

萬有文庫

第一集一千種

王雲五主編

交流電機

尤佳章著

商務印書館發行





交 流 電 機

尤 佳 章 著

工 學 小 叢 書

編主五雲王

# 交 流 電 機

著 章 佳 尤

號一〇五路山寶海上			
五	雲	王	人 行 發
路 山 寶 海 上			
館 書 印 務 商			所 刷 印
埠 各 及 海 上			
館 書 印 務 商			所 行 發

版 初 月 十 年 九 十 國 民 華 中

究 必 印 翻 權 作 者 有 書 此

---

The Complete Library  
Edited by  
Y. W. WONG

---

ALTERNATING-CURRENT MACHINERY  
BY YOU CHIA CHANG  
PUBLISHED BY Y. W. WONG

THE COMMERCIAL PRESS, LTD.  
Shanghai, China  
1930  
All Rights Reserved

# 交流電機

## 目錄

第一章	基本概念及定律	一
第一節	交流與直流之區別	一
第二節	波狀及周波率	四
第三節	平均值及有效值	七
第四節	表圖	九
第二章	交流電路	一五
第一節	連列電路	一五
第二節	並列電路	二三

第三節	電路解法	二六
第四節	共振	三九
第五節	三叉連接	四二
第六節	三角連接	四四
第三章	工率與工率因數	四六
第一節	有效工率	四六
第二節	反應工率	四七
第三節	工率因數	四八
第四節	工率計算法	五一
第四章	變壓器	五八
第一節	效用及原理	五八
第二節	構造	六〇

第三節	減熱法	六四
第四節	耗損效率及定額	六七
第五節	自變壓器	七〇
第六節	定流變壓器	七二
第七節	多相變壓器	七四
第八節	特種變壓器	七六
第五章	感應電動機	七九
第一節	構造大要	七九
第二節	旋轉磁場	八〇
第三節	旋轉器	八三
第四節	旋力及速度	八六
第五節	特性	八八

第六節 變速法……………九〇

第七節 單相感應電動機……………九二

第八節 感應發電機……………九四

第六章 交流發電機……………九六

第一節 構造大要……………九六

第二節 磁場……………九八

第三節 發電子……………九九

第四節 發電子反應……………一〇一

第五節 定額耗損及效率……………一〇三

第六節 並列運用與分工……………一〇五

第七章 同期電動機……………一一〇

第一節 概論……………一一〇

第二節	設喻·····	一一二
第三節	起動特性·····	一一四
第四節	運用特性·····	一一七
第五節	同期機之功用·····	一二〇
第六節	追逐作用·····	一二二
第八章	變流機·····	一二四
第一節	同期變流機·····	一二四
第二節	電動發電機組·····	一二九
第三節	振動整流器·····	一三〇
第四節	水銀整流器·····	一三一
第九章	單相整流電動機·····	一三六
第一節	單相連列電動機·····	一三六



第二節	抗拒電動機·····	一四一
第三節	單相定速電動機·····	一四四
第四節	單相鼠籠電動機·····	一四五

# 交流電機

## 第一章 基本概念及定律

### 第一節 交流與直流之區別

以電之本體而論，初無直流交流之別；其所以有此分別者，由於其行動現象之不同耳。電子之流動，方向不變者，是爲直流，如電瓶、電池、直流發電機所發之電流是已。至若交流，則方向時變，而數量隨之，其循環往復，自成周期。二者各有其特殊之應用，然以言應用之廣，輸送之便，則交流勝於直流。茲就交流之基本概念，列述如左：

(一) 電流 交電流者，方向交變之電流；當其在導綫中流動時，初則趨前，繼則退後，往還流行，

一如鐘擺。其數量之變更，初則零值，次則漸增，達最高值後，則又漸減，返於零值，然後反其方向，漸增至最高值，再由此漸減至零值；如此循環一周，謂之一周波。此項交變之圖解及其算學關係，俱詳下文。

(二)電壓 交電流作上述之交變時，其發生此電流之電壓，亦作同一之變更。其初亦由零值漸增至最高值，次則漸減為負值，與電流之經歷同。惟電流之最高值與電壓之最高值，未必發現於同時，此則讀者所應注意者也。交流之電流與電壓均為變數而非常數，故其相加相減，不能以直流之法為之。設有交電流二，其流行之方向雖同，然其一達最高時，又一未必亦達最高值。二者之交變，或先後參差，或適成相反，亦猶二人同行，速度雖等，而步伐未必一致。故欲加減此二流，必先確知二者在某時點之方向與數值，而後可以直流之法施之。

(三)多相電流 設有數量相等之二交流，其最高值發現於同時，則二者相加，即得一數量倍增之交流。此二交流之最高值所以得同時發現者，乃由於步伐之一致，在電學中稱此步伐為相位 (phase)；凡相位相同之電流，其各時點之數量與方向，均為同等，故可作簡單之加減。在實際上，交

流電機所發之電流，在一種以上者，其相位恆不一致，常有一定之相差，其加減法為幾何的而非算術的。例如交流機發出三種相位不同之電流，則稱為三相電流，此外又有二相四相等之稱，總稱曰多相電流 (polyphase current)。

(四) 工率 在直電流中，工率 (power) 之量等於電壓與電流之乘積；在交電流，則電壓與電流時時變值，故祇能謂為在某時點之電壓與電流之乘積，即係該時點之工率，而不能便以最高值電壓與最高值電流之乘積為其有效之工率。交電流之發熱能力，等於若干直電流者，此直電流之量，稱曰該交流之有效值；蓋以實用效力而論，此變值之交流，猶彼定值之直流也。交電壓之有效值亦然。以有效值之電壓與電流（二者須同相）相乘，即得交流之有效工率。

(五) 電阻 交流電路中亦有電阻 (resistance)，其與電壓及電流之關係，得用直流電中之『歐姆定律』 (Ohm's law) 以計算之，惟須電流與電壓均為同相，方可合用。在純粹電阻之路中，電壓與電流為同相，計算之法一如直流；若二者為異相，則惟與電流同相之一部分電壓，始合乎上述之定律。

(六)電抗 電抗 (reactance) 惟交流電路中有之，蓋抗電之效應，乃由電流變值時之自感應作用而起。感應所生之電壓，常與原有之電壓相反，由是而抵抗電流之進行，與直電流中之電阻相類。然電阻與電抗有一根本上之區別，即電阻之阻止電流，結果則消耗一部分之電能，而發為熱力，若電抗則雖足以減低交流之有效電壓，但實際上並不消耗電能。（即有之，亦非由於電抗，而由於磁遲滯流等效應）。

(七)電阻抗 電阻抗 (impedance) 亦惟交流有之，即電阻與電抗之綜合效應也。按電阻所生之電壓降，係與電流同相，電抗所生之電壓降，則與電流相位差九十度角，故電阻降之數量，等於二者之幾何和而非代數和也。

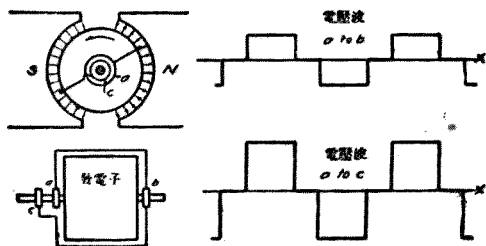
## 第一節 波狀及周波率

直流電機發電子中產生之電流，即係交流；其電磁感應之理，以及說明感應電壓及磁流行動，三方關係之佛來銘定則 (Fleming's rule) 及楞次定律 (Lenz's law) 俱詳拙著直流電機一

書，茲不複述。

交流變值之波狀，視電機中磁場之分配及導線之佈置與行動而異。如導線以均等之速度，行於均勻分配之磁場中，則感應之電壓，必為定值。若磁場每半周反其方向，則電壓亦隨而反向。故如第一圖，導線自 a 至 b 之一段，所感應之電壓成長方形之曲線，蓋即表示電壓之定值，且隨磁流之方向以俱變也。自 b 至 c 之一段導線，以磁流方向與 a b 所處之磁場相反，而其行動方向則與前相同，故其感應電壓之方向與前者相反。但以二線連成環狀，此二電壓適成相加，故 a c 間之電壓，倍於 a b 間之電壓。

今若令磁場之分配，密於磁極之中心，而疏於極尖，且導線之行動方向，與磁線所成之角度，隨處而異，不若第一圖之恆成直角，則感應電壓之波狀，將如第二圖所示。若磁場之密度均勻，如第三圖所示，



第一圖 電壓波之一

如導線以均等之速度，行

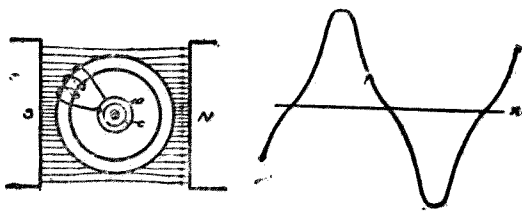
則導線割截磁線之速度，隨導線行動方向與磁線所成之角度而異。此時感應電壓之波狀，成一簡單之正弦曲線（如圖）——此為標準之波狀。此波之零值，設在  $t_1$  秒數之後，則其各時點之數值，以算式表之，當為

$$e = M E \sin 2\pi f (t - t_1),$$

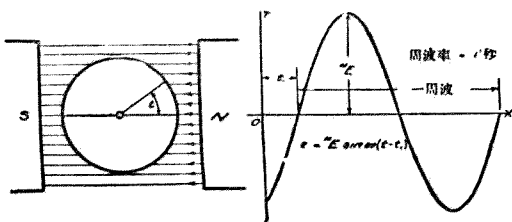
式中  $M E$  為最高電壓， $f$  為周波率 (frequency)，即每秒鐘內之周波數， $t$  為時間，以秒計。計算電流時點值之算式，與前相類，即

$$i = M I \sin 2\pi f (t - t_1)$$

正弦曲線亦稱單譜曲線，交流電之作此波狀者，其耗損為最低，即發電之效率，較任何他種之波狀為高。交流電之周波率，有高低二種；高者供無線電報及無線電話之用，低者供電力電燈之用。普通



第二圖 電壓波之二



第三圖 電壓波之三

交流電機所產之電流，其周波率之高低，視旋轉速度及磁極之數目而定。磁極一對成一週波，故周波率者，即每秒所經若干對之磁極也。

### 第三節 平均值及有效值

正弦波狀之交流有四值：一、最高值 (maximum value)，二、時點值 (instantaneous value)，三、平均值 (average value)，四、有效值 (effective value)。最高值即波之振幅，時點值即在各時點之數值，均見上文。至平均值者，乃以一周波之時間，除此曲線所包之面積所得之商數。按所謂電流，即係每單位時間流過導線某截面之電量，故曲線所包之面積（即時間與電流之乘積）即係交流之電量；今以時間除面積，不啻化正弦曲線為長方形，二者所包之面積則相等，故以此長方形之高度為平均值。此平均值之量約為最高值之  $0.6366$ ，即

$$I = 0.6366 I_m.$$

有效值之命意異是，前者以電量為根據，今則以能量為根據。蓋交流雖為變量，而其所含之能



力，則可假定其與某直電流之能力相等；此直電流之數值，即可根據之以計量交流。電學家朱爾 (Joule) 於一八四一年，證明電流在導線中所發之熱能，與電流之平方成正比，即

$$J = RI^2T.$$

J 爲朱爾數，乃能力之單位，爲朱爾所發明，故名。若以加洛里 (calories) 計，則前式變爲

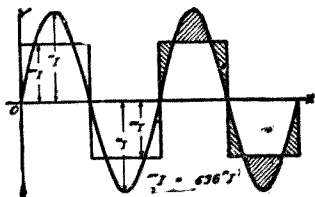
$$H = 0.24I^2RT,$$

此中 I 均指直流，T 爲時間，R 爲電阻。在交流，則當用時點電流  $i$  代 I，並用積分法積集 T 時間之總能量，其算式爲

$$H = 0.24R \int_0^T i^2 dt \quad \text{或} \quad J = R \int_0^T i^2 dt$$

今令交流與直流所發之熱能相等，以求直流 I 與交流最高值  $M_I$  之關係，則

$$RI^2T = R \int_0^T i^2 dt$$



第四圖 平均值

$$I = M I \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sin^2(\omega t) d(\omega t)} = \frac{M I}{\sqrt{2}} = 0.707 M I$$

故知此同等發熱量之有效電流  $I$ ，為最高電流之  $0.707$  倍。從上列之算式觀之，而知平均值與有效值在算學上的區別，即平均值為各時點值之平均量，而有效值則為各時點值之平均平方之平方根。普通計量交流電壓及電流之單位，如電表上所示之弗打數與安培數，皆為有效值。

有效值對於平均值之比例，名曰『波狀因子』(form factor)，所以表示電波之形狀也。在正弦曲線之波狀因子，為  $1.11$ ，餘則各隨波狀而異。

#### 第四節 表圖

表圖者，表示交電流及交電壓之數量與相位關係之圖也。圖表之法可分四種：

一、直角坐標 (rectangular coordinates) 為笛卡兒 (Descartes) 所發明，故亦名笛卡兒坐標。

二、極坐標 (polar coordinate) 以圓半徑及與橫標所成之角度，定數量之位置。

三、向量圖 (vector diagram) 分：(一)

(甲) 極相位圖 (polar-phase diagram)。

(乙) 曲拐相位圖 (crank-phase diagram)。

四、測量圖 (topograph) 可藉此以代計算。

(一) 直角坐標 上文第二節中諸圖皆直角坐標圖，與算學表法之三角函數相合。例如第五圖，即以直角坐標法，代表一交流電壓與一交流電流之波狀變值，電流波之進行，後於電壓，其相差為一角度  $\theta$ 。若以三角函數表之，則

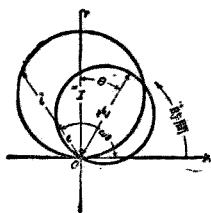
$$i = MI \sin(\omega t)$$

$$e = ME \sin(\omega t + \theta)$$

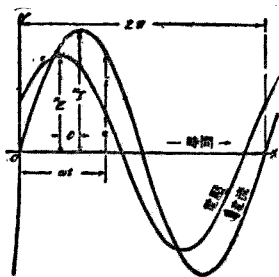
式中之  $\theta$ ，即電壓前進之角 (angle of lead)，亦即電流落後之角 (angle of lag) 也。

(二) 極坐標 在直角坐標中，以縱標代時點值，橫標代時間或角度（假定速度為定值），在

極坐標中，則以一旋轉向量與一標準軸所成之角，代時間或角度（本書所稱角度有二種，一曰電度，一曰機械度或幾何度，電度以每對磁極間之距離為一百八十度，機械度則為尋常之角度，凡關於電的方面者，均用電度，今即指此，讀者宜注意焉），而以向量之長度為時點值。向量之旋轉，以與時鐘指針相反之方向為正，同向為負，時間之計量，則自第一象限之橫軸  $X$  為起點。第六圖所示之曲線（即二平圓），即係代表第五圖中之交電流與交電壓，二者之相位差，亦為一  $\theta$  角度。與此圖相配之算式，即係上文之三角函數式。此圖所表之正弦波，其軌迹成一正圓形；例如電流之曲線，當時間為零時， $i$  為零，其後隨時間以俱增，至九十度，則達最高值  $M$ ，此即圓之直徑。自九十度至一百八十度，則  $i$  漸減至於零。此圓線即第五圖中在橫標以上之半波。自一百八十度至三百六十度， $i$  之軌迹亦成圓形，在  $X$  軸之下，與其上者



第六圖 極坐標

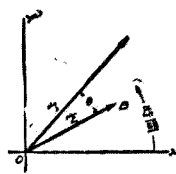


第五圖 直角坐標

相似；此下部之圓形，等於第五圖中橫標下之半波。電壓波因較電流為先進，故其最高值發現較早，其直徑偏於縱軸之右，而與之成 $\theta$ 角。

(二) 向量圖 普通數量，可以直線之長度表示之，如質量、重量、長度、時間等。此等數量無方向關係，故可用普通算術，為之加減或乘除。若數量而兼有方向者則異是。例如有人向東走二里，復向北走三里，則其人與起點之距離，決非五里。又如以三力加於一物，除三者加於同一點上，而方向相同外，其綜合之力亦決不能謂為三者相加之和。此等問題皆涉及幾何學之範圍，應以幾何的方法算之。今交流電學中之數量，大多含有方向，即所謂有向之量，或簡稱向量。設有同周率之二正弦波，其相位相同，則綜合波之最高值，當然為前二波最高值之和；然若二者之相位有差，則綜合之最高值，必較二波之總和為小。此等向量，表之以圖，更較算式為明晰，可助學者之理解，故為交流電學中表達思想之一重要工具也。

(甲) 極相位圖 茲先就向量圖中之極相位圖述之。此圖（見第七圖）脫胎於極坐標圖；極坐標圖以軌跡表時點值，此則僅以圓之直徑代



電流落後

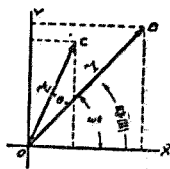
第七圖 極相位圖

之較前者為簡。在交流電中，所欲表示者，重在有效值（或最高值）與相位，而不重時點值與周波率，故此圖雖簡，頗適於用。此圖只注意於相位之差角，與  $\epsilon_t$  無關，可隨意作  $OA$  或  $OB$  於任何位置。

(乙) 曲拐相位圖

曲拐相位圖（見第八圖）脫胎於直角坐標，以旋轉向量代最高值，其時

點值，則以向量在縱坐標上之投影代表之，時間則以  $\epsilon_t$  之角度量之。如以此圖與正弦波電流之方程式  $i = I_m \sin(\omega t)$  比較，則向量  $OB$  即最高值  $I_m$ ，角度  $XOB$  即  $\epsilon_t$ ，而  $Y$  軸上之投影即時點值  $i$ 。

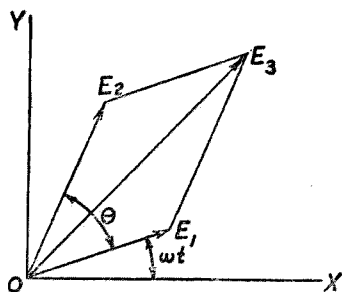


電流落後  
第八圖 曲拐相位圖

同周率而異相之二正弦波，其綜合之波亦為正弦波。在直角坐標中作此等曲線，殊令人厭煩，若用向量圖，則求綜合之值，事甚易。例如有二電壓  $E_1$  與  $E_2$ ， $E_1$  後於  $E_2$   $\theta$  角（見第九圖）。求法：以  $E_1 E_2$  二向量為二邊，作成一平行四邊形，從  $O$  點作對角線  $OE_3$ ，此即  $E_1$  與  $E_2$  二最高值之綜合值也。若用極相圖，其法同上，惟  $E_1$  與  $E_2$  互易其位置耳。

曲拐相位圖與極相位圖，有一顯著之不同之點：即二者雖皆表示電流後於電壓，乃  $O A$  與  $O B$  之相對位置，在第七第八兩圖，適成相反。其故由於二圖所根據之觀念不同。曲拐圖中之向量，猶如引擎上之曲拐，繞  $O$  點左旋不已，以先遇  $Y$  軸之向量為先，後遇者為後；今電流既後於電壓，故  $O B$  應在  $O C$  之後。極相位圖則不然：圖中向量乃固定而非旋轉，其在圖中之位置，與時間無關，惟其間相對位置則有一定；向量之分先後，假定有一直線，自  $O X$  之位置起，繞  $O$  左旋，向量之與此線先遇者為先，後遇者為後，故向量之相位關係，雖二圖皆同，而其在圖中之相對位置，則適成相反也。

(四) 測量圖 表圖除上述四種之外，又有所謂測量圖，猶測量地勢之圖，可藉此代計算；凡化解交流電路之各種問題俱用之，測量結果雖不若計算之精確，而簡捷則過之。此圖作法及其應用，俱詳下文。



第九圖 曲拐相位圖

## 第二章 交流電路

### 第一節 連列電路

交流電以時時變值，與直流之定值不變不同，故其在導線中所受之阻力，除電阻 (Resistance) 而外，復有因變值而起之感應作用所生之電抗 (reactance)。此電抗足以變更電壓與電流之相位關係，為交流電路問題中之一重要因數。電阻與電抗之綜合效應，曰電阻抗 (impedance)。在直流電學中， $E = RI$ ，此即所謂歐姆定律；在交流中，則上式應改為  $E = ZI$ ， $Z$  即電阻抗也。與電阻之意義相反者曰電導 (conductance)，其單位為謨 (mho)，以算式表之，則為  $g = \frac{1}{R}$ 。與電抗之意義相反者曰電納 (susceptance)，其單位亦為謨，其公式為  $b = \frac{X}{R^2 + X^2}$ 。電阻抗之倒數曰電導納 (admittance)，單位同上，公式為  $Y = \frac{1}{Z}$  或  $Y = \frac{1}{\sqrt{R^2 + X^2}}$ 。茲將此六種數量分述如左：



(一) 電阻 電阻之效應，交流與直流同，其所生之各值電壓降（即電壓因電阻而降落之量），可以算式表之於左：

以時點值計，則

$$e = r i = r^M I \sin(\omega t)$$

以最高值計，則

$$^M E = r^M I$$

以有效值計，則

$$E = r I$$

由以上諸式，可知在純粹電阻之路中，電壓與電流之關係，一如直流；蓋電阻祇能減少電流，降低電壓，初不能變更電流之相位也。

(1) 電抗 電抗有二種：一曰感應電抗 (inductive reactance)；二曰容量電抗 (capacity reactance)。感應電抗之生，由於導線之感應度 (inductance)；容量電抗之生，由於容電量 (capacity)。感應度與容電量乃交流電路中之二要素，可比之於力學中之惰性與彈性。惰性往往抵抗交變之動力，感應度亦然，能抵抗交電流，使波動之進行落後。彈性則異是，非惟不抵抗，且能協助交變動力，容電量亦然，能引進電流之波動，使之前進。此二種特性之影響於電流，一前一後，適成相反。

茲就其算理分別述之如次：

(甲) 感應電抗 電流在導線周圍所生之磁場，與電流之量成正比；令  $\phi$  為磁流， $L$  為感應度，則

$$\phi = Li$$

電壓之為感應度所消耗者，其量與磁流 ( $\phi$ ) 之變率成正比，即

$$e = L \frac{d\phi}{dt}$$

以  $\phi$  之值代之，得

$$e = L \frac{di}{dt}$$

假定電流為正弦曲線 (sine curve)，以  $i$  之值代入上式，得

$$e = L \frac{d(MI \sin \omega t)}{dt} = \omega LM I \cos(\omega t)$$

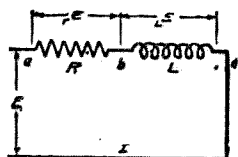
由此知感應度所耗之電壓，較電流為前進 (lead)，其相位差為九十度角，蓋餘弦曲線 (cosine

(curve) 常較正弦曲線先進九十度也。式中之  $\omega$  為角速率 (angular velocity) 以每秒若干度，或每秒若干弧度 (radians) (如一百八十度之弧度為  $\pi$ ) 計；若以弧度計，則  $\omega$  等於  $2\pi f$ ， $f$  即周波率也。上式以有效值表之，而以  $j$  表示九十度之前進，則成

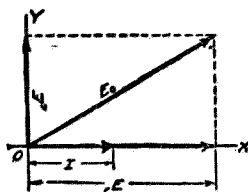
$$L E = j \omega L I = j X_L I$$

式中  $X_L$  即感應電抗，等於  $\omega L$ ，或等於  $2\pi f L$

設有一交流電路，含有連列相接之電阻  $R$  與感應度  $L$ ，如第十圖所示，圖中  $E$  為由於電阻之降壓， $E_L$  為由於感應度之降壓。今以曲拐向量圖表之，令橫坐標  $O X$  之長度代表電流  $I$  (有效值)，



第十圖



第十一圖

電阻降壓 $E_r$ 與 $I$ 同相，故仍以橫標表之。至感應度之降壓 $E_L$ ，則與 $I$ 成直角，在 $I$ 之先，故以 $OY$ 之長度代表之。以 $E_r$ 與 $E_L$ 為兩邊，作一平行四邊形，從 $O$ 點作對角線 $E_0$ ，此即 $E_r$ 與 $E_L$ 之幾何和，亦即電路兩端之電壓。（第十一圖）若以上圖表成算式，則

$$E_0 = \sqrt{r^2 I^2 + L^2 X I^2} = I \sqrt{r^2 + X^2}$$

例如電阻 $r$ 為八歐姆，感應電抗 $LX$ 為五歐姆，二者連列相接，電流十二安培，求 $E_r$ 、 $E_L$ 及 $E_0$ 之值各若干弗打。

$$rE = rI = 8 \times 12 = 96 \quad LE = LXI = 5 \times 12 = 60$$

$$E_0 = \sqrt{96^2 + 60^2} = 112.7$$

故知 $E_r$ 為九十六弗打， $E_L$ 為六十弗打， $E_0$ 為一一二·七弗打。

(乙) 容量電抗 交流電路中與感應電抗相對者，有容量電抗，由於容電量 $c$ 而起。設有不相接觸之鄰近二導體，其一荷以陽電，又一即有陰電感應而生，其量相等，是名靜電感應，此以二導體間有靜力線所致。此靜力線 $\psi$ 與二導體容電量 $c$ 之關係，為

$$\psi = C_e e$$

此二導體（名擬電器）間之電流，與電力線之變率成正比，故

$$i = \frac{d\psi}{dt}$$

以  $C_e$  代  $\psi$ ，得  $i = C \frac{d_e e}{dt}$

或  $e e = \int \frac{idt}{C} = \frac{MI}{e} \int \sin(\omega t) dt$

$$e e = -\frac{MI}{\omega C} \cos(\omega t)$$

以有效值表之， $e E = -j \frac{I}{\omega C} = -j_e X I$

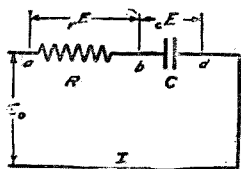
式中  $-j$  所以表示  $E$  之相位後於電流  $I$  九十度，與  $E$  之方向相反。 $X$  爲容量電抗，等於  $\frac{1}{\omega C}$  或

$$\frac{1}{2\pi f C}。$$

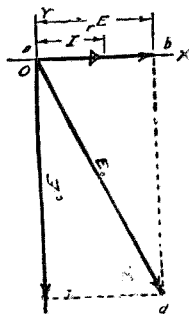
設有一電路，內有電阻  $R$  與一容電量  $C$  連列相接，如第十二圖；今以向量圖（第十三圖）表之，則以  $OX$  長度代  $I$  及  $E_e$  在  $I$  後九十度，故以負縱標之長度代表之。同前作平行四邊形，得對

角線  $E_0$ 。若以算式表其關係，則為

$$E_0 = \sqrt{r^2 I^2 + c^2 X^2 I^2} = I \sqrt{r^2 + c^2 X^2} = \sqrt{r^2 E^2 + c^2 E^2}$$



第十二圖



第十三圖

(三) 電阻抗 電阻抗乃電阻與感應電抗容量電抗之綜合值也。感應與容量二抗，其相位差常為一百八十度，即二者之方向常相反，其綜合量為  $LX - cX$ 。此總電抗無論為正為負，與電阻成直角，故電阻抗為電阻與電抗之幾何和，即

$$Z = \sqrt{r^2 + (LX - cX)^2} = \sqrt{r^2 + \left( 2\pi fL - \frac{1}{2\pi fc} \right)^2}$$

設有一電路（見第十四圖），含有電阻  $R$  五·四歐姆，感應電抗  $LX$  四歐姆，容量電抗  $cX$  八·二

歐姆，電流  $I = 7.5$  安培，求  $E_r, E_L, E_0$  及電阻抗  $Z$ 。

$$rE = 5.4 \times 7.5 = 40.5$$

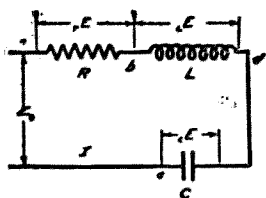
$$lE = 4 \times 7.5 = 30$$

$$eE = 8.2 \times 7.5 = 61.5$$

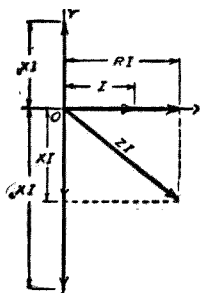
$$Z = \sqrt{(5.4)^2 + (4 - 8.2)^2} = \sqrt{29.16 + 17.64} = \sqrt{46.8} = 6.85$$

$$E_0 = ZI = 6.85 \times 7.5 = 51.4$$

在直流電路中，電壓等於電阻乘電流；在交流路中，則電壓等於電阻抗乘電流，此即交流中推廣之歐姆定律，亦即電學中普遍的定律也。



第十四圖



第十五圖

上之例題，若以向量圖解之，則如第十五圖所示，求法同上文。惟 $X$ 之電壓須以正縱標表之， $X$ 之電壓以負縱標表之， $XI$ 則為二壓之差；然後以此差值與 $RI$ 為平行四邊形之二邊（或簡作直角三角形之勾股二邊）以求對角線 $NI$ （或三角形之弦）此即總電壓 $E_0$ ，其與 $I$ 之相位關係，如圖所示。

## 第二節 並列電路

(一) 電導納 電導在直流中為電阻之倒數；在交流中則不然，其表式較為普遍。茲試從算式以求其值。按連列之電路，其各部電流量不變，惟電壓則處處不一，故常以電流為標準，而分析電壓為二，一與電流同相，一與電流成直角，同相者為 $RI$ ，垂直者為 $jXI$ ，即

$$E = RI + jXI = I\sqrt{R^2 + X^2}$$

化成 $I$ 之表式，則

$$I = \frac{E}{R + jX} = \frac{E}{\sqrt{R^2 + X^2}}$$



$$\text{分子分母各乘 } r + jx \quad I = E \frac{r + jx}{r^2 + x^2} = \frac{rE}{r^2 + x^2} + \frac{jxE}{r^2 + x^2}$$

此式中之  $\frac{r}{r^2 + x^2}$  與 E 式中之 r 相當，稱曰電導； $\frac{x}{r^2 + x^2}$  則與 x 相當，稱曰電納。在直流中，x 爲零，故

電導爲  $\frac{1}{r}$ ，是則  $\frac{r}{r^2 + x^2}$  實爲電導之普遍公式。

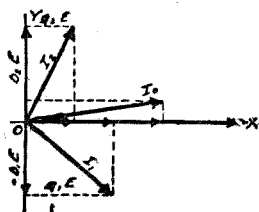
電阻抗之公式爲  $\sqrt{r^2 + x^2}$ ，電導納之公式與此相類，爲  $\sqrt{g^2 + b^2}$ ，g 即電導，b 即電納，故

$$\text{電導納} \quad Y = \sqrt{g^2 + b^2} = \sqrt{\frac{r^2}{(r^2 + x^2)^2} + \frac{x^2}{(r^2 + x^2)^2}} = \frac{1}{\sqrt{r^2 + x^2}} = \frac{1}{Z}$$

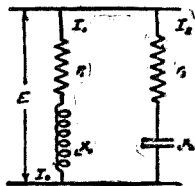
由此得  $E = ZI, \quad I = YE$

電導、電納，與電導納之用，以並列電路爲宜；蓋並列路中，各路之電壓皆等，電流則各路不一，化解時宜以電壓爲標準，而分電流爲二部：一與電壓同相，一與電壓垂直，同相者爲  $gE$ ，垂直者爲  $bE$ 。若用向量（見第十六圖）表之，則應以橫標代電壓，及  $gE$ （此部電流爲同相）而以縱標代  $bE$ ，其由於感應電納之電流，以負縱標代之（後於電壓九十度角），由於容量電納之電流，以正縱標

代之（前進九十度角）第十六圖之圖解，乃表示第十七圖並列電路之化解法，以求得  $I_0$  之值，及其與電壓之相位關係。



第十六圖



第十七圖

(二) 克希荷夫定律 歐姆定律既可推廣其應用於交流，而與之同等重要之克希荷夫定律 (Kirchhoff's law) 亦得適用於此。在直流電路中，克氏之定律曰：

- (a) 在某電路中所有電動力之總和為零，即  $\sum E = 0$ 。  
 (b) 所有流向一點之電流之總和為零，即  $\sum I = 0$ 。

在交流路中，電流與電壓俱可分為兩部：一與橫標平行，一與縱標平行，二者分別計算，其結果亦如上述。故在交流路中，克氏定律亦得成立：

$$(c) \text{ 在某電路中所有電動力之平行分力及垂直分力之總和，各爲零值，即}$$

$$\sum_r E = 0, \quad \sum_x E = 0.$$

(d) 所有流向一點之電流，其平行分流與垂直分流之總和，各爲零值，即

$$\sum_g I = 0, \quad \sum_b I = 0.$$

### 第三節 電路解法

本章第二節中，已將交流電路中所有各項數量，已分別剖述，茲復綜列算式如左，以備化解各種電路之用。

$$\text{電阻} = r = \frac{g}{g^2 + b^2} = \frac{g}{g^2 + (cb - lb)^2}$$

$$\text{電抗} = x = l_x - c_x = \frac{b}{g^2 + b^2} = \frac{cb - lb}{g^2 + (cb - lb)^2}$$

$$\text{電阻抗} = z = \sqrt{r^2 + x^2} = \sqrt{r^2 + (Lx - cx)^2} = \frac{1}{y}$$

$$\text{電導} = g = \frac{r}{r^2 + x^2} = \frac{r}{r^2 + (Lx - cx)^2}$$

$$\text{電納} = b = \frac{x}{r^2 + x^2} = \frac{x}{r^2 + (Lx - cx)^2}$$

$$\text{電導納} = y = \sqrt{g^2 + b^2} = \sqrt{g^2 + (ob - Lb)^2} = \frac{1}{z}$$

$$\text{電壓} = E = zI = I\sqrt{r^2 + x^2} = I\sqrt{r^2 + (Lx - cx)^2}$$

$$\text{電流} = I = yE = E\sqrt{g^2 + b^2} = E\sqrt{g^2 + (Lb - lb)^2}$$

(一) 連列電路 連列電路之解法 (series circuit) 已見第一節所舉諸例，茲復舉一更完備之例題，化解於左：

設有一連列電路 (第十八圖) 有以下之已知各值： $r = 4.2$  歐姆； $L = 0.03$  亨利； $C = 450$  兆分之一法拉； $I = 10$  安培； $f = 50$  周波

求： $E_1, E_2, E_0, \theta$

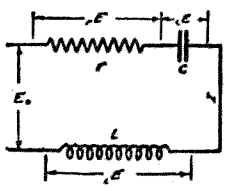
$$rE = rI = 42.0 \text{ 弗打}$$

$$LE = L \times I = 2\pi f LI = 2\pi \times 50 \times 0.03 \times 10 = 94.2 \text{ 弗打}$$

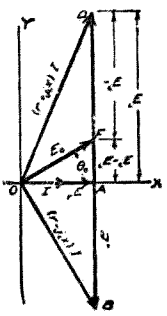
$$eE = c \times I = \frac{I}{2\pi f C} = \frac{10}{2\pi \times 50 \times 450 \times 10^{-6}} = 70.7 \text{ 弗打}$$

$$E_0 = \sqrt{rE^2 + (LE - eE)^2} = \sqrt{(42)^2 + (94.2 - 70.7)^2} = 48.1 \text{ 弗打}$$

$$\theta_0 = \tan^{-1} \frac{X}{r} = \tan^{-1} \frac{LX - eX}{r} = 29^\circ 15'$$



第十八圖



第十九圖

若以圖解法求之，先令橫標之若干長度（例如以一吋代十安培）代電流，然後將算得之 $E_L, E_E$ 諸值各以相當向量代表之，惟全圖所用表尺（即以單位長度代表之安培數或弗打數）務須一致。次從 $E_L$ 減去 $E_E$ 得F點，連OF線，即得 $E_0$ ，並與電流所成之相位角 $\theta_0$ 。

(二) 並列電路 並列電路 (parallel circuit) 之圖解法，以電壓作標準為便，故應以橫標長度代電壓，其各路電流則以相當之向量表之。計算電流時，以利用電導電納，較諸用電阻電抗為便，茲舉例以明之。

電路第二十圖，有以下之已知值： $r_1 = 3.4$ ； $r_2 = 8.5$ ； $\alpha X_1 = 6.6$ ； $L X_2 = 4.1$  歐姆； $E = 100$  弗打； $f = 50$  周波

求： $G_0, b_0, Y_0, I_1, I_2, g_1, b_1, I_0, \theta_1, \theta_2, \theta_0$

$$G_0 = G_1 + G_2 = \frac{r_1}{r_1^2 + \alpha X_1^2} + \frac{r_2}{r_2^2 + L X_2^2} = \frac{3.4}{(3.4)^2 + (6.6)^2} + \frac{8.5}{(8.5)^2 + (4.1)^2} = 0.062 +$$

$$0.096 = 0.158 \text{ 謨}$$

$$b_0 = {}_0b_1 - {}_1b_2 = \frac{{}_0X_1}{{}_1I_1^2 + {}_0X_1^2} - \frac{{}_1X_2}{{}_2I_2^2 + {}_1X_2^2} = \frac{6.6}{(3.4)^2 + (6.6)^2} - \frac{4.1}{(8.5)^2 + (4.1)^2} = 0.120$$

$$-0.046 = 0.074 \text{ 歐}$$

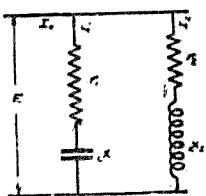


圖 十一 續

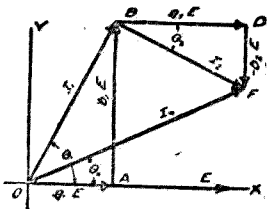


圖 一 十二 續

$$Y_0 = \sqrt{{}_0g_0^2 + {}_0b_0^2} = \sqrt{(0.158)^2 + (0.074)^2} = 0.175 \text{ 歐}$$

$$I_1 = E \sqrt{{}_1g_1^2 + {}_0b_1^2} = 100 \sqrt{(0.062)^2 + (0.120)^2} = 13.7 \text{ 安培}$$

$$I_2 = E \sqrt{{}_2g_2^2 + {}_1b_2^2} = 100 \sqrt{(0.096)^2 + (0.046)^2} = 10.6 \text{ 安培}$$

$$I = {}_0I = 0.158 \times 100 = 15.8 \text{ 安培}$$

$$b_1 I = y_0 E = 0.074 \times 100 = 7.4 \text{ 安培}$$

$$I_0 = y_0 E = 0.175 \times 100 = 17.5 \text{ 安培}$$

$$\theta_1 = \tan^{-1} \frac{b_1}{g_1} = \tan^{-1} \frac{0.120}{0.062} = 62^\circ 40'$$

$$\theta_2 = \tan^{-1} \frac{b_2}{g_2} = \tan^{-1} \frac{0.046}{0.096} = -25^\circ 39'$$

$$\theta_0 = \tan^{-1} \frac{b_0}{g_0} = \tan^{-1} \frac{0.074}{0.158} = 25^\circ 8'$$

圖解可改用三角分析法，以代平行四邊形法，如第二十一圖。先為電流電壓，各定一適當之表尺，乃以 E 代表於橫標上，次從算得之  $g_1 b_1$  兩值，作  $g_1 E$  於 OX 上，又從 A 點作 AB 垂直線，代表  $b_1 E$ ，連 OB，即得第一分路中之電流  $I_1$ ，此值可與算得者比對。復次從第二分路中算得之  $g_2 b_2$  二值，作 BD，等於  $g_2 E$ ，又從 D 點向下作 DF 線，等於  $b_2 E$ 。此乃第二路之感應電流，應後於電壓九十度，故其方向為負。最後連 OF 線，其長度即代表二分路綜合之電流，亦即  $g_1 E$ ， $b_1 E$ ， $g_2 E$ ， $b_2 E$  四種電流之幾何和也。若電路有二以上之分路，則  $g_3 E$ ， $b_3 E$ ， $g_4 E$ ， $b_4 E$  諸值，可按前法，從 F



點繼續進行。

以上所用之曲拐相位圖，重在代表問題中之各項數量，與其相位關係，以之替代算學，尚不十分便利。於是利用幾何原理，從已知之相位角度，以求並列路中之各項數量者，曰幾何圖解法。其法從上圖脫胎而來，並利用幾何學中所謂『半圓內所包之三角形常為直角三角形』之理，以三角之勾股弦，分別代表電阻降，電抗降，及總電壓。茲舉例以明之。

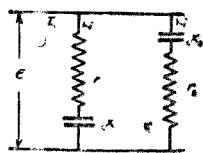
設有一並列電路如第二十二圖，有以下諸值： $r_1 = 9.0$ ； $x_2 = 12.0$ ； $c x_1 = 15.0$ ； $c x_2 = 10.0$  歐姆； $E = 100$  弗打； $f = 25$  周波。

求： $G_1, G_2, g_0, c b_1, c b_2, b_0, Y_0, I_1, I_2, g I, b I, I_0, \theta_1, \theta_2, \theta_0$

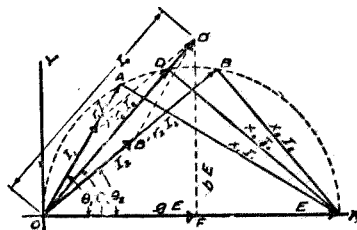
先用算法求  $\theta_1, \theta_2$  二值。

$$\theta_1 = \tan^{-1} \frac{c b_1}{G_1} = \tan^{-1} \frac{c X_1}{r_1} = \tan^{-1} \frac{15}{9} = 59^\circ 1'$$

$$\theta_2 = \tan^{-1} \frac{c b_2}{G_2} = \tan^{-1} \frac{c X_2}{r_2} = \tan^{-1} \frac{10}{12} = 39^\circ 52'$$



第二十二圖



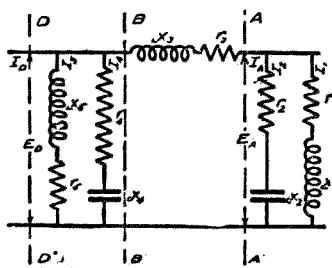
第二十三圖

以  $OX$  上若干長度代一百弗打之電壓，次以此長度作直徑，繪一半圓形，如圖。作  $OA$  線，與  $O$  成五十九度一分，而與圓周交於  $A$  點，連  $AX$  線。 $OA$  長度代表  $r_1 r_2$  之數值（弗打數）， $AX$  則代表  $r_1 r_2 C$  之值。以同一方法作  $OB$ ，與  $OX$  成三十九度五十二分，連  $BX$  線，二線所代表之數量，見第二十三圖。以  $r_1$  除  $r_1 r_2 C$ ，得  $I_1$  之數值，以  $OA'$  之長度代表之； $I_2$  則以  $OB'$  代表之。以  $OA'$  及  $OB'$

爲二邊，作平行四邊形，得對角線  $OD'$ ，是即  $I_0$  之數值，其與  $OX$  所成之角即是  $\theta_0$  角。此線與圓周相交於  $D$  點， $OD$  代表  $r_0 I_0$ ， $DX$  代表  $X_0 I_0$ 。從  $D'$  點作垂直線於  $OX$ ，其長代表  $b_0 E$  或  $I_1$ ，而  $OF$  則代表  $g_0 E$  或  $I_2$ ，以  $E$  除之，得  $g_0$  與  $b_0$ ，又若從  $A$  點亦作垂直線於橫軸，則此直角三角形之勾股二邊，即代表  $g_1 E$  與  $b_1 E$  二值，以  $E$  除之，得  $g_1$  與  $b_1$ 。以相同之手續，從  $B$  點作一垂直線，則可得  $g_2$  與  $b_2$  二值。以  $E$  除  $I_0$ ，則得  $y_0$ 。故用此圖解法，除計算  $\theta_1$  及  $\theta_2$  二值外，其餘各種所求之數量，若  $g_1, g_2, g_0, b_1, b_2, b_0, y_0, I_1, I_2, b_1, g_1, I_0, \theta_0$ ，皆可從圖中量得也。

(三) 並連列電路 此指並列與連列混合之電路，其化解法，算學與圖解可以並用，而化解之時，則須分段爲之。茲舉例如次，以明算法，圖解則從略。

第二十四圖所示之電路，其左爲發電機所在，其右則爲末端。中有並列路二，連列路一，故以  $A, A'$  等三虛線分爲三段。第一段中之數量如左：



第二十四圖

$r_1 = 3.0$ ;  $LX_1 = 4.0$ ;  $r_2 = 6.2$ ;  $cX_2 = 3.3$  歐姆。

欲合此段之二分路爲一，必須用電導及電納計之。

$$g_1 = \frac{r_1}{r_1^2 + LX_1^2} = \frac{3}{3^2 + 4^2} = \frac{3}{25} = 0.120 \text{ 謨}$$

$$Lb_1 = \frac{LX_1}{r_1^2 + LX_1^2} = \frac{4}{25} = 0.160 \text{ 謨}$$

$$g_2 = \frac{r_2}{r_2^2 + cX_2^2} = \frac{6.2}{(6.2)^2 + (3.3)^2} = 0.125 \text{ 謨}$$

$$cb_2 = \frac{cX_2}{r_2^2 + cX_2^2} = \frac{3.3}{(6.2)^2 + (3.3)^2} = 0.067 \text{ 謨}$$

$$g_A = g_1 + g_2 = 0.245 \text{ 謨}$$

$$b_A = cb_2 - Lb_1 = 0.093 \text{ 謨}$$

$$Y_A = \sqrt{g_A^2 + b_A^2} = \sqrt{(0.245)^2 + (-0.093)^2} = 0.262 \text{ 謨}$$

在 A, A' 一段路中之同等電阻爲

$$r_A = \frac{g_A}{g_A^2 + b_A^2} = \frac{0.245}{(0.245)^2 + (0.093)^2} = 3.58 \text{ 歐姆}$$

其同等電抗爲

$$x_A = \frac{b_A}{g_A^2 + b_A^2} = \frac{0.093}{(0.245)^2 + (0.093)^2} = 1.35 \text{ 歐姆}$$

同等電阻抗爲

$$z_A = \sqrt{r_A^2 + x_A^2} = \sqrt{(3.58)^2 + (1.35)^2} = \sqrt{12.8 + 1.82} = 3.83 \text{ 歐姆}$$

既知 A, A 路中之同等電阻與同等電抗，然後可與 B, B 路中之電阻電抗合計。令此路中之數量如左：

$$r_3 = 2.0; \quad r_{x_3} = 3.5 \text{ 歐姆}$$

將以上(1)(2)(3)三路之電阻電抗合併之，則得

$$r_B = r_A + r_3 = 3.58 + 2.0 = 5.58 \text{ 歐姆}$$

$$x_B = x_A + x_3 = 1.35 + 3.5 = 4.85 \text{ 歐姆}$$

最後復將  $r_B$  與  $x_B$  與 (4) (5) 兩並列路之同等電阻及同等電抗合計之。其 (4) (5) 兩路之數量如左：

$$r_A = 2.5; \quad cX_1 = 2.1; \quad r_s = 1.8; \quad L X_5 = 3.2 \text{ 歐姆}$$

$B, B'$  以前之總電阻抗爲

$$Z_B = \sqrt{r_B^2 + x_B^2} = \sqrt{(5.58)^2 + (4.85)^2} = \sqrt{31.1 + 23.5} = 7.4 \text{ 歐姆}$$

(4) (5) 兩路之電阻抗爲

$$Z_4 = \sqrt{r_4^2 + cX_4^2} = \sqrt{(2.5)^2 + (2.1)^2} = \sqrt{6.25 + 4.41} = 3.27 \text{ 歐姆}$$

$$Z_5 = \sqrt{r_5^2 + L X_5^2} = \sqrt{(1.8)^2 + (3.2)^2} = \sqrt{3.23 + 10.2} = 3.67 \text{ 歐姆}$$

此三種電阻抗處於同一電壓  $E_D$  之下，故以之除  $E_D$ ，即得  $I_B, I_4, I_5$  三種電流，並可算得此三流與電壓之相位關係。至欲求此三電流之總值，即  $I_D$ ，則須將每一分路中之電阻電抗，一一變爲電導電納。

$$G_B = \frac{r_B}{r_B^2 + x_B^2} = \frac{5.58}{(5.58)^2 + (4.85)^2} = 0.1018 \text{ 歐}$$

$$b_3 = \frac{X_B}{R_B^2 + X_B^2} = \frac{4.85}{(5.58)^2 + (4.85)^2} = 0.0584 \text{ 謨}$$

$$g_4 = \frac{r_4}{r_4^2 + cX_4^2} = \frac{2.5}{(2.5)^2 + (2.1)^2} = 0.2345 \text{ 謨}$$

$$b_4 = \frac{cX_4}{r_4^2 + cX_4^2} = \frac{2.1}{(2.5)^2 + (2.1)^2} = 0.1970 \text{ 謨}$$

$$g_5 = \frac{r_5}{r_5^2 + lX_5^2} = \frac{1.8}{(1.8)^2 + (3.2)^2} = 0.1335 \text{ 謨}$$

$$b_5 = \frac{lX_5}{r_5^2 + lX_5^2} = \frac{3.2}{(1.8)^2 + (3.2)^2} = 0.2377 \text{ 謨}$$

將各路電導電納分別加之得

$$g_D = g_B + g_4 + g_5 = 0.1018 + 0.2345 + 0.1335 = 0.4698 \text{ 謨}$$

$$b_D = b_B - b_4 + b_5 = 0.0584 - 0.1970 + 0.2377 = 0.1291 \text{ 謨}$$

故在 D, D' 處之總電導納爲

$$Y_D = \sqrt{G_D^2 + b_D^2} = \sqrt{(0.4698)^2 + (0.1261)^2} = 0.488 \text{ 漢}$$

$$\theta_D = \tan^{-1} \frac{b_D}{G_D} = \tan^{-1} \frac{0.1291}{0.4698} = 15^\circ 20'$$

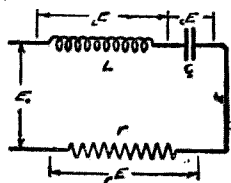
既得以上諸值，則無論電壓若干，均可求得電路各部之電流；反之若已量得任何一部之電流，亦可求得電壓及他部分之電流。

#### 第四節 共振

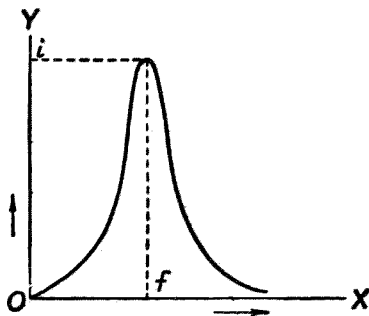
聲學試驗中有所謂音叉者，擊則發聲，聲有高低，隨叉之大小而異；今若擊其一叉，而以同等大小之他叉置其附近，則二叉共鳴 (Resonance)，聲音嘹亮。樂器之優者，無不注意於製器之材料，或金屬，或竹木，要以能與樂音共鳴者為佳，蓋共鳴則音調諧和而悅耳矣。然金屬竹木之所以能共鳴，必具有二要素，一為惰性，乃物質所公有，一為彈性，亦物質所通具，惟強弱各有不同耳。交流電路之為物，亦猶音叉，能接收外來之交變電壓，而與之共振 (Resonance)，遂於路中發生巨量之電流。其所以能共振者，亦有二要素，一為感應度 (與音叉之惰性相當)，一為容電量 (與彈性相當)。惰



性足以抵抗交變之運動，彈性則足以助長此運動；在電路亦然感應度足以抵抗交變之電流，容電量則足以助長此電流。二者數量相等時，對於電流，一推一挽，適成相應之作用，其推挽之速率，視二者之數量而異。苟有一交流電壓加於此路，其周波率與此路之推挽速率相等，則路中即起共振之作用；斯時電流之運行於路中，完全不受感應度或容電量之抵抗，僅受電阻之阻撓，故其量較非共振狀態時特大。茲就第二十五圖之連列電路言之，路中有感應度  $L$ ，容電量  $c$ ，電阻  $r$ 。感度電抗之值為  $LX = 2\pi fL$ ，容量電抗之值為  $cX = \frac{1}{2\pi fc}$ 。此電抗之向量為相反，當其數量相等時，即  $LX = cX$  或  $2\pi fL = \frac{1}{2\pi fc}$  時，得  $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{Lc}}$ ，此即二者對於電流推挽之速率，電學中稱曰『自然周波率』(natural frequency)。如外來電壓之交變速率（即周波率）與電路本有之推挽速率



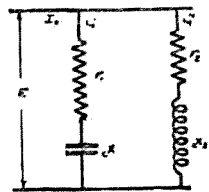
第二十五圖



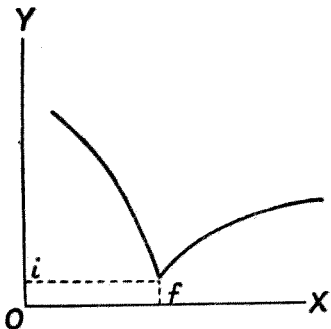
第二十六圖

(或自然周波率)同,則電流得電路之助,其數量達最高值,此名共振電流,即第二十六圖曲線之最高點。若以其他周波率之電壓加之,則電路仍具相當之電抗,電流遂較前者為低;其周波率距自然周波率愈遠者,電流愈低,如第二十六圖所示。共振電流之量,等於  $\frac{E}{r}$ , 一如直流。

以上指連列路之共振而言,至於並列電路,則其共振情形與前略異。試以第二十七圖之並列路言之。其第一分路中有電阻  $r_1$  及容量電抗  $x_1$ , 第二分路中有電阻  $r_2$  及感應電抗  $x_2$ 。此二種電抗在自然周波率  $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1C_1}}$  時,於二分路所成之連列路中,其共振作用完全與上述者同,即二分路中之電流  $I_1, I_2$ , 皆達最高值,且均較總路之電流  $I_0$  為大,亦猶連列路中在感應度或容電量兩端之電壓,均較總電壓為大,且遠過之。若以各種周



第二十七圖

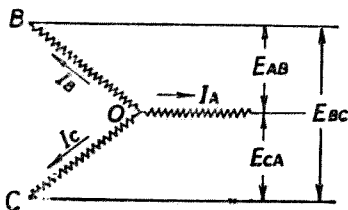


第二十八圖

波率之電壓加於此路，量其總路電流之量，而繪成曲線圖（如第二十八圖）以表之，則在自然周波率或共振周波率  $f$  時，此總電流之量為最低，等於  $i$ 。此事與連列電路之情形相反。共振作用在無線電路中甚重要，利其能得最高值之電流，且能藉此以選擇所欲收受之電波，而排去其所不欲接收者。在電力工程中，則無甚重要，且往往避免之，以電流過高，每易肇禍也。

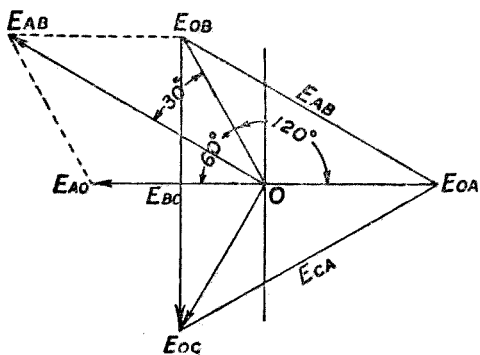
### 第五節 三又連接

在交流電路中，有兩種特別連接，非直流所有者：一曰三又連接（Y-connection），一曰三角連接（ $\Delta$ -connection）。此等連接，或施用於發電機，電動機，變壓器，變流機等之內部線圈，或施用於消耗電力之線路，將於下文分別論之。茲先就三又連接言之。第二十九圖表示一交流發電機中三線圈之連接式，三圈相距各一百二十電度（以每一對磁極間之圓周距離為一百八十電度），故各圈中之電



第二十九圖

流，如  $I_A, I_B, I_C$ ，其相位之差亦各一百二十度，其三圈所生之電壓 ( $E_{AB}, E_{BC}, E_{CA}$ ) 亦然。今有一事須注意者，即從三圈外端引出之  $A, B, C$  三導線，其中所經之電流即係各個線圈中之電流，但任何二導線（如  $A$  與  $B, B$  與  $C, C$  與  $A$ ）間之電壓，則並非等於一線圈二端（自  $O$  至  $A$ ，或自  $O$  至  $B$ ）間之電壓，乃等於  $O A, O B$  二圈電壓之和。此總和並非即將兩壓相加，因二圈有相位之差，故必須用幾何的加法。茲以向量圖代表此種電壓之關係，如第三十圖。今假定三圈中之電流，咸自中心點  $O$ ，流向外端，電壓之方向亦如之；據此則自  $A$  至  $B$  之電壓  $E_{AB}$ ，實為  $E_{OB}$  減  $E_{OA}$ ，蓋  $E_{OB}$  與  $E_{AB}$  之方向相同，應作正號， $E_{OA}$  則與之相反，應作負號故也。在向量圖上，以  $E_{OB}$  減  $E_{CA}$ ，祇須從  $E_{OA}$  繪一直線至  $E_{OB}$ ，此線之長度，即代表  $E_{AB}$  之數量，其斜度則代表其相位。餘如  $E_{BC}$  及  $E_{CA}$ ，作法同上。又一

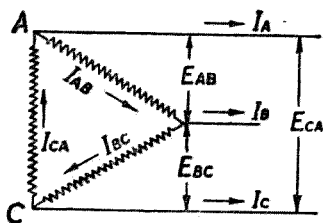


第三十圖

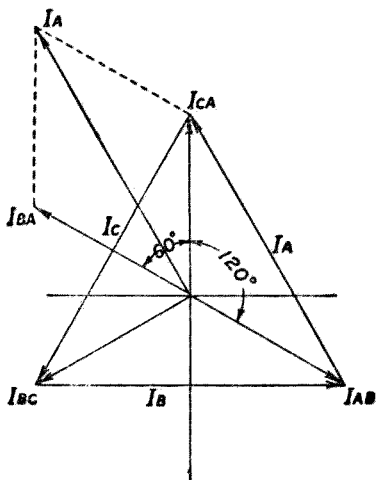
法將  $E_{OA}$  倒置對方，成  $E_{AO}$ ，以此與  $E_{OB}$  作平行四邊形之兩邊，從  $O$  點作對角線，是即  $E_{AB}$ ，結果全與上同。

## 第六節 三角連接

三角連接與三叉相類，惟前者所重在電壓，今之所重在電流。第三十一圖示三角連接之線路，此時導線間之電壓（如  $E_{AB}$ ,  $E_{BC}$ ,  $E_{CA}$ ）即係線圈電壓，而導線中之電流，則並非一線圈中之電流，乃等於與該線相接之二線圈電流之和。今假定線圈電流，均依同一方向（右旋）而流，則  $A$  線中之電流  $I_A$ ，應為  $I_{CA}$  減  $I_{AB}$ （以向  $A$  點之  $I_{CA}$  為正，則背  $A$  點之  $I_{AB}$  自應為負，故名為二流之和，實即二流之差。）以向量圖表此諸電流之關係，則當如第三十二圖所示。在向量圖上，以  $I_{CA}$  減  $I_{AB}$ ，可自  $I_{AB}$  作一直線至  $I_{CA}$ ；此線之長度乃代表  $I_A$  之數量，其斜度則代表其相位。餘  $I_B$  及  $I_C$  以同法得之。又一法倒置  $I_{AB}$  於對方，成負號之  $I_{AB}$ ，即  $I_{BA}$ ，然後與  $I_{CA}$  相加，作平行四邊形，其對角線，即  $I_A$  是也。



第三十一圖



第三十二圖

## 第三章 工率與工率因數

### 第一節 有效工率

電壓與電流之異相，無非由於感應度或容電量之電抗：前者使電流落後九十度，後者使電流前進九十度。交流電路中之真能消耗電能者，厥惟電阻，其所耗工率，等於電流與電阻降（電阻兩端之電壓）之乘積。感應電抗與容量電抗雖亦吸收電能，但吸收之後，仍如數歸還於電路，並不短少。前者所耗之工率，名爲有效工率；後者之工率，謂之反應工率，此則不能取用者也。

當電流與電壓之相位相同時，電流曲線之最高點或零點，常與電壓曲線之最高點或零點，同時發現，此時在任何時點之工率，等於電流時點值與電壓時點值相乘，即

$$P = i e$$

今以第三十三圖表之， $E$  爲電壓曲線， $I$  爲電流曲線；以各時點之  $e$   $i$  相乘，記點於同一圖上，連續各點，即得工率曲線  $P$ 。其平均工率，則如虛線所示，等於最大時點值之半，故平均工率之算式爲

$$P = \frac{1}{2} I_m E_m$$

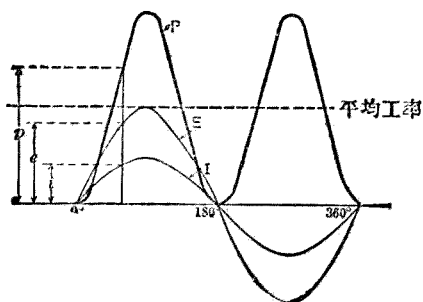
此時之平均工率，亦名有效工率，即

$$P = EI$$

式中之  $E$   $I$ ，指有效值之電壓與電流。有效工率爲真能作工之電力，其計量單位爲瓦特，或基羅瓦特（即一千瓦特），一基羅瓦特普通等於七百四十六匹馬力。

## 第二節 反應工率

反應工率亦稱無效工率 (wattless power)，試以第三十四圖表明之。此圖與上圖略同，惟  $E$



第三十三圖

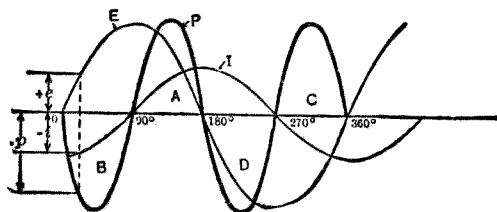


與 I 之相位，相差九十度，電流後於電壓，此時之工率曲線 P，半在橫標之上，半在橫標之下，非如上圖之全在橫標上也。上部曲線指正號之工率，下部為負號工率；正號工率即發電機輸出之工率，負號則為輸入之工率。輸出輸入，兩兩相抵，結果發電機並未作工，故其平均工率或有效工率為零。此工率雖無實用，然事實上確有如許工率出入於發電機中，故名反應工率以別之，其數量等於電壓與電流（皆有效值）之乘積，以算式表之，則

$$P = EI$$

此式與前式同，而意義則異。反應工率之計量單位為弗打安培（簡稱弗安），而不用瓦特，以為區別也。

### 第三節 工率因數

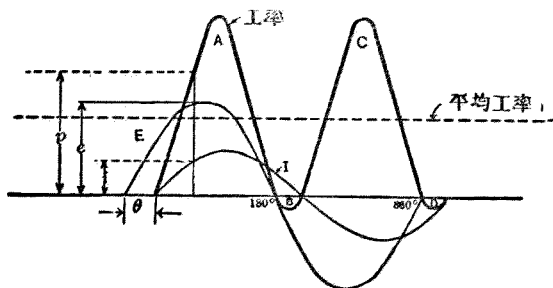


第三十四圖

以上二節，皆指特別情形而言。以普通情形論，交流電路中電壓與電流之相位，鮮有相同者，亦

鮮有相差九十度者，蓋電抗與電阻，乃交流路中所必有，特數量有大小耳。故普通電壓電流之相位差，常在零度與九十度之間；若然，則吾人將何以計其工率耶？今試就第三十五圖觀之。電流曲線後於電壓曲線 $\theta$ 角。在工率曲線 $P$ 上之每一點，係由 $E$ 、 $I$ 二曲線之相配各值相乘而得。例如在任何一時點之工率 $p$ ，等於在該時點之 $e$ 與 $i$ 之乘積。此圖中有 $B$ 、 $D$ 二環，此即負號之工率，較諸正號工率之 $A$ 、 $C$ 兩環為小。故發電機所輸出之平均工率為正號，惟較二正環之面積所代表者為少，因須減去負號環之面積也。

是以虛線所表示之平均值，不復等於電壓與電流（有效值）之乘積矣。欲求此平均工率或有效工率之數值，必須假定此異相之電流，為由二分流所合成，一與電壓成直角，一與電壓同相。此種

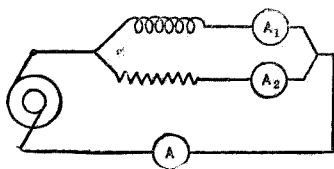


第三十五圖

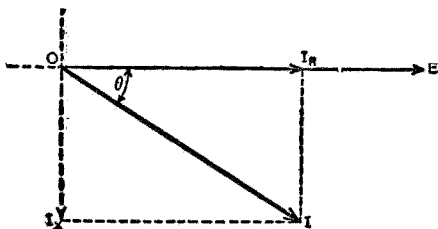
分流之理，可以第三十六圖表明之。圖左示一發電機，電流自機輸出，經並列之二路——其一具有感應電抗，有電流表  $A_1$  示其量；其二具有電阻，有  $A_2$  示其數量——而返於電機。此二分路中之電流，當然相差九十度之相位。第三十七圖之向量圖，所以表示此二分流之相位與數量， $I_R$  即上圖  $A_2$  所量得之電流量， $I_X$  為  $A_1$  所量得之感應電流，故圖中  $I_X$  後於  $I_R$  九十度。 $I$  即  $A$  所量得之總電流，乃  $I_R$  與  $I_X$  之幾何和或向量和。此二分流中，惟與電壓  $E$  同相之  $I_R$ ，為能產生有效工率，其與電壓成直角之  $I_X$  則僅能產生反應工率（已見第二節），故計算有效工率（或平均工率）時，祇須以  $I_R$  與  $E$  相乘即得。

按第三十七圖之幾何關係，得

$$I_R = I \cos \theta,$$



第三十六圖



第三十七圖

$$I_x = I \sin \theta$$

故知在電流與電壓異相之電路中，有效工率爲

$$P = EI \cos \theta$$

此式中之  $\cos \theta$  名工率因數 (power factor)。同相時，工率因數爲一，成直角則工率因數爲零，故此式實適用於任何相位關係之有效工率之通式。至反應工率（或無效工率）之通式，則爲

$$P = EI \sin \theta$$

若單取  $E I$  之乘積，不問其相位之異同，則稱爲貌似工率，以弗安計，或以基羅弗安計。所謂工率因數亦即有效工率對於貌似工率之比。凡瓦特表所量得之值，均爲有效工率，以弗打與安培之乘積除之，便得上述之因數。

#### 第四節 工率計量法

計量工率之法，視各種電路而異；即在同一電路，又有二瓦特表與三瓦特表諸法，茲分述如左：

(一)單相電路 在單相電路中，計量工率之法，與直流同，以瓦特表連接於路中量之，即得瓦特或基羅瓦特數。瓦特表之構造，有線圈二：一名電流圈，可容路中全部電流之通過，線粗，電阻甚微；一名電壓圈，線細甚，電阻極高，僅用以測電壓之高低。以此表量工率時，須以電流圈之二端，直列接於路中；其電壓圈則以一端接於電流圈之任何一端，另一端則接於電路之對邊，換言之，即以此圈作並列連接。

(二)平衡三相電路 三相電路為交流電路之最普通最經濟者。此路有三角三又二種，已詳前章第五第六兩節。今欲計量一三相發電機（無論為三角或三又連接）所輸出之工率總量，以常識觀之，自當計量每一線圈中之工率，然後以三線圈之工率相加。譬如第一圈輸出二百瓦特，第二圈三百瓦特，第三圈四百瓦特，則該機之工率總量，為九百瓦特。若三圈所輸工率相等，即在平衡狀態，則祇須量得一圈之工率，而以三乘之。此法在理論上固一正確可行之法，但實際上則有不能實行之理由在。蓋大多數之電機，其線圈皆深藏機內，欲以瓦特表接於線圈中，殊為困難；其露於機外者，惟引出之導線而已。然則吾人不可以瓦特表量其一導線中之工率而乘以三乎？曰，不可。蓋一

導線中之工率，非即一線圈中之工率，此二者有一定之算學關係。今就三角連接言之，令導線 A 中之電流為  $I_A$ ，與此線相接之二線圈（A B 與 C A）中之電流為  $I_{AB}$  與  $I_{CA}$ （見上文第三十一圖）；按前章第六節之理論， $I_A$  之數量，等於  $I_{CA}$  與  $I_{AB}$  之差，即

$$I_A = I_{AB} \times 2\cos 30^\circ = 2 \frac{\sqrt{3}}{2} I_{AB} = \sqrt{3} I_{AB} \quad (\text{參看第三十一圖})$$

故知導線中之電流，等於線圈電流之  $\sqrt{3}$  倍。至導線 A 與導線 B 間之電壓，在三角連接之電路中，即係線圈 A B 之電壓。假定此線圈電壓  $E_{AB}$  與線圈電流  $I_{AB}$  為同相，又因三線圈之電壓與電流皆同，故三圈之總工率為  $3E_{AB}I_{AB}$ 。今導線電流  $I_A$  係與  $I_{AB}$  或  $E_{AB}$  成三十度角，即  $I_A$  之與  $E_{AB}$  同相之部分為  $I_A \cos 30^\circ$ 。以此同相部分之電流與線圈電壓相乘，即得導線 A 中之工率，即

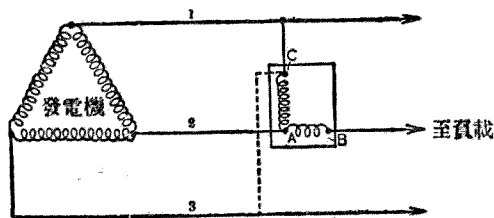
$$P_A = E_{AB} \times I_A \cos 30^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2} E_{AB} I_A = \frac{\sqrt{3}}{2} E_{AB} \times \sqrt{3} I_{AB} = \frac{3}{2} E_{AB} I_{AB}$$

由此觀之，從導線 A 量得之工率，實等於三線圈總工率之半數。換言之，吾人苟量得任何一導線中

之工率，乘之以二，即得三線圈之總工率矣。

以上皆就三角連接言，今再就三叉連接觀之，以覘此原則之亦適用與否。在三叉連接中，導線電流即係線圈電流，導線間之電壓則為二線圈電壓之差，其算學關係，與三角連接中導線電流之與線圈電流同——即任二導線間之電壓，等於任一線圈電壓之 $\sqrt{3}$ 倍，且與該線圈電壓成三十度角。故每一導線之工率，亦等於三線圈總工率之半，與三角連接之情形，完全相同。

是以無論三角或三叉連接，各線圈之工率平衡者，祇須以瓦特表量任一導線之工率，而以二乘之，即得三線圈之總工率。又一法則如第三十八圖所示，以瓦特之電流圈 A B，接於第二導線中，以電壓圈 A C 接於 1 2 兩線之間，如是量得工率後，立將電壓圈之 C 點移接於 3 線，以此量得之數與前者相加（若其一為負數，則相減，）即得發電機之總工率。此法亦可施於稍失平衡之三相電路。



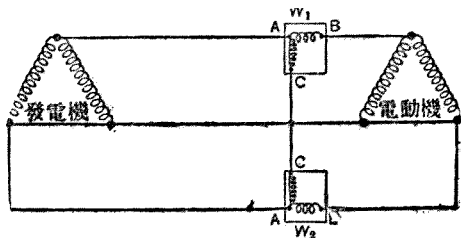
第三十八圖

(三) 不平衡三相電路 以上二法，祇能適用於平衡或稍失平衡之三相電路，而不適用於不平衡之電路；今復有二法，則不獨能適用於前者之情形，且亦能適用於不平衡之情形。茲分述如左：

(甲) 二瓦特表法 此法用瓦特表二，如第三十九圖之連接，注意此二表之連接，須成對稱形。若依此接法，表之指針示反向者，須將電壓圈 A C 倒轉。若二表皆正或皆反，則其數量相加；若一正一反，則二者相減；加減後所得之數量，即係三線圈之總工率。無論三角或三叉連接，此法之應用皆同，且結果甚為確切，無異於一一計量三圈之工率而加之也。

此二表法之所以正確，有算式可以證之。茲以第四十圖之三叉連接路言之，瓦特表  $\bar{W}_1$  所量之時點工率，為

$$P_1 = (-e_n)i_1 = (e_1 - e_3)i_1$$



第三十九圖



而瓦特表  $W_2$  之時點工率，則爲

$$P_1 = e_1 i_2 = (e_2 - e_3) i_2$$

以此二表之時點工率相加得

$$P = P_1 + P_2 = e_1 i_1 - e_3 i_1 + e_2 i_2 - e_2 i_2$$

但  $i_1 + i_2 + i_3 = 0$

或  $-i_1 = i_2 + i_3$

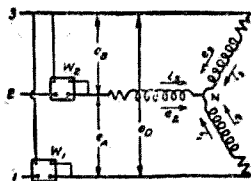
代 (15) 之值於上式，則得

$$P = e_1 i_1 + e_3 i_2 + e_3 i_3 + e_2 i_2 - e_3 i_2 = e_1 i_1 + e_2 i_2 + e_3 i_3$$

由此知二表時點工率之總和，適等於三線圈時點工率之和。若在三角連接，其結果同，證法亦相類。

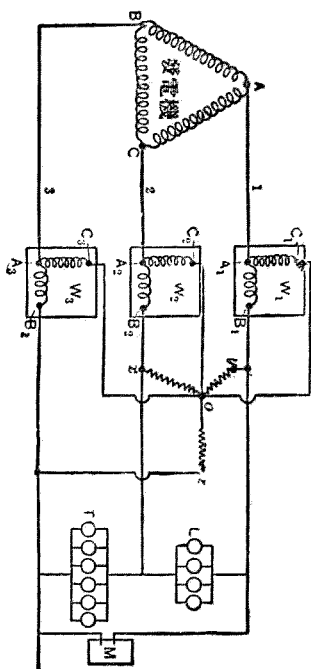
(乙) 三瓦特表法 若在三相路中，有中點可得者，則可用三瓦特表，以計量各線圈之工率。此

法將三表之電流圈，接於導線中，其電壓圈則以一端接於電流圈，以他端接於中點（參看第四十一圖）。若路中無中點可得，則可用三根無感應電阻之線，接成三叉形，而以三叉之三端接於導線，



第四十圖

成一入爲的中點（見圖）此三線之電阻，不可過低，俾不致提取總線中之電流亦不可過高，須與電壓圈之電阻相較爲極微。



第四十一圖

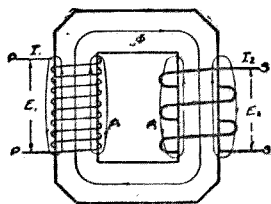
## 第四章 變壓器

### 第一節 效用及原理

交流電之所以優於直流而應用較廣者，曰在乎交流之輸送較爲經濟而已；其輸送之所以經濟，則賴乎有變壓器（transformer）之用，增電壓於輸出之時，則輸送線之截面得以減小，降電壓於取用之時，則用電之器，可以任擇適當之電壓，以較直流電壓之執一不變者，優勝多矣。按朱爾（Joule）氏之定律，輸送線之電力耗損，與電阻及電流平方之乘積成比例。今輸出時電壓既增，則電流減，電流減半，則耗損減爲四分之一；換言之，以同等之損失，而電力之輸送可以倍增。例如電壓增爲四倍，則輸送之工率，即可增爲十六倍；或輸送之工率仍前，則電線之截面積或線之重量，僅需十六分之一，工率輸送之所費，乃與以俱減。在取用電力之處，爲用戶之安全，電燈之經濟，以及其他

種種便利，需用低壓，則又可藉變壓器以減之，以適應其需要。大凡電力之分配，輸送線之電壓利其高，線之兩端（即發電之處與用電之處）利其低，而交流電以變壓器故，獨能適合此條件，其為用之廣也，宜矣。

變壓器之種類，以相分，則有單相多相之別；以構造言，則有鐵心式（core type）鐵殼式（shell type）之稱；以作用言，則有定位（constant-potential）定流（constant-current）之異；此外復有自變壓器（autotransformer），相位變壓器（phase-transformer）等之稱。第四十二圖表示一鐵心式之變壓器，繞於鐵心環之左者為正線圈，其右則為副線圈。當電壓  $E_1$  加於正圈之兩端時，即有一電流  $I_1$  在線內流行，同時此圈之鐵心中，產生一有效磁流  $\Phi$ ，及一漏入空隙之無用磁流  $\phi_1$ ；此有效磁流，行經副線圈中，因其數量之交變，遂於副線圈之兩端，感生一電壓  $E_2$ ，並由是而有副圈電流  $I_2$ 。由於此種電磁相感之理，正路中之電力，乃藉磁流之媒介，而傳遞於副路。此即變壓之原理也。



第四十二圖

茲假定正圈中之磁流，完全流入鐵心，其漏入空隙者，略而不計；又輸入正路之電力，係完全傳至副路，暫置器中之耗損而不計。依此假定，則正副二路電壓電流之比率，可以左式表之，

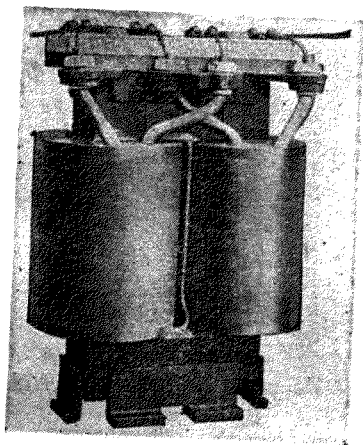
$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

式中  $n_1$   $n_2$ ，即正副二路之線圈數。此二路電壓之大小，與其圈數成正比；電流大小，則與圈數成反比。

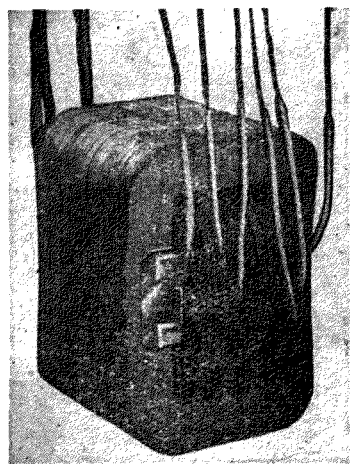
## 第二節 構造

變壓器之構造，略如上圖所示，惟左右兩線圈之間，並無如許空隙，且正副兩圈，不必分列左右，實際上往往將兩圈間層包裹，而連繞於兩邊。變壓器之鐵心截面，大都為長方形，取其製造之經濟也。各種變壓器之構造，不分鐵心及鐵殼二式，其鐵心皆用薄鐵片集成，正副兩圈之位置，均甚貼近。在鐵心式中，正副圈各分二組，繞於鐵心環之兩對邊，每邊正副圈皆相間圍繞。第四十三圖，示一裝置完成之鐵心變壓器，另有一箱，以備安置。兩線圈之間，稍留空隙，使冷油得周流其間，以減其熱度。

殼式變壓器見第四十四圖，其鐵心作「日」字狀，異於鐵心式之作「口」字形。又鐵心式線圈大都為圓筒式，而殼式之線圈則為長方形，繞於中央之鐵心上，周圍有鐵心包裹，惟露兩端。



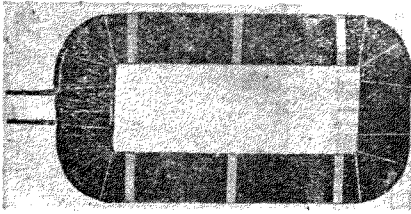
第四十三圖



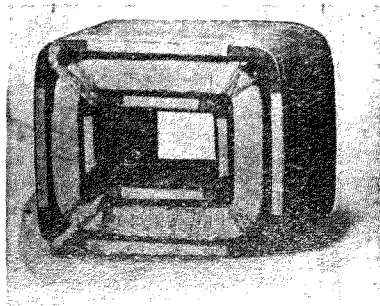
第四十四圖

(一)線圈 正副二圈為位置貼近，將每圈繞成薄片，如餅狀（因名餅圈，）然後將正副薄片相間堆疊。第四十五圖所示，即此等薄片之一也。變壓器之大者，間層之薄片有十餘片以上。第四十六圖表示殼式線圈之又一製法；並不將線圈繞成薄片，乃將低壓圈分成二組，而以高壓圈置於

其間。



第四十五圖



第四十六圖

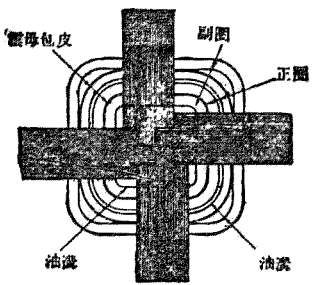
(二)鐵心 近今變壓器之鐵心，大都成連續之磁路，周繞線圈而無間斷，然薄片之鐵心，成長方環者，萬不能製成一片，蓋若成一片，則線圈將不能離鐵心而預製，祇能以銅線周繞其上矣。是故每一薄片之鐵心，必須分成L形之兩片。當以此片堆砌於線圈周圍時，必須一倒一正，相間疊置。此

L形片之接合處，既如是斷續相間，則製成之後，自可堅實如常，且磁阻亦所增無幾。

最近奇異電氣製造公司，發明一新式構造，實則即係鐵心式之變相；第四十七圖，即此新式變壓器之內部。此器之正副圈，同繞於四個鐵心式鐵心之一邊，他四邊則為磁流之回路。此器用同心之圓筒式線圈（製造最易，）佈置極密，且易於減熱，勝於以上二式。第四十八圖為此器之平面圖；表示冷油得自由流行於諸線圈之間，及其他各部。



第四十七圖



第四十八圖



(三)絕緣 變壓器之絕緣 (insulation) 必須精密檢查，以變壓器所受之電力，每在極高之電壓也。高壓線圈非惟應與低壓者絕緣，即對於鐵心，亦須絕緣；設遇一處之絕緣破損，與高壓線相通，則運用者雖明知其為低壓之部，或為無壓之部，而偶一接觸，即有性命之虞，甚或行經其旁，雖未觸着，亦能感受重大之電擊也。欲使線圈有完善之絕緣，則於絕緣線之外，須再繞以布帶；及繞成線圈之後，則塗以油漆等絕緣物品；而線圈與線圈之間，及線圈與鐵心之間，則用特製之絕緣紙以隔離之。既畢，則用高壓電力，須二倍於其規定之電壓者，以測驗其絕緣物之是否為之破損；若經此試驗而仍完好，則此器始為合用。

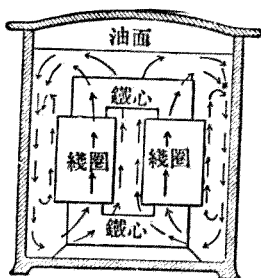
### 第三節 減熱法

變壓器之鐵心與線圈，皆有耗損（各種耗損詳下文），所謂耗損，即消耗一部分之有用電能，而變為無用之熱是也。此在各種電器皆然，非獨變壓器也。此所變之熱，非惟不能利用，且為絕緣物之害，故必須設法除之；否則熱度將繼續增高，終至燒燬線圈中之絕緣物。減熱之法，有氣冷，油冷，水

冷三種；小變壓器所用者，普通爲油冷法，電力廠中之大變壓器，則用水冷法。

(一) 氣冷法 氣冷法 (air cooling) 係用風扇鼓風，從變壓器之底部吹入，經過線圈及鐵心，攜取其中熱氣，從頂部放出。有時此風扇連接於電力廠底層之氣壓室，而以變壓器裝置於此室之上。每一變壓器之底部，開一氣孔，與下氣室相通；室內氣壓之高低，視變壓器之負載而定，在負載最重時，此氣壓須足以輸入一迅速之氣流於器內。此空氣須潔淨無塵，否則塵埃凝集器內，必致發生短路之弊。氣冷法以用於小變壓器爲多，非大者所宜。

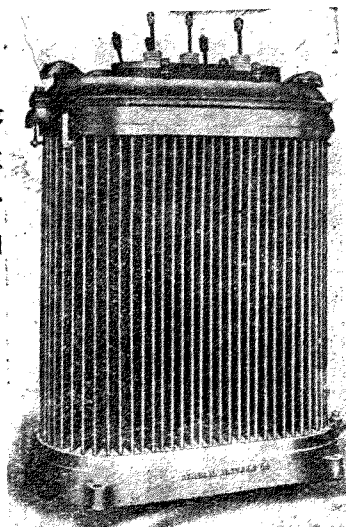
(二) 油冷法 用油冷法 (oil cooling) 時，變壓器之裝箱，須緊密不洩水爲合用；法以冷油灌入箱內，一以供減熱，一以作絕緣物。油在箱中之流動，全仗對流之作用——即由於冷熱油對流之對流。油之最切近於線圈及鐵心者，受熱而上升，其在外圍之油，則由上而下，以補其缺。如此則熱氣皆藉油流而傳至箱面，復由空氣之對流，而散佈於外。變壓器內油流之方向，見第四十九圖所示。變壓器之用油，足



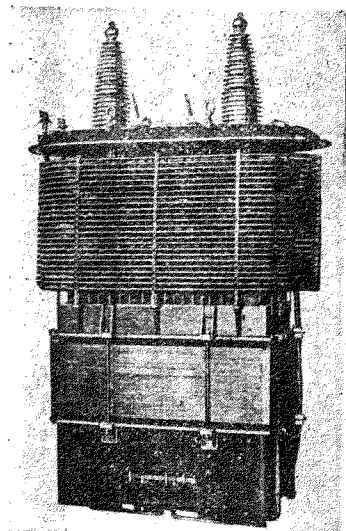
第四十九圖

以增加其電量，與電動機或發電機用風扇通風之增其容量同。此種降冷之法，最為可靠；決無弊病發生，如氣冷法與水冷法然也。

變壓器之容量較大者，發熱之量甚巨，減熱之法亦較難；其箱面平滑者，與空氣接觸之面積，不足以供熱力之發散。故箱之外表，常裝成凹凸不平，如第五十圖所示之狀，以增加其輻射之面積。惟大電廠中所用之變壓器，雖有甚大之輻射面積，亦不足以盡散其熱，於是乃不得不採用水冷法焉。



第五十圖



第五十一圖

(二) 水冷法 水冷 (water cooling) 之變壓器，亦以其內部之線圈與鐵心，浸入油中（與油冷法同），惟箱中之油，則用環繞之螺旋水管，浸於油中，以冷水流入其中而冷之。此項冷法，大多用於安置廠屋內之極大變壓器。至於裝在電桿木上，及露置空中之變壓器，則水管中之水常有冰凍之虞，自不能採用此法。第五十一圖，示一水冷之大變壓器之內部情形。其中環繞之水管，須精密裝就，不可稍有洩漏，蓋一有水滴洩入油中，則油之絕緣能力，將因而大損。

#### 第四節 耗損效率及定額

(一) 耗損 變壓器所用之材料，不外乎分片之鐵心，銅導線，及絕緣物或隔電物。鐵心中之耗損，與普通電機中之發電子等鐵質部分相同，有磁遲耗損 (hysteresis loss) 及渦流耗損 (eddy-current loss) 二種。以算式表之，磁遲所耗之工率爲

$$hP = \eta V f \beta^{1.6} 10^{-7} \text{ 瓦特}$$

式中  $\eta$  名磁遲係數， $V$  爲鐵心之容積， $\beta$  爲每方公分之磁力線數。渦流所耗之工率，爲

$$eP = e\lambda V^2 \beta^2 10^{-7} \text{ 瓦特}$$

式中， $e$  名渦流係數， $\lambda$  為電路之導電率，餘意同上。絕緣物之耗損，與鐵耗相類，惟為量甚小，可略而不計。實用測驗時，此項耗損常包含於磁遲及渦流二鐵耗中。銅線耗損為耗損中之最大者，此由銅線對於電流之阻力。按朱爾定律，此耗損之量，等於電阻與電流平方之乘積，其算式為

$$P_o = r_1 I_1^2 + r_2 I_2^2$$

式中之  $r_1$  與  $r_2$ ，乃正副二電路中之電阻， $I_1$  與  $I_2$  為二路之電流。變壓器之總耗損，等於此三種耗損 ( $P_o, P_e, P_m$ ) 之和。此三者所耗之工率，悉變為熱，而自變壓器之表面發散之。

(二) 效率 電機工程中所用之『效率』(efficiency) 名詞，大抵皆指輸出量對於輸入量之百分比；今變壓器之效率亦然，以算式表之，則得

$$\text{效率} = \frac{\text{輸出量}}{\text{輸出量} + \text{耗損}} = \frac{E_2 I_2 \cos \theta_2}{E_2 I_2 \cos \theta_2 + R I_2^2 + r_1 P + e P}$$

若銅耗與鐵耗二者相等，即  $R I_2^2$  等於  $r_1 P + e P$ ，則效率為最高。式中之  $R$  並非副路之電阻，乃正

副二路之電阻當值。普通變壓器之設計，其最高效率，大多在四分之三負載與滿負載之間。在無負載時，效率為零；負載漸重，則效率驟增；至四分之一負載時，往往已在百分之九十以上矣；過此以往，效率之變遷甚小。

電廠中所注重者，尚不在此種普通效率，而在乎全日效率。所謂全日效率者，即一日間變壓器之瓦特小時輸出量對於瓦特小時輸入量之比也。試舉例以明之。設有一五千瓦特之變壓器，供給電燈之用。在一日之間，滿負載時用一小時半，半負載用一小時半，餘則無負載。假定其鐵耗為二百瓦特，滿負載時之銅耗為二百瓦特，半負載之銅耗為 $(\frac{1}{2})^2 \times 200 = 50$ 瓦特。變壓器全日連接於總線，故其鐵耗總量為 $24 \times 200 = 4800$ 瓦特小時。滿負載銅耗佔一小時半，故為 $1.5 \times 200 = 300$ 瓦特小時，又半負載佔一小時半，為 $1.5 \times 50 = 75$ 瓦特小時。故全日之總銅耗為375瓦特小時。合前鐵耗，共為 $4800 + 375 = 5175$ 瓦時。變壓器之全日輸出量，為 $1.5 \times 5000 + 1.5 \times 2500 = 11,250$ 瓦時。其輸出量為11,250 + 5175 = 16,425瓦時。故全日效率為 $\frac{11250}{16425} = 68.5\%$ 。若就平常效率計之，滿負載之輸出量為5000瓦特，耗損總量為 $200 + 200 = 400$ 瓦特，則其效率為 $\frac{5000}{5000 + 400}$

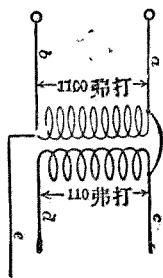
= 92.7%。

(二) 定額 變壓器之設計製造，視需用之電壓，周波率，與負載而定。變壓器所能負載之電能，常為溫度所限制，不能任意增加。此器內部，因有上述之種種耗損，熱力繼續發生；此熱從表面發散之速度，須與發生之速度相等，然後溫度不致增高。普通小變壓器之鐵心與線圈，皆浸入油中，以油為導熱之媒介，將熱導至外表而發散之。變壓器之鐵箱面，製成凹凸狀，以增加其散熱之面積。大變壓器熱量更大，油浸法及凹凸面，尚不足使其速散，必須用冷水，流過內部之螺旋水管，以減其熱度。變壓器之定額，以基羅瓦特或基羅弗安計，定額之大小，以溫度之限度而定。按照美國電氣工程師協會規定，變壓器之溫度，應不過周圍空氣溫度以上五十度（攝氏表）。

## 第五節 自變壓器

自變壓器 (autotransformer) 者，亦一普通之變壓器，惟其正副兩圈有電力的連接耳。普通此二圈之關連，僅藉磁場之相接，而自變壓器則非惟有磁力的連接，且有電力的連接也。譬如有一

尋常一千一百弗打至一百十弗打之變壓器，其線圈之相連，如第五十二圖。今副路不取 c d 二端，如普通方法，而改取 d e 二端，則普通變壓器即一變而為自變壓器矣。此副路之電壓，等於正路電壓，加上或減去 c d 線圈中所生之電壓。若線圈 c d 之電壓，與 a b 同向，則 d e 之電壓大於 a b，即 a b 與 c d 之和，等於一千二百十弗打；反是，a b 與 c d 相反，則 d e 之電壓，為 a b 與 c d 之差，等於九百九十弗打。



第五十二圖

上圖所示之自變壓器，祇有一線圈，而副路之電壓則可以任意增減，以其圈數可以增減也。第五十三圖(甲)表示 1100—1200 弗打之連接法，第五十三圖(乙)則表示 1100—1000 弗打之連接法。在此連接中，正副二路所共有之一部分線圈，兩路之電流適互相抵消。假定第五十三圖(乙)中之副路負載，為十安培，其電壓為一千弗打；則此一萬弗安之電力，顯係由正圈供給，而一萬弗安在一千一百弗打時，應有  $\frac{10000}{1100} \approx 9.1$  安培之電流。故 A B 一部線圈所負載之電流為 10—9.1

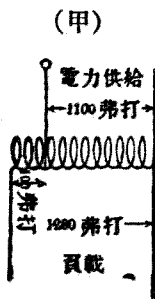
安培，至正圈之勵磁電流則略而勿計焉。但 B C 之部，則仍負載全部之電流 9.1 安培也。因此



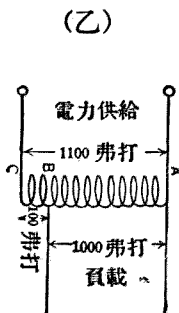
電流之抵消，故自變壓器之用銅量，甚為經濟，遇正副二圈電壓相近時為尤甚。

### 第六節 定流變壓器

上文所說之變壓器，皆指定壓者，蓋副路供給之電力，其電壓為不變者也。今所云定流變壓器者，即無論負載之大小，電壓之高低，而電流量則能自動的維持於定值也。需用此項定流之電力者，如弧光燈其一例也。弧光燈及鎢絲路燈，多係連列相接，每燈所用之電流皆同；設中有數燈因故障，則全路之電阻減小。若電壓不變，則電流必因而增加；或電燈數目驟增，則電流減少；或增或減，皆非電燈所宜。是故此種燈制，必須用一特製之變壓器，其電壓可隨時變更，則電流則永不變者，



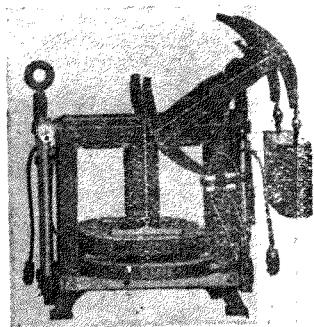
第五十三圖



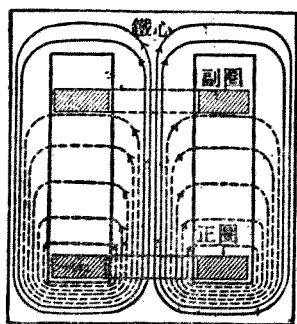
第五十三圖

此即所謂定流變壓器是也。定流變壓器之所以能變副路之電壓者，在變更正副兩線圈間之洩漏磁流也。其正線圈之位置固定不變，副線圈則可以移動，以變更二圈間之距離，洩漏磁流之量，即視此距離之大小而異。此種變壓器之構造，見第五十四圖所示。副圈之重量，有一重錘平衡之，故此圈祇須極小力量，即足以舉起之。

第五十五圖可以表示此器之作用，圖為一定流變壓器之簡單截面圖。兩圈間之洩漏磁流，以圖中之虛線代之；在此器中，漏磁之途徑，特較尋常之器為大。抵消副圈重量之錘，其重較小，不足以舉此圈，但副圈中有電流時，兩圈間之磁流即發生拒力，以助副圈之上升。此拒力之大小，與電流成正比。當電流在規定值時，此拒力適足使副圈浮於空中。若電流超過



第五十四圖



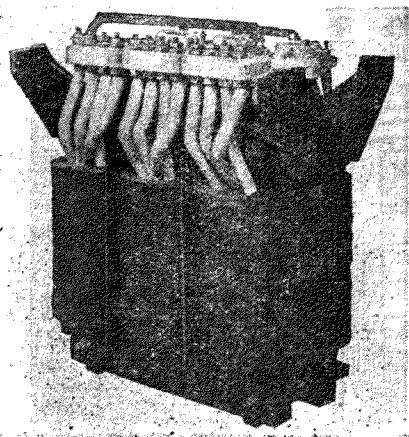
第五十五圖

規定之值，則副圈更向上舉，而漏磁亦更多。漏磁多，則副圈之電壓減，其電流乃維持其原狀。

茲復舉例以明其應用。設此變壓器運用於一組連列弧光燈之負載，而一燈熄滅，遂減去外部電路之電阻。此時副路電流則驟增，且因而增加正副圈間之拒力，而舉起副圈。但副圈距正圈稍遠，則漏磁增加，而副圈之電壓減低，於是其電流亦減至規定之值。故知此種變壓器常能維持其副圈之定壓也。

## 第七節 多相變壓器

多相變壓器 (polyphase transformer) 以三相為最普通，以構造論，亦有殼式與鐵心式二種。第五十六圖為鐵心式之三相變壓器，第五十七圖為殼式之三相變壓器。設有三個單相式之鐵心變壓器，其線圈僅繞於鐵環之一邊，以他邊為磁流之回

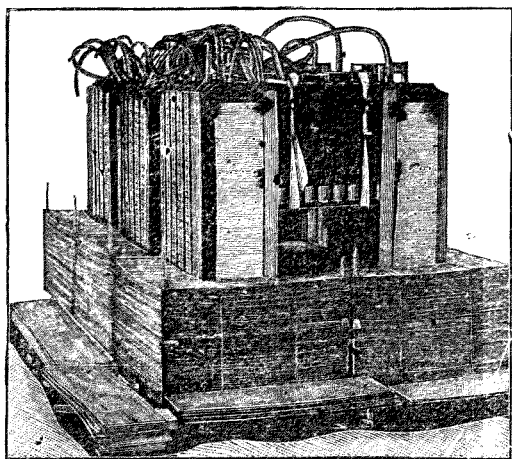


第五十六圖

路，今合此三邊爲一，則此總回路中即無磁流經過，等於虛設，因三相磁流，相去一百二十度，其總和爲零也。故此公共之邊可以免去，而改爲第五十六圖所示之鐵心。此鐵心之各部，闊狹皆同，以各部磁流密度皆相等也。三相變壓器之殼式鐵心，係取□狀之三個單相殼式鐵心，上下直列而成，如□□□狀。其相接之邊，與左右兩邊之闊狹同，惟中央繞線圈之心，則闊度倍於他邊。上述二式之三相變壓器，正副二圈皆同繞一心，或分薄片疊置，或分同心圈相間包圍。

以一個三相變壓器與三個單相變壓器較，前者有左列之優點：

(一) 鐵心之重量可減少約百分之十六。



第五十七圖

(二)效率可以增加百分之〇·四至〇·一五。

(三)所佔之地位約減去百分之五十。

(四)購置之費約可少百分之二十五。

然亦有其缺點在；其主要之缺點，苟有一圈損壞，必致三圈同時停止，以此業務常有間斷之虞。倘用三個單相變壓器，則一器損壞，可以取去修理，而以餘二者作V字連接，以分任三相之負載。

## 第八節 特種變壓器

變壓器之供專門之用而特製者，如電焊變壓器，電表變壓器，測驗變壓器等是也。今分述如左：

(一)電焊變壓器 此種變壓器專供電焊鋼鐵之用，能供給電流以燒熱金屬之連接處。先將連接之兩片金屬物，用鉗夾緊，而後以此變壓器之副路短接於其連接之點。此接合點之電阻，較諸副路之他部為高，故此處受熱甚烈。不過數秒鐘，此兩片金屬即鎔解為一。迨電焊合後，接合點之電阻頓減，熱亦消失，而電焊之事竣矣。此種變壓器之正線圈，大都為一百十至二百二十弗打之電壓，其

副圈則僅有一二匝，祇產生數弗打之電壓而已；特副路之電流量則極大，欲使煨接迅速，約須數千安培之巨。

(二)電表變壓器 此種變壓器共有二種：一爲電流變壓器，一爲電壓變壓器。普通量電流之電流表，其內部線路決不能容納數千安培之電流，普通電壓表亦決不能直接計量輸送線上之極高電壓，故遇有巨量之電流或電壓，非採用上述之電表變壓器，則電表必致燒燬，遑言計量。今舉其用法如下。例有一二千二百弗打之電線，欲用電壓表量之，則可用  $20:1$  之降級變壓器，以正路（高壓線圈）跨接於二電線間，以副路接於一百二十五弗打範圍之電壓表。此表量得之值，乘以二十，便爲確數。此種變壓器名爲電壓變壓器；其滿負載之容量祇數瓦特，僅足運用電壓表而已。用此變壓器時，須注意其負載不能過量，否則計量之值必致錯誤；又此器欲得精確之結果，不能用升級，蓋一變壓器之比率，用作降壓時爲  $60:1$  者，用作升級時，竟可改爲  $1:57$  之比也。

欲計量巨量之交電流，必須用電流變壓器。用法：將正圈連列接於線中，副圈則接至電流表。設正副路圈數之比爲  $5:1500$ ，即此器爲一升級變壓器，則電流表之最大限度爲五安培者，即足以

計量一千五百安培之電流。蓋正副圈之電流之比，與其圈數之比成反比例也。如此則以一容量不大之電流表，可以計量任何巨大之電流。用此器時，有一點須注意者，即此器負有電流之時，切不可將副路截斷。否則非變壓器有燒燬之虞，即截斷之副路感應一極危險之高壓，此以副路之圈數甚多，感應電壓與之成比例也。

(三) 測驗變壓器 一切電器在施用之前，其絕緣物之抵抗能力如何，必先有正確之測驗。測驗時所用之電壓，常爲此所驗之器之規定電壓之二倍。例如欲測驗一高壓之電力變壓器，則測驗時必須另用一變壓器，可產生二倍於前者之電壓者。又遇測驗電暈 (CORONA) 耗損，及空氣之隔離電力等，亦需用高壓。故供測驗用之變壓器，其電壓須在五十萬至一百萬弗打之間。測驗變壓器之電量不大，惟其體積則甚大，以其線圈須有多量之絕緣物，使其隔離也。

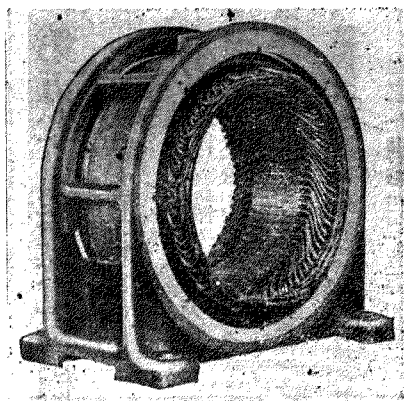
## 第五章 感應電動機

### 第一節 構造大要

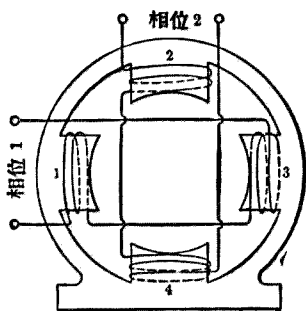
感應電動機 (induction motor) 之主要機件有二：一爲靜止部分，一爲旋轉部分，與普通電機之構造同。其靜止部分名靜止器 (stator)，旋轉者名旋轉器 (rotor)。此機之所以稱爲感應者，以其旋轉器之不與供給之電力線相連也。此旋轉器導線中流行之電流，並非直接從供給電力之電動力而產生，乃由於靜止器所生之磁場感應而生。感應電動機之運用原理，與他種電動機相類，其旋轉器上裝有一組導線，因靜止器磁場之感應而生電流，流行於線中，此線乃亦產生一磁場，與前之磁場發生反應作用，導線遂受動力之推動而旋轉。此器之運用，全仗一旋轉磁場之作用；欲明其原理，必先自此始。



## 第二節 旋轉磁場



第五十八圖



第五十九圖

之感應電動機之靜止器，及其線捲之如何繞法，具見第五十八圖。此器之線圈平均分佈於鐵軛之內周。線圈之匝數甚少，極似直流發電機之發電子線捲，其繞法亦無不同；其功用雖為產生磁場，

而與交流發電機或直流發電機之磁場線捲異。從上圖觀之，可見此靜止器並無突出之磁極鐵心，惟爲便於說明其旋轉磁場起見，暫假定其有磁極鐵心，每極繞有一普通之線圈。第五十九圖示一假定之二相四極電動機之靜止器。相對之磁極 1 2，繞成連列之線圈，並同接於相位 1 之總線；其 2 4 兩極亦作如是之繞法，惟連接於相位 2 之總線。又相對兩極之磁性，常一南一北，適成相反；磁極 1 所發出之磁流，流入對極 3，磁極 2 所發之磁流則流入對極 4。故此兩對磁極，受線圈中之電流激勵後，乃造成二個互成直角之磁場。令第二相之電流後於第一相之電流九十度角，其最高值或有效值則爲相等。勵磁電流既爲交流，則磁場之強度自亦隨而交變；其交變之情形如下：在第一個時點  $t_1$  時，第一磁場之強度爲零，第二磁場則爲負向之最高值；在第二時點  $t_2$  時，第一磁場爲正向最高值，第二磁場爲零；在  $t_3$  時，第一磁場爲零，第二磁場爲正向最高值；在  $t_4$  時，第一磁場爲負向最高值，第二磁場爲零。若此二磁流之交變均作正弦曲線，則此二磁流之時點值，可用三角方程式表之。令  $\phi_1$  爲第一磁場之磁流， $\phi_2$  爲第二磁流， $\Phi$  爲最高值磁流，二者皆同， $t$  爲時間以秒計， $\omega$  爲角速率，即每秒若干角度，則

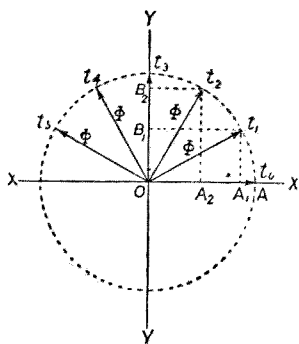
$$\phi_2 = M\Phi \sin \omega t$$

$\phi_2$  在  $\phi_1$  後九十度，即  $\phi_1$  在  $\phi_2$  前九十度，故在同一時點， $\phi_1$  多經九十度，以算式表之，則

$$\phi_1 = M\Phi \sin(\omega t + 90^\circ) = M\Phi \cos \omega t$$

此二種磁流之變值，既如上式所示，但二者之方位，一縱一橫，並非同向；故欲求此二流之總量，不能即以其時點值作代數的加法，而應以幾何的加法施之。參觀

第六十圖，XX 為第一磁場所處之方位，YY 為第二磁場所處之方位。在起始之  $t_0$  時， $\phi_1$  為最高值，等於  $OA$ ，第二磁流  $\phi_2$  為零，二者之綜合量即為  $OA$ 。至  $t_1$  時， $\phi_1$  等於  $OA_1$ ， $\phi_2$  等於  $OB_1$ ，其綜合量為  $\Phi$ ，此即以  $OA_1$  與  $OB_1$  為二邊之平行四邊形（此處為長方形）之對角線是也。再進至  $t_2$  時， $\phi_1$  為  $OA_2$ ， $\phi_2$



第六十圖

為  $OB_2$ ，其綜合量為  $\Phi$ ，長度與前之  $\Phi$  同，皆等於  $OA$  或  $M\Phi$ 。如是更進，至  $t_3$ ， $t_4$ ， $t_5$  等等，所得之綜合磁流常為  $\Phi$ ，成無數之圓半徑，惟方向則時時變更，作向左之旋轉。故此二相電流所成之二個垂直磁

場，乃合成一『強度不變之旋轉磁場』。此旋轉磁場強度（即總磁流量）之所以不變而等於 $M\Phi$ 者，亦可從算學上證明之。按 $\phi_1$ 之方向為橫， $\phi_2$ 之方位為縱，此二者適為一三角形之勾股二邊，其弦則綜合量 $\Phi$ 是也。依三角定律，弦之平方等於勾平方與股平方之和，即

$$\Phi^2 = \phi_1^2 + \phi_2^2 = M^2\Phi^2\sin^2\omega t + M^2\Phi^2\cos^2\omega t = M^2\Phi^2(\sin^2\omega t + \cos^2\omega t)$$

在三角學中  $\sin^2\omega t + \cos^2\omega t = 1$ ，故

$$\Phi^2 = M^2\Phi^2 \quad \text{或} \quad \Phi = M\Phi$$

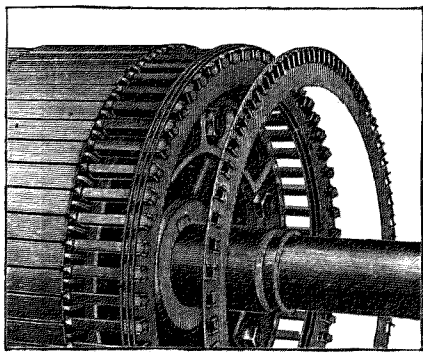
由此可知無論 $t$ 為若干， $\Phi$ 之量常等於 $M\Phi$ ，而為一恆定不變之常數，其旋轉速率則為 $\omega$ ，等於 $2\pi f$ 。例如第一第二相電流之周波率均為每秒六十周波，則此磁場之角速率為每秒 $2\pi \times 60 = 120\pi$  弧度（此指電學上之角度）。今此機有四極，即機械上每轉一周，等於電學上之二周，故 $1:0.5$  電弧度等於 $60:1$  機械弧度，換言之，即此磁場每秒能轉三十次，或每分鐘一百八十轉也。

## 第二節 旋轉器

以構造別之，感應電動機之旋轉器有二：一名鼠籠式旋轉器 (squirrel-cage rotor)，一名迴繞旋轉器 (wound rotor)。二者之鐵心皆用薄矽片集成；其不同處，在乎線捲之連接方法而已。

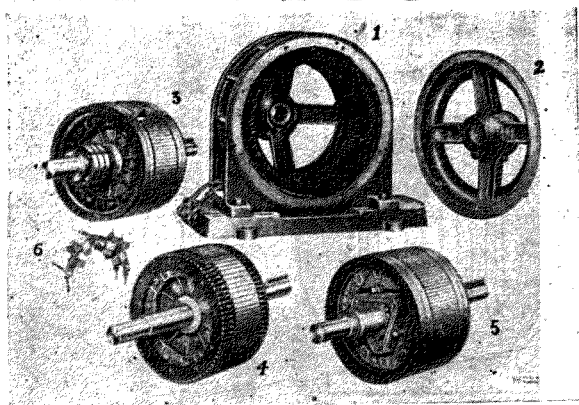
(一) 鼠籠式旋轉器 此器之線捲，係用粗銅桿置於外周之槽內，銅桿之兩端，用粗銅環煅接而成短路。旋轉器上之槽，大都為半封閉者，故銅桿可由鐵心之端部插入。此等線捲中所生之電壓極低，故銅桿上祇需少許之絕緣；大概一厚層之絕緣油漆即可敷用。第六十一圖表示一鼠籠式旋轉器之電動機，並表明其短路之環與槽中之銅桿。此銅桿有時並不與動軸平行，而稍作偏斜狀。其所以如是之扭轉者，欲其起動旋力之平均，且以之減少旋轉時之營營作聲也。

(二) 迴繞式旋轉器 此式旋轉器，頗與交流發電機之旋轉發電子相似。其各個之導線互相絕緣，而列成許多線圈。此等線圈大都分為三組，接成一三叉式之三相線捲，



第六十一圖

其三線端則連接於三個銅環上環裝於動軸上如第六十二圖3之旋轉器所示。此種線圈為開斷的，迨壓於環上之炭刷相接，其路始合，而電流通。炭刷（第六十二圖6）所連接之外部電路，其電阻可高可低，故旋轉器電路之電阻，可變更此外路之電阻以增減之。增減之法，用一節制電鎗，其形式與構造，與電車上之駕駛器相同。有時可將電阻裝在旋轉器內部之鐵幅上。在此等旋轉器，無須用旋轉環；其線捲之端部，可接至移動指上，與電阻之線端相接觸。此等移動指可變其位置，以節制旋轉器電路中之電阻量，而其位置之移動，則有一槓桿司其事，此桿可運用在動軸上之移動軸。第六十二圖中之3 4 5，為三種不同之旋轉器，炭刷及刷柄等附件，則圖中標6字者是也。感應機之在五匹馬力下者，以鼠籠式為最普通；其工率



第 六 十 二 圖

大者，達一百五十或二百匹馬力。更大之電動機，則通用迴繞旋轉器，而加以外部電阻，其理由詳下文。

#### 第四節 旋力及速度

茲就一鼠籠式旋轉器在旋轉磁場中之情形觀之。磁場及旋轉器導線之截面見第六十三圖。此圖代表一二極電動機，其磁場之旋轉，假定為左旋向或反鐘向。若旋轉器停止不動（或旋轉之

速度較磁場為小），則此器頂部之導線中，即有一正電壓感應而

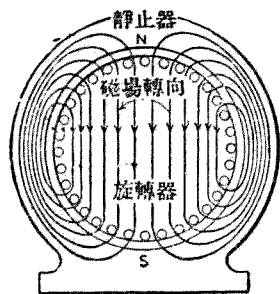
生（其方向為流入紙中），其底部之導線中，則有一負電壓感生

（從紙中流出）。旋轉器上之導線，既為銅環連接一起，則線中之

電流方向，自必與電壓之方向同，即頂部導線中之電流，離讀者而

流去，底部導線中之電流，則向讀者而來。按電磁原理，凡負有電流

之線，處於磁場之中而與之成直角者，線上即受有一動力而使之



第六十三圖

行動，動之方向則與線垂直。此中行動，電流，磁流三者方向之關係，可以佛來銘 (Fleming) 之左手定則以斷定之。其法以食指代磁流方向，中指代電流方向，拇指代行動方向，三指依空間之三向伸出，互成直角；今若已知其二者之方向，則第三者之方向不難推得。就上例言之，已知磁流向下，頂部導線之電流向書中，則按此法推之，行動方向，必為向左無疑；反之，下部之線則向右行。結果旋轉器因此項電動作用，被驅而作反鐘向之旋轉，與旋轉磁場之方向同。

上文既知旋轉器之行動方向與磁場同，然則其旋轉之速度為何如耶？今先假定此電動機並無負載，其阻力甚小，亦可不計，旋轉器之行動完全自由。若速度小於磁場，則其導線中即有電動力感生，有電動力即有電流，有電流即有旋力，結果使旋轉器追及磁場。既追及後，二者之速度相等，旋轉器之導線乃不復能割截磁場中之力線，於是旋轉器之電路中亦無電流運行。無電流則無旋力，故此旋轉器決不能再加其速度。換言之，旋轉器之最高速度，以旋轉磁場之速度為限。

然此乃就理論言之，在實際上，此電動機即無外加之負載，亦必有種種阻力，故其速度萬不能達到同期之速度（即磁場速度），惟相去不甚遠耳。例如有一電動機，其同期速度為每分九百轉



者，旋轉器之無負載速度約為八百九十八轉，即旋轉器之移退為每分鐘二轉，約百分之〇·二。

## 第五節 特性

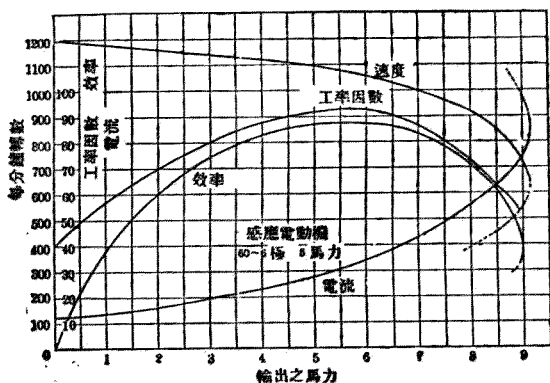
感應電動機之特性，可分二種：一名起動特性，一名運用特性，茲述之如左：

(一) 起動特性 起動時之重要特性有三：曰旋力，曰電流，曰工率因數。感應電動機在靜止時，不啻一變壓器，其旋轉器之線捲，猶變壓器之副線捲，靜止器線捲猶副線捲。變壓器之副圈成短路時，其正圈常從電力線吸取巨量之電流，而鼠籠式之感應電動機在靜止時，其情形亦然。鼠籠式旋轉器之電阻甚低，其最大之缺點，即在此巨量之起動電流；例如一五匹馬力之感應電動機，其滿負載電流不過二七·五安培，然當其初與電力線連接時，電流驟增至一三〇安培，其馬力較大者，其起動電流亦作比例之增加。此起動電流之工率因數甚低，又以電流之大，每使總線電壓，在電鑰閉合時，為之變動。例如上述之五匹馬力之機，在起動時，可使總線電壓自一一〇弗打減為一〇二弗打，但在滿負載電流及至規定速度時，此電壓則復增至一〇九弗打。其對於總線電壓之影響，殊不

利於同一總線之其他用器械，如電燈，及同期電動機，或同期變流機等，對於後二者尤足擾亂其運用，或因變壓過大，竟至使此二機失其步驟。鼠籠電動機之缺點，尚不止此，其起動之旋力甚小，往往僅及滿負載旋力之一小分數，以致起動甚為不便。

以上所述三種缺點，皆由鼠籠式旋轉器之電阻過小，若具有巨量之電阻，即可免除此種種之弊病，惟效率則不免因而減低，其速度之調整亦欠完善。以電阻加入旋轉器中，其旋力與工率因數皆隨而增加，惟電流則減少。電阻增至一某點，起動旋力達最高點；電阻更增，則旋力反減，而工率因數則繼續增高，電流則繼續減少。

(二) 運用特性 普通之小感應電動機，而具有低電阻者，其運用特性見第六十四圖之曲線所示。其無負



第六十四圖

載電流，大概爲滿載電流之百分之二十至四十。電流之增加，與負載成比例，過滿載後，增加愈速。速度則隨負載之增加而稍跌，自無負載至滿負載之跌落，每在同期速度百分之十以下。磁場速度與旋轉器速度之差（名曰移退率），在滿負載以後，增加甚速，若負載過重，則竟至停止。遇此種情形，必須藉斷路器或熔線以斷其電路，且須去其負載，而後可以重新起動。此最大之負載，大概大於滿載百分之百或百分之七十五；此則視各機而異，惟須遠較滿載爲大，庶不致時時停頓也。

## 第六節 變速法

感應電動機在一定之輸出量時，欲變其速度，可有以下諸法。

(一) 變更旋轉器之電阻 感應電動機本係一定速之機，故變速問題較爲困難，非如直流電動機之易於完滿解決也。變速之第一法，以電阻加入旋轉器之電路中。但如上文所言，此法雖能減速，而其效率則因而減小，且其最高負載之點亦爲之降低。故此電阻變速法，祇能適用於起動之時，尙無妨於經濟；此法頗與直流鐵路電動機之以電阻變速相類。

(二)變更供給電流之周波率 從前有一時欲以二三種周波率之電力線，任取其一通接於電動機以爲變速之法者。蓋旋轉磁場之速度，與周波率成比例，而旋轉器之速度，則又視磁場之速度而異，惟常較磁場爲遲，故旋轉器之遲速，可以各種不同之周波率以變之也。例如一電動機，原定爲每秒二十五周波者，若改用六十周波之電流，則速度約可倍增。在實際上，電動機之速度，實與供給電力之周波率成比例。惟此法所需之接線及用具等，頗爲複雜，鮮有採用之者。

(三)變更磁極之數目 又一變速法，將靜止器之線捲，經一組電鑰而變其內部之連接；此等電鑰苟予以適當之運用，可使靜止器所生之磁極變其數目。例如將電鑰向左閉，則此機可有八極，向右閉，則得六極，磁極數變則旋轉器之速度亦變。此法雖頗有效，然其線圈之連接極複雜，爲用不廣。

(四)首尾啣接法 在鐵路電機車中，有用二電動機首尾啣接者。第一機之靜止器連接於電力線，此機之旋轉器之旋環，則接至第二機之靜止器，第二旋轉器之電路則連接於一可變之電阻。當第二旋轉器之電阻完全截去時，二機之速度，適爲其分別直接於總線時之半（此時旋轉器亦

接成短路。)此法祇適用於相等之二機同任一負載時，如電車上之電動機是也。

此外尚有許多變換感應機速度之法，然或嫌其效率太低，或嫌其手續之複雜，或嫌其購置費之昂貴，無有完善者。是故感應電動機者，根本上乃一定速之電動機也。

## 第七節 單相感應電動機

以上種種解析，俱暗指一多相之感應電動機。單相機有數點，與多相機異，此不可不說明者。

(一)單相電動機無起動旋力 單相感應電動機，除裝置另外之起動器械，如整流子，或額外

之靜止器線捲等以外，實毫無起動旋力者。但此機運用於近乎同期速度時（其移退率約在百分

之二十以下），其特性頗與多相感應電動機相似。雖單相機之工率因數及移退率皆比多相機為

小，但此種差別甚微，可不論也。單相機之所以缺乏起動旋力者，以其靜止器祇有一組線圈，且祇供

給一單相之電流；故此機祇能產生一擺動磁場，而不能生旋轉之磁場也。欲此機有起動旋力，則必

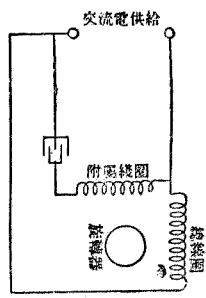
須如多相機之具有旋轉磁場。惟單相機在近乎同期速度時，旋轉器電流與其單相之靜止器電流

合作，而產生一旋轉磁場，故云近乎同期速度時，單相機與多相機相同也。

(二)使單相機起動之分相法 欲予單相機以起動旋力，分相法即其一法也。其靜止器上本祇有一個線捲，可負載電流，今則再加一線捲與前者成直角，僅使其在起動時間，足以負載一勵磁電流。及旋轉器已近同期速度，此捲即自動的截出於電路之外。第六十五圖表示此種分相電動機之連接法；其附屬之線圈，經一凝電器而連接於單相電力線。此凝電器之量，足使附屬圈中之電流，較總圈電流前進九十度角。故此二圈猶如二相電動機中之二線圈，能產生一旋轉的磁場。如不用凝電器，亦可以感應圈代之，使電流後退九十度，結果則二圈仍為二相。

(三)整流子式之電動機 又有一種通用之單相感應電動機，用一裝有整流子及刷子之旋轉器，一如直流電動機之狀。迨電

動已近同期速度，則所有整流子之截片，自動的接成短路，刷子則自整流子上舉起。如此則復變此旋轉器為一尋常之鼠籠式旋轉器。此機之起動原理，如下文第九章中所述之抗拒電動機。第六



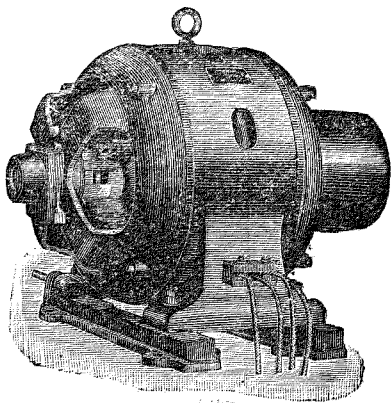
第六十五圖

十六圖卽此種整流子式之感應電動機，圖示整流子一端之構造。

(四)多相機之優於單相機 多相電動機之適於平常用途，顯較單相機爲勝；第一點，多相機每匹馬力之價，賤於單相，其運用亦較爲有效。又多相機無需額外之器械，以產生起動旋力。由於此種事實，單相機之用祇以小量者爲限，及限於多相電力不能取得之處。

## 第八節 感應發電機

設以一感應電動機連接於多相電線，而以機械工能驅之，使旋轉於高過同期速度之速度（旋轉方向與用作電動機時同），則此機便成一發電機，能供給電力於總線矣。如此應用之感應機，名爲感應發電機（induction generator），或名異期（非同期）發電機（asynchronous generator）。



第六十六圖

Generator)。此種感應機必須連接於電壓與周波率均爲固定之電力線，且須驅動於此項周波率之同期速度以上時，方能發電。此機所供給之電量，全恃此機之速度；例如其速度高過同期速度百分之四，則其所發電量，即爲高過同期速度百分之二時所發電量之二倍。當用作感應發電機時，旋轉器速度大於磁場，此時之所謂移退率謂爲負數。

此種感應發電機之優點，在乎其短路時之特性。普通交流發電機如遇短路，則數秒鐘內可以燒燬，惟感應發電機則不然，一遇短路，自能停止發電，不致遭殃。故普通電廠中多採用之，與同期發電機並用。譬如一十萬啓羅瓦特之發電廠，以五萬啓瓦由同期機任之，餘五萬啓瓦則由感應機任之，如是短路危險可以減半。但感應發電機亦不宜多用，多用則工率因數必致減低，故此機以擔任半數之電力爲度。感應電動機既有此項發電作用，以此在電機鐵路上應用頗廣。例如電車下山時，可藉地心吸力驅動此機，使高於同期速度，以送還電力於總線。除此項節省電力而外，又可藉此機爲電氣制動機，免去特裝之制動器械。感應電動機用於起重機上，亦可用作發電機，其理同上。

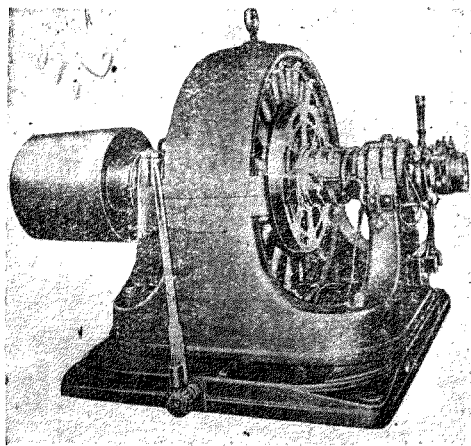


## 第六章 交流發電機

### 第一節 構造大要

交流發電機之構造，大略與直流發電機同，亦分磁電二部：在其磁部有鐵軛，磁極，勵磁線圈等；在其電部，有發電子鐵心，鐵輻，發電子線捲，旋環，刷子等，惟不如直流機之有整流子，且旋轉器有時爲磁場而非發電子。交流機之磁場電流，皆由另一直流機或蓄電池供給之，從無如直流機之能自勵者。較小之交流機，有時亦有旋轉之發電子與靜止之磁場，惟較大者往往反是。若旋轉者爲發電子，則電流之引出，雖經旋環及與此環相接觸之刷子，環之多少，視線捲之連接法而定，如分線捲爲二相，則需二環，如爲三相，則用三環。若旋轉者爲磁場，則勵磁電流之引入，亦經由此二物，計用環刷各二枚。磁場所需之電流爲直流，而發電子祇能產生交流，不適此用，故必取給於他機。

大交流機之所以令磁場旋轉而不令發電子旋轉者，是有數因。一者欲產生極高之電壓，必須增高磁場與發電子之相對速度，但發電子構造較磁場爲複雜，在高速旋轉時，易於爲離心力所損壞，故不如令磁場旋轉之爲愈。二者旋轉器在內，靜止器在外，在內者不若在外者地位之寬舒，今以發電子爲靜止器，則其銅線絕緣等物可得充分之地位。三者發電子既不附帶整流子，自無需乎旋轉。四者磁場之鐵心可不必用力弱之薄鐵片，而可改用堅實之鋼塊，其電壓低而絕緣物少，可以任受極高速度之離心力，而不致折裂。第六十七圖爲一普通之小交流機，其旋轉器爲發電子，有旋環三枚；第六十八圖則爲一磁場旋轉之交流機，能產生二千三百弗打之電壓，係供大電廠中之用者。此機速度甚低，故磁極數頗多，至於爲蒸汽臥輪機所驅動之機，則速度極高，磁極



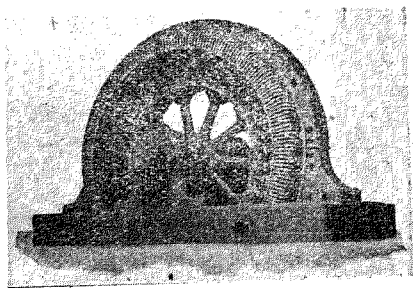
第六十七圖

僅有數個，其構造亦較爲堅密。

交流發電機所生交電流之周波率，視磁極之對數，及磁場或發電子之旋轉速度而異。發電子上每一銅線行經一對磁極，即產生一完全周波之電流，故每秒鐘之周波數（即周波率）等於每秒鐘內一銅線所經之若干對磁極。例如有一交流發電機，共有磁極十六個，即有磁極八對，其發電子（或磁場）之旋轉速度爲每分鐘四百五十轉，即每秒七·五轉。以七·五乘八，得六十，此即每秒周波數或周波率也。

## 第二節 磁場

交流發電機鮮有自勵者，即偶有之，亦不過容量極小之機，由此可知自勵法之不適用於此矣。故凡交流發電廠中必備有數具自勵之直流發電機，以供給交流發電機之磁場電流。交流機磁場



第六十八圖

線圈所用之電力，不及其發電量之百分之五，故勵磁之機祇需小量者已足。例如一千啓羅瓦特之交流發電機，僅需一二十五啓羅瓦特之直流發電機。有時每一交流機自備一勵磁機，或用皮帶連接於前者之動軸上，或同裝一軸，惟大電廠中則電鑰屏上另有一組勵磁電流之幹線，以數勵磁機供給之。所有交流機之磁場電路，咸連接於此組幹線。至勵磁機之驅動，則或用交流電動機，或用蒸汽臥輪或蒸汽機。交流發電機之磁場線圈，普通規定其電壓爲一百二十五弗打，此電壓與發電子線捲所生之電壓（高可數千弗打）毫無關係。磁極之數目，依交流機之速度與周波率而定（見上節）。磁極之構造，係用鋼片集成，其線圈作長方形，用銅線或銅帶圍繞，以電壓不高，故匝數不多，而所負電流則頗大。

## 第二節 發電子

如上文所言，大發電機之發電子都爲靜止器，卽軛狀之機架，軛之內周有槽若干，與動軸平行，所以容納線捲之銅線。有此線槽則磁場鐵心與發電子鐵心之間，祇有少許之空氣隙，磁路之磁阻

乃爲之大減。發電子鐵心（即軛）亦用薄鋼片集成，惟此鋼片更較磁場鐵心爲薄，約爲後者之半。鐵心中又製有氣溝，與槽成角直，俾冷空氣得流通其間，以導去銅鐵耗所發之熱。

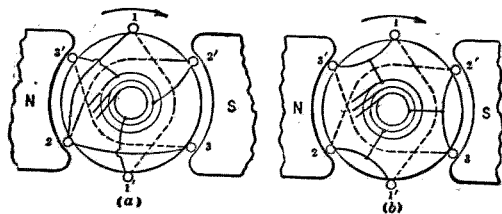
交流機之發電子線捲，頗似直流電機，而簡單過之；其圈數甚少，且皆連列相接。每一磁極之線圈數，不過六個，最多亦以十二個爲限。在直流機中，須用許多匝數極少之線圈，俾整流時不致發生火花，今交流機則並無整流子，此種對於線圈之限制，可以置而不問，此又其簡易處也。

發電子線捲有單相多相之異，視其連接如何而定，交流機之所以有單相多相之稱者，蓋卽由此。在單相之線捲，各線圈皆連列成一組，祇有兩端露出，故只用二個旋環，及二個刷子。在多相線捲，則分全部線圈爲二組，三組，或四組等等，各組皆相等而獨立；視組之數目，而有二相，三相，或四相等之別。最普通者，分線圈爲三組，是爲三相發電機。今日通用之交流發電機，屬此式者，約占全部中百分之九十五。二相機有時四旋環或三環；三相機則常用三環。

三相機之連接，有三叉及三角二種，茲分述如下。（甲）三叉連接：此連接法係將發電子上三組線圈之起端，連接一起，其末端則分別連接於三旋環上，見第六十九圖（a）。（乙）三角連接：此法見

下圖(b)法將線圈1之末端，連接於線圈2之起端，線圈2之末端連接於線圈3之起端，線圈3之末端又連接於線圈1之起端：即三線圈首尾相銜成環狀。次就連接之三點，引出三線，以接於三旋環上。此法在交流發電機中，應用不若三叉法之廣，大概用三叉法者，占全部三相機百分之九十，以其總線間之電壓高於三角連接故也。惟機之電量，則二者皆同。譬如有一三相交流發電機，其每相電流為 $I$ ，每相所生電壓為 $E$ （每相即每一組線圈）則在三叉連接之發電機，其每對總線間之電壓，即為 $\sqrt{3}E$ ，即為每相電壓之 $\sqrt{3}$ 倍，但每線中之電流，則仍為 $I$ ，與每相之電流同；若在三角連接，則總線間之電壓為 $E$ ，與每相電壓同，但總線電流則為 $\sqrt{3}I$ ，即為每相電流之 $\sqrt{3}$ 倍。

#### 第四節 發電機反應



第 六 十 九 圖

在交流發電機中，欲研究其發電子之反應作用，較直流發電機爲困難。直流機中之導線，在半轉中（即一百八十電度）所負載之電流爲定值，在下半轉中電流值同，惟方向則與前相反。此電流既穩定，則發電子線捲對於磁場之助磁或減磁之效應，自亦恆定。今交流發電機中導線所荷之電流，則繼續變更，故每一線圈對於磁場強度，常發生一周期的效應。在單相機中，全部發電子線捲產生一變動之效應於磁場；在多相機，則各線圈之個別效應，合而爲強度與方向均爲恆定之效應，與直流機相同。

在單相發電機中，發電子反應之總效應，係對於總磁場，作周期的加減，且使磁場橫過磁極作周期的擺動。此二項效應乃於磁極面中產生渦流，故單相發電機之設計，尤須特別注意，否則磁極中必致發熱，其產量乃爲之限制。

多相機之反應作用，可作向量圖以表示每相之磁動力，而後綜合之。例如二相發電子之磁動力，其向量互成直角，以此二者加之，即得磁動力之總量，其所以成直角者，以二相線圈相去九十度也。此二相磁動力之相加，爲一定值，等於其一相之最高磁動力，其方向亦恆定不變。

三相機之發電子反應之總效應，與二相機同，亦為一不變動之反應。反應之數量，特乎發電子電流之數量，等於每相最高反應量之一·五倍。反應之方向，視負載之工率因數而異，在落後之負載，則反應與磁場相反，前進負載，則與磁場同向。

## 第五節 定額耗損及效率

交流電機如發電機，變壓機等等之定額，實際皆不用基羅瓦特，而用基羅弗安。例如一發電機，其電流量為十安培，電壓為一百弗打，則其產量定額即為一千弗安，即一基羅弗安（1 K.V.A.）單相發電機或變壓器之定額，係以線端電壓或電流量，再以一干除之，即得基羅弗安數。例如一二千三百弗打交流發電機，有電流量一百安培，則其定額為  $\frac{2300 \times 100}{1000} = 230$  基羅弗安。如此機為二相發電機，每相能容一百安培，每相電壓為二千三百弗打，則其定額倍於前機，即為四百六十基羅弗安。若此機為三相機，其任二線間之電壓為二千三百弗打，每線容電流一百安培，則其定額為

$$\frac{2300 \times 100 \times \sqrt{3}}{1000} = 398 \text{ 基羅弗安。}$$



交流機中之耗損與直流機同，亦可概分為摩擦，風力，銅，鐵四種耗損。摩擦耗損在承軸中及在電刷下面。此一項與風力耗損，大都用經驗的公式表之，或用一分度電動機計量之。電刷與風力耗損，為量至微，除高速度之臥輪發電機外，往往略而不計。銅耗一部分在磁場中，一部分在發電子中。磁場耗損或勵磁耗損，計量甚易，僅須量其弗打數與安培數即得。在發電子則計量其電阻與電流，然後計其  $I_a I_a$  之耗損。在巨大之電機，此電阻量甚小，非直接計量所可確定。若發電子導線之大小為已知，則其電阻即不難計算。洩漏之磁流，常在發電子導線中產生渦流，於是銅耗乃益增，有時名之為負載耗損。

交流發電機之效率，等於輸出工率對於輸入工率之比，普通以百分數表之。其公式為

$$\text{效率百分數} = \frac{\text{輸出工率} \times 100}{\text{輸入工率}} = \frac{\text{輸出基羅瓦特數} \times 100}{\text{輸出基羅瓦特數} + \text{耗損基羅瓦特數}}$$

大發電機之效率曲線，大約如第七十圖所示之狀，此即表明在各種負載之效率。圖中所代表之發電機之定額為五千基羅瓦特，此時效率為最高；自五分一負載以上，效率均超過百分之八十，此部

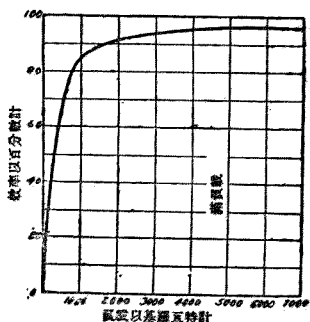
曲線甚爲平坦：發電機之優者，類皆如是。

## 第六節 並列運用與分工

大凡供給城市居民之電力，欲求發電之經濟有效，莫如集中所有發電機於一處，以其負發電之責。如是則管理簡，人員少，經費省，較諸分設數廠，經濟多矣。況電力集中則

發電量大，發電機之效率，愈大者愈高，此又一優點也。城市之大者，供電之量，往往有數十萬基羅瓦特之巨，非一機所能勝任，於是用大機數具，並列運用，以給電於同一總線。電廠之大者，發電機多至十餘架，咸並列以分任其負載焉。至於選定發電機之大小與數目，其理與直流機同，要以大小相等式樣相同者爲宜，蓋相同則修理之件，可以少備，而管理上亦較爲便利也。

電廠中既議定需用何種發電機若干架，則又應討論其連接之方法，或連列，或並列，孰者爲宜。實際上，所有供給電力電燈之線路，無論負載之大小，莫不需乎恆定之電壓。若發電機作連列連接，



第七十圖

則總線電壓，自必視機之數目而異。且連列運用則各機電壓必不穩定，除非動軸相接，方能免此。譬如發電機二具，並無機械的連接，而使之連列接於負載，則負載上之電壓繼續變遷，自零值以至一機電壓之二倍。故連列接法不適於數機之並用。

連列之外，惟有並列，應用此法，有宜考慮之點三。一者，若總線中已有電流，而以交流機連接之，則應如何留意，庶可運用穩當？二者，若此發電機所生之電壓，大於或小於所接之總線電壓，則結果若何？三者，數機並用時，其間負載之分配若何？此三點者，今依次答之如左。

設有數機已並列連接於同一總線，又有一機則欲連接於此線；試問在此連接之電鑰閉合之前，應具有若何之條件？茲簡單述之如左：

(一) 此機之電壓，必須等於總線之電壓。

(二) 此機之周波率，必須等於總線之周波率。

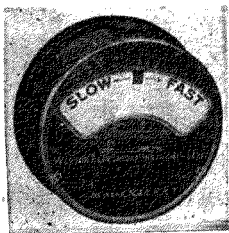
(三) 此機電壓之相位，必須與總線之相位相反。

(四) 此機電壓之波狀，必須與總線電壓之波狀相似。

以上前三項條件，均可用手術滿足之，乃運用者所能為，惟第四條件則非變更速度，變更磁場電流所能完成者矣。蓋波之形狀，為機之設計所限定，非運用者得以變更之；然事實上，所有新式電機，其電壓波狀，都為正絃波式，故第四條件類能滿足，無庸顧慮也。

使加入之機滿足此三項條件，而後閉鑰以接於總線，如是手續名曰同期化(synchronizing)。欲滿足前二條件，事頗易為；加入之機之電壓，可用磁場電阻器節制磁路電流以變之，其周波率則可變更原動機之速度以變之，蓋周波率與速度成正比也。至於第三條件，則可用一同期儀器以滿足之；此器或用電燈，置於發電機與總線間適當之處，或用一同期表(synchroscope)均可。

同期表乃一指示儀器，器之面上有一指針，或旋轉，或僅搖擺。第七十一圖所示之表，為前後搖擺式，較旋轉者為善。此表有獨立電路二，其一連接於總線，又一則接於加入之電機。此二電路所生之磁場，互相反應，乃使指針搖擺；表面有一標記，表示正當之同期地位，指針指此時，即可將電鑰閉合，此機遂與他機並用不悖矣。



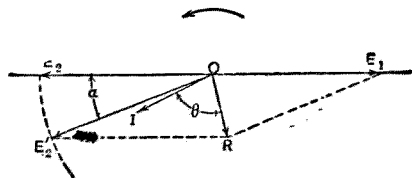
第七十一圖

此交流發電機既經同期化後，並不立即擔任負載。今欲使之分任負載，在理論上，自應減其磁場電阻，以提高其電壓；然此法並不能使之負荷。此機之電流表雖表示有電流流出，與電壓之增高成比例，但機之輸出電力，則並不見其瓦特表上有所指示也。由此可知電流表所示之電流，實爲一無瓦特電流，即反應電流，與其電壓成九十度角之相位差者。此反應電流並不供給負載，乃流行於並用諸機之發電子之間，故名循環電流。若電壓減低，結果相類，惟電流相位反於前耳。故知一機電壓之變更，不足以影響各機之分工，而祇能產生一循環電流，使發電子起不必要之發熱作用，同時則反應於磁場，以均平諸機之電壓耳。

其次之問題，則爲二交流電機之分工，既不因勵磁力之變而變易，則欲移一機之負載於他機，將用何法乎？按此二機若分任之負載爲均等，而欲使第二機多任負載，其法惟有增加此第二機之原動引擎之旋力而已——此法在理論上及實驗上，均可以證明之。今欲分析此問題，可先假定二機爲並列運用，且供給同等之電力於某種之負載。在此狀況下，二機之電動力適反其相位。又假定此二機之電動力爲相等，故二機之間並無循環電流。此二電動力即第七十二圖中  $O E_1$  與  $O E_2$ 。若

第二機之原動機（假定爲蒸汽引擎）增其汽量，則第二發電機之速度即驟增。然速度之增爲時甚暫，僅占幾分之一秒，迨第二機之相位較第一機爲稍進，其速度即回復常度；蓋二機每分鐘之旋轉次數必須相等，然後可運用於同期狀態。

第二機之相位，既被曳向前，其電動力之向量，即自  $O E_2$  移前  $O E'_2$ （見第七十二圖），進前之角爲  $\alpha$ 。此時  $O E_1$  與  $O E'_2$  之合量，非爲零而爲  $O R$ 。此電壓施於兩機之局部電路內，輸送一電流於二發電機之間，此電流即圖中之  $O I$ ，後於  $O R$  以  $\theta$  角。此電流  $O I$  幾乎與  $O E'_2$  同相，亦幾與  $O E_1$  成一八〇度之異相。此電流之結果，即是加於第二機已任之負載，所加之負載，即係此向量  $O I$  之所代表。至第一機則亦於其原有之負載，減去同等之數量。



第七十二圖

## 第七章 同期電動機

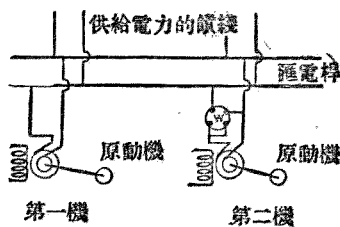
### 第一節 概論

上文言交流發電機之並列運用，以分任電廠之負載。今若有二機並用，而移去其一之原動力，結果則此機仍能繼續運行，旋轉速度仍與原動力未去前無異。茲爲說明其理，設此二機之原動機爲蒸汽機，旋轉速度爲每分鐘七百二十轉。今於一機上裝置一精密之量速儀器，以表示其速度，然後將連接於此發電機之蒸汽機，關閉其汽門。當汽門關閉時，試細察量速表之指針，以視其速度之是否下降以至停止，如常識之所預期，乃事實上此機非惟不停止，亦不減速。其速度竟未嘗降爲七一·九轉，而仍爲七二〇轉也。

夫電機之旋轉，必賴有工能以輸入之；今蒸汽機之汽門已閉，既不復供給以機械的能力，則其

所取給者，自必爲他機所給之電能無疑矣。假定此二發電機之並列運用，如第七十三圖所示，第二機之輸出工率，則有瓦特表W以指示之。又假定此瓦特表W之連接，在第二發電機幫助第一機擔任負載時，則表示正號之工率，即輸出之工率。今當第二機之原動機關閉汽門時，則見此W表示負號工率，即輸入之工率。此即表示第二發電機已被第一機驅動而爲電動機，此即本章所欲討論之同期電動機 (synchronous motor) 是也。故知同期電動機者非他，即交流發電機之用作電動機者耳。二者之構造既同，故本章不復贅述。

然此機何以以『同期』命名耶？曰：同期乃此機之特性，故以此命名，以別於其他非同期或異期之電動機也。交流發電機與同期電動機實一機而二用，其設計上雖稍有差別，而其相同之處，則有二點最爲顯著：一則二機皆屬他勵，即磁場電流必須取給於一獨立之直流電源，二則無論負載之大小若何，其速度常在同期速度。例如一十極之同期電動機，取用二十五周波之電力，則其速度



第七十三圖

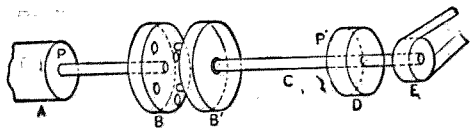


爲每分鐘三百轉，在無負載如是，在半負載如是，在全負載亦如是，即過負載亦無不如是。今此機若用作發電機，則在每分鐘三百轉之速度時，其所生電壓即爲每秒二十五周波。二者之速度與周波率相配合，故稱此速度爲同期速度 (synchronous speed)，此電動機之所以以『同期』(synchronism) 名也。

## 第二節 設喻

讀者欲明瞭同期電動機之運用原理，莫如設想一機械的比喻。第七十四圖即此比喻之簡圖也。設有一原動力機，例如蒸汽機，如圖中A處所示，此即代表同期電動機所取用之能源。啮合器B、B'代表一同期電輪，旋輪D代表電動機之電動子，經一柔軟而有彈性之動軸，與啮合器B、B'相連接。滑輪E上繞有皮帶，以拖動某種負載，代表同期電動機之負載。

啮合器之左半部B旋轉不息，以代表電動機所連接之有電流之線，其右



第七十四圖

半部B'則停止不轉，以代表電動機之線端。此時B與B'一動一靜，自不能嚙合；苟勉強爲之，則軸必破裂。故欲使B、B'嚙合爲一，勢必先用外力驅動C軸，與B同一方向，同一速度，迨B'上之針適與B上之孔相對，而後二者得以嚙合。此卽等於閉合電動機之同期電鑰也。由此比喻，則知欲起動一同期電動機，決不能立即將電機之線端，連接於電力線上；蓋以初動之時，其所生之反電動力之周波率甚低，不與電力線之周波率同等故也。故此機之起動必須另仗他力，其法詳見下節。

迨針既納入孔中，則假定D輪之上，有一P'點，與A輪上之P點相對。當C軸爲原動機A所驅動，而以E輪與皮帶拖動一負載時，此柔軟之動軸C，必因其兩端受相反之旋力而扭轉，扭轉之大小，則恃乎E輪所任之負載。今設C軸向後退扭，則P'必落後於P點，以若何之角度，此卽表示電動機之反電動力，亦每因負載之增減而移其相位也。

然無論C軸之扭轉之大小若何，P'與P仍旋轉於同一速度；E之負載愈增，則P'之落後於P亦愈遠。然若繼續增E輪之負載，過於C軸承受之力量，則軸必裂而爲二，而停止其運用矣。在同期電動機亦然，倘負載過度，則斷路器將截止其供給，以免電機之受損也。

同期電動機有特殊之弊病，曰追逐 (hunting)，即其電動子之速度，時高時低，搖擺於同期速度之上下，而有一定之周期（詳見下文）——此事亦可用此比喻以解之。上圖中之D輪與C軸，其全體自有一自然之擺動周期。但當D之旋轉，與A同一速度時，D亦能發生自然之擺動，使P搖擺於P之前後。若E輪上之皮帶，撲擊輪面，其周期等於DC全體之自然周期，則D之擺動將逐漸加烈，終至使C軸折裂也。

### 第三節 起動特性

前節之比喻，不特助讀者以明瞭同期機之運用，且使之易於記憶，而於此機之起動特性，資助尤多。起動一事，在直流電動機，可謂不成問題，無須仰賴於他機，或其他特殊之方法；交流電動機則不然，恆視此為一重要問題，如感應電動機之缺乏起動旋力（見第五章第四節），與此機之不能直接連接於電力線，皆其例也，而此機則尤甚。同期機之起動，須用一附屬器械，及已達同期速度與適當之電壓，始可接於總線，一如交流發電機之並列運用然（參看第六章第六節）。其所用之起

動機，普通爲一小感應電動機（約爲同期機定額之百分之五至百分之十）裝於同期機之電動子軸上。

起動同期電動機所用之感應電動機，其磁極對數至少須較同期機少一對，否則同期機卽不能行動至同期速度。此由感應機之旋轉有若干移退率（見第五章第三節）其速度常較同期速度（卽旋轉磁場之速度）小自百分之五至百分之十；今既少去一對磁極，則以同一周波率之電壓加之，其速度卽可稍增，以達同期速度矣。例如有一十極之同期電動機，則宜用八極之感應機起動之。設供給之電力爲六十周波，則十極機之同期速度爲每分鐘七百二十轉，八極機之同期速度爲每分鐘九百轉。倘欲令此起動感應機之速度，適等於同期機之同期速度，則其移退率應爲百分之二十（每分鐘一百八十轉）。至於感應機之電壓與相數，則應與同期機同，庶二機可同接於一總線也。起動時先以連接於同軸之感應機接於總線，以驅動同期機，迨此機已達同期速度，則停止感應機之電力，而移接於同期機。

又一起動法，並不另用一感應機以爲起動，乃令同期機之自身兼具感應機之作用。法於同期

機之電動子上，加一多相線捲，並以多相電流輸入之，以產生一旋轉磁場，蓋即借用此電動子爲感應機之靜止器也（參看第五章第二節）。此旋轉磁場於磁極面中產生渦流，渦流又反應於發電子而使之旋轉，此磁極面即等於感應機之旋轉器（參看第五章第三節）。惟茲之動靜兩器，與普通感應機相反，然動靜本爲相對，雖二者互易，而爲用則同也。同期機之電動子遂藉此感應作用，以增其速度；當此增速之時，同期機之磁場不予勵磁；迨已達同期速度，則勵磁力漸增以至規定之值。此時即可閉合同期電鑰，以取電力於總線，並截去產生旋轉磁場之多相電流，至是同期機乃自動擔任負載矣。同期機以此法起動時，其所取電流恆高至滿負載電流之二三倍，惟電流雖大而旋力甚小。旋力之大小，全恃渦流之反應作用；故欲增加旋力，必先減低渦流之阻力。其法於磁極面上加一銅網，以便渦流之運行。網以數銅桿製成，與動軸平行，而連合其兩端。此網不特減低渦流之電阻，以增加起動旋力，且能壓制電動子之擺動，即所謂『追逐』是也。

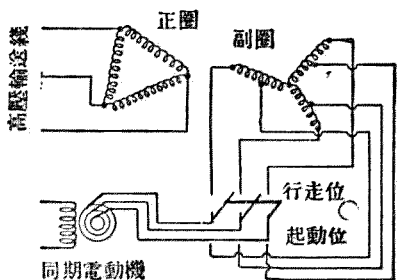
以感應法起動同期機時，其起動電流往往過大，故必設法減低其電壓，以免線捲之被燬。法於給電之變壓器線捲上，設半壓連接點；起動時連接於此點，迨速度將近同期，則藉一二向電鑰，移接

於全壓之點。第七十五圖表示此法之線路圖。起動時電鑰向下，取用半壓電流於變壓器之副圈；迨速度既高，則移轉向上，以取用全壓電流。

#### 第四節 運用特性

設有一同期電動機，去其負載而運用之，其磁場電流則在額定值；此時電動子中之電流甚小，適足供給無負載之耗損。今若變此磁場電流，在額定值之上下，則見電動子電流迅速增加；當磁場

電流在極高或極低值時，雖無負載，而電動子電流竟可遠出滿負載電流之上。此在各值磁場電流之電動子電流，若繪於直角坐標之圖上，則成一V狀曲線，如第七十六圖曲線3所示。今若加負載（機械的）於此機，至額定值，復變更磁場電流，則得圖中之曲線1。在半負載時，則得曲線2。此等曲線皆所以表示在一定負載時，電動子電流與磁場電流之關係，名爲『相位特性』或稱V狀曲



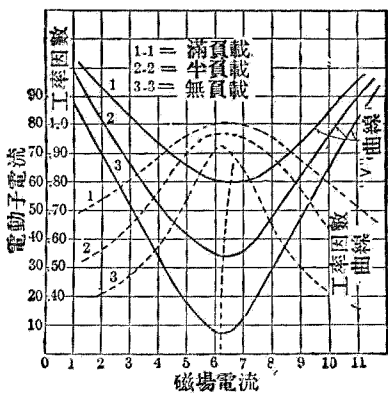
第七十五圖

線。

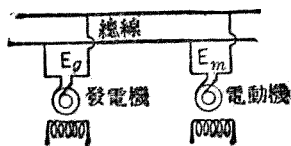
倘在上述之試驗，於計量電動子電流外，兼量輸入工率，則由此可以計算工率因數（假定總線電壓為已知。）在各種負載之工率因數曲線，見第七十六圖之虛線。從此等曲線觀之，可知磁場電流之變更，雖引起電動子電流之增加，然輸入之工率則並不增加，因工率因數同時減低故也。

故吾人可以斷言，不在規定值之磁場電流，常於電動子路中，引起一進前或落後之電流，其進退角度之大小，則恃乎磁場電流與規定值之距離。吾人若於測驗 V 狀曲線時，用一工率因數表，則可徵示磁場電流大於規定值時，電動機即自總線取給一進前電流，反之小於規定值，則取給一落後電流。

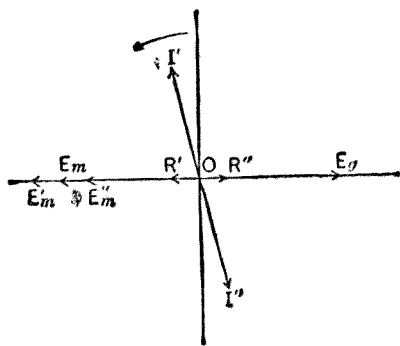
欲明此等事實之原由，可就同期電動機之電動子，與總線，及供給電力之發電機之發電電子所



第七十六圖



第七十七圖



第七十八圖

成之電路觀之，如第七十七圖所示。令  $E_g$  代表發電機之電壓， $E_m$  代表電動機電動子中所生之電壓。在此電路中之任何電流，必由於此二電壓之總量所生。

第七十八圖表示上圖電路中各電壓及電流之向量關係。第一，假定電動機無負載，其無負載耗損則略而不計，在此情形下， $E_m$  與  $E_g$  適相等而相反，二者之總量為零，故電路中無電流運行。其次，



假定此電動機之磁場過勵（即磁場電流超過規定額），電動機電壓乃隨而增加，即第七十八圖中之 $O, E_m$ ，較 $E_g$ 為大，故二者之總量為 $O R'$ 。此總電壓發生一電流，運行於二機之間，且落後於 $O R'$ 近九十度角，以二機之發電子與電動子均具極高之感應度故也。此電流即圖中之 $O I'$ 。此 $O I'$ 對於 $O R'$ 為落後，而對於總線電壓 $O E_g$ ，則為前進。若是則此過勵之同期電動機，對於總線之作用，不啻一凝電器也。反之，若減磁場電流至額定值之下，則其電壓低減為 $O E''$ 。此 $O E''$ 與 $E_g$ 之總量為 $O R''$ ，其所生之落後電流為 $O I''$ 。此 $O I''$ 對於 $E_g$ 為落後，約等於九十角。故同期之勵磁在定值下者，其對於總線之作用，猶一感應線圈。

## 第五節 同期機之功用

大凡電路之傳電容量（指電工率），恃乎接受電路之工率因數而異。例如有一電力輸送線，能負載六萬弗打之電流一百安培，若電流與電壓為同相，即工率因數為一，則其傳電容量即為六千基羅瓦特。然若收受電力之電路，大部分為感應電動機，及輕負載之變壓器，則此輸送線中之電

流，竟可落後於電壓至四十五度之巨。在此情形之下，此輸送線之負載容量，等於  $60,000 \times 100 \times \cos 45^\circ = 4,240,000$  瓦特，即 4240 基羅瓦特。此時輸送線之容量已大減，僅及前者之百分之七〇·七而已。故知工率因數高，則線之效用大，因數低則效用小；講究輸送電力之經濟者，不可不注意於此也。

是故欲增進輸送線之效用，減少輸送之耗費，惟有設法提高工率因數。按交流電原理，凝電器與感應度之作用，相反而相消。例如有一落後之感應電流，與一進前之容量電流，分析之，各得二分，一與電壓同相，一與電壓成直角，同相者為有效電流，垂直者為無效電流，有效者方向相同而相加，無效者方向相反而相減（參看上文第二第三兩章）。今輸送線工率因數之所以低者，大都由於用電機器之有感應度耳；若應用上述之『過勵的』同期機，則能發生一容量電流，以抵消其原有之感應電流，而工率因數乃於以大增，即欲進之於單位，亦易事也。此機普通連接於輸送線之末端，並不加以機械負載，至磁場過勵之程度，則視其欲糾正之因數而異。同期機之專供此用者，名曰『同期凝電器』，蓋直以凝電器目之矣。

## 第六節 追逐作用

設有交流電機二具，一爲發電機，一爲同期電動機，二機同連一軸，則當其旋轉於同期速度時，其發電子與電動子之相對位置，卽不難用適當之試驗儀器以比較之。假令吾人能立足於發電子之邊緣上，當其旋轉時，能觀見電動子上之某點。此點在吾人觀之，自應爲靜止之點，蓋事實上此點雖旋轉於極高之速度，然立於發電子邊緣上之吾人，則亦以同一速度旋轉故也。今若加一負載於電動機上，吾人則見電動機之電動子，旋轉稍緩，歷時不過數分之一秒，卽見吾人觀察之點，已向後退移數度，此時電動子卽回復其原有之同期速度，而該點又成靜止，不過位置稍後耳。

同期電動機之設計完善者，其作用一如上述。在一定之負載，電動子上之任何一點，對於發電子上之一固定點，有一定之相對位置。惟設計不善者，此機往往發生一弊病，卽電動子上之此點，常搖擺於其適當之中位之前後，故一時電動子移至中位之前，又一時則移至中位之後。電動子作此等搖擺時，其平均之旋轉速度，適爲同期速度。此等擺動名曰『追逐作用』。電動子之追逐，有一自

然之擺動周期，一如鐘擺之有自然周期然；所謂周期者，即每一完全擺動（一往一還）所經之一定的時間也。

欲查察同期機之是否有追逐作用，可以以下二點爲證：一該機之瓦特表指針，時時搖擺；二旋轉時嗡嗡之聲，變爲時斷時續合乎節拍之音。追逐作用乃同期電動機之病，其結果，小則失其均速之優點，大則失其同期，甚至停止其運用。蓋電動子亦有一定之自然周期，與鐘擺同，倘此周期與追逐之周期同，則搖擺愈甚，終至與同期相差過遠而停止。

阻止追逐之法，可有數種。其一法爲加一飛輪於電動子軸上，以變其自然周期，使不與追逐之周期同。又一法爲加極粗之銅網或銅柵於磁極面，藉渦流之反應以阻止之。若此追逐作用因負載之不均勻而起，如因皮帶之撲擊輪面，則應首先去除此弊，其追逐自然停止矣。

## 第八章 變流機

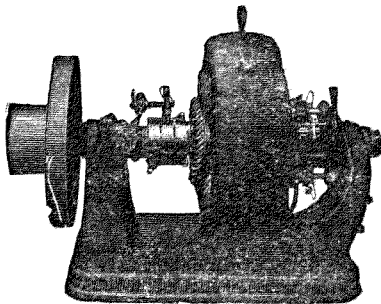
上文曾言交流之優點，在於輸送之經濟，及其電壓之易於變換，故近時電廠所發之電，多屬交流；然直流亦自有其特殊之應用，如車輛上之電動機，及光度極強之弧光燈，皆須取給於直流，故必須有變換交流為直流（或反是）之機械，應可使交流直流各盡其利。此種變流機器（converter），頗有多種，今擇要言之，一曰『同期變流機』（synchronous converter），二曰『電動發電機組』（motor generator set），三曰『振動整流器』（vibrating rectifier），四曰『水銀整流器』（mercury rectifier），請分述如左。

### 第一節 同期變流機

同期變流機者，實由一直流發電機及一同期電動機合組而成。變流機之發電子，及其線捲，為

此二機所共有，發電子之一端，有直流整流子，其他端則有交流之旋環。變流機自此環以取用交流電力，運用如同期電動機；同時整流子則輸出直電流，一如直流發電機。電動機與發電機之電流，同時流行於同一之線捲中，受同一磁場之感應。是故同期變流機等於一電動發電機組，凡欲變交流為直流者，以此機之應用為最廣，在機氣鐵路上，尤為通用。此機亦有用以變直流為交流者，此則名為反變流機。

第七十九圖，表示一三相之小同期變流機，其外貌頗似一直流發電機，惟發電子之一端，添加三個旋環耳。今若運用此機為同期電動機，其電動子乃旋轉於同期速度；但吾人假定此電動子之動，並不由於同期機之作用，而由於他機之拖動，則此電動子即一變而為發電子，其線捲所生之交流，經整流子之作用，遂從刷子上輸出一單向之直流。倘以負載電路連接於刷子，則該路即得取用直流電力。直流電力之輸出愈增，則交流方面之輸入亦增——在



第七十九圖

實際上，交流輸入之量（以瓦特計），常等於直流之輸出量，及機中之耗損。此機之旋轉，由於同期電動機之作用，故無論負載之大小，即無論直流輸出量之大小，其速度常為同期速度而不變。以變流機之直流方面而論，發電子之速度既恆定不變，則刷子上之直流電壓，自亦不因負載之大小而變矣。易以更確切之語言之，即任何變流機，其交流電壓與直流電壓之比，為一常數。又此電壓比率，與磁場電流，交流之周波率，及機之大小，均無關係；惟與線捲在交流端所分之相數則有關。故三相變流機之電壓比率，不與單相者同，但同是三相或單相之機，則不論電量之大小，周波率之高下，仍同此比率也。例如單相變流機，其交流電壓之最高值與直流電壓同，故交流電壓之有效值，等於直流電壓乘  $\frac{1}{\sqrt{2}}$ ，即交流與直流之電壓比為  $\frac{1}{\sqrt{2}}$ 。此比率為單相機之常數，與速度，極數，大小等無關。又如三相變流機，交流電壓之有效值，等於直流電壓乘  $\frac{1}{\sqrt{2}} \times \sin 60^\circ$ 。（此  $60^\circ$ ，即相位差角之半，）即交流電壓與直流電壓之比為  $0.612$ 。其他二相四相等之電壓比率，可由此類推，即以相位差角之半，代入上式可也。

同期變流機之輸入方面，原係一同期電動機，故必須設法以助其起動。今通用之起動法，共有

三種：一從整流子端起動之，用之如直流電動機；二從旋環端起動之，用之如感應電動機；三用某種輔助之起動機，如小感應電動機等。

(一) 直流起動法 用此法起動，必須有直流電力可用，其電壓必須與此機所輸出者相等。若電廠中有變流數架，其中有已運用者，則未起動者之直流電力，即可取給於已用之機。起動之機之發電子路中，須接一電阻器，及速度漸增，則電阻漸減，又須變更磁場電阻，使速度合乎同期，然後閉合電鑰，以連接於交流總線。

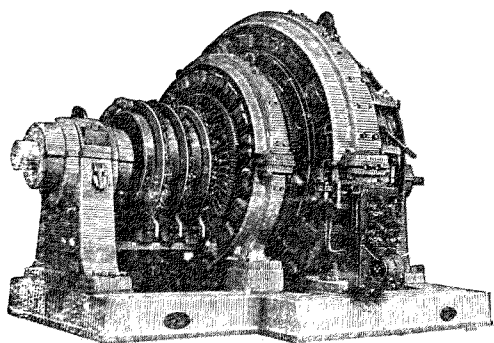
(二) 感應機起動法 用同期機為感應機，以助其起動之法，今漸成普通。初從變壓器取用半壓電流，同時截斷其磁場電路。及速度已抵同期，則改用全壓電流，並閉合磁場電路，磁場電流則逐漸增加，以達規定值。

(三) 輔助起動機 此法須用一小感應電動機，其旋轉器則直接裝於變流機軸上。其靜止器之線捲電壓與相數，均須與變流機同，其大小祇須足供運用變流機於無負載及同期速度之所需。感應電動機之磁極數，須較變流少一對，其定額約為變流機之百分之五至百分之十（參看第七

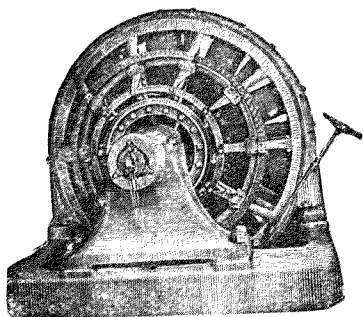


章第三節)

上文曾言變流機之交流電壓與直流電壓，有一定之比例，交流電壓不變，則直流電壓亦不變。但普通所用直流，每欲其電壓隨負載而俱增，庶幾導線中之電壓降可以抵消，低輸送端部之電機，



第八十圖



第八十一圖

仍得享用固定之電壓。欲節制直流電壓，不外以下二法：(甲)用升壓機變更變流機所受之交流電壓，或變更變壓器之電壓比例，或用感應度均可；(乙)變更交流電壓之波狀。第八十圖即應用甲法之升壓機，以變更直流電壓之同期變流機。第八十一圖則應用乙法之分極變流機，其磁極分裂爲二，一大一小，藉此變更交流電壓之波狀，以爲節制直流電壓之法。

## 第二節 電動發電機組

用同期變流機從交流取直流之法，非不簡捷經濟，然此機有一大缺點，即直流電壓之難於變易是也。大凡用直電流者，每欲其電壓之易變，如礦場所用之直流，其尤著者也。同期變流機雖亦有種種方法，以節制直流之電壓，顧其法太複雜，且所變之範圍甚小。能滿足此項需要者，厥惟電動發電機組，此即交流電動機與直流發電機所組合而成者也。此電動機，或爲感應，或爲同期，均無不可；此機接受交流電力，以驅動直流發電機。電動機與發電機，或連接一軸，或用皮帶牽動。發電機之磁場，可以自由節制，其他種種特性，亦可不受電動機之限制。以費用論，此組自不敵同期變流機之經

濟，且效率亦不及後者之高也。惟其所得於節制電壓之利者，猶足以償其所失也。

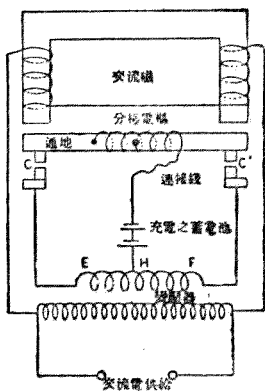
### 第二節 振動整流器

上節所述，均指需用巨量之直流而言；然亦有所需之直流，為量甚小，而手邊祇有交流可得者，如汽車上之蓄電池，即其主要之例也。其所需之電量既小，若應用電動發電機組，或同期變流機，自嫌其太費，故必須有更簡單之機械以應之。振動整流器即最適用於此種情形之器械，普通能供給十弗打左右之直流電數安培。此器之構造，有一分極之電樞，設法支架之，使受一交流電磁之作用後，能前後振動。此器之線路圖，見第八十二圖，其外部之攝影，則見第八十三圖。當E點對於H為正號時，蓄電池即經接觸點C而被充電，及F點對於H為正號時，蓄電池又經接觸點C'而被充電。此等接觸點可以移動，以免火花之發生。此整流器甚小，運用亦頗簡單，誠一有用之電器。蓄電池之連接於整流器，決無誤接之弊，且如遇交流電壓停止時，亦不致放電；故此器乃一極可靠之器械。

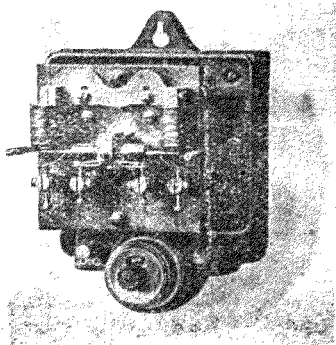
變交流為小量直流之器，除上之振動整流器外，尚有一旋轉整流器。此器有一整流子，用一小

### 第四節 水銀整流器

同期電動機旋轉之。整流子上有若干截片，其數與電動機之磁極數同，每相間之截片則連接一起。此每組之截片，經由旋環及刷子而接於交流總線。刷子置於整流子上，充電之蓄電池則連接於刷子。刷子之位置，必須留心較正，庶可免除整流器上之火花。



第八十二圖

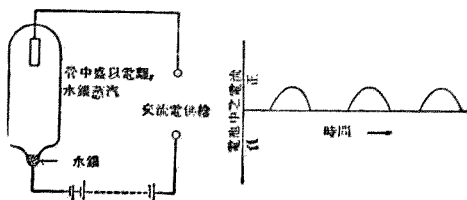


第八十三圖

以上二器皆不適用於多量直流電力之電路，若強用之，必致發生火花於接觸之點，且須時時留意其運用。水銀整流器者，乃裝有電離水銀蒸汽之玻璃管（管中已抽盡空氣），其一端有水銀，又一端則有如鋼鐵等之金屬，此水銀蒸汽為導體，惟祇能作單向之傳導（即電流祇能向前流去，不能向後倒流。）設以交流電壓加於管之兩端，則惟水銀端為負，鐵端為正時，方有電流通過，反之則電流不能流入。故在此水銀管內，電流祇能自鐵流至水銀，而不能自水銀流至鐵片。故此管可用作整流器，變交流為直流。此管用以充電於電池之線路，及其管中經過之電流狀況，具見第八十四圖。此種電流，名曰『脈動電流』，雖為單向之直流，然非勻靜之連續電流，僅能供電池充電之用，而不適用於電動機與電燈。但近來水銀整流器之主要用途，則為弧光燈，然如第八十四圖之電流，則決不能適用於此燈也。

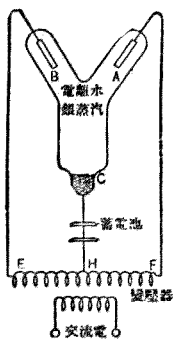
第八十五圖為一改良之水銀蒸汽管，此管有二陽極，即A B二鐵片，能將交流波正反兩部，完

\* 所謂電離者，指氣體原子之變其常態；即原子上已釋放一小量之陰電，名為電子。經過此變化之氣體，能自由傳導電流；但在原狀之氣體原子，則絕難傳電，為一極善之絕緣體。欲使氣體電離，可用電花通入，或利用放射物如銻質等之放射亦可。



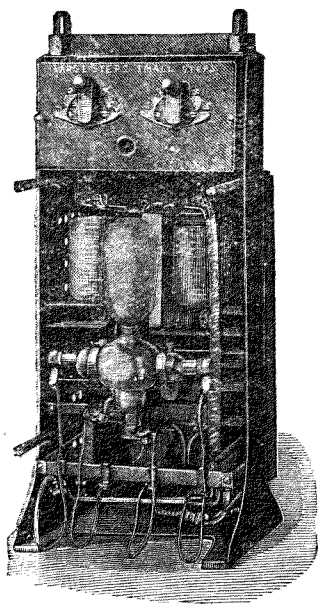
第八十四圖

全整理為直流，非如前者之僅令通過向上之半波。充電之電池，連接於陰極（即水銀端C）及變壓器中心點H之間。當F點對於H為正號時，電流即經陽極A而流入管中，以充電於電池；當E點對於H為正號時，則電流經陽極B而流入管與電池中。故電池中之電流，成第八十五圖所示之狀。



第八十五圖

水銀整流器有主要用途二：一爲充電於電池；二爲供直電流於弧光燈。其用以充電於電池者，電量不一，小者不過三安培，大者可五十安培。電量之更大者，其玻璃管因受熱過度，有破裂之虞，於是有利用金屬管，浸入油中，以爲減熱者。但若用金屬管，則須擇不與水銀混合之金屬，方爲合用，在金屬中似以鐵爲最適於此項之需要。然鐵質之管，難以維持適當之真空，故水銀管之能適用於巨量之電流者，猶在試驗時期也。倘此問題果能解決，則電機鐵路上所用之同期變流機，皆將以此管代之矣。



第八十六圖

佛來銘式之弧光燈，須有直流以運用之。連列之弧光燈制，以取用於定流之變壓器爲最便，此變壓器之供給，自爲交流電力。變壓器之副圈，並不直接連接於燈路，乃中經一水銀管，以供給整理之直流於弧燈。定流變壓器之功用，在供給一定量之電流，一若路中未加水銀整流器者然。水銀整流器之供蓄電池充電用者，見第八十六圖之攝影；此管設計可負載三十安培之電流，其運用壽命，擔保有四百小時之久。但事實上，則此等水銀管之壽命，往往在一千小時以上；其所以毀壞者，在乎真空之變更也。



## 第九章 單相整流電動機

### 第一節 單相連列電動機

大凡電動機之用於車輛者，必須有極高之起動旋力，及一變易之速度負載曲線（即速度可隨負載而異，）且當運用於相差極大之速度時，仍有優美之效率（即效率不甚因速度而變，）以上三種條件，在前述之各種交流電動機，鮮有能滿足者。例如感應電動機，其速度幾乎固定，與負載之大小無關，苟欲調變其速度，則非嫌連接之複雜，即嫌效率之減低，終不能得滿意之運用。又如同期電動機，其起動旋力極小，其速度亦為固定，與負載無關，故此機尤不適於電車之用。

惟單相連列電動機（single phase series motor）則不然，其起動特性與運用特性，頗與直流通連列電動機相似，頗合於電機鐵路之用。此種交流電動機，今已專製為鐵路電動機，成效頗著，惟

較之直流連列機，則猶有所未逮，故其用途尚不若直流機之廣。今各國電機鐵路，大都用直流連列電動機爲原動力，然自總廠所發之交流，變爲直流以行駛電車，其間所經步驟，耗損殊多，結果則效率甚低，車輪所用之能力，不過總廠電力百分之四十五耳。倘用交流連列機，則交流直接可用，手續簡省，耗損大減。故交流機之構造，苟能與直流機有同等之效率，同等之可靠，則所有鐵路電機，皆將盡易直流機爲交流機矣。

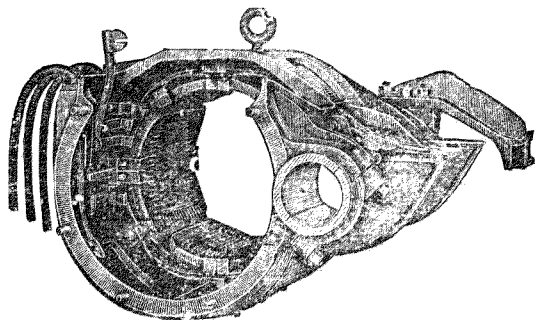
(一) 運用原理 交流連列電動機之運用原理，係根據於直流之連列電動機。試以直流連列機連接於交流電線，則磁場電流之交變，與電動子電流爲同相；按佛來銘左手定則，既知磁力線與電流之方向，則可以斷定電流線之行動方向，若前二者同時反其方向，則行動之方向仍不變；故可斷定此機之旋轉常依一方向進行，並非前後擺動，如普通人之所預料也。故連列電動機於直流交流二者，均可適用，此即交流連列機之所由製也。然交流機之構造，並不與直流者同，此因直接採用直流機於交流，有三種缺點：一爲線捲之阻抗太大，旋力極低；二因交流磁場之變更，輒與磁極中之磁遲耗損與渦流耗損甚大；三因整流子與刷子間之電流太強，往往發生火花。有此三弊，故交流連

列機之構造，不能不加以改良，以謀對於交流有特殊之適用。

(二)構造 直流機磁場之磁流爲定值的，故其軛及磁極可用全塊鑄鐵，無需分片，惟電動子則以其磁流之時變，則用薄鐵片合成；今交流機則二者之磁流均爲變值，故均須以鐵片製成。以故交流機之構造，決不能如直流機之省儉，即機械之堅固，亦不如也。

交流機之磁場線圈，匝數較直流者爲少，且無突出之磁極，其外貌頗類感應電動機之靜止器，蓋線圈皆嵌入槽內也。然磁場線圈並不將各槽裝滿，乃留出若干槽，以嵌入另一組線圈，名曰抵消線捲。第八十七圖，表示一交流鐵路連列機之磁場線捲；此磁場已裝配完成，預備納入電動子矣。

交流連列機之電動子，與直流機有密切之相似；所不同者，線捲之繞法耳。在交流機電動子上，每一線圈之匝數甚少，此等



第八十七圖

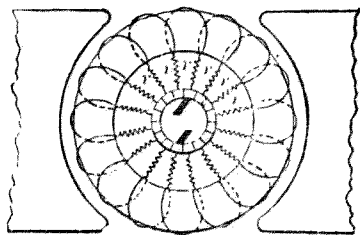
線圈並不直接連接於整流子，惟與所謂電阻引線者相接，詳見下文。

(二) 工率因數 此交流連列機當運用於交流電路之時，其工率因數甚低，鮮有在百分之三十或四十以上者。此則由於磁場線捲與電動子線捲之有巨量之感應度耳。工率因數小則效率低，此電機工程學者之所通知；故此機之感應度，必須設法以減低之。抵消線捲之設，所以反其磁流之方向，以抵消電動子之感應度，而使之幾等於零。若磁場線捲，則惟減其匝數以減小之。此抵消線捲繞於磁場槽內，其所生之磁動力，恰與電動子相等而相反，故電動子即失其感應度。此線捲或與電動子連列，或自成一閉合電路，或與磁場線捲連列，而成一獨立之閉合電路，視各式電動機而異。

此機電動子之感應度，雖已由抵消線捲抵消之，然磁場線捲則猶有若干之感應度，故供給之電力，必須為低周波率，普通為以二十五周波為標準，亦有低至十五周波者；若周波率較高，則磁場線捲之感應電抗（等於  $X_{sc}$ ），亦必隨而增高矣。又此機之磁流密度，亦宜減低，以免磁場鐵架中，發生重大之磁遲耗損與渦流耗損。又欲產生所需之旋力，必須增加電動子上之導線數目；然導線雖增，而感應度則以有抵消線捲之作用，並不因而增加也。

(四) 整流作用 整流一事，在直流機中，早爲一困難問題，今在交流機，則其解決之法愈難。直流機中因整流而發生之種種困難，在交流機莫不有之，而交流機又有一難點，即磁場線圈對於電動子線圈，有一變壓器之作用，能於刷子所接成短路之電動子線圈中，產生一巨量之電流是也。蓋磁場線圈不啻一變壓器之正圈，而被刷子接成短路之一部分電動子線圈，則猶變壓器之副圈，副圈受正圈之感應，乃產生一強大之電流，流行於刷子與整流器之間，遂使整流子上起巨大之火花。除去此弊之法，在直流機則採用整流磁極，但對於交流機，則此法爲不適用，有效之方法，惟有加電阻線以緩此副圈電流之勢耳。

(五) 電阻引線 此電阻線加於電動子線捲引線與整流子之間，故名電阻引線。此線之電阻，約等於線圈本身之二倍，即第八十八圖中之  $r$ 。此線加入後，可使整流子與刷子間之變壓器電流，較未用此線時，減爲五分之一。此等電阻線，對於全部電動子線捲之電阻，所增無幾，惟在此變壓器電流之路中，則已增加其電阻至五倍之巨。此法據實驗報



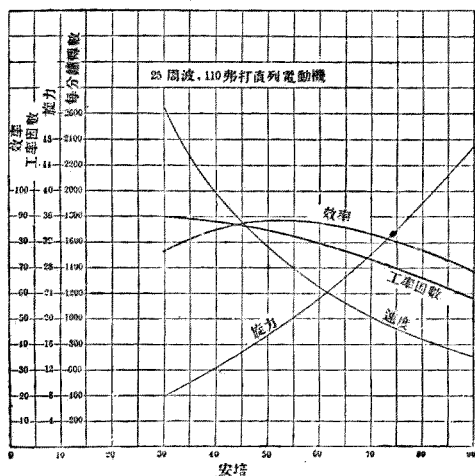
第八十八圖

告，可使交流連列機，雖運用於任何負載，亦不致整流子上有火花之發生，且此電阻線亦經久耐用，不易損壞也。

(六)運用特性 此交流連列機之運用特性，頗與直流連列機相類。第八十九圖即一小連列機之試驗結果。此機之旋力，或拖曳力，幾與電流之平方成正比，增加，速度最低時，旋力為最高；此即其適宜於拖曳車輛之主要特性也。其效率在各種負載，尚在高度，惟較直流機為低，此由其有額外之鐵耗銅耗故也。此機速度隨負載之增加而漸減，此點亦頗適用於車輛者。

## 第二節 抗拒電動機

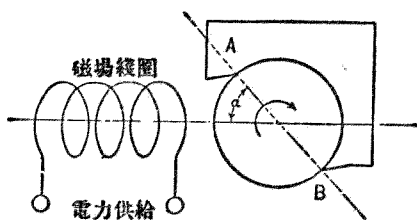
此抗拒電動機 (repulsion motor) 有靜



第 八 十 九 圖

止器與旋轉器二部，與感應電動機同，靜止器上繞有線捲，是為磁場，旋轉器亦繞有線捲，捲之端部，則連接於其整流子之各截片，整流子上有刷子，其狀頗類直流機之電動子。惟電動子線捲並不連接於電力線，此則與直流機及前之交流連列機不同處也。此機為托馬斯 (Elihu Thomas) 於一八八七年所首創，迄今仍未見其有大用也。此機之運用特性，極似交流連列機。其優於交流連列機處，在其電動子不與電力線相接，而以磁場承受電力，故其所用電壓，可高於連列機。

(一) 運用原理 此機之運用原理，可就第九十圖表明之。其磁場線捲連接於電力線，乃產生一交變磁流，流經電動子中。電動子之刷子，本接成短路，而刷子 A B 之平面，則與磁場方向成一  $\alpha$  角。電動子線圈受此交變磁流之感應，則生一電動力，此電動力復產生一電流，運行於其線圈中，及連接刷子之短路中。電動子導線既載有電流，則反應於磁場，而生旋力。此旋力之大小，恃乎上圖中之  $\alpha$  角之大小，旋力之方向，與

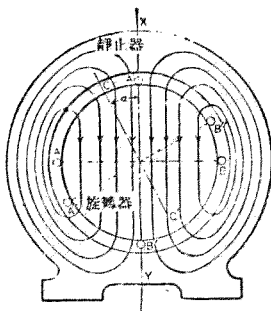


第九十圖

$\alpha$  角開展之方向同。由上觀之，則此機之作用，實一變壓器耳。磁場為正圈，電動子為副圈，正副兩圈發生反應，乃起旋力，至旋力之所以能繼續產生，以推轉電動子而不息者，則全賴乎其整流子及接成短路之 A B 二刷耳。

(二) 旋力 此機之旋力，所以視  $\alpha$  角而異者，其理可從第九十一圖見之。按電動子線圈之被刷子短接者，其平面常與刷子之平面（第九十圖中之 A B）成直角。例如在第九十一圖中，此短接之線圈在 A B 時，刷子之位置則在 X Y，其平面與磁場平行。此時 A B 圈中，受磁場之感應而生一強大之短路電流，此電流亦生一磁場，按楞次定律，則此磁場必與前者相反。此二磁場極性相反，猶如相反二磁鐵並置一處，則二者相吸，不生運動。故知刷子之平面與磁場平行時，即  $\alpha$  角為零度時，電動子上所受之旋力為零。

今若令刷子之位置，處於圖中之 A B，此時短接之線圈，則在 A' B'。今線圈平面既與磁場平行，



第九十一圖

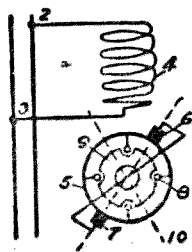


則圈中自無電流感生，既無電流，即無旋力。故  $\alpha$  角為零度或九十度時，其電動子均無旋力可生。

今復令刷子移置圖中之  $C, C'$ ，此時短接線圈則在  $A, B'$ ，圈中因磁場之感應而生電流，此電流與磁場反應，遂生旋力，使電動子隨而旋轉。當磁流交變時，旋力之方向不變，因電動子電流亦同時交變，結果則二者皆如不變者然。此機常用以代替連列機，或用以起動單相之感應電動機。

### 第三節 單相定速電動機

此機之電路，見第九十二圖。其靜止器有一磁場線圈 4，其旋轉器則有一整流線捲 5，短接於 6, 7 兩刷子間，刷子之中心線，則與磁場圈中心成一角度。9 為一離心器，當旋轉達同期速度時，能離開中心，而短接整流線圈上之若干點，如圖中之 8 等。於是此機之特性，乃變其變速性而定速性，無論在何負載，其速度常為同期而不一。實際上，此離心器械每置於旋轉器內部，在整流器之對端。此機能自行舉起其刷子，以減少整流器之摩擦，並以減低運用時之聲響。此

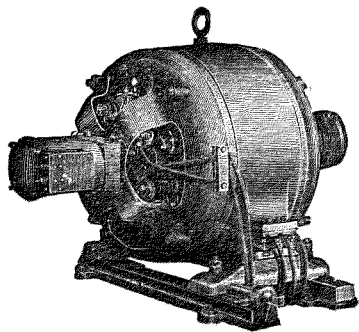


第九十二圖

機之起動與停止，大都用一單連之雙極電輪爲之。其較大者，則用普通之直流電阻起動器。此機爲美國瓦格涅 (Wagner) 電機製造公司所造，故名瓦格涅 B A 式電動機。

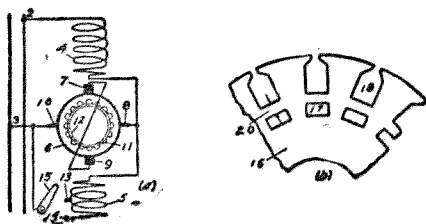
#### 第四節 單相鼠籠電動機

單相感應電動機之缺點，在乎起動旋力之弱小，及運用時工率因數之低，因是而有此單相鼠籠電動機之製，以彌補其缺陷。此機既有整流線捲，又有鼠籠式線捲，且有刷子二對，相隔九十度角。此機攝影，見第九十三圖。其電路則見第九十四圖 (a)，圖 (b) 則表示其電動子上裝設二種線捲之槽。線槽 18 內裝整流線捲，其下 17 內則裝鼠籠線捲，蓋不啻合普通直流機與感應機於一機也。第九十四圖 (a) 中之 4，爲磁場線捲，5 爲抵消線捲，同繞於靜止器之內周。7 9 爲正刷，永遠短接，其中心線與磁場線捲之中心線



第九十三圖

平行；10 8 爲副刷，與正刷成九十度角。當起動時，線捲 4 連接於電力線 2 3 之間，並經 10 8 兩刷，與整流線捲 6 連列，線捲 5 則開斷，如圖所示之狀，迨該機旋轉已達規定速度，則將電鑰 15 連接於 13 點或 14 點。若與 13 點相連，則在多數負載，其工率因數即進而爲一。若連 14 點，則在無負載時，運用於進前之工率因數，在滿負載則因數爲一。此機之優點，在起動時有充分之旋力，運用時則有單位之工率因數，此皆非單相感應機所能有者，然以一機而兼備兩種線捲，其構造之複雜，已倍於感應機，況有整流子抵消線捲等件，其造價自亦隨而增高，故其所得於此，即有所失於彼，二者適相抵消而已。其他有整流器之交流電動機，種類繁夥，在四十種以上，雖運用各有特長，然權其得失，則亦若是而已矣。



第九十四圖

