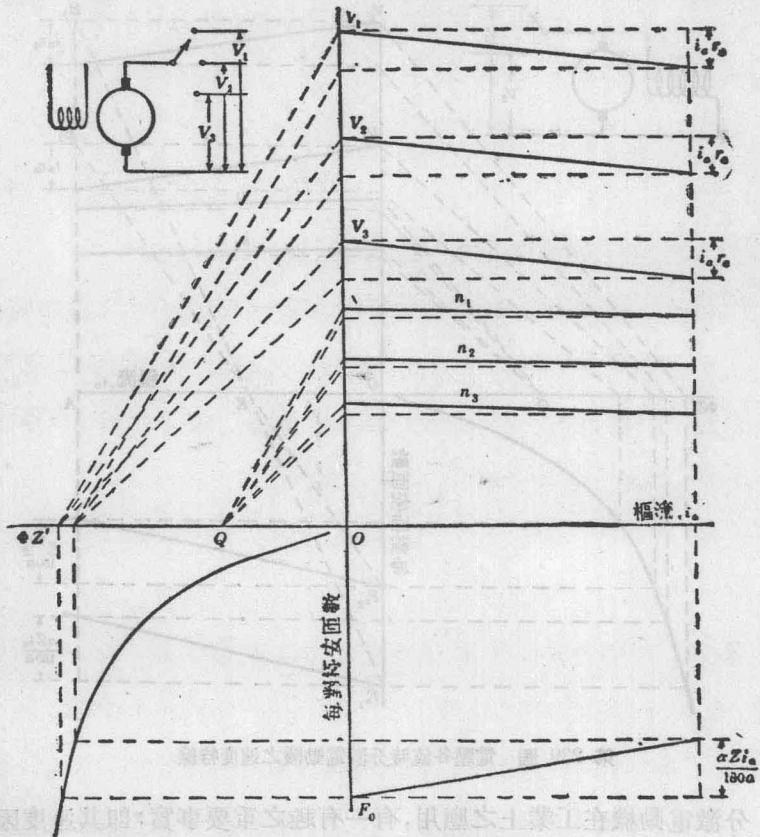
$$\frac{AP}{OA} = \frac{OL}{OS} = \frac{OL}{\text{常數}}$$

因是 AP 與轉力成比例，或用適宜之 OS 線長度，則 AP 即可代表轉力，而 P 即為所需轉力曲線上之一點。轉力曲線向下稍彎；但 Φ 在 i_a 之工作範圍內，大致不變，故此曲線普通可視為通過 O 點之一直線。

7-5. 分激電動機之特線 普通分激電動機如運用於恆電壓幹線下，而有定量磁場電阻，實無異於一恆電壓，恆磁激之別激電動機。因是，其動作特線之確定，直與上節所述者相同。

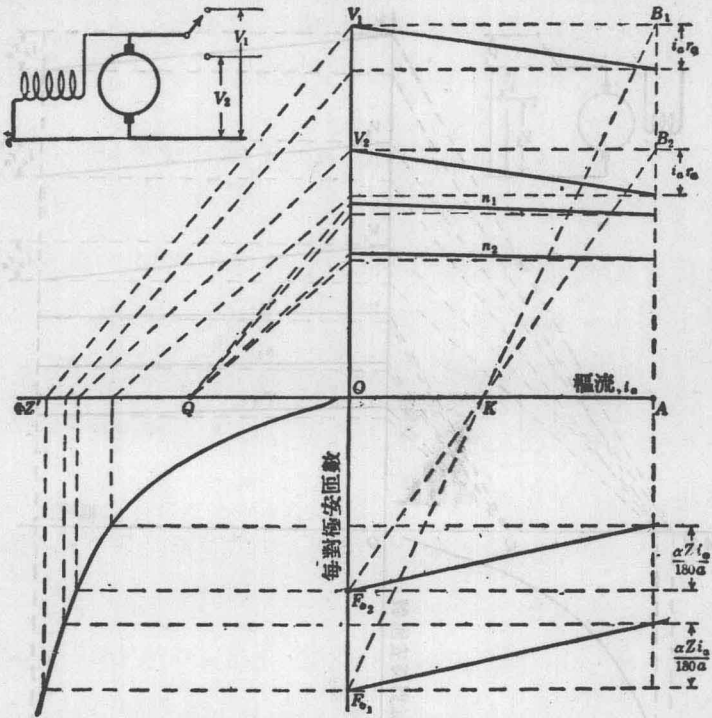
分激與別激電動機主要不同之點，即為分激機中磁激與外加電壓有相互之關係，不能單獨變更，而別激機則不然。因此分激電動機速度變更之可能範圍，較別激電動機為小，此於第 238, 239 圖中可見。

第 238 圖示別激電動機磁激不變，而樞電壓不同時之各種速度特線。第 239 圖示分激機之數種速度特線，其速度變更之範圍，較別激機



第 238 圖 電壓各值時別激電動機之速度特線

爲小，因如外加電壓過高則磁流近於飽和限度，過低則又入於磁化曲線之不穩定部分。其他限制速度變更範圍之原因，則與整流情形有關。圖 239 之作法甚易明白，蓋分激場流（因而場激亦然）與外加電壓成正比例，故如 OF_0 爲相當於 V_1 之場激，則欲求相當於 V_2 之 OF_0 ，可作 B_1F_0 線與 OA 相交於 K 點，再從 B_2 經 K 作線而與縱坐標相交，即得 F_0 點。



第 239 圖 電壓各值時分激電動機之速度特線

分激電動機在工業上之應用，有一有趣之重要事實：即其速度因溫度升高而增加。此由於場捲電阻因溫度升高而增加，激磁電流及磁流遂隨之而減，樞阻雖同時增加，使速度略有減低之傾向，但終以磁場之影響為較大。工業上所用之分激電動機，普通並不裝以磁場變阻器，如發電機然，故其場捲之設計，必使於運用溫度下，有適當之電阻，俾得所需之速度。標準設計之電機，在冷時與熱時滿載速度之差，約為較高值之 10%。

7-6. 串激電動機之特線

(a) 速度特線 自速度之普通方程式

$$n = \frac{V - i_a (r_a + r_f)}{\Phi Z'}$$

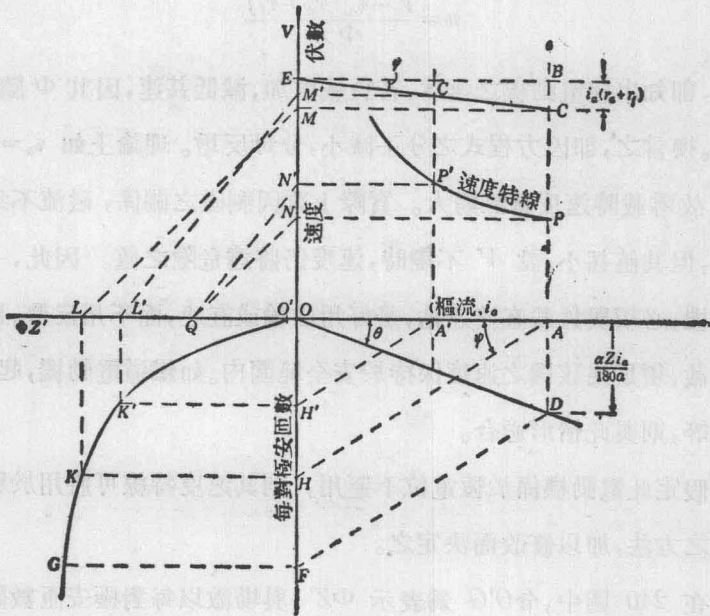
觀之，即知串接電動機之速度，若負載增加，減低甚速，因其 Φ 隨 i_a 而增加。換言之，即因方程式之分子減小，分母反增。理論上如 $i_a = 0$ ， $\Phi = 0$ ，故零載時速度為無窮大。實際上雖因剩磁之關係，磁流不致完全為零，但其值甚小，設 V 不變時，速度仍將達危險之值。因此，一串激電動機，必須與負載直接連結，最好用齒輪或直連，而不用皮帶。且其最小負載，須足使該機之速度保持於安全範圍內。如鐵道電動機，起重機，滾磨等，則與此情形適合。

假定此電動機係於恆電位下運用，則其速度特線可將用於別激電動機之方法，加以修改而決定之。

在 240 圖中，令 $O'G$ 為表示 $\Phi Z'$ 與場激以每對極安匝數關係之磁化曲線。令 OE 依比例尺表明恆電壓 V ，並作 EC 與橫線成 φ 角，而使截線 BC 依比例尺等於相當於 $i_a = OA$ 之阻落， $i_a(r_a + r_f)$ 。如此 AC 即為相當於 i_a 之反電勢。再作 OD 與橫線成 θ 角，使其截線 $AD = \frac{\alpha Z i_a}{180 a}$ = 每對極之去磁安匝數。

當樞流（即場流）為 $i_a = OA$ ，磁激為 $n_f i_a$ ，其中 n_f 為每對極之場捲匝數。設令 OF 代表相當於 i_a 之場激，以每對極安匝數計。作 DF 線，並作 AH 線與之並行，如是由 OF 線減去 $AD = FH$ ，即得淨磁激 OH 。其相當之 $\Phi Z'$ 值為 $HK = OL$ 。

$$\therefore n = \frac{V - i_a (r_a + r_f)}{\Phi Z'} = \frac{AC}{HK} = \frac{OM}{OL}$$



第 240 圖 串激電動機速度特線之作法

在 $\Phi Z'$ 軸上選擇一 Q 點並與 LM 並行作 QN 。從 OLM 及 OQN 二相似三角形，可得

$$n = \frac{OM}{OL} = \frac{ON}{OQ}$$

故知 ON 與速度成比例。由 N 點作橫線與 A 之縱線相交，交點 P 即為速度電流曲線上之一點。

因

$$FH = AD = \frac{aZ}{180a} i_a$$

$$OH = OF - FH = \left(n_f - \frac{aZ}{180a} \right) i_a$$

及
$$\frac{OH}{OA} = \tan \psi = n_f - \frac{aZ}{180a} = \text{常數}$$

故對於其他任何電流，如 $i_a = OA'$ ，欲定 P' 點時，僅須作與 AH 相並行之 $A'H'$ 線即得。

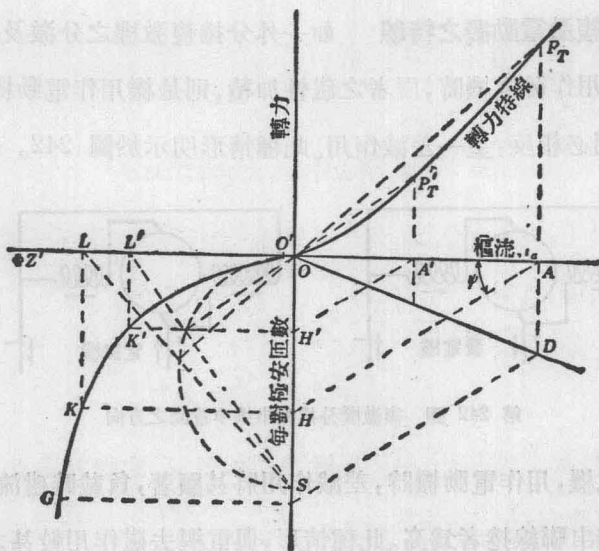
(b) 轉力特線 如前所述，當 $i_a = OA$ 時轉力為

$$T = 7.05 \Phi Z' i_a = 7.05 OL \cdot OA \text{ 磅呎}$$

擇一 S 點(圖 241)使 $OS = \text{常數}$ ，並作 OP_T 與 LS 垂直，

$$\frac{AP_T}{OA} = \frac{OL}{OS}$$

於是 AP_T 與轉力成比例，而 P_T 為轉力電流曲線上之一點。



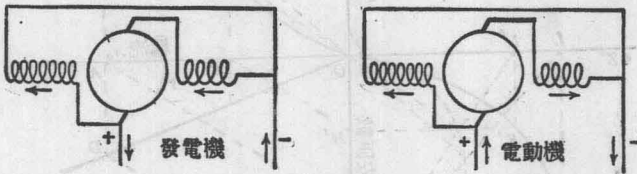
第 241 圖 串激電動機轉力特線之作法

串接電動機之轉力曲線與直線樣式相差甚遠，則以磁流因電流而變有以致之。如磁化曲線為一直線時，即 Φ 與 i_a 成比例，轉力當與 $(i_a)^2$ 成比例，曲線將為一拋物線，但實際上則為一較高級之曲線，介於直線與拋物線之間。

如欲作 OP_T 線等，與 LS 垂直，可先以 OS 為直徑作一半圓，然後由 O 作一直線經過 LS 與半圓相交之點。

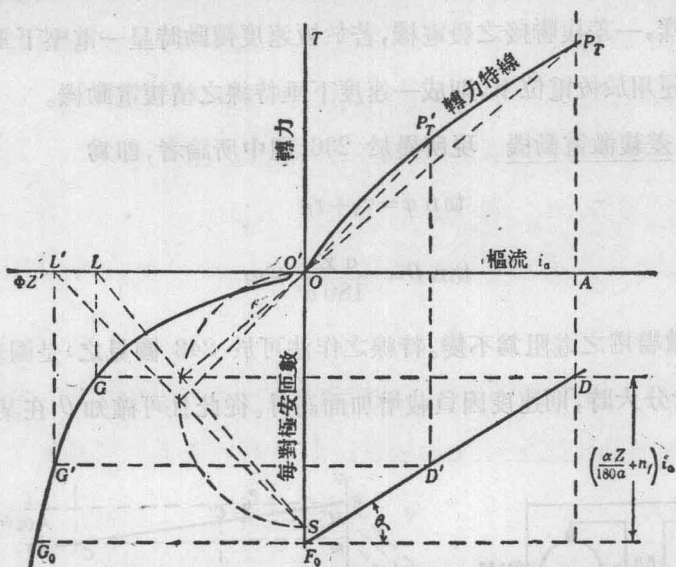
上述別激，分激及串激諸電動機之轉力曲線所示之轉力，乃依方程式(11)所得之總共發出轉力。用制動實驗所測得之實在轉力，每較總共轉力為小，因其一部分已用於內磨擦耗及鐵耗。有用轉力之曲線，可從總共轉力曲線之縱坐標上減去『消耗轉力』而得之，故在有用轉力曲線經過零值時， i_a 仍有相當之值。(參閱 285 圖)。

7-7. 複激電動機之特線 如一外分捲複激機之分激及串激線捲之接法，在用作發電機時，兩者之磁性加積，則是機用作電動機時，其兩線捲之作用必相反，呈一差減作用。此種情形明示於圖 242。設計為超

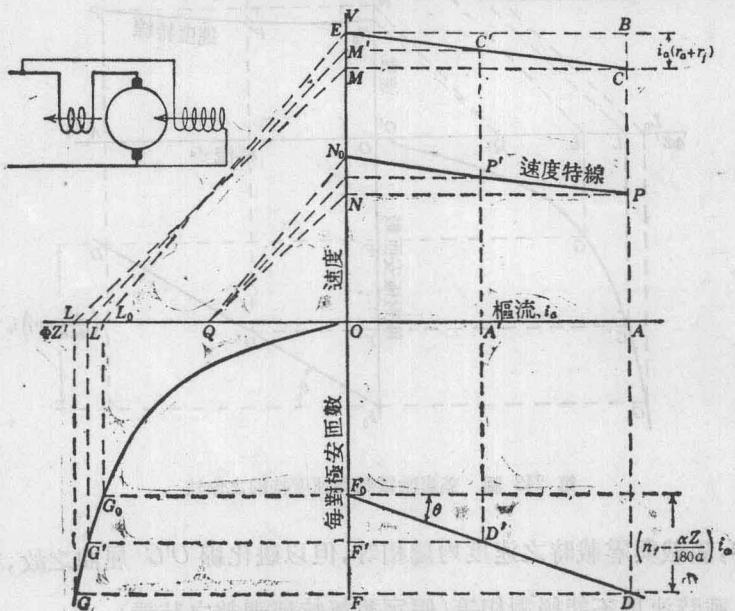


第 242 圖 複激機分捲與串捲中電流之方向

複激之發電機，用作電動機時，差減作用將甚顯著，負載時磁流減少，而速度將較無串聯線捲者為高。此種情形，與電樞去磁作用較甚之分激電動機相似。



第 244 圖 差複激電動機轉力特線之作法



第 245 圖 積複激電動機速度特線之作法

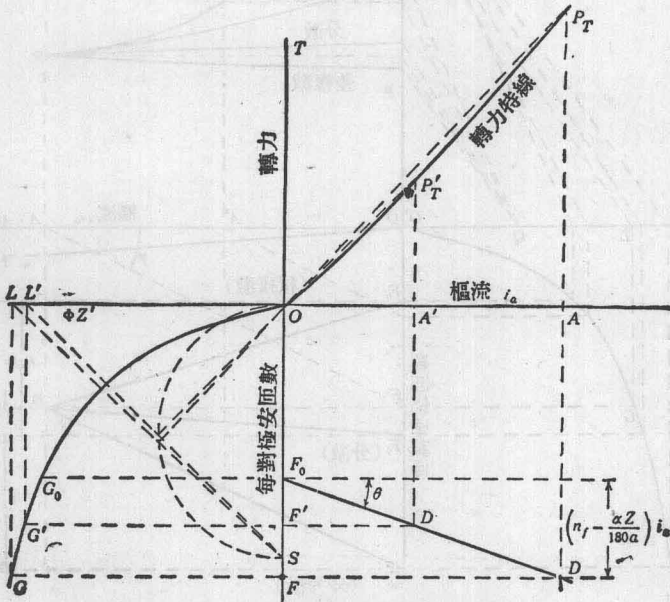
轉力曲線之作法，見第 244 圖，圖中 S 仍為定點。此曲線之向下彎曲，則以磁流因電流增加而減少之故。差復激電動機通常皆不用，因其速度上昇特線將使此機在有載時入於不穩定狀態。

(b) 積復激電動機 如圖 245 及 246 所示，

$$\tan \varphi = r_a + r_f$$

及
$$\tan \theta = n_f - \frac{\alpha Z}{180 a}$$

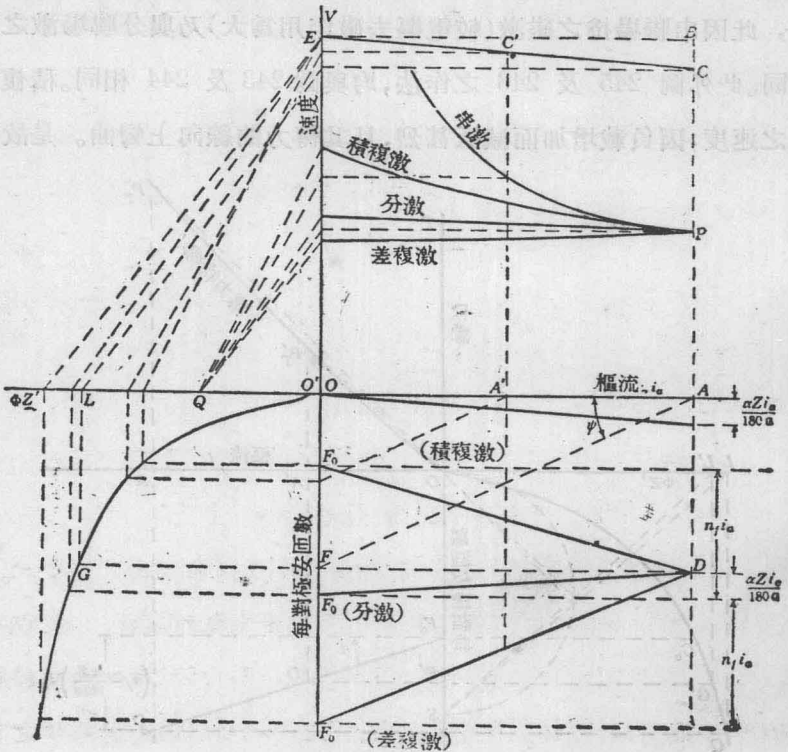
但 F_0D 線 (其斜度依 θ 而定) 依增激之方向而作，與第 243 圖適相反，此因串聯場捲之磁激 (較電樞去磁作用為大) 乃與分聯場激之方向相同。此外圖 245 及 246 之作法，均與圖 243 及 244 相同。積復電動機之速度，因負載增加而減低甚烈，且其轉力曲線向上彎曲。是故積復



第 246 圖 積復激電動機轉力特線之作法

激電動機之特線係在分激與串激電動機兩者之間，而與後者特別相異者，則在此機之速度，於滿載突然卸失時亦有一定限度而不致『跑散』。

7-8. 電動機特線之比較 如機架已具備，線捲可繞作串捲，分捲，或複捲，且如適當調準線捲或磁場變阻器，各種捲法時之滿載速度可使相等。在其他負載時，速度自不相同，依各式之特線而定。今如將各式機之速度電流曲線共繪於一圖上，則運用狀況即易得明顯之比較。此種圖乃如第 247 圖所示。圖中為簡單起見，分激機之阻落 $i_a r_a$ 乃用串激及



第 247 圖 速度特線之比較

爲常數，加速度即爲常數。電動機之總轉力與磁流及樞流 (Φi_a) 成比例，故在起動時期 i_a 應有定值而不變；蓋無論電動機爲串激，分激，複激，或別激，如線路電壓不變， Φ 亦即隨 i_a 而不變。

如在 i_a 引入樞路之前，磁流已達 Φ 之全值，則轉力之忽然發生或將損及電動機所拖動之機件，如裂斷齒輪或損傷其他部分。在串激機中，磁流與電流皆從零值同時建起，故起動時之衝擊得以緩和。在分激或複激機中，如於開動時將場路及樞路同時關閉，則因分捲之自感甚大，亦可減少開機時之震動。但樞路尙未連接而場流已達全值者亦非無有，下文將詳論及之。

從方程式(4)可得

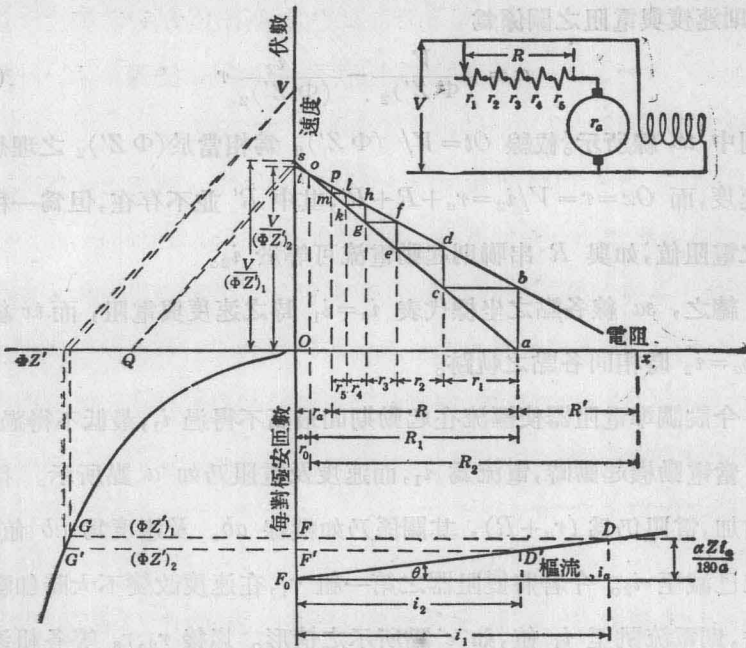
$$E_a = \Phi Z' n = V - i_a r'$$

故在起動時期如 Φ 及 i_a 皆爲常數，電阻 r' 應隨 n 而適當改變，俾使上式可以滿足，即

$$r' = \frac{V}{i_a} - \frac{\Phi Z'}{i_a} n \quad (12)$$

故如 $\Phi Z'$ 及 i_a 皆不變， r' 應爲 n 之直線函數。用液體或炭堆變阻器時，電阻可以連續變更，但普通電阻係由數組接成，故如逐步減去，其變更不能連續。此種逐步減阻，將使起動電流值改變，因而影響及於 $\Phi Z'$ 。今欲使 i_a 及 $\Phi Z'$ 之變化在相當限度內不致過分影響轉力及加速度，則起動變阻器逐步之電阻必須有適當之比例。

(a) 分激或別激式 (圖 249) 圖中磁化曲線與第 236 圖者同。作 $F_0 D$ 線與橫線成 θ 角，使二線間之截線，等於每對極之去磁安匝數。 $\mathcal{O} F_0$ 乃代表場激之定值。



第 249 圖 起動電阻器 (別激或分激電動機用) 之各步驟

令起動電阻之總值為 R , 故在起動時之樞流為

$$i_a = i_1 = \frac{V}{r_a + R}$$

如電流依此值不變, 速度與樞電阻之關係從方程式(5)可得

$$n = \frac{V}{(\Phi Z')_1} - \frac{i_1}{(\Phi Z')_1} r \tag{13}$$

上式在圖 249 中乃為直線 sa 。在速度軸上之截線 (相當於 $r=0$) $V/(\Phi Z')_1$ 為相當於磁化 $(\Phi Z')_1$ 之理想零載速度。在電阻軸上之截線 (相當於 $n=0$) 為 $r = V/i_1 = r_a + R$ 。但當電流達 i_1 值時, 電動機即加速, 反電勢自零值建起, 而樞流起始減少。假設樞流減至 i_2 , 而維持不

變，則速度與電阻之關係為

$$n = \frac{V}{(\Phi Z')_2} - \frac{i_2}{(\Phi Z')_2} r \quad (14)$$

如圖中 tx 線所示。截線 $Ot = V / (\Phi Z')_2$ 為相當於 $(\Phi Z')_2$ 之理想零載速度，而 $Ox = r = V / i_2 = r_a + R + R'$ ，其中 R' 並不存在，但為一種假定之電阻值，如與 R 串聯則起動電流可等於 i_2 。

總之， sa 線各點之坐標代表 $i_a = i_1$ 時之速度與電阻，而 tx 線則為 $i_a = i_2$ 時相同各點之軌跡。

今設調準電阻器使樞流在起動期間最高不得過 i_1 ，最低不得過 i_2 。

當電動機起動時，電流為 i_1 ，而速度及電阻乃如 a 點所示。待速度增加，電阻仍為 $(r_a + R)$ ，其關係乃如縱線 ab 。及速度為 ab 值時，電流已減至 i_2 。今若將變阻器之第一組 r_1 ，在速度改變不大時即驟然減去，則電流跳至 i_1 值，如 c 點所示之情形。以後 r_2, r_3 等各組逐步減去，其關係乃如級線 $abcd \dots p$ 所示。

若減盡起動電阻而僅餘 r_a ，則相當於 p 點縱坐標之 n 值將為

$$n = \frac{V - i_1 r_a}{(\Phi Z')_1} \quad (15)$$

變阻器之分組數為整數，故 i_1 及 i_2 之值非可任意選擇，乃視組數而定。吾人注意 $abcd \dots p$ 線將 oax 三角形分成若干相似之三角形，其相互關係如下：

$$\frac{r_1}{R'} = \frac{cb}{ax} = \frac{ob}{ax} = \frac{R_1}{R_2} = \rho \quad (16)$$

$$\frac{r_2}{r_1} = \frac{ed}{cb} = \frac{od}{ob} = \frac{R_1 - r}{R_1} = 1 - \frac{r_1}{R_1} = 1 - \rho \frac{R'}{R_1} = 1 - \rho \frac{R_2 - R_1}{R_1} = \rho \quad (17)$$

同樣

$$\frac{r_3}{r_2} = \frac{r_4}{r_3} = \frac{r_5}{r_4} = \frac{r_m}{r_{m-1}} = \rho \quad (18)$$

其中 m 為變阻器之分組數。

是故總電阻為

$$\begin{aligned} R &= r_1 + r_2 + r_3 + \dots + r_m = r(1 + \rho + \rho^2 + \dots + \rho^{m-1}) \\ &= r_1 \frac{1 - \rho^m}{1 - \rho} \end{aligned} \quad (19)$$

而

$$r_1 = R \frac{1 - \rho}{1 - \rho^m} = \left(\frac{V}{i_1} - r_a \right) \frac{1 - \rho}{1 - \rho^m} \quad (20)$$

上式中之 ρ 值可由(16)式求得,或即

$$\rho = \frac{R_1}{R_2} = \frac{r_a + R - r_0}{r_a + R + R' - r_0} \quad (21)$$

如 i_1 及 i_2 相差不大, r_0 將甚小,則圖 249 中之 $s, t,$ 及 o 點幾為相同,而

$$\rho \simeq \frac{r_a + R}{r_a + R + R'} = \frac{i_2}{i_1} \quad (22)$$

如 r_0 並非甚小,則可由代表磁化曲線之弗羅里方程式而計其值。假定

$$\Phi Z' = \frac{A \cdot F}{B + F}$$

其中 F 為淨磁激,以每對極安匝數計, A 及 B 為常數可從磁化線求得之。如樞流已知,淨磁激為 $(F_0 - Di_a)$,其中 F_0 為分激或別激場捲之

磁激,而 $D = \frac{aZ}{180 a}$ 。故當樞流為 i_1 及 i_2 時,

$$(\Phi Z')_1 = \frac{A(F_0 - Di_1)}{B + F_0 - Di_1} \quad (23)$$

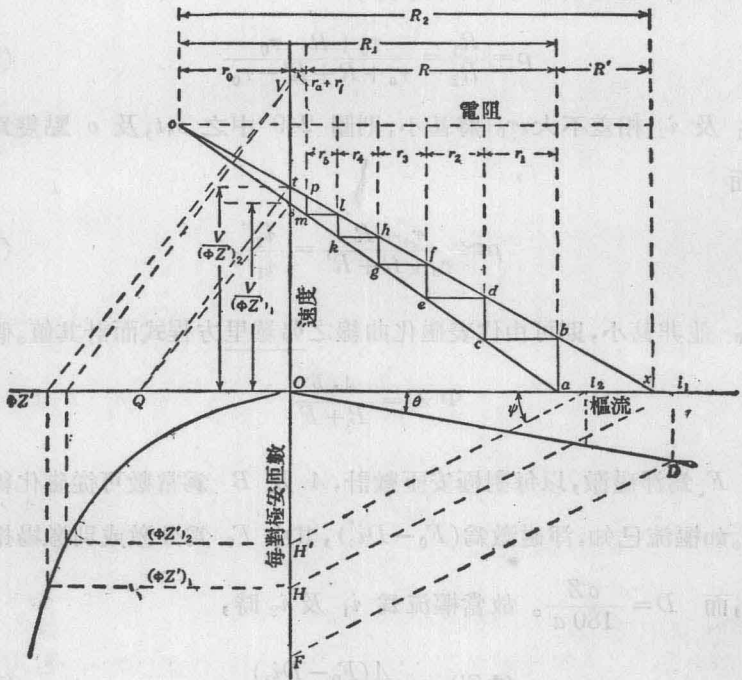
$$(21) \quad (\Phi Z')_2 = \frac{A(F_0 - Di_2)}{B + F_0 - Di_2} \quad (24)$$

但(13)及(14)式代表二直線 sa 及 tx ,故如從二式聯解 r ,則得 r_0 之關係為

$$r_0 \left[\frac{i_1}{(\Phi Z')_1} - \frac{i_2}{(\Phi Z')_2} \right] = V \left[\frac{1}{(\Phi Z')_1} - \frac{1}{(\Phi Z')_2} \right] \quad (25)$$

將(23)及(24)代入,化簡之,得

$$r_0 = V \frac{B \cdot D}{BF_0 + (F_0 - Di_1)(F_0 - Di_2)} \quad (26)$$



第 250 圖 起動電阻器(串激電動機用)之各步驟

(b) 串激式 (圖 250) 圖中所示 sa 及 ta 二線之交點現移至原點之左, 此為與圖 249 不同之處。(13) 及 (14) 式仍可應用, 但 r_1 之方程式略改如下:

$$r_1 = R \frac{1-\rho}{1-\rho^m} = \left(\frac{V}{i_1} - r_a - r_f \right) \frac{1-\rho}{1-\rho^m} \quad (27)$$

其中
$$\rho = \frac{R_1}{R_2} = \frac{r_a + r_f + R + r_0}{r_a + r_f + R + R' + r_0} \quad (28)$$

而
$$\left. \begin{aligned} r_a + r_f + R &= \frac{V}{i_1} \\ r_a + r_f + R + R' &= \frac{V}{i_2} \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

欲求 r_0 , 仍可用弗羅里方程式, 但此式在串激機應改為

$$\Phi Z' = \frac{A(n_f - D)i}{B + (n_f - D)i} = \frac{Ci}{B + Ki}$$

其中
$$C = A(n_f - D)$$

$$K = n_f - D$$

於是
$$(\Phi Z')_1 = \frac{Ci_1}{B + Ki_1}$$

$$(\Phi Z')_2 = \frac{Ci_2}{B + Ki_2}$$

代入(25)式, 則得

$$r_0 = - \frac{VB}{Ki_1 i_2} \quad (30)$$

式中負號表示 r_0 乃在原點之左。但代入(28)式時, 仍應改用正號。

(c) 積複激式 (圖 251) r 及 ρ 各值仍可由(27), (28)及(29)式

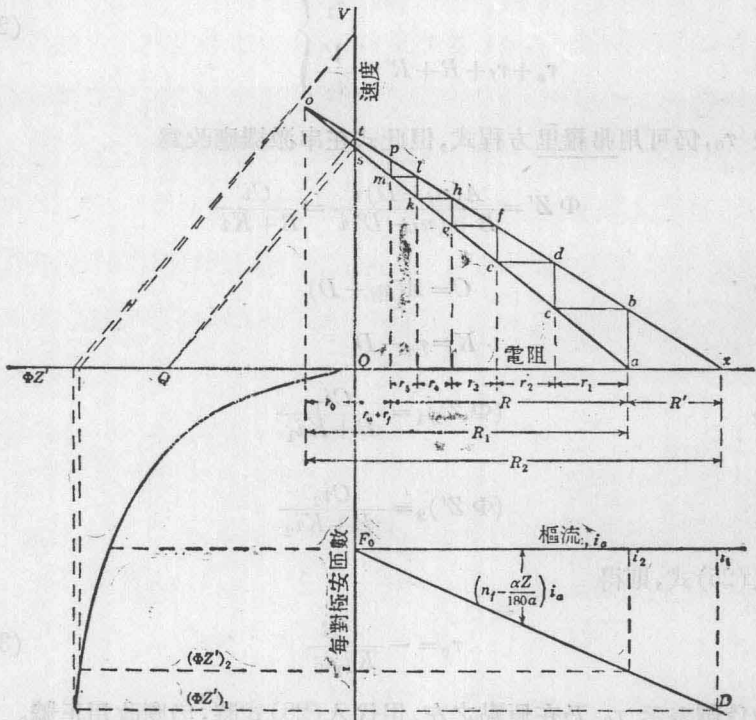
求得。欲求 r_0 時，應先注意

$$(\Phi Z')_1 = \frac{A[F_0 + (n_f - D)i_1]}{B + F_0 + (n_f - D)i_1}$$

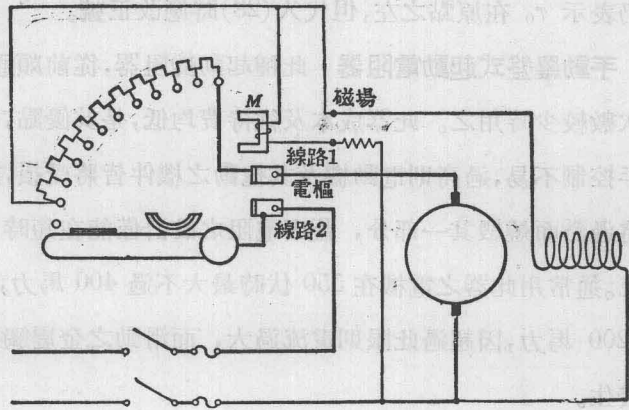
$$(\Phi Z')_2 = \frac{A[F_0 + (n_f - D)i_2]}{B + F_0 + (n_f - D)i_2}$$

代入(25)式，則得

$$r_0 = -V \frac{B(n_f - D)}{BF_0 + [F_0 + (n_f - D)i_1][F_0 + (n_f - D)i_2]} \quad (31)$$



第 251 圖 起動電阻器（積復激電動機用）之各步驟



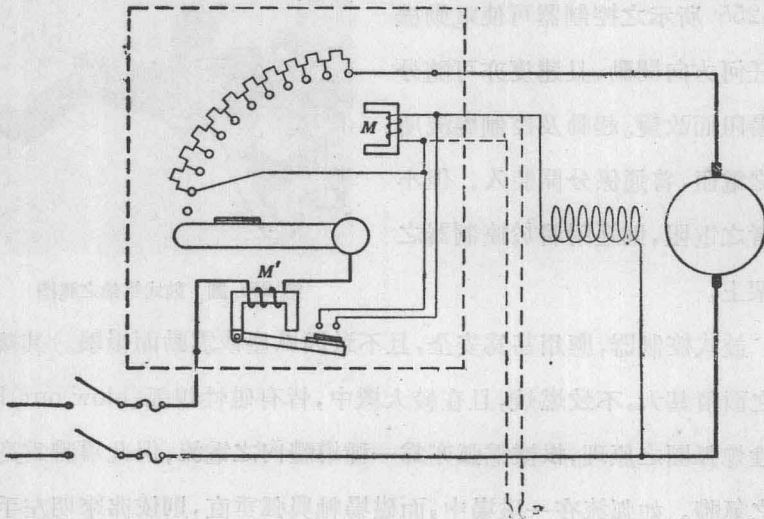
第 253 圖 四點起動電阻器(分激電動機用)

連接於線路。如經過 M 之電流低於某一定值，電磁鐵失其作用，而起動杆即因彈簧之力而回至起動位置。是故 M 之功用乃在防止電壓過低。起動變阻器，或加一接觸鑰 C ，如圖 252 所示。此鑰係銅彈簧片所製，可於起動杆移至運用位置時將樞流逕接於外線路。

設電路總鑰忽開，電動機因而停止，變阻器之起動杆(如圖 252 所示)並不立即回至原處。蓋此時電動機改作發電機，仍有電流經過樞捲，場捲及電磁鐵線圈所組成之閉合周路。待電樞所儲之動能及磁場所儲之磁能逐漸消耗，發電機作用減少，電流亦即不足吸引起動杆。依圖 253 所示之接法，如總鑰開斷，起動杆移回較速但磁場之儲能則仍經電樞而消散，並無損害之影響。

三點起動變阻器，於場路開斷時，足以保護電動機不致過速或跑散，蓋場流忽斷，起動器即回至停止位置。

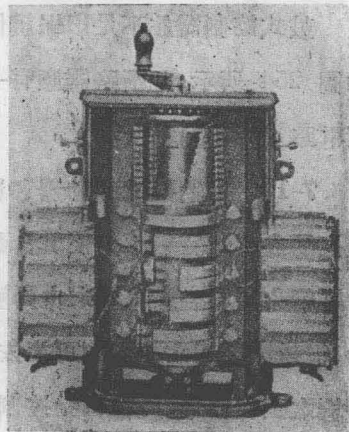
過載之保護法可依圖 254 所示，或用斷路器亦可。圖中過載釋放



第 254 圖 三點起動電阻器及過載釋放圈

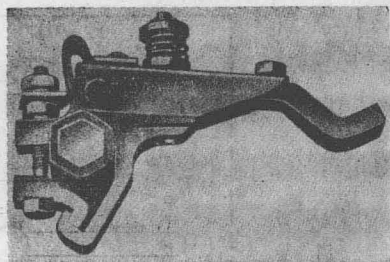
圈 M' 作用一接連於 M 兩端之旋臂，起動杆即可使回至原處。又如在 P 點欲按鈕而停機，則可用虛線所示之接法。但此附屬周路之電阻必較 M 圈之電阻甚小，俾在並接時可分去 M 之大部電流。

7-11. 鼓式控制器 如電動機運用時，需要時常開關，換向，及改變速度，則羅盤式起動器尚不夠結實，宜改用鼓式手控制器。圖 255 示此種控制器用於可調速電動機時之接法。連接之次序乃依鼓上銅片之大小及位置而定，各銅片與觸指相接如第 256 圖所示。



第 255 圖 鼓式控制器

圖 255 所示之控制器可使電動機在任何方向開動，且速度亦可隨分捲場阻而改變。起動及控制場流所用之電阻，普通係分開裝入，但小號者之電阻，則逕附着於控制器之外架上。



第 256 圖 鼓式電輪之觸指

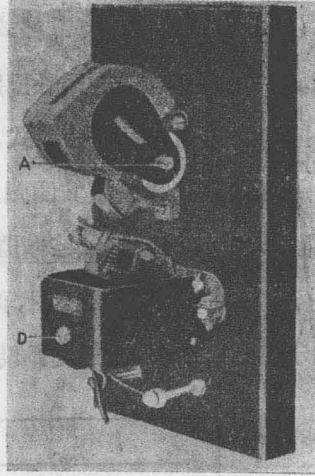
鼓式控制器，應用甚為安全，且不致因風塵或震動而損壞。其接觸處之面積甚大，不致燃燒，且在較大機中，皆有磁性熄弧(blow out)圈。磁性熄弧圈之原理，根據電弧亦為一種導體內之電流，但此導體為高溫度之氣體。如弧流在一磁場中，而磁場軸與弧垂直，則依弗來明左手定則，電弧將受一側力而延長。弧路延長則阻力增長，而後發生斷弧。此種熄弧磁場之線圈乃與所欲斷之電流串聯。實際上電弧限於極小地位，且與外部絕緣，俾他部不致受損。

鼓式控制器並不足以保護低壓及過載。此種保護法應用斷路器，約如圖 254 所示。此斷路器應有一吸引圈接於外線路，如電流過高，即開斷電路。

7-12. 自動磁性起動器 羅盤式及鼓式起動器，雖亦可改用電動機拖動或利用空氣壓力使其自動，但普通均用手控制。依目前趨向，起動器皆改用電磁鐵控制之自動觸頭，蓋如此則在遠處按鈕即可控制自如。電磁鐵運用主要觸頭可使依照一定次序，故運用者可專心注意於拖動機之工作情形。此種自動控制在大電動機殊為必要，例如滾磨高速電梯，起重機，及車床等均已逐漸改用。

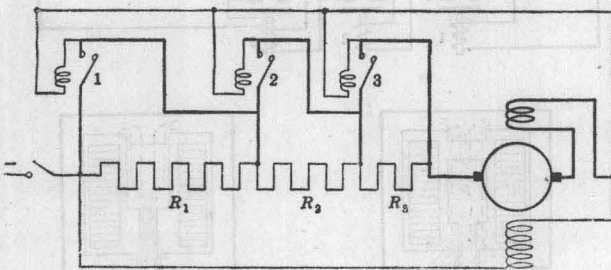
自動起動器因設計之不同可分為下列數種，即：(a)反電勢式；(b)；串聯繼電及串聯鎖鑰式；(c)限時式；(d)限時限電流式。茲分別略論之：

(a)反電勢式^① 反電勢隨電動機轉速而增加，故電刷間之位差亦自靜止時之零值逐漸增加，至滿載時則近於端電壓值。如磁性接觸器之線圈(如圖 257)接於樞端，其中電流即隨速度及反電勢而增。待樞電壓達某一定值(此值視電磁鐵之氣隙大小而定)，接觸器閉合一部分，起動電阻即被短接。今若用數接觸器，分別在各級電壓時閉合，則起動電阻即可逐步減去。



第 257 圖 直流接觸器

上法因各接觸器須分別調準，仍有不便之處，不如改用第 258 圖之接法。在起動時第一線圈之電壓為線路電壓減去 R_1 之位落；待速度增加，總電流



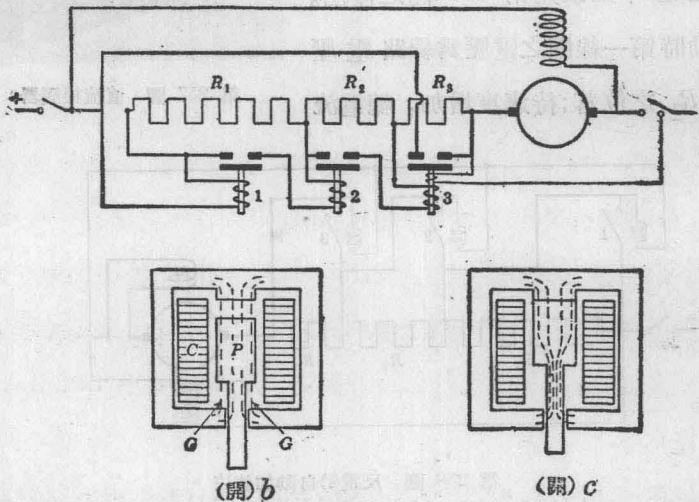
第 258 圖 反電勢自動加速法

① H. D. James, "Controllers for Electric Motors"

減少, R_1 之位落亦減, 而第一線圈中電流即增至閉合第一接觸器之值。 R_1 既受短接, 總電流忽增, 但當速度繼增, 電流又減, 直至第二線圈上之電壓足以閉合第二接觸器。同樣, 在樞電壓將近線路電壓時, 第三接觸器即起作用。

(b) 串聯鎖鑰式 反電勢式接觸器之閉合圈係分聯式, 故依電壓而作用。今如改用串聯式, 則各圈將依電流而作用, 如圖 259 所示。但用電流控制之線圈亦可作分聯式, 其由線路所通之電流則經過附屬觸頭, 另由一串聯繼電器控制其開關。

圖 259 示美國電氣控制器製造公司所製自動起動器。當總鑰開時, i_1 先流過第一接觸器之線圈, 再經 R_1, R_2, R_3 而至電樞。第三接觸器另有分聯圈接於樞端, 但起動時反電勢甚小, 不足以發生作用。第一接



第 259 圖 串聯鎖鑰式控制法

觸器之電磁鐵構造甚為特別，故有一延遲作用，須俟電流減至 i_2 值，方能閉合使 R_1 短接而第二線圈即受電流。第二線圈所受之電流初亦近於 i_1 值，但因同上之特別構造，第二接觸器之閉合亦可延遲至電流減為 i_2 時。 R_2 既短接，第三線圈即受電流，再經過同樣之延遲，第三接觸器即閉合，而電樞即直接連於總線。於是上述三接觸器之串圈均失其電流，而總連接之維持，乃由第三接觸器之分擔負其責。

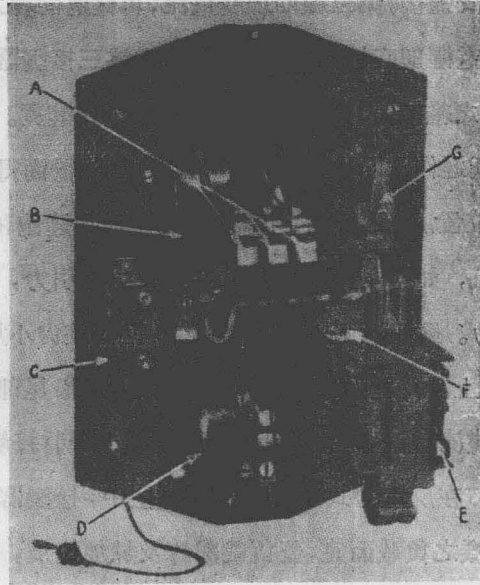
電磁鐵之延遲作用乃由圖 259 (b) 及 (c) 之設計而得。在開斷時，柱塞 P 占 (b) 之位置。待電流 i_1 初通， P 之尾部既達飽和，大部磁流之路線即經過空氣，如 G 所示。 G 之磁流發生下引力， P 上氣隙中之磁流發生上吸力。雖上吸力較下引力為大，但其差尙小於柱塞之重量，故 P 仍不能向上。待經過串圈 G 之電流減少， P 尾部不再有飽和狀態，氣隙 G 之磁流隨減，向上之力加大， P 遂上升將接觸器閉合。

(c) 限時式 在反電勢式及串聯式控制法中，接觸器短接各組電阻之快慢，視電動機之負載而定，蓋負載影響及於加速度，而加速度與反電勢之增加或開動時電流之減低率有關。且用反電勢法時，線路電壓如過高，分聯圈或使接觸器閉合過早，過低則或竟不能閉合，故情形甚為複雜。同樣，如用串聯法則在輕載時速度增加過速，電流之變化亦快，連鎖鑰不及依次作用，而接觸器或不能閉合。為免除上述各弊起見，故有限時式之設計，即各組電阻之除去皆依一定時間，而各時間另有限時設備限定之。

欲得一定時限，可用一電動機經適當齒輪拖動一鼓式控制器，調準電動機之速度即可調準時限。或用電動機拖動凸輪 (cam) 而使接觸器

依次閉合。但普通限時設備，多用與鐘表相似之擺輪。

圖 260 示奇異公司製限時式起動器。此器有一可調準之擺，與鐘



第 260 圖 定時限控制器

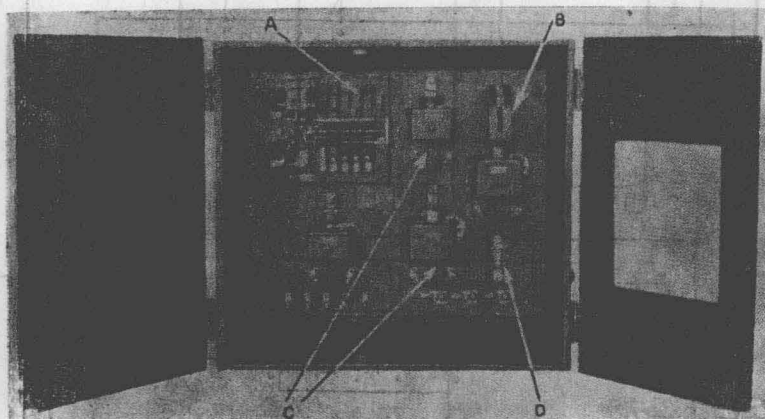
A. 加速觸指； B. 線路觸指； C. 過載繼電器； D. 限時機件； E. 運用多

指接觸器之線圈； F. 多指接觸器； G. 輔助觸指。

擺相似，其總加速時期約自六秒至十秒。此項機件經棘輪 (ratchet) 及
 較盤掣 (pawl) 而與接觸器之加速觸指相接。當螺管閉合線路觸指時，

加速觸指亦有閉合之趨向，限時機件之齒輪即因此轉力而轉動，但有擺輪加以限制，故加速時間仍為一定。

圖 261 示另一式之起動器，其連接圖見第 262 圖。一部分加速觸

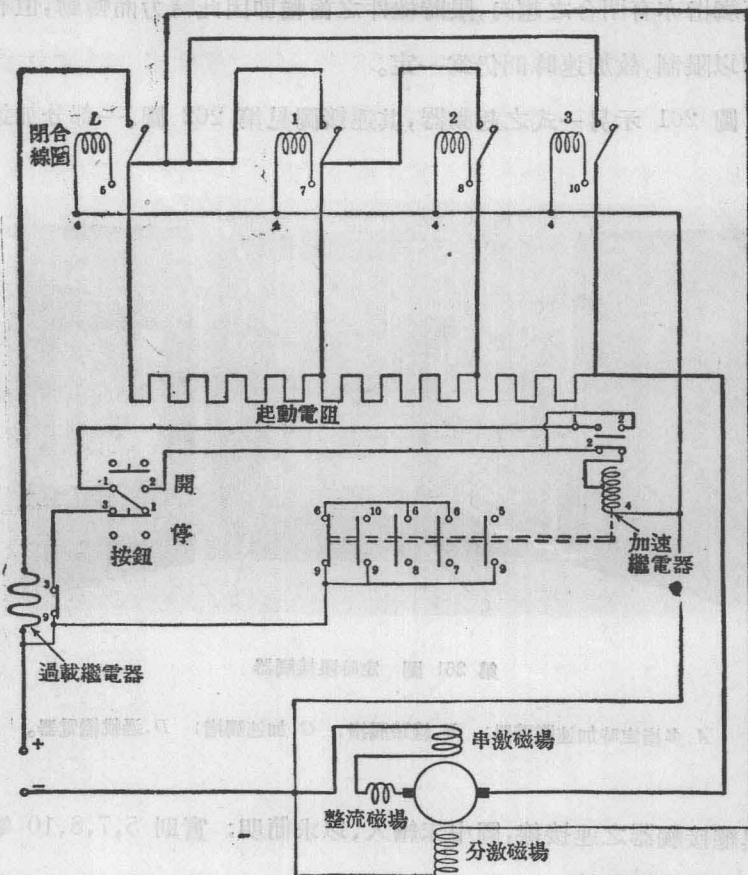


第 261 圖 定時限接觸器

A. 多指定時加速繼電器； B. 線路觸指； C. 加速觸指； D. 過載繼電器。

指與總接觸器之連接線，圖中未繪入，以求簡明；實則 5, 7, 8, 10 等同數字各點均應互接。

當按起動鈕時，圖 262 所示之線路接觸器， L 及加速繼電器皆受作用。閉合 L 即將電動機經起動電阻而接於線路。今若將限時機件依預定時間調準，則到此時間，6 與 7 二指相接，第一組電阻受短接而第一接觸器即生作用。其他各組電阻亦同樣依一定時間而除去。待最後加速接觸器閉合，6 與 9 二點即斷連，而中部各接觸器遂失其作用。

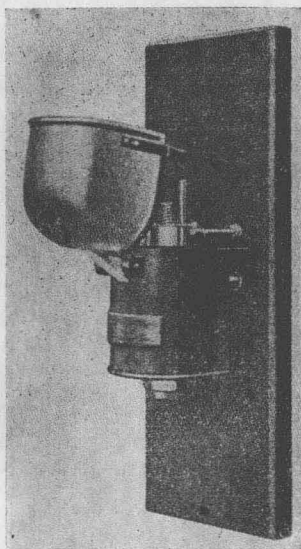
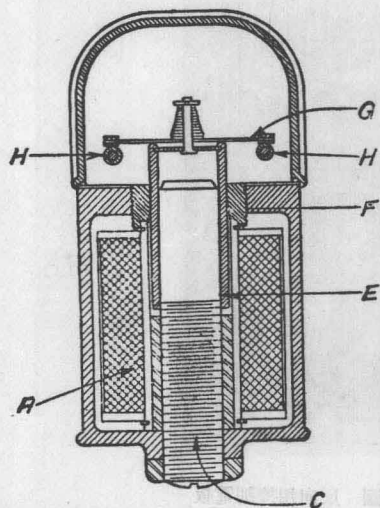


第 262 圖 圖 261 所示起動器之接線圖

(d) 限時限電流式 美國電氣控制器製造公司近將限時式，及串聯式控制方法合而為一。加速時每步驟所容許之時間，可依電動機之負載而自動改變，其時間限度約自 0.01 秒(輕載)至 2 秒(重載)。如僅用限時控制，電阻依一定時間而除去，但電動機在重載下或不及達到相當速

度，則電流將至甚高。限時限電流式則當重載時，每步驟容許較長之時間，故電流可不致過高。至於電動機陷於不動之危險，則另有過載繼電器保護之，遇電流過大時即將供電路開斷以免過熱。

加速繼電器爲此機件之主要設備，如圖 263 所示。串聯圈 *A* 所生之磁流，由鋼鐵心 *C*，經非磁性隙 *F* 及圓筒形之外殼，而成一周路。



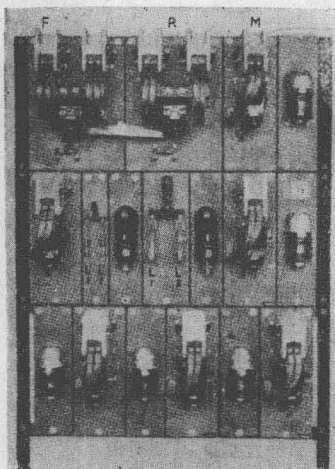
第 263 圖 限時限電流式加速繼電器

C 之上部爲一鋁質之袖管，上與接觸杆 *G* 相連。當 *G* 在最低位置時，固定觸頭 *H* 乃受其橋接。

經過 *C* 之磁流變更時，*E* 中即感應電流，蓋 *E* 乃相當於單匝之導體與 *C* 之磁流相鏈。依照侖茲定律，此感生電流與原來電流 *A* 之方向適相反，故有一相拒之力，如 *A* 之電流變更愈大，此作用亦愈速而愈大。如此袖管 *E* 雖有上昇之趨向，但於經過 *F* 之磁流時，*E* 中

感生渦流，再加地心吸力作用，故 E 不但不能上昇，且仍將下墜。下墜時又因經過 F 之磁流而生渦流，其方向適相反，故下墜受延遲，而 G 與 H 之接觸亦隨之延緩。 A 之電流愈大， F 之磁流亦愈大，而延遲作用隨之增加，故 H 受接觸之時間亦遂加長。

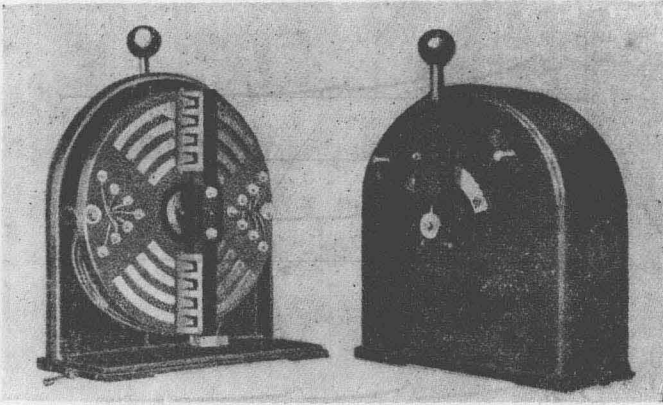
根據上述原理所製之控制電板，如圖 264 所示，其總控制鑰見第



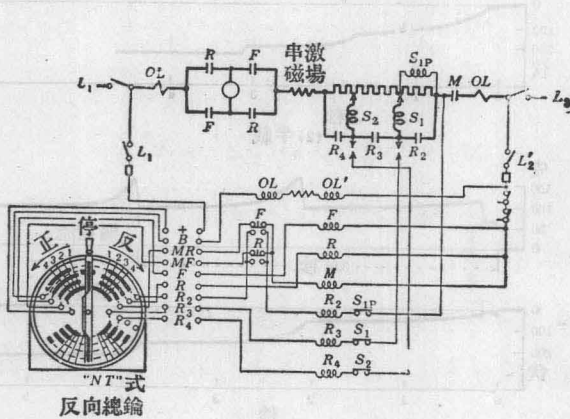
第 264 圖 反向用控制電板

265 圖。圖 266 示詳細連接圖，起動電流及樞電壓之波形則見第 267 圖。樞電壓約與速度成正比，其不成正比之程度視主要磁流與定值之差異而定。

從第 266 圖之接線情形，可知總電鑰可於任何方向，忽從停開位置移至全速度位置，而限時限電流繼電器即順次序自動作用。但如總電鑰杆移至中部某一步驟時，電動機僅加速至相當於該步驟樞阻之速度。括塞繼電器及接觸器之作用則於下面第 7-25 節詳述之。

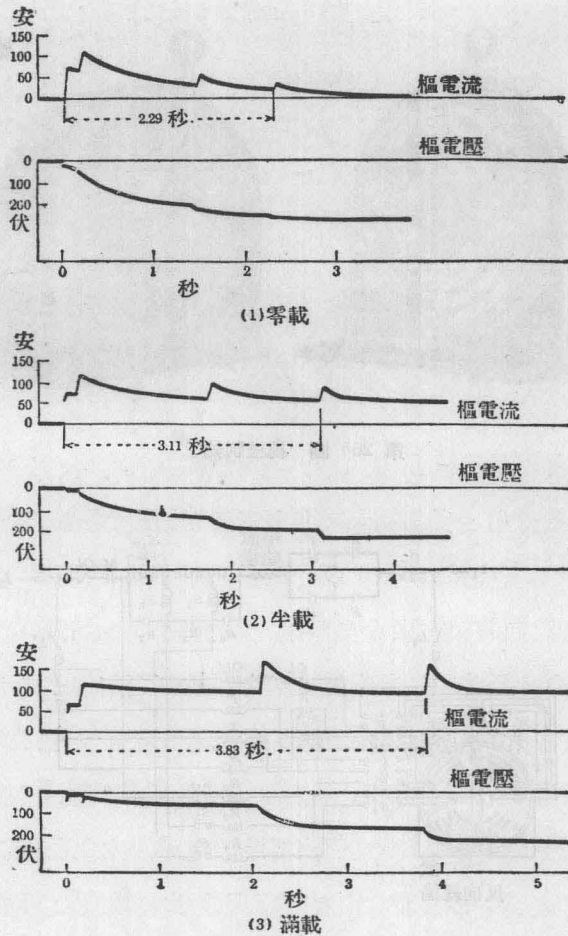


第 265 圖 總控制箱



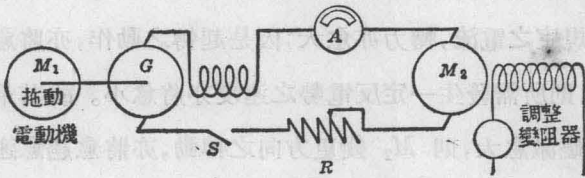
第 266 圖 反向控制接線圖

L_1, L_2 = 主要線路刀鉗; M = 斷路器; OL' = 過載重接圈; R = 反向接觸器;
 R_3, R_4 = 加速接觸器; L_1', L_2' = 控制周路刀鉗; OL = 過載跳開圈; F = 正向接觸
 器; R_2 = 插入接觸器; S_1, S_2 = 限時限電流繼電器; S_{1P} = 插入繼電器。



第 267 圖 起動電流之波形圖

7-13. 反電勢，倒轉電動機 反電勢之存在，可由 268 圖之連接法，得絕好之證明。設 G 為一串激發電機，以一適合之電動機 M_1 拖動之，



第 268 圖 倒轉電動機之接法

其速度不變。此發電機經電鑰 S 及調整電阻 R ，以通於一無載別激電動機 M_2 之電樞。 M_2 之磁激則由一適宜來源供給恆量電流而得。

如周路之電阻小於某臨界值時，電鑰 S 一經關閉，則此串激發電機將建起電壓及電流。同時， M_2 之速度高昇，而其反電勢亦依之增高，以致此周路中用以發生電流之有效電勢，乃為發電機 G 與電動機 M_2 兩電勢之差。故電流於升至某一值後即向下低降，而 G 所發出之電勢亦隨而減低。同時 M_2 因原有動量 (momentum) 有保持速度之傾向，其反電勢因是勝過 G 所發出之電勢，故其周路內之電流，因而變向 (可用一雙向電流計測見之) M_2 遂暫變為一發電機，拖動 G 使成一電動機，而旋轉之方向適與 M_1 相反。但 M_2 除旋轉能外，既無他種拖動力，故不久亦即停止其轉動。但因周路中電流方向之改變， G 之剩磁亦已改向，故當 M_2 停止時， G 將從行變成發電機，惟其極性則與初時相反。於是 M_2 復於另一方向轉動，迨其反電勢勝過發電機時，則又復停止。如此繼續變換，成循環之現象。

電阻 R 之作用，僅以限止過大之電流，電阻之值則視實驗所用機而定。 M_2 起動之時率，視電樞之轉動慣性 (moment of inertia) 與其

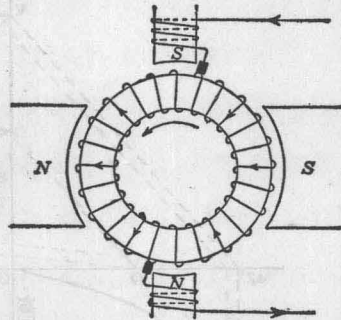
轉力而定，而轉力則又係於 M_2 激磁電流之大小。 M_2 之磁激愈大，則對於任一規定之電流，轉力亦愈大；因是起轉之動作，亦將愈速。再者，磁激愈大，則所需發生一定反電勢之速度亦將愈小。故其最後之結果，如 M_2 之磁激愈大，則 M_2 變更方向之轉動，亦將愈趨愈速。

以上之理論，可以解釋為何串激發電機不能作蓄電池充電之用。蓋於充電時，電池之反電勢逐漸增加，周路內之有效電勢漸致減低；因電壓之減低而其電流亦趨低減，而此發電機之電壓亦將減低。電流因是繼續下降而終於零；於是蓄電池將放電而有轉動發電機使為電動機之趨向。

7-14. 差複激電動機之起動 差複激式電動機罕有用於實際者，蓋在大多情形下，分激電動機之略垂速度特性，已能充分滿足恆速度之條件。再者，差複激電動機於重載時每易『快跑』(racing)，因多量電流經過串激場捲，磁流大減，有以致之。此種電動機當起動電阻器之柄轉至第一觸點時，亦易在錯誤之方向轉動，蓋分激線捲之匝數較多，電感亦高，分激場流之昇高因以被阻，而串激線捲則電感既少，電流易入，或可勝過分激磁場之磁化作用，因而改變磁流，及轉動之方向。在此種情形之電動機，如未受負載，則將迅速轉動於謬誤方向，因是發生充分之反電勢，以減少電流與轉力。其電樞所得之動量或使之暫為一發電機，並反送電流至線路。同時分激場流已升起，迨電樞因轉力之減低或旋轉能消失而停止，反電勢既無，則巨量之電流即將經過其電樞及串激場捲。於是此機即在正當之方向轉動。但如始動電流頗大而使串激磁場仍勝過於分激者，則將另得一反向之轉動。此種過程將繼續不已，除非是機

設計之常數，能不與其電樞振盪^①之自然周期相符合，而使繼續之衝擊漸形消滅。

分激而有整流極之電動機，如其電刷安置未妥，或亦將有以上同樣之情形發生。普通整流軸與整流極軸恰合，但如其電刷偶依轉動之反向而後移(如 269 圖)，則整流極將發生一部分與主極相反方向之磁流，因是其特性亦一改而如差複激電動機矣。



第 269 圖 整流極電動機電刷後移時之差復影響

7-15. 分激電動機速度之控制 觀察電動機速度之基本方程式

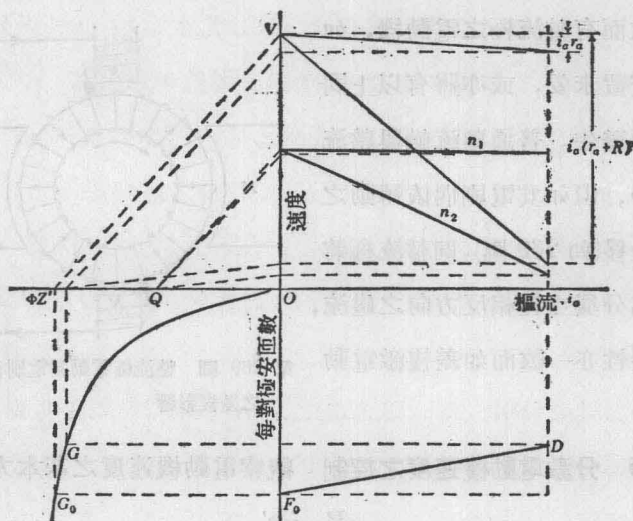
$$n = \frac{V - i_a r'}{\Phi Z'}$$

可知調節速度之主要方法約有三種：(一)變阻控制法，乃將電阻 r' 變換 (r' 包括電樞之電阻 r_a)；(二)電壓控制法，將外加電壓 V 變換；(三)磁場控制法，將磁流 Φ 變換。更有一法，有時用之，即如電樞有雙線捲及雙整流器時，則或串聯或並聯可以變換 Z' 。

(a)變阻控制法 此法可用一可變電阻與電樞串聯(但非於幹線或磁場周路上)使其有效電阻增加。如此能使其速度特性曲線有顯著之下垂特性，而其下垂斜度，與樞捲及外加電阻器合併之電阻成正比，如圖

① Ludwig, L. R., "Effect of Transient Conditions on Application of Direct-Current Compound Motors," Trans. A. I. E. E., Vol. 47, p. 599. April, 1928.

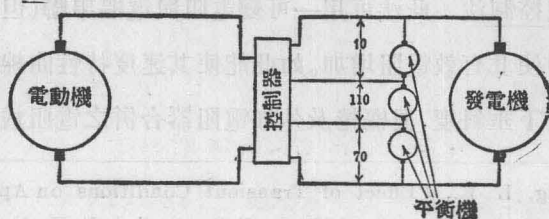
270 所示(此圖作法,與 236 圖大致相同)。電動機用此法者,其速度調整甚劣,蓋速度隨負載之變動將甚大,且樞流通過外加之電阻器,耗



第 270 圖 串聯電阻對於速度之影響

損有用之功率,效率上殊不經濟。故工業應用上,多不採用此法,但在實驗室及特種試驗時,採用極稱便利。又如電動機所拖動機件之速度改變,需要一定步驟時,則上法亦為合宜。

(b) 電壓控制法 用一平衡機組如第 271 圖之連接,使主發電機

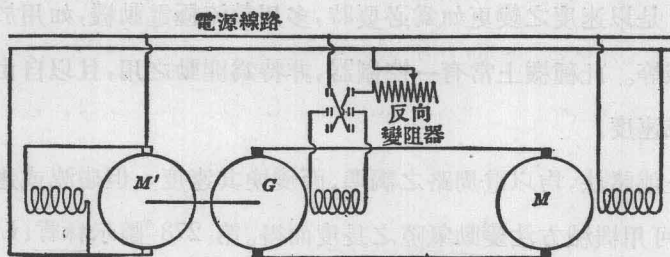


第 271 圖 電動機之速度調整——電壓控制法

或匯電條上之電壓，分爲數份，則可於數種不同之電壓中擇一加於電動機電樞而發生其相當之速度，如第 238 圖所示。在某一外加電壓時，其速度大致不變，且與外加電壓成正比。在規定電壓時，滿載與無載速度之改變，常在百分之二至十之間，電動機大者約百分之二，小者約爲百分之十。但當電樞之周路變換時，分激場捲上之電壓不應改變，俾場內磁流，可保持不變。變換電樞連接時，乃用特種之控制器，頗似普通電氣鐵道電動機中所用者。

如 271 圖之排列法，可以六種不同之電壓，即 40, 70, 110, 150, 180, 或 200 伏，加於電動機，而得六種不同之速度。界於此間之速度，可用與分聯磁場串聯之變阻器調準之。此法常用以轉動全工場之機械，如車牀，鑽牀等。其不合算處則在配電路所用銅線甚多，成本亦大。

電動機用以轉動戰艦內之礮位或船舵等工作時，其速度之增加與減少，均須極均勻，而轉動之方向，須可變換，則可用黎阿那(Ward Leonard)制。第 272 圖中，電動機 M 之速度須待調整，其磁場周路



第 272 圖 黎阿那制速度控制法

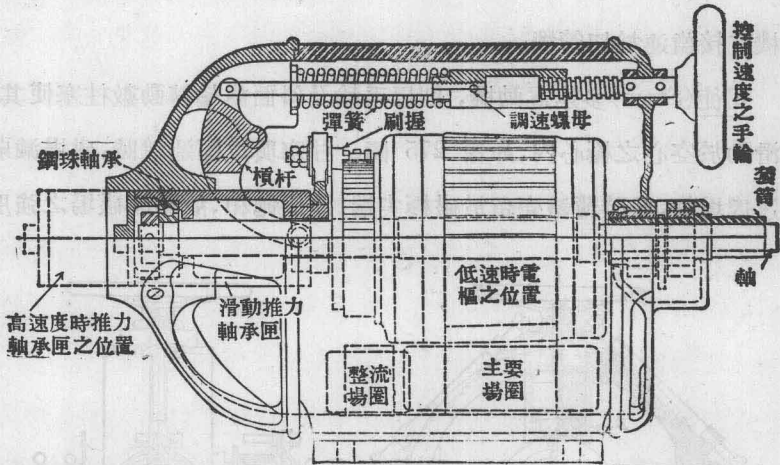
從幹線上別激，電樞由另一副發電機供給。此副機則以分激電動機 M' 或其他適當之原動力用恆速度轉動之。發電機 G 之磁場，接於恆電壓

之供電線上，並用倒接磁場變阻器以調準其磁激，使在任何方向時，可從零至最高，如是電動機 M 所受之電壓，可得均勻之變更。此法極有效，但須多置一組電動機發電機，所費自屬不貲。

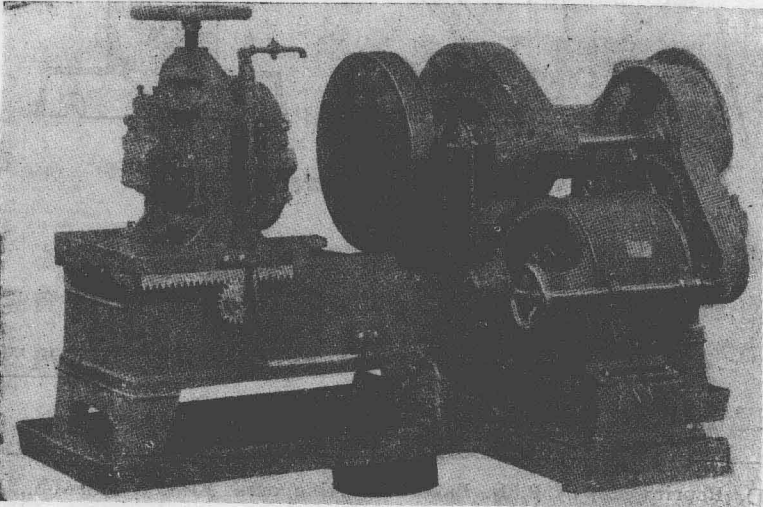
(c) 磁場控制法 調整分激電動機速度之最簡單最經濟方法，莫如於場捲周路中接一變阻器，以變更其磁流。如變阻器之電阻均已除去，而電動機之磁周路已達飽和，則減少場流時，速度約可加倍；過此則磁極尖端之磁場強度，將因電樞反作用而減弱（尤其在有載時），足使整流作用大受影響。總之，此法祇宜於極有限之速度變化時用之。

有整流極之電動機則不然，其速度變化之限度可極廣，最高與最低速度成 5 或 6 與 1 之比者，亦極普通。整流極或內間極電動機之原理，乃以稍小之磁極置於整流軸上，即用流過電樞之電流激磁，以抵消電樞之反作用。此類輔極線捲之設計，往往使其適足以抵消電樞上所發生之磁勢或稍超抵之。若是，則主磁場之磁勢，雖作廣範圍之變更，亦不致發生火花，蓋整流極所生之磁場，適足使線圈之電流在經過整流時改變其方向。是以速度之變更如為必要時，多用整流極電動機，如用於金工場各機械等。此種機上常有一控制器，非特為開動之用，且以自由變換其方向或速度。

上述諸法，均以電周路之調準，而變換其速度。但磁流或速度之改變，亦可用機械方法變動氣隙之長度而得。第 273 圖示林肯 (Lincoln) 可調速電動機。其樞心為圓錐形，故若用手輪轉動，以使電樞向旁移動，則氣隙之有效長度，可以增減自如。在較小之機，其速度之變更，可易得 10 與 1 之比例。高速度（及弱磁場）時整流之困難，用整流極則亦可免。



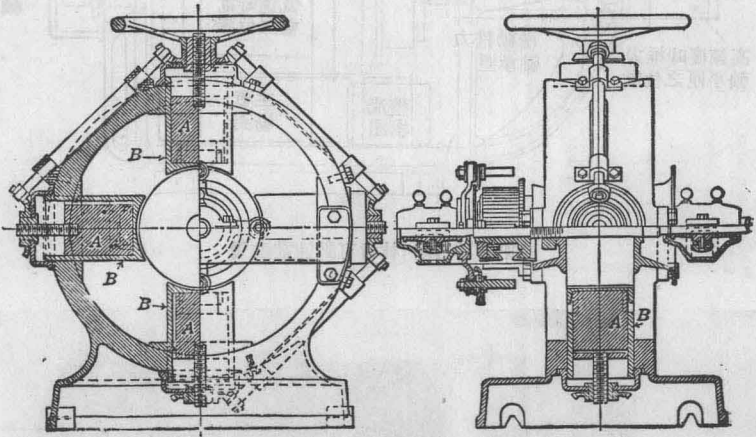
第 273 圖 林肯可調速電動機



第 274 圖 林肯可調速電動機及其拖動之切管機

第 274 圖示一 Reliance Electric and Engineering Co. 所造同樣之機直接齒連於切管機。

司徒(Stow)多速電動機，則以手輪及斜面齒輪轉動數柱塞使其進出滑動於空心之極心內，如第 275 圖。柱塞與電樞遠離時，磁場減弱，而速度增加，此時薄鐵壳留於磁極尖端，遂成飽和，故整流磁場之強度，



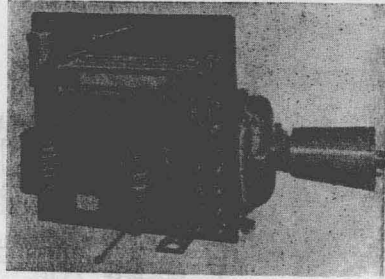
第 275 圖 司徒多速電動機

儘足阻止高限速度時火花之發生。

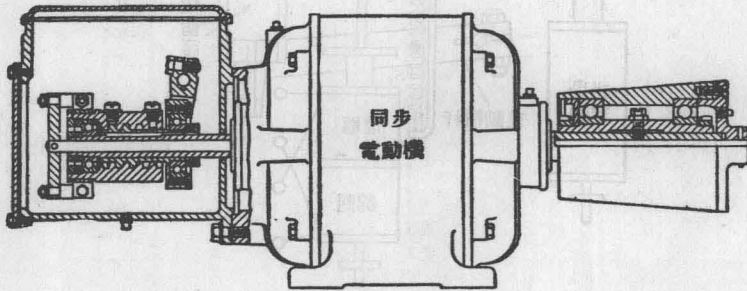
上節所述磁場控制方法，乃為調準廣限速度變化之用。但若負載變換甚大，而欲速度不變，則問題大為不同。為達到此目的起見，西屋公司乃製造下列機件，^①如圖 276, 277, 278 所示。

① Reprint 424, by R. R. Baker, Westinghouse Elec. & Mfg. Co., J. H. Ashbaugh, "Automatic Speed Regulation," Elec. Engineering (A. I. E. E.), p. 363, May, 1931.

此種調整器之基本原理，乃於電動機之分聯場捲加一炭堆變阻器，因炭堆之壓縮隨轉速而改，故電阻亦即依速度而變。當電動機速度加大時，變阻器之壓力亦增，如此磁場加強而速度不致過



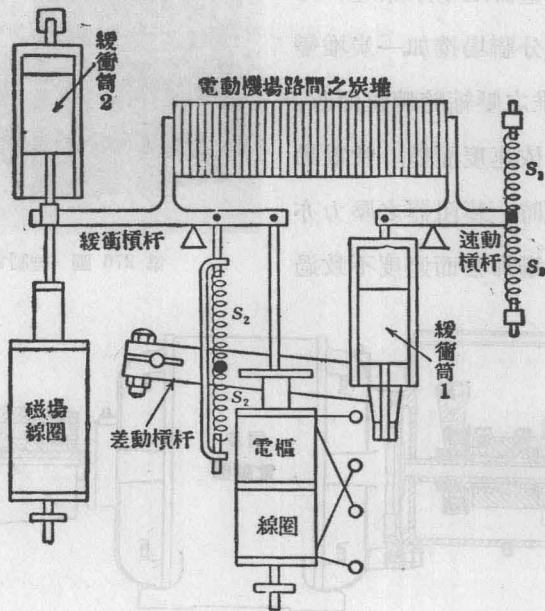
第 276 圖 控制電板



第 277 圖 差動機件

高。當速度減小時，壓力亦減，磁場轉弱，而速度可以提高。此種速度變換之控制，係用皮帶連於圓錐形滑輪。圖 277 示一小號同步電動機，其空心軸之伸長部分置有鋼珠軸承，軸承之上即為滑輪。同步電動機速度既不變，乃拖動差動機件之螺旋部分，而錐形滑輪則拖動螺母部分。差動機件乃鏈接於差動槓桿，如圖 278，故圓錐滑輪及同步電動機間如有相對之轉動，則差動槓桿將向某一方向移轉。同步機支流來源之週波數既為不變。故其固定速度可供參考比較之用。

當差動槓桿因速度減小而向上移動時，一號緩衝筒（見圖 278）即將此動作傳至速動槓桿，使炭堆之壓力即刻減少，而速度遂不致減低。



第 278 圖 控制電板接線圖

此速動槓桿之動作雖甚猛烈，但時間甚短，且有平衡彈簧 S_1 ，可使槓桿回至原來位置。與場捲樞捲串聯各有一線圈，此二線圈，因磁場及電樞中電流驟變，乃預向其原有位置移動，如圖 278，而緩衝槓桿即由彈簧 S_2 感受其力。此緩衝槓桿另連於二號緩衝筒。緩衝槓桿作用為免去調整之過與不及。當差動槓桿初時動作甚緩時，一號緩衝筒因其中空氣可經另一孔漏出，故不移動。但緩衝槓桿則經彈簧 S_2 而偏斜，而炭堆之壓力亦可得其適當之變換。

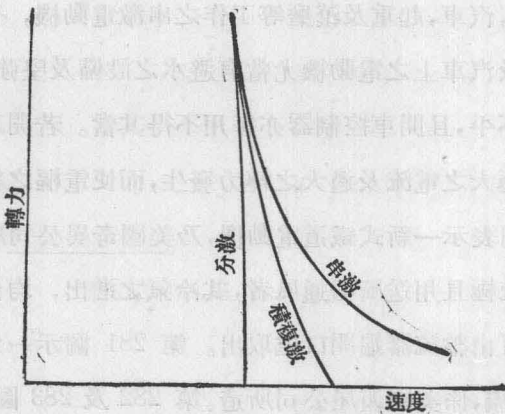
7-16. 分激及複激電動機之應用 由前所作分激電動機之特性分析，可知如在各種負載時速度欲其不變，例如轉軸及紡織機等，則此種

電機最為適宜。此機在磁場變阻器調準至某一特定值時，其速度特線亦為一定，如圖 236 所示，自零載至滿載略有下降。變阻器調準至他值時，速度特線將整個移上或移下。但在尋常分激機中，變阻器之調準亦有定限，蓋如因加速而使磁場過弱，則滿載樞流整流時或將發生有害之火花。

上述整流困難，如用整流極則可免去。如此速度可用變阻器得大量之變化，而在某一場阻定值時，各種負載情形下之速度又可不變。故車牀鑽牀等單獨拖動時，用此最為便利。

如速度可任其改變，而零載速度須有定限，例如滾磨及起重機等，則可用積複電動機。又如用以拖動鐵鏈，如重量增加，則速度減少，故可保護鐵鏈，不致因過重而損壞，

研究各種電動機之適用性時，可利用第 279 圖所示速度與轉力之關係。此圖各點之值係由圖 247 及 248 得來，即於各載流值時，從二



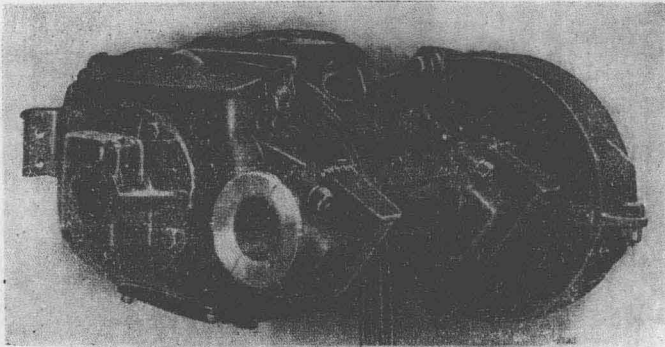
第 279 圖 速度-轉力特線

圖中分別求其速度與轉力之關係值，然後另作新圖。

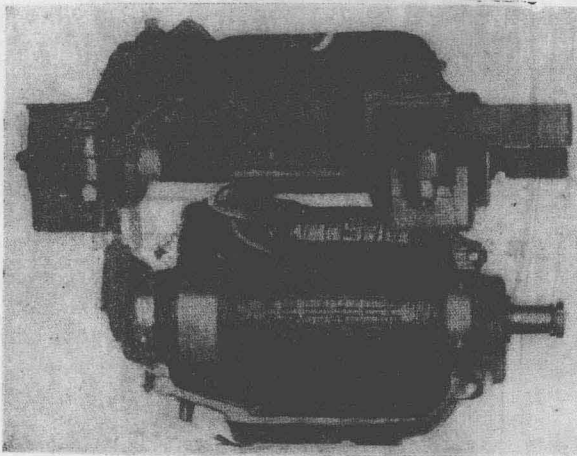
7-17. 串激電動機之應用 串激電動機之速度，當負載增加時，降落極快，故凡拖曳之工作均適用之，如電車，及起重機等。例如電氣鐵道之工作，用恆速特性之電動機如分激機者極少，蓋恆速特性之電動機若外加電壓不變，其速度恆不變，當車行上高坡時，必須增加功率之供給，而電流亦隨之增大。若用串激電動機則不然，當負載增加時，其速度必減低，故能自動防止過大負載之危險，而在一定限度內，能在電系內維持固定負載而不變。同時其發生轉力之比例，比電流之正比例為大，而分激電動機發生之轉力，則反不及電流之比例。但當 i_a 相同時，串激電動機之轉力並不一定比分激電動機為大，蓋轉力與磁流及樞電流之積成比例，故如使磁流相同，則在同一滿載電流時，轉力亦必相同（參看圖 248）。故串激電動機之適用於拖曳工作，實有賴於其速度轉力特性曲線，如圖 279 所示。

用於鐵道，汽車，起重及滾磨等工作之串激電動機，普通皆用全封式。用於鐵道及汽車上之電動機尤當有避水之設備及堅強之構造，以經粗用，因路面不平，且開車控制器亦每用不得其當。若開車時電阻除去太快，必致有極大之電流及過大之轉力發生，而使電樞之線捲散碎。

第 280 圖表示一新式鐵道電動機，乃美國奇異公司所造，此機為箱架式，有整流極且用送風機通風者，其冷氣之進出，均由機架之小齒輪端。其電樞可由整流器端開口處取出。第 281 圖示一分裂機架式有整流極之電動機，係美國西屋公司所造。第 282 及 283 圖表明 280 圖電動機之整流器及電刷。第 284 圖示 280 圖上電動機之特線，285 圖



第 280 圖 箱架式鐵道電動機

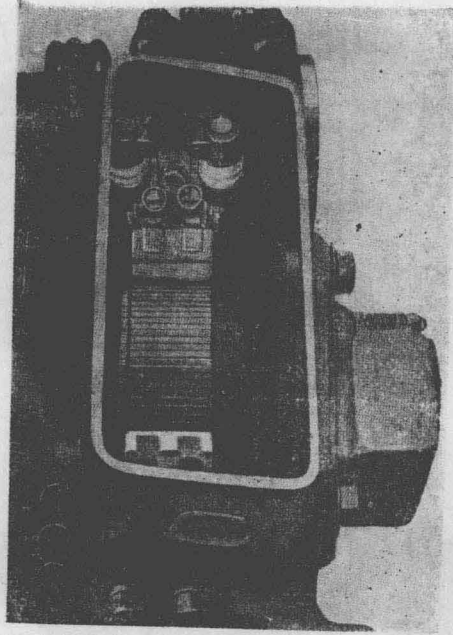


第 281 圖 分裂機架式鐵道電動機

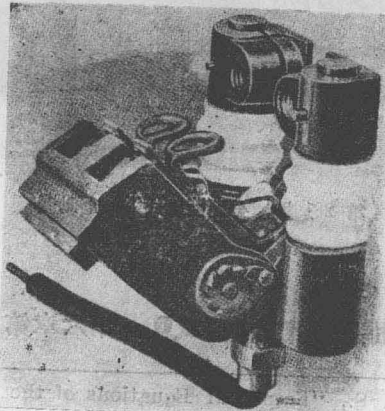
乃 281 圖電動機之特線。

7-18. 串激電動機特線之方程式^① 第六章第 15 節內,曾根據弗

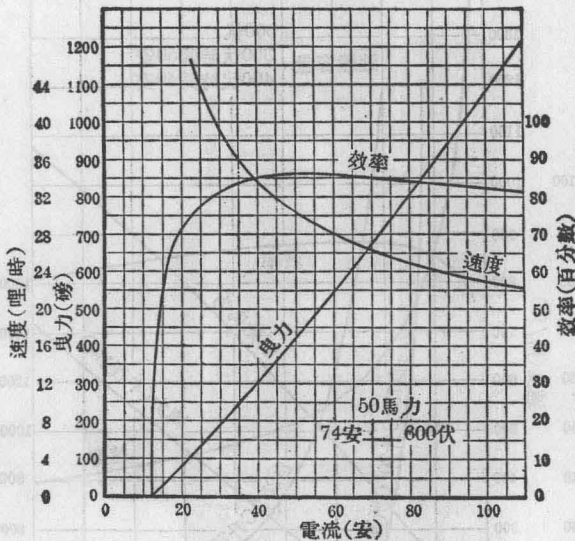
① Langsdorf, A. S., "Empirical Equations of the Speed and Torque Characteristics of the Series Motor," Washington University Studies, Vol. 6, No. 1 (1918).



第 282 圖 圖 280 所示電動機之整流器及電刷



第 283 圖 圖 280 所示電動機之刷握



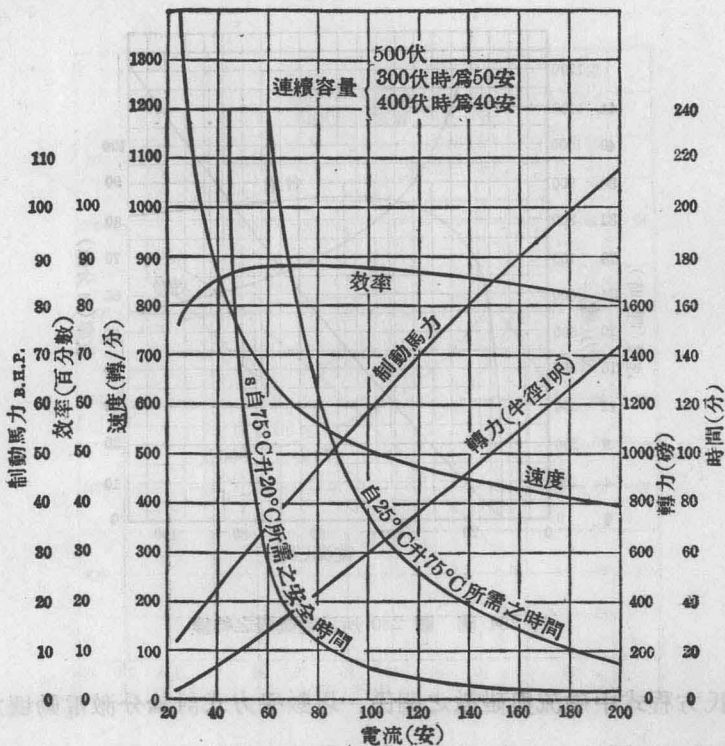
第 284 圖 圖 230 所示電動機之特線

羅里氏方程式中磁流與磁激之關係，以數學方式討論分激電動機之特線，此節亦以同樣之方法，研究串激電動機之特線，以得其速度及轉力特線之實驗方程式。蓋此種方程式有時或可有用，而主要之目的，則在舉一極好之例，表明求一方程式以適合實驗所得圖線之方法。

例如，試欲求第 286 圖上速度及曳力曲線之方程式（曳力與轉力成正比）。

設磁流與磁激之關係，可以下式表明之：

$$\Phi = \frac{ai}{b + \mu} \dots \dots (32)$$



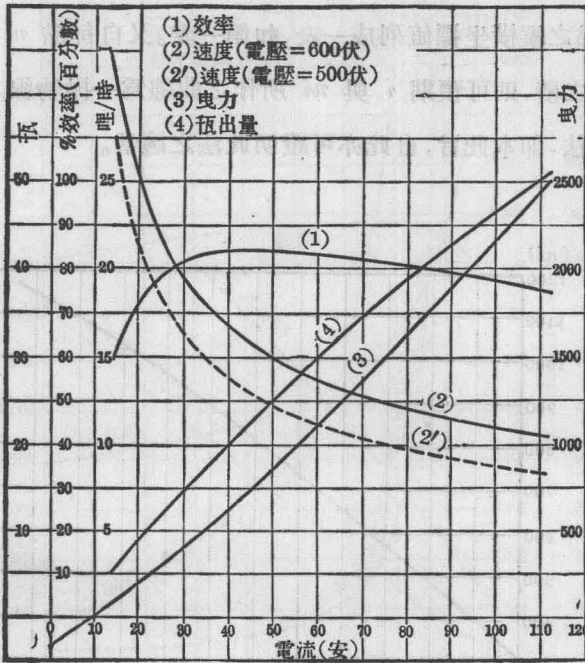
第 85 圖 圖 281 所示電動機之特線

式中電樞之去磁安匝數亦可計算在內；蓋若淨磁激可以 $(1-k)i$ 代表之， k 為一常數，等於每極電樞去磁安匝數與每極場捲安匝數之比，則弗羅里方程式應寫作

$$\Phi = \frac{a(1-k)i}{b + (1-k)i}$$

若分子分母各除以 $(1-k)$ ，其結果乃與方程式(32)同式。

從方程式(4)



第 286 圖 鐵道電動機之特線

$$V = \Phi Z'n + ir$$

其中 r 乃電動機全部之電阻。今若以方程式(32)中 Φ 代入，

則

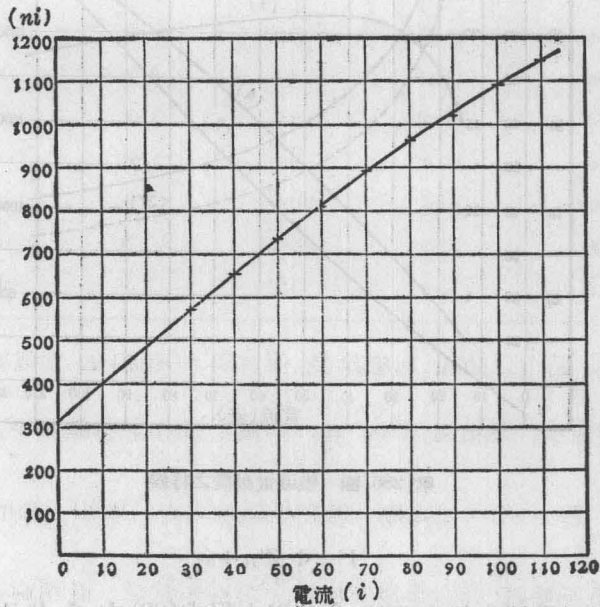
$$V = \frac{aZ'ni}{b+i} + ir$$

或

$$ni = \frac{Vb}{aZ'} + \frac{V-br}{aZ'}i - \frac{r}{aZ'}i^2 \quad (33)$$

設在方程式(33)中，以 ni 之積，為一新變數 y ，而以變數 i 為自變數，

則此方程式表示一拋物線，其軸與 y 軸並行。從第 286 圖速度特線上，將各點之縱橫坐標值列成一表，如第一表。又自每點 n 與 i 之值，計算 ni 之積，則可預期 i 與 ni 所作之曲線為一拋物線。第 287 圖曲線之作法，即本此旨，自此亦可證明此法之適當。



第 287 圖 ni 與 i 各值之作圖

方程式 (33) 中，若令 $i=0$ ，則

$$(ni)_{i=0} = \frac{Vb}{aZ}$$

第一表

1	2	3	4	5
i 安	n 哩/時	ni	$\frac{ni-320}{i}$	n (計算數)
30	19.2	576	8.53	19.22
40	16.4	656	8.40	16.43
50	14.7	735	8.30	14.71
60	13.5	810	8.17	13.52
70	12.65	886	8.08	12.64
80	12.0	960	8.00	11.96
90	11.4	1026	7.84	11.39
100	10.9	1090	7.70	10.92
110	10.5	1155	7.59	10.50

故若以 287 圖上之曲線，向後延長，使其與 ni 軸相交，其截線即為常數

$\frac{Vb}{aZ'}$ 。在圖中，此值為 320。若 ni 與 i 所作之曲線甚平，從原有紀錄或 286 圖上)所決定之點，遠在坐標軸之右，則用上法所定之

$\frac{Vb}{aZ'}$

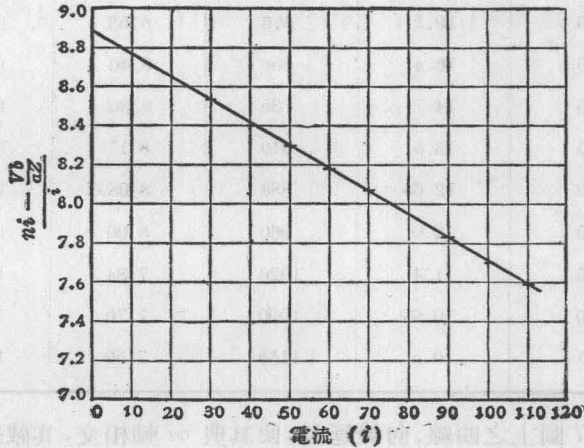
之數值，恐不準確。此時當以其他 $\frac{Vb}{aZ'}$ 之數值試之，直至適合而後止。

試值之適合與否，當以下述之方法驗之：

從 287 圖得 $\frac{Vb}{aZ'}$ 值，代入方程式(33)，則得

$$\frac{ni - \frac{Vb}{aZ'}}{i} = \frac{V-br}{aZ'} - \frac{r}{aZ'} i \tag{34}$$

而 $\frac{ni - \frac{Vb}{aZ'}}{i}$ 之值，可自第一表之記錄中計算之。試觀方程式(34)，則知此數與 i 有直線之關係，故若以此二數畫於圖上，即可得一直線。第 288 圖即自第一表中第一項與第四項之值所繪成。若所繪之圖線，果為



第 288 圖 $\frac{ni - \frac{Vb}{aZ'}}{i}$ 與 i 各值之作圖

一直線，則可證明此法之可靠，亦可表示自 287 圖所決定之 $\frac{Vb}{aZ'}$ 之值不差；若所繪之線非直線，或因所得常數不準，須另覓一值以試之，或則方法有誤。

繼續分析方程式(34)及第 288 圖之圖示法，則可知此線在縱坐標軸之截線為 $\frac{V-br}{aZ'}$ ，而斜度為 $\frac{-r}{aZ'}$ ，此二數之值，亦極易求得：

$$\frac{V-br}{aZ'} = 8.9$$

$$\frac{r}{aZ} = 0.0118$$

將二值代入方程式(14), 解 n , 則得

$$n = 8.9 + \frac{320}{i} - 0.0118 i \quad (35)$$

即為所求之速度方程式(n 之單位為哩/時)。

以 i 各值(或即用第一表中第一項之值)代入(35)式內, 即得其相當之 n 。以此數值列入第五項而與原有之 n 值相較, 即知此數與原有者實相等, 其所差者乃因讀 286 圖曲線之坐標值時, 第三位以後或難準確。

電動機所發生之轉力及曳引力, 與 Φi 成正比, 但因有磨擦之消耗, 是以淨得之曳力較少於所發生之曳力, 而其相差約為一常數。故 T 之方程式可寫作

$$T = k\Phi i - T_f \quad (36)$$

其中 T 乃淨得之曳力, T_f 乃消失於磨擦力上之一部分曳力。將(32)式代入(36)式, 遷項後得

$$T = \frac{kai^2}{b+i} - T_f = \frac{ci^2}{b+i} - T_f \quad (37)$$

其中 c 乃為一新常數。

(37)式亦可寫作

$$c \frac{i^2}{T+T_f} = b+i \quad (38)$$

從(38)式可研究得下述之作圖步驟: 在第 286 圖上, 將曳力線向後引長, 至與縱坐標軸相交為止, 此截線為 150 磅(在負方向), 即可

作為 T_f 之值。更從此圖上同時讀出 T 與 i 之數值，另作第二表，其第四項更從比例式 $\frac{i^2}{T+T_f} = \frac{i^2}{T+150}$ 求得之。(38)式表示此值與 i 所作之圖線，當為一直線。若所得非一直線，則當以另一 T_f 值再試之。

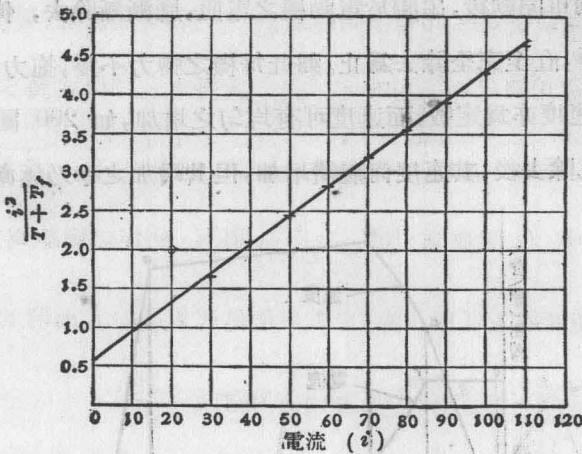
此例中 T_f 之值為 150， $\frac{i^2}{T+T_f}$ 與 i 所作之圖線為一直線，如圖 289。在此線上任取二點，以其坐標值代入(38)式而解其常數，即得

$$T = \frac{i^2}{0.68 + 0.0361i} - 150 \quad (39)$$

第 二 表

1	2	3	4	5
i 安	T 曳力(磅)	$T+T_f$	$\frac{i^2}{T+T_f}$	T (計算數)
30	380	530	1.698	360
40	600	750	2.13	605
50	860	1010	2.48	855
60	1120	1270	2.84	1114
70	1370	1520	3.22	1380
80	1640	1790	3.58	1640
90	1900	2050	3.95	1910
100	2150	2300	4.35	2180
110	2440	2590	4.68	2450

設以第二表中 i 之值，代入(39)式，而求 T 值，則得第五項。各



第 289 圖 $\frac{i^2}{T+T_f}$ 與 i 各值之作圖

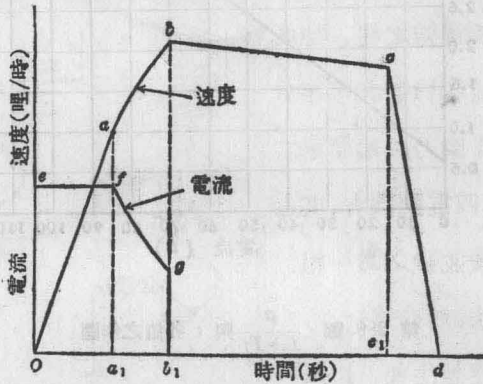
數與第二項之 T 相差甚小，故可證明 T 之公式為不誤。

7-19. 電氣鐵道電動機之工作週 決定電氣鐵道電動機適用於某種裝置與否，其馬力定額不甚重要，此種電動機定額之規定約有數種，其最普通者謂之一小時定額，其定義如下：①

如一電動機加以額定電壓（如為交流，週波數亦應為額定值），且有適當通風設備，連續試驗一小時，而不致超過過熱限制（參看第十章），則此機軸上所發出之馬力（或以預計），即為其『一小時定額』。無論如何電動機之選擇，當以其不致發生過熱為條件，而發熱量則依工作全部時間內（包含停止之時）所須電流之均方值而定。機車於開動及加速度時，所須電流最多，故發熱量大部視停止次數之多寡而定。

① 參看 A. I. E. E. Standards.

車或列車開動後，串聯於電動機之電阻，應漸漸除去，俾每機之電流大致不變，直至完全除去為止。如此每機之轉力不變，拖力 (draw-bar pull) 及加速度亦為定數，而速度可有均勻之增加，如 290 圖之 Oa 線。當電阻均已除去後，其速度尚繼續增加，但其增加之率乃逐漸減低，如



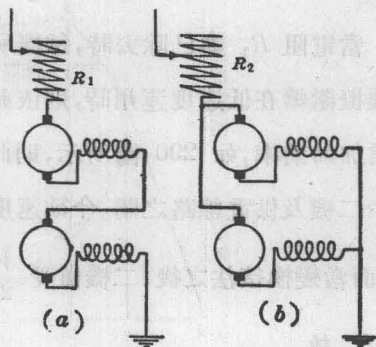
第 290 圖 鐵道電動機之速度—時間曲線及電流—時間曲線

曲線 ab ，此時電流亦自原有不變值 Oe 沿曲線 fg 降下。增加速度時，反電勢同時增加，故電流因而減少。經過時間 Ob_1 之後，關去電流，使車滑動，其速度之降下如 bc 線。若再加輪掣 (brake)，則速度驟減，自 c_1 降至零。此斷線 $Oabcd$ 名曰『時間速度曲線』，其面積與 Od 時間內車行之路程成比例。

圖 290 示城市區電車之普通情形，開動及停止甚多，而控制器極少能在最速開動之位置。但在城市間及幹線電車，站頭相離甚遠，則用電時間較 290 圖中 Ob_1 為長。如此速度尚可上升，而電流則下降，但上升及下降率將不如以前之大 (假定軌道甚平)，直至電能入量與磨擦耗及風耗相等，則以後速度及電流均將不變。

Oa 線之斜度，表示車之加速度，通用之數為1—2哩/時/秒，故若知車之重量，齒輪之比例，及車之種類，則其拖力，轉力及電流，均可決定。

7-20. 混聯控制法 車中置備二電動機者，當開車時，其開車電阻器與此二機初均串聯，及電阻盡除時，則將二機立即換為並聯，而接電阻於並聯機及供電線之間，待此電阻除去後，並聯機即直接連於供電線。第291圖乃一最簡單之接法。車中置有四電動機者，其電動機常以每二機並聯之為一組，再用混聯控制法，如前述。



第 291 圖 混聯控制法

採用混聯控制法者，比每一機各用一開動變阻器或兩電機永

久並聯合用一電阻器以為開車之用者，均較經濟。設一車有二電動機：

V = 供電線上之電壓

I = 每機於加速度時所需之電流

r = 每機之電阻

t = 加速度之時間(以秒計)

當開車時，二機串聯(圖291 a)其開車電阻器必須有電阻 R_1 歐，以得

$$I = \frac{V}{R_1 + 2r}$$

或

$$R_1 = \frac{V}{I} - 2r$$

最初時，電阻之損失等於 $I^2 R_1$ 瓦；但當電動機均勻增高其速度時，

(假設電流不變),則反電勢亦隨之漸漸增加,故欲使電流不變,其電阻亦須漸漸除去。但所有電阻,應在 $t/2$ 秒鐘內除盡,然後再將電動機移至並聯之位置(圖 291 b)。故在加速度前半時期電阻器之能耗為

$$W_{R_1} = \frac{1}{2} I^2 R_1 \frac{t}{2} = \frac{1}{4} I^2 R_1 t \text{ 瓦-秒}$$

當電阻 R_1 盡已除去時,每機所受之電壓,為線路電壓之半。如電動機擬繼續在低速度運用時,則依此亦可得甚好之效率。但如欲使其速度增加如前率,如 290 圖所示,則此二機必須並聯,並以一新電阻 R_2 , 加於二機及供電線路之間。今欲速度繼續不斷,則每機必須繼續接受 I 安,而當變換接法之後,二機僅受 $\frac{V}{2}$ 伏,故其餘之 $\frac{V}{2}$ 伏,必須消失於電阻 R_2 。故

$$R_2 = \frac{\frac{1}{2} V}{2 I} = \frac{V}{4 I} \text{ 歐}$$

而加速度後半期電阻器之能耗乃為

$$W_{R_2} = \frac{1}{2} (2 I)^2 R_2 \frac{t}{2} = I^2 R_2 t \text{ 瓦-秒}$$

故總共電阻器之損失為

$$W = W_{R_1} + W_{R_2} = I^2 t \left(\frac{R_1}{4} + R_2 \right) = \frac{1}{2} I^2 t \left(\frac{V}{I} - r \right) \text{ 瓦-秒}$$

若此二機先已並聯,如圖 291(b), 而欲使每機有 I 安之電流通過,則可以 R_3 接於二機及供電線路之間,其中

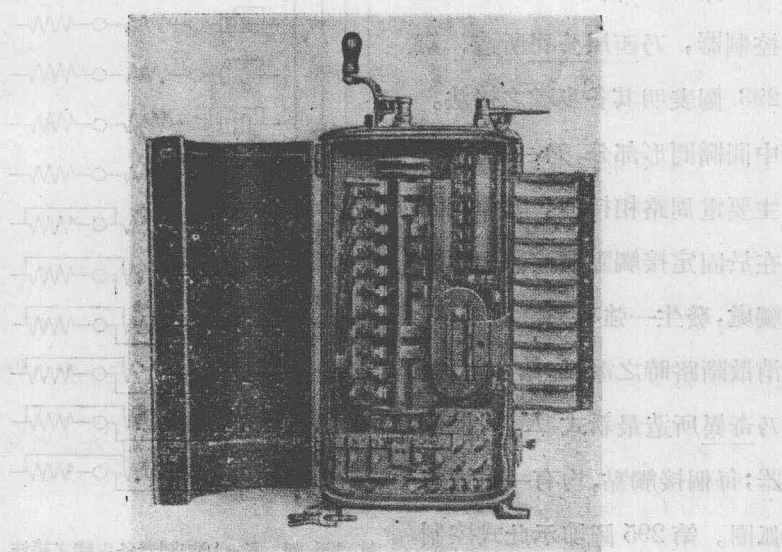
$$R_3 = \frac{V}{2 I} - \frac{r}{2} \text{ 歐}$$

此電阻器之能耗將為

$$W_{R_3} = \frac{1}{2} (2I)^2 R_3 t = 2I^2 R_3 t = I^2 t \left(\frac{V}{I} - r \right) \text{ 瓦-秒}$$

適二倍於混聯控制時之損耗。

7-21. 電氣鐵道之控制器 電氣鐵道開車電阻之逐步變更，及自串聯換至並聯接法之手續，可用一控制器以完成之。控制器逐點移動時，電阻即有一定之變更，故實際上加速度時之電流，並非如 290 圖之 *ef* 線絕對不變，但此線乃為鋸齒形。一半在此線之上，一半在此線之下。當二電動機在完全串聯或完全並聯時，其控制器之位置，曰開動點，在此位置時，電阻全去，故無損耗。控制器在其他各點時，均稱為電阻點，但自串聯變為並聯時，不作此稱。

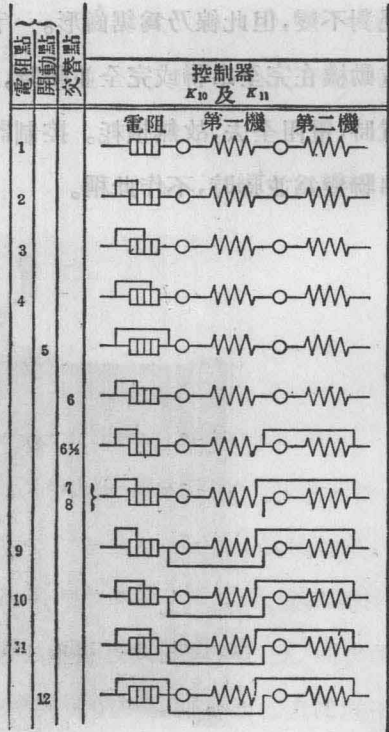


第 292 圖 K-10 控制器

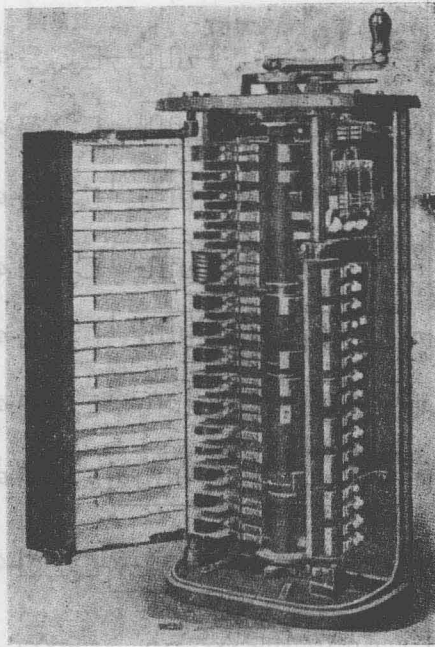
控制器之種類，普通均以其大寫英文字表明之。例如 *R* 式控制器，乃用變阻器控制法，而無混聯之裝置。此種控制器，多用於單機之電氣鐵道設備上，或用於單機或雙機開礦車頭及起重機上。*K* 式控制器，專為串激電動機雙機或數機混聯之用，其特點則當電動機自串聯變至並聯時，不致使電周路斷去。*L* 式控制器，亦專為串聯電動機混聯而設計，但變換接法時，電周路在過渡時期中必須絕斷，故今鮮有用者。*B* 式控制器，亦用普通電路接法，

並可使電動機變為發電機，以供給電能於輪軸或軌道上之磁鐵輪掣。

第 292 圖示 *K-10* 號控制器，乃西屋公司所造，第 293 圖表明其各步驟之接法。中間橢圓形部分，乃一螺管，與主要電周路相接連，其作用乃在於固定接觸點與控制桿之接觸處，發生一強有力之磁場，以消散斷路時之電弧。第 294 圖乃奇異所造最新式 *K* 式控制器；每個接觸點，均有一磁力熄弧圈。第 295 圖即示此式控制器之連接法。此圖在變換接法



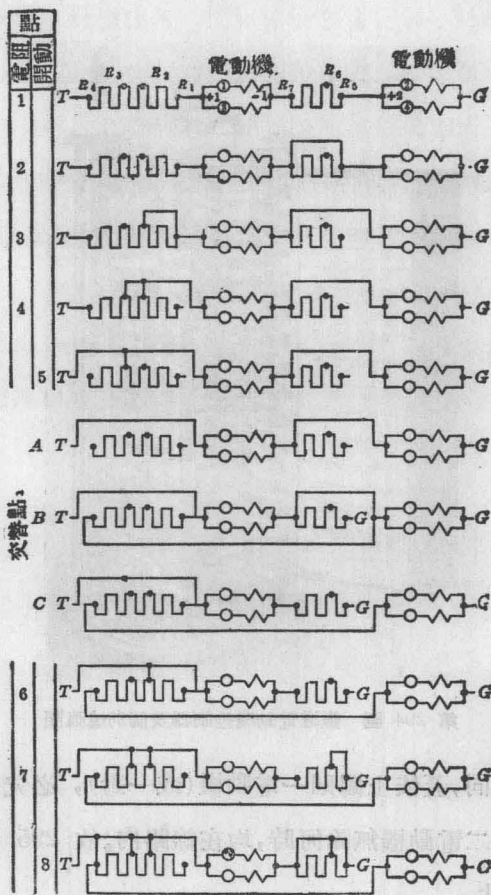
第 293 圖 *K-10* 控制器各步驟之接法



第 294 圖 鐵道電動機控制器及個別爐弧圈

時與 293 圖不同，蓋依上圖則一電動機（或一對），必先短路而後即刻開斷，而此圖則二電動機無論何時，均在線路內。故 295 圖之變接法，名曰電橋控制法。

控制器除 R 式外，均有二柄，其一用以加速度，其一用以變換車之行動方向。此二柄以機械方法相連，當主柄不在『關』之地位時，變向之柄不能動作，而主柄必須待變向柄在向前或向後之地位時，始可動作。變向柄能將磁場線捲之接法對調。使對於電樞端接方向相反，而電動機轉動之方向，亦即隨之以變。



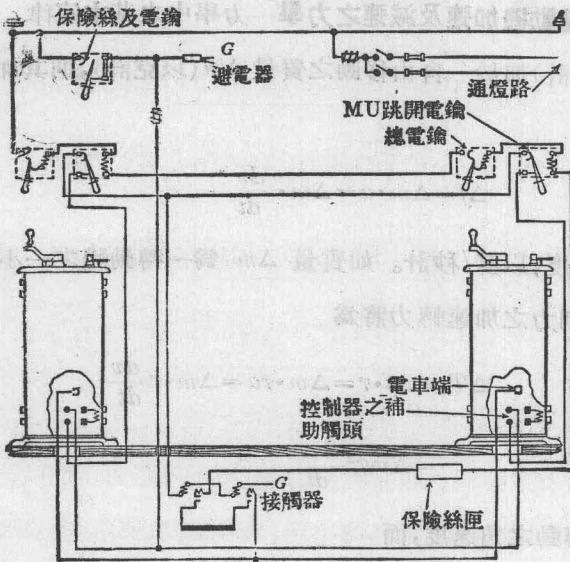
第 295 圖 電橋控制法

車行時若欲減速，必先將控制柄亟轉至『關』處，而在速度未至太慢之前，再移至一定之點。若轉回太慢，接觸點間，每易有極大之電弧，而發生損害。

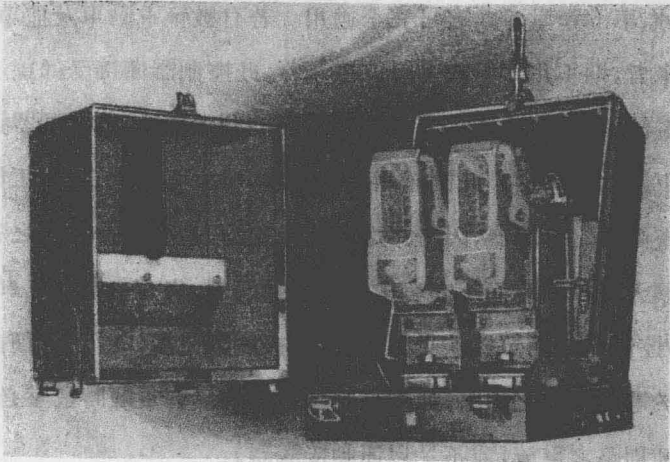
上述各種控制器，主電流均直接經過，故在單機車或電動車(motor

car) 及拖車 (trailer), 多可完全適用。若有數輛電動車及拖車, 合而為一列車者, 則須用 M 式多單位控制器。此控制器僅接受幹線上一小部分之電流, 動作電磁鐵以運用接觸器而控制主電流。其接觸器通常裝於車身下避水鐵箱內。此制僅用一控制器, 曰主要控制器, 以工作列車上所有電動車之接觸器, 因所用之電流輔周路, 乃經過全列車之各部。

控制大號單機車而不宜有多量電流通過者, 尚有一制, 與 M 式相仿。此種控制器之簡單接法見圖 296, 其接觸器見圖 297。此種控制器不適用於電壓太低之線路, 如在長饋線之極端, 則重載時電壓必甚低。蓋此時輔周路之電流, 或不足以運動接觸器。



第 296 圖 控制器及其輔周路



第 297 圖 接觸器

7-22. 電動機加速及減速之力學 力學中之基本定律，為如有一力 Δf (以達計) 加於一自由移動之質量 Δm (以克計)，則其加速度為 a 浬/秒，即

$$\Delta f = \Delta m \cdot a = \Delta m \cdot \frac{dv}{dt} \quad (40)$$

其中 v 為速度，以浬/秒計。如質量 Δm 為一轉動體之一小部分，離轉軸 r 浬，則力之加速轉力將為

$$\begin{aligned} \Delta T_a &= \Delta f \cdot r = \Delta m \cdot r a = \Delta m \cdot r \frac{dv}{dt} \\ &= \Delta m r^2 \frac{d\omega}{dt} \end{aligned} \quad (41)$$

其中 ω 為轉動之角速度，而

$$v = r \omega \quad (42)$$

角速度以弧度計，乃為轉體在單位時間(1秒)內所轉之角度，故如轉速

爲 n 轉/分, 或 $n/60$ 轉/秒, 則角速度爲

$$\omega = 2\pi \frac{n}{60} \quad (43)$$

在(41)式中, $d\omega/dt$ 爲角速度對於時間之變換率; 換言之, 爲每秒角速度之變換值, 即角加速度, α 。故(41)式可寫作

$$\Delta T_a = \Delta m r^2 \alpha \quad (44)$$

今設轉動物體由許多 Δm 組成, 各距轉軸 r 呎, 則將各項 $\Delta m r^2$ 相加時, 適等於「轉動慣性」 I , 而(44)式又可寫作

$$T_a = I \alpha \quad (45)$$

此爲力學中表示轉力與角加速度關係之基本方程式。此式亦可應用於制動轉力時, 而得角減速度之值。

在(45)式中代入

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt} = \frac{2\pi}{60} \frac{dn}{dt}$$

得
$$T_a = \frac{2\pi}{60} I \frac{dn}{dt} \text{ 達-呎}$$

其中 $I = \Sigma m r^2$, m 以克計, r 以呎計。

如 m 以磅計, r 以米計, 則得

$$T_a = \frac{\pi}{30 \times 9.81} I \frac{dn}{dt} \text{ 磅-米} \quad (46)$$

如用英制單位(m 以磅計, r 以呎計), 則上式應改爲

$$T_a = \frac{\pi}{30 \times 32.2} I \frac{dn}{dt} \text{ 磅-呎} \quad (47)$$

計算某一物體之轉動慣性 I 時，可將該物體分析成簡單幾何形式，分別求得其 I 而總加之。直流機之各種特殊形式約如下述：

(甲) 空心圓柱，如樞心樞捲及整流器。

(乙) 實心圓柱，如軸。

(丙) 輻射臂，如電樞之輻及整流器之輻。

在甲式中，如內外半徑為 r_1 及 r_2 ，則 $I = \frac{m(r_1^2 + r_2^2)}{2}$ 。乙式之內半徑為 0，故 $I = \frac{mr_2^2}{2}$ 。丙式之輻臂假定為直棒，其內外兩端離中心 r_1 及 r_2 ，則 $I = \frac{m(r_1^2 + r_1r_2 + r_2^2)}{3}$ 。普通， $I = \int dm \cdot r^2$ ，可由積分式加適當界限值而求得之。

常時電動機與其他轉動物體相連，或直接，或經齒輪，或經皮帶。如其他物體之轉動慣性為 I_1, I_2, I_3 等，而轉速為 n_1, n_2, n_3 等（轉速之單位依 n ），則電動機及拖動物體之總轉動慣性，將為

$$\Sigma I = I + I_1 \left(\frac{n_1}{n} \right)^2 + I_2 \left(\frac{n_2}{n} \right)^2 + I_3 \left(\frac{n_3}{n} \right)^2 + \dots \quad (48)$$

又如電動機之轉速為 n ，與一移動物體 m' （以磅計）耦接，而得移動速度 v' （以呎/秒計），則電動機之 I 將增加

$$I = \frac{m'}{32.2} \left(\frac{30 v'}{\pi n} \right)^2 \quad (49)$$

此種情形，可於電車或架空移動起重機時得之。

7-23. 電動機加速所需之時間 電動機之總轉力 T ，曾見 (11) 式。其中一部分轉力， T_0 ，消耗於電動機本身之磨擦耗及鐵耗；另一部分，

T_i , 乃用以抵償其負載之阻礙轉力; 所餘者方為加速轉力 T_a 。故

$$T_a = T - T_0 - T_i \quad (50)$$

如負載以馬力計, 則其相當於 n 轉/分速度之轉力值為

$$T_i = \frac{\text{馬力} \times 33,000}{2\pi n} \text{磅-呎} \quad (51)$$

為簡單起見, 假定 T_0 及 T_i 在任何速度時皆不變, 且加速時期內樞流亦不變, 則從 (11), (47), (50) 各式可得

$$\frac{\pi}{30 \times 32.2} I \frac{dn}{dt} = 7.05 \Phi Z' i_a - T_0 - T_i \quad (52)$$

其中除 n 及 t 為變數外, 餘皆為常數。故根據上述假定, 可得

$$\int_0^n dn = A \int_0^t dt$$

或
$$n = At \quad (53)$$

其中
$$A = \frac{30 \times 32.2}{\pi I} (7.05 \Phi Z' i_a - T_0 - T_i)$$

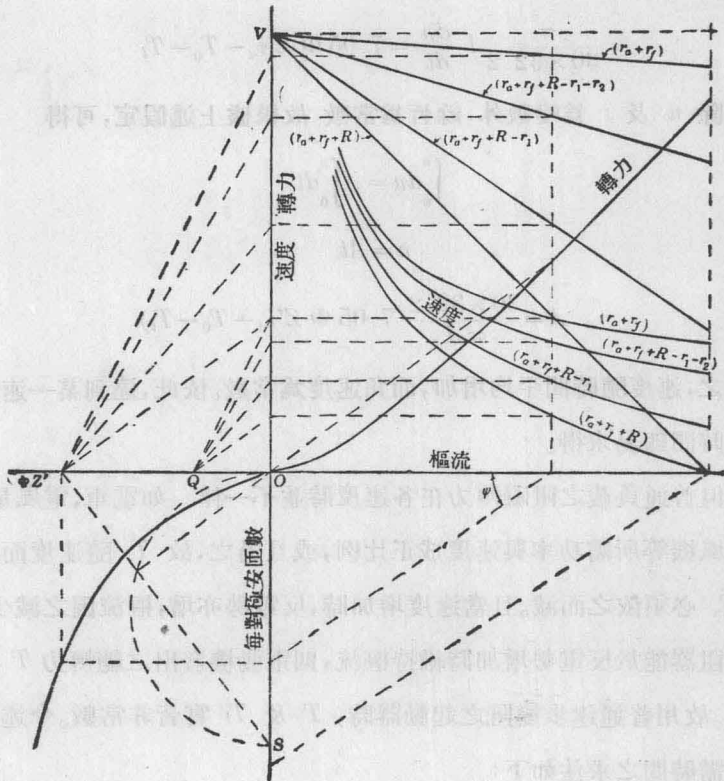
換言之, 速度隨時間平均增加, 而角速度為常數。依此, 達到某一速度所需之時間即易求得。

但普通負載之阻礙轉力在各速度時並不一律。如電車, 電風扇, 電氣吹風機等所需功率與速度成正比例, 或且過之, 故 T_i 隨速度而增加, 而 T_a 必須依之而減。且當速度增加時, 反電勢亦增, 樞流因之減少。起動變阻器能於反電勢增加時維持樞流, 則電動機發出之總轉力 T 亦將減小。故用普通逐步變阻之起動器時, T 及 T_i 實皆非常數。今述其加速所需時間之求法如下:

從圖 279 及其相關各圖 (247, 248), 可知任何電動機之速度轉力

特線乃視其磁化曲線及樞阻,電樞去磁安匝數等而定。圖 279 之各曲線,係根據電動機空轉之條件,即樞路中並無外加之電阻。如有起動電阻按入,則速度轉力線即又不同。

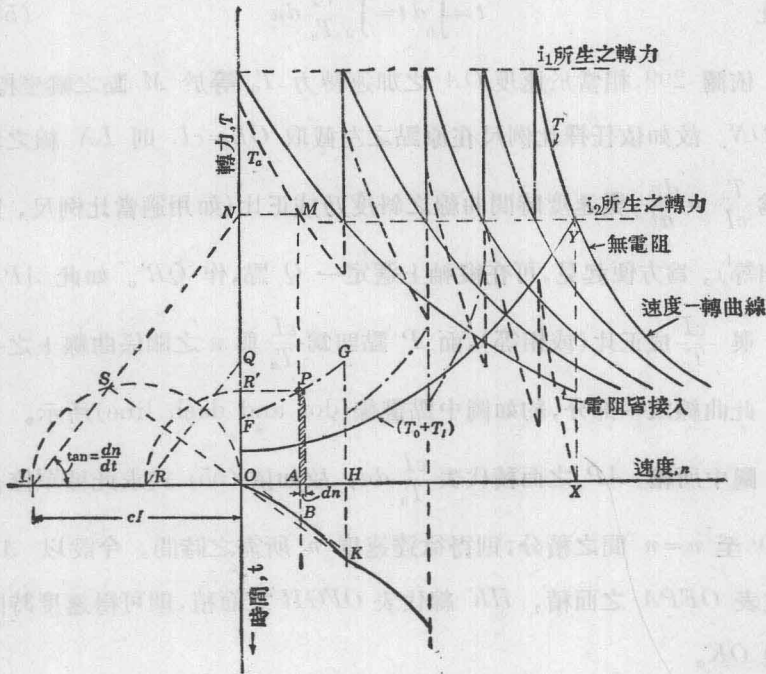
試舉串激機為例。圖 298 示此種機之轉力電流特線及速度電流特線,其作法與圖 240,241 相同。每一速度電流曲線相當於起動情形串聯電阻之各值。但轉力電流特線不受串聯電阻變換之影響,因轉力僅依



第 298 圖 串聯電阻對於串激電動機速度特線之影響

電流而定，與速度及反電勢皆無關係。今從各速度電流特線，取其速度與轉力之同時值，則可各得一速度轉力特線，如圖 299 所示，每一特線相當於一串聯電阻之值。假設起動變阻器之各步驟，適使電流變換之最高值為 i_1 ，最低值為 i_2 ，則當電動機加速時，總轉力 P 與速度之關係乃如圖中上部粗線所示之鋸齒形。

設 T_0 及 T_l 之和另由一曲線代表之，如圖 299 所示，而 $(T_0 + T_l)$ 曲線適與轉力速度曲線相交於 Y 點。此交點相當於樞流 i_2 ，且起動電阻均已除去，故此時電動機之轉力，適等於阻礙轉力，不致再有加速，



第 299 圖 加速與轉力之關係

而速度之值適為 OX 。

如 $(T_0 + T_1)$ 曲線之縱坐標從 T 曲線減去，則得一曲線代表加速轉力 T_a 與速度之關係，此線圖中以虛線示之。但從(46)及(47)式， T_a 及 n 之關係為

$$T_a = cI \frac{dn}{dt}$$

其中 c 值視所用單位而定。此式亦可寫作

$$dt = \frac{cI}{T_a} dn \quad (54)$$

由此

$$t = \int_0^t dt = \int_0^n \frac{cI}{T_a} dn \quad (55)$$

依圖 299，相當於速度 OA 之加速轉力 T_a 等於 M 點之縱坐標，即 ON 。故如依任擇比例尺在原點之左截取 $OL = cI$ ，則 LN 線之斜度為 $\frac{T_a}{cI} = \frac{dn}{dt}$ ，與速度時間曲線之斜度乃成正比(如用適當比例尺，則適相等)。為方便起見，可在縱軸上選定一 Q 點，作 QR' 。如此 $AP = OR'$ 與 $\frac{cI}{T_a}$ 成正比(或相等)，而 P 點即為 $\frac{cI}{T_a}$ 與 n 之關係曲線上之一點。此曲線之一部分，約如圖中點畫線(dot and dash line)所示。

圖中所繪 AP 之面積代表 $\frac{cI}{T_a} dn$ ，故如依(55)式求此種單位在 $n=0$ 至 $n=n$ 間之積分；則得欲達速度 n 所需之時間。今設以 AB 線代表 $OFPA$ 之面積， HK 線代表 $OFGH$ 之面積，則可得速度時間曲線 OK 。

以 OL 為直徑作一半圓，與 LN 相交於 S ，則 OS 適可與速度時

間曲線在 B 點之切線並行，但時間之比例尺自應有適當之選擇。

圖 298 及 299 雖為串激電動機而作，但同樣方法可以應用於分激及複激機。轉力速度曲線之形狀自將不同，可由圖 279 而知，而圖 299 中之 $(T_0 + T_i)$ 曲線亦將視負載性質而改變。除此之外，作圖之原理仍為相同。

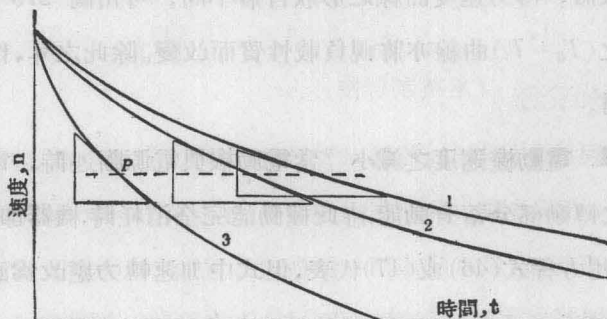
7-24. 電動機速度之減小 當電動機與電源斷連時，電動機及其拖動機之轉動部分蓄有動能，待此種動能完全消耗時，機器即停。此種情形，仍可用方程式(46)或(47)代表，但式中加速轉力應改為減速或制動轉力，而加速度亦改為減速度。速度減時 $\frac{dn}{dt}$ 為負，故轉力亦變負數；此負號乃僅指出轉力與轉動方向之相反。

上述關係，可用以測驗電機在任何速度時之能耗。^① 其法乃為將電動機之速度升高於額定值，然後任其因能耗之減速作用而轉慢，轉慢時將速度及時間同時記錄。如此所得之減速曲線，乃如第 300 圖所示。第一曲線代表磁場斷接及電刷移開時之情形，故僅包括軸承磨擦及風阻耗。第二曲線代表磁場斷接而電刷裝好時之情形，故較第一曲線加多電刷在整流器上之磨擦阻耗。第三曲線代表磁場正常而電刷移開時之情形，故除軸承磨擦及風阻耗外，尚有鐵心耗(磁滯耗及渦流耗)。欲從以上各曲線計算損耗，吾人可注意如以(47)式中之 T_a 乘以 $\frac{2\pi n \times 746}{33,000}$ ，其積數即為損耗之瓦數。故得損耗為

① 參看 Charlton, O. E. and Ketchum, W. D., "Determination of Generator Speed and Retardation During Loss Measurements," Trans. A. I. E. E., Vol. 49, p. 1095, July, 1930.

$$P_i = \frac{2\pi^2 \times 746 I}{33,000 \times 30 \times 32.2} n \frac{dn}{dt} = 31 \times 10^{-8} I n \frac{dn}{dt} \text{ 瓦} \quad (56)$$

其中 I 用英制單位，(磅-呎²)， n 以轉/分計。今在 300 圖中之 P 點



第 300 圖 減速曲線

沿曲線繪一正切線，即得 $\frac{dn}{dt}$ 之值。然後將 n 各值代入 (56)，即得各速度之損耗。從第一及第二曲線得來之損耗互減，則得電刷磨擦耗；從第一及第三曲線得來之損耗互減，則得鐵心耗。

用此法求損耗，必須確知轉動慣性 (I) 之值。本章 7-22 節雖有計算 I 之各公式，但因各種尺寸及質量不易盡知，每難應用。大機器中 I 亦可由實驗求得，其法用一制動器加一已知之減速轉力，然後作一減速曲線，如前所述。例如，第一減速曲線，在某一速度 n 時之斜度為 $\left(\frac{dn}{dt}\right)_1$ ，則軸承磨擦及風阻之抵拒轉力為

$$T_1 = cI \left(\frac{dn}{dt}\right)_1$$

如再將已知之制動力 T_2 加於軸上之滑輪，則在同一速度 n 之減速率為 $\left(\frac{dn}{dt}\right)_2$ ，即

$$T_1 + T_b = cI \left(\frac{dn}{dt} \right)_2$$

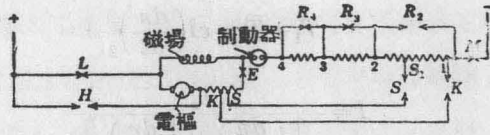
$$\text{故 } I = \frac{T_b}{c \left[\left(\frac{dn}{dt} \right)_2 - \left(\frac{dn}{dt} \right)_1 \right]} \quad (57)$$

其中 $c = \frac{\pi}{30 \times 32.2}$ (用英制單位)。

此法用於小機器時，甚為困難，因機器停止甚速，故速度隨時間變換之記錄，不易真確。且除在大機器外，速度計(tachometer)所增加之磨擦不能不計，故量速度非用一種斷續光盤(stroboscope)不可。欲免去上述小機器之困難，可於軸上加一較重之飛輪。機器加飛輪之 I 可由(57)式求得，而電動機之 I 即可由總 I 減去飛輪之 I 而得。

7-25. 動力制動法，再生控制法 如欲一電動機急停，如升降機及滾磨等，可在減速時間利用負載之慣性以拖動電動機使成發電機，而將電能消耗於跨接電樞之電阻，則減速可以大加增加。此種控制器應使制動電阻接於電樞之兩端時，場捲可有充分電流維持磁場之力，或竟加大之。分激電動機如用作發電機時，場捲對於線路之連接，不用改變，但串激機改為發電機時，場捲應串聯一限制電流之電阻，然後接於線路上；否則，串聯場捲應另以一低壓發電機供給磁激，如 Chicago, Milwaukee 及 St. Paul Railway 之電氣火車頭然。上述之法名曰動力制動法，在升降機，滾磨，印刷機，車床等多用之。電動機轉慢時，發出電勢亦減，故如欲維持其減速轉力，制動電阻亦須減小。關於各步驟制動電阻之計算方法，可參看第 249, 250, 251 各圖。

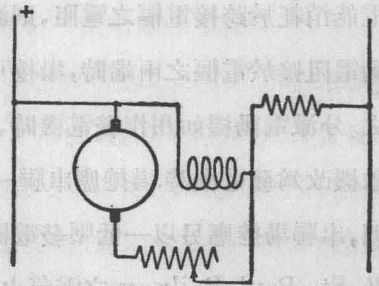
第 301 圖示動力制動法如何應用於串聯電動機拖動之起重機。當



第 301 圖 Wright 動力制動接法

起重機將物下降時，觸頭 L 接連而 H (起重接觸點) 開斷，則線路總電流即經過磁力制動器之螺管而使制動器放鬆。此項線路電流因接觸點 R_2 間電阻之限制，最大不過滿載之值。而電樞電流則受電阻 E 之限制。

動力制動器之應用於起重機橋 (crane bridge)，尤有特殊趣味。此種起重機橋由串激電動機控制，因有特種軸承，磨擦甚微，電源斷連後，仍可滑動甚大之距離。故串激電動機與線路斷接後，可經過相當之時間，方使橋停止移動，以便電動機之磁場消失。但電動機經制動電阻而欲改接成發電機時，磁場或不能建起，而制動作用亦遂失去。為避免此種弊病，可如第 302 圖所示，將串激場捲經限制電流之電阻器永接於線路，以免磁場之消失。美國電氣控制器製造公司曾應用上述原則，謂之場捲之“ T ” (“teazer”) 連接法。

第 302 圖 “ T ” 連接法

在滾磨廠等處，電動機必須立刻停止，然後改變方向，此種運用名曰「插入」 (“plugging”)，即電動機未停止以前，反方向之電源即已接入。

由此時起直至電動機停止，線路電壓與電樞發出之電勢方向相反，故如無補救辦法，電流必異常之大，而斷路器適將於磁激極應維持之時開斷。補救之法，可用插入繼電器，及接觸器如第 266 圖所示。插入繼電器 $S_1 P$ 係分捲，且永久並接於始動電阻之第一步。設經過此電阻之電流超過預定之限度（亦即電位降落超過限度時），繼電器即不讓插入接觸器 R_2 連接，直至電動機停轉為止。繼電器亦可加以調準，使 R^2 在電動機完全停轉以前略早連接，以加速方向之變換。

再生制動法為動力制動法之一種改變方式，即轉動體之儲能，不消耗於電阻器，而還之於供電線路。故如一轉動機慢轉時可送還一部分電能，而其他轉動機仍須線路供給電源，則發電廠供給之總電能可以減少。但如線路上並無其他負載，則須特別設法，謹防電能反流入電廠，以致損及原動機。

7-26. 飛輪之均載作用 用飛輪以使蒸汽機、煤氣機、衝孔機等之負載變化得均勻作用，其法沿用已久。電動機之最高負載，或較供給電源之容量為大，如礦內升降機，則亦可用飛輪以均勻其負載。Ilgnor-Ward-Leonard 制，為前述 Ward-Leonard 制之一種修改方式，即於電動發電機組上用一笨重之飛輪。當負載達最高值時，電動發電機組任其降低速度，而飛輪之儲能即可供給過載；負載減少時，速度增加，而飛輪之儲能亦增。故飛輪可作能源與負載間之緩衝，其結果即如過載由蓄電池組負擔一般，惟代價則便宜甚多。^①

① Motter, W. N., and Tatum, L. L., "Flywheel Load Equalizer," Trans.

A. I. E. E., Vol. 30, Part I, p. 729 (1911).

7-27. 數電動機負載之分擔 設二具或數具分激電動機，為同一電壓而設計者，並聯於同一幹線而其軸結實相連，其電流速度曲線（圖236）相似，如討論第六章第197圖時所論及（即速度線依滿載電流之百分數，繪成者為相同），其負載之分擔，必然依各機之容量為比例。串激機並聯時亦然。

串激電動機串聯於恆電流之周路上，若電刷之位置不變，其發生之轉力亦可不變。但若轉力不變，則其速度必與負載成正比而變。若欲避去此速度之變更，使其不變，則屠利恆電流系（參看第六章）中之串激電動機可加調整器以變動電刷之位置，如此轉力可以改變，而速度不受影響。

當電車上行於高坡時，如軌道光滑，串聯電動機因負載分擔之不均，可引起有趣之事實。設電車後部之載重過於前部，則當控制器之柄轉移至第一點時，前後兩電動機，（或兩對電動機）既相串聯，故受同樣之電流，而所生轉力亦相等。若前部之載重極輕，則車輪與鐵軌間之附着力，或不足以制止其滑轉，以致前部電動機之速度增高，而車輪自轉。前機發生之反電勢，既因速度之增高而增加，故外加電壓消耗於前機者，亦須加增。但增加前機之外加電壓，即減少工作已嫌過甚之後機電壓。是故前輪之滑轉，若不能制止，此電車必將停止。

習 題

習題 7-1. 從試驗結果，一4極，30馬力，220伏，900轉/分之分激電動機，如磁場電流減少一半，速度即增至1500轉/分。設不計電阻

位落及電樞反作用之影響，問該機用於 110 伏線路時速度爲何？如電流限於滿載之值，問其最大馬力爲何？如場圈混聯，求 110 伏時之速度及額定馬力之值。

習題 7-2. 一 220 伏電動機，其電樞之電阻爲 0.44 歐，分激場阻爲 169 歐，串激場阻爲 0.15 歐。如樞流爲 25 安，試分別求此機在用作 (a) 分激電動機，(b) 內分捲複激電動機，及 (c) 外分捲複激電動機時之線路電流，分激場電流，反電勢，及電樞場捲之功率耗。

習題 7-3. 第 7-2 題之電動機用作分激機時，其零載路流爲 2.9 安，速度爲 1185 轉/分。該機如用作別激發電機，而轉速爲 1200 轉/分時，其斷路飽和曲線可以下列各值代表之：

伏： 230; 222; 213.1; 203.4; 185; 181.5; 169; 155.3; 140; 123.2; 8.0

安： 1.4; 1.3; 1.2; 1.1; 1.0; 0.9; 0.8; 0.7; 0.6; 0.5; 0.0

如場阻爲 190 歐，外加電壓爲 230 伏，問其理想之零載速度爲若干？

習題 7-4. 第 7-2 題及第 7-3 題中之電動機，接作分激式時，其電刷之位置乃使電樞在電流 35 安時每極之去磁安匝數，僅爲磁場安匝數之 5%。試作樞流 0 至 50 安間之速度及轉力特線。

習題 7-5. 第 7-2 題中之串激場捲用外分捲接法時，其所發生之磁激爲分激場捲當樞流爲 35 安時所發生者之 20%。試分別作電動機之速度，及轉力特線 (i_a 值至 50 安爲止)，設串激場捲爲 (a) 差複激接法，(b) 積複激接法。

習題 7-6. 第 7-2 題及第 7-3 題之分激電動機，如樞流爲 40 安，外加電壓爲 230 伏，問 (a) 其轉力 (以磅-吋計) 幾何？ (b) 如欲於機器

不動時發生此轉力，電樞應加串聯電阻若干？(c) 如電樞不動，而欲發生之轉力比(b)大一半，應加之串聯電阻又為若干？

習題 7-7. [‡](a) 上題之分激電動機，如外加電壓為 220, 240 及 275 伏，試作其速度特線。(b) 如上機用作別激機，分捲磁場另由 225 伏電源供給，而電樞接於(1)115 伏或(2)440 伏之幹線，試分別作其速度特線。

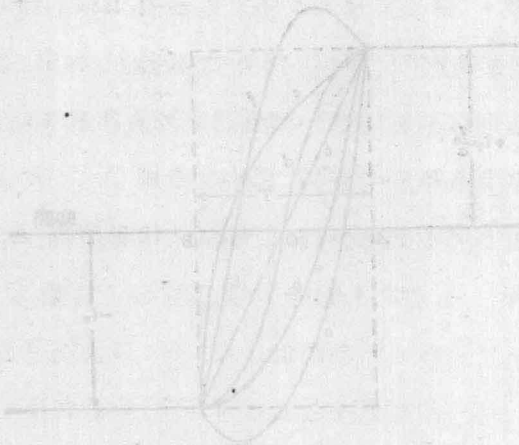
習題 7-8. 從第 7-3 題之數據(data)，試求該機磁化曲線之弗羅里方程式。從曲線之原點作切於磁化曲線之切線，即得磁流及氣隙磁激之關係，(試解釋其理由)。今若將極靴鑽削，使氣隙之長度增加 10%，試求其理想之零載速度。

習題 7-9. 第 7-2 及第 7-3 題分激電動機之滿載樞流為 37 安。假定滿載時起動電阻已完全除去，而起動電流值為 45 安，試計算起動電阻器五步驟之電阻值。

習題 7-10. 第 7-2 及 7-3 題之電動機，其樞心直徑為 8 吋，軸長 5 吋，疊片直接置於直徑 $1\frac{1}{2}$ 吋長 18 吋之鋼軸上，如第二章第 64 圖所示。(圖中通風孔隙可以不加注意)。整流器之外直徑為 6 吋，可作為完全鋼質所製。又假定樞捲等於一銅殼，其外直徑為 7.75 吋，厚 1 吋，長 11 吋，而電樞之齒亦可不必另計；試求電樞之轉動慣性 I 。

習題 7-11. 上題之電動機，如直接拖動一負載，其 I 兩倍於電動機之電樞，而其反抗轉力始動時為 5 磅-呎，以後隨速度之平方而增加，試作其加速度曲線。在電動機之滿載定額時，負載之反抗轉力適與電動機所供給之轉力相等。起動電阻器乃用第 7-9 題所設計者。

習題 7-12. 今有一電動發電機組，帶一直徑 9 呎厚 16 吋之生鋼飛輪。問速度在 900 轉/分時，此飛輪之儲能爲何？如速度在 12 秒間，均勻減速至 480 轉/分，問供給負載之瓦數若干？

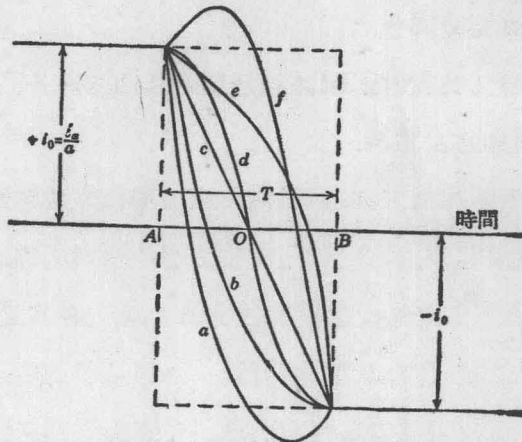


習題 7-12 之電動發電機組之飛輪

第八章 整流

8-1. 基本觀念 在一 a 並聯路之電樞中，每路含有 $\frac{Z}{2a}$ 匝互相串連，其電流為 $\frac{i_a}{a}$ 安。當整流截片由電刷下經過時，其所連接之線捲單位乃自一電路換至他電路，此二路中電流之方向，適相反。際此過渡時期或整流時期，電流必須先由其本來之值，減至零值，然後再增至原來之值，但方向相反。整流時間頗短，約自 .0005 至 .002 秒；於此短時間內，方向之改變或為過遲，或為過速，實為常遇之事。在任一種情形之下，如整流時期末之電流量與將接電路之量不同，則因均流關係，將使刷與截片間發生火花。是故整流過程之研究，其目標乃在決定不發生火花之條件。

線捲單位中之電流，隨時間而異，可用線圖表之；如第 303 圖，其



第 303 圖 短路電流曲線之各種式樣

縱坐標示電流之量，橫坐標示時間。於整流時期 AB 之前，線圈中之電流為 $+i_0 = \frac{i_a}{a}$ 。假定線捲對稱，則電樞各周路中之電流皆相等，而整流完畢時之電流應為 $-i_0$ 。在 $AB = T$ 之時期內，其電流變化之式樣有如 a, b, c, d, e, f 諸曲線所示；每曲線代表某種實際情形。此種曲線可名之曰短路電流曲線。

曲線 a 表示電流之變換過速；未至整流末期 B 時，其電流已超過 $-i_0$ ，如此情形，謂之『過度整流』。其電流或能達到其最後之正量而無火花，惟刷與截片間接觸面之局部電流密度或將過大，以致發生火花或使電刷發輝（或白熾），因之有過大之能耗，而電刷亦將發熱及損壞。

曲線 b 表示電流達其最後之值，甚為順利，蓋在整流時期之末，電流之變更率為零。此種整流乃為圓滿整流。

曲線 c 表示電流自始至終之均勻變換。此為直線整流。直線整流乃為吾人所歡迎，蓋電刷接觸面可得均勻電流密度，因之接觸面之功率耗損，亦為最小，後當更詳述之。

曲線 d 謂之『正弦』整流，因該線乃示正弦曲線之半。此種短路電流曲線，普通可得滿意之整流。

曲線 e 實表示一極端之例，其最後之電流變換率為無限大，即此線與經過 B 點之垂線相切。於此情形，火花之發生實為必然之結果。

曲線 f 表示『不足整流』，即電流之變換太遲。雖其最後之電流量尚合，但因過度之電流密度，致電刷灼熱，一如過度整流所述。

此種曲線，實祇代表其較重要者而已。在實際上，短接電流曲線之形狀無窮。此種曲線所須滿足之唯一條件，即如樞捲為對稱，最初與最

後之電流值應為相等，而方向適相反。

以上所論，祇於電磁之關係上言之。至於機械上之弊病，如電刷之振動，及整流器之不平滑，雖電及磁之情形甚優，亦在在足以發生火花。例如電刷之振動，可使短路電流曲線成鋸齒形。

8-2. 整流理論之物理基礎 整流理論實為直流機各部理論中最未進展者；換言之，吾人不能預先決定整流之特性，一如計算其他各種特性同一準確。然實際上採用經驗所得之方式已遠超於理論，故製造家通常保證其出品在零載至百分之五十過載間，用一固定之電刷位置，可無火花之虞。

整流之基本理論，實甚簡單，各著作家已多詳述。吾人可先注意下述事實：線圈整流時，由其電流變換，感生自感電勢，此電勢之方向，恆欲阻止電流之變換；若短接之線圈，與其他同時整流之線圈有感應關係，則更感生互感電勢。因此之故，此種理論名曰『電感』說。尚有一事實，亦須注意，即短接之線圈，或位於一磁場內——極尖附近之邊緣磁場或整流極之反磁場——，故線圈如有轉動，即發生電勢。如前所述，此電勢之方向須能抵消自感阻延之作用；此種情形之過程稱為電壓整流。苟線圈不受外界之磁場作用，即無電勢之發生，此謂之電阻整流，蓋其自感電勢，純藉圈內及電刷接觸面之電阻位落以限之。電阻整流多用於電刷位置固定而無其他特種整流設備者（如整流極）；普通皆用炭刷，因其高電阻足以使短接電流限制於相當範圍之內。電車及起重電動機即屬於此類，其電刷恆位於幾何中軸上，因轉動之方向，須時常變換故也。

電刷與整流片之變遷面間，及短接線圈與連接引線內之電阻位落，

實與由自感，互感及線圈在磁場內轉動所發生之電勢，有同一重要。整流器與電刷間之接觸電阻，乃較任何尋常金屬導體之電阻為複雜；其性質有數端均與電弧相似，蓋依電流密度，電流方向，溫度，接觸面之物質及化學結構，電流之性質（直流，交流或脈振流）而不同；此外更因接觸之壓力及兩接觸面之相對速度而異。^①

電流經過整流器及電刷間之變遷面時，或能使其間之空氣層游離（ionization）而生一反電勢，與弧流相似。自此觀點言之，接觸面間之位降落實為此反電勢及真電阻位落之和；故觀察位落除電流所得之商數，實非真電阻，但可名曰有效電阻，為真電阻及由於反電勢之虛電阻之和。整流器及電刷間之變遷薄層，為一儲能所，當所儲電能過一定之限度，則此薄層不能支持而破損，於是火花發生。以此而論，僅一電流密度或變遷位落，不足以定火花限度之標準。此可於安諾德（Arnold）教授之實驗證明之：即由炭刷至一金屬面通以電流，再將電流密度逐漸加增，至電刷發光為止，但並無火花發生。

8-3. 電感理論用於簡單環捲之通用方程式 為簡明起見，先論一簡單之環捲，其刷之寬 b ，等於整流片之寬 β 。於此情形，每次僅一線捲單位處於短接地位，如 304 圖所示，且與其他單位無互感之作用。如第六章所述整流軸線與幾何中軸線須略有偏傾（在發電機，其移動之方向與電樞轉動之方向同），使其前極尖之邊緣磁場，能感生一電勢於短接單位中，足以平衡自感之阻延作用。惟於整流時期中，此短接線圈於邊緣磁場中，自某一感生電勢較弱之位置移至其他較強之位置。如此則所

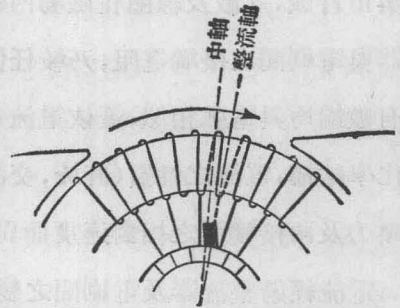
① 參看 Arnold, "Die Gleichstrom maschine," Vol. I.

生之反電勢並非不變。如磁流分佈之曲線，用實驗以定之，若第四章中指引刷之法所述，則此曲線於極尖附近之短距離間，近似直線；故整流電勢可以一函數表之：

$$E_c = e + ht \quad (1)$$

其中 $t =$ 距整流開始時之時間
 $h =$ 常數

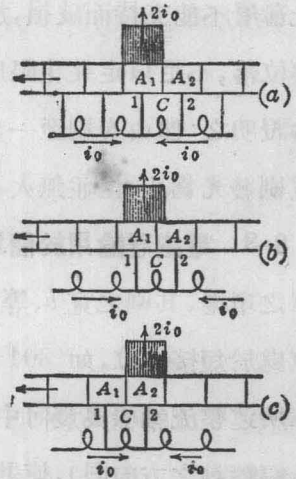
$e =$ 在整流開始，即 $t=0$ ，時之整流電勢



第 304 圖 簡單環捲之短接線捲單位

第 305 圖中 (a), (b), (c) 三部次第表示 C 線圈整流之初, 中, 終三期之狀況。

在 (a) 位置時，此圈為右線捲中之一部，負有 $i_0 = \frac{i_a}{a}$ 之電流。左右二電路之電流，皆經引線 1 而至電刷。(c) 之位置，亦與上同，惟是時此線圈乃為左線捲之一部，電流之方向亦變，二電路之電流，皆經引線 2 而至電刷。在 (b) 位置時，乃為 C 圈已短接，即截片 A_2 與電刷接觸後之情形；此時右方之電流由引線 1 或 2 至電刷，故 C 圈電流已較前為少；當 A_1 之接觸面減少而 A_2 之接觸面增多時，則原有之電流，經 2 者漸多於 1。同時右方之電流逐漸不經 C 圈，而左方之電流則經過 C 圈及 A_2 者漸多，而由 A_1 經過者漸少，



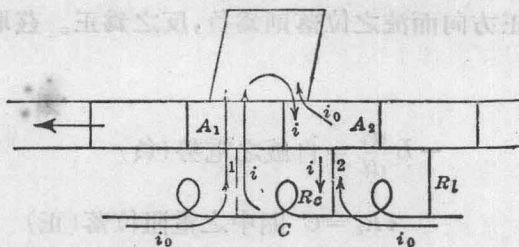
第 305 圖 線圈短接之各期狀況

同時右方之電流逐漸不經 C 圈，而左方之電流則經過 C 圈及 A_2 者漸多，而由 A_1 經過者漸少，

蓋因 A_2 之接觸面漸增，而 A_1 之接觸面漸減故也。

設當整流期中，電刷電流 $2i_0$ ，自引線 1 均勻遷移至引線 2，則其結果為直線整流。於此情形之下，當刷之中部處於 A_1 與 A_2 兩截片間之絕緣物上，則 C 圈中之電流為零；是時引線 1 與 2 各從其左右電路中，流入電流 i_0 。如整流軸過近於前極尖，則（如為發電機） C 圈中之電勢，由於在磁場中轉動所感生者，將助電流自引線 1 至 2 之變換，是以接觸面 A_2 ，將有過大之電流密度，此即 303 圖(a)所示之過度整流。反之，如整流磁場過弱，則將阻延電流自 1 至 2 之變換，因之接觸面 A_1 之電流密度，或將過多，此即 303 圖(f)所示之不足整流。

8-4. 基本之數學關係 第 306 圖實與 305(b) 圖無異，惟各路之電流，均已用符號標明。今先假定左方與右方之電流各自引線 1 及 2 中經



第 306 圖 短接圈中之電流路

過，而在 C 圈中之電流，在任何時間，其值為 i 安，並經電刷而成其周路。此圖示短接圈中之電流 i ，依時針向而流，但在整流期之後部，此電流之方向，與前相反。自圖中觀之，引線 1 與 2 中之電流為

$$\left. \begin{aligned} i_1 &= i_0 + i \\ i_2 &= i_0 - i \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

故 $i_1 + i_2 = 2i_0 =$ 總電流量 (3)

今設 $R_c = C$ 圈中之電阻

$R_l =$ 每整流引線之電阻

$R_b =$ 電刷全接觸面之電阻

自線圈 C 短接開始後之 t 時, A_1 與 A_2 面積之電阻各為

$$R_1 = R_b \frac{T}{T-t}$$

$$R_2 = R_b \frac{T}{t}$$

依照啓旭夫定律,含有 C 圈,整流引線 1 及 2,接觸面 A_1 與 A_2 ,二整流片及電刷之通路中,其各種位落之和(有正負號)必為零。任何電勢之符號可令之為正或負,乃視其是否與一假定之正方向為相應抑相逆而定。其電流向正方向而流之位落則為負,反之為正。茲取反時針向之電勢為正,得

$$-L \frac{di}{dt} = \text{自感之電勢(負)}$$

$$iR_c = C \text{ 圈中之電阻位落(正)}$$

$$i_1 R_l = \text{引線 1 之電阻位落(正)}$$

$$i_2 R_l = \text{引線 2 之電阻位落(負)}$$

$$i_1 R_b = \text{接觸面 } A_1 \text{ 之電阻位落(正)}$$

$$i_2 R_b = \text{接觸面 } A_2 \text{ 之電阻位落(負)}$$

$$E_c = \text{整流電勢(正)}$$

$$\therefore L \frac{di}{dt} + iR_c + (i_0 + i)R_l + (i_0 + i)R_b \frac{T}{T-t} - (i_0 - i)R_b \frac{T}{t}$$

$$-(i_0 - i)R_l + E_c = 0 \quad (4)$$

此可寫為
$$L \frac{di}{dt} + iR + \frac{R_b T}{T-t} (i_0 + i) - \frac{R_b T}{t} (i_0 - i) + E_c = 0 \quad (5)$$

其中
$$R = R_c + 2R_l$$

此方程式假定整流片與電刷之電阻可忽略不計，但該假定實無大錯誤。

此微分方程式之完全積分，在某種條件之下，已被解出。^① 其結果之方程式形式為

$$i = F(t)$$

其兩端條件為 $t=0$ 時， $i=i_0$ ；而 $t=T$ 時， $i=-i_0$ 。積分之全體結果通常不甚重要，蓋就火花而論，最要之點，係在整流時期之終。

8-5. 通用方程式之討論 在整流過程最後之瞬間，當 $t=T$ ， $i=-i_0$ 時，

$$E_c = e + hT = E_T$$

$$\frac{R_b T}{t} (i_0 - i) = 2 R_b i_0$$

$$\frac{R_b T}{T-t} (i_0 + i) = \frac{0}{0}, \text{ 爲不定式}$$

然 $\left(\frac{i_0 + i}{T-t}\right)$ 項之值，可將分子分母，分別取其微分，而視 t 爲獨立變數，

以得

$$\frac{i_0 + i}{T-t} \Big|_{t=T} = \frac{di}{-1} = -\frac{di}{dt}$$

① Riebesell, Paul, "Über den Kurzschluss der Spulen und die Vorgänge bei der Kommutation des Stromes eines Gleichstromankers," Kiel (1905).

故普通方程式可改寫為

$$L \frac{di}{dt} - i_0 R - R_b T \frac{di}{dt} - 2R_b i_0 + E_T = 0$$

或
$$\left(\frac{di}{dt} \right)_{t=T} = - \frac{i_0(R + 2R_b) - E_T}{R_b T - L} \quad (6)$$

自最後之方程式(6),可演繹得下列數重要結果:

(1) 設 $i_0(R + 2R_b)$ 不等於 E_T , 而 $\frac{R_b T}{L} = 1$, 則 $\frac{di}{dt}$ 之最後值為無限大, 即 $\left(\frac{di}{dt} \right)_{t=T} = \infty$ 。果如此則自感之電勢 $-L \frac{di}{dt}$ 亦為無限大, 其結果在電刷後端發生火花, 故普通 $\frac{R_b T}{L}$ 之值必須異於 1。

(2) 就 303 圖(a)之考察, 知在過度整流情形下, 最後之電流變換率為正, 惟此種超越現象, 必須避免, 故電流最後之變換率宜常為負, 因之方程式(6)之分子分母其符號須相同。

是以, 設
$$\frac{R_b T}{L} > 1 \quad (7)$$

則
$$E_T < i_0(R + 2R_b) \quad (7a)$$

又設
$$\frac{R_b T}{L} < 1 \quad (8)$$

則
$$E_T > i_0(R + 2R_b) \quad (8a)$$

在(7a)(8a)兩式中, $i_0(R + 2R_b)$ 項乃僅較 $2i_0R_b$ 略大, 而 $2i_0R_b$ 表示電刷接觸之位落; 如用普通炭刷, 此值約為 1 伏。欲 E_T 小於此值, 惟有使電刷之位置與中性軸甚近; 大部機器之運用, 皆需電刷有一固定之位置, 且對中軸甚近, 是以在此情形下有 $\frac{R_b T}{L} > 1$ 之關係, 即擔保整流

良美之條件。上述關係，常視為無火花運用之重要標準，但細察(8)與(8a)之關係，可知 E_T 若充分大於刷之接觸位落時，則 $\frac{R_b T}{L}$ 可小於 1，甚為明顯。此種情形，實常見於大容量之高速機器中，如渦輪發電機是。蓋此種機器，其整流時期 T 甚短，且因其樞心較長，故感應係數 L 亦較大。在此種情形之下， E_T 必須較大，故每藉整流極以控制在中性帶之磁流密度，因而調整短接單位中所感生之電勢。總之(7)及(7a)之關係，適用於無特種輔助裝置之電阻整流法；而(8)及(8a)則用於有特種裝置之電壓整流法。

$$(8) \text{ 若 } E_T = i_0 (R + 2 R_b) \quad (9)$$

則最後之電流變換率為零，即 $\left(\frac{di}{dt} \right)_{t=T} = 0$ 。此種情形實為最優之整流條件，其形狀可於 303 圖(b)曲線見之。

8-6. 火花標準之修改式 $\frac{R_b T}{L} > 1$ 之條件，可改為含有簡單物理

解釋之另一形式：即將不等之兩邊，各乘以 $\frac{2 i_0 L}{T}$ ，而得

$$2 i_0 R_b > \frac{2 i_0 L}{T} L = e \quad (10)$$

$2 i_0 R_b$ 一項，乃為電刷接觸面之位落，普通炭刷，其值約為 1 伏。 $\frac{2 i_0 L}{T}$

項為在整流時電流變換率之平均值，故 $e_r = \frac{2 i_0 L}{T}$ 為平均之電抗電壓 (reactance voltage) 或即自感電勢之平均值。故 $e_r < 1$ 方可得滿足之條件。

$\frac{R_b T}{L} > 1$ 之標準，表示電刷接觸電阻 R_b 與整流時間 T 須大而 L 須小。炭刷之較他種金屬為優者，以其有較大之接觸阻，而合上述之需求故也。

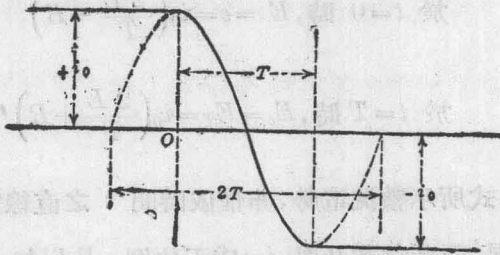
如設計時每線捲單位之匝數使為甚小，則自感係數即能在某種限度之內，蓋感應係數與匝數之平方成正比例。大機器中，每線捲單位祇有一線圈；通常每單位之匝數，不得過於 2 或 3，惟鐵道電動機中常有 4 匝或 5 匝者。再者 L 之值，係視線圈中每一安電流之磁鏈數而決定，故如限制電樞軸長，可使 L 減小；此即言同一容量之機器其直徑較大者，整流器必大，截片亦因之增多，是以每截片每線捲單位之匝數減少，而 L 亦可在一定限度之內。

初視之，以為刷寬增大，即可得良好之結果，因 T 值由此增加故也。但事實上此顯見之優點，適與其他劣點相抵，因刷寬增加，同時其短接線圈亦增加，因之發生互感作用，一如增加原來線圈本身之自感然。（參閱第 8-15 節）。

$\frac{R_b T}{L} > 1$ 或 $e_r = \frac{2 i_0 L}{T} < 1$ 之標準，亦常用他式表明。何伯特 (H. M. Hobart) 曾擬一法，假定整流曲線(圖 303 d)為一正弦曲線之半，其週期為 $2T$ ，且其最大之縱坐標為 i_0 ，如圖 307 如對原點 O 而言，其方程式為

$$i = i_0 \cos \frac{2\pi t}{2T}$$

而自感電勢之瞬值為



第 307 圖 正弦整流

$$e = -L \frac{di}{dt} = \frac{\pi}{T} L i_0 \sin \frac{2\pi t}{T}$$

其最大值(即何巴特所謂電抗電壓)為

$$e_{max} = \frac{\pi}{T} L i_0 = \frac{2i_0 L}{T} \frac{\pi}{2} = \frac{\pi}{2} e_r \quad (11)$$

故如 $e_r < 1$, 或 $e_{max} < 1.57$; 然通常言之, $e_{max} < 2$ 。自前節之討論言之, 如 $e_r > 1$ 或 $e_{max} > 2$, 則其整流電壓必須調準, 以使 $E_T > i_0(R + 2R_b)$ 。

8-7. 直線整流 方程式(5)為決定直線整流必須之條件; 直線整流云者, 即電流自始至終, 變換均勻。此種直線整流, 如第 303 圖(c)曲線所示, 其任何瞬時電流值為

$$i = i_0 - \frac{2i_0}{T} t = i_0 \frac{T-2t}{T}$$

而

$$\frac{di}{dt} = -\frac{2i_0}{T}$$

以此值代入(5)式選項後, 即得

$$E_c = i_0 \left[\frac{2L}{T} - \frac{R}{T} (T-2t) \right] \quad (12)$$

自(12)式中, 則得

$$\text{於 } t=0 \text{ 時, } E_c = e = i_0 \left(\frac{2L}{T} - R \right)$$

$$\text{於 } t=T \text{ 時, } E_c = E_T = i_0 \left(\frac{2L}{T} + R \right)$$

換言之，按(12)式所示整流電勢，非惟依時間 t 之直線函數而變，更須依負載多寡而異，蓋此負載乃與 i_0 成正比例。是以如一電機對於某一特殊負載有完全直線整流，而無其他特種矯正機件，則對於不同之負載，將不能得完滿之整流。

直線整流之有趣結果，乃在電刷接觸處之電流密度為一恆量。參看第 306 圖得

$$i_1 = i_0 + i$$

$$i_2 = i_0 - i$$

如

$$i = i_0 \frac{T-2t}{T}$$

則

$$i_1 = 2i_0 \frac{T-t}{T}$$

$$i_2 = 2i_0 \frac{t}{T}$$

惟接觸面 A_1 及 A_2 可用下式表之：

$$A_1 = A \frac{T-t}{T}$$

$$A_2 = A \frac{t}{T}$$

其中 A 為電刷之全面積。因之電流密度為

$$\frac{i_1}{A_1} = \frac{i_2}{A_2} = \frac{2i_0}{A} = \text{常數}$$

在直線整流中，電流密度既不變，則電刷觸阻之阻耗為最小。茲先假定在 C 圈(圖 306)中之短接電流非直線式。在此情形之下，非直線式之電流可視為一直線式之電流 i_l 及一額外之電流 i_x ，綜合而成，而 i_x 可為任何之形式。於是

$$i = i_l + i_x$$

而

$$i_1 = i_0 + i = i_0 + i_l + i_x$$

$$i_2 = i_0 - i = i_0 - i_l - i_x$$

在 A_1 與 A_2 面之接觸電阻為

$$R_1 = R_b \frac{T}{T-t}$$

$$R_2 = R_b \frac{T}{t}$$

故接觸面之阻耗為

$$W_c = i_1^2 R_1 + i_2^2 R_2 \quad (13)$$

以 i_1, i_2, R_1, R_2 之值代入上式，並知 $i_l = i_0 \frac{T-2t}{T}$ 即得

$$W_c = 4i_0^2 R_b + i_x^2 R_b \left(\frac{T}{T-t} + \frac{T}{t} \right) = 4i_0^2 R_b + i_x^2 R_b \frac{T}{t \left(1 - \frac{t}{T} \right)} \quad (14)$$

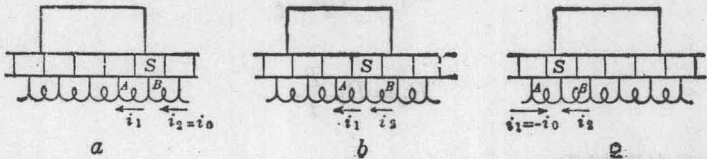
由此觀之，如 $i_x = 0$ ，或即整流為直線式，則阻耗為最小。

8-8. 整流片之電流密度一般情形 電刷寬度間之均勻電流密度，即直線整流之特點，意即接觸面間之位落在無論何處，均為一律，是以沿電刷接觸處(依周線之方向)，均無電位差，故亦無均壓之電流。設如此

種電位差果存或有存在之趨勢，則額外之電流將沿電刷而生，經短接圈而完成其途徑，因之乃成非直線之短接曲線，其電流密度，亦不均勻矣。

電位差之可以生額外電流者，以在短接線圈所感之電勢形狀，（對時間之函數）與感生直線短接電流者不同之故，故決定在何種方式之下，電流密度之分配，即受非直線短接電流之影響，至為重要。下述為安諾德^①教授之圖解法，其目的即如上述。

試舉一例，如電刷之寬度為截片寬度之 3.5 倍，且假定任何瞬間，凡整流片面積為電刷所遮掩者其電流密度相同；更假定線圈中相繼整流者其短接電流曲線絕對相同；當某一整流片 S 經過電刷時，其電流密度，即將時時變換。茲將三種不同之形相，如第 308 圖 (a), (b), 及



第 308 圖 寬電刷短接之各形相

(c) 三部所示，分別說明之：

- (1) 整流片初近電刷
- (2) 整流片為電刷所掩蓋
- (3) 整流片將離電刷

(1) 第一種形相 經整流片 S 而至電刷之電流為

$$i_2 - i_1 = i_0 - i_1$$

電流經整流片向上者，命之為正。

① Die Gleichstrommaschine, 2nd. ed., Vol. I, p. 438.

(2) 第二種形相 經整流片 S 而至電刷之電流為

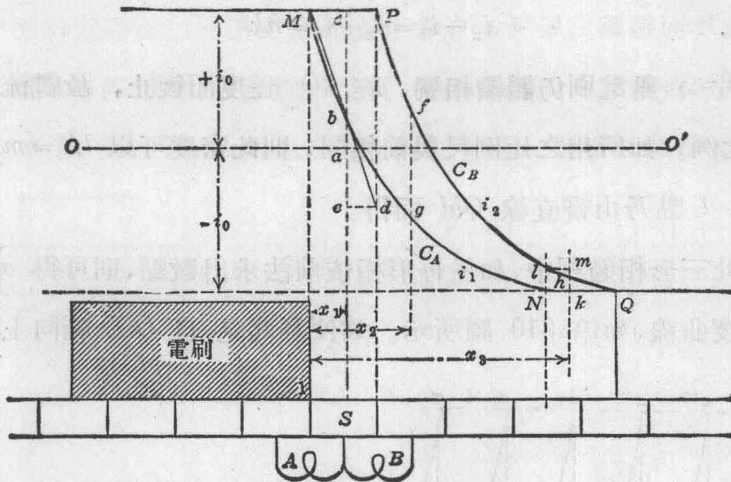
$$i_2 - i_1$$

(3) 第三種形相 經整流片 S 而至電刷之電流為

$$i_2 - i_1 = i_2 + i_0$$

因在此位置時，線圈 A 所載之電流，係自左支路而來，即 $i_1 = -i_0$ 。

第 309 圖中， C_A 與 C_B 曲線表示 A 與 B 線圈之短接電流曲線。各線以刷之邊緣 1 為準，復按正確之時間位置而畫； OO' 乃縱坐



第 309 圖 截片之電流密度

標之軸。圖中示整流片 S 開始移動至第一形相時之情形。

當整流器向左移至 x_1 距離時（在第一種形相中）， A 圈中之電流為 ab ，經截片 S 之電流為 $i_2 - i_1 = i_0 - i_1 = ac - ab = bc$ ，其電流密度與 $\frac{i_0 - i_1}{x_1} = \frac{bc}{Mc}$ 成比例。畫直線 Mb ，引長之使與經 P 點之垂線相交於 d 點，則 $\frac{bc}{Mc} = \frac{Pd}{MP}$ 。惟 MP 為一不變長度，故 Pd 乃與截片 S

之電流密度成比例。投射 d 點至 e 點, ce 即為相當於橫坐標 x 時之電流密度。由圖中之作法, 可知如最初電流之改變太速 (過度整流), 則結果將使截片經刷下時有過大之電流密度。

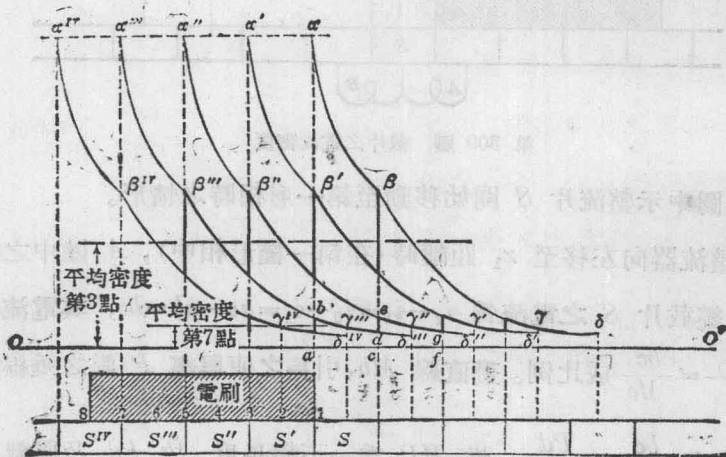
在第二形相中, 或整流器已移動至 x_2 距離後, 整流片 S 之電流密度為 $i_2 - i_1$, 可直接用 C_A 及 C_B 曲線間之截線 fg 代表之, 此截線依 ce 同一比例尺乃與電流密度成比例。

當至第三形相時, 即整流器行經 x_3 後, 則截片 S 之電流為

$$i_2 - i_1 = i_2 + i_0 = hk$$

同時截片 S 與電刷仍繼續相觸, 經 lQ 長度而後止, 故電流密度與 $\frac{hk}{kQ}$ 成比例。如所用之比例尺與前相同, 則此密度可以 $lN = mk$ 之長表示之, l 點乃由畫直線 Qhl 而得。

在此三相相過程中, 如於每形相依前法求出數點, 則可得 $\alpha\beta\gamma\delta$ 之電流密度曲線, 如第 310 圖所示。為便利起見, 自 OO' 軸向上所畫之

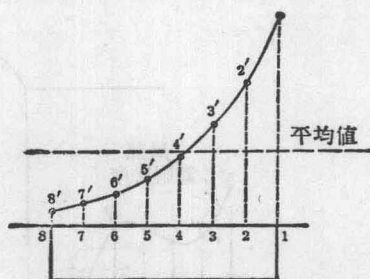


第 310 圖 整流片之電流密度曲線

縱坐標乃表示電流密度。同樣之 $a'\beta'\gamma'\delta'$ 及 $a''\beta''\gamma''\delta''$ 等曲線，乃表示整流片 S' 及 S'' 等之電流密度變化，其時間比例尺仍與 $a\beta\gamma\delta$ 曲線所用者同。

8-9. 電刷局部電流密度之變化 除直線整流外，凡同一瞬間，沿刷接觸之弧上，其電流密度即非一律，即一指定之點，其電流密度亦因時而異。例如第 310 圖中，試論電刷上之第 7 點，此點適將與截片 S''' 相接。此時 S''' 之電流密度為 ab ，可於 a''' 曲線得之。自後直至 S''' 離開在此點下移動時為止，電流密度均按 bd 曲線而變化，旋後則截片 S'' 將在該點下移動，其電流密度因之突然自 dc 增至 ec (e 點乃在 a'' 曲線上)，然後漸降至 gf 。曲線 eg 當然與曲線 bd 相同；故換言之，在一定點上之電流密度，依週期性而變換。按前法，可得一具有 β, β', β'' 尖角之鋸齒形曲線，表示電刷上第 3 點電流密度之變換。

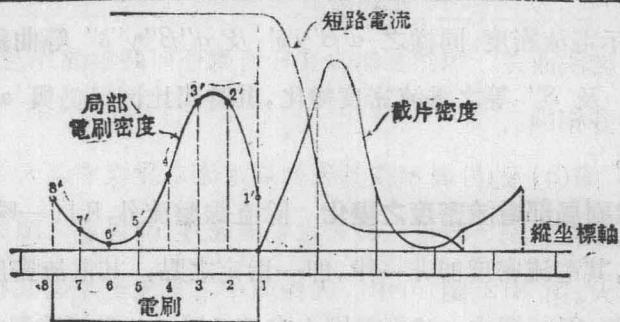
沿電刷上不同之點，各取其平均密度，而繪之成圖，結果即得如第 311 圖 $1'2'3'-8'$ 曲線。此為第 309 圖之整流曲線 MN 或 PQ 之平均局部電流密度曲線。局部電流密度與整個電刷之平均電流密度相差甚大，於第 311 圖中視之，甚為明瞭。



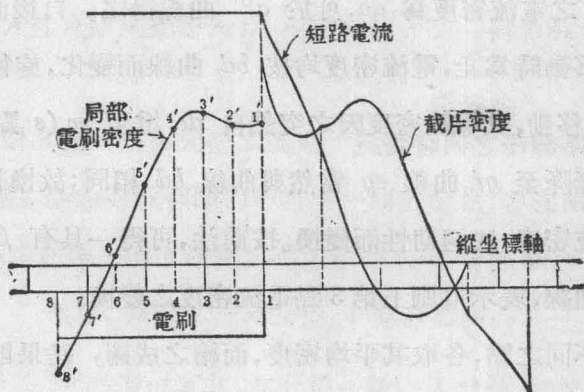
第 311 圖 沿電刷各點之平均局部電流密度

8-10. 其他各例 用上述之

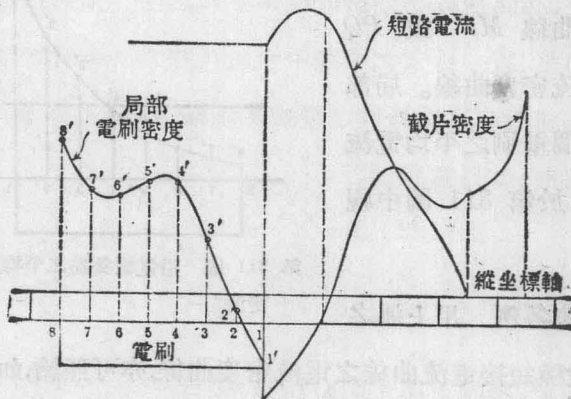
法，對於其他數種短接電流曲線之電流密度曲線，亦可照繪，如第 312 圖 (a), (b), (c) 各部分所示。直線整流之曲線未曾表明，蓋自以前之分析



(a)



(b)



(c)

第 312 圖 電刷及截片之電流密度曲線

討論或幾何繪法而言，瞭然知無論在任何處任何時整流片及電刷上之電流密度均各相同。

第 312 圖(a)及(b)表示在整流初期電流之變換率過大之情形。其結果為當截片經過刷下時得一較大之電流密度，而近刷之踵部，其平均電刷密度亦大。第 312 圖(b)中，因線圈中之電流已超過其應達之量，致使後移之整流片，有反方向之電流。第 312 圖(c)表示不足整流之情形，因之刷之踵部得一反方向之電流，且於整流末期有過大之電流密度。

8-11. 相鄰線圈之同時整流 線圈之整流過程，既為相鄰短接線圈之互感作用所影響，故預定同一中性帶內同時短接線圈之數，及其彼此相互之位置，至為重要。前述簡單環捲之情形在同一帶內之線圈，祇為一電刷所短接。如電刷之寬為 b 而整流片之寬為 β ，則 $\frac{b}{\beta}$ 之比乃為同時短接線圈之數。此比大概為一帶分數，其實短接線圈，必為一整數，故該數之變更，必間於此帶分數前後兩整數之內。至於摺捲及波捲，則不能若是之簡單，蓋一指定之中帶中有數導體為一極性之電刷所短接，而其他數導體為相鄰之異極性之電刷所短接，如第 313 圖。此圖示一兩重摺捲之情形，其各常數如下：

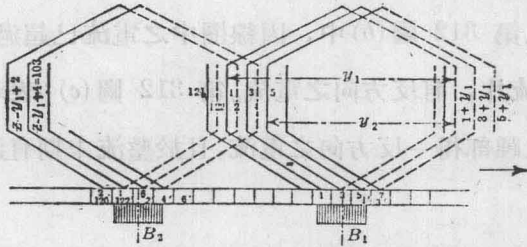
$$Z=122 \quad S=61 \quad p=6 \quad a=12$$

$$y=m=\frac{a}{p}=2 \quad y_1=23 \quad y_2=-19 \quad \frac{b}{\beta}=2.5$$

如圖中位置所示，導體 1 與 4 同時短接；稍前於此，則導體 1, 3, 4, 同時短接。研究各短接線圈之逐步連合情形，可用下列安諾德教授之圖解

法，^①實甚便利。

(1) 摺捲 自第 313 圖中觀之，可知 B_1 及 B_2 兩刷對於所接觸之整流片，實非處於同一位置，此為 $\frac{S}{p}$ 非一整數之結果。



第 313 圖 摺捲之同時短接單位

圖中以實線畫成之諸圈邊，如 1, 3, 5 等，表示在槽之上部。此等圈邊，皆各與上層記有同號數之截片相接。至於此等線圈之他邊，如記有 $1+y_1, 3+y_1, 5+y_1$ 等，則各與下層所記之號數 $1', 3', 5'$ 等之截片相接，此等號數乃於原來各號數去 y_1 相加而得。當電刷 B_1 同時與任何一對相同號數之截片相接觸時，則其記有此號數之線圈乃為之短接。圈邊 2, 4, 6 等亦如是排列。

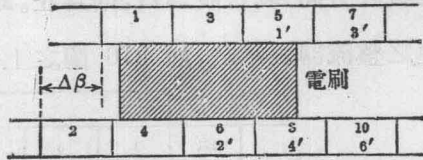
圈邊 2 與另一圈邊在其左者相接，其間相差一節距 y_1 ，即與 1 相差 y_1-1 ，故整流片 2 與 1 相差為 $\frac{1}{2}(y_1-1)$ 截片。惟 B_1 及 B_2 兩刷彼此相隔為 $\frac{S}{p}$ 截片，故以 B_1 處之截片為準， B_2 左近截片之移置為

$$\Delta = \frac{S}{p} - \frac{1}{2}(y_1-1) \quad (15)$$

① “Die Gleichstrommaschine,” 2nd. ed., Vol. I, p. 354.

如 Δ 為負，則此移置向左，為正則向右。按第 313 圖之情形， $\Delta = -\frac{5}{6}$ 。

二刷同時之動作，可藉第 314 圖而研究之。取紙一條，裁成斜線面積之寬，用以代表電刷，且令此紙條在二整流器間滑動。當其與同號數之截片相接時，則此等相當之線圈乃同時受短接。

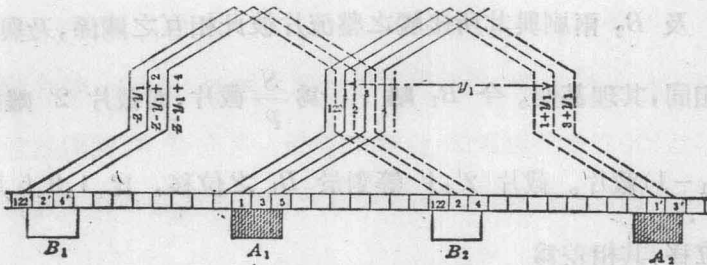


第 314 圖 摺捲同時短接之線圈

(2) 波捲 第315圖示兩重波捲之一部，其常數如下：

$$Z = 122 \quad S = 61 \quad p = 6 \quad a = 4$$

$$y = y_1 = y_2 = 21 \quad \frac{b}{\beta} = 2.5$$



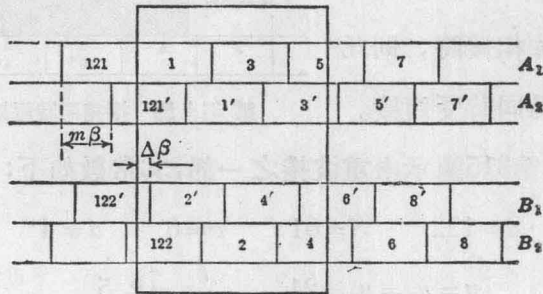
第 315 圖 波捲之同時短接單位

如圖中位置所示，圈邊 122, 1, 2, 3, 4 皆短接。

今以與圈邊 1, 3, 5 等相接之截片名以相同之號數，而與此等線圈他邊相接者，名以 1', 3', 5', 等號數。關於同一中性帶之其他線圈如 2, 4, 6 等，亦可同樣處理之。

同極性之電刷 A_1 與 A_2 ，對於所接觸之整流片，並非處於相似之位置。彼等相隔 $\frac{2S}{p}$ 截片，而線捲單位兩端相距 $y = \frac{2S}{p} \pm m$ ，其中

$m = \frac{\alpha}{p}$, 是以整流片 1', 3', 5 對於 A_2 之關係, 與 1, 3, 5 對於 A_1 之關係, 其相差之量為 $m\beta$ 。設 m 為正 (如圖中所示), 則截片 1', 3', 5' 等之移置方向為右; 設為負, 則為左。此等線捲單位之短路, 可以畫上下相連之整流器表示之, 如 316 圖之上半部。



第 316 圖 波捲同時短接之線圈

B_1 及 B_2 兩刷與其所接觸之整流片彼此相互之關係, 乃與 A_1 及 A_2 者相同, 其理甚明。今 B_1 離 A_1 為 $\frac{S}{p}$ 截片, 而截片 2' 離截片 1 為 $\frac{1}{2}(y_1 - 1)$ 截片。截片 2', 4' 等對於 B_1 之位移, 比 1, 3, 5 等對於 A_1 之位移, 其相差為

$$\Delta = \frac{S}{p} - \frac{1}{2}(y_1 - 1)$$

設 Δ 為正, 則此相差為向右 (圖中 $\Delta = +\frac{1}{6}$); 設為負, 則向左。其完全關係如第 316 圖所示。

設有紙一條, 其寬與刷同, 在虛擬之整流器 A_1, A_2, B_1, B_2 , 上移動, 如有同號數之截片相接觸。則其相當之線圈, 即同時受短接。

8-12. 一槽內數線圈短接之各形相 上述之法, 可用以研究某槽

內數線圈短接之次序或形相。今分爲二種不同之情形如下：

(1) 處於同一徑向平面內之諸圈邊，(上下相疊置)同時進入短接，且同時離去短接。

(2) 處於同一徑向平面內之諸圈邊，其進入及離去短接之時間，彼此各異。

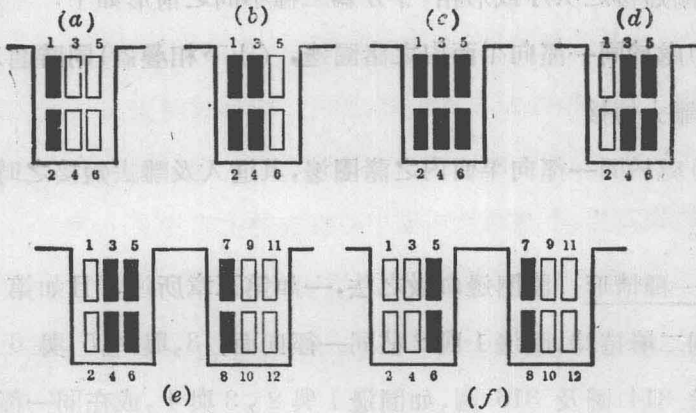
第一種情形 設圈邊命數之法，一如第三章所述，且如第 104 圖所示，則二層捲時，圈邊 1 與 2 佔同一徑向面，3, 與 4, 5 與 6 等均相同。參考 314 圖及 316 圖，如圈邊 1 與 2, 3 與 4, 或在同一徑向面內之任兩圈邊，同時進離短接，則其相同號數之截片間，不能稍有位移。換言之，適合於此種情形之條件爲

$$\Delta = \frac{S}{p} - \frac{1}{2} (y_1 - 1) = 0$$

或
$$y_1 = \frac{2S}{p} + 1 \quad (16)$$

例如有一單重摺捲，每槽有六圈邊，刷寬爲 $2\frac{1}{2}$ 截片，且 $\Delta = 0$ 。依 314 圖所示，惟將 Δ 改爲零，則其相鄰線圈短接之各步形相乃如第 317 圖(a), (b), (c)等部所示。其中有斜紋之線圈表示短接之情形。在一短時間內，如第 317 圖(c)，槽內之諸圈邊同時短接；稍後，仍有六圈邊短接。如(c)所示，惟四邊在一槽內，餘二邊則在次槽內。

從第 317 圖研究之，1 與 2 兩圈邊離去短接時，即受同槽內同時短接之 3, 4, 5, 6 諸圈邊互感作用之影響。3 與 4 離去短接時，即受同槽 5 與 6 兩圈邊及次槽 7 與 8 兩圈邊之互感作用；因短接線圈分置於

第 317 圖 相鄰線圈短接之各形相 $\Delta=0$

不同槽中，故 3 與 4 所受之感應作用必小於 1 與 2 所受者，其理甚明。同理，5 與 6 離短接時，乃受鄰槽中同時短接之 7, 8, 9, 10 諸圈邊之互感影響。是以此兩圈邊所受之感應作用，必更小於 3 與 4 所受者。故於諸線捲單位中，其整流之情形不同，而其短接電流曲線之形式自亦不同。

不寧唯是，當一槽內之各線圈，如第 317 圖中之 1—2, 3—4, 5—6 是，相繼與電刷之接觸分離時，其對於鄰近極尖所處各異。因之當短接末期，每線圈由於邊緣磁場所感生之電勢亦各異。此實由於相繼之截片隔距相等，而線圈等則集於槽中，相隔不等之故。如 317 圖 1 與 2 兩線圈，對於轉動之方向而言，係在 3 與 4 等之前。故 1 與 2 在短接時，較 3 與 4 離短接時所處之磁場為弱。同理，5 與 6 離短接時，較之 3 與 4 所處之磁場更強。今如加於 1 與 2 之整流電勢，適足以與所生之自感互感電勢相消，則於 3 與 4 處，用此同值之整流電勢，以平衡較小之自感互

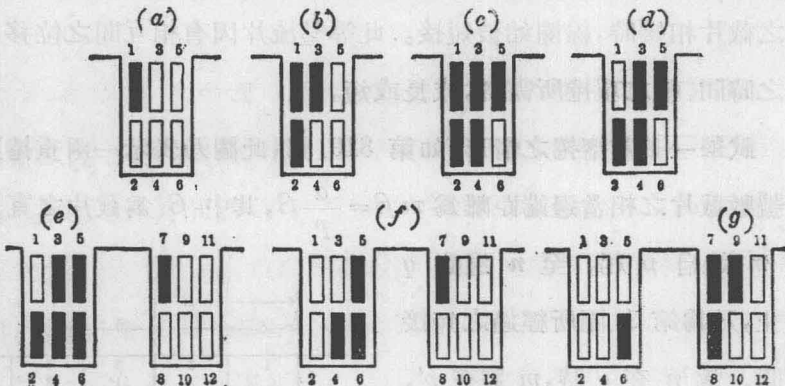
感電勢，自嫌過大；而於 5 與 6 圈則更大，且將有過度整流之現象。於此情形之下，每第三整流片，線電流密度過大而將變黑，為事實之可能。今欲使同槽中行經整流時之諸線圈，所受之磁場強度差異甚微，則每槽所張之角度必小。因此每極之槽數不應小於 12，最好能大於 12；且一刷之兩邊所張之角，不應過於兩極中心線夾角十二分之一。^①

第 317 圖中所示之整流次序，僅適合於整節捲之情形，蓋此種線捲，其後節距 y_1 乃近於 $\frac{2S}{p}$ 。至於弦捲（短節距），乃有 $\Delta \leq 0$ 之特種情形。

第二種情形 自前之分析中言之，第二種情形乃由 $\Delta \leq 0$ 而起。試觀 $\Delta = 1$ 時有趣之變化，即

$$y_1 = \frac{2S}{p} - 1 \quad (17)$$

如有一線捲，其節距能適合於方程式 (17)，每槽亦有圈邊，刷寬為 2.5



第 318 圖 相鄰線圈短接之各形相 $\Delta=1$

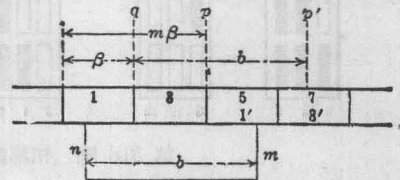
① Gray, "Electrical Machine Design."

截片，則其相鄰線圈整流之次序，約如第 318 圖所示。在此特種情形之下，2與3, 4與5, 6與7 等之各對線圈，同時進入及離出短接。

8-13. 波捲中之選擇整流 試研究單重波捲如第 98 圖所示，則知同極性之數電刷，不但有外加之導線，使彼此相連，且線捲中之短接線圈，彼此亦相通。此圖更表示其內部途徑之電阻，非皆相等，蓋由於電刷接觸面積變異之故。不特如此，短接圈於任何時在邊緣磁場中所移動之位置不能完全相同；是以在該場中由轉動所感生之電勢，均各互有微差。上述兩種事實，均足使電樞電流不能平均分配於各刷中。此總電流中之不均部分，時於各刷間輪流移換，而成週期現象，使恆適合於啓旭夫定律。在波捲中，電刷上電流值之移換，名曰『選擇整流』。

8-14. 短接之時間 在簡單之環捲中，短接之時間，即等於整流片上之一點移動與刷寬同長距離所需之時間。惟自第 314 及 316 圖中視之，此種簡單之關係不能適用於摺捲及波捲，蓋祇有電刷同時與同號數之截片相接時，線圈始被短接。此等整流片因有相互間之位移，故短接之時間，較之環捲所需者，或長或短。

試舉一多重摺捲之情形，如第 319 圖（此圖乃表示一兩重捲），其同號數截片之相當邊端距離為 $m\beta = \frac{\alpha}{p}\beta$ ，其中 β 為截片之寬。當刷之 m 邊自 p 起，至 n 邊到 q 時止，乃為第 1 圈所經過之短接時間。當 n 在 q 時， m 將在 p' ，故短接存在於自 p 至 p' 之距離間。此距離等於



第 319 圖 短接之時間

$$b - (m\beta - \beta) = b + \beta \left(1 - \frac{a}{p}\right)$$

而短接之時間爲

$$T = \frac{b + \beta \left(1 - \frac{a}{p}\right)}{v_c} \quad (18)$$

其中 v_c 乃整流器之周線速度。

波捲之電刷組數如等於磁極數，則可得完全與上相同之結果。如一對或一對以上之電刷組已省去，則上述之關係，須加以改正。按第 316 圖中之 $m\beta$ 爲鄰近兩同性刷距離之位移（以截片爲單位）。故如移去數刷，則上式求 T 之 $m\beta \left(= \frac{a}{p}\beta\right)$ 一項，必須乘以在省去電刷區域內雙極節距數。

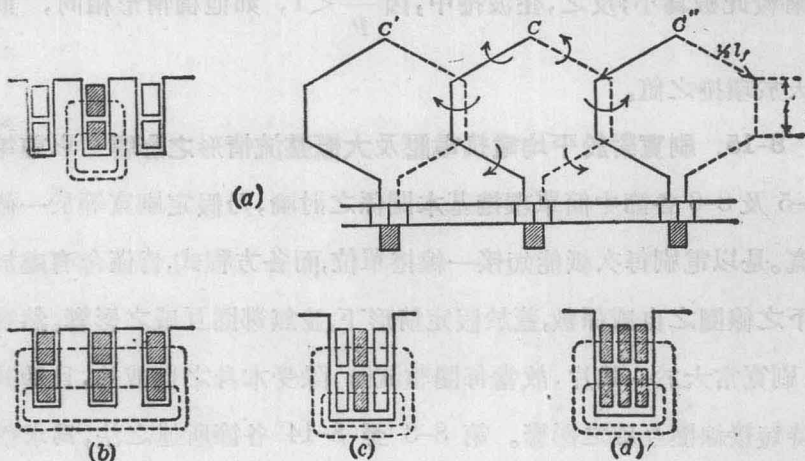
在單重摺捲中， $\frac{a}{p} = 1$ ，是以 $T = \frac{b}{v_c}$ ，即與環捲者同。多重摺捲之 T 將較此數爲小；反之，在波捲中，因 $\frac{a}{p} < 1$ ，如他種情形相同，則 T 將大於環捲之值。

8-15. 刷寬對於平均電抗電壓及大概整流情形之影響 以前第 8-4, 8-5 及 8-6 各節中簡單環捲基本關係之討論，乃假定刷寬等於一截片之寬。是以電刷每次祇能短接一線捲單位，而各方程式，皆僅含有處於整流下之線圈之自感係數，蓋於假定情形下，並無鄰圈互感之影響。然實際上，刷寬常大於一截片，故當每圈整流時，除受本身之自感外，且受其他同時短接線圈互感之影響。第 8-8 至 8-14 各節所述之法，爲求摺捲因寬電刷同時短接之線圈數及其位置與短接期之時間。如已知短接電

流曲線之形狀，則可求電刷上電流密度分佈之情形。現在更須注重基本之數學分析。以包括寬刷對於摺捲波捲諸短接單位電抗電壓平均值之影響。

在未入正文之前，須先知欲求一嚴正之演述，以適於任何式樣之線捲，在實際上為不可能之事。蓋此問題中有甚多互相憑藉之因數，而使數學上之困難，無法解決。但求一相當準確之方程式，可視為規繩者，乃一易事，而此式即有舛差，亦在安全方面。

例如，假定先論有整節距之單重摺捲，每槽有二圈邊，且電刷祇能掩蓋一整流片。每一線捲單位有 $z = \frac{Z}{2S}$ 匝。同時短接單位之圈邊，彼此上下相疊置，如第 320 圖 (a) 之斜紋部所示。某一線捲單位 C 之感應作用，非惟受已圈電流變換之影響，但亦受 C' 及 C'' 電流變換之影響，蓋 C' 及 C'' 之一部與 C 圈佔共同之槽。依照假定線捲之式樣，且更假定與各磁極所連之磁路為對稱，則 C, C', C'' 諸單位之短接電流



第 320 圖 刷寬對於整流之影響

曲線必相等，而各單位在同一時間內電流之變換率 $\left(\frac{di}{dt}\right)$ 亦必相同。故在任何時間之總共感應電勢為 $(L+\Sigma M)\frac{di}{dt}$ ，其中 ΣM 為各互感係數之總和，而電抗電壓平均值為

$$e_r = \frac{2 i_0 (L + \Sigma M)}{T} \quad (19)$$

此當可與方程式(10)相比較。

用伯匣耳及何巴特(Parshal and Hobart)之法(參看第8-6節)，能估定組合係數 $(L+\Sigma M)$ 之值。如以

φ_s = 在同時短接之導體羣中，每安培導體與 C 線圈埋入槽內部分每吋長所鏈之磁力線。

φ_f = 在一同時短接之導體羣中，每安培導體與 C 線圈在槽外之端接部分每吋長所鏈之磁力線。

設槽長 l' ，有 $2z$ 導體，每導體有 i 安之電流，則與 C 圈一邊相鏈之磁流為 $\varphi_s \times l' \times 2z \times i$ 。設每組之端接線長 $\frac{1}{2}l_f$ ，有 z 導體，則與一組端接線相鏈之磁流為 $\varphi_f \times \frac{1}{2}l_f \times z \times i$ 。故與 C 圈兩邊及兩組端接線相鏈之總磁流為二倍於上述兩磁流之和，即

$$\varphi = 2zi(2\varphi_s l' + \frac{1}{2}\varphi_f l_f)$$

今以每安所生之磁鏈數除以 10^8 ，即得所求之感應係數 $(L+\Sigma M)$ ，或

$$L + \Sigma M = \frac{z\varphi}{i} \times 10^{-8} = 2z^2(2\varphi_s l' + \frac{1}{2}\varphi_f l_f) \times 10^{-8} \text{ 亨} \quad (20)$$

依照伯匣耳及何巴特實驗之結果，如用普通之槽，則每一吋長之鐵心，

每一安導體 φ_a 之值約為 10 磁力線(如長度以呎計,則此值約為 4 磁力線),而每一吋之端接線長度,每一安導體, φ_f 之值為 2 磁力線(如長度以呎計,則此值約為 0.8 磁力線)。故如用吋單位,則

$$L + \Sigma M = 2z^2(20l' + l_f) \times 10^{-8} \quad (21)$$

今使刷寬增大,以在三鄰近槽內之圈邊同時短接,如第 320 圖 (b) 所示。圖中漏磁途徑,須經過三槽,非如 320 圖 (a) 之僅過一槽,故其磁阻均大三倍;蓋鐵部之磁阻,與槽內之非磁導體者相較,實無足重要。惟加於此漏磁途徑之總磁勢,亦大三倍,故實在與一線捲單位相鏈之磁流,仍與 320 圖 (a) 所示者相同,而 $(L + \Sigma M)$ 之值亦與 (21) 式相同。但短接之時間,以刷寬增大之故,比前大三倍,故其電抗電壓平均值,亦比前減至三分之一。

試閱第 320 圖 (c) 與 (d) 所示之線捲: (c) 部之電刷祇蓋住一整流片,其漏磁祇等於 (a) 時之三分之一,而整流時間相同,故 (c) 之電抗電壓平均值祇及 a 之三分之一。至於 (d) 之漏磁與 (a) 相同,因磁勢與磁阻均各增三倍。惟因整流時間大三倍,故其電抗電壓平均值,亦祇為 (a) 之三分之一。

上述之結果,可以公式總括之:

$$e_r = \frac{2i_0(L + \Sigma M)}{T} = \frac{2i_a}{a} \frac{L + \Sigma M}{T} \quad (22)$$

其中

$$L + \Sigma M = 2z^2(20l' + l_f) \times 10^{-8}$$

$$T = \frac{b + \beta \left(1 - \frac{a}{p}\right)}{v_c}$$

在單重摺捲情形之下， $a=p$ ， $T=\frac{b}{v_c}=\frac{60}{nS} \times$ 電刷所掩蓋之截片數，其中 n = 每分鐘之轉數， S = 整流片之總數；故如假定有整節距之線捲單位，則

$$e_r = 1.33 \times 10^{-8} \frac{z^2 n S i_a (l' + 0.05 l_f)}{a \times \text{電刷所蓋之截片數}} \quad (23)$$

其中 l' 與 l_f 皆以吋為單位。在此公式中，如電刷所蓋之截片數為一帶分數（如 $2\frac{1}{2}$ ），則所代入之數，須為較大值之整數。

設槽之式樣，與伯匣耳及何巴特試驗中所用之普通式樣，甚有差異，則上述算法 $L + \Sigma M$ 時所用之實驗常數，須加以相當之校正。至於計算 L 及 M 之較詳方法，將於本章之末述之。今姑不論此種校正，即從(23)式推廣至寬刷時之情形觀之，吾人曾假定在同時整流各線圈中電流之變化形相在同時必絕對相同，且其對於時間之變換率，無論何時，又均相等。此顯與實際不符，故(23)式將依事實與假定條件之差別而生舛誤。實際上相鄰短接圈中之電流變換，彼此有若干之差減影響 (differential effect) 故公式(23)之結果，不免過於悲觀，但其舛差乃在安全方面。

在短節摺捲中，同時短接數圈邊，所處之位置，約如第 318 圖 (e)，(f)，(g) 等部所示，每一線圈在槽部分所經過之漏磁流，乃稍小於整節捲者，故如其他情形均相同，則電抗電壓之平均值亦將較少。欲將各種可能之情形總括於一公式中，實為困難，其最善之手續為作一如第 318 圖之圖，選其最高漏磁值之特種組合，於是依上述對於整節捲所用之方法估定其漏磁，或用第 8-21 與 8-22 兩節所述之較確之法亦可。

在單重波捲中，如僅用二刷，則每刷短接 $\frac{p}{2}$ 串聯單位，此可於第三章中第 95 與 98 圖中知之。是以公式 (23)，須乘以 $\frac{p}{2}$ ，即得

$$e_r = 1.33 \times 10^{-8} \times \frac{z^2 n S i_a (l' + 0.05 l_f)}{a \times \text{電刷所蓋之截片數}} \times \frac{p}{2} \quad (24)$$

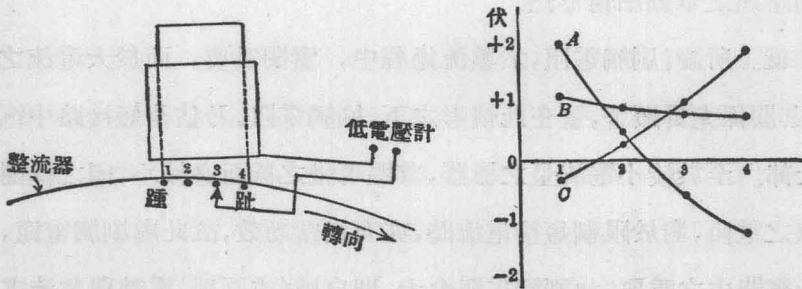
在波捲中，如所用之電刷數為 p ，則每線捲單位當整流期中，分別短接，因之同極性諸刷所短接之 $\frac{p}{2}$ 單位，乃為並聯而非串聯。設電流於 $\frac{p}{2}$ 路中均分，則其電抗電壓，可由 (23) 式計算之。惟因 8-13 節所述之選擇整流，電抗電壓之平均值乃比公式中所得者較大；反之，公式中所包含之整流時間，似嫌過小。依 (18) 式，可知如其他情形皆相同，波捲中之 T 應稍大於單重摺捲者。上述二因之影響適相反，故有彼此平衡之趨向。

自第 320 圖 (a), (b), (c), (d) 之結果，而總括之，可知 (b), (c), 及 (d) 之電抗電壓平均值相同，但均小於 (a)。設每槽之圈邊數大於 2，如 (c) 及 (d)，則刷寬雖增加，而同時整流圈邊之最高數不超過每槽之圈邊數，電抗電壓平均值不受影響。如刷寬增加至同時整流之圈邊數超過每槽之數時〔試以 (b) 與 (a) 相較〕，則電抗電壓之平均值將減少。

8-16. 刷寬間位落之變化 第 8-7 節中所述，如整流為直線式，電刷下之電流密度皆相同，而其功率耗為最小。如整流非直線式，則其局部周路中之電流，可認為由二種電流併合而成，其一乃依直線式之定律，而其他則依一比較更複雜之定律。此直線部分與電樞之主流相合，併成一電流，通過接觸面而至外界周路（或來自外界周路而流經接觸面）。是以如整流為直線式，則接觸面間之位落，各點一律，而在一刷下之整流

器各點間，絕無電位差。但在非直線整流時，則其外加部分，等於一環流經過短接線捲單位與電刷所成之局部途徑。在此情形之下。電刷接觸面間之位落，各點均不相同。

在第 321 圖中，量低電壓之電壓計之一端，係與刷握相連，他端則接於一中號硬度鉛筆之一點上，而使該筆尖能相繼在電刷趾踵間之整流器上等距之四或五點相接觸。如電機在滿載額定速度下運用，則各點所量得之電壓，可畫成一曲線，如 A, B, C 各式所示。 B 曲線示沿電



第 321 圖 電刷接觸位落之測法

刷接觸弧間，有均勻之位落，故近似直線整流。 A 曲線示刷之踵部有過大之位落及電流密度，而其趾部之電流方向倒置，乃為過度整流之情形。 C 曲線為不足整流之特徵，電刷趾部之電流密度過大。如機器有整流極，而所得之曲線如 A ，則可減低其整流極之磁激，以改良之。反之，若測定者如 C 曲線，則應增加其整流磁激。

8-17. 整流電勢，電抗電壓及電刷位落之關係 ① 吾人已知欲得

① 閱者可讀 B. G. Lamme, "Physical Limitations in D. C. Commutating Machinery, Trans. A. I. E. E., Vol. XXXIV, Part II, page 1739 (1915).

圓滿之整流，其必需條件為線圈整流時所感生之電勢，必須極近於整流期中所生自感及互感電勢之值。是以，如自感互感之電勢，可以估定至相當準確程度，並藉其他設計如整流極之助而使感生電勢可在相當限度內，則上述兩種電勢之差可使甚小，而為短接途徑（包含刷觸）之電阻所吸收。反之，設乏特種裝置以感生短接線圈之整流電勢，如電刷因某種需要，固定位置於近主極邊緣磁場中之中性點，則自感互感電勢，必須在能為刷觸及短接圈本身之電阻所吸收之範圍內，如第 8-5 及 8-6 兩節所述之單線圈情形然。

就上所論，刷觸電阻，於整流過程中，實關重要，而於大電流之機器，其關係尤為顯著，蓋在此情形之下，刷觸電阻，乃佔全短接路中電阻之大部。至於較小電流量之機器，其樞導體之截面必較小，因之線圈及引線之電阻，對於限制短接電流時，亦有相當功效，故此處刷觸電阻，非若大機器中之重要。如刷觸電阻愈大，則自感（或互感）電勢與整流電勢之差亦可愈大，是以圓滿整流之負載範圍，亦因之擴張。就通常言，炭刷之接觸電阻，因其硬度之增加而加大。故如有用軟炭刷而乏良好整流之電機，則可易他種較硬之刷以改良之。

刷觸電阻非一常數，乃因電流或溫度之加增而減其值。當刷接觸面間之平均電流密度為每平方吋 35 至 40 安時，通常炭刷接觸面間之位落，約自 1 至 1.25 伏，如電流密度加大，則此位落略有增加。如第九章第 337 圖所示，各種電流密度所得之電刷位落，乃俟其溫度不變時，以電壓計量得之。例如：設電流密度驟然自某值升至一較高之值，其刷位落並非即依第 337 圖而變化，蓋當電流密度驟增時，溫度不能即

立即上升，是以此時之位落甚大。在相當時間之後，溫度增加，刷阻降低，此最後位落之值。乃與第 337 圖相符。自上述言之，偶有短期中相當量之過載時，整流器可無發生劇烈火花之虞，蓋因接觸電阻暫時仍可保持原有值之故。然若過載繼續不止，則此電阻將降至一較小之值，整流線捲單位中之短接電流增大，而火花生矣。

不發生火花，即為整流良好，亦未必盡然。短接圈中電流之變化，可使之不發生火花，但同時其電流密度在刷之某部或可甚大，如第 321 圖 A 與 C 兩曲線所示。刷下分配不均之電流所生之功率耗，對於機器效率之影響，並不重要。但此功率耗使刷與整流器之溫度增高，則甚為不利，其理如前節所言。且過大之電流密度，能使電刷面不平及整流器變黑，以致整流器與刷之接觸面間，無光潤之磨擦，而良好之整流，即不能達到，蓋整流器與刷之平潤，實為良好整流情形之特性。

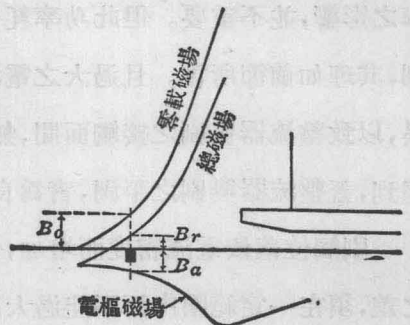
刷觸位落依電流密度而增加，但增加甚緩，故整流電勢與電抗電壓之差，須在一定範圍內而不能過大。例如此相差為 2 伏，則刷下之環流乃為相當於接觸位落 1 伏者，因環流須經過接觸面二次。設此不平衡之電壓為 3 伏，則環流必比較增大而相當於 $1\frac{1}{2}$ 伏之接觸位落。普通炭刷之位落，可吸收 2 至 $2\frac{1}{2}$ 伏之不平衡電壓，而無過大之局部環流。

在一定限度內，整流電勢及電抗電壓之差，能為刷下環流所平衡而無火花。此時之總電流密度，或足使電刷發輝，但無火花發生；待刷下所集中之電能超過某一限度以外，則發生火花。

凡一機器在其許可工作範圍之內，自零載至特許過載中之任何負

載時，其整流電勢及電抗電壓之差，必須保持於一相當範圍之內。零載時樞流等於零（極近於零），故無電抗電壓，而其整流電勢，乃應在火花極限之內。

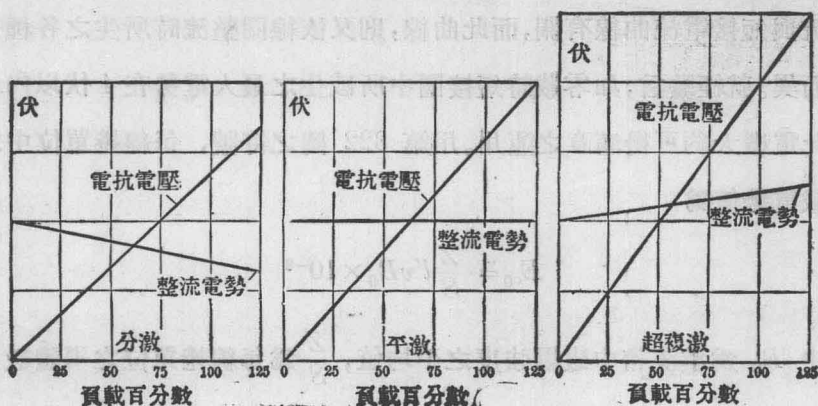
在無整流極之電機中，其整流電勢，乃由兩極間之磁場感生。此磁場之強度，則視場捲及樞捲之總磁勢而定。如無飽和作用，此整流磁場乃等於場捲及樞捲兩磁場分別所生作用之和。實際計算上多用此法，較為簡便。至於飽和之糾擾作用，乃據設計者之意見及其對於所設計之特定式樣電機之經驗，而將計算所得者，加以相當改正。至於場捲及樞捲之磁流分配曲線，可用第四章所述之法以測定之。在整流帶中，此種曲線之式樣如第 322 圖所示。此圖示分激發電機之情形，其電刷在前移位置。自圖中觀之，可知此整流磁場，即使其場激不變，亦因負載之增加而減其值。按



第 322 圖 整流磁場之分佈

整流電勢必須因負載之增加而加其值。故此種相反改變，對於整流電勢，實為不幸之至。仍假定無特種整流裝置，苟電樞所生之磁勢過強或電刷前移不足，則所生之整流電勢，甚至可與所需要者相反。

就上所論，凡恆速分激或別激發電機或電動機之整流磁場均因負載增加而減其值，其感生之整流電勢亦然。從第 323 圖可得一結論；即當最大負載時（通常為過載 25%），電抗電壓，須遠小於二倍火花極限之值，以使電抗電壓與整流電勢之差仍在火花極限以內。反之，超複激發



第 323 圖 線圈整流時之不平衡電壓

電機之整流電勢，因負載增加而增其值，故此種機器在最大負載時之電抗電壓可超過二倍火花極限值而無整流困難。無論任何一種情形，在 125% 負載時，設電抗電壓大於整流電勢，而相差之值等於零載時之整流電勢（此零載值乃在火花極限內），則約於 $\frac{5}{8}$ 滿載時，二電勢彼此適相抵消。

上節之討論，乃說明超複激或串激發電機中之優點。不特如是，如整流帶中電樞之正交磁化作用應受抵消，而其整流磁場，又與負載成正比例，則在任何負載時，電抗電壓適可平衡，因之而得理想上之整流情形。此種作用，可用整流極以得之。整流極乃置於兩主極相距之中點，而以樞電流激其磁性。（參看第九章）。

當寬刷短接數線圈時，負載雖甚穩定，刷接觸面定點上之位落（可以第 321 圖之法測定之），亦未必不變，而每作脈振形，如第 310 圖對於電流密度者所示。第 321 圖中以電壓計量得之值，僅為平均值。此脈振之影響，使刷下生高頻電流，而此電流，又須由接觸電阻限制之。此種

電流與短接電流曲線有關，而此曲線，則又依線圈整流時所生之各種電勢而異。就經驗言，如零載時短接圈中所感生之最大電勢在 4 伏以內者，則此電機大約可得滿意之運用。用第 322 圖之符號，每線捲單位中之零載電勢值為

$$E_{c0} = \frac{Z}{S} l' v B_0 \times 10^{-8}$$

其中 B_0 為整流帶中磁場強度之平均值， $\frac{Z}{S}$ 為每線捲單位之導體數， v 為周線速度，以呎/秒計。上述乃假定線圈為整節距，故兩圈邊同時截切同強度之磁場。如用短節捲則各邊所感生之不等電勢必須求其代數和。在有載時，每單位之整流電勢將減為

$$E_{c1} = \frac{Z}{S} l' v (B_0 - B_a) \times 10^{-8} \quad (25)$$

如用弦捲，則上式亦須酌加修改。 E_{c1} 既小於 E_{c0} ，故得整流滿意之條件為

$$E_{c0} = \frac{Z}{S} l' v B_0 \times 10^{-8} < 4 \text{ 伏} \quad (26)$$

自上述之理，顯知整流帶中之磁流密度 B_0 ，必須為吾人易於控制者，俾電刷可置於一位置而擔保各負載時均得良好之整流。欲達此目的，整流極尖鄰近之磁場強度應逐漸減少，不宜驟然變更。此可用下法得之：即極尖之氣隙應長於極靴中部之氣隙。

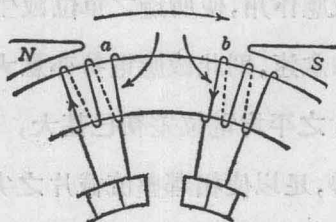
8-18. 整流磁場之脈振 當整流期中，因電樞之轉動。齒與槽對於極靴之位置，時作週期之變動。因此之故，兩極間周線上之樞磁流亦呈一振擺現象。短接圈中電流之變換，更使此區域中之磁流發生脈振。就全

部論之，磁流將有脈振現象，蓋極面下之齒面，並非各處絕對相同，因之磁周路中之磁阻，亦有週期性之變更。上述各種作用，均係高頻的，且於短接圈中，感生變向極速之電勢，此種電勢乃加於前述之主要電勢，而短接電流曲線乃成鋸齒形。此種脈振作用，可以用多數小槽（每槽含較少之圈邊）而減少之。

8-19. 短接電流對於主磁場之反作用，飛閃 第 324 圖 (a) 與 (b) 示發電機線圈整流時，最初及最後之位置。在位置 (a) 時，此線圈加一去磁磁勢於主磁周路，而在 (b) 時，則其作用相反，其所生磁勢之方向與主磁勢同。如整流實現於幾何中軸上，且短接電流曲線，對於 O 點 (第 303 圖) 為對稱，則此去磁作用與磁化作用相消。但如在整流中期時，線圈適在幾何中軸上，而短接電流曲線並不對稱，則其作用乃偏重於某一方。在過度整流時，整流時期之大部分如 (b) 位置所示，故結果有磁化作用。當不足整流時，其結果為去磁作用。此種說法應用於電動機時則相反。

當發電機於零載時轉動，電刷所短接之線圈中將生電流。此電流之方向，乃依磁場之方向而定，因之即視電刷位移之方向而定。如電刷為前移，則短接圈中電流之方向如第 324 圖 (b) 所示，而有磁化作用；如為後移，則結果為去磁作用。此零載短接電流之值，足以使主磁流受其影響。

因之，更影響於吾人實驗所測定之斷路特性曲線。



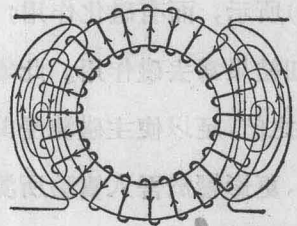
第 324 圖 短接線捲單位之磁化作用

設一有全磁激之發電機，忽然將兩主端短接，則線圈整流時之電流

甚大，而線圈之感應作用，延阻電流之轉向，故生一強大之去磁作用。此種情形，在有整流極之機器中尤為顯著。去磁作用之自然結果，乃使電機之主磁流變弱，因之減低短接之損害。惟主磁流乃代表多量之儲能，此儲能不能立時變換。故短接圈之去磁作用雖大，主磁流之減低甚緩。且此去磁作用，必須於主場捲中，有一相當之增加甚速之電流以抵消之。換言之，短接圈與場捲，二者有感應上之關係，一如變壓器或感應圈之原圈及副圈。當電機短接時，電流忽然增加，因之於場捲中感生一反射之電流衝量。惟場捲之電阻，並未更變，故激磁電流之驟增，使場捲兩端之電壓有明顯之加增，而此加增之電壓實足以損壞場捲之絕緣。

設整流器兩相鄰截片間之電壓太大，則其間將發生電弧。如兩異極性之電刷間，各截片依次有此種現象，其結果乃等於電機短接。此種現象，名之曰飛閃 (flash-over)。飛閃現象，或因整流器不潔所致，但其主要原因乃由於電機本身之電磁情形。

電機短接或過載時，樞電流忽然增加，而其所生之交叉磁流，亦約按比例而增大，如第 325 圖。在增加之過程中，此磁流對於樞捲單位發生感應作用，使所鏈之單位感生一電勢與電流變換率成正比。樞電流之增加愈速，則此感應電勢亦愈大。如相鄰截片之平均電位差初已甚大，此加添之電勢，足以使相鄰整流截片之尖處，有火花放電，因之主電流更得一游離或傳導之電路。此感生之電勢，於兩刷中間之單位中為最大。如電機通常本有大量電流



第 325 圖 樞捲單位所鏈之交叉磁流

之變更，此種飛閃之趨勢，甚為劇烈。例如換向滾磨之電動機，即有此種情形為免去此種危險，應用特種裝置。下面第九章中將述及補償捲，此捲可用以抵消電樞交叉磁流之作用。

8-20. 火花常數 平均電抗電壓可以下式表示之

$$e_r = \frac{2 i_0}{T} L$$

此式甚為重要，已如前述。今以上式略為改變，使包括電機之主要設計常數，因此在設計之中途，可用以審核所選之常數是否適當。自以前之結果，得

$$T = \frac{b + \beta \left(1 - \frac{a}{p}\right)}{v_c}$$

$$L = \frac{4 \pi}{10^9} z^2 l' \times F$$

其中 F 為一機器大小之函數。吾人更知

$$z = \frac{Z}{2S}$$

$$v_c = v \frac{d_{com}}{d}$$

其中

v = 電樞周線速度

d = 電樞直徑

d_{com} = 整流器直徑

$$\frac{Z i_0}{\pi d} = q = \text{電樞上每挀周線之安培導體數}$$

以上列各式代入 e_r 式中，得

$$e_r = C \frac{Z}{S} l' v q \quad (27)$$

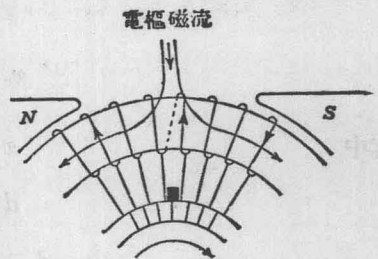
其中

$$C = \frac{2 \pi \beta F \times 10^{-9}}{b + \beta \left(1 - \frac{a}{p}\right)}$$

$\frac{Z}{S} l' v q$ 之量，可以作為整流條件之特性。用米制時，其平均值約為 20×10^6 。用英制時 (l 以吋計， v 以呎/分計， q 以每吋周線安導體計)，則其數約為 40×10^6 。

8-21. 樞磁理論 因樞電流磁化作用所成之畸形氣隙磁流，可視為分別由場磁勢及樞磁勢發生之兩磁流所綜合而成。嚴格言之，磁回路中如有一部鐵飽和時，則非絕對確實，惟可作為近似之假定。是以設電刷之位置在幾何中軸上整流時，則短接圈將不受主磁之作用，惟在空間亦佔有固定位置之樞磁流（其位置與主磁流相直交）。將感生一電勢於此短接圈中，一如主磁流對於極靴下之導體之作用然。關於發電機之情形，乃如第 326 圖。此圖指出一種事實，即樞磁流所感生之電勢，乃與短接圈中本有之電流之方向相同，故此電勢將延阻樞電流之轉向。欲去此弊，此電勢必須用一反方向之電勢以抵消之，且反向電勢之值，似宜稍大，使其所餘之電勢，能助電流之轉向。

吾人如移置電刷之位置，使其整流於場磁流密度較濃部分發生，則可得反向電勢。或電刷仍置中軸，則用整流極產生反電勢以抵消樞電勢（參閱第九章）。



第 326 圖 電樞磁流之發生

根據以上之分析，蘭姆氏 (B. G. Lamme) 曾為說明整流之全部現象^①。此種理論上之優點，在其注重整流過程中之物理現象。在此理論中，自感及互感之作用，已包含於截切樞流所感生電勢之中，然終未明白利用自感及互感之電勢。例如在上述作者之論文中，有下列之說明：

『依通常之理論而言，當線圈整流時，此線圈所生之局部磁流，乃假定係反方向者。然於實際整流帶中，某數部分磁流在全整流期內保持其固有之值與方向而不變。此乃數佐證中之一，表示對於此種問題，通常之數學假定，與事實上有顯明之矛盾。』

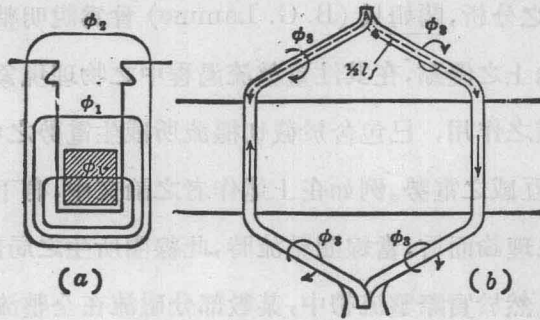
自激磁流之轉向，乃為自感電勢之起因，而非僅感應理論中之數學抽象部分。蓋此磁勢對於線圈，實有轉向，但對於空間之位置，則未嘗改變其方向，此乃線圈移動之結果，於第 324 圖中已明白表示之。此圖乃示短接線圈電流轉向前後之兩不同位置。惟設此自激磁流乃視為發生自感電勢者，則計算整流磁流時，應將此部除去；換言之，此整流磁流乃為場捲磁流與整流帶外之樞線圈所生之磁流所綜合而成。

8-22. 有槽電樞中自感係數 L 之計算法^② 一線圈之自感係數，吾人已知等於每安電流之磁鏈數除以 10^8 ，關於埋在槽中之電樞線圈，其與本圈相鏈之自激磁流，可分三部：

(1) 自此齒之壁至他齒之壁，經樞心而完成其周路之磁流，如第

① B. G. Lamme: "A Theory of Commutation and its Application to Interpole Machines," Trans. A. I. E. E., Vol. XXX, Part 3, p. 2359 (1911); A. Still: "Elements of Electrical Design," Chap. VIII, pp. 215-241, McGraw-Hill, Co.

② 如電機設計另成一學程者，則 8-22 與 8-23 兩節可略去。



第 327 圖 圓繞線圈之漏磁途徑

327 圖 ϕ_1 所示。

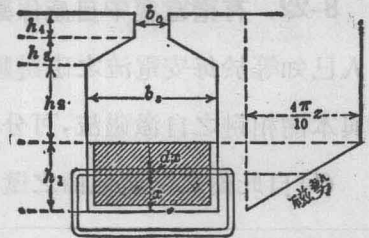
(2)在極尖間，自此齒尖至他齒尖之磁流，如 ϕ_2 所示。

(3)與樞心外端接線相鏈之磁流，如 ϕ_3 所示。

各種磁流之磁鏈數，可分別計算之如下：

(1)槽漏磁流 所有直流機之線捲，大概均為二層，實際上無有例外。每線圈之一邊在上層，而他邊則在下層，故一圈之兩邊，其磁流之大小及分佈，並非相同。

(a)在槽底之圈邊(328圖)。此圈邊有 $z = \frac{Z}{2S}$ 導體，其每單位電流之總磁勢為 $\frac{4\pi}{10}z$ 吉〔柏〕。假定磁力線穿過槽時為直線，一單位磁力管 dx 所受之磁勢為



第 328 圖 在槽底線圈之槽漏磁流

$$\frac{4\pi}{10} \frac{x}{h_1} z,$$

故在此單位磁路中之磁流為

$$d\varphi'_1 = \frac{4\pi}{10} \frac{x}{h_1} z \frac{b_s}{l'dx}$$

其中 l' 為樞心之改正長度，而所有之尺寸均用呎為單位。上述之分母示磁周路空氣部分之磁阻，蓋鐵部之磁阻在比較上實不足重視。此磁流與 $\frac{x}{h_1}z$ 導體相鏈，故其磁鏈數為

$$\frac{4\pi}{10} \left(\frac{x}{h_1} z \right)^2 \frac{l'dx}{b_s}$$

此式以 10^9 除之，則得電感(以亨[利]計)如下：

$$\therefore dL'_{1b} = \frac{4\pi}{10} \left(\frac{x}{h_1} z \right)^2 \frac{l'dx}{b_s} \times 10^{-9}$$

線圈全深度之總磁鏈數，可用 x 自 0 至 h_1 之積分得之，即

$$L'_{1b} = \frac{4\pi}{10^9} \frac{z^2 l'}{h_1^2 b_s} \int_0^{h_1} x^2 dx = \frac{4\pi}{10^9} z^2 l' \frac{h_1}{3 b_s} \quad (28)$$

在此線圈之上，其磁勢為一恆量，即 $\frac{4\pi}{10} z$ 。故於 h_2 之區域內，磁

流之分佈均勻，其值為

$$\varphi''_1 = \frac{4\pi}{10} z \frac{b_s}{h_2 l'}$$

且因其所鏈為全導體，故

$$L''_{1b} = \frac{4\pi}{10^9} z^2 l' \frac{h_2}{b_s} \quad (29)$$

同樣，因 h_3 及 h_4 區域內磁流所生之電感數為

$$L'''_{1b} = \frac{4\pi z^2}{10^9} z \times 10^{-8} = \frac{4\pi}{10^9} z^2 l' \frac{2h_3}{b_0 + b_s} \quad (30)$$

及

$$L^{IV}_{1b} = \frac{4\pi}{10^9} z^2 l' \frac{h_4}{b_0} \quad (31)$$

故槽漏之總感應係數為

$$\begin{aligned} L_{1b} &= L'_{1b} + L''_{1b} + L'''_{1b} + L^{IV}_{1b} \\ &= \frac{4\pi}{10^9} z^2 l' \left(\frac{h_1}{3b_s} + \frac{h_2}{b_s} + \frac{2h_3}{b_0 + b_s} + \frac{h_4}{b_0} \right) \end{aligned} \quad (32)$$

如為直槽(第 329 圖 a), 則得

$$L_{1b} = \frac{4\pi}{10^9} z^2 l' \left(\frac{h_1}{3b_s} + \frac{h_2}{b_s} \right) \quad (33)$$

如槽形為第 329 (b) 圖所示, 則

$$\begin{aligned} L_{1b} &= \frac{4\pi}{10^9} z^2 l' \left(\frac{h_1}{3b_s} + \frac{h_2}{b_s} + \frac{2h_3}{b_0 + b_s} \right. \\ &\quad \left. + \frac{h_4}{b_s} \right) \end{aligned} \quad (34)$$

(b) 在槽頂之圈邊(第 330 圖), 依上法推

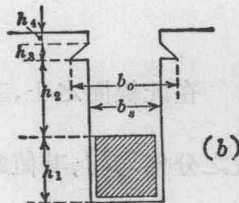
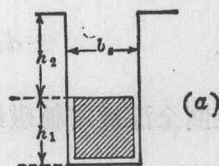
求, 可知 L_{1t} 與 L_{1b} 完全相等, 惟 h_2 應以 h'_2 代之。故槽漏之總感應係數為

$$L_1 = L_{1b} + L_{1t} \quad (35)$$

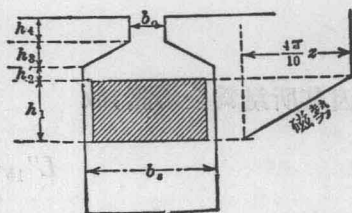
其值比 L_{1b} 之兩倍為小。

2. 齒尖漏磁流 假定自此尖

至他尖之磁力線乃為一直線部分 b_0



第 329 圖 直槽中之線圈



第 330 圖 在槽頂之線圈

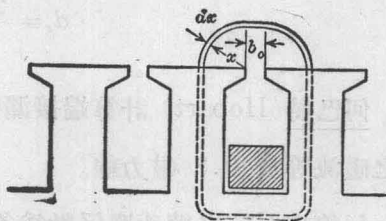
及二象限所組成，如第 331 圖，則在單位磁路 dx 中之磁流爲

$$d\varphi_2 = \frac{\frac{4\pi}{10} z}{b_0 + \pi x} l' dx$$

故線圈兩邊之總感應係數爲

$$\begin{aligned} L_2 &= 2 \times \frac{4\pi}{10^9} z^2 l' \int_0^{\frac{1}{2}(\tau-b)} \frac{dx}{b_0 + \pi x} \\ &= \frac{4\pi}{10^9} z^2 l' \times 1.46 \log_{10} \left[1 + \frac{\pi(\tau-b)}{2b_0} \right] \end{aligned} \quad (36)$$

$(\tau-b)$ 表示兩極尖相隔之距離，積分之上限乃取此數之半，蓋假定線圈整流時約在二極尖之中部。由此式所算得之 L_2 值，似嫌略大，蓋吾人未嘗計算因鄰近槽之開口而減少磁流之影響^①。



第 331 圖 齒尖漏磁流

3. 端接漏磁流 計算端接線所生之感應作用，有許多近似之公式。倪哈冒(Niethammer)^②擬定爲

$$L_3 = z^2 l_f \left[0.4 \log_{10} \left(\frac{l_f}{s} \right) - 0.1 \right] \times 10^{-8} \quad (37)$$

- ① 方程式中之極限，已用許多實驗以校核之，其所得之結果，與實際測定者甚相符合。安諾德(Arnold, "Die Gleichstrommaschine")以全節距爲上限而格雷(Gray: "Electric Machine Design")則僅用一齒寬。
- ② Niethammer, "Elektrische Maschinen Apparate u. Anlagen," Vol. I, p. 139.

其中 s 為長方形線圈截面之對角線長(包括各匝間之絕緣物),而 l_f (參看 327 圖b)為每線捲單位之總端接線長度。

安諾德^① 擬定為

$$\begin{aligned} L_3 &= z^2 l_f \left[0.46 \log_{10} \left(\frac{\frac{1}{2} l_f}{d_s} \right) - 0.092 \right] \times 10^{-8} \\ &= z^2 l_f \left[0.46 \log_{10} \left(\frac{l_f}{d_s} \right) - 0.23 \right] \times 10^{-8} \end{aligned} \quad (38)$$

其中 d_s 為一圓周之直徑,此圓周與線圈截面之周圍(包括匝間之絕緣物)同長。即

$$d_s = \frac{2(a+b)}{\pi}$$

何巴特(Hobart) 計算端接漏磁流,乃假定每安導體每端接線長度之磁流等於 0.8 磁力線。

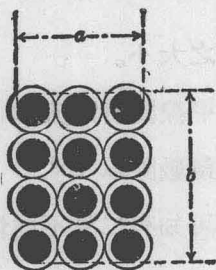
每線捲單位之總感應係數為各部漏磁流所生感應係數之總和,即

$$\begin{aligned} L &= L_1 + L_2 + L_3 \\ &= \frac{4\pi}{10^9} z^2 l' \left[\left(\frac{2h_1}{3b_s} + \frac{h_2 + h_2'}{b_s} + \frac{4h_3}{b_0 + b_s} + \frac{2h_4}{b_0} \right) + \right. \\ &\quad \left. 1.46 \log_{10} \left(1 + \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\tau - b}{b_0} \right) \right] + \frac{z^2 l_f}{10^8} \left[0.4 \log_{10} \frac{l_f}{s} - 0.1 \right] \end{aligned} \quad (39)$$

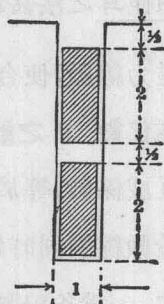
伯厘耳及何巴特曾將彼等測定電樞線圈感應係數所得結果公佈於世^② 彼等自此得一平均之數,即諸線圈每安導體每端埋入槽中部分之

① Arnold: "Die Gleichstrommaschine," 2nd ed., Vol. I, p. 376.

② Parshall and Hobart, "Electric Generators," 1900.



第 332 圖 線圈之截面



第 333 圖 槽之大小比例(特種情形)

長度所鏈之磁流約有 4 磁力線(如以吋計則有 10 磁力線),而每安導體每呎端接線長度所鏈之磁流為 0.8 磁力線(如以吋計,則為 2 磁力線)。上述諸式中,如以習常之長度大小之尺寸,代入,則彼此結果甚相符合。試舉一直槽電機為例,設槽之深寬之比為 5:1 (第 333 圖),且 $\frac{\tau - b}{b_0}$ 約為 10, 即兩極間約有 5 槽。令 $z=1, l'=1$ 呎, 則

$$L_{1b} = \frac{4\pi}{10} \left(\frac{2}{3} + 3 \right) \times 10^{-8}$$

$$L_{1l} = \frac{4\pi}{10} \left(\frac{2}{3} + \frac{1}{2} \right) \times 10^{-8}$$

其平均值為

$$\frac{4\pi}{10} \left(\frac{2}{3} + 1 \frac{3}{4} \right) \times 10^{-8} = 3.05 \times 10^{-8}$$

同樣,線圈一邊之 L_2 值為

$$\frac{4\pi}{10} \times 0.73 \log_{10}(1+15.7) \times 10^{-8} = 1.11 \times 10^{-8}$$

故其總和為 4.16×10^{-8} 亨。換言之,即每安導體每呎長有 4.16 磁力

線。何巴特與伯匣耳之法甚為簡易，惟有一不便處，即設計者須十分慎重選擇正確之磁力線數，使合於某一電機之大小。

8-23. 互感係數 M 之計算法^① 如甲線圈有電流 1 安流過，則甲乙二線圈之互感係數，等於乙線圈之磁鏈數除以 10^8 。

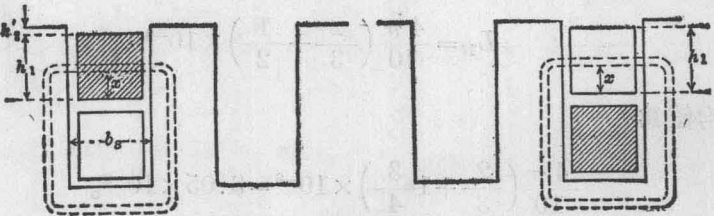
從以前關於數線圈同時短接之討論，可知有二種不同情形。一為各線圈佔同一槽內，一為各線圈在異槽內。今分別研究之：

1. 在同槽之線圈 在此條件之下，又有二種可能之情形：(a) 線圈彼此並置；(b) 線圈彼此疊置，或非疊置而在不同層中，即一在頂層，一在底層。

(a) 如在槽內圈邊並置，而全長度皆然，則可寫為 $M=L$ ，而無舛誤，其理甚為明顯。

(b) 圈邊既在不同層中，則其端接線背道而行，故互感作用，祇因槽內及齒尖之磁流而得。

第 334 圖中之斜紋部分示一線圈之兩邊。左邊之感圈乃在槽底，



第 334 圖 互感作用之漏磁途徑

而生每安 $\frac{4\pi}{10}z$ 吉之磁勢於單位磁力管 dx 上。故其槽磁鏈為

① 同 8-22 節註。

$$\int_0^{h_1} \frac{4\pi}{10} z \frac{x}{b_s} + \frac{4\pi}{10} z^2 l' \frac{h'_2}{b_s} = \frac{4\pi}{10} z^2 l' \left[\frac{h_1}{2b_s} + \frac{h'_2}{b_s} \right]$$

同樣，右面圈邊之槽磁鏈為

$$\int_0^{h_1} \frac{4\pi}{10} z \frac{x}{b_s} + \frac{4\pi}{10} z^2 l' \frac{h'_2}{b_s} = \frac{4\pi}{10} z^2 l' \left[\frac{h_1}{2b_s} + \frac{h'_2}{b_s} \right]$$

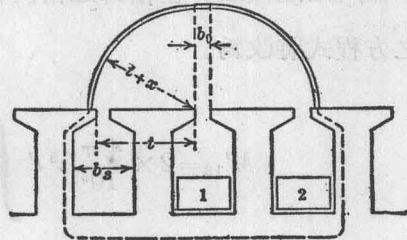
其結果與前者相同。

齒尖漏磁流所生之磁鏈，乃與以前計算 L 時相同。故最後之結果為

$$M = \frac{4\pi}{10^9} z^2 l' \left\{ \left[\frac{h_1}{b_s} + \frac{2h'_2}{b_s} \right] + 1.46 \log_{10} \left[1 + \frac{\pi}{2} \frac{\tau - b}{b_0} \right] \right\} \quad (40)$$

2. 在異槽之線圈 (a) 二圈同層。在此情形下，線圈邊各處皆並

行，故其相鏈磁流乃為沿埋入槽內部分之齒尖漏磁流，及沿端接線之端接漏磁流之和。茲先研究齒尖漏磁流，第 335 圖



第 335 圖 鄰槽中線圈之互感

故在 dx 管中，其磁鏈為

$$\frac{4\pi}{10} z \frac{x}{b_0 + \pi(t+x)} dx$$

而此磁流在線圈兩邊所發生之互感係數為

$$\begin{aligned}
 M'_{12} &= 2 \times \frac{4\pi}{10^9} z^2 l' \int_0^{\frac{\tau-b}{2}-t} \frac{dx}{b_0 + \pi(t+x)} \\
 &= \frac{4\pi}{10^9} z^2 l' \frac{4.6}{\pi} \log_{10} \frac{b_0 + \frac{\pi}{2}(\tau-b)}{b_0 + \pi t} \quad (41)
 \end{aligned}$$

此值似乎過大，蓋演算積分至兩極尖時，未將槽口之影響顧及。

端接漏磁流所生之互感作用，實難於估計。安諾德主張以單圈自感係數之半數表示之，即為

$$M''_{12} = z^2 l_f \left[0.2 \log_{10} \left(\frac{l_f}{s} \right) - 0.05 \right] \times 10^{-8} \quad (42)$$

而 $M_{12} = M'_{12} + M''_{12} \quad (43)$

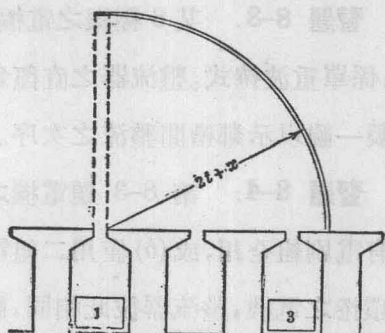
如所論之線圈非在相鄰之槽內，而其位置乃如 336 圖所示，則上述之方程式將改為

$$\begin{aligned}
 M'_{13} &= 2 \times \frac{4\pi}{10^9} z^2 l' \int_0^{\frac{\tau-b}{2}-2t} \frac{dx}{b_0 + \pi(2t+x)} \\
 &= \frac{4\pi}{10^9} z^2 l' \frac{4.6}{\pi} \log_{10} \frac{b_0 + \frac{\pi}{2}(\tau-b)}{b_0 + 2\pi t} \quad (44)
 \end{aligned}$$

$$M''_{13} = \frac{1}{4} L_3 = z^2 l_f \left[0.1 \log_{10} \left(\frac{l_f}{s} \right) + 0.025 \right] \times 10^{-8} \quad (45)$$

而 $M_{13} = M'_{13} + M''_{13}$ (46)

至於如 336 圖所示以外之情形，實無計算之必要，蓋其所得之值乃比較甚小。且通常電刷罕有如此之寬，以使同時短接線圈之距離，過於三槽。



第 336 圖 非鄰槽中線圈之互感

(b) 二圈異層 在此情形下，齒尖漏磁所生之互感係數 M'_{12} 與 M'_{13} 仍如前同；惟端接漏磁流乃為零，蓋此等線圈在離槽後，彼此分開，且背道而行。是以

$$M_{12} = M'_{12} = \frac{4\pi}{10^9} z^2 l' \frac{4.6}{\pi} \log_{10} \frac{b_0 + \frac{\pi}{2}(\tau - b)}{b_0 + \pi t} \quad (47)$$

$$M_{13} = M'_{13} = \frac{4\pi}{10^9} z^2 l' \frac{4.6}{\pi} \log_{10} \frac{b_0 + \frac{\pi}{2}(\tau - b)}{b_0 + 2\pi t} \quad (48)$$

上式中槽口之影響，仍未顧及，故所得之值，或為過大。

習 題

習題 8-1. 今有二同樣電機，一機之整流為直線式，另一機則為正弦式，分別如第 303 圖之 *c* 及 *d* 曲線所示。試求其刷接觸面電阻耗之比例。

習題 8-2. 某電機中之短接電流有如第 303 圖之 *b* 曲線。假設 *b* 為一拋物線，其頂尖在曲線之最低部。如刷寬等於 $2\frac{1}{2}$ 整流片，試製一

圖以表明刷接觸面均離五點上之電流密度。

習題 8-3. 某 6 極機之電樞有 67 槽，每槽 4 導體，每線捲單位 1 匝，係單重波捲式。整流器之直徑為 10 吋，刷寬 0.75 吋（正切方向）。試製一圖以示鄰槽間整流之次序。

習題 8-4. 第 8-3 題電機之轉動速度為每分鐘 1150 轉。如 (a) 所有電刷組全用，或 (b) 僅用二組電刷，試分別求其整流時間。若有一簡單環捲之電機，整流器彼此相同，試比較其整流時間。

習題 8-5. 二同式電機，其區別僅在有補償線捲與否。試比較此二機在過載同百分數時之磁漏情形，並申述其理由。

習題 8-6. 今有一 4 極複激式電機，電樞為單重被捲式且有二整流極。當此機用為積複激發電機時，試製一圖以示各線捲之電流方向，各極之磁性，及迴轉之方向。如迴轉方向不變，今欲使樞端之極性相反，問將如何變換其接線方法而得之？

習題 8-7. 第 8-6 題中之電機今用為分激電動機（仍留整流極），且其迴轉方向與前者相反。試將其可能接法——詳述之。

習題 8-8. 有整流極之電動機，如其電刷向迴轉方向移動，其對於電動機之運用將有何影響？試申述其理由。

第九章 整流裝置,補償捲及整流極

9-1. 電機無輔助裝置時之整流 以前所論,凡關於無火花整流之重要電磁原理,已詳及之。至於整流器與電刷應善為構造,以得完全之接觸面,而避免振動,蓋不待言。刷與刷柄之自然振動週期須與整流器轉動時所發生之不規則振動週期稍異,以避免機械共振。整流器及所用之銅質必須一律,以保護圓柱面,而截片間之雲母絕緣體,必須略向下凹,以免因銅與雲母磨損不等而生攪擾。

免除火花,前章論之已詳,茲為完全起見,僅將其磁電要義及可採用之法,作一總括而節述如下:

(1) 每一刷下短接圈中所生之整流電勢,不可大於 4 至 $4\frac{1}{2}$ 伏,

或

$$E_{co} = -\frac{Z}{S} l v B_0 \times 10^{-8} < 4 \text{ 至 } 4\frac{1}{2} \text{ 伏}$$

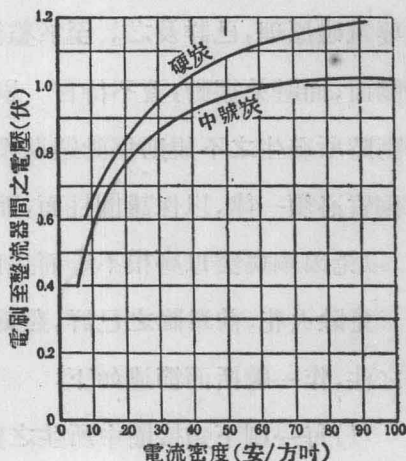
此方程式根據於整節捲之假設;如為短節捲,整流圈之兩邊所受磁場強度不等,有時為同極性,故所生之電勢彼此相消,結果使短接電勢減低。同時電樞去磁作用亦減少。此二者皆表明短節捲之優點,但在此種線捲中,短接圈至少有一邊與一極尖相近,而極尖之磁場強度變更甚速,故此種情形限制刷之移動帶,而與邊緣磁場漸漸變更之需要不相符合。

(2) 平均電抗電勢為

$$e_r = \frac{2 i_0}{T} (L + \Sigma M) < 2 i_0 R_b$$

當小於 1 伏，可從 $\frac{R_b T}{L} > 1$ 之關係中推得之。 e_r 之極限值以刷觸之電壓降落 ($2 i_0 R_b$) 為準，約為 1 伏。電刷之炭愈堅，則電壓降落亦愈大，故須要電阻整流時，必用硬炭，第 337 圖表示中號炭及硬炭用為電刷時，接觸位落與電流密度之變化。

當電流密度漸增時，位落漸趨常數，甚為明顯。自整流器至電刷之接觸位落，通常較自電刷至整流器者稍大。



第 337 圖 電刷位落與電流密度之關係

(3) 電刷不可過闊，俾同時短接線圈中之互感作用可以減少。實際上刷寬罕有超過整流片寬之 3.5 倍者。若欲得相當大小之接觸面，以遞電流，則可調準刷之軸

向長度。通常硬炭刷之平均電流密度，約為 30 安/方吋 (5 安/方呎)，軟炭刷者約等於 65 安/方吋 (10 安/方呎)。平均值約為 40 安/方吋。至於金屬刷，則可容較高之電流密度至 160 安/方吋。

同時短接之線圈數既為

$$n_{sc} = \frac{b}{\beta} \cdot \frac{p}{a}$$

且 $\frac{b}{\beta}$ 之比常為 2 至 3.5 間之數，故如遇特別困難時， $\frac{p}{a}$ 應使之甚小。

$\frac{p}{a}$ 之比在串聯線捲 (二周路) 時最大，故如電抗過大，惟有將線捲繞為

混聯或完全並聯以補救之。

(4) 減少線捲單位之匝數,可使圈中之自感係數不致超出限度之外;反之,若電樞導線數業已固定,則增加整流片之數,亦可使自感係數變小。另一使 L 值減低之法,為擇一較短之電樞軸向長度。由此數點觀之,設計者宜使直徑與軸長有較大之比。整流片數加多,則每片所載之電壓不大,而其平均值為 $V \div \frac{S}{p} = \frac{pV}{S}$ 。在單重摺捲中,此值應小於 20 伏,在可能範圍內,宜使小於 15 伏。在串聯式中,兩鄰近截片間之電勢差不得超過 40 伏。否則機器中難免有『飛閃』之慮。

採用大直徑時,槽數亦可增加,而每槽僅含少數圈邊,如此互感作用即可減少。槽數既多,則在兩極尖中間之槽數亦隨之而增,足以消除整流磁流之振擺,因而減少總磁流之脈振。

(5) 在第四章中,曾說明欲防止由電樞畸變作用而生之整流磁場換向,下述關係必須滿足:

每極電樞安匝數 $\equiv 1.1$ 每極磁場安匝數。

此係數 1.1,通常以 0.8 或 0.9 代之。

換言之,即主磁場之強度須遠勝於電樞所生之磁場。電樞磁勢所作用之磁路,既與由主場激所作用者,不完全相同,故若在電樞之橫 (transverse) 磁路中,加以磁阻,則電樞反作用之擾亂必可減少,實甚明顯。設同時受上述二種磁激之磁路,其某部已於零載時飽和,則載流幾不發生畸形影響;故飽和之作用,實與增加磁阻相同。

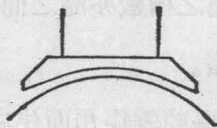
上敘第一法,驟視之若甚簡易,其實不然,蓋電樞磁勢所作用之磁路包括主磁路之重要部分,即氣隙及鄰近鐵部是也。在電樞磁路上加入

磁阻，即對於主路增加相當磁阻，於是所需之場激亦增，而機價亦高。應用此原理之設計，乃採用縱槽於極心，如第 338 圖所示。但因電樞磁

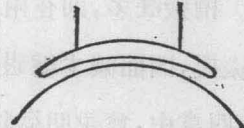


第 338 圖 極心上之縱槽

流，可捨過槽之路，而自槽後經過，故該法是否有效，尙屬問題。最有效之設計，乃包含增加磁阻與飽和作用二項。其額外之磁阻，可將極之兩尖截成斜面，或使極面略成偏心以得之，如第 339 圖及第 340 圖。發電

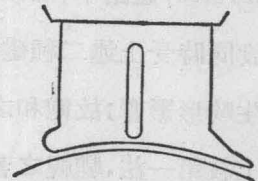
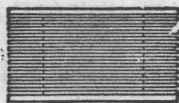
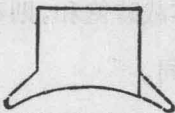


第 339 圖 去角之極面



第 340 圖 偏心之極面

機中，飽和情形在後拖尖最爲重要，但在電動機中則前越尖較爲重要。今如用薄而長之極尖，可得需要之飽和。在疊片極中，可用形如第 341 圖之鐵片，疊成所需之厚，使射出諸尖，左右交疊。極面之正面圖如第 342 圖。所謂疊片極者，未必全部爲疊片所造，若僅極靴按此構造，而用螺釘裝於整塊極心上亦可。



第 341 圖 第 342 圖 疊片極之構造 第 343 圖 倫岱爾發電機之磁極

第 343 圖爲倫岱爾(Lundell) 發電機中磁極之構造。此類電機僅能於單方向旋轉。

樞齒飽和之作用,與極尖飽和之作用相同。故齒之磁流密度可有意使之增高至 140,000 線/方吋(21,000 線/方呎)者。凡電刷置於幾何中點之電動機,如用於鐵道者,此法尤爲普通。

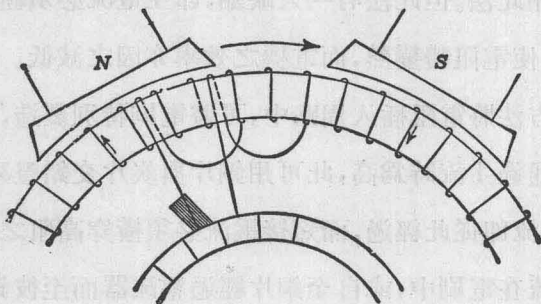
(6) 邊緣整流磁場之強度應遞次增減,此可將極尖製成相當式樣以適合之。極尖氣隙之長度可用下式計算:

$$\delta' = \frac{(1.25 \text{ 至 } 2) \left[\frac{\beta Z i_a}{360 a} - 2 AT_i \right]}{1.6 B_g}$$

(此式見第四章)

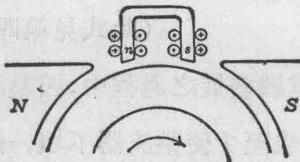
9-2. 最早時之整流裝置 在直流電機發展之過程中,因整流上發生困難,早已發明各種裝置以避免火花,或至少使整流器不壞,而減少其維持費用。有數種裝置,乃短接線圈中引入足以抵消電抗電壓之電勢。其他亦有在線圈周路中增加電阻,以使短接電流限於安全值者。

第 344 圖所示之賽耀(Sayer) 線捲中,乃將反向電勢,用輔助線

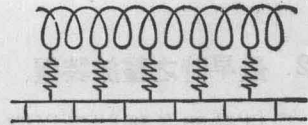


第 344 圖 賽耀線捲

捲導入短接圈中，此輔助捲在整流期內截切一部分主磁流，並與適在整流之線圈串聯。除整流時外，其餘時間輔助捲不在電周路之內。實際上輔助圈不過將整流器引線延長而繞於電樞上而已。對於轉動方向而言，輔助圈係在主圈之後面，故其整流電勢全賴後拖極尖之磁流密度，與普通電機中之賴前越極尖者，完全不同。後極尖之磁場密度，既因電流而增加，故整流電勢亦隨之而增加。此種整流情形之自動調準，以後極尖飽和為限度。賽耀之裝置近已廢去不用，與斯溫朋^①(Swinburne)之整流裝置，僅可供歷史上之研究，而無實用之價值。後者以馬蹄形電磁鐵置於中性帶而激以主電流，如第 345 圖。



第 345 圖 斯溫朋整流裝置



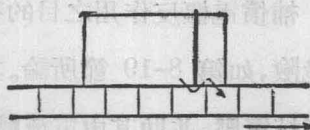
第 346 圖 整流器之高電阻引線

在短接線圈周路中插入電阻之最簡單方法，乃如第 346 圖所示。圖中整流器引線係用高比電阻 (specific resistance) 之合金。有數種交流電動機即引用此法。但此法有一大缺點，即主電流必須經過此等額外之電阻體，結果使電阻體變熱，而電機之效率亦因之減低。

除依上敘方法將電阻插入周路中，可將電刷特別製造，使在短接電路中之電阻較通過主流時為高，此可用銅片與炭片交錯豎列以得之。銅導電甚易，故主流即從此經過，而短接電流必須橫穿高阻之銅炭串聯片層。但短接電流在電刷中，或自至銅片經過整流器而至彼銅片，則可不

① Jour. Inst. Elec. Eng. (London), p. 106 (1890).

經炭層。故此種電刷有時亦將失其本來之效用。較佳之法為楊(Young)董(Dunn)二氏所設計者^①，即用一輔助炭刷，使與主刷絕緣，短接電流最後即在此斷裂，如第 347 圖所示。如此在整流過程之最後一步，周路中可增加甚大之電阻。



第 347 圖 主刷與絕緣之輔助刷

最近凡整流遇有特別困難時，則採用整流極，其他諸法多已擯棄。如運用條件仍有特殊困難時，則用補償捲以助之。其主要特點，將於下列各節中詳論之。

9-3. 補償原則 樞電流所引起之交磁作用，實為磁場畸變之主因。磁場既有畸變，則電刷必須移位，於是去磁作用又隨之而起。故吾人苟加一與交流作用大小相等，方向相反，且空間勻布相同之磁勢以抵消之，則磁場畸形可完全免去，而刷之位移，亦不必要(除非刷移乃為改善整流者，可仍沿用之)。若此補償電勢大於電樞磁勢，則中性帶適可有相當之磁勢，以使短接圈中電流方向轉變。如此電刷即可永置於幾何中軸之位置。

如補償安匝數與電樞安匝數之比為一，則樞磁流將完全消去。如略大於一，則整流帶有一反向磁流。當磁周路未飽和以前，此反向磁流隨樞電流而增，適合於各種負載情形下，最完美整流之條件。上述二種情形，無論其比數為一或大於一，此補償線捲之電流，必為樞電流之全部或一部，故補償線捲必須與電樞串聯，至於分流器(diverting shunt)，

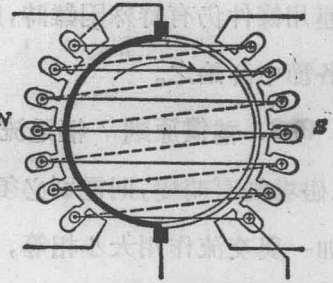
① Elec. World, p. 481 (1905).

則可裝可不裝，一如複激電機中之串激線捲然。

補償電樞反作用之目的有二：一即阻止磁場畸變，以免整流器飛閃之危險，如第 8-19 節所論。其他目的為發生整流電勢以抵消短接圈中之電抗電壓，並助其中電流轉換方向。此二者尤以第二項更為重要。

9-4. 補償線捲 德國孟其(Menges)氏於 1884 年宣布其補償電樞反作用之原理。其法即在極旁用靜止補償捲圍環電樞，使樞電流或其一部分經過之，其方向適可以反對電樞上之磁化作用。後至 1892 年，

賈安(H. J. Ryan)與湯姆孫(M. E. Thompson) 按其原理更作試驗，得一法如第 348 圖所示。圖為二極發電機，補償捲埋於極面之槽中，至其分配之疎密，一如樞捲，故能完全抵消電樞

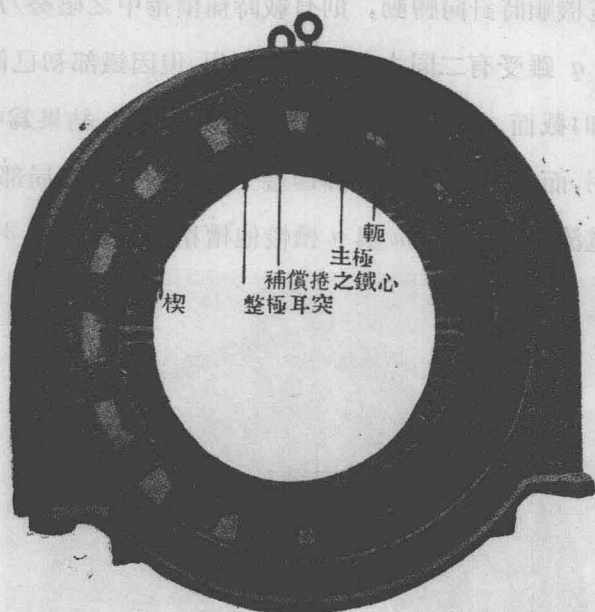


第 348 圖 補償線捲

之反作用。圖中電樞導線中之電流，為全部電流之半，故補償匝數必為有效交磁匝數之半。在較大之多極電機中，每極補償匝數必為每極電樞匝數之 $\frac{1}{a}$ ， a 表示電樞電流之路數。

第 349 圖示利支威電機公司 (Ridgway Dynamo and Engine Co.) 所造此類電機之磁場外架。全部磁路係用鋼片製成，而磁軛夾於鑄鐵架內。裝置分流線捲之主極係用螺釘固定於軛上；裝補償捲之鐵心，亦用螺釘固定於主極上，並藉木楔以固整流耳突之位置。此種木楔又可減少此極至彼極之磁路截面，因之減少磁漏。

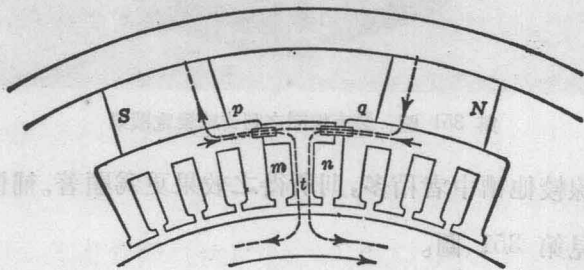
全部磁路所以用疊片之故，因負載電流如變更甚速，則在一整塊金屬體中，易引起渦流。依侖茲定律，此種渦流與其產生之來源，適有相反



第 349 圖 利支威發電機架(示有槽極面)

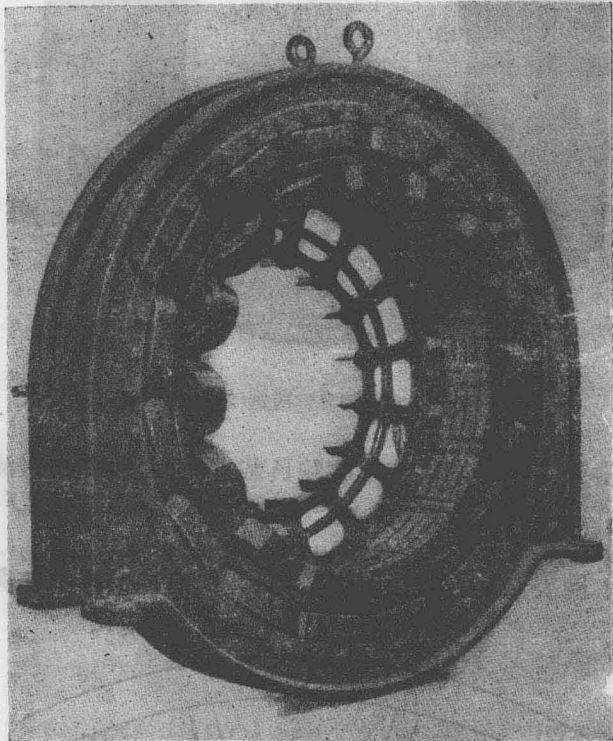
之作用，故當整流帶中之磁流最應隨負載電流而變更時，磁流之調準反受其阻礙而致遲緩。

第 350 圖表示一電機磁路之一部，此機有補償捲，即與前述者相



第 350 圖 有補償捲時磁極中之磁流途徑

同。設此發電機順時針向轉動，則有載時補償捲中之磁勢乃如虛線所示。圖中截面 q 雖受有二同方向磁勢之作用，但因鐵部初已飽和，故實無磁流之增加；截面 p 則受兩不同方向磁勢之作用。結果為中齒 t 受總磁勢之作用，而成一北極，此北極即發生一適當方向之局部磁場，以助短接圈中電流之轉變。若 m 與 n 槽較他槽稍大，(參看第 349 圖)，且

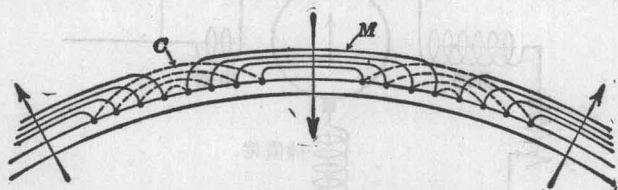


第 351 圖 裝有線圈之利支威發電機架

二槽中之導線較他槽中者稍多，則所得之效果更為顯著。補償捲與磁場捲之排列法見第 351 圖。

德利(Deri)之裝置法，與湯姆孫賈安法相似，但磁場不用凸極場架

及有槽環,而用一有槽之圓柱體,上繞二組線圈圍環電樞,如第 352 圖。主捲 M 所生磁極之軸線乃如箭頭所示。補償捲 C 所生之磁勢,沿兩

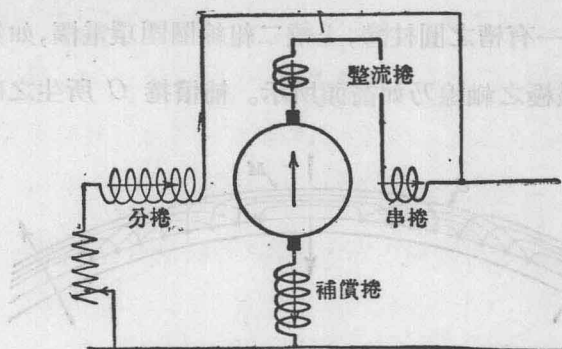


第 352 圖 德利式主捲與補償捲之排列法

極間之中軸作用,而與電樞磁勢方向相反。磁場之構造與感應電動機(induction motor)中之定子(stator)相似。磁路中各部分沿徑向之磁阻既皆相等,故可得完全抵償。

9-5. 整流極 整流極(有時名曰內間極,因其位於主極之間,見圖 356)幾摒除他種整流輔助裝置,而獨佔特殊之地位。極上激磁之線捲與電樞串聯,而其磁勢則恰與電樞所發生者相反,因此與補償線捲相似,但其功用則殊異。補償線捲(如上所述)之空間分佈乃在極弧之間,與電樞相似,故可以抵消該處大部分由樞勢所生之橫磁流,而其最有益之結果即為阻止飛閃之趨向。反之,整流極於整流帶間發生頗大之局部磁勢;如極面形狀合適,磁流亦調準得當,則整流磁場之方向,分佈及強度,皆為適合,必能整流於零載至過載之間。有時負載之變化甚速,且其範圍又過廣,如換向滾磨機,則須在該機上,同時採用整流極與補償線捲。

第 353 圖示一複捲電機之接線圖,並附有整流極及補償線捲。為與本書各圖所採用之標準系統(引用他種書籍之圖在外),劃一起見,此



第 353 圖 兼有補償捲及整流極之複激電機

圖不僅示電路連接之順序，且示各線捲磁軸間之相互關係。圖中之箭頭示各磁勢之方向。補償線捲及整流線捲恰與電樞磁勢相反。此二線捲之磁勢皆沿電刷軸之方向，但分聯及串聯主線捲之磁勢作用，則與刷軸成直角。

今之所以普遍應用整流極者，其主因即以目前之需要，已非齒部高度飽和，極尖飽和及氣隙加大等方法所能滿足。新式之機器速度既高，電樞之直徑自必較小，但必有相當之放熱面積以消去大電機內之熱量，故其軸長必增加。此種比例，使電樞磁勢與磁場磁勢之比增加，故設計時如對於原料之有效使用已達極限，則整流極當為必具之具，以保證圓滿之整流。且整流極能調準發電機之電壓，及電動機之速度，其限度絕非無整流極之電機所能達者。

電樞之磁勢決非整流極之磁勢所能完全抵消，蓋因分佈不同之故。倘事實上決不需要完全抵消以免除飛閃，則此種情形決非缺點。蓋通常之目的乃在整流帶中發生一適當強度之反向磁流，至於帶外之磁流分佈，則對整流並不重要。整流極安匝數與電樞安匝數之比既為一定數，

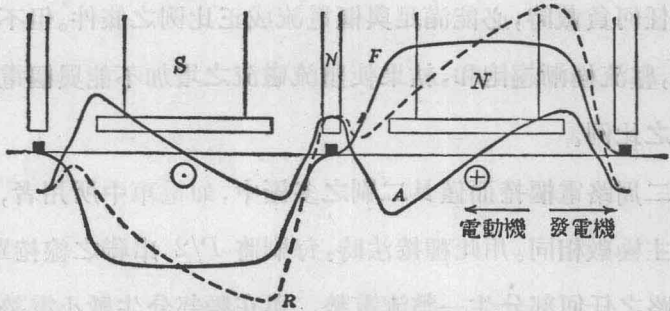
故二者之差亦必與樞電流成正比例。如整流極磁路之磁阻不變，則整流磁流在任何負載時，必能滿足與樞電流成正比例之條件。但不幸在過大負載時，整流極漸趨飽和，結果使整流磁流之增加不能與樞電流之增加依嚴格之比例。

在二周路電樞捲而僅具二刷之多極中，如電車中所用者，整流極數不必與主極數相同。用此種捲法時，每刷將 $P/2$ 串聯之線捲單位短接，且在周路之任何部分生一整流電勢，與在數部分生數小電勢相加有同等效果。普通鐵道用之四極電動機常用二整流極。

整流極之存在，可增加主極之磁漏，因鄰近主極間磁漏途徑減短，散磁係數有時竟達 1.8 或更大。欲減少磁漏，整流極之長與闊必須減至最小限度，而主極之跨度應較普通機器者為小。故極弧與極節距之比數常用 0.60 至 0.65，以代 0.70。整流極之跨度當等於或略大於一槽中之線圈經過整流時期該槽所移之距離。整流極之軸長，可使短於主極，因抵消電勢之發生，乃在線圈之何部分，實無關緊要。但若整流極縮短，則磁場強度必較全長時為大，約為全長與真長之比，至於磁流之邊緣作用，自亦應酌加顧及。由此引起設計上之一種衝突。蓋欲減少磁漏而減短極之長寬，則磁流密度之增加，將使過載時之飽和現象。更難免除。

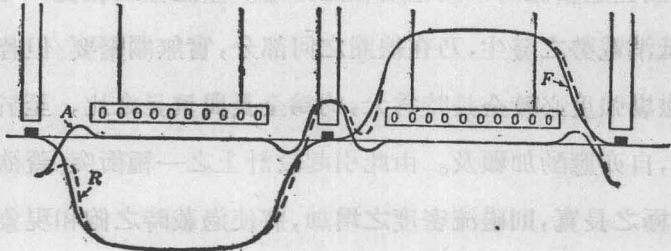
9-6. 氣隙間之磁流分佈 當一電機裝有整流極時，其總電流可作為由二部組成：(1) 主線捲單獨作用所生之磁場；(2) 電樞捲與整流極捲相串聯而共同發生之磁場，但與主磁場線捲無關。此種將兩磁場分開所得之錯誤，已於第四章提出，但顯可忽略不顧。

第 354 圖中 F 曲線代表主磁場線捲之磁場分佈， A 曲線代表電



第 354 圖 整流極機之磁場分佈

樞及整流極磁化作用合生之磁場。 R 曲線由此二曲線相加而得，代表總磁流之分佈。吾人可注意 R 曲線在刷軸鄰近有深刻凹處。若主極弱而電樞所發之磁強，此凹處將在主極尖下變為反極磁性。其結果將使整流片間之電壓加大而易生飛閃。果遇此種情形，則須用補償線捲以抵消電樞反作用。完全補償電機中之磁流分佈，乃如第 355 圖所示。



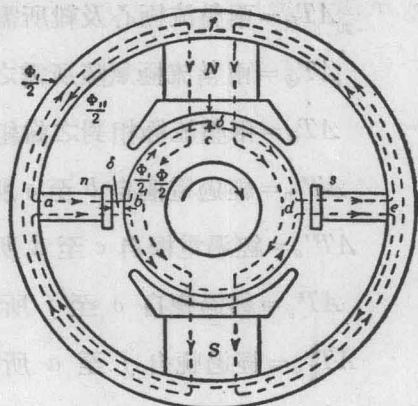
第 355 圖 有補償捲之整流極機之磁流分佈

9-7. 整流極之線捲 計算繞於整流極上之線捲，並無特殊困難。

整流極必須具有充分之安匝數，以平衡電樞安匝數及供給一磁勢，以使整流磁流通過橫磁途徑 n, s (第 356 圖)。凡主極 N, S 所供給之磁勢，如與整流極在共同之磁路中，則於計算時亦須顧及。圖中示二極發電

機，其轉動為順時針向。設此機為同方向轉動之電動機，則整流極之極向必須改變。苟樞電流之方向改變，則可自動得此結果，蓋整流線捲與樞捲本係串聯故也。

第 356 圖表出下列各事實：在樞心及軛之四象限中，其主極與整流極在二象限所生之



第 356 圖 整流極機中之磁周路

磁流方向相同，而在其他二象限則相反。如無飽和現象，則各磁勢所生之磁流必各成比例；果如此，則有二象限中之電樞磁流為 $\frac{\Phi + \Phi_i}{2}$ ，他

二象限中者為 $\frac{\Phi - \Phi_i}{2}$ ，式中 Φ_i 為整流極所生之有用磁流。同樣，有

二象限中之軛磁流為 $\frac{\Phi_i + \Phi_{ii}}{2}$ 而在其他二象限為 $\frac{\Phi_i - \Phi_{ii}}{2}$ 。此處

$\Phi_i = \nu \Phi$, $\Phi_{ii} = \nu_i \Phi_i$ ，其中 ν 為主極之散磁係數， ν_i 為整流極之散磁係數。整流磁流為

$$\Phi_i = B_{ig} b'_i l'_i$$

其中 B_{ig} 為整流極下氣隙之磁流密度，可從整流電勢求得之； b'_i 為整流極之校正寬度， l'_i 為其校正長度。此種寬度及長度較真正大小，約大整流極下氣隙 δ_i 之三四倍。在磁周路 $abcdefa$ 之各部，必有一定之磁流密度，以符於 Φ 及 Φ_i 之值，並有一定之安匝數以符於此磁流密度。該安匝數可自相當之 $B-H$ 曲線中求得之。設

AT_{i_0} = 兩整流極心及靴所需之安匝數

AT_{i_g} = 兩整流極氣隙所需之安匝數

AT_{i_i} = 兩整流極相對之齒組所需之安匝數

AT'_a = 經過電樞自 b 至 c 所需之安匝數

AT''_a = 經過電樞自 c 至 d 所需之安匝數

AT'_y = 經過軛自 e 至 f 所需之安匝數

AT''_y = 經過軛自 f 至 a 所需之安匝數

依啓旭夫定律，磁周路 $abcdefa$ 中磁勢之代數和必爲零。此周路內除上列諸磁勢外，尚有二整流極捲之磁勢 AT_i 與電樞之磁勢 AT_a 。按

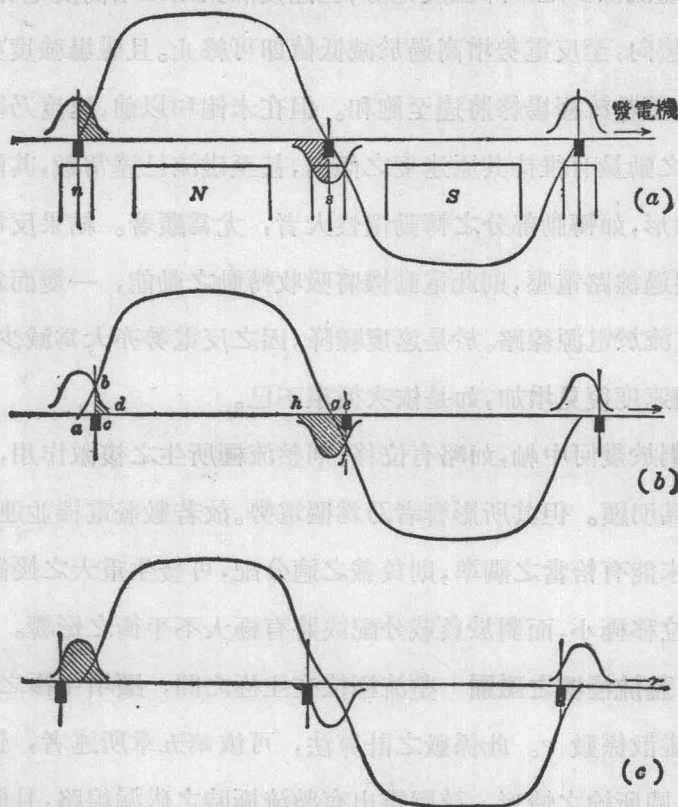
$$AT_a = \frac{2}{p} \cdot \frac{Z}{2} i_a = \frac{Z i_a}{\pi d} \cdot \frac{\pi d}{p} = q \tau$$

$$\therefore AT_i = q \tau + AT_{i_0} + AT_{i_g} + AT_{i_i} - AT'_a + AT''_a + AT'_y - AT''_y$$

苟整流極線捲中無分流器；則其匝數等於 $\frac{1}{2} \frac{AT_i}{i_a}$ 若有分流器，則匝數必須加多。

以上所論雖指二極機(圖 356)而言，但多極機亦可由此類推。

9-8. 整流極之複激作用 第四章論及發電機電刷，如有前移則生去磁作用而減少所生之電勢；如有後移，則生複激作用。若發電機具有整流極，電刷位移之結果益顯，可自第 357 圖見之。如 357 圖(a)，刷在幾何中軸之位置，兩鄰刷間之樞捲僅受主極磁流之作用，因整流極所生之各磁流方向相反，互相消去(如圖中斜紋面積所示)。設刷依轉動方向前移，如 357 圖(b)，則總磁流減少 efh 與 bcd 面積之差及 abc 與 efg 面積之和。若刷向後移，如 357 圖(c)，則其結果爲鏈於樞捲之磁流增加。



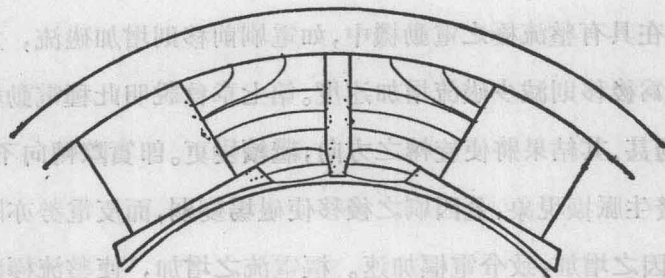
第 357 圖 整流極之復激作用

同理，在具有整流極之電動機中，如電刷前移則增加磁流，於是減低速度，如為後移則減少磁流增加速度。第七章曾說明此種電動機之刷，如向後移過甚，其結果將使旋轉之方向，繼續變更。即實際轉向不變，而速度亦必發生脈振現象，蓋因刷之後移使磁場變弱，而反電勢亦隨之減低，樞電流因之增加，致令電樞加速。樞電流之增加，使整流極磁場變強，而主場變弱，於是電樞之加速更增。但反電勢與有效磁流及速度成

正比例。磁流減少足以降低反電勢，但速度加大足以增高反電勢，故電樞加速之趨向，至反電勢增高過於減低值即可終止。且磁場強度亦不致長此減弱，蓋整流極場終將達至飽和。但在未飽和以前，速度乃繼續增加。電樞之動量有維持其原速度之傾向，甚至磁流已達常數，其傾向仍存。此種情形，如轉動部分之轉動慣性大者，尤為顯著。結果反電勢驟增，或竟超過線路電壓，則此電動機將吸收轉動之動能，一變而為發電機，轉送電流於電源線路。於是速度驟降，因之反電勢亦大為減少，而樞流增多，則速度復見增加，如是依次循環不已。

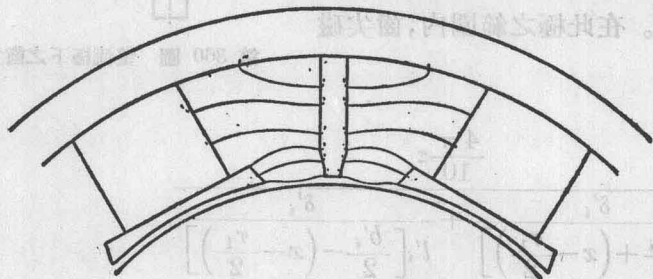
電刷對於幾何中軸，如略有位移，則整流極所生之複激作用，在發電機中亦甚明顯。但其所影響者乃為樞電勢。故若數發電機並連運用，而各電刷未能有恰當之調準，則負載之適分配，可發生重大之擾亂。即各電刷之位移極小，而對於負載分配或將有極大不平衡之影響。

9-9. 整流極機之磁漏 整流極位在主極之間，顯增主極之磁漏，因而增加磁散係數 ν 。此係數之計算法，可依第五章所述者，惟須合於第 358 圖所繪之情形。該圖畫出有整流極時之磁漏線路，且假定僅主極有激磁作用。



第 358 圖 有整流極時主磁流之磁漏

如主極無激磁，而整流極有之，則整流極之磁散係數 ν_i 可按第 359 圖所示之磁漏路線而計算之。通常整流極甚窄狹，且軸長亦小於主極者，故不必分別計算其由側邊發出之磁漏，僅於計算主極與整流極二邊之磁漏時，即可將該部磁漏包括在內。其法以原整流極之軸長再加其闊



第 359 圖 整流極之磁漏

之半，作為計算時之整流極軸長。整流極靴之側邊磁漏，亦可以同法計算，以臻簡便之效。

計算整流極之磁漏時，須注意各磁流管磁位之變異，如第五章所論及者。在整流極線捲上之軛部，其磁位可作為零。沿極心而下，磁位按直線式而漸增，以至極靴時為 $\frac{1}{2} AT_i$ 安匝。若整流極之漏磁流算出為 φ_i ，而其有效磁流為 Φ_i ，則磁散係數即為

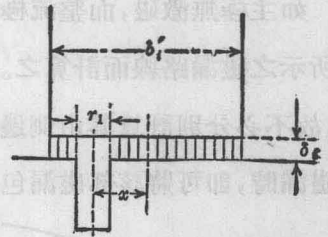
$$\nu_i = \frac{\Phi_i + \varphi_i}{\Phi_i} = 1 + \frac{AT_i}{\Phi_i} \times \text{大小尺寸之函數}$$

整流極所發出之有效磁流 Φ_i ，僅須足以在短接圈中發生反向電勢，比較甚小，而漏磁流 φ_i 則較大，故 ν_i 之值常在 2 與 5 之間。

9-10. 整流極對於線圈自感之影響 短接線圈之在整流極下者，自感係數將略增加。蓋在 $L = L_1 + L_2 + L_3$ (見第八章) 公式中，齒尖磁

漏所發生之 L_2 乃受其影響，其值可計算於後。

設槽中心有一圈邊，距整流極中心 x 呎，整流極之校正寬度為 b'_i ，如 360 圖。在此極之範圍內，齒尖磁流為



第 360 圖 整流極下之齒尖磁流

$$\frac{\frac{4\pi}{10}z}{l'_i \left[\frac{b'_i}{2} + \left(x - \frac{r_1}{2} \right) \right]} + \frac{\delta'_i}{l'_i \left[\frac{b'_i}{2} - \left(x - \frac{r_1}{2} \right) \right]}$$

$$= \frac{4\pi}{10}z \frac{l'_i}{4\delta'_i} \left[\frac{(b'_i - r_1)^2 - 4x^2}{b'_i - r_1} \right]$$

故線圈兩邊之平均自感係數為

$$L_2 = 2 \times \frac{4\pi}{10^9} z^2 \frac{l'_i}{4\delta'_i} \int_0^{\frac{b'_i - b_0}{2}} \left\{ (b'_i - r_1) - \frac{4x^2}{b'_i - r_1} \right\} dx$$

$$= \frac{4\pi}{10^9} z^2 l'_i \frac{(b'_i - r_1)^2}{6\delta'_i}$$

在以上二式中 δ'_i 為氣隙之校正長度，等於 $\delta_i \frac{t}{t - \sigma r_1}$ ，均以呎為單位。

設 $l' < l'_i$ ，上式中須加一項如下：

$$\frac{4\pi}{10^9} z^2 (l' - l'_i) \times 1.46 \log_{10} \left[1 + \frac{\pi(\tau - b)}{2r_1} \right]$$

第十章 效率,定額,及發熱^①

10-1. 慣例及測定效率 效率之定義乃為機器發出之功率與其吸收者之比。計算比率時,其入量與出量之單位,必須相同。若為發電機,其入量為機械功率而出量為電功率,電動機則反之,其入量為電功率而出量為機械功率,故計算以前須先化為同單位之數。通常功率之單位為瓦(watts),瓩(kilowatts)及馬力(horse power),而

$$1 \text{ 馬力} = 33000 \text{ 呎-磅/分}$$

$$1 \text{ 瓩} = 1000 \text{ 瓦} = 1.34 \text{ 馬力}$$

發電機之定額,尋常以其速度及電壓皆為額定值時機端可得之預計。電動機之定額則以其速度及電壓皆為額定值時其軸端發生之瓩或馬力表示之(惟鐵道電動機不在此列)。

在工程規範中,吾人公認有二種不同之效率,曰慣例效率,曰直接測定效率。尋常所用者均為慣例效率,下節當詳述之。設下文用效率時不說明為何種效率,即指慣例效率而言。又如下文提及效率而不說明在何種負載情況者,普通均明白其為額定負載而溫度在 75°C . 時之效率。

慣例效率,可自基本關係計算之。

① 讀者欲得更詳細之敘述,請參看:

“A. I. E. E. Standards” (1925).

“Handbook of Apparatus Standards” (NEMA),

“Motor and Generator Standards” (NEMA),

“A. E. S. C. Standards,”

“I. E. C. Standards.”

$$\text{入量} = \text{出量} + \text{損耗}$$

$$\text{出量} = \text{入量} - \text{損耗}$$

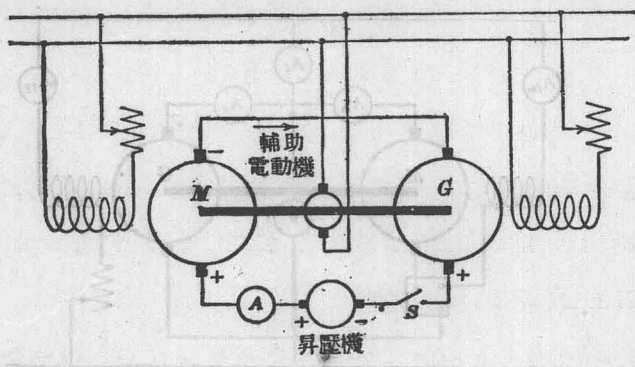
$$\text{故 效率} = \frac{\text{出量}}{\text{入量}} = \frac{\text{出量}}{\text{出量} + \text{損耗}} = \frac{\text{入量} - \text{損耗}}{\text{入量}} \quad (1)$$

若相當各負載時之損耗，均能精確量得，則自上式求得之效率，乃為真正效率；但因種種原因（下節當詳述之），數種損耗，不能準確量得，每假定其數值，故有慣例效率之稱。

直接測定效率可直接測定其入量與出量以求之。例如較小之直流發電機，其機械入量可用輸送測力計（transmission dynamometer），其電氣出量可用適當之伏計及安計量得之。直流電動機之入量，可用伏計及安計，出量可用柏朗尼制動器（Prony brake）量得之。直接測定時，電力須於機器之供線端量之，其機械功率，若為電動機，須於其轉動軸上之滑輪，齒輪或耦合處量之，如此皮帶或齒輪之能耗可不致包括在內。（但鐵道電動機之機械出量，均在車軸上量之，故齒輪損耗亦包括在電動機損耗之內）。直接測定法，因有下列兩原因，超過一定限度外，即不能應用：（一）電機之容量過大時，適當之測力計及制動器，皆不易設計；（二）即有試驗設備，耗能過巨，價值不貲。

較大之機器，不能用測力計或制動器測驗時，可用循環功率法（circulating power method），又曰反對（opposition）或回載（loading-back）法以直接測定之。惟此法須有兩架同種類同定額之電機。

圖 361 示勃郎台爾（Blondel）氏反對法之接法，圖中同式二機之軸互相耦合，軸上復連接一小電動機。二機之電樞相接，但其電氣方向適為相反。電路中接一昇壓機或其他電源，其電壓方向與發電機相加。

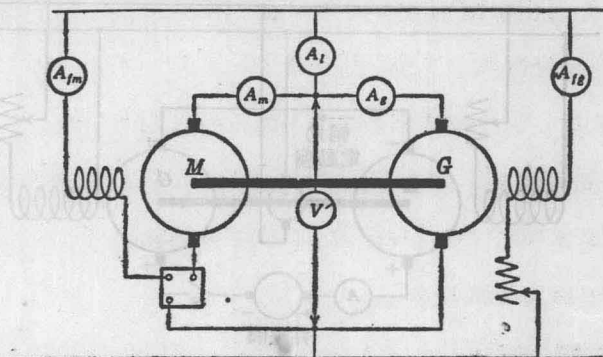


第 361 圖 勃耶台爾反對法

二機之磁場捲另與外來電源相接。今先使小電動機轉動至額定速度。若圖中 S 未閉，二機之激磁電流，可調準至適當之值，而使二機達額定之端電壓。在此情形下，二機之摩擦耗及鐵耗（包括磁滯耗及渦流耗）皆由小電動機供給。如量得小電動機之入量，減去該機本身之損耗，則得二主機之摩擦耗及鐵耗。今將 S 關閉，但昇壓機仍無激磁，則因二主機電勢相等，故無電流通過電路。及昇壓機電壓增高，則電流將通過二機，一機成爲發電機，另一機乃爲電動機。此時二主機之摩擦耗及鐵耗仍由小電動機供給，而二主機之銅耗則由昇壓機供給。故昇壓機之載流容量，應足以負載主機之高電流。

此法之優點即在二主機可試驗至任何定額，而電源僅須供給二主機之能耗，再加小電動機及昇壓機之能耗。所得結果，在理論上甚爲準確，惟需用輔助機器，乃其不便之處。

圖 362 示卡伯氏反對法之接法，雖無輔助機器，但結果未盡準確。二機之軸互相耦接，其電樞亦相聯，惟電氣方向適相反。一機附有起動



第 362 圖 卡伯反對法

變阻器，以便開動至額定速度。所有損耗皆由線路供給之。今以 G 機之激磁增加，使成發電機，供給電能於 M 機，則 M 機成爲電動機，可以拖動 G 機。由線路來之電氣入量，供給 G 及 M 二機之總損耗，但二機之損耗彼此不同，因 G 機之磁激應較 M 機者爲大。由此可知此法用以測定效率，並不準確，但如欲使二機擔受負載，而電源僅供給總損耗之量，則此法亦甚方便。故如僅欲求某機負載時溫度上昇之值，此法甚爲經濟。

10-2. 直流發電機及電動機之損耗 欲決定發電機或電動機在某一出量時之效率，(一)如用直接測定法，則須知其相當之入量，或(二)須知相當該出量時各種損耗成分之總數，如第一式所列者。若用第一法，則總耗等於入量多於出量之數，但此法不能十分準確，蓋不論測定出量或入量時，稍有極小之差誤，其影響於兩數之差之百分數必大。若用第二法，所得即爲慣例效率，總耗之成分，可分三類：(A)能準確測定者，(B)能測定其大概者，及(C)不能測定者。故對第三部份及第二部份之

一小部份,普通在求慣例效率時均以習慣值代之。

整流式直流電機之損耗,可分為下列諸項:

1. 電阻耗 電流經過各部電阻,因而發生熱耗,如

(a) 樞捲阻耗,

(b) 場捲阻耗(若有變阻器,亦包括在內),

(c) 電刷及刷觸阻耗。

2. 鐵心耗

(a) 樞心及齒內之磁滯耗。

(b) 樞心,齒內,及極面之渦流耗,

3. 機械耗

(a) 軸承摩擦耗,

(b) 風阻耗(轉動部份與空氣之摩擦耗),

(c) 電刷摩擦耗。

4. 負載雜流耗,由於

(a) 電樞導線之渦流,

(b) 整流時線圈中之短接電流,

(c) 整流線圈內電流所發生之磁流脈振,及因齒槽磁阻不同而發生者,

(d) 樞心端片之渦流,及穿過鐵心疊片而未絕緣之螺釘中之渦流,

(e) 因電樞反作用而在樞心及齒中發生之磁流畸變。

損耗之主要分類法,可依美國電機工程師學會(A. I. E. E.)規定之標準如下:

A. 能準確測定者:

1. 無載時之鐵心耗(包括無載時導線中之渦流耗),
2. 有載及無載時線捲之 i^2r (電阻)耗。

B. 能測定或決定其大概者:

1. 電刷摩擦耗,
2. 電刷接觸耗,
3. 風阻及軸承摩擦耗。

C. 不能決定者:

1. 因磁流畸變而生之鐵心耗。
2. 因負載電流有時發生橫越(交叉)磁流以致導線中發生渦流耗。
3. 因主磁場畸變,齒鐵飽和,以致導線上發生渦流耗。
4. 負載時磁場畸變,以致發生齒耗。
5. 整流時之短接耗。

綜觀上列諸損耗,可知在機器之工作限度內,有數種為不變者,或近於不變者,其他數種隨負載而變。但不變或近於不變之部分仍須視機器之特性而定。例如恆速度發電機及電動機之風阻及摩阻耗不變,然在串激機中則隨負載而變。在分激機及外分捲複激發電機中,若端電壓不變,其分激場捲之 i^2R 耗約為不變,所有串激場捲及樞捲之阻耗則與負載同變。恆磁流機器之鐵心耗似近不變,但串激機則磁流依負載而變,鐵心耗亦隨之而異。

10-3. 恆電位恆速度電機之效率及損耗 欲計算恆電位恆速度分激電機之慣例效率,可分其損耗為二類:(1)不因負載而變者,(2)因負

載而變者。

不變耗包括鐵耗或鐵心耗, 風阻及摩擦耗, 以及分激線捲電阻耗或 I^2R 耗(包含變阻器損耗)。分激場捲, 若接於供電幹線上, 則其電阻耗不變, 惟線捲電阻或因溫度變化而變者不計。若發電機為恆電位之內分捲複激機, 則當負載增加時, 分激場捲之端電位略增, 故場耗亦稍加大。

變耗包括樞捲及與其串聯線捲(如串聯場捲, 整流捲及補償捲)之電阻耗。

依 A. I. E. E. 標準, 欲求各種發電機電動機之慣例效率, 其損耗成分之測定, 計算及假設, 規定如下:

5-361. I^2R 耗 I^2R 耗應根據電流值及相當於 75°C . 溫度時之電阻值。

5-362. 軸承磨擦及風阻耗 (a) 普通以另一電動機拖動欲試驗之機。受試驗之機應將電刷移開, 且不受磁激。電動機之出量應設法測定, 此值即等於受試驗機之軸承磨擦及風阻耗。

(b) 引擎式發電機 此式發電機之風阻耗, 及軸承磨擦甚小, 不及出量百分之一。此耗數量既小, 測定又難, 可以不計。

5-363. 整流器及集流環之電刷磨擦耗 (a) 以另一電動機拖動欲試驗之機, 電刷照常按置, 惟不受磁激。由此所得電動機之出量減去 5-362(a) 節所得之出量, 即為電刷磨擦耗。試驗時整流器及電刷之面, 應經若干時間之轉動而磨光。

(b) 根據事實上之經驗, 製造廠中新機之電刷磨擦耗與長期開動後

之值大不相同，故電刷磨擦耗，可用下述平均值為慣例值。如電刷磨擦面每分鐘速度約為 1000 呎，則每方吋電刷接觸面之瓦耗如下：

炭刷及石墨刷 8 瓦

金屬石墨刷 5 瓦

如對於以上各值發生疑問時，則應用(a)法量得之。

某種電刷磨擦耗之實際值準確量得時，可供其他同樣情形之應用。

5-364. 鐵心耗 以另一電動機拖動欲試驗之機，電刷照常按置，且受磁激，使端電壓相當於指定負載之內電壓(可從計算而得)。由此所得電動機之出量減去 5-363(a)節所得之出量，即為鐵心耗。

如以試驗機受磁激及不受磁激時損耗之差為鐵心耗之值，普通每電刷柱釘(stud)僅用一電刷與整流器相接觸。

5-365. 電刷觸耗 如用炭刷及石墨刷並帶一豚尾附件，則正電刷及負電刷之總電位落為 2 伏。如無豚尾附件，則總電位落為 3 伏。如用金屬石墨刷，則無論負載為何，每一集流環之位落，可作為四分之一伏。

5-366. 負載雜流耗(包括不能決定者在內) 計算直流電機之慣例效率時，負載雜耗可假定為出量之百分之一。但電動機在 200 馬力以下，而轉動速在 575 轉/分以下者，尚無定值，可暫不計。

5-367. 其他損耗 (a)磁場變阻器耗 所有磁變阻器之損耗，無論串聯或複聯，均應於測定效率時計入，即在別激時亦應如此。

(b)通風吹風機 當一通風機供給空氣於某套電機，所需之功率應於測定該套電機效率時計入。但如一座或數座通風機供給空氣至多套電機時，則所需之功率將於測定全廠效率時計入，而於計算各套電機效

率時可以不計。

(c) 其他輔助機器 輔助機器,如別激機等,其損耗應歸入全廠計算,而不計入發電機之效率中。但汽輪發電機之直接拖動磁激機者,又為例外。實則激磁及磁場變阻器之能耗,均應為發電機損耗之一部。

5-368. 決定損耗之其他方法 輕載法使電機在零載時轉動如電動機,先測定其入量。此值減去串聯阻耗(I^2R 耗),即為損耗之固定或不變部分,如 5-362, 5-363 及 5-364 節所討論者。在任何負載時之損耗,乃即等於此不變值再加 I^2R 耗,電刷觸耗,負載雜耗,及其他損耗。 I 之值依負載而定, R 可以量得。

分激式電機之不變耗,可以下列之簡單實驗得之。以額定電壓 V 加於該機,開動之作為電動機,使其在無載下空轉。先測定此時電樞及場捲之電流 $(i_a)_0$ 及 i_s 。無載時輸入電流之總和應為 $(i_a)_0 + i_s$,故功率入量之總和為 $V[(i_a)_0 + i_s]$ 。此時出量為零,其總耗即等於不變耗加電樞之 $(i_a)_0^2 r_a$ 耗,故不變耗為

$$P_c = V[(i_a)_0 + i_s] - (i_a)_0^2 r_a \quad (2)$$

此測驗須於電動機轉動若干時後行之,俾使其溫度升高至通常工作時之值。樞電阻 r_a ,亦須於工作溫度時量得之。電刷應置於中軸上。

自第二式內求得之不變耗,包括鐵心耗,風阻及摩擦耗,及分聯場捲之電阻耗。後者等於 $V i_s$,故鐵心耗,風阻及摩擦耗之總和為

$$P_c - V i_s = V(i_a)_0 - (i_a)_0^2 r_a \quad (3)$$

欲分求鐵心耗,風阻及摩擦耗之值,須依 A. I. E. E. 標準 5-363

及 5-364 各節之手續求得之。

恆磁流恆速度電機之鐵心耗，並不如計算慣例效率時所假定，絕對不隨負載而變。蓋在同一體積之鐵心中，其磁滯耗與磁流密度之 1.6 次方成比例，而渦流耗與磁流密度之二次方成正比例（參看第 10-10 節）。電樞反作用之效應，乃使磁流畸變，鐵心一部份之磁流密度加增，而別部份則減少。是以磁場轉移之結果，雖總磁流之量未變，而鐵心耗則因以增多。此種零載與滿載間鐵心耗之變更，即為負載雜流耗之一部。

計算慣例效率，可舉一例明之。設有一 250 瓩，550 伏平複激外分捲式發電機，（滿載時電流出量為 455 安），其記錄如下：

不變耗；

鐵心耗	3500 瓦
風阻及摩擦耗	2000 瓦
分激場耗(包含變阻器損耗)	<u>2250 瓦</u>
總共	7750 瓦
電樞及串聯場捲熱時之電阻	0.03 歐

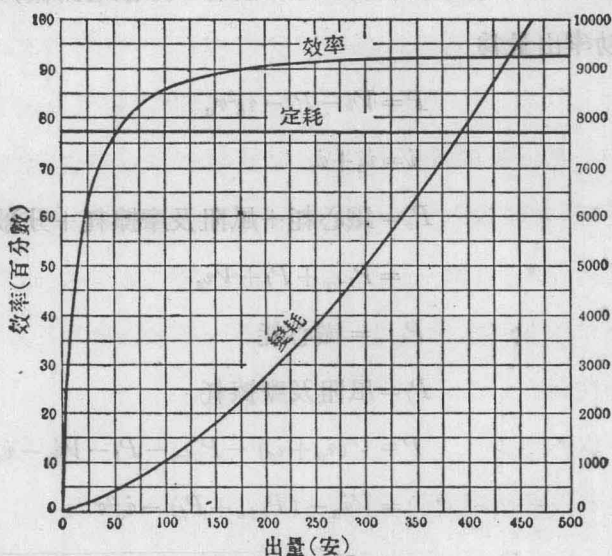
設出量電流為 i ，其樞流為

$$i_a = i + i_s = i + \frac{2250}{550} = i + 4.09$$

電機之出量等於 $550 \times i$ 瓦。其損耗為：不變耗 7750 瓦；電樞及串聯磁場之銅耗為 $i_a^2 \times 0.03$ ；電刷接觸耗為 $2 \times i_a$ ；負載雜流耗為 $0.01 \times 550 i = 5.5 i$ （依照 A. I. E. E. 標準 5-366 節）。故在任何出量電流 i 時，其效率為

$$\eta = \frac{550i}{550i + 7750 + (i + 4.09)^2 \times 0.03 + 2(i + 4.09) + 5.5i}$$

若假設 i 之數值,而計算效率,可得第 363 圖之曲線。



第 363 圖 損耗與效率

從圖上可以看出,若負載漸漸加增,效率自零值驟增,漸近最高值。若再增加其出量電流,其效率必漸減(圖中未示),蓋此時總損耗之增加率,較大於電流之增加。

上例為一發電機,設其電壓不變,則其出量必與線路電流成正比。若電壓變更,則路流不與功率出量成正比。故作效率及損耗曲線時若不以路流為橫坐標而以功率出量代之,則必須另行校正。例如,設有一機,其外特性曲線升高,零載時端壓為 110 伏,至滿載時為 115 伏,電壓之升高成一直線。滿載時之功率出量為 $115i$ 瓦,半載時為 $112.5 \times \frac{1}{2}i$

$= 56.75 i$, 僅為滿載出量之 49.3% 而非 50%。

從量得之無載損耗以計算電動機之運用特性時，必須注意電流入量，不與電動機所供給之功率成正比。設有一分激電動機，其功率入量為 $V i$ ，而功率出量為

$$P = V i - P_c - i_a^2 r_a$$

但

$$i = i_a + i_s$$

而

$P_c =$ 鐵心耗 + 風阻及摩擦耗 + 分激磁場耗

$$= P_{h+c} + P_f + V i_s$$

其中

$P_{h+c} =$ 鐵心耗

$P_f =$ 風阻及摩擦耗

故

$$\begin{aligned} P &= V(i_a + i_s) - P_{h+c} - P_f - V i_s - i_a^2 r_a \\ &= V i_a - (P_{h+c} + P_f) - i_a^2 r_a \end{aligned}$$

而

$$i_a = \frac{V}{2 r_a} \pm \sqrt{\left(\frac{V}{2 r_a}\right)^2 - \frac{P + P_{h+c} + P_f}{r_a}}$$

上式平方根號前應用負號，方有意義。今舉一實例如下，設有一 110 伏 10 馬力之電動機，其樞電阻為 0.11 歐，場電阻為 40 歐，而零載時之樞流為 3.1 安。故鐵心耗與風阻及摩擦耗之總和為

$$P_{h+c} + P_f = 110 \times 3.1 - (3.1)^2 \times 0.11 = 340 \text{ 瓦}$$

滿載時 ($P = 10$ 馬力 = 7460 瓦) 樞流為

$$i_a = \frac{110}{2 \times 0.11} - \sqrt{\left(\frac{110}{2 \times 0.11}\right)^2 - \frac{7460 + 340}{0.11}} = 76.8 \text{ 安}$$

而路流為

$$i = i_a + i_s = 76.8 + \frac{110}{40} = 79.55 \text{ 安}$$

當該機祇發生其額定負載之半數, 即 5 馬力 = 3730 瓦時, 其路流為 42.25 安; 實較大於滿載時路流之半數甚多。

10-4. 變換之效率, 電氣與機械效率 上節所討論之效率為淨出量與總入量之比, 乃電機之總效率。但分析發電機及電動機之工作情形, 可另行分出三種效率, 如下:

發電機之機械總入量並非皆變為電功率, 蓋一部份消耗於風阻及摩擦耗與鐵心耗。鐵心耗如制動器, 故實際上等於增加摩擦阻力。機械總入量與損耗之差, 乃在電樞中變成電功率。發生電功率之一部份, 又損失於電機內各線捲之電阻及電刷觸阻上。其餘剩者始為有用之淨出量。故

發生之電功率 = 機械入量 - 風阻及摩擦耗 - 鐵心耗

而變換效率為

$$\begin{aligned}\eta_c &= \frac{\text{發生之電功率}}{\text{機械功率入量}} \\ &= \frac{\text{出量} + \text{電阻耗}}{\text{機械功率入量}}\end{aligned}\quad (4)$$

同樣, 電樞之淨電功率出量與總共發生之電功率之比乃為電氣效率 η_e , 而

$$\eta_e = \frac{\text{電功率出量}}{\text{發生之電功率}} = \frac{\text{出量}}{\text{出量} + \text{電阻耗}}\quad (5)$$

試以(4), (5)兩式, 與總效率 $\eta = \frac{\text{出量}}{\text{入量}}$ 比較, 可知

$$\eta = \eta_c \eta_e\quad (6)$$

若為電動機，入量電功率之一部份，消耗於各線捲之電阻及電刷觸阻上，而其餘剩者變為機械功率。但發出之總機械功率中，一部分又消耗於風阻及摩擦耗與鐵心耗，後者又似一制動器，而等於增添摩擦阻。茲將各項關係列式如下：

發出之機械功率 = 電功率入量 - 電阻耗

又 機械出量 = 發出之機械功率 - 風阻及摩擦耗 - 鐵心耗
故變換效率為

$$\begin{aligned}\eta_c &= \frac{\text{發出之機械功率}}{\text{電功率入量}} \\ &= \frac{\text{電功率入量} - \text{電阻耗}}{\text{入量}}\end{aligned}\quad (7)$$

而電動機之機械效率為

$$\begin{aligned}\eta_m &= \frac{\text{機械出量}}{\text{發出之機械功率}} \\ &= \frac{\text{出量}}{\text{出量} + \text{風阻及摩擦耗} + \text{鐵心耗}}\end{aligned}\quad (8)$$

故

$$\eta = \eta_c \eta_m \quad (9)$$

10-5. 最大效率之條件 於任何機械中，如其總損耗包括二部分，其一不因負載而變，而其他則依負載之平方而變者，則此機之最大效率，將在恆損耗與變損耗相等之負載時實現。故如負載或出量為 P ，恆耗為 P_c ，而變耗為 kP^2 ，其中 k 為一常數，則

$$\eta = \frac{P}{P + P_c + kP^2} \quad (10)$$

對於負載 P 取 η 之微分，且使之等於零，以求最大效率時之條件，即

$$\frac{d\eta}{dP} = \frac{(P+P_c+kP^2) - P(1+2kP)}{(P+P_c+kP^2)^2} = 0$$

可得
$$P_c = kP^2 \quad (11)$$

而其最大效率為
$$\eta_{\text{最大值}} = \frac{P}{P+2P_c} \quad (12)$$

上述之關係,在恆電位恆速度式之電機中,如分激發電機及電動機等,甚相接近。其恆耗包括摩擦阻,風阻,場捲中之電阻耗及鐵耗等,而其變耗則等於 $i_a^2 r_a$,再加刷接觸耗(慣例作為 $2i_a$ 瓦)。如將 r_a 之平均值稍稍加大,使刷觸阻耗亦包括在電樞阻耗內,則變耗將約與 i_a^2 成比例,而 i_a 又約與出量成比例。若將實在情形更作較詳之探討,則更可得各種對於分激發電機之事實。

設 V 為端電壓, i, i_a 及 i_s 為路流,樞流及分激場電流,則

$$i_a = i + i_s$$

而
$$\eta = \frac{Vi}{Vi + P_c + i_a^2 r_a} \quad (13)$$

其中 P_c 為恆耗, r_a 為已包含接觸阻之樞阻。通常 i_s 於相近滿載時,祇占 i 之極小百分數,故下列方程式中以 i 代 i_a , 其所生之舛誤,亦甚渺小。

$$\eta = \frac{Vi}{Vi + P_c + i^2 r_a}$$

由此
$$\frac{d\eta}{di} = \frac{(Vi + P_c + i^2 r_a)V - Vi(V + 2ir_a)}{(Vi + P_c + i^2 r_a)^2}$$

設
$$\frac{d\eta}{di} = 0$$

則
$$P_c = i^2 r_a \approx i_a^2 r_a \quad (14)$$

即電流出量之值，能使恆耗與變耗相等時，其效率將為最大。

同理，於一分激電動機中，其入量為 V_i ，出量為 $V_i - P_c - i_a^2 r_a$ ，故其效率為

$$\eta = \frac{V_i - P_c - i_a^2 r_a}{V_i} \approx \frac{V_i - P_c - i^2 r_a}{V_i} \quad (15)$$

而

$$\frac{d\eta}{di} = \frac{V_i(V - 2i r_a) - (V_i - P_c - i^2 r_a)V}{V^2 i^2}$$

使 $\frac{d\eta}{di} = 0$ ，則得最大效率之條件為

$$P_c = i^2 r_a$$

在此情形中，取微分時乃以入量電流 i 為自變數，而在發電機時，則出量電流乃為其自變數。

上述之計算，並非十分嚴密，但於實際應用，則已足夠準確。尚有一似較為準確之分析，可根據變耗乃由兩部所組成之事實，其一部依電流之平方而變，而他部則與電流成正比而變。如是則鐵心耗 P_{h+e} （由於磁滯及渦流）可假定與負載電流成正比而變，並不常為恆量，即

$$P_{h+e} = (P_{h+e})_0 \pm ci \quad (16)$$

其中 $(P_{h+e})_0$ 為無載時之鐵心耗而 c 為一常數。電刷觸耗與 i_a 成正比，故亦與 i 成正比。分激場耗在通常之分激電機及外分捲複激電機中為

$\frac{V^2}{r_s}$ 而在內分捲複激電機中則為

$$\frac{(V \pm i r_f)^2}{r_s}$$

其正號適用於發電機而負號則用於電動機。在外分捲複激電機中，其串

激磁場損耗為 $i_a^2 r_f$,而在內分捲電機中則為 $i^2 r_f$ 。故各種損耗之總計,包括有一恆量項,一與路流成比例之項,及一與路流平方成比例之項,而其效率為

$$\eta = \frac{V i}{V i + P_c + C_1 i + C_2 i^2} = \frac{V}{V + \frac{P_c}{i} + C_1 + C_2 i} \quad (17)$$

欲求最大效率,其分母須為最小,故求分母之微分而使之等於零,即得最大效率之條件為

$$-\frac{P_c}{i^2} + C_2 = 0$$

或
$$P_c = C_2 i^2 \quad (18)$$

自此可知在最大效率時,其恆耗應與變耗中之與路流平方成比例之一項相等。

10-6. 最大效率點之所在 自前節所述,可知如恆耗與變耗之關係選擇適當,則其最大效率點,可在任何所需之出量時得之,其理甚明。例如,假定其總損耗含有二項,一項為恆量 P_c ,其他一項則依負載之平方而變。設其額定滿載為 P ,其恆耗為 xP ,其中 x 為出量之任何分數,而滿載時之變耗為 yP , y 亦為出量之任何分數,則滿載時之效率為

$$\eta = \frac{1}{1+x+y} \quad (19)$$

設 zP 為所需最大效率時之出量,其變耗將為 $z^2(yP)$,而在最大效率時則得

$$z^2(yP) = xP$$

或
$$z = \sqrt{\frac{x}{y}} \quad (20)$$

茲舉一例，設欲一機之損耗分配得當，使最大效率將在滿載之四分之三時實現，而額定滿載時之效率將為百分之 85，則

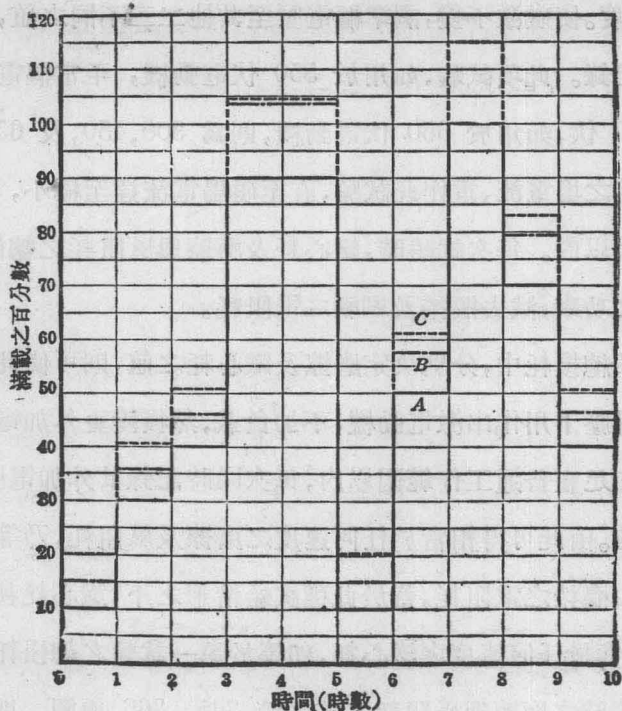
$$\frac{1}{1+x+y} = 0.85$$

$$z = \sqrt{\frac{x}{y}} = 0.75$$

自此兩式得 $x = 6.35\%$ ， $y = 11.3\%$

設 x 所代表之恆耗，比 y 所代表之變耗為大，則可知最大效率，將在滿載以外。今欲使最大效率在小於滿載時實現，則其銅耗宜比恆耗為大。故如預知一機在輕載運用之時間甚長，而滿載或超載僅為偶然，於設計此機時，應使樞阻較大，俾在平均負載點或其相近處，可得最大之效率。

10-7. 全日效率 一機器之全日效率，為在一工作日內功能淨出量與總入量之比。供電量之收費，多以功能之消費為根據（以瓦時計），故電動機之全日效率，實甚重要，在可能範圍內，應使之愈高愈好。一機器之全日效率，大概依負載曲線 A （第 364 圖）而異，但亦與恆耗與變耗之比值有關。負載曲線之縱坐標表示功率出量，橫坐標示時間，故在此曲線下之面積，乃與功能出量成比例。設有甲乙二電動機，甲機之恆耗占額定出量百分之五，變耗占百分之十，其功率入量依 B 曲線而變。乙機之恆耗為百分之十，變耗為百分之五，其功率曲線如 C 線所示。甲機之全日效率為百分之 85.8，乙機則為百分之 81.7。設輕負載之時間加長，則其全日效率之相差亦愈大，而恆耗較小之電機更覺有益。例如九小時間僅載百分之十，而一小時受滿載，則甲機之全日效率為百分之



第 364 圖 A. 負載曲線; B. 及 C. 功率入量曲線。

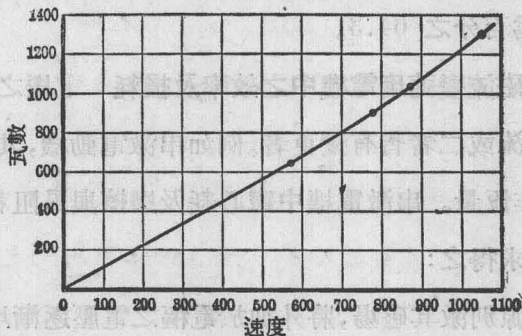
75.7, 而乙機為百分之 64.3。

10-8. 變磁流變速度電機中之效率及損耗 電機之中, 亦有於運用時速度或磁流或二者皆有變更者。例如串激電動機, 其鐵心耗及磨擦與風阻耗, 均非恆量。串激電機中鐵心耗及磨擦與風阻耗之總值, 可用下述實驗之法求得之:

自任何電源別激其磁場, 將外加於電樞之電壓逐漸增加, 而使電動機在零載下起動。俟該機起動後, 增加其磁激, 使磁場電流達有載時之最大值, 更調準樞電壓, 使至所需要之值, 然後記錄其場電流, 樞電流,

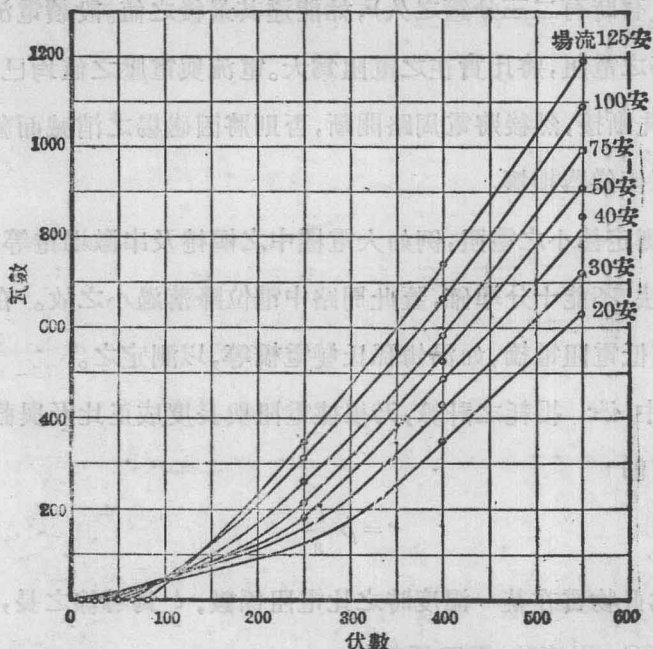
電壓，及速度。使磁激不變，調準樞電壓至其他二三不同之值，每次取上述各種之記錄。此項試驗，如用於 550 伏電動機，平常樞電壓為 250，400 及 550 伏，如用於 650 伏電動機，則為 300，450，及 650 伏。用其他不同值之場電流，重作此試驗，直至磁場電流達至極小，但速度應在安全範圍以內。每次試驗時，鐵心耗及磨擦與風阻耗之總值，乃等於電樞所受之功率，減去樞捲及刷觸之電阻耗。

如欲於總損耗中，分別決定磨擦及鐵心耗之值，則可使此機在較低值之外加電壓下用作串激電動機，不加負載，然後變更外加電壓，使其速度之變換足在普通工作範圍以內，每次同時記錄其外加電壓，電流，及速度之值。由此可得相當於任何速度之磨擦及風阻耗，乃等於所供給之功率減去樞捲之電阻耗，蓋於此種試驗情形之下，鐵心耗甚小，可以不計。故相當於任何速度之鐵心耗，即等於第一試驗之總損耗及第二試驗在同速度時之磨擦與風阻耗之差。第 365，366 兩圖，即用此法得之^①。根據此種曲線，即可以計算任何負載時之效率。



第 365 圖 磨擦與風阻耗與速度之關係，鐵道電動機之試驗。

① "Motor and Generator Testing," Sec. 8, pp. 8 and 11, July, 1913, Westinghouse Elec. and Mfg. Co.



第 366 圖 串激電動機之鐵心耗

10-9. 電阻耗 電阻耗或銅耗 (i^2r) 可以實測, 甚為準確, 或可以電機設計時之記錄算得之。其法即先測定線捲各部在工作溫度時 (75°C .) 之電阻, 然後由 i^2r 方式, 計算其損耗。欲知測定電阻各種方法之詳, 學者可參考其他關於電氣測定之各種教科書及手冊^①。設欲測定並非太小之電阻, 則最普通之方法, 乃為降電位法。此法使一已知量之電流, 通過於所求之電阻, 以適當之電壓計, 量其線捲間之電位降落。如此法用於測定高感應電周路中之電阻 (如大電機之分激場捲) 時, 則電流在未達穩定值之前, 不可記錄, 蓋此種周路中之自感甚大, 恆使電流於相

① Laws, Frank A., "Electrical Measurements."

當時間後(有時有二三分鐘之久),始能達其最後之值。設讀電流之值太早,則所得之電阻,將比實在之電阻為大。電流與電壓之值均已讀得後,電壓計須先斷接,然後將電周路開斷,否則將因磁場之消滅而發生過大之電壓,以使儀器損壞。

至於測定甚小之電阻,例如大電機中之樞捲及串激場捲等之電阻,則用降位法,不能十分準確,蓋此周路中電位降落過小之故。在此種情形下,可用低電阻電橋,如湯姆孫氏雙電橋等,以測定之。

線捲中 i^2r 損耗之計算,乃根據電阻與長度成正比及與截面成反比之事實,即

$$r = \rho \frac{l}{s} \quad (21)$$

其中 ρ 爲此物質在某一溫度時之比電阻係數, l 爲導線之長, s 爲其截面。在 $t^\circ\text{C}$. 溫度時,電阻係數爲

$$\rho = \rho_0(1 + 0.00427 t) \quad (22)$$

其中 ρ_0 爲攝氏表零度時該物質之電阻係數, 0.00427 爲每一度增加電阻之溫度係數。如長度以呎計, 截面以圓吋計, 則商用銅質之 $\rho_0 = 9.59$ 歐。如用釐及平方釐, 則 $\rho_0 = 0.016$ 歐。如最初之溫度並非零度, 則其溫度係數, 可用方程式求得之, 即等於 $\frac{1}{234.5 + t}$ 。故設最後之溫度爲攝氏表 40 度, 則每一度增加電阻之溫度係數, 將爲 $\frac{1}{274.5} = 0.00364$ 。

關於電機各部計算 i^2r 損耗之公式, 茲總括如下:

(a) 電樞 任何式樣之發電機或電動機, 其電樞中之電阻耗爲

$$P_{ca} = i_a^2 r_a \text{ 瓦}$$

其中 $r_a = \rho_0 \frac{l_a}{s_a} (1 + 0.00427 t) \frac{1}{a^2}$ (23)

在此公式中, l_a = 樞捲中電線之全長

s_a = 樞導線之截面

t = 電樞中銅質之工作溫度,以攝氏表度數計,平常均作為等於 75°C .

a = 電樞中分聯周路數

(b) 別激電機中之磁場銅耗為

$$P_{cf} = i_f^2 r_f \text{ 瓦} \quad (24)$$

而於普通之串激發電機及電動機中,則為

$$P_{cf} = i_a^2 r_f \text{ 瓦} \quad (25)$$

其中 r_f 表示場捲及其調整分流器之總電阻。

於分激電機中,其磁場銅耗為

$$P_{cf} = i_s^2 r_s = \frac{V^2}{r_s} = V i_s \text{ 瓦} \quad (26)$$

此式中之 r_s 亦包括調整變阻器之電阻在內。

於外分捲複激電機中,其總場捲銅耗為

$$P_{cf} = i_a^2 r_f + i_s^2 r_s \text{ 瓦} \quad (27)$$

如此機為發電機,則 $i_a = i + i_s$; 如為電動機,則 $i_a = i - i_s$ 。

內分捲複激電機中之場捲銅耗為

$$P_{cf} = i^2 r_f + i_s^2 r_s \text{ 瓦} \quad (28)$$

此式中 i, i_a, i_s 間之關係,仍與上式相同。

(c) 整流器之電阻耗依整流器與電刷之過渡面(transition surface)之電位降落而變,且因所經過之電流量而異。設在每刷之位降為 Δe ,則其損耗為

$$P_{ce} = 2i_a \Delta e \text{ 瓦} \quad (29)$$

如用普通炭刷,而電刷之電流密度並不過高, Δe 之值約為一伏。(參看第九章第 337 圖) 美國電機工程師學會 (A. I. E. E.) 標準定則第 5-365 節,規定於計算慣例效率時,如電刷有豚尾附件,其總位落(包括正負二刷)為 2 伏,無附件者為 3 伏。

在西屋電機製造公司所出之小手册^①中有下述之公式,可用以計算電刷接觸之總位落

$$2 \Delta e = \frac{i_a}{20 \times \text{總電刷面積(以方吋計)}} + 1 \quad (30)$$

10-10. 鐵心耗

1. 磁滯耗 (a) 樞心之磁滯耗 樞心與磁場間相對之移動,使樞心之磁性,有周期之變換,而因質量中之分子磨擦,遂於樞心中發生功率損耗。此種磁滯之損耗,可用司坦麥茲氏之實驗方程式以表之:

$$P_{ha} = \eta f V B_a^{1.6} \text{ 瓦} \quad (31)$$

其中

η 為常數,因樞心之材料而異;

$$f = \frac{pn}{120} = \text{每秒鐘磁周波數};$$

V 為鐵心之體積;

B_a 為鐵心內磁流密度之最高值。

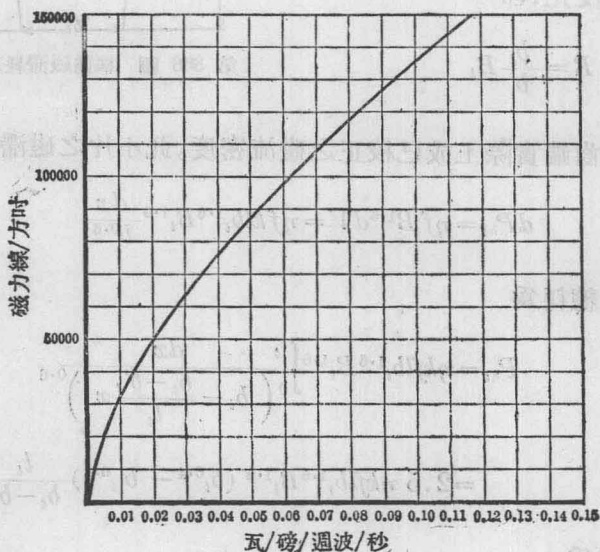
① "Motor and Generator Testing."

若所用之單位為米制, (體積以立方呎計,磁流密度以每平方呎之磁力線計),則普通鋼片之 $\eta = 0.0021 \times 10^{-7}$; 若所用之體積以立方吋計,磁流密度以每平方吋之磁力線計,則 $\eta = 0.0017 \times 10^{-7}$ 。樞心之重量 W 既與體積成正比,故上式亦可寫作

$$P_{ha} = \eta f W B_a^{1.6} \text{ 瓦} \quad (32)$$

若 W 以磅計, B_a 以每方吋磁力線計,則 $\eta = 0.0062 \times 10^{-7}$ 。

第 367 圖之曲線,表示磁滯耗之變化,為磁流密度之函數,磁滯耗



第 367 圖 磁滯耗曲線

以每秒每周波每磅之瓦數計,而磁流密度則以每方吋磁力線數為單位。常數 η 之值,已見上述。

(b) 樞齒之磁滯耗 齒之形狀,外大內小,如 368 圖,故任何兩截面之磁流密度,並不相同,而以平均磁流密度,代入上式時,其磁滯耗之

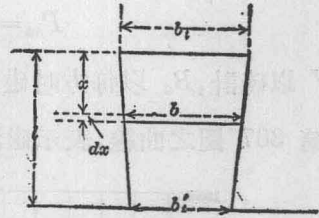
值自不可靠。

如圖中所示，取一小片 dx ，與齒端相距 x 。此小片之體積為

$$dV = b l k dx = \left(b_t - \frac{b_t - b'_t}{l_t} x \right) l k dx$$

其中 k 為疊片因數(約在 0.85 至 0.90 之間)。設經過齒上任何截面之總磁流皆相等，則磁流密度與截面之闊度成反比，即

$$B = \frac{b_t}{b} B_t$$



第 368 圖 樞齒磁滯耗之計算

其中 B_t 為齒端實際上或已校正之磁流密度。此小片之磁滯耗為

$$dP_{ht} = \eta f B^{1.6} dV = \eta f k l b_t^{1.6} B_t^{1.6} \frac{dx}{b^{0.6}}$$

而每齒上之總耗為

$$\begin{aligned} P_{ht} &= \eta f k l b_t^{1.6} B_t^{1.6} \int_0^{l_t} \frac{dx}{\left(b_t - \frac{b_t - b'_t}{l_t} x \right)^{0.6}} \\ &= 2.5 \eta f k l b_t^{1.6} B_t^{1.6} (b_t^{0.4} - b'^{0.4}) \frac{l_t}{b_t - b'_t} \end{aligned} \quad (33)$$

齒之體積既為

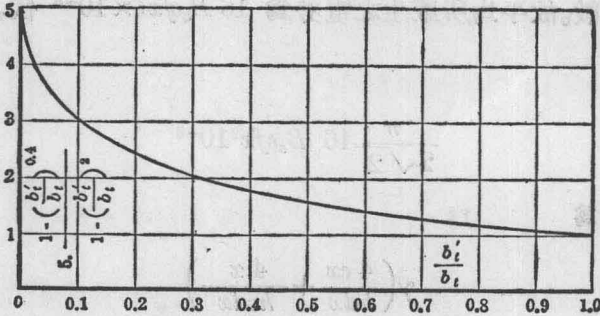
$$V_t = \frac{b_t + b'_t}{2} k l_t l_s$$

上式可寫作

$$P_{ht} = \eta f V_t B_t^{1.6} \times 5 \frac{1 - \left(\frac{b'_t}{b_t} \right)^{0.4}}{1 - \left(\frac{b'_t}{b_t} \right)^2} \quad (34)$$

與(31)式相比較, 僅加一因數 $5 \times \frac{1 - \left(\frac{b'_i}{b_i}\right)^{0.4}}{1 - \left(\frac{b'_i}{b_i}\right)^2}$ 而已。此因數相當於各

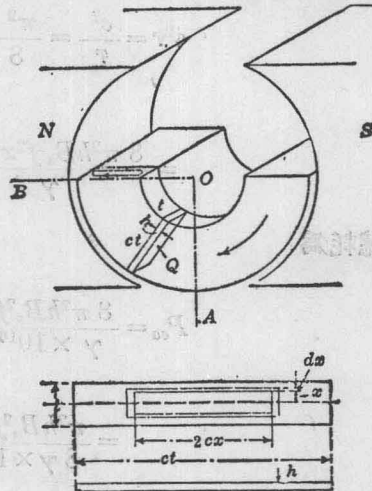
$\frac{b'_i}{b_i}$ 值時之值, 可於第 369 圖中求得之。



第 369 圖 樞齒磁滯耗之改正因數

2. 渦流耗 鐵心耗之因渦流而生者, 曰渦流耗。以下推得之公式僅可得其近似值, 但尋常可用實驗求得, 其理由容後說明之。

在樞心之一薄片上取一徑向單位 Q , 如圖 370 所示。 t 為薄片之厚, ct 為樞心徑向距離 (c 為一數字)。當此單位 Q 在縱立位置 OA 時, 經過之磁流最多, 在平行位置 OB 時, 則無磁流經過, 故在兩極電機中, 每轉變更磁流四次, 即每磁週中磁流變更四次。變換磁流, 即感生



第 370 圖 渦流之簡單途徑

交流電勢，因而發生相當之交流電流，其電路可假設如圖中下半所示，在二長方形間，其闊度各為 $2x$ 及 $2(x+dx)$ ，而長度為 $2cx$ 及 $2c(x+dx)$ 。如 B_a 為樞心之最高磁流密度，則此單位電路中每磁週所變換之磁力線為 $4B_a \times 4cx^2$ ，或每秒所變換之磁力線為 $16B_a c x^2 f$ ，其中 f = 每秒之磁週數。故平均所感生之電勢為 $16B_a c f x^2 \times 10^{-8}$ 伏，而其有效值為

$$\frac{\pi}{2\sqrt{2}} 16 B_a c f x^2 10^{-8}$$

電路之電阻為

$$\gamma \left(\frac{4cx}{hdx} + \frac{4x}{hcdx} \right)$$

其中 γ 為樞心鐵質之比電阻。

該單位周路中之電阻耗為

$$\begin{aligned} i^2 r &= \frac{e^2}{r} = \frac{\pi^2}{8} \cdot \frac{(16 B_a c f x^2 10^{-8})^2}{\frac{4 \gamma x}{hdx} \left(c + \frac{1}{c} \right)} \\ &= \frac{8 \pi^2 h B_a^2 f^2 x^3 dx}{\gamma} \times \frac{c^3}{c^2 + 1} 10^{-16} \end{aligned}$$

故總耗為

$$\begin{aligned} P_{ea} &= \frac{8 \pi^2 h B_a^2 f^2}{\gamma \times 10^{16}} \times \frac{c^3}{c^2 + 1} \int_0^{\frac{t}{2}} x^3 dx \\ &= \frac{\pi^2 h B_a^2 f^2 t^4}{8 \gamma \times 10^{16}} \frac{c^3}{c^2 + 1} \end{aligned}$$

但 hct^2 = 該單位之體積，故每單位體積之損耗（以瓦計）為

$$P_{ea} = \frac{\pi^2}{8} \frac{B_a^2 f^2 t^2}{\gamma \times 10^{16}} \times \frac{c^2}{c^2 + 1} \quad (35)$$

由上式可知渦流耗與磁流密度之平方, 磁變頻數之平方, 及疊片厚度之平方成正比, 而與樞心鐵質之比電阻成反比。但由上式所算得者, 並非十分精確, 因實際電流之分佈, 並非如所假設者, 而各薄片間又非絕對互相絕緣; 因此實際量得之渦流耗每大於計算值有 50% 至 100% 之多。設

$$B_a = 10,000 \text{ 高}$$

$$f = 60 \text{ 週}$$

$$t = 14 \text{ 吋} = 0.0356 \text{ 呎}$$

$$\gamma = 12 \times 10^{-6} \text{ 歐/呎}^3$$

$$\frac{c^2}{c^2 + 1} = 1 \text{ (近似值)}$$

從上式計算之渦流耗, 每磅為 0.27 瓦; 然緩冷鋼片所量得之渦流耗每磅為 0.44 瓦。第 371 圖示頻數在每秒 25 及 60 週波及片厚 14 吋時之渦流耗與磁流密度之關係。在其他頻數及片厚之渦流耗, 可由其平方比得之。

(a) 齒中之渦流耗 參看第 368 圖, 齒之單位截面之渦流耗為

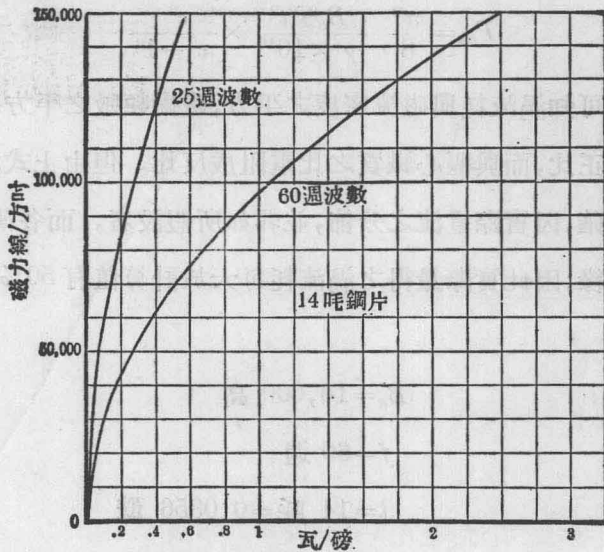
$$dP_{ei} = \epsilon f^2 t^2 B^2 \times (\text{體積})$$

$$= \epsilon f^2 t^2 B^2 b k l dx$$

$$= \epsilon f^2 t^2 b_i^2 B_i^2 k l \frac{dx}{b}$$

其中 ϵ 為渦流常數。今求其積分得

圖 373 齒及齒其



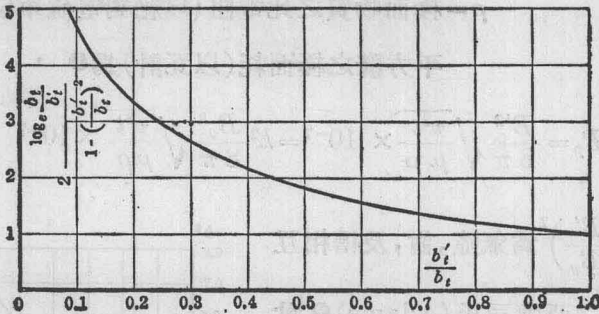
第 371 圖 渦流耗之曲線

$$\begin{aligned}
 P_{e_i} &= \epsilon f^2 t^2 b_i^2 B_i^2 k l \int_0^{l_i} \frac{dx}{b_i - \frac{b_i'}{l_i} x} \\
 &= \epsilon f^2 t^2 b_i^2 B_i^2 k l \frac{l_i}{b_i - b_i'} \log_e \frac{b_i}{b_i'} \\
 &= \epsilon f^2 t^2 B_i^2 \times (\text{齒之體積}) \times 2 \frac{\log_e \frac{b_i}{b_i'}}{1 - \left(\frac{b_i'}{b_i}\right)^2} \quad (36)
 \end{aligned}$$

此式與(35)式不同之點在 multi-factor

$$2 \frac{\log_e \frac{b_i}{b_i'}}{1 - \left(\frac{b_i'}{b_i}\right)^2}$$

其值見第 372 圖。



第 372 圖 樞齒渦流耗之改正因數

(b) 極面中之渦流耗 極面中發生渦流耗之原因, 前於第二章已述及之。根據侖茲定律, 磁流脈振所感生之渦流, 其方向乃適以挫抑磁流之脈振, 故此種渦流, 僅存在於磁極表面之薄層中。

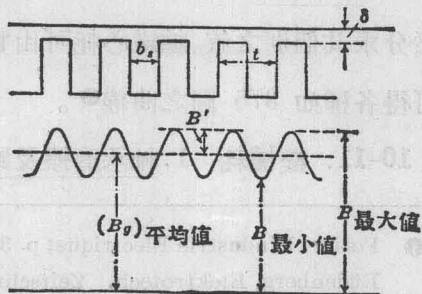
在樞心上任一點轉過一齒節距所需之時間內, 極面上任一點上之磁流脈振亦適經過一全週之變化。此時間為 $t' = \frac{t}{\pi dn}$ 秒, 故磁頻數

$$f_i = \frac{1}{t'} = \frac{\pi dn}{60 t} = \text{齒數} \times \text{每秒鐘之轉數}。$$

第 373 圖示極面磁流密度之變化, 其分佈曲線假定作正弦波形。其脈振之振幅為

$$B' = \frac{B_{\text{最大值}} - B_{\text{最小值}}}{2}。 \text{ 今設}$$

$v =$ 電樞之周圍速度 (以呎/秒計),



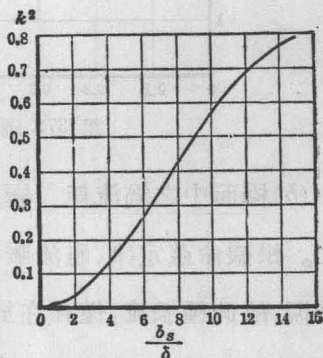
第 373 圖 極面磁流密度之變化

$\mu =$ 極面物質之磁導係數。

ρ = 極面物質之比電阻 (以絕對電磁單位計), 則每平方呎之極面耗 (以瓦計) 爲^①

$$P_p = \frac{B'^2}{8\pi} \sqrt{\frac{v^3 t}{\mu \rho}} \times 10^{-7} = k^2 \frac{B_g^2}{8\pi} \sqrt{\frac{v^3 t}{\mu \rho}} \times 10^{-7} \quad (37)$$

其中 $k^2 = \left(\frac{B'}{B_g}\right)^2$ 爲氣隙, 齒, 及槽相互數值之函數。亞當司氏 (Adams)^② 曾研究得一曲線, 如第 374 圖所示, 由此可求 k^2 與 bs/δ 之關係, 結果甚佳。若用英制單位, (B_g = 以每方吋之磁力線計; v 以呎/秒計, t 以吋計, μ 及 ρ 仍與上同), 則每平方吋之極面耗 (以瓦計) 爲



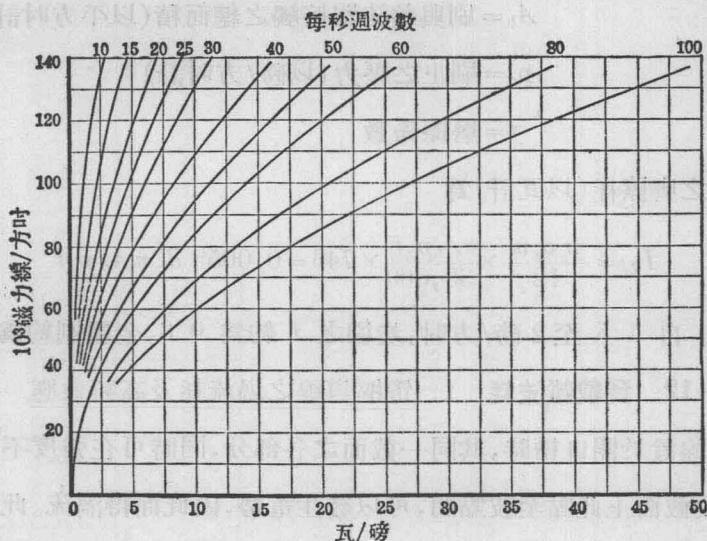
第 374 圖 計算極面耗之常數

$$P_p = 1.65 \times 10^{-7} k^2 B_g^2 \sqrt{\frac{v^3 t}{\mu \rho}} \quad (38)$$

3. 總鐵心耗 除特別設計之電機外, 求磁滯耗與渦流耗之和, 較易於分求其個別之值。總鐵心耗可由實驗量得之。由此種試驗之結果, 即可得各種如 375 圖之曲線^③。

10-11. 機械耗 1. 軸承磨擦及風阻耗 軸承之磨擦耗, 可以設法

- ① Potier, l'Industrie Electrique, p. 35 (1905); Rüdénberg, Elektrotech. Zeitschrift, Vol. 26, 181 (1905).
- ② Adams, Lanier, Pope, and Schooley, Trans. A. I. E. E., Vol. 28, p. 1133 (1909).
- ③ Gray, "Electrical Machine Design," p. 102.



第 375 圖 總鐵心耗

算出；但風阻耗因包含許多變數，不易計算。實際量得之阻力耗，為二者之和，並不能分出風阻耗若干，磨擦耗若干，因此總稱之曰磨擦及風阻耗（或簡稱為阻力耗）。尋常容量之高速電機，其阻力耗約為其額定容量之 1% 至 3%，而在低速電機，約為 0.8% 至 2%。在較大之直連電機中，此耗約為 $\frac{1}{2}$ % 至 1%，極高速度之電機，如渦輪發電機，其風阻耗則較大。

電機速度在 1800 呎/分以下時，其軸承之磨擦耗與軸之周圍速度之 $\frac{3}{2}$ 次方成正比。速度更高時，則與速度成正比。風扇等電機之風阻耗與速度之三次方成正比。此兩種損耗，均與負載之大小無關。

2. 整流器上之磨擦耗

設

d_c = 整流器之直徑(以吋計)

A_b = 刷與整流器接觸之總面積(以平方吋計)

p_c = 刷上之壓力(以磅/方吋計)

f = 磨擦係數

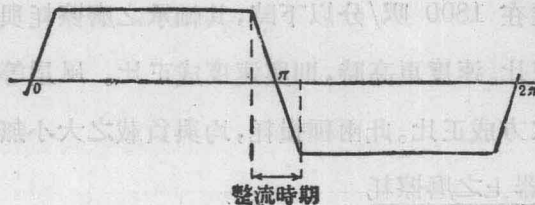
則電刷之磨擦耗(以瓦計)為

$$P_{bf} = \frac{\pi d_c n}{12} \times \frac{A_b p_c f}{33,000} \times 746 = 0.0059 d_c n A_b p_c f \quad (39)$$

通常 p_c 自 1.5 至 2 磅/方吋, 炭刷之 f 約為 0.3, 金屬刷約為 0.2。

10-12. 負載雜流耗 1. 電樞導線之渦流耗及高頻效應 當粗大之樞導線置於開口槽時, 其同一截面之各部分, 同時可在強度不同之磁場內。故截面上此點至彼點間, 可以發生電勢, 因此而得渦流。此渦流耗之值, 有時可至電阻耗百分之 5 至 15。故從電樞銅耗之立場而言, 有效電阻可較真實電阻大百分之五至十五。若欲減少此種損耗, 可用較小導線互絞或並接以代替粗大之導線。

電樞導線中損耗之另一來源, 乃為『皮膚作用』(skin effect), 此現象於交流電通過粗大導線時常有之。直流機中之電流, 普通雖以為單向, 但實則交變, 此從第 376 圖可知。此圖示直流機導線中電流交變之理想曲線, 雖與交流電之正弦波形不同, 但依照傅立葉定理, 此種梯形圖,



第 376 圖 直流樞中交之交流電流

可分解作正弦級數,其各項諧波之頻數,爲原梯形之 1,3,5,7,9 倍不等。故實際電流,可作爲多數交流電所組成,而頻數較高之電流,其集於導線外層之趨向亦愈大。據最近所量得^①,此種效應所增加之損耗,有時幾及原有銅耗之半。換言之,即有效電阻有時幾增加百分之五十。故如需用導線之截面過大時,應改用絞線,以糾此弊。

2. 短路電流所生之其他損耗 此種損耗較小,不能算出;在試驗時,乃包含於負載雜流耗中。

損耗摘要

銅耗

電樞

$$i_a^2 r_a$$

磁場:別激式

$$i_f^2 r_f$$

串激式

$$i_a^2 r_f$$

分激式

$$i_s^2 r_s$$

複激外分捲式

$$i_a^2 r_f + i_s^2 r_s$$

複激內分捲式

$$i^2 r_f + i_s^2 r_s$$

整流器

$$2 i_a \cdot \Delta e$$

鐵心耗

磁滯耗:樞心

$$\eta f V B_a^{1.6}$$

① Lyon, W. V., E. Wayne, and M. L. Henderson, "Heat Losses in Direct Current Armature Conductors," Trans. A. I. E. E., Vol. 47, p. 589. (1928).

$$\eta f V_t B_t^{1.6} \times 5 \frac{1 - \left(\frac{b_t'}{b_t}\right)^{0.4}}{1 - \left(\frac{b_t'}{b_t}\right)^2}$$

樞齒

$$\epsilon f^2 t^2 B_a^2 V$$

渦流耗：樞心

$$\epsilon f^2 t^2 B_t^2 V_t \times 2 \frac{\log_e \frac{b_t}{b_t'}}{1 - \left(\frac{b_t'}{b_t}\right)^2}$$

樞齒

$$k^2 B_g^2 \sqrt{\frac{v^3 t}{\mu \rho}} \times (\text{常數})$$

極面

機械耗

軸承磨擦與風阻 $\frac{1}{2} - 3\%$ ，視容量及速度而定

電刷磨擦阻 $0.0059 d_c n A_b p_c f$

負載雜流耗 (參看 A. I. E. E. 定則 5-366 節)

樞導線中之渦流耗 (0.05 至 0.15) $i_a^2 r_a$

短路電流耗及其他

10-13. 定額及容量 (rating and capacity) 美國電機工程師學會 (A. I. E. E.) 規定關於定額之定義如下：

5-100. 定額之定義 每一機器或機件之定額，乃指假定之運用限度而言。^①

本節所云定額乃指製造者對於機器所指定之出量，及其速度，電壓，電流等特性而言。此定額規定之出量，可作實際試驗時可得之最高出量。

① 定額係根據某種一定標準所假定，故在各種應用情形下，並不確實指示運用時之安全限度。

各種定額茲分述如下:

5-101. 連續定額 連續定額乃指機器在長期內,可以安全承受不過限制之負載。

5-102. 短期定額 短期定額乃指機器新開動後,在規定短時期內,可以安全承受不過限制之負載。

5-103. 短期定額之標準時期 短期定額之標準時期為 5, 10, 15, 30, 60 及 120 分鐘。

5-104. 發電機之公稱定額 今有一恆定負載值,如發電機繼續負擔,其溫度不再上昇,且如將負載驟增至大一倍半之值,亦可運用二小時之久,不過限制,則此恆定負載值謂之公稱定額(nominal rating)。

5-105. 間斷,週期,及變換負載時之定額 如負載為間斷的,週期的,或變換的,則其定額或為連續的,或為短期的,或為公稱的,務求其發熱效應與實際情形相符合。

5-106. 定額種類之了解 如定額之種類並未明白指出,則吾人了解為連續定額。但電車機器之定額,則應了解為公稱定額。

5-107. 定額之單位 (a) 發電機 發電機在一定速度及電壓時之定額,應以機端可用之預計。

(b) 電動機 電動機在一定速度及電壓時之定額,應以軸端可用之預或馬力計。

以上討論標準定額定義時所說之限制,乃指最高溫度,整流,過速,及絕緣等條件而言。下節當詳論之。

10-14. 溫度限制 從理論而言，發電機如於負載增加時，仍能維持其電勢之值，則其出量僅視用電路減少電阻之可能限度以為限制。實際則不然，機器容量除有時限於整流情形外，每為絕緣體之完整及 i^2R 及其他熱耗所生最高溫度所限制，蓋每種絕緣體各有其溫度限制，過此即易燬壞。但在未過限制時，溫度之高低，似與各絕緣體之有用年限無關。如電機設計時，即預備在安全溫度以下運用，則此機之定額與容量有相當之差，故二名詞之意義，亦非相同。絕緣體在超過安全溫度時，損壞頗速，其損壞之程度，依時間及過量溫度而增加。絕緣體之有用年限，除受溫度影響外，與電應力（電暈即其相關之效應），振動及變更機械應力，漲縮及所接觸之水分，空氣，及煙氣有關。在 A. I. E. E. 標準定則未經 1916 年之修改以前，電機（除電車外）各部之可許溫度升高，規定如下：

電樞及場捲	50°C.,
整流器	55°C.,
軸承	40°C.,

以上可許之溫度升高，僅可在室溫 25°C.，氣壓 760 釐，及尋常空氣流通情形下適用。設室溫並非 25°C.，則每差一度，其觀察所得之溫度升高，宜加以 $\frac{1}{2}\%$ 之校正。若低於 25°C. 者，加上此數；高於 25°C. 者，減去此數。

以後修改之定則中，對於最熱點最高可許溫度，亦加以注意。普通氣冷機器，以四周 40°C. 為溫度升高之起點，而所升高之溫度限制，乃視絕緣體之種類而別。絕緣體可分四類如下①：

① 錄自 1925 “A. I. E. E. Standards.”

O 類絕緣體,包括棉,絲,紙及同類有機物料之既未除去空氣,且未浸於油中者。

A 類絕緣體,包括棉,絲,紙及同類有機物料之曾除去空氣,或浸於油中者。又瑛瑯之應用於導線者,亦屬此類。

B 類絕緣體,包括無機物料如雲母(mica)及石棉(asbestos)之砌成體,且與其他黏質連合者。如 A 種物體僅用作構造上連合之用,其被連合之物質仍作為 B 類,惟絕緣之線捲於加以相當於 B 類之熱度時,其電氣及機械特性均不應有損(損字指絕緣物用於連續工作後,而失其絕緣特性而言)。

C 類絕緣體,包括雲母,瓷,石英等無機物體。

絕緣體除去空氣者,謂之浸漬絕緣體, (impregnated insulation) 即絕緣體中已將適當物質代替纖維中之空氣之意。但有時此種絕緣體中之空間,未必全有此種物質。此種浸漬用之物質應有良好之絕緣性,應能塗滿所有纖維,使之互相黏着,且與導體相依附;自身不應因溶質(solvent)之蒸發,或其他原因而生空隙;應於機器開動時或在溫度限制內不致變成流質;應於長期受熱後不致過度損失其絕緣性。

A. I. E. E. 標準規定關於測定溫度之三種方法,茲分述如下:

1. 溫度計法 此法包括用水銀或酒精溫度計(通稱寒暑表),或電阻溫度計,或熱偶(thermocouple)放於機內可達到之最熱部分。

2. 電阻法 導體上之電阻,因溫度增加而加大。應用此原理,線捲之溫度,可以由量得之線捲電阻而計算之。故如相當於量得電阻 r 之溫度為 $t^{\circ}\text{C}$., 則相當於其他量得電阻 R 之溫度 T 為

$$\frac{R}{r} = \frac{234.5 + T}{234.5 + t}$$

故得
$$T = \frac{R}{r} (234.5 + t) - 234.5 \quad (40)$$

3. 埋置探熱法 此法利用熱偶或電阻圈，依標準所規定，安置於機器之內部，但普通直流機中不用之。

各種絕緣體之限制溫度，乃從實驗得來，但標準所定可量得之限制溫度，較真正限制溫度為低，俾機器某種部分之溫度或較可量得者為更高時，亦留有餘地。此所留之餘地，視各種方法而定，慣例如下：

溫度計法 15°C .

電阻法 10°C .

埋置探熱法 5°C .

根據以上規定，各類絕緣物可量得之溫度限制，及溫度升高限制（四周溫度作為 40°C 。）可列表如下：

方 法	可量得之溫度限制 (以 $^{\circ}\text{C}$. 計)				可量得之溫度升高限制 (以 $^{\circ}\text{C}$. 計)			
	O類	A類	B類	C類	O類	A類	B類	C類
溫 度 計 法	75	90	110	未規定	35	50	70	未規定
電 阻 法	80	95	115	未規定	40	55	75	未規定
埋 置 探 溫 法	85	100	120	未規定	45	60	80	未規定

直流發電機及電動機中，溫度皆用溫度計（寒暑表）法量之，惟鐵道電機中固定線捲之溫度，可以電阻法量之（量時應在停機前一分鐘之內）。埋置探溫法之主要用處在交流機中。為決定熱度限制之熱驗（heat

run),可於任何溫度之冷空氣中爲之,但最好不冷於 10°C . (50°F .),至於四周溫度則可不顧,因無論在 10 度至 40 度之內,A. I. E. E. 標準所規定之溫度升高值均爲相同。如熱驗在高於 1000 米(3300 呎)之高處舉行,則在低於 1000 米處試驗時之溫度升高值,較之高處之升高值應減少。此減少之值,可假定每高出 1000 米以上 100 米之距離,即減少百分之一。

欲量四周溫度,應將數溫度計置於機器半身周圍,相距一二米距離,無風及無特殊熱氣輻射之處。溫度計應浸於油中,油杯應用粗大之金屬圓柱鑿孔爲之。此孔應滿裝油,且使溫度計之水銀管完全浸沒。此種最小之油杯,依規定圓柱直徑 25 釐(1 吋),高 50 釐(2 吋),機器較大時,則油杯亦應加大。加大油杯之目的,乃爲避免計算溫度升高值時因「時滯」(time lag)而生之錯誤。蓋機器之溫度改變與四周空氣之溫度改變,其時間性每不相同,機器愈大,「時滯」亦愈甚。

機器如一部分在地下,電樞之溫度限制,應對於地下及室中溫度之權衡平均值而定。計算此平均值時,地下及室中溫度所占之分量,應與機器在地下及室中之所占之容積成比例。磁場之一部分,固定於地下者,則其溫度限制,應對於地下溫度而定。

在量機器各部之溫度時,溫度計應與各部直接接觸,水銀管每套以皮墊 (belt pad), 用油紗頭按於機上。皮墊用於大機器者,標準尺寸爲 $1\frac{1}{2}$ 吋寬, 2 吋長, $\frac{1}{8}$ 吋厚。讀溫度計應在「熱驗」時及剛停以後,二值之間應取其較高者。如停後稍久,方始讀溫度計,則應作一溫度時間曲線,再由此推求停機時之溫度。(但如停機後,溫度隨時間而升高,則仍應取

其最高之值)。

10-15. 美國電機製造業公會之定額

項 目	電 動 機			發 電 機			
	40°C. 定額	50°C. 定額		40°C. 定額		50°C. 定額	
絕 緣 體 種 類	A	A	B	A	A	B	A
負載 (以額定容量 之百分數計)	100	100	100	100	125	100	100
時 間 定 額	連續	連續或短時	連續	2 時	連續
溫度升高:							
1. 鐵心及線捲	40	{ 55 ⁽²⁾ 50	{ 75 ⁽²⁾ 70	40	55	40	50
2. 整流器	{ 55 ⁽¹⁾ 75	{ 65 ⁽¹⁾ 85	{ 65 ⁽¹⁾ 85	45	60	55	{ 65 ⁽¹⁾ 85
3. 裸銅線捲	50	60 ⁽³⁾	85	60
4. 機械部分 ⁽⁴⁾ ⁽⁴⁾ ⁽⁴⁾ ⁽⁴⁾

註 (1) 此指 A 類絕緣物用於整流器或與整流器相近, 而其有用年限將因整流器之熱而影響者。

(2) 此指全閉式及避水式電動機。

(3) 在全閉式電動機中可增至 65°C.。

(4) 如機械部分與絕緣不相接觸, 則其溫度升高不致損及絕緣。

上表示美國電機製造業公會 (N. E. M. A.) 所定之溫度限制, 凡分二種, 一指 40 度, 一指 50 度。前者乃用於普通開蓋式之電機, 其負載之情形, 有時需要相當之準備量。後者乃用於最高負載, 大致確定, 無需準備量之時。

電動機之經製造廠擔保有 40 度定額者, 可於規定電壓下連續負

載百分之十五過載。轉力方向,該機之霎時最高轉力,可達一倍半滿載值,但溫度不能擔保在限度以內。發電機之有 40 度定額者,可於二小時內負擔百分之二十五之過載,溫度仍擔保在規定限度以內。霎時過載可達一倍半,但溫度不能擔保。

10-16. 鐵道電動機之發熱 鐵道電動機因所佔地位有限,且工作情形特殊,運用較普通電動機更爲困難。故設計時最好可任其在短時期內可受較高之溫度。此外負載變化,極不規則;頗難定其定額。A. I. E. E. 標準規定其一小時定額及連續定額如下:

鐵道電動機之一小時定額乃爲該電動機在一小時試驗內能負載之出量,以馬力或瓦計,可在轉軸處量得而不致超過下表所定之溫度限制者。電動機假定係初開,電壓及週波數(如爲交流機)應皆爲額定值,且固有通風設備亦在應用。

通風式鐵道電動機之連續定額,乃爲該電動機在長時試驗內,能負載之出量,以馬力或瓦計,可在轉軸處量得,而不致超過下表所定之溫度限制者。電動機之電壓及週波數(如爲交流機)應皆爲額定值,且固有通風設備,亦在應用。直流通風式之鐵道電動機,在電壓爲額定值或其半值,或其四分之三值時,亦可得連續定額各值,以安培計。

全閉式鐵道電動機之連續定額以安培計,電壓爲額定值之半數或四分之三。帶有磁場控制之電動機,其定額依磁場連接方式而定。普通磁場最小時,定額最大,即作爲該電動機之定額。如定額不指明爲何種定額時,吾人將了解作爲一小時定額。

鐵道電動機之發熱

項 目	機 器 部 分	封閉方式	測 定 溫 度 法	溫度升高限制(0°C.)			
				一小時之定額		連 續 定 額	
				A類 絕緣物	B類 絕緣物	A類 絕緣物	B類 絕緣物
1	樞 捲 及 場 捲	通 風 式	電 阻 法	100	120	85	105
			溫 度 計 法	80	95	65	80
		全 閉 式	電 阻 法	110	130	95	115
			溫 度 計 法	90	105	75	90
2	鐵心與絕緣物接觸或相近之機械部分	通 風 式	溫 度 計 法	80	95	65	80
		全 閉 式	溫 度 計 法	90	105	75	90
3	整 流 器	通 風 式	溫 度 計 法	95	110	80	95
		全 閉 式	溫 度 計 法	105	120	90	105
4	其他部分與絕緣物不相近者,其溫度升高,不生影響。						

註：全閉式電動機之溫度升高限制,假定比通風式高10°C.,因實用時之情形較試驗時為冷。

10-17. 整流限制 關於整流限制, A. I. E. E. 標準規定如下: 如於接受試驗及通常運用時,其負載達至需要之較高值,而整流器及電刷不致焚燒或受損,則整流即為滿意。滿意整流之條件,并非完全不生火花,但在額定負載範圍內,電刷應不必移動,而可得滿意之整流。機器

之有連續定額時, 應能於十秒鐘間負載相當於該定額一倍半之電流值, 而整流仍為滿意(假定磁場變阻器之位置與額定滿載時同)。機器之有短期, 間斷, 周期, 或變易定額時, 在各該定額時, 應有滿意之整流。發電機之有公稱定額者, 應於規定各負載(瞬時負載在內)時整流滿意。

10-18. 過速限制 一切發電機除水輪及汽輪所拖動而具有備急調速器者外, 應足以安全承當百分之二十五之過速。水輪拖動之發電機, 應足以安全承當全套機器之最高跑散速度。汽輪拖動之發電機, 如具有備急調速器, 其過速限制為百分之二十。

分捲及複捲電動機, 應足安全承當高於零載速度之百分之二十五之速度限制。串捲電動機之有一小時或一小時以內之短期定額者, 如無特種保險方式, 應足安全承當相當於額定負載四分之一時之速度。

10-19. 出量方程式 卡伯(G. Kapp)推得定額與速度及電樞之大小有一定之關係。此關係若以代數式表明之, 則成出量方程式。

令 $V =$ 額定端電壓,

$i_a =$ 額定樞電流,

$\psi =$ 極弧與極節距之比值,

$q =$ 樞周每單位長度之安倍導體數。

因
$$V = \frac{p}{a} \frac{\Phi Z n}{60 \times 10^8} \text{ (近似值)}$$

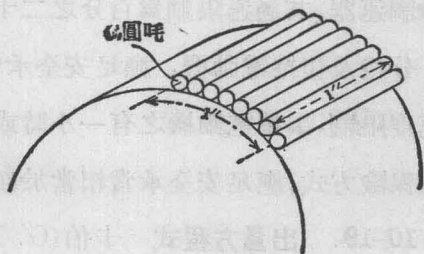
及
$$\Phi = B_p b l = \frac{\pi d \psi}{p} B_p l \text{ (近似值)}$$

故出量功率(以預計)為

$$\text{瓦} = \frac{V i_a}{1000} = \frac{\pi^2 \psi B_g q}{60 \times 10^{11}} d^2 l n = \xi d^2 l n \quad (41)$$

$$\text{其中} \quad \xi = \frac{\pi^2 \psi B_g q}{60 \times 10^{11}} \quad (42)$$

爲出量係數。此係數之數值，依機器設計常數， ψ ， B_g ，及 q 而變，但因 ψ 之變化有限，故與 B_g 及 q 之關係特大。由 B_g 之值可知機器中磁性物質利用之程度，而由 q 之值同樣亦可略知電樞銅質之利用程度爲若何，蓋 q 與溫度之特性，有密切關係，如亞當司 (Adams) 所曾說明者^①。今以 q 代表電樞每吋周圍之安倍導體數， h 代表導體中之電流密度，以每安倍之圓呎計。第 877 圖示一光心電樞面之一部分（用光心樞面乃爲便利起見），其面積爲一平方吋。



第 877 圖 樞面銅耗之計算

每導體所載之電流爲 $\frac{i_a}{a}$ 安，其截面爲 $\frac{i_a}{a} h$ 圓呎，故每吋之電阻爲

$$r = \rho \frac{\text{長度}}{\text{面積}} = 1 \times \frac{1}{\frac{i_a}{a} h} = \frac{a}{i_a h} \text{ 歐}$$

上式中 $\rho = 1$ ，因在電樞之工作溫度下，銅之比電阻約等於 1 歐/圓呎一吋。由此可得每導體上之 $i^2 r$ 爲

$$\left(\frac{i_a}{a} \right)^2 \frac{a}{i_a h} = \frac{i_a}{a h} \text{ 瓦}$$

但每吋樞周之導體數爲 $\frac{q}{i_a/a} = \frac{a q}{i_a}$ 故樞面上每平方吋之 $i^2 r$ 耗爲

① Trans. A. I. E. E., Vol. 24, p. 653 (1905).

$$\frac{i_a}{ah} \times \frac{aq}{i_a} = \frac{q}{h} \text{ 瓦/方吋} \quad (43)$$

電機之容量在 20 瓩或以下者,其 q 之值約為 400。容量在 1,000 瓩者, q 約為 800—850。如機器周圍速度為 2500 呎/分,則 $\frac{q}{h}$ 之值(此項銅耗,以每平方吋之瓦數計)極近於 1;但在較大之機器,如周圍速度為 6,000 呎/分,通風情形較好, $\frac{q}{h}$ 之值可增至 2.5。 B_g 之值之變化,在小機器約為 40,000 磁力線/方吋,在大機器約為 60,000 磁力線/方吋。 ξ 之值,普通在 0.000015(小機器)及 0.000056(大機器)之間。

10-20. 發熱及降冷曲線 任何機器之能耗,皆變成熱,因而升高機器之溫度。其最後之溫度,則須視機器組成材料之熱容量,與散熱之難易而異。當發生之熱量與散失之熱量相等時,機內之溫度即成穩定。

今先推求均勻物體之冷熱定律,以便研究構造較複雜之發電機及電動機時,易於明瞭。

令 Q = 每秒時發生之熱量,以瓩-卡計 (kg.-calories),

s = 物質之比熱 = 1 瓩升高 1°C . 所需之熱量,

W = 物體之重量,以瓩計

A = 放熱之面積,以平方呎計,

α = 降冷係數 = 物體與介質間,每相差一度,每平方呎散熱面積,每分時消散之熱量,以瓩-卡計,

θ = 物體之溫度,以攝氏度數計 ($^\circ\text{C}$.),

θ_1 = 四週介質之溫度,以攝氏度數計 ($^\circ\text{C}$.),

1. 物體之發熱 在 dt 時間內，溫度升高 $d\theta$ 度，發出之熱量為 Qdt 稅一卡，而物體吸收之熱量為 $sWd\theta$ 稅一卡。所餘之熱量乃等於 $A\alpha(\theta-\theta_1)dt$ 稅一卡，必為消散之熱量。故

$$Qdt = sWd\theta + A\alpha(\theta-\theta_1)dt \quad (44)$$

遷項後，得

$$dt = \frac{sWd\theta}{Q - A\alpha(\theta-\theta_1)}$$

設當 $t=0$ 時， $\theta=\theta_1$ 則

$$\int_0^t dt = sW \int_{\theta_1}^{\theta} \frac{d\theta}{Q - A\alpha(\theta-\theta_1)}$$

由此得

$$\theta - \theta_1 = \frac{Q}{\alpha A} \left(1 - e^{-\frac{\alpha A}{sW}t} \right) \quad (45)$$

當 $t=\infty$ 時，

$$(\theta - \theta_1)_{t=\infty} = \frac{Q}{\alpha A} \quad (46)$$

此為物體所能升高之極限溫度。上式(46)又可寫作

$$Q = \alpha A (\theta - \theta_1)_{t=\infty} \quad (47)$$

由此可知物體之溫度穩定時，生熱之速度與散熱速度相等。

2. 物體之降冷 在此情形下，並無熱量發生，故 $Q=0$ ，而基本方程式變為

$$0 = sWd\theta + A\alpha(\theta-\theta_1)dt \quad (48)$$

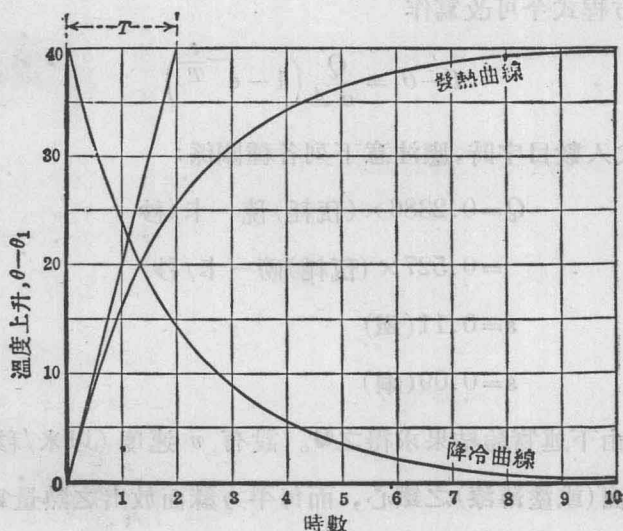
若 $t=0$ 時，溫度為 Θ 度，則

$$\int_0^t dt = -sW \int_{\Theta}^{\theta} \frac{d\theta}{a(\theta - \theta_1)}$$

由此得

$$\theta - \theta_1 = (\Theta - \theta_1) \epsilon^{-\frac{\alpha A}{sW} t} \quad (49)$$

此為降冷曲線之方程式。若 $\Theta - \theta_1 = (\theta - \theta_1)_{t=\infty} = \frac{Q}{aA}$, 即初冷時等於發熱時之最高溫度, 則降冷曲線方程式中, 與熱曲線方程式中之變數部分, 完全相同, 僅加減符號不同而已。故發熱曲線與降冷曲線為同形之對數曲線, 但一向下彎, 一向上曲, 如第 378 圖所示。



第 378 圖 發熱及降冷曲線

今先求發熱方程式

$$\theta - \theta_1 = \frac{Q}{aA} \left(1 - \epsilon^{-\frac{\alpha A}{sW} t} \right)$$

之微分，再以 $t=0$ 代入，則得該曲線在原點處之斜度為

$$\left(\frac{d\theta}{dt}\right)_{t=0} = \frac{Q}{sW} \quad (50)$$

蓋依物體之質量及材料而變，而與放熱面積及散熱面之性質無關。實際上最初時所生之熱，皆為物體所吸收，而無放散者，故原點處曲線之斜度，乃代表熱量全為物體吸收時溫度之升高率。設溫度依此率繼續升高，則在 $T = \frac{sW}{\alpha A}$ 秒後，即可達到其極限溫度 $\frac{Q}{\alpha A}$ ；故 T 可稱為物體之時間常數。

發熱方程式今可改寫作

$$\theta - \theta_1 = \frac{Q}{\alpha A} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right)$$

以上各式代入數目字時，應注意下列各種關係：

$$Q = 0.2386 \times (\text{瓦耗}) \text{ 瓦-卡/秒}$$

$$= 0.527 \times (\text{瓦耗}) \text{ 磅-卡/秒}$$

$$s = 0.11 \text{ (鐵)}$$

$$s = 0.09 \text{ (銅)}$$

α 之值，可由下述實驗結果求得之^①。設有 v 速度（以米/秒計）之空氣，吹過裸面（或塗薄漆）之鐵心，而每平方呎面放出之熱量為 $0.0038(1 + 0.25v)$ 瓦，則鐵心表面之溫度，將升高 1°C 。如 v 以呎/分計，則放出之熱量當為 $0.0245(1 + 0.00127v)$ 瓦/方吋。由此，如 v 以米/秒計，

① Ott, Ludwig, London Electrician, p. 805 (1907).

$$\alpha = 0.906(1 + 0.25 v) \times 10^{-6} \text{ 瓩-卡/秒/方呎/}^{\circ}\text{C.} \quad (51)$$

如以呎/分計,

$$\alpha = 12.89(1 + 0.00127 v) \times 10^{-6} \text{ 磅-卡/秒/方吋/}^{\circ}\text{C.} \quad (52)$$

若鐵心上塗以雙層厚漆,渥脫 (Ott) 亦曾由實驗中求得放出之熱量為 $0.0030(1 + 0.107v)$ 瓦/方呎/ $^{\circ}\text{C.}$ (v 以米/秒計), 或 $0.0194(1 + 0.00054 v)$ 瓦/方吋/ $^{\circ}\text{C.}$ (v 以呎/分計)。

由上式算得之升高溫度,與實際上測得之溫度,不能相等,因算得之溫度,略去由線捲傳至鐵心,或由鐵心傳至線捲之熱,且發熱之不勻佈情形,及絕緣體之熱容量亦均未顧及。但普通而言,最後之溫度上升,可以下式代表之:

$$\theta - \theta_1 = \text{常數} \times \frac{\text{消散之瓦數}}{\text{散熱面積}} \quad (53)$$

其中常數由實驗而定。

10-21. 電樞之發熱 上述渥脫(Ott)由實驗所得之結果,略加修改,即可應用於電機之旋轉部分。設用裸鐵面或塗薄漆面之放熱量,則溫度之升高為

$$\theta - \theta_1 = \frac{w}{a} \frac{460}{1 + 0.25 v} \quad (54)$$

式中

w = 消散之總瓦數,

a = 輻射之總面積,以平方呎計,

v = 電樞之周圍速度,以米/秒計。

若鐵面塗有厚漆者，升高之溫度爲

$$\theta - \theta_1 = \frac{w}{a} \frac{333}{1 + 0.107 v} \quad (55)$$

故如以 $\frac{w}{a} = 1$ 代入上式，即得每平方呎放熱一瓦時所升高之溫度。若每方吋放熱量爲一瓦時，而 v 以呎/分計，則升高之溫度爲

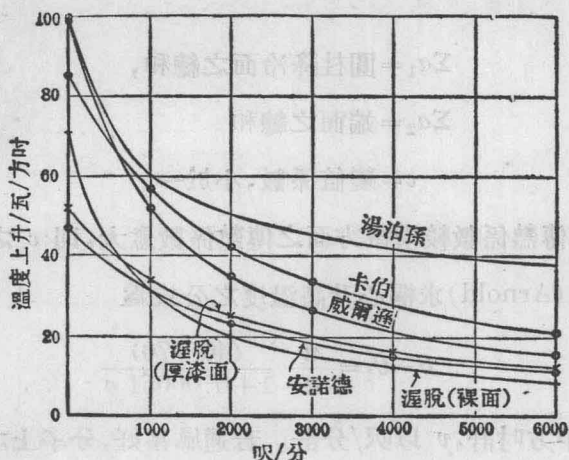
$$\frac{71.3}{1 + 0.00127 v} \text{ (裸面)}$$

$$\frac{52}{1 + 0.00054 v} \text{ (塗厚漆面)}$$

其他各人所定之常數如下：

人 名	米制單位	英制單位
<u>卡伯</u> (Kapp)	$\frac{550}{1 + 0.1 v}$	$\frac{85}{1 + 0.00051 v}$
<u>安諾德</u> (Arnold)	$\frac{300}{1 + 0.1 v}$	$\frac{46.5}{1 + 0.000511 v}$
<u>愛孫</u> (Esson)	$\frac{354}{1 + 0.0006 v}$	
<u>威爾遜</u> (Wilson)	$\frac{640}{1 + 0.18 v}$	$\frac{99}{1 + 0.00091 v}$
<u>湯泊孫</u> (Thompson)	$\frac{645}{1 + 0.3\sqrt{v}}$	$\frac{100}{1 + 0.0213\sqrt{v}}$

以上各公式，可以由線表示每方吋散熱一瓦時，所升高之溫度，爲周圍速度(呎/秒)之函數，如第 379 圖所示。吾人可注意在尋常 v 值時，安諾德 (Arnold) 公式之曲線乃在渥脫 (Ott) 研究所得兩曲線之間。



第 379 圖 溫度上升及電樞周速之關係

上列諸式若用以計算機器溫度之升高, 除非該機之種類, 完全與求各該常數時之實驗機相同者, 計算之結果, 必不能準確。第 379 圖中諸曲線大部分之差異, 由於無公認之散熱面之故。有人規定散熱之面積, 僅為圓柱之外面, 但包括端接及鐵心之表面。有人則除圓柱面外, 更包括電樞旁邊之露面。凡露出之面皆有散熱之功用, 蓋無疑義, 但放散之多少, 未能皆同。熱量由物體內部流至外部, 其多少與方向須視各方向之傳熱係數而異。電機中沿疊片之傳熱係數, 較其橫方向之傳熱係數, 約大數十倍之多(據渥脫實驗所得約自 50 倍至 100 倍), 故除非鐵心極深, 大部分之熱量, 皆由圓柱面上消散。是以欲求電樞升高之溫度, 其合理之公式當如下式: ①

$$\theta - \theta_1 = \frac{w}{\sum a_1 + c \sum a_2} \cdot \frac{C}{1 + bv} \quad (56)$$

① Ott, London Electrician, p. 805(1907).

其中

$\Sigma a_1 =$ 圓柱降冷面之總和,

$\Sigma a_2 =$ 端面之總和

$c =$ 變值係數, 小於一

若沿疊片之傳熱係數較橫截方面之傳熱係數愈大, 則 c 之值愈小

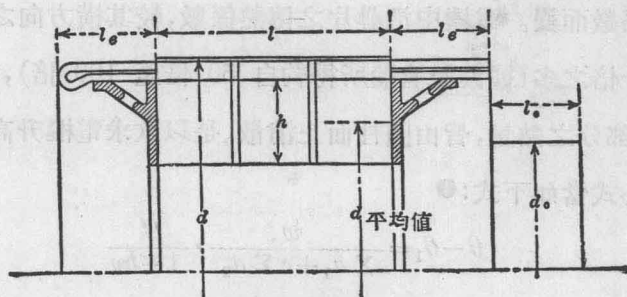
安諾德 (Arnold) 求樞心升高溫度之公式為

$$\theta - \theta_1 = \frac{w}{a} \frac{(40 \rightarrow 70)}{1 + 0.00051 v} \quad (57)$$

式中 a 以平方吋計, v 以呎/分計。若通風甚好, 分子上之數目係數應取其較低之值 (即近於 40)。應用上式時必需注意 w 並不包括端接處散熱之瓦數, a 亦不包括端接面積; 換言之, 樞心升高之溫度, 與端接升高之溫度, 乃係分別計算。故欲估計樞心上升高之溫度時, 代入上式之 w 值, 應為

$$w = \text{總鐵心耗} + \frac{\text{線捲埋在槽內之長度}}{\text{線捲總長度}} \times i_a^2 r_a \quad (58)$$

安諾德 所定 a 之數值為圓柱之面積, 加兩端之面積, 加通風管旁面總面積之半。如第 380 圖所示,



第 380 圖 散熱面之尺寸

$$a = \pi dl + \pi d \frac{h(2+n_v)}{\text{平均數}} \quad (59)$$

如計算端接之溫度升高時,

$$w = \frac{\text{線捲在槽外之長度}}{\text{線捲總長度}} \times i_a^2 r_a \quad (60)$$

$$a = 2 \pi dl_0$$

在半閉之機器中,溫度之升高,約比由上式算出者,大一倍半;全閉之機器,則大兩倍。

10-22. 場圈之發熱 磁場線圈溫度之升高,不僅由於 $i^2 r$ 之能耗,且亦受極面渦流耗及電樞散熱之影響。熱量之消散方法有三:(1)由於四周空氣之對流;(2)由於極心之傳導;及(3)直接輻射。圈內溫度各點皆不同,視線圈之深度及絕緣體之性質而異,大凡在線圈截面中間之溫度為最高,最外層之溫度最低。浸漬以絕緣物之場圈,較普通之場圈易冷,因絕緣化合物之傳熱較空氣為佳。用增加電阻法,可以量得全線圈之平均溫度升高,其最熱點之溫度升高值,約較平均值大 12% 至 20%。全線捲之平均溫度升高,較露出外面大 40% 至 60%。露出外面之溫度,乃取露出圓柱面中間及兩端之溫度計紀錄,而取其平均值。

計算場圈溫度升高之公式,約如下式:

$$\theta - \theta_1 = C \frac{\text{線圈能耗之瓦數}}{\text{線圈之散熱面積}} \quad (61)$$

關於常數 C 之數值,各人所用不同,視其所選擇之散熱面而異。 C 乃代表每單位面積,散熱一瓦,所升高之溫度。若散熱之面積(以平方吋

① 參看 Neu, Levine, and Havill, Elec. World, Vol. 38, p. 56 (1901).
及 Ott, London Electrician, p. 805 (1907).

(計) 僅指圓柱之外面, 而不包括兩端露出之面積, 則敞開式電機在靜止狀態時之 C 值為 70 至 80, 平均為 75。電樞周圍之速度愈增, C 之值愈小, 蓋因風扇作用之故。大約速度相差 1000 呎/分, 則 C 小 5%, 即

$$C = 75(1 - 0.00005 v) \quad (62)$$

其中 v 為周圍速度, 以呎/分計。此值為平均值。場圈愈短, C 必減少愈多, 蓋因磁軛有降冷作用之故; 反之, 場圈愈長, 減少值愈小。在遮蔽式機器中, C 之值可超過原數 50%, 而在封閉式機器中, 可較(62)式之值大二三倍。

通風式場圈之製法, 係由若干同心部分組成, 各部之間相隔約半吋。此種場圈製造法, 增加與空氣接觸之面積, 故散熱作用亦加甚。但間隙中之面積, 不如外面等面積之同樣有效。在同一溫度升高時, 通氣之圈較普通圈每平方吋可多散 50% 之熱量瓦數。換言之, 即 C 可作為等於 50。

10-23. 整流器之發熱 電刷磨擦阻耗, P_{bf} , 及電流通過刷與整流器間之接觸阻耗, 皆足以使整流器發熱。其升高之溫度, 可以下式計算之:

$$\theta - \theta_1 = 20 \frac{W}{A} \frac{1}{1 + 0.00051 v} \quad (63)$$

其中

W = 整流器上之總耗,

$A = \pi d_c l_c = \pi \times$ 整流器直徑 \times 整流器長度

v = 整流器之周圍速度, 以呎/分計

10-24. 封閉式電動機之定額 若一敞開式之電動機, 改成一封閉式之電動機, 則其定額必須減少, 以免溫度超過安全程度之危險。根據實際經驗, 如定額馬力減少百分之三十, 而速度增加百分之二十, 則溫度之增加, 可在規定範圍以內。減少馬力之定額, 可減少通過之電流, 而 i^2R 亦即隨之而減。增加機器之速度, 即減少每極之磁流, 因之激磁能耗及鐵心耗均可降低。速度增加而鐵心耗反減低, 乃因磁流密度減少之影響大於磁週數增加之影響之故。蓋普通鐵心耗中, 磁滯耗常大於渦流耗, 故鐵心耗大約可作為與磁流密度之平方成比例, 而與速度僅成正比。

習 題

習題 10-1. 今有一 110 伏分激電動機, 其定額為 $\frac{1}{2}$ 馬力, 樞電阻為 2.7 歐, 場電阻為 318 歐。在額定電壓下空轉時, 線路電流為 1.6 安, 速度為 1800 轉/分。如磁流及鐵心耗假定不變, 求相當於路流 5 安之負載時之慣例效率, 變換效率, 機械效率及馬力出量。

習題 10-2. 設第 10-1 題中, 電動機之路流增至 6 安, 而其電樞反作用將有用磁流減至零載值之 95%。問此時速度及鐵心耗為何? 鐵心耗可假定與磁流之平方成比例, 與速度成正比。如負載所需之轉力不變, 而欲將速度減至 900 轉/分, 問與電樞串聯之電阻, 應為若干? 此時之效率又為幾何?

習題 10-3. 第 10-1 題之電動機, 其線路電流於何值時效率最大? 其最大效率值為若干? 此時馬力出量為何?

習題 10-4. 今有一 220 伏, 30 馬力分激電動機, 其零載時之線

路電流爲 7 安，磁場電流爲 3 安，樞阻爲 0.085 歐。此電動機用皮帶拖動一 115 伏，25 瓩之分激發電機，其滿載效率爲 88%，皮帶損耗爲 0.335 馬力，發電機之場流爲 5.5 安，樞阻爲 0.025 歐。假定每機之電刷位落爲 2 伏，問發電機供給滿載時電動機之入量爲若干瓩？

習題 10-5. 今有相同之 600 伏，250 馬力分激電動機二具，電氣方面，並聯於 600 伏之幹線上，機械方面，互相耦接，以作卡伯氏反對法之試驗。每機樞阻爲 0.056 歐，電刷位落每機 2 伏。甲機用作發電機，樞流爲 330 安，場流爲 5.4 安；乙機用作電動機，路流爲 405.5 安，場流爲 5.5 安。問幹線供給之電功率爲何？電動機之效率約爲幾何？

習題 10-6. 今欲設計一分激電動機，使其滿載效率爲 92%，而最高效率適在 $7/8$ 滿載值時。試求損耗之變換及固定部分，(以滿載定額之百分數計)，及最高效率之值。半載時之效率又爲幾何？

習題 10-7. 今有一 230 伏 20 瓩複激機，其樞阻爲 0.091 歐(刷觸阻不在內)，分激場阻 101 歐，串激場阻 0.041 歐。如用作電動機，則空載時之路流爲 7.4 安。如此發電機爲平複激式，試求其在額定負載時之慣例效率。

習題 10-8. 第 10-7 題中之發電機，如每日發電 10 小時，負載分配爲 $\frac{1}{4}$ 滿載 3 小時，半載 2 小時， $\frac{3}{4}$ 滿載 1 小時，滿載 3 小時， $\frac{1}{4}$ 過載 1 小時，試求其全日效率。

習題 10-9. 今有一 4 極 220 伏分激電動機，其電阻在 75°F 時爲 5.02 歐，有效散熱面積爲 650 平方吋。如周圍空氣溫度爲 75°

F. 之定值, 而線圈散熱率為每高出 75°F . 一度, 每方吋散熱 0.01 瓦, 問線圈之最後溫度為何? 銅線之溫度係數為 $0.00427/^{\circ}\text{C}$.

習題 10-10. 如第 10-7 題中之電機為四極機, 且其額定速度為 1150 轉/分, 問電樞鐵心之直徑及長度約為何值? 假定氣隙磁場密度為每方吋 47,000 線, 周線每吋有 500 安倍導線, 而極弧與極距之比為 0.7.

第十一章 昇壓機及平衡機, 列車電焰制

11-1. 昇壓機 (boosters) 昇壓機爲一種電機, 其電樞係與電周路串聯; 其所發生之電勢, 可因磁激極性之不同, 而增加或減少周路中原有之電勢。此種昇壓機, 大都可用任何原動機發動, 惟普通則均利用電動機; 此電動機所需之電流, 即可直接由恆位幹線供給。

11-2. 串激昇壓機 昇壓機最顯著之效用, 爲增加發電機之電壓, 或中央車站匯電條一部分之電壓。設有一特殊之負載, 其受電機器之電壓, 必須與來源之電壓相等時, 則昇壓機所發之電壓, 必須足以補償饋電線之電阻位落而後可。電阻位落既係與電流成正比例, 故昇壓機之電壓, 亦當與電流成正比例; 換言之, 昇壓機之外特線。必須爲一經過原點之直線。若不用輔助機件, 此種特性實難使之精確實現; 但爲實用計, 若設計一種串激發電機, 使其磁流密度, 永不超過磁性飽和點範圍以外, 則亦可得近似理想之昇壓機。第 140 圖所示之磁滯作用, 顯然足以妨礙昇壓機之效用, 故必須減至極小; 其次若磁激之磁流, 必須經過大變更者 則此磁路必須完全用薄疊片, 俾因磁流變更而發生之渦流減低, 不致延誤磁流之改變, 而遲緩機器之動作。

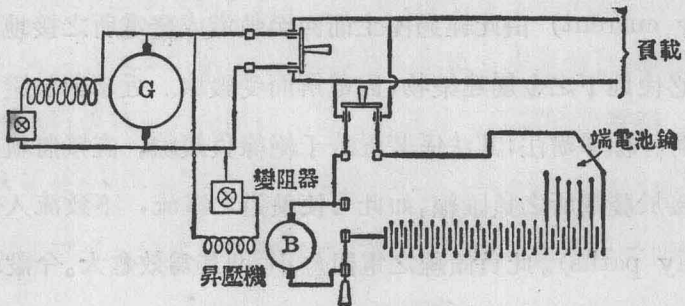
用串激昇壓機以補償電位落, 猶之完全消去電路中之電阻。在普通情形, 若欲減小電路之電阻, 其惟一方法爲增加電線之截面面積, 但電線之截面增加, 則電線之重量及其價格亦必同時增加。故在實地使用時, 當視情形而預爲計劃一種標準: 在未達此標準時, 增大電線可較裝置昇

壓機爲合算；若過此標準，則裝置昇壓機或較爲經濟。

用串激昇壓機以消去電路電阻之法，有時或用之於電力鐵道。電力鐵道常以地爲回線，當電流經過地下時，地下之水管，煤氣管，及電話線等，往往被其電解。欲求免除此種困難，採用串激昇壓機實最妥善。普通電車之電流回路，常爲軌道及軌道附近之土壤。此電流即依軌道及土壤電阻大小之反比而分成兩部，故雖砌合完善之軌道，亦必有甚大之電流經過土壤，而沿行於低阻之地下金屬建築物（如水管煤氣管等）。當雜散電流（stray current）由此經過溼土而回至軌道或發電所之接地匯電條時，結果必使地下之金屬建築物，因電解而受毀壞。近來對於避免電解危險，已有一標準辦法：其法係裝置若干絕緣負饋線，直接將軌道上之各點，連接於發電所之負匯線，如此可使軌道之電流，不致流入雜散之歧路（stray paths）。此負饋線之電阻愈小，則其爲效愈大。今設以一串激昇壓機，接於負饋線上，使其電勢之方向，爲由軌道以入於負匯線，則饋電線之當量電阻（equivalent resistance），必可因之減小，而大部分之電流，自然經過負饋線而回發電所矣。昇壓機之用於此等處者，概稱之曰減壓機（negative booster），或曰回軌昇壓機（track-return booster）。

11-3. 分激昇壓機 恆位電系中，其負載有逐漸變化，由最小而變至極大者，往往以蓄電池組與匯電條並接。低載時可全由此蓄電池供電；在頂高負載時，可與發電機並用。在其他時期，則又可取發電機之電流，以充其電。如此則當發電機工作時期，可以維持均載（uniform load），而燃料費因之節省。在此種裝置中，可用一種分激昇壓機，以抵抗蓄電

池之反電勢，而助其充電。如圖 381 所示，昇壓機之場捲，係接於總匯線上，(切勿接於自己之電樞上)，故實際上此機乃為別激式。當充電時，昇壓機之電樞與蓄電池接成串聯，且供給一較小之電勢，故場捲用上述之連接法。此昇壓機之電壓，可藉磁場變阻器而以手控制之。磁場之必須調準與否，一依電流計所指示者以為斷。在此場路中，通常均安有換向鑰，或換向變阻器。若蓄電池電壓過低，或外路需電流過多時，則此昇壓機之電勢，可與蓄電池之電勢相加，而助之放電。



第 381 圖 分激昇壓機之連接圖

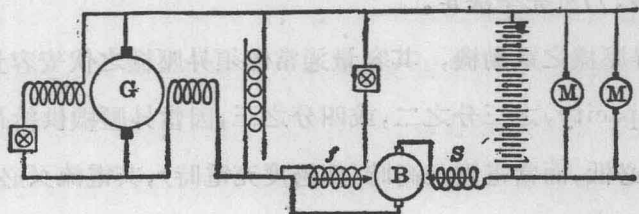
普通鉛蓄電池組，在可能限度內，每電池可放電至 1.8 伏；當充電時，欲求可以保持電池長久完善，每電池必須外加電壓 2.65 伏，俾使得『過度之充電』。故假設上述裝置之電壓為 V ，則所需電池之總數必為 $\frac{V}{1.8}$ ，以備萬一其他來源斷絕時，此蓄電池組即可單獨用以供電。充電以後，蓄電池之電壓可加至 $2.65 \times \frac{V}{1.8}$ ，故昇壓機之容量，必須足以發生 $V \left(\frac{2.65}{1.8} - 1 \right) = 0.47 V$ 伏；因此在 110 伏之裝置中，昇壓機之最大電壓當為 52 伏。由此可見，昇壓機之設計，必待蓄電池組之最大放

電率明瞭後，乃可完全決定。

拖動昇壓機之電動機，其容量通常僅須昇壓機之伏安容量 (volt-ampere capacity) 之三分之二，或四分之三，因當昇壓機供給最高電流時，其電壓必低，而當電壓最高時（即過度充電時），其電流又必大減。鉛蓄電池組如繼續供給一電流之值八小時，而每電池之電壓減至 1.8 伏，則此電流值謂之正常（八小時）放電率 (normal discharge rate)。過度充電時之電流值，不應超過此八小時放電率之一半。

如第 381 圖所示之電池組，其在最右邊者謂之端電池 (end-cell)；此數個端電池，可藉端電池鑰以關進電路內，或撤出電路外。使用端電池之目的，純為調變電池伏數起見，蓋所以補償充電放電情形變更時電壓之不同，以使合於線路之需要。例如 110 伏之裝置中，當電完全放出時，其所需電池之總數為 $\frac{110}{1.8} = 61$ ；若在新充電以後，每電池之伏數為 2.15，則所需僅 $\frac{110}{2.15} = 51$ 電池。故在此種裝置中，必須設有 61 電池，而其中之十個為端電池。然依以上所述，若昇壓機之磁場裝有換向鑰者，則端電池之數目，亦可酌量減少，此因昇壓機之電勢，在此種情形時，可以使之反抗蓄電池之電勢至某種程度，而恰能調準伏數至相當數量。

11-4. 恆流昇壓機或單向昇壓機 普通在旅館及辦公室等建築中，其電燈及昇壓機所需之電量，常因時而變，設有一單獨小發電所，欲使之專任此種負載，則其中必須有一種設備，足以保持電燈之電壓不變，而同時當昇降機開動，電流急增時，又必須有法以減小電力周路之電壓。此種裝置，約如第 382 圖所示。圖中 f 為昇壓機之分激場捲，直接聯於



第 382 圖 恆流或單向昇壓機

恆電位之電燈匯線上，其所發生之磁化作用為串激場捲 S 之磁化作用所反抗，如圖中箭頭所表示。因 f 而生之磁激，通常大於 S ，此二磁激之差，即用之以助昇壓機發生電壓；在普通負載情形時，此電壓約當 10 伏至 15 伏，而電壓之方向，恰與發電機電壓方向相同。在正常負載時，蓄電池組必須調整至既非充電，亦不放電；換言之，即使發電機與昇壓機之電壓總數，恰與蓄電池之斷路電壓相等。如是則所有之電燈負載及電力負載，均由主要發電機擔任之。過後若電力負載忽然增加，此突然增加之電流，必須取之於發電機，因之昇壓機之串聯場激，亦必同時增加，而昇壓機所發生之電勢，遂因以減小；至是原來蓄電池上之均壓情形，乃完全攪亂，而蓄電池遂開始放電，以幫助發電機，使電流不致超過其正量。反之，若電力負載減小，昇壓機之串聯場激暫時隨之以減，而充電電流即得流入蓄電池中。由此可見，此昇壓機雖名曰恆流，其經過電樞及串聯磁場之電流，並非一定，但實際上此變化幾甚微細。電流之增減，絕不致十分超過蓄電池電流之平均數。當蓄電池充電或放電時，其端電壓亦各同時增減，其所增減之量，約略可與電流成正比例。例如一電流等於八小時率之值，其電壓之變更，為每電池 0.05 伏，則在一小時

率 \bullet 時(約當八小時率電流之四倍)，其變更當為每電池 0.2 至 0.21 伏(假定電池組係預先充滿電量)，故知此處昇壓機之功用，完全在變更蓄電池之電壓，以符合於負載所需要之充電或放電率。茲舉一例以明之，假設電力周路之電壓為 230 伏，則當每電池放電時之正常電壓為 2 伏時，所需之電池總數為 115。若負載所需之電流，相當於蓄電池八小時放電率，而超過於平均電流值 I 安，則昇壓機之電壓必須減低至 $115 \times 0.05 = 5.75$ 伏。此種變化可用一適當比例之串聯場捲以促其實現。即在電流由 I 增加至 $I(1+p)$ 時，恰可使場激亦有相當需要之變更(此處 $p \times 100$ 代表昇壓機電流之百分數變化)。此種昇壓機之電壓應有直線變化，故磁路之工作範圍，亦必須在磁化曲線之直線部分(參看第 381 圖)。

- ① 設有一蓄電池組，當其放電為八小時率時，其容量(capacity)為 C_8 安時(amp-hour)，則當其放電至較高率時，其容量必銳減。例如有一電流，能於一時內將每電池之電壓，降低至 1.8 伏者，則此電流稱之曰一小時率，而其容量則降低為 $\frac{1}{2} C_8$ 安時。此容量減小之原因，純由高率之放電，發生高速之化學變化於有效材料(active material)之表面薄膜上，因以阻止電解液，使不得透入新鮮材料(fresh material)所致。放電率(n)及其相當之安時容量(C_n)之關係，可約略以下列之公式表示之：

$$C_n = \frac{C_8}{2} \sqrt[3]{n}$$

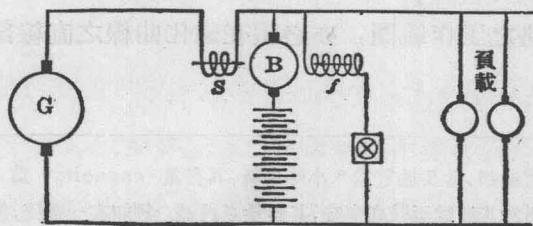
參看 "Storage Battery Engineering," by Lamar Lyndon, 3d ed., p. 98, 及 Foster's "Electrical Engineers' Pocketbook," 7th ed., p. 875 (1913).

若 i_8 為相當於八小時率之電流， i_n 為相當於 n 小時率之電流，則顯然可知 $C_8 = 8 i_8$ 而 $C_n = n i_n$ ；以之代入上述之近似公式中，即可得

$$i_n = \frac{4 i_8}{\sqrt[3]{n^2}} \quad (\text{近似值})$$

因充電之情形不同，而蓄電池之電壓有變化者，其補償方法，可於昇壓機之分激場捲中接一變阻器，而以手調整之。但用單向昇壓機（或其他自動昇壓機）時負載之變動，雖足以引起一交變之放電及充電，而其交變絕速，故蓄電池大體上所受影響絕少。因此如平均電力負載較小，而變化較大時，採用單向昇壓機最為合宜。

11-5. 雙向昇壓機 另有一種電系（例如電力鐵道之有較大平均負載者）並不希望蓄電池放電時電力周路之電壓降低，有時可用雙向昇壓機（如圖 383 所示）。此機與單向昇壓機不同之點，全在樞流之方向，蓋兩者之分激場捲與串激場捲，雖均用差接法，而雙向昇壓機中之樞流



第 383 圖 差接或雙向昇壓機

並不限於單一方向。雙向昇壓機之目的，係在保持發電機之負載，使常等於平均負載之值，而以蓄電池擔任其增減之餘數。故在第一種裝置中，若平均負載較大，而變化範圍較小者，最宜用此。

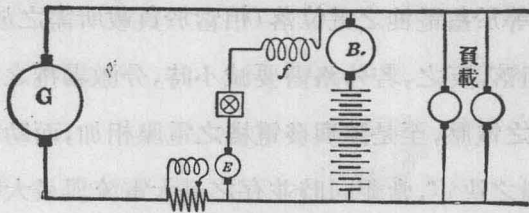
如圖 383 所示，設蓄電池之斷路電壓，適等於電系之電壓，則當負載在平均數值時，蓄電池並不充電或放電。同時，經過昇壓機分激場捲之電流，亦可調整之，使其磁化作用恰與串激場捲 S 相抵消。當外路需要增加時，其經過 S 之電流，亦稍稍增加，因而昇壓機發生一電勢，與蓄電池電勢之方向相同；至是蓄電池乃實行放電。由此可見，昇壓機所發

生之電勢，必須等於蓄電池之電位落（相當於負載所需之放電率），加昇壓機電樞之電阻落。反之，若外路需要減小時，分激場捲之力量，超過串激場捲，昇壓機之電壓，至是遂與發電機之電壓相加，而助蓄電池充電，故此昇壓機容量之決定，當視同時並存之最大電流與最大電勢以爲斷。

就表面上觀之，蓄電池之斷路電壓，雖曰等於發電機之電壓，及其電系之電壓，然其真正電壓，常依蓄電池之放電情形，而變更甚鉅。若欲補救此種變換，可於分激場捲中，串聯一變阻器，而以手調整之。

11-6. 昇壓機之輔助控制 如以上 11-4, 11-5 兩節所述，無論雙向昇壓機或單向昇壓機，均有一共同之缺點。即差接線捲之串激圈，如其電流有一定變換時，則一定之電壓隨之而生，不論蓄電池之情形如何。實則蓄電池相當於某一充電率或放電率之電壓變化，乃視其原來情形而異。換言之，全靠昇壓機串激場捲之電流變化，並不能自動的得到所需之充電率或放電率。且因串激場捲必須足以擔負巨量電流，故線捲之截面，亦須特大，因之機器每瓶容量之尺寸，與重量，亦同時增加，殊不經濟。爲免除此種困難計，乃有數種自動裝置之發明，可用另外機件以調整蓄電池，而昇壓機則僅裝有一極簡單之分激場捲。現此種裝置，在實用上，已代上述二種差接昇壓機之地位。

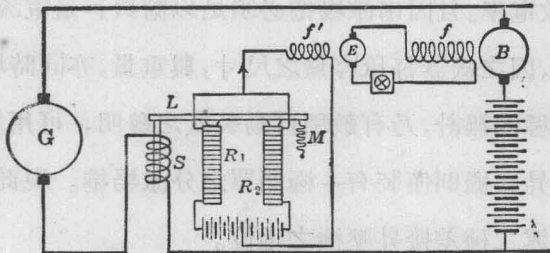
11-7. 赫巴特 (Hubbard) 反電勢制 此係 Gould Storage Battery Co. 所專利。如圖 384 所示，昇壓機之場捲 f ，係與一小激磁機 E 之電樞串聯。此激磁機由小電動機拖動，其磁場復用發電機之全部或一部電流以激之。當負載在平均值時，激磁機 E 所發生之電勢，可調準至恰與線路電勢等值而相反。昇壓機之場捲，既無電流經過，電樞



第 384 圖 赫氏反電勢制昇壓機調整法

即不發生電勢，而蓄電池之電壓與線路電壓相等，亦絕無放電充電等作用。負載超過平均數值時，激磁機串激圈之電流，亦必同時增加，因之此機所發電勢，超過線路電壓，而電流乃經昇壓機之場捲而流通，終至昇壓機之電樞發生電勢，以助蓄電池放電。反之，若負載減小，激磁機之磁場減弱，結果使昇壓機之極性改變，而助蓄電池充電。

11-8. 恩芝制 (Entz system) 此係 Electric Storage Battery Co. 所發明，可用以控制較大容量之裝置。如圖 385 所示，發電廠所有



第 385 圖 昇壓機之自動調整法，恩芝制。

之電流均經過一線圈 S （此線圈由厚銅片數匝繞成），當電流通過時，此圈即發生一種電磁拉力，以吸引懸於槓桿 L 一端之鐵心。若發電廠之輸出量，恰當平均數值，則電磁鐵之拉力，恰為彈簧 M 所平衡，而使槓桿壓於 R_1, R_2 兩堆炭片上之力量，適足以使兩炭堆之電阻彼此相等。

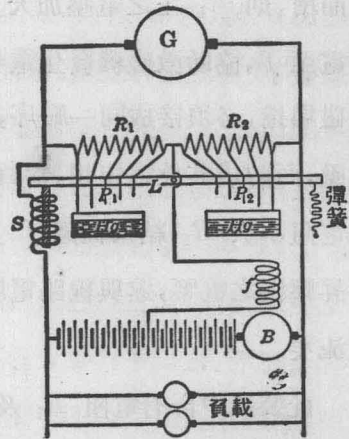
此二炭堆之頂端互相連接後，又與激磁機場捲 f' 之一端相連；炭堆之下端，則連接輔助蓄電池之兩端，而於蓄電池之中點，另連一線至 f' 之他端。激磁機 E 之電樞，又供給電流於昇壓機之場捲 f 。設 R_1 與 R_2 之電阻相等，且所有之輔助蓄電池，均充有相當之電，則 f' 兩端之電位差等於零，故激磁機與昇壓機皆不發生電勢。主要蓄電池之電壓既等於線路電壓，故亦並無充電或放電作用。若負載電流加大，經過 S 之電流隨之而增，則 R_1 上之電壓加大。因此 R_1 之電阻減小，而輔助蓄電池即放電至 f' ，協助激磁機發生電勢，以激昇壓機之磁場。此處 E 與 B 之兩磁場捲，必須接成同一順序，務使昇壓機之電壓，加入主要蓄電池之電壓，而助成其放電作用。當負載減低時，彈簧 M 之力超過 S ，故 R_2 之電阻小於 R_1 ，結果經過 f' 及 f 之電流均與增加負載時之方向相反，而昇壓機之電壓，遂與線路電壓同向，至是主要蓄電池乃一變而受充電電流矣。

此裝置中含有電阻 R_1 及 R_2 ，輔助蓄電池組，及激磁機場捲 f' ，通盤組合，極相似於惠司東電橋 (Wheatstone Bridge)。蓄電池之兩相等部分，恰相當於電橋之兩比率臂 (ratio arms)， R_1 與 R_2 相當於電橋之可變電阻及未知電阻，而場捲 f' ，則相當於測電計 (galvanometer)。 f' 極性之影響，猶之測電計在電橋中，因橋臂電阻之變化而向左右傾歛。

在較小容量之裝置中，激磁機與輔助蓄電池組，均可省去。實則無論若何裝置，若以主要電池或主要電池之一部應用，輔助蓄電池實非必須之品；蓋使用輔助蓄電池組之目的，完全為避免主要蓄電池組中各電池負載之不等。設欲省去激磁機，圖中之連接法，應略加變換，即將連於

f 兩端之接頭直接移至 f ，但如此改法，必須昇壓機之容量及其激磁所需之電流均甚小，蓋實際上經過 S 之電流有限，炭堆不能隨意加大，以得範圍較大之壓力變化，故電橋周路即有不平衡，其所發生於 f 或 f 之電流，亦至有限。

11-9. 畢蕉制 (The Bijur system) 此係 General Storage Battery Co. 所發明。如圖 386 所示，此種外部控制法，亦係應用惠司東電橋之原理。圖中 R_1 與 R_2 係代表兩相等之比率臂，互相串聯而接於線路；此兩臂上各有一列搭頭 (taps)，接於長度不同之各接觸線，如 P_1 及 P_2 是。Hg 係代表兩水銀槽，當槓桿 L 受電磁鐵 S 之力或受彈簧之力，而向左右偏欹時，各接觸線因長短不同，或浸入水銀槽中，或曳出水銀槽外。蓄電池之斷路電壓，可設計恰與線路電壓相等，故當此電系擔負平均負載時，設控制機件之槓桿



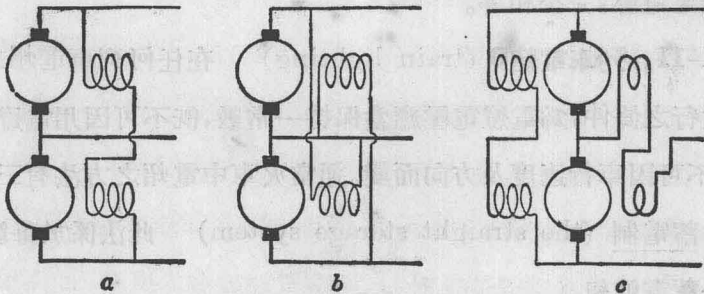
第 386 圖 昇壓機之自動調整法，畢蕉制。

L 調準平橫，則蓄電池既不充電，亦不放电；蓋此時昇壓機場捲 f 之兩端並無電位差，因之昇壓機亦無磁激。其後若負載增加，則經過 S 之電流，亦稍稍增加，結果使槓桿成反時針向之轉動，同時 R_1 之電阻，亦遂因槓桿轉動而漸受短接，至是 f 周路中之平衡狀態，乃完全攪亂，電流遂流過 f ，使昇壓機發生電勢，以助蓄電池放电。反之，若負載減少，則彈簧之拉力勝過 S 之吸力，結果槓桿作順時針向之傾側，而 R_2 漸受

短接；此時經過 f 之電流方向，與前相反，故昇壓機發生反向之電勢，以助蓄電池充電。

畢蕉制與其他外部控制法之分別，可一比較之：他法中發電機電流之變化，係與蓄電池充電放電成正比例；而在畢蕉制，則發電機之電流有一定變化時，其增減之電量，適由蓄電池擔任之。蓋在畢蕉制之裝置中，電磁鐵 S 與抑制彈簧之拉力，係配成一種比例，當有一定之電流經過 S 時，無論槓桿移動至任何位置，此二拉力恰互相平衡。在此平衡狀態下，電流稍有變更，則此二力之差，即可超過各移動部分之摩擦力 (friction)，而使槓桿繼續移動。因是昇壓機之磁激，亦依適當之方向而逐漸增加，藉以調濟發電機之負載，使不致超過其本來之變化。

11-10. 平衡機 (balancers) 第 387 圖之 a, b, c 係代表平衡機之三種接法，其目的在求三線制 (three-wire system) 兩邊之電壓，永遠保持相等，或近乎相等。(參閱第六章第 6-21 節)。如第 387 圖中 (a) 之接法，若兩邊之負載不平衡，則在負載較重之一邊，其電壓必降低，而在負載較輕之一邊，其電壓必增高。當此情形時，擔負重載之機器，遂變為



第 387 圖 平衡機之連接法，三線制。

發電機，以遏止電壓之降落，而在其他一邊之機器，則變為電動機，以限制其電壓之上升。但此時因電動機帶有負載，平衡機之速度隨之減低，實足以妨害發電機盡量供給負載以維持中線電位不變之能力（蓋在速度不變時，中線電位大致不變）。欲補救上述中線電壓之改變，可以場捲接成第 387 圖 (b) 式。當此情形時，若載重一邊之電壓降落，則電動機之磁場減弱，即可促增其速度；同時因輕載一邊之電壓升高，故發電機之電磁加強，而更足以促成電系兩邊之電壓平衡。但如此平衡，並不能十分完善，蓋平衡機之自動回應 (response) 乃依真正電壓之不平衡為發端。欲求完善之調整法，事實上亦屬可能，如圖 387 (c) 所示，即其一種。此種平衡機之兩架機器，均係複激，其串激場捲之接法，係使中線之上之電流流過時，發電機所受者，為積複激磁場，而電動機所受者為差複激磁場。故在重載一邊之電壓，可同時因磁激及速度之增加，而維持不變。由上所述，可知 387 圖 (b) 所代表之電系，其自動作用乃係於電壓之不平衡，而第 387 圖 (c) 所代表之電系，其自動作用，則係於電流之不平衡。此二法中，以後者更為完善，蓋複激磁場可以隨意調準，而使中線兩邊之電壓，完全相等。

11-11. 列車電燈 (train lighting) 在任何列車電燈方式中，其必履行之條件，為電燈電壓應當保持一常數，既不可因用電燈數目而變，亦不可因車行速度及方向而變。通常火車中電燈之方法有三：

1. **蓄電制** (the straight storage system) 此法係於每節車中，各裝一蓄電池組。

① 參閱 Trans. A. I. E. E., Vol. 21, pp. 129-227 (1903).

2. 首尾制(the head-end system) 此法係於行李車中，或火車頭上，裝一恆壓發電機，以供給全車之電流。

3. 軸燈制(the axle-lighting system) 此法係於每輛車下，各裝小發電機一只，以車軸曳動發電。

最早之火車，全用蓄電池以為點燈之用，但蓄電池之電壓愈用愈小，結果列車在長距離之鐵道上，愈行則燈愈暗。故在終點，或在沿途各站時，必須將電池充電或另換新電池。

在首尾制中，普通均用複激發電機，而以汽輪機拖動之，此汽輪機所用之蒸汽，即取之於火車頭。此種汽輪發電機，或置於火車頭。或置於行李車中均可。但列車之電燈制如欲求其完善，必須另用蓄電池組，普通每輛車一組，以為車未連接時或車行遲緩時之用。普爾門 Pullman) 睡車上之標準蓄電池組，係以十六小電池組成之，其電壓恰相當於 30 伏之標準燈壓。電池全放電與全充電間之電壓變化，可藉自動調整器免除之，使燈上所受之電壓，絕對不變。

在軸燈制中，欲求保持電壓不變，其情形較為複雜，蓋發電機之用車軸曳動者，不僅其速度之變化太大，且此機應能運用於任何車行方向之時。普通發電機所固有之性質，均不合於車軸發電之用。故是項發電機，必須特別設計，配以各種之調整器，始可應用。通常車軸發電機均須與蓄電池組並用，以為車停時或車行太緩發電機電壓過低時之預備。

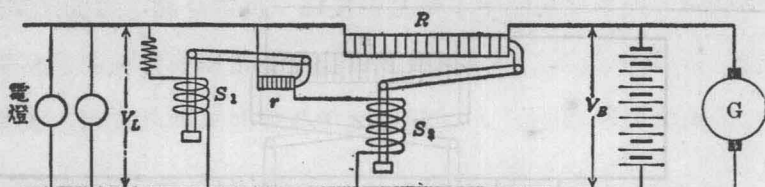
汽車發電機之設計，與車軸發電機相似，惟可無須注意轉動之方向，此因汽車上之發電機，係由汽油機拖動，而汽油機旋轉之方向，常為一定不易。

11-12. 列車電矧制中之電壓調整法 欲求免除電燈燭光之變更，必須用一自動調整器，以爲補償蓄電池全放電與全充電間電壓變更之預備。在軸矧制內，更須足以補償因速度改變而變動之電壓。調整之法不一，大別之可分爲機械法及電磁法 (electrical or electromagnetic method)。有數種之裝置，維持恆電壓即須維持恆電流，而使發電機供給恆量功率；此種調整尙非完全合適，蓋鉛蓄電池組充電時，電流應初大而漸小，以至電池完全充滿，此點並未顧及。今若安置調整器，以使蓄電池組之電壓，控制發電機之電壓及電流輸出量，或使發電機管理線路及蓄電池之電壓，均屬可能。

軸矧制中之用機械調整法者，係利用皮帶之滑溜 (slipping) 或另一滑溜齧合器 (clutch)，以調整發電機之電壓。利用滑皮帶者，司東氏 (Stone) 發電機即其一例。在此類電制中，當負載增加至預定值以上，而皮帶發生滑溜作用時，發電機之速度即保持不變。司東制之發電機，軸上裝有自動搖臂；以爲火車倒行時轉換發電機極性之用。同時又有自動離心電鑰，置於發電機與電池之間。當發電機之速度及電壓，已達預定之「拾起」值 (pick-up value) 時，則此鑰關閉；若速度低於規定之限度，則此鑰自啓。

電磁調整法，可包括下列各種電壓調整方法：(a) 利用燈路電阻或發電機之場路電阻之自動變更；(b) 利用發電機之電樞反作用，以求所需之特性。上述各法，當於下列各節分別舉例詳論之。

11-13. 電阻調整法 如第 388 圖所示，電燈周路中接有二炭片堆，自動調整器之運用，即藉此炭片堆電阻之變更。當電池之電壓 V_b

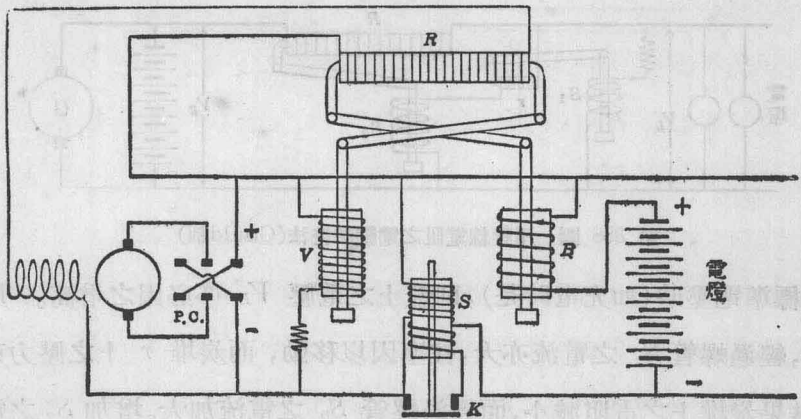


第 388 圖 用幹線電阻之電壓調整法(Gould制)

高於標準電壓時(如充電時是)，則燈上之電壓 V_L 亦必因之增高。 V_L 既大，經過螺管 S_1 之電流亦大，柱塞因以移動，而炭堆 r 上之壓力亦增。結果炭堆上之電阻減小，而經過螺管 S_2 之電流加大。增加 S_2 之電流，即使其柱塞移動，因此炭堆 R 之壓力減少，而電阻增加。於是 V_B 所增加之一大部分，遂被 R 所吸收。由此可見螺管 S_1 及 S_2 之回應，係全恃 V_L 之變更，故燈上之電壓，並不能絕對保持不變，惟實際此變更亦甚小。又此裝置中用螺管 S_1 及炭堆 r ，乃使 S_2 對於 V_L 變更之回應，愈加銳敏。電燈調整器，通常均與發電機調整器並用，今已略述前者之構造，後者當於下節繼續討論之。

11-14. 發電機磁場調整法 如第 389 圖所示，發電機之電壓調整，係於場路中接一電阻 R 而調變之。圖中炭堆 R 之兩端，接以兩螺管 V 及 B 。如速度變更，發電機電壓隨之而變，則螺管 V 即生作用；如蓄電池電流變更，則影響於螺管 B 。

茲舉一例以明之；假定電鑰 K 關閉，而發電機充電於電池內，則當發電機之速度增加時，同時必有一趨向，以加大發電機電壓及充電電流。但充電電流既增加，螺管 B 即發生一向上之拉力，而其柱塞之重量即不再加於 R ，結果發電機之場阻加大，而電壓降低。發電機之速度

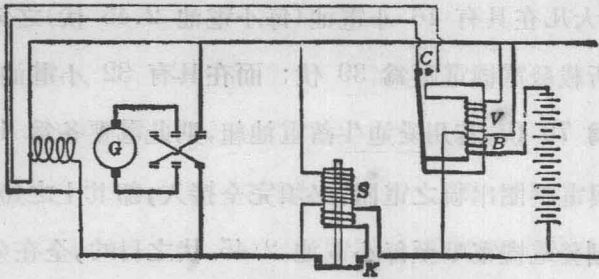


第 389 圖 用磁場變阻器之電壓調整法(Gould 制)

增高時，蓄電池往往易致過度充電，欲求免除此弊，可使螺管 V 之柱塞，於線路電壓增高時，即向上升，而減少 R 右邊之壓力，使場路電阻加大，以抑制發電機之電壓。

當發電機達相當之速度，而其所發生之電壓，足使螺管 S 發生作用時，自動電鎗 K 即關閉，而發電機與蓄電池組乃連成一起。此時發電機之電流，通過電鎗 K 上之串捲以增分捲 S 之吸力。若速度低於上述之「拾起」值。則蓄電池之電壓，大於發電機之電壓。而經過串捲 K 之電流，方向乃與前相反。結果 K 之柱塞上所得之淨力小於地心吸力，而 K 即開斷。於是所有之負載，遂完全歸電池組擔負。圖中 $P.C.$ 係代表一換極器。

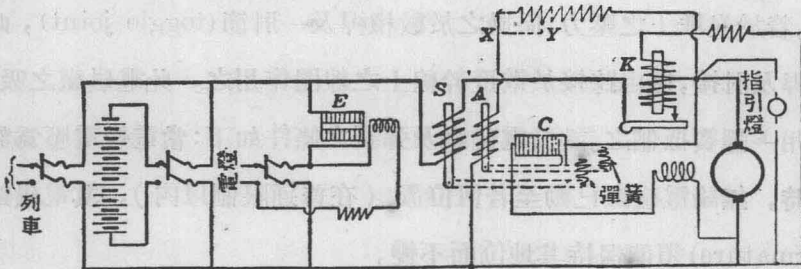
另有一法，與第 389 圖相似，惟加一振動接觸器，如 390 圖所示。此振動接觸器頗類似於提利爾 (Tirrill) 調整器中之接觸器。自動電鎗 K 之作用，仍與 389 圖之作用同，螺管 B 與 V ，則在同一磁路上作用，



第 390 圖 用振動接觸器之電壓調整法

以為啓閉接觸 C 之用。故若充電電流超過安全限度時，則線圈 B 吸閉接觸 C ，而使發電機場捲暫時短路，以減發電機電壓。同理，若發電機電壓，因轉速加快而過高時，則線圈 V 亦生同樣之作用。

11-15. 磁場與線路調整法 第 391 圖示一列車電制之連接法，



第 391 圖 磁場與線路之聯合調整法(Safety Car Heating and Lighting Co.)

此圖與 11-13 節及 11-14 節所述相似，亦含有獨立之調整器，以分別調整發電機及電燈之電壓。

與發電機之分激場捲相串聯者，為一炭堆 G ，此炭堆之電阻，係利用槓桿着於其上之壓力以控制之，至於槓桿之運動，則可藉 S 與 A 兩線圈中之柱塞以為左右。線圈 S 所載者，為發電機電流之全部，此電流可調準至保持滿載之值。線圈 A 跨接於線路上，其載電之量，係依蓄電

池組而變，大凡在具有 16 小電池(每小電池 2.45 伏)之鉛電池組之裝置中，其所載發電機電壓為 39 伏；而在具有 32 小電池之「60 伏」裝置中，則為 78 伏。若用愛迪生蓄電池組，則此電壓各為 43 伏及 86 伏，但此時與電壓圈串聯之電阻，必須完全接入，即其上之短路 XY ，必須啓開。限制發電機電壓至每小電池 2.45 伏之目的，全在免除蓄電池之過度充電，如此則當電池充滿後，充電電流可以自動減低，而不致溢出其安全數量。至於利用線圈 S 以限制發電機電流之目的，則在避免發電機或因燈載太大，或因發電機充一完全放電後之蓄電池組而得過度之負載。

與電燈串聯者，爲一對炭堆 B ，此二炭堆，互相並聯，可用以控制燈壓。着於炭堆上之壓力，係操之於數槓桿及一肘節(toggle joint)，此數槓桿及肘接，復由跨接於電燈幹線上之線圈作用之。此電磁鐵之吸力，更用一彈簧抵制之。設計電磁鐵及彈簧之條件如下：當電燈電壓為額定值時，無論電磁鐵已動至若何位置（在普通限制以內），其電磁鐵銜(armature)須能保持其地位而不變。

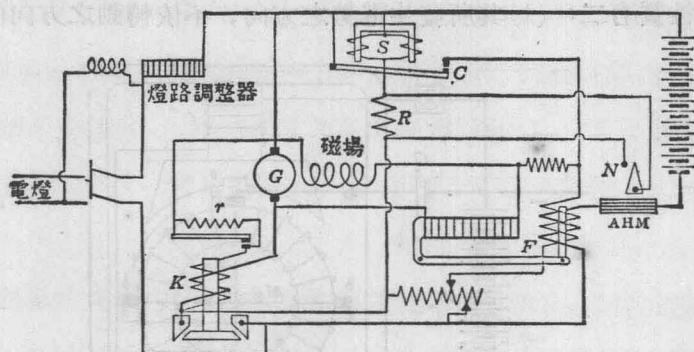
此在電制中，控制發電機及燈路之電磁鐵銜，均帶有石墨柱塞及空氣緩衝筒。溫度變化之影響於發電機調整器及燈路調整器之電壓圈者，則用零溫度係數之電阻體以補償之。

當列車速度高過「拾起」值時，則用自動電鑰 K 以連接發電機與蓄電池組，其作用與以上所述者相似。故若發電機電壓與蓄電池電壓相等，則分聯圈吸起旋轉於尖軸上之電磁鐵銜，因而引起串聯圈之作用，以助分聯圈緊吸電鑰。反之，若發電機電壓降低，而小於蓄電池電壓，則

電鑰之啓開因之而加速。

發電機之四個刷柄，均裝於鋼珠軸承之搖移環上，此環可於兩停止點之間，自由旋轉九十度。當此機器向一方面移動時，則電刷對於整流器之摩擦力，即使此搖移環緊靠一停止點，於是此刷乃位於無火花整流之適當地位。過後若轉動之方向相反，則又將搖移環旋轉九十度，而使緊靠於另一停止點。故其結果，無論此發電機轉動之方向若何，均可以保存其原來之極性而不變。

第 392 圖示另一電制，其中包含有一電燈調整器及一發電機磁場調整器 F 。當發電機之速度及電壓達至一定之數量時，則自動電鑰 K 即因電壓圈之吸力而關閉，而蓄電池即與發電機相通連。其經過調整器



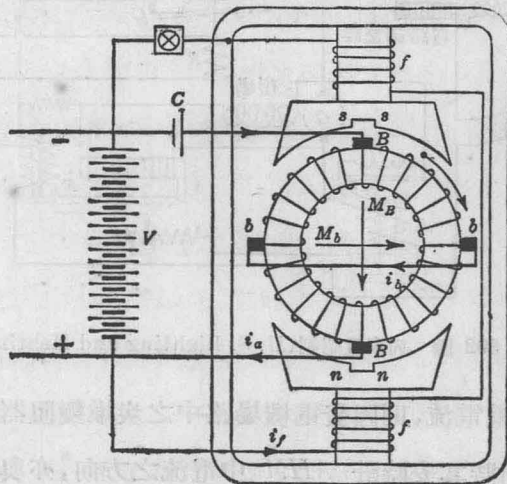
第 392 圖 列車電燈制(U. S. Lighting and Heating Co.)

F 串聯圈之充電電流，則因發電機場路中之炭堆變阻器之作用，而竭力保持其恆值。同時其安時計 AHM 中電流之方向，亦與充電電流相同。及蓄電池充電，且接觸針 N 亦達於其接觸點，電阻 R 即被短接。至是電鑰 S 亦被其作用，接觸 C 自然關閉，因此電流調整器 F 之分聯圈

中，即有電流流過。分聯圈與串聯圈之拉力既相加，發電機之電壓驟減，而蓄電池乃「浮」(float)於線路上。換言之，此時發電機直接供給負載電流，而蓄電池則既不充電，又不放電。

11-16. 利用電樞反作用之調整法 利用有載情形時之電樞反作用，以爲發電機電壓之調整法者，可援盧森堡 (Rosenberg) 列車電燈發電機(第 11-17 節)及第三刷式之汽車電燈發電機(第 11-20 節)以爲例。此類之調整法既皆憑藉於發電機之內有特性，故可納入電磁調整法中。

11-17. 盧森堡列車電燈發電機 盧森堡發電機，最初發表於 1905^①，其構造至奇巧，其運用亦至便利，故極適宜於列車電燈之用。此機最顯著之性質有二：(1)其所發生電勢之方向，不依轉動之方向而變更；



第 393 圖 盧森堡列車電燈發電機

① Electrotechnische Zeitschrift, p. 393 (1905).

(2) 在某種速度以上，其所發生電流之數量，不依車速之增加而變換。第 893 圖即係表示此種兩極機之連接法。此圖若加以相當之增減，其原理亦可適用於多極機。圖中 V 為蓄電池組，若欲發電機工作適宜，此蓄電池組必須與發電機並用。當列車停止時，則 V 單獨供給電燈之電流，同時分激場捲 ff 亦受其電流而發生磁極 nm, ss 。電刷 BB 之整流軸係與磁極軸成一線，不似平常電機之二軸互成直角。

BB 二刷係經過一鋁電池 C 而連接於蓄電池之兩端，此鋁電池具有極大電阻，以限制蓄電池之電流流入電樞，同時若電流反向，電樞之電流流入蓄電池時，則此阻力極小。故在列車停止時，或在列車之速度尚未足以使發電機「拾起」負載時，此種鋁電池之特性，可以防止蓄電池放電至電樞。在主要電刷以外，此機更有一對短接輔助刷 bb ，與磁極軸恰成直角。此輔助刷之位置，正與平常發電機主要電刷之位置相同。

電樞經過 ff 所激起之磁場而轉動，可以發生一電流沿 bb 軸而流行於短路之電樞中，此電流之經過，遂造成一極強之交叉磁場 M_b ，而 M_b 之磁力線復行經低磁阻之極靴。如圖中所示，極為明顯。設電樞正轉（即順時針向），則交磁場為自左至右，故電樞導線在此交磁場中轉動時，即沿 BB 軸發生電勢與電流，而電樞磁勢 M_B 之方向，適與場捲 ff 所生磁激之方向相反。反之，若將電樞反轉，（即反時針向），則交磁場 M_B 之方向亦反；二者同時反向，故原有 BB 刷之極性，仍保持不變。此處有堪注意者，即電樞之磁勢 M_B 與場捲之磁激相反，故知與 BB 軸並行之磁流極小，因而經過短路 bb 之電流，亦不致過大。

此機與平常發電機迥異，蓋此機主要磁場反不若交磁場之重要。

BB 軸之磁場既弱，整流之困難可免，否則在極面下之線捲單位，必常因短接而呈此種困難。若用上述裝置，而仍有整流之困難，則可於主要電刷相對處之極面，刻以凹槽。

由此可見，此機實具有一定之限制，若過此限制，則電刷 BB 所發生之主要電流，不能繼續增加。此限制之條件即電樞之磁勢 M_B 適與 ff 所生之場激互相抵消。蓋在此種情形時， bb 軸毫無電勢及電流，故主要刷軸亦並無電勢。以此推測，故可知在某種速度以上時，此機所發生之電流，實際必永遠保持一常數。欲調準電流至任何所需之限制值，則可利用磁場周路 ff 中之變阻器。至於發電機之發動，則可由車軸用皮帶拖動，或將電樞直接裝於車軸上。

根據此機物理現象之定性研究，庫爾門 (Kuhlman) 與哈內門 (Hahneman) 二氏曾發表一論文，^① 討論此發電機速度與電流之定量關係，茲節錄之如下：

設 n = 電樞之每分轉數(轉/分)

i_f = 場捲 ff 之恆激電流

i_a = 主要電流輸出量

i_b = 沿 bb 軸之短路電流

$n_f i_f$ = 場捲 ff 所生之安匝數

$n_a i_a$ = 沿 BB 軸之有效電樞安匝數

$n_b i_b$ = 沿 bb 軸之有效電樞安匝數

V = 線端電壓假設為常數

① Elektrotechnische Zeitschrift, Vol. 26, p. 525 (1905).

E_b = 短接 bb 所發生之電勢

Φ_B = 沿 BB 軸之場磁流

Φ_b = 沿 bb 軸之場磁流

r_a = 電樞電阻 (電刷在內)

設磁路之飽和性，可忽略不顧，則磁流之量與磁勢成正比例，故下列諸式均可成立。

$$E_b = c_1 \Phi_B n \quad (1)$$

$$i_b = \frac{E_b}{r_a} = \frac{c_1}{r_a} \Phi_B n \quad (2)$$

$$\Phi_B = c_2 (n_f i_f - n_a i_a) \quad (3)$$

$$\Phi_b = c_3 n_b i_b \quad (4)$$

$$V = c_1 \Phi_b n - i_a r_a \quad (5)$$

將 (2) (3) 二式代入 (4) 式，則得

$$\Phi_b = c_1 c_2 c_3 \frac{n_b}{r_a} (n_f i_f - n_a i_a) n \quad (6)$$

再將此式所得 Φ_b 之值代入 (5) 式，則得

$$V = c_1^2 c_2 c_3 \frac{n_b}{r_a} (n_f i_f - n_a i_a) n^2 - i_a r_a \quad (7)$$

及

$$i_a = \frac{c_4 n_f i_f n^2 - V}{r_a + c_4 n_a n^2} = \frac{\frac{n_f i_f}{n_a} - \frac{V}{c_4 n_a} \cdot \frac{1}{n^2}}{1 + \frac{r_a}{c_4 n_a} \frac{1}{n^2}} \quad (8)$$

其中

$$c_4 = c_1^2 c_2 c_3 \frac{n_b}{r_a}$$

由 (8) 式即可得下列諸結論：

(a) 若 $n=0$

$$i_a = -\frac{V}{r_a}$$

由此可知，若無鋁電池 C ，則電樞停止時，線路上（或蓄電池）必將成爲短接，而 i_a 之負號，即表明將有一電流由線路流入電樞。

(b) 若 $n=\infty$ ，

$$(1) \quad i_a = \frac{n f i_f}{n_a} \quad \text{或} \quad n_a i_a = n f i_f$$

由此可知，若速度爲無窮大時，則電樞之磁勢 M_B 恰與場激相抵消。故此種條件，可以決定此機用作發電機時之電流限制量，即 (i_a) 最高值 $= \frac{n f i_f}{n_a}$ 。此結果亦可表示如何可用場路變阻器以控制 i_a ，蓋 (i_a) 最高值，可隨 i_f 之值而轉移。

(c) 若此機用作發電機，則 i_a 必須爲正數；故

$$(2) \quad \frac{n f i_f}{n_a} = (i_a)_{\text{最高值}} \geq \frac{V}{c_4 n_a} \cdot \frac{1}{n^2}$$

或
$$\frac{(i_a)_{\text{最高值}} r_a}{V} \geq \frac{r_a}{c_4 n_a} \cdot \frac{1}{n^2}$$

但 $\frac{(i_a)_{\text{最高值}} r_a}{V}$ 項爲『電樞最大阻落』與『線路電壓』之比值，欲得較高之效率，此比值必甚小，故就比較而觀， $\frac{r_a}{c_4 n_a} \cdot \frac{1}{n^2}$ 之值，必更小於 1，若當速度增加時，則此值且近於零。由此可知，(8) 式之分母，可直視爲 1（此錯誤甚小），而 i_a 之值，遂變爲

$$i_a = (i_a)_{\text{最高值}} - \frac{V}{c_4 n_a} \cdot \frac{1}{n^2} \quad (9)$$

由(8)(9)二式可知若

$$n = n_0 \sqrt{\frac{V}{c_4 n_a (i_a)_{\text{最高值}}}} = \sqrt{\frac{V}{c_4 n_f i_f}} \quad (10)$$

則電流等於零，若當速度增加時，則電流亦必驟增，而至漸近 $(i_a)_{\text{最高值}}$ 為止。

茲舉一例以明之：假設此發電機之端電壓為 50 伏，其所供給之最大電流為 50 安，而其開始「拾起」負載之速度為 300 轉/分，則從(10)式得

$$300 = \sqrt{\frac{50}{c_4 n_a 50}}$$

$$c_4 n_a = \frac{1}{90,000}$$

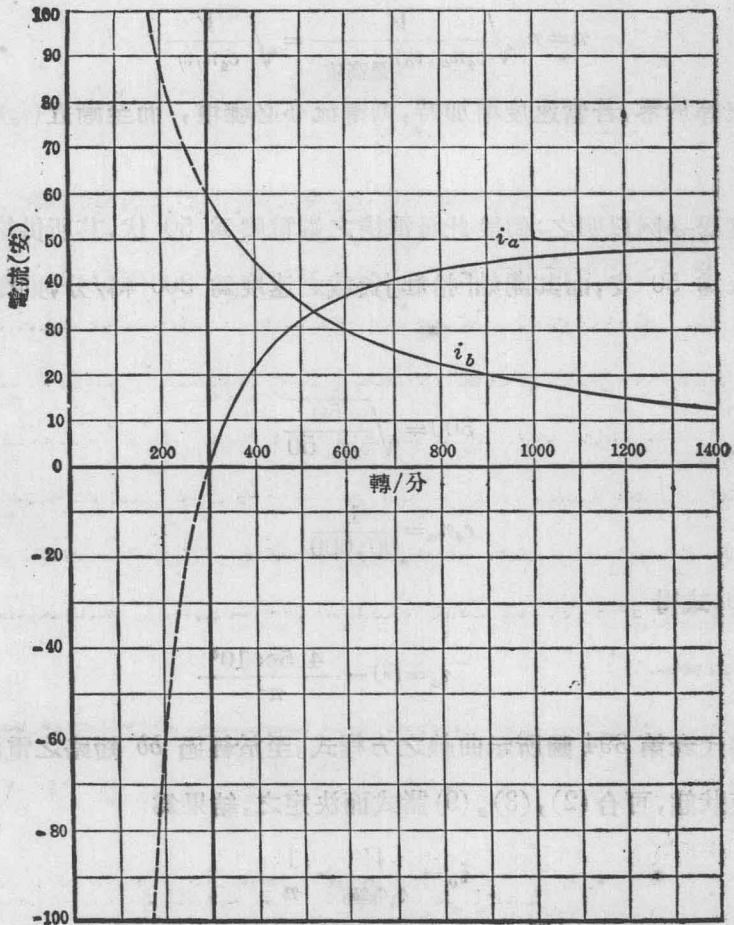
再從(9)式得

$$i_a = 50 - \frac{4.5 \times 10^6}{n^2}$$

此式即代表第 394 圖所示曲線之方程式。至於經過 bb 短路之電流 i_b ，其變更狀態，可合(2)，(3)，(9)諸式而決定之，結果為

$$i_b = \frac{V}{c_1 c_3 n_b} \cdot \frac{1}{n} \quad (11)$$

此式所代表者，乃為等邊雙曲線。由此可見 i_b 為 c_3 之函數，而 c_3 乃依交磁場 Φ_b 之磁阻以為斷。圖 394 所示之 i_b 曲線係根據下述之假定： $n=300$ 時， $i_b=60$ ；或 $i_b = \frac{18,000}{n}$ 。曲線中之虛線部分，係由(9)，(11)二式算出，相當於 i_a 之負值（表示電動機作用）。在 n 值甚小時，式中含有 r_a 之各項並未計入，故結果未能完全準確。但在圖中所示之



第 394 圖 盧森堡發電機電流與速度之關係

範圍以內，其與真正曲線之相差甚小。

試就第 393 圖考察在樞捲四象限之中，電流 i_a 與 i_b 之方向在二象限相同，而在其他之二象限相反。若 i_a 與 i_b 同方向，則總電流為

$$i_a + i_b = (i_a)_{\text{最高值}} - \frac{V}{c_4 n_a} \cdot \frac{1}{n^2} + \frac{V}{c_1 c_3 n_b} \cdot \frac{1}{n}$$

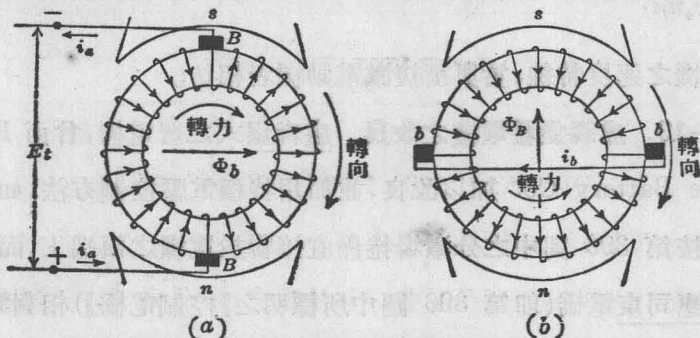
此值最大時之條件為：

$$\frac{d}{dn} (i_a + i_b) = \frac{2V}{c_4 n_a n^3} - \frac{V}{c_1 c_3 n_b} \cdot \frac{1}{n^2} = 0$$

或即 $n = \frac{2c_1 c_3 n_b}{c_4 n_a}$ 。代入以上所用各值，則得相當於最大電流時之速度為 500 轉/分，而電流之值為 $i_a = 32, i_b = 36$ 。

11-18. 盧森堡電機作為電動機之運用法 盧森堡電機若由外源供給電流時，即可用作電動機，但在靜止時並無轉力。此機不生起動轉力之原因，由圖 393 所示，至為明晰，蓋樞流之軸，與 ff 所生之磁流軸恰為同一方向，故彼此不能互相反應。且在靜止時，機中亦無交磁場以反應樞流。今欲使之發動，勢必先使電樞在 Φ_B 中轉動，俾於 bb 軸發生電流及磁流於 bb 軸。但若此電樞之起動為何方向，則以後即依此方向繼續轉動。

第 395 圖所示之機器，與前第 393 圖者相同，惟彼則供給線路以電流，此則取給電流於線路。起動衝量，假定為順時針向。圖中所示機件，



第 395 圖 盧森堡電動機電流與磁流的關係

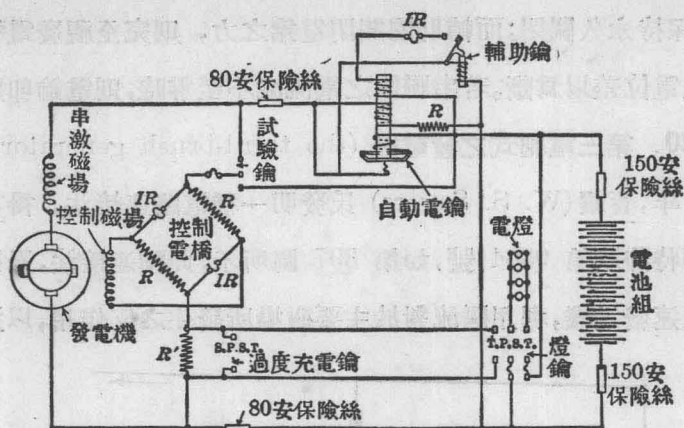
凡分兩部，以便明晰指出兩對電刷之作用。在(a)圖中電樞上導體之箭頭，係代表電流 i_a 之方向，而在(b)圖中則係代 i_b 之方向。起動衝量既為順時針向， i_b 之方向即可由弗來明氏右手定則定之。若起動之旋轉為反時針向，則 i_b 與 Φ_b 之方向，均必與圖中相反。但無論在何種情形， Φ_b 與 i_a 中之反應，均足以發生一轉力，與原來轉動之方向相同，故能使電樞加速轉動。惟同時 Φ_B 與 i_b 間之反應，則與原來轉動之方向相反。此二相反轉力之差，始為真正之有效轉力。

分析言之，若此電動機電源之電位不變，其特性均可以前節所討論之各種方程式包括之。所不同者，僅須將 i_a 代以負值，以表示電流流入電動機耳。惟應用(9)(11)二式務須注意，(在低速度時尤應注意)，蓋(8)式中原有之 r_a 一項，前曾略去，至此則不復能忽略也。今設仍用以前各常數之值，則相當於 10% 之最大電樞阻落時，其 $r_a = 0.1$ 歐；當機械靜止時，由(9)式算出之電流為 $i_a = -\infty$ ，而從(8)式所得真正之值則為 $i_a = -500$ 。此種電動機作用時速度變化之範圍，為自 $n=0$ 至

$n = \sqrt{\frac{V}{c_a n p i_f}}$ (如 394 圖所示，為 0-300 轉/分)。無須更詳之討論，即

可知此機之速度特線，實與積複激電動機者相仿。

11-19. 盧森堡發電機之改良 盧森堡式之發電機，曾由 Electric Storage Battery Co. 加以改良，並加用特種電壓控制方法，如圖 396 所示。按第 393 圖中之分激場捲係直接聯於電機之兩端上，而在此處則聯於惠司東電橋(即第 396 圖中所標明之『控制電橋』)相對點之間。此外更有一補償線捲，標名曰『串激磁場』，用以抵消主要電流所發生之



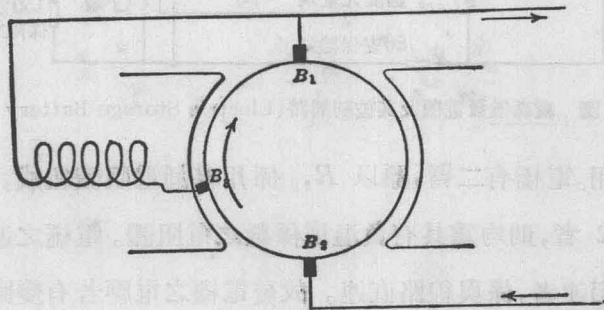
第 396 圖 盧森堡發電機及其控制周路 (Electric Storage Battery Co. 制)

電樞反作用。電橋有二臂，標以 R ，係用普通電阻體組成，而其他二臂之標以 IR 者，則均為具有負溫度係數之電阻體。電橋之連接點，不與控制磁場相連者，係與線路直連。故發電機之電壓若有變動，則控制磁場兩端之電位差，亦因以更動，結果場磁電流亦必改變，以求恢復原來之發電機電壓。今若欲使蓄電池過分充電，可預先將燈路拆斷，然後再將短接於電阻 R' 上之過充電鑰啓開。此種作用，可立即減小外加於電橋上之電壓，猶之發電機本身之電壓減低。故若重新調準電橋之電流，則場激增加，而端電壓因以升高。此電壓升高之限度，以及充電電流之多寡，均視電阻 R' 之值而決定。當關閉燈路時，三極電鑰即將 R' 短接，因之發電機電壓減小至平常電燈電壓，而免充電時之高電壓損害電燈。由此可知，蓄電池之過分充電工作，必須於日間行之。

自動電鑰除裝有普通分聯圈及串聯圈外，另有一第三圈連接於發電機與蓄電池組之間。此鑰若無輔助圈或串聯圈之力，不能單獨使之

關閉，或保持永久關閉；而輔助圈關閉電鑰之力，則完全視發電機與蓄電池間之電位差以爲斷。若串聯圈之電流減小至零時，則電鑰即將自啓。

11-20. 第三電刷式之發電機 (the third-brush generator) 西曆 1896 年，賽耀 (W. S. Sayers) 氏發明一種電路連接法，得英國政府之專利特許狀第 9364 號，如第 397 圖所示，此種連接法，乃欲使分激式之恆速發電機，利用樞流對於主要磁場所發生之反作用，以造成自



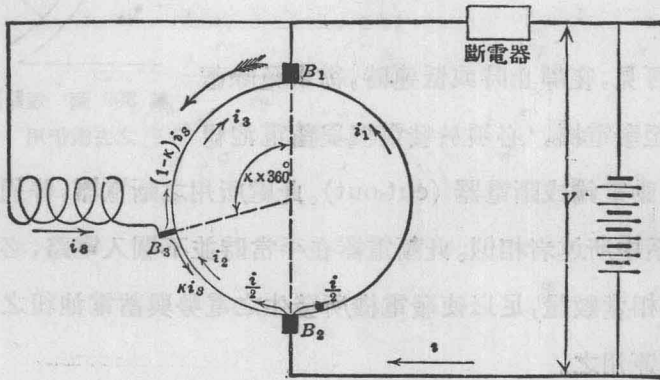
第 397 圖 賽耀氏發電機之連接圖

動的複激作用。此分激場捲與平常接於主要電刷者不同，乃接於輔助刷 B_3 (係位於主要刷 B_1B_2 之間) 與 B_1 之間，而使分激場捲張於極面之後拖部分(如圖所示)。在有載情形時，電樞反作用增加磁流於極面之後拖部分，因此分激場捲兩端間所包括之樞捲，發生較大之電勢，而磁激亦因之加大。

現在汽車中所常用之第三電刷式發電機，即根據賽耀氏發電機之原理，惟有下列不同之點：(1) 分激場捲之兩端，係張於極面之前越半部，(2) 此機既係由汽車引擎直接用齒輪拖動，故必須可以適於變速度之運用。

三刷發電機在專門技術上，具有極高深之意味，故以下各節將於其使用上之自然反應，作一詳確之討論，同時於其特性之研究，亦作一相當之分析。

如圖 398，假設蓄電池組之電壓固定不變，則雖速度加至極大，此連接法亦可自動的限制其電流數量之遞增，蓋在如此情形，當機器在某

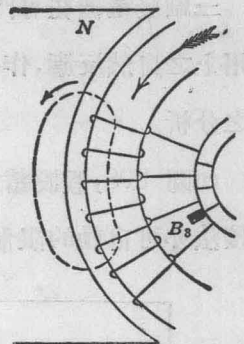


第 398 圖 三刷發電機之連接圖

種特殊之速度時發生電流，若速度增加，則其所發生之電勢及電流，皆將有增加之趨勢；但因樞流增加，則交磁作用亦增，足以移開極尖上之磁流，故 B_1 與 B_3 二刷間所產生之電勢為之銳減，而分捲場激不但不能增加，且因之減弱。此種作用，可因速度之增加，繼續生效，直至主要磁場變成極微弱為止；若過此限度，速度仍繼續增加，則電樞中所增加之電流，反使磁激作過大之銳減，至是非特足以阻止電流之加多，且足使原有之電流降至極小。故由以上觀察，可知此機所產生之電流，在最先係與速度同時並增，迨增至一最高數量時，則仍復逐漸減小。

三刷機中，除主要樞流反作用發生去磁作用外，尚須顧及輔助刷之

影響（如圖 399 所示）。此刷短接極面下之樞捲單位，而其中感生之電勢，即因短接而生極大電流。此電流之方向，恰於極面前越半部之氣隙中發生去磁作用，因以影響及於該部樞捲中之電壓（此部樞捲中之電壓，即為供給分捲場激者）。



第 399 圖 短路圈發生
之去磁作用

由此可見，在靜止時或低速時，欲求免除蓄電池放電至發電機，必須於發電機與蓄電池組間，裝一自動電鑰或斷電器 (cut-out)。此處所用之斷電器，普通與以前列車電矧系中所述者相似。此斷電器在平常時並不關入電路，必待機之速度，達至相當數量，足以使發電機所發生之電勢與蓄電池組之電勢相等時，始可運用之。

根據以上討論，可得結論二：(1) 表示速度與電流之特線，其普通形式，約如第 405 圖所示；(2) 移動輔助刷之結果，可以改變拾起負載點及最大電流點，且電流之最大數量，亦隨之而改。

理論之分析

下列諸記號，將重複應用於此分析中，故為便於參考計，特列表如下：

V = 恆量之線路電壓

E_a = 電樞中所發生之總電勢

i = 線路電流

i_f = 分激場流

n = 速度 (轉/分)

r_s = 分激場捲之電阻

r_a = 主要電刷間所量得之樞阻 (包括刷觸阻在內)

r = 在電刷 B_s 下之短路電阻

n_s = 每對磁極之分激場匝數

Z = 電樞導體數

Φ = 每極之磁流

d = 電樞之直徑

l = 樞心之長度

τ = 極節距

δ = 氣隙之長

ψ = 極弧與極節距之比

p = 磁極數 (假設為 2)

a = 經過電樞並行路之數 (假設為 2)

B_g = 氣隙間之磁流密度

k = 決定電刷 B_s 位置之因數

在未行討論分析之詳情以前，對於着手之方法，計算之次序，及何種減少數學困難之近似假定，應得一普通概念。第一部所須假定者，為不顧磁路之飽和性，換言之，即假定磁流與磁勢係成正比例。由此所得之結果，即為當電樞無電流時，場捲中電流 i_s 所發生之磁流，係與 i_s 成正比；若當電機受載時，則在 i_s 所發生之磁勢內，必須減去因樞流而發生之種種去磁磁勢，此二磁勢之差，乃與每極磁流成正比。故主要電

刷間所發生之有效電勢，即可依平常方法計算之。至於激磁電流 i_s 之大小，則依電刷 B_1 與 B_3 間所發生之電勢而定，而此電勢又依此二刷間樞捲導體所切之淨磁流以爲斷。故最後所欲得之結果，乃爲決定發電機之速度與其線路電流間之關係（此處所謂線路電流，係指流入蓄電池及外周路中之電流），此種關係。應祇包含機器中之種種常數（constants）。

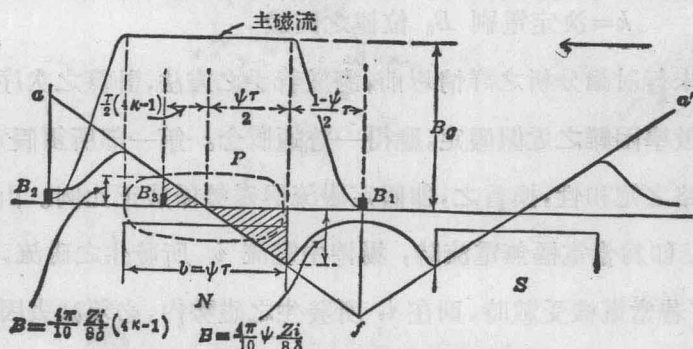
從 398 圖連接法，可知線路電流 i 流入電刷 B_2 後，分爲兩路而至電刷 B_1 ；而分激場流 i_s 流入電刷 B_3 後，亦可分成 ki_s 與 $(1-k)i_s$ 兩部，此兩部之電流，係與兩路之電阻成反比。故由此可得第 398 圖所示之電流 i_1, i_2 及 i_3 之各值如下：

$$i_1 = \frac{1}{2}i + ki_s \quad (12)$$

$$i_2 = \frac{1}{2}i - ki_s \quad (13)$$

$$i_3 = \frac{1}{2}i + (1-k)i_s \quad (14)$$

主要線路電流之流過樞捲後，即發生一交磁磁勢勻佈於樞面，此可



第 400 圖 電流 i 所發生磁勢之勻佈

以第 400 圖中之斜線 afa' 表示之。此磁勢之一部在極面下者，可假定其所發生者為橫磁場，其任何一點之強度，可認為與該點之磁勢成正比；其另一部在兩磁極之間者，則因該部磁路之磁阻較大，磁流遠不能與磁勢成比例，故代表勻佈之曲線，頓成一馬鞍形（參看第四章第 4-12 節）。今若不顧飽和性之影響，則交磁作用所增加於極面後拖半部之磁流，必與前越半部所減少之磁流相等，故此種作用，不能直接影響於主要電刷間所發生之電勢；但在電刷 B_1B_2 之間（換言之，即張於分激場捲兩端之部分），則磁流稍為減弱，此磁流減少之數量，係與第 400 圖中兩斜紋面積之差成正比；至於兩極間磁流之影響，則不復計及。

欲求 B_1B_2 間所減少之磁流數量，可如圖中虛線 P 所示，作一密合磁路。在此虛線圈中，所有極面下之樞導體，均行畫入。此周路中之磁勢總數為 $\frac{4\pi}{10} \psi \frac{Z}{2} \cdot \frac{i}{2}$ 。假定鐵之磁阻與氣隙磁阻相較，可以不計，

則周路中磁勢之半數 $\frac{4\pi}{10} \psi \frac{Zi}{8}$ ，必係耗用於每極尖之氣隙。今設氣隙

之長為 δ 呎，則極尖之磁場強度必為 $\frac{4\pi}{10} \psi \frac{Zi}{8\delta}$ ，而以斜紋大三角形

代表之磁流，必等於平均磁流密度 $\left(\frac{1}{2} \cdot \frac{4\pi}{10} \psi \frac{Zi}{8\delta} \right)$ 與極面半面積

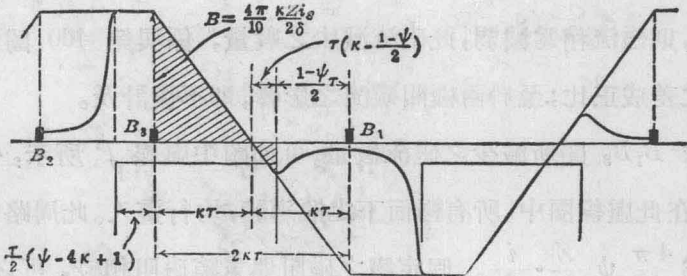
$\left(\frac{\psi \tau l}{2} \right)$ 之相乘積。斜紋小三角形係與大三角形相似，其高度為 $\frac{4\pi}{10} (4k$

$-1) \frac{Zi}{8\delta}$ ，其底闊為 $\frac{\tau}{2} (4k-1)$ ；故知 B_1B_2 間因電流 i 而生之磁流

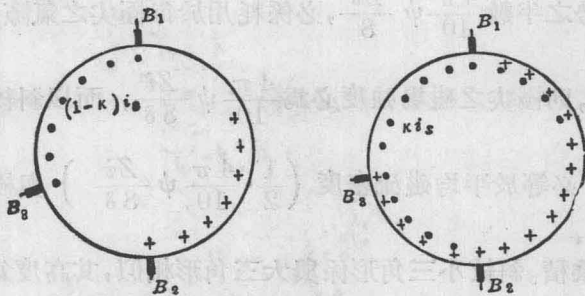
淨減少量為

$$\varphi'_d = \frac{4\pi}{10} \frac{Zi \tau l}{32\delta} \left[\psi^2 - (4k-1)^2 \right] \quad (15)$$

流過 B_1B_2 二刷間 kZ 導體之電流 $(1-k)i_a$ ，發生一磁勢，四周勻佈，此可以第 401 圖中之梯形圖表示之。欲明此理，可參看第 402 圖，蓋樞捲某一部分之任何導體，必在相對象限中，有一回歸導體。如第 402 圖所示，沿途徑 Q 之總共磁勢為 $\frac{4\pi}{10}kZ(1-k)i_a$ ，此磁勢之半數， $\frac{1}{2} \frac{4\pi}{10}kZ(1-k)i_a$ ，乃用以穿過電刷 B_2 相對之氣隙。但分激電流之其餘部分 ki_a ，自電刷 B_2 流至電刷 B_1 ，取道於較遠途徑。而經過



第 401 圖 電流 i_a 所發生磁勢之勻佈



第 402 及 403 圖 激磁電流成分之勻佈

$(1-k)Z$ 導體時，亦發生一相似而較小之磁勢，如第 403 圖所示。然若僅就磁化作用而論，則第一第三兩象限之電流互相抵消，故所須討論者，僅第二第四兩象限，恰與第 402 圖之分佈相同。在此數導體中之電

流既為 ki_s ，故沿途徑 P 之磁勢為 $\frac{4\pi}{10} kZki_s$ (第 402 圖) 此磁勢若加於 402 圖原有之磁勢中，則得沿途徑 P 之總共磁勢為 $\frac{4\pi}{10} kZi_s$ 。在電刷 B_1B_3 之間，電流 i_s 之影響，大體為磁化作用，此磁流之數量，係與第 401 圖中兩斜紋三角形面積之差成正比例。此兩三角形中，大者之高為 $\frac{4\pi}{10} \frac{kZi_s}{2\delta}$ ，而其底為 $k\tau$ ；今小者之底既為 $\tau\left(k - \frac{1-\psi}{2}\right)$ ，故依相似三角形法算出，其高必為 $\frac{4\pi}{10} \frac{Zi_s}{2\delta} \left(k - \frac{1-\psi}{2}\right)$ 。由此得 B_1B_3 間之磁化磁流為

$$\varphi'_m = \frac{4\pi}{10} \frac{Zi_s \tau l}{16\delta} (1-\psi)(\psi+4k-1) \quad (16)$$

故在電刷 B_1B_3 之間，因 i 與 i_s 合併影響而生之磁流淨減量，必為 (15) (16) 二式之差，即

$$\varphi_d = \frac{4\pi}{10} \frac{Z\tau l}{32\delta} \left\{ \left[\psi^2 - (4k-1)^2 \right] i - 2(1-\psi)(\psi+4k-1)i_s \right\} \quad (17)$$

但電刷 B_1B_3 間磁流之真正減少數量，實超過於 (17) 式所述，蓋因在電刷 B_3 下，尚有短路電流之去磁作用。此短路電流 (以 $i_{s.c.}$ 表示之)，流過 $Z/2S$ 匝之短路圈，而發生一磁勢 $\frac{4\pi}{10} \frac{Z}{2S} i_{s.c.}$ ，其勻佈情形，約如第 404 圖所示。圖中 B_1B_3 帶間之去磁磁流，係以雙叉斜紋面積為代表，其值為

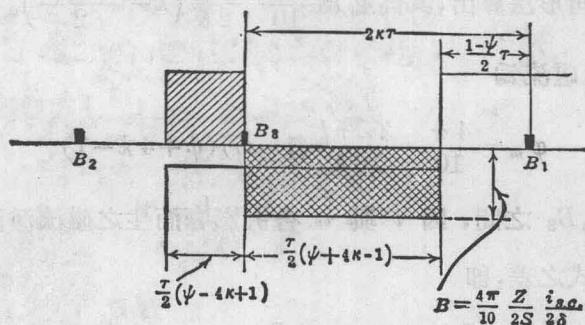
$$\varphi_{s.c.} = \frac{4\pi}{10} \frac{Z}{2S} \frac{\tau l}{4\delta} (\psi+4k-1) i_{s.c.} \quad (18)$$

此處 $i_{s.c.}$ 之值，可定為短路時期之平均電勢 $e_{s.c.}$ 與周路中有效電阻 r

(包括線圈阻及刷觸阻在內)相除之商;即

$$i_{s.c.} = \frac{e_{s.c.}}{r} \quad (19)$$

其中 $e_{s.c.}$ 之值,係從普通公式 $e = Blv \times 10^{-8}$ 算出,而式中 B 為導體移動時所經過之磁流密度。然在此處所討論者,為相對於電刷 B_s 之磁流密度,係由三部分組合而成:其第一部分為主要磁場中之 B_g ; 其第二部分 $\frac{4\pi}{10} \frac{Zi}{8\delta} (4k-1)$,係由 i 所發生之交磁磁場而來,如第 400



第 404 圖 $i_{s.c.}$ 所發生磁勢之勻佈

圖;其第三部分 $\frac{4\pi}{10} \frac{Zki_s}{2\delta}$,則由 i_s 而來,如第 401 圖。總此三部,故得

$$e_{s.c.} = \left[B_g + \frac{4\pi}{10} \frac{Zi}{8\delta} (4k-1) + \frac{4\pi}{10} \frac{kZi_s}{2\delta} \right] l \frac{Z}{S} \frac{\pi dn}{60 \times 10^8} \quad (20)$$

在此式中,因數 $\frac{Z}{S}$ 係代表短路線捲單位中串聯導體之數;而 $\frac{\pi dn}{60}$ 則係代表周圍速度。

假定 $B_g = ci_s$ (c 為常數),則(20)式可變為

$$e_{s.c.} = \frac{2 Z \tau l n}{S \times 60 \times 10^8} \left[\left(c + \frac{4 \pi}{10} \frac{k Z}{2 \delta} \right) i_s + \frac{4 \pi}{10} \frac{Z(4k-1)}{8 \delta} i \right] \quad (21)$$

將(19)及(21)二式，代入(18)式，而以其所得結果加入(17)式，則得 $B_1 B_3$ 二刷間因種種原因而成之總共去磁磁流為

$$\begin{aligned} \Phi_D = & \frac{4 \pi}{10} \frac{Z \tau l}{32 \delta} (\psi + 4k - 1) \left[(\psi - 4k + 1) + \frac{4 \pi}{10} \left(\frac{Z}{S} \right)^2 \frac{\tau l}{\delta r} \frac{4k - 1}{60(10)^8} n \right] i \\ & + \frac{4 \pi}{10} \frac{Z \tau l}{4 \delta} (\psi + 4k - 1) \left[\frac{Z \tau l n}{S^2 r \times 60(10)^8} \left(c + \frac{4 \pi k Z}{10 \times 2 \delta} \right) - \frac{1 - \psi}{4} \right] i_s \end{aligned} \quad (22)$$

在電刷 $B_1 B_3$ 之間，電勢 E_f 之成因，即由於二刷間之主要磁流 ($B_g \psi \tau l$) 與(22)式中所得磁流數之差。此二刷間之主要磁流為

$$\Phi_{B_1 B_3} = \frac{\psi + 4k - 1}{2 \psi} B_g \psi \tau l = \frac{\psi + 4k - 1}{2} c r l i_s \quad (23)$$

在此帶中，截切 $\Phi_{B_1 B_3}$ 以發生電勢 E_f 之導體數，為總共樞導體數之 $2k$ 分之一。假設 φ 為(23)(22)二式之差，則 $B_1 B_3$ 間所發生之電勢，必為 $\frac{2k \varphi Z n}{60(10)^8}$ 。 E_f 既知，故更可得

$$i_s = \frac{E_f - 4 k r_a i_s}{r_s}$$

$$= \frac{E_f - 4 k r_a \left[\frac{i}{2} + (1 - k) i_s \right]}{r_s}$$

或另寫作

$$i_s = \frac{E_f - 2 k r_a i}{R} \quad (24)$$

其中

$$R = r_s + 4 k (1 - k) r_a \quad (25)$$

若更用下述各符號代入，則又可得

$$i_s = i \frac{n(\gamma + \epsilon n) + 2k\tau_a}{n(\alpha - \beta n) - R} \quad (26)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \frac{kZ\delta l}{60(10)^8} (\psi + 4k - 1) \left(c + \frac{4\pi}{10} \frac{Z}{2\delta} \frac{1 - \psi}{4} \right) \\ \beta &= \frac{4\pi}{10} \frac{kZ^2\tau^2 l^2}{[60(10)^8]^2} \frac{\psi + 4k - 1}{2S^2\delta r} \left(c + \frac{4\pi}{10} \frac{kZ}{2\delta} \right) \\ \gamma &= \frac{4\pi}{10} \frac{kZ^2\tau l}{60(10)^8} \frac{\psi^2 - (4k - 1)^2}{16\delta} \\ \epsilon &= \left(\frac{4\pi}{10} \right)^2 \frac{kZ^4\tau^2 l^2}{(60 \times 10^8)^2} \frac{\psi + 4k - 1}{16S^2\delta^2 r} (4k - 1) \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

主要電刷 $B_1 B_2$ 間所發生之電勢 E_a ，係完全依每極之總磁流 Φ 而定；此磁流之量，可認為下列二數之代數和：一即場激所生之磁流 $B_0 \psi \tau l = c \psi \tau l i_s$ ，一即樞流所生之磁流（其中有正有負）。試觀第 400 圖，可知主要線路電流 i 對於全部磁流，僅發生一交磁作用，若不計磁路之飽和性，則其去磁作用，儘可不計。但從第 401 圖，則知 i_s 發生之磁化作用，可分兩部：一部為 (16) 式中之 φ'_m ；一部為 B_3 左面長方形所代表之外加磁流 $\frac{4\pi}{10} \frac{kZi_s \tau l}{2\delta} \frac{\psi - 4k + 1}{2}$ 。此二部分磁流之和為

$$\varphi_m'' = \frac{4\pi}{10} \frac{Zi_s \tau l}{4\delta} \left[\frac{1 - \psi}{4} (\psi + 4k - 1) + k(\psi - 4k + 1) \right] \quad (28)$$

同理，若更參看第 404 圖，則短路圈中亦發生一去磁磁流 φ_a'' ，可以圖中兩斜紋長方形之差表示之，即

$$\varphi_a'' = \frac{4\pi}{10} \frac{Z\tau li_{s.c.}}{4S\delta} (4k - 1) \quad (29)$$

由上各式，故知每極之有效磁流淨數為

$$\Phi = c\psi r l i_s + \varphi_m'' - \varphi_s'' \quad (30)$$

而

$$\begin{aligned} E_a &= \frac{\Phi Z n}{60 \times 10^8} \\ &= V + 2 r_a i_1 \\ &= V + i r_a + 2 k r_a i_s \end{aligned} \quad (31)$$

將(28)，(29)，及(30)三式代入(31)式，並將各項併合之，則得

$$\begin{aligned} E_a &= \zeta i_s n - \eta i_s n^2 - \lambda i n^2 \\ &= V + i r_a + 2 k r_a i_s \end{aligned} \quad (32)$$

式中

$$\left. \begin{aligned} \zeta &= \frac{Z \tau l}{60(10^8)^2} \left\{ c\psi + \frac{4\pi}{10} \frac{Z}{4\delta} \left[\frac{1-\psi}{4} (\psi + 4k - 1) + k(\psi - 4k + 1) \right] \right\} \\ \eta &= \frac{4\pi}{10} \frac{Z^3 \tau^2 l^2}{(60 \times 10^8)^2} \frac{4k-1}{2S^2 \delta r} \left(c + \frac{4\pi}{10} \frac{kZ}{2\delta} \right) \\ \lambda &= \left(\frac{4\pi}{10} \right)^2 \frac{Z^4 \tau^2 l^2}{(60 \times 10^8)^2} \frac{(4k-1)^2}{16 S^2 \delta^2 r} \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

更將(26)式中 i_s 之值代入(32)式，則得

$$i = V \frac{-\beta n^2 + \alpha n - R}{n^2(\beta\lambda - \epsilon\eta) - n^3(\alpha\lambda + \gamma\eta - \epsilon\zeta) + n^2[\gamma\zeta + \beta r_a + \lambda R - 2k r_a(\eta + \epsilon)] + n[2k r_a(\zeta - \gamma) - r_a \alpha] + R r_a - 4k^2 r_a^2} \quad (34)$$

公式(34)中，僅含有線路電流及速度二數量，其他則均為此機器之常數，故此公式即所需之方程式，代表此線路電流及速度之關係。

以上對於數式之導出已完，茲更進而分析此式，以求表顯其真正物理的意義。

從第一步觀察，設將(27)及(33)式之關係，代入(34)式 n 之係數中，則 n 之四次項消滅，蓋 $(\beta\lambda - \epsilon\eta)$ 之值，顯然為零。今若設

$$y_n = -\beta n^2 + \alpha n - R \quad (35)$$

及
$$y_d = -(\alpha\lambda + \gamma\eta - \epsilon\zeta)n^3 + [\gamma\zeta + \beta r_a + \lambda R - 2kr_a(\eta + \epsilon)]n^2 + [2kr_a(\zeta - \gamma) - r_a\alpha]n + r_a(R - 4k^2r_a) \quad (36)$$

則(34)式可寫為

$$i = V \frac{y_n}{y_d}$$

故欲研究 i 及 n 間變化之關係，可先決定(35)(36)二式之曲線，然後將此二曲線之縱坐標互除，而以其結果乘以 V 即得。

茲先取(35)式論之。如圖 405 曲線 y_n 所示，此式顯然為一拋物線。當速度為零($n=0$)時， y_n 之值為

$$(y_n)_{n=0} = -R \quad (37)$$

故知此拋物線，與縱坐標軸相交之點，係在原點下 R 距離處。若當 $-\beta n^2 + \alpha n - R = 0$ ，即

$$n = \frac{\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - 4R\beta}}{2\beta} \quad (38)$$

時，則 y_n 之值為零。故當 $\alpha^2 > 4R\beta$ 時，此式之二根，均為正實數，而拋物線交於 n 軸上之兩點，皆在原點之右；其中之一速度為

$$n_1 = \frac{\alpha - \sqrt{\alpha^2 - 4R\beta}}{2\beta} \quad (39)$$

其他則為

$$n_2 = \frac{\alpha + \sqrt{\alpha^2 - 4R\beta}}{2\beta} \quad (40)$$

若更將(27)式中 α 與 β 之值代入，則可知 $\alpha^2 > 4R\beta$ 之必須條件為

$$r > \frac{8\pi}{10} \frac{ZR}{kS^2\delta} \frac{1}{\psi + 4k - 1} \frac{c + \frac{4\pi}{10} \frac{kZ}{2\delta}}{\left(c + \frac{4\pi}{10} \frac{kZ}{2\delta} \frac{1-\psi}{4}\right)^2} \quad (41)$$

依同一方法，可以分析(36)中之 y_a 。在此式中，當 $n=0$ 時，

$$(y_a)_{n=0} = r_a(R - 4k^2r_a) \quad (42)$$

此數永遠為一正數，故代表(36)式之三次式曲線與縱坐標軸相交之點，係在原點以上 $r_a(R - 4k^2r_a)$ 距離處。更進而論，則 y_a 之函數，又可寫為

$$y_a = -An^3 + Bn^2 + Cn + D \quad (43)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} A &= a\lambda + \gamma\eta - \epsilon\zeta \\ B &= \gamma\zeta + \beta r_a + \lambda R - 2kr_a(\eta + \epsilon) \\ C &= 2kr_a(\zeta - \gamma) - r_a a \\ D &= r_a(R - 4k^2r_a) \end{aligned} \right\} \quad (44)$$

如欲發電機運用適當，代表(43)式曲線之各點，在 n_1 及 n_2 之間者，必須在 n 軸之上；換言之，即在此二速度之間， $y_a=0$ 之函數不當有實根。試使(43)式等於零，而兩邊同除以 A ，則

$$n^3 - \frac{B}{A}n^2 - \frac{C}{A}n - \frac{D}{A} = 0$$

此處若將

$$n = n' + \frac{B}{3A} \quad (45)$$

之值代入，則 n^2 之項消去，而結果方程式變為

$$(n')^3 - n' \left(\frac{C}{A} + \frac{B^2}{3A^2} \right) - \frac{2}{27} \frac{B^3}{A^3} - \frac{BC}{A^2} - \frac{D}{A} = 0 \quad (46)$$

如能滿足下列之條件，此方程式即無實根。此條件為：

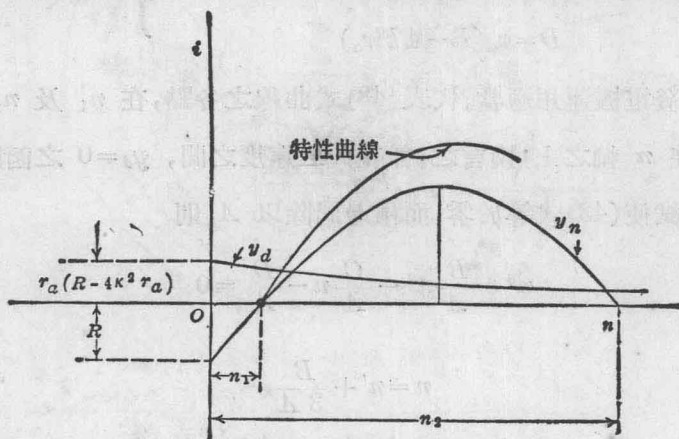
$$\frac{1}{27} \left(\frac{C}{A} + \frac{B^2}{3A^2} \right)^3 < \frac{1}{4} \left(\frac{2}{27} \frac{B^3}{A^3} + \frac{BC}{A^2} + \frac{D}{A} \right)^2 \quad (47)$$

上式又可化爲

$$A^3 C^3 < \frac{23}{108} A^2 B^2 C^2 + \frac{2}{81} AB^4 C + A^2 D \left(\frac{1}{4} A^2 D + \frac{1}{27} B^3 + \frac{1}{2} ABC \right) \quad (48)$$

式中若各將 A, B, C, D 之值代入，則可得一極複雜之方程式。但為簡單計，此亦可以近似式代表之：其法係假定若當電刷 B_0 係在兩主要刷之正中時（通常確係如此），則因數 k 約等於 $\frac{1}{4}$ ，而包含 $(4k-1)$ 之各項，均近於零。更復援引(27)(33)(44)諸式，即可知在此情形時， A 之係數近於零，而 B 與 C 則均為正數。故(48)式所代表之情形，確可適合，而三次曲線在第一象限中之一段，確位於 n 軸之上。

由以上之觀察，可知表示 i 與 n 關係特線之普通形式，係與第 405

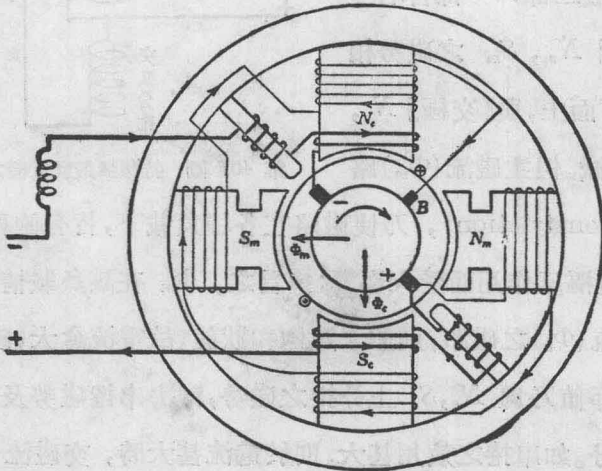


第 405 圖 三刷發電機之特性曲線

圖相似。此曲線與 n 軸相交處凡有兩點：一點與原點相近而相當於拾載 (pick-up) 點，蓋在此點時，發電機即開始放電，以充蓄電池；另一點則遠在原點之右，在此點時之速度，常超過普通運用速度甚巨。

試更觀(34)式，即可知充電電流，係與蓄電池組電壓 V 成正比例。此蓄電池電壓，係假定不變。但就事實言，則電壓 V 之值，前已默認為與發電機之端電壓相等，故後者之電壓，所超過於蓄電池者，僅為其間之導線阻落。今若蓄電池組之電壓不變，而導線電阻或有增加，則充電電流，亦必因之增加。此結論似乎荒誕而不經，然試驗結果已證實其為真確。

11-21. 特種弧鍛發電機^① 圖 406 示特種三刷發電機，其電壓

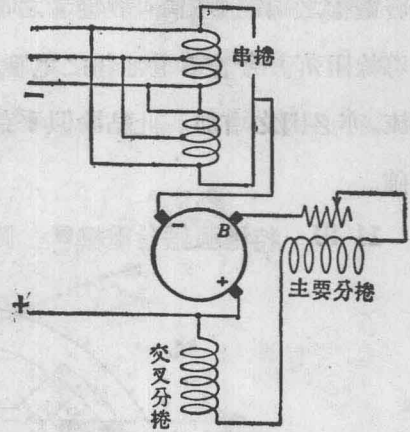


第 406 圖 特種弧鍛發電機

① Bergman, S. R., "A New Type of Arc-welding Generator," G. E. Rev., Vol. 23, No. 5, p. 442, May, 1920.

電流特性線，適合於單人用之弧鍛設備。此機之外表，宛如一四極發電機，而附有二整流極者。如圖所示，各極之極性，乃依 N, N, S, S 之次序，故此機實僅有二極。每極復各分兩半，而樞捲亦應為兩極捲。主要電刷之軸，應相當於南北極之間，而第三刷 B 則在二主刷之間。分捲乃接於正電刷及 B 之間，此可於第 407 詳圖中見之。串捲係僅置於二極上，與分捲在該二極上所生之磁化作用適相反。

假定電樞順時針向而轉，則圖 406 中電樞磁勢之方向，乃沿主刷相連之 45° 度線自十至一。此磁勢可分成二部：一部自右至左，與『主極』 N_m, S_m 之磁勢相加；一部自下而上，與『交極』 N_c, S_c 之磁勢相減。但主磁流 (Φ_m) 路



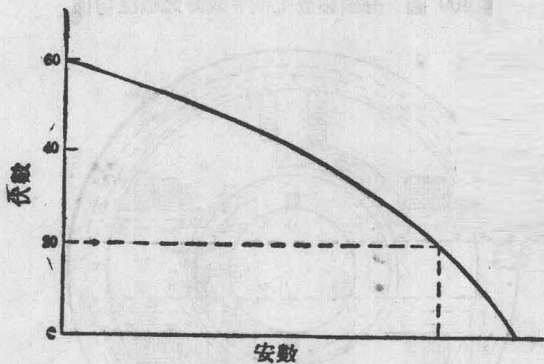
第 407 圖 特種弧鍛發電機之連接圖

徑之緊縮 (constriction)，乃使磁路在各種負載下，皆有飽和現象，故 Φ_m 並不因電樞反作用而受大影響；換言之， Φ_m 在該負載情形下大致不變。交磁流 (Φ_c) 之磁路，則並未達飽和狀態，故電流愈大，磁流反少；蓋交磁流之淨值乃為 N_c, S_c 上分捲之磁勢，減去串捲磁勢及電樞反作用之交叉部分。如串捲之效用甚大，則於電流甚大時，交磁流 Φ_c 或將致於反向。

圖中之分激場捲，並聯於截切主磁流 Φ_m 之一部分樞捲， Φ_m 既大致不變，正電刷與 B 刷間樞捲所生之電勢亦不變，故分激場捲所得乃

爲恆電壓。但負電刷與 B 刷間樞捲之電勢，則依 Φ 。而減； Φ 。如反向，電勢之方向亦隨之而反。故主刷間之電壓，乃由二部分組成，一部分不變，一部分隨電流而變，電流增加，電勢反減。試舉一實例，如零載時兩部分電勢皆爲 30 伏，則端電壓爲 60 伏。如載流增至 200 安，負刷與 B 刷間之電勢反向爲 -10 伏，則端電壓變爲 $30 - 10 = 20$ 伏，而此電壓適足以維持電鍛時所需之弧。

圖 407 所示之串捲，附有許多接觸點或搭頭(tap)。如此弧鍛電流，可以調準至任意值。圖 408 示此機之電壓電流特性線，此外所與普通

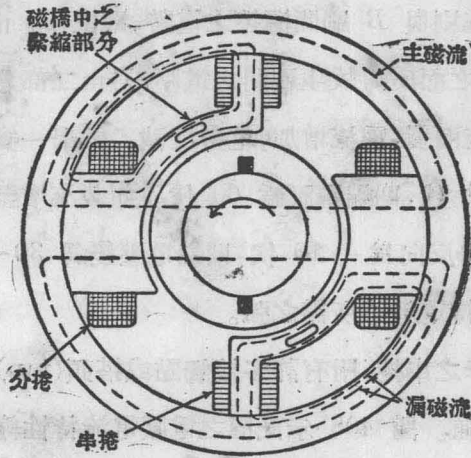


第 408 圖 弧鍛發電機之伏安特性線

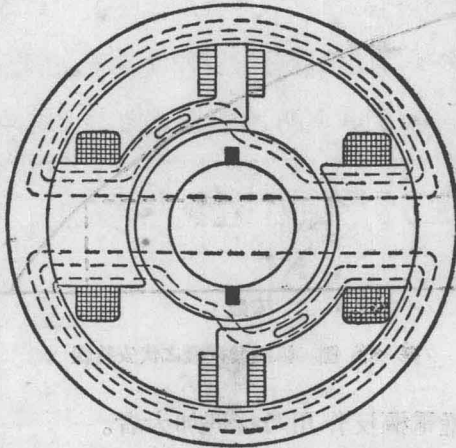
分激發電機相同，惟電樞反作用乃特別加大者。

11-22. 分磁極發電機^① 此種發電機係 The Electric Products Co. 所設計製造，乃爲電話局及電廠中充蓄電池之用。如圖 409 及 410 所示，極片之構造乃包含一主極及一副極(secondary pole)或分

① Smith, E. D., "The Diverter-pole Generator," J. A. I. E. E., p. 11, January, 1929.



第 409 圖 分磁極發電機零載時之磁流勻佈



第 410 圖 分磁極發電機滿載時之磁流勻佈

磁極 (diverter pole)，此副極之功用；乃與整流極相同。主極由分捲激磁，整流極部分則由串捲激磁。

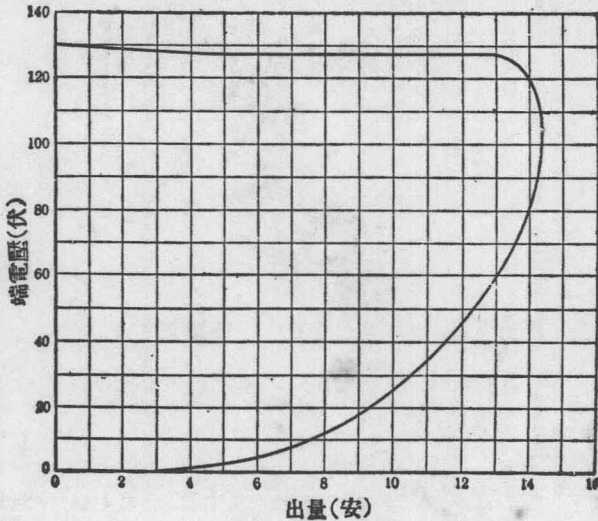
從圖 409 可知零載時分激場捲所生磁流之一部，由電樞分去，而經分磁極以完成周路。負載增加時，分磁極之串激反使磁流漸還於電樞，

因此電勢增加，足以補償(1)發電機之阻落及(2)拖動電動機之速度變化。而同時可供給一整流磁場。

主極及分磁極間之磁橋 (magnetic bridge) 有一緊縮部分 (constricted section)，其功用為(1)限制主極之磁漏(2)控制由分磁極內面流進電樞之磁流。

設計主極與軛時，如使其磁流密度不高而遠低於飽和值，則分磁極之磁流變化，對於維持主磁流之磁激無大影響。分磁極之磁流密度，除緊縮部分外，亦不甚高，故整個機器在磁化曲線之直線部分運用，而發電機特線中各種彎曲部分自亦隨之而消失。

在普通發電機中，串激之效應乃使磁流隨載流而增加，而此機則適相反。蓋磁化曲線之彎曲反映於發電機特性線者，在此適得相反之影響，故其伏—安曲線為下凹而非上凸。今設於蓄電池充電時，蓄電池倒充發



第 411 圖 $1\frac{1}{2}$ 瓦, 130 伏分磁極發電機之特線

電機，使成電動機，則此機並無加快或反極性之趨向。其原因如下：磁橋之緊縮部分，既足以阻止串激反向時分去更多之漏磁，主磁流大致不變。故分磁極如有對於主極反極性之趨向，早已可為分磁極之飽和作用所阻遏。

發電機之電流出量增加時，可達一運用點，此處分磁極之串激安匝數與主極之分激安匝數相同。在此點時所有主極之漏磁，皆將分還電樞，故無餘磁以維持端電壓。由此點以往，即電流增加極微，分磁極之磁流亦將消失，因此端電壓減少而主磁流亦減。此數種反應之聯合作用，乃使伏安特線得一清楚或尖銳之截止點(cut-off)，如圖 411 所示。

