

感应电动机文辑

(第三集)

王 群 祐 主 編

科技卫生出版社

-53

內 容 提 要

本書是繼第一集、第二集之後由“電世界”月刊中選輯有關感應電動機的絕緣、起動、保安、自動工作、功率因數、維護和檢修等三十八篇彙集而成。對於從事電工的技術人員，提供了很多實用參考資料。

感 應 電 動 機 文 輯

(第 三 集)

主 編 者 主 羣 祐

科 技 衛 生 出 版 社 出 版

(上海南京西路 2004 号)

上海市書刊出版業營業許可證出 093 号

上海市印刷四厂印刷 新华书店上海發行所總經售

开本 787×1092 綫 1/27 印張 5 1/3 字數 129,000

(原科技版印 13,235 冊)

1959 年 1 月新 1 版 1959 年 1 月新 1 版第 1 次印刷

印數 1—10,000

統一書号：15119·132

定价：(十二) 0.70 元

目 錄

三相換向式電動機	史鍾奇	1
珂矢秦珂感應電動機圖及其應用	張理	12
電動機新產品製造中的幾點体会	陳常興	18
繞製電動機繞圈簡述	陳常興	20
感應電動機轉子的動平衡	尹桐文	25
矽鋼片絕緣處理	姜承讓	34
電動機的浸漆與烘培	陳常興	39
交流電動機的絕緣試驗	樊元武	45
感應電動機舊壳繞新線的簡捷計算法	蔣鴻金	50
蘇聯的電機絕緣等級介紹	趙鉄藩	56
絕緣漆	祝宗壽	59
電動機的銘牌	王羣祐	65
辨別起端和末端	李慧生	73
再談“辨別起端和末端”	賈仲·楊光宗	75
起動自耦變壓器及起動抗器之選擇	陳敦錫	80
用圖解法計算捲繞型電動機的起動電阻	金乃文	84
怎樣使 500 伏感應電動機能用在 380 伏電源上	楊福生	88
談水泵用的電動機	文	96
礦井水泵和捲揚機的馬達容量	宋寶愷	104
水泵的自動工作	韋世英	108
再談電動水泵的自動工作	安繼成·孫火壽	111
備用泵浦自動工作的裝置	葉新材	115
電動機的自起動問題	李昌齡	117
礦井排水用電動機預熱的新方法	宋執謙	124
提高金屬加工機床電動機的功率因數	胡汝鼎	128
消環型電動機的同步運行	劉乾業·趙為信	130
三相 Y 接電動機一相斷路的保安裝置	潘星平·洪思沂	133
電機漏電自動斷電裝置	高遐齡	139

三相換向式電動機

史 鍾 奇

感應電動機在工業方面的應用很廣，不過其速率約近恒定，對於某種用途殊感不便。普通所用變速方法，不外下列幾種：(1)變換磁極數；(2)變更頻率；(3)插入電阻於轉子電路中（即滑環式電動機）及(4)串級法。前兩法需要附屬設備（已詳電世界月刊三卷九期感應電動機之速率控制一文），第四法需用兩只電動機，此三者之速率變更範圍均屬有限。第三法雖可使速率連續變動，但因插入電阻而轉子電阻的功率損失增加，效率乃隨速率之降落而減少，顯然不甚經濟。要使得速率可以廣泛地作連續之變動，只有引入電壓於轉子一法。

電壓變更速率之原理

感應電動機在担荷負載時，其轉軸上受有反轉矩，欲使電動機能勝任此負載，其轉子所生之轉矩必須能克服此反轉矩。欲產生此需要之轉矩，其轉子必須有相當之感應電勢以產生適足之電流（轉矩與轉子電流及磁通成比例，在感應電動機中磁通約近恒定，所以轉矩隨轉子電流為轉移）。因此在負載加重時，電動機轉子之速率必須降低，即轉差率加大，方能以較大之相對速率割切旋轉磁場而產生適當之應電勢。

反之，如負載不變而變更其速率，則轉子應電勢也隨之變更。若減低其轉子速率，則轉子與磁場間之相對速率加大，應電勢變大而轉子電流變大，其產生之轉矩將超過負載所施之反轉矩。反之，若升高其速率，則產生之轉矩將不足应付負載。所以在負載恒定時，唯有引入一電壓於轉子內，以輔助或抵消其應電勢，然

後速率才能變更。

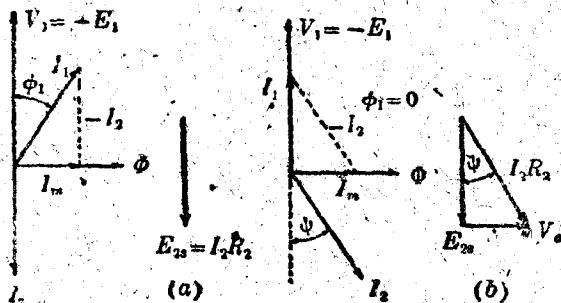
若引入之電壓與轉子應電勢為同相而互相輔助，則欲產生與某值反轉矩相當之電流，其轉子本身所需之應電勢可以減少。就是說轉子與磁場間的相對速率可以降低，即轉子可以較快的速率而運轉。外加的電壓愈大，轉子的速率也愈大，就是轉差率愈小。如果外加電壓與轉子電動勢相等，則轉差率為零，感應電動機可以在有負載時以同步速率而旋轉。再進一步，如果外加電壓大於轉子應電勢，則轉差率為負值，轉子的速率可大於同步速率，而仍作電動機的運用。

反之，如外加電壓與轉子應電勢反相，則轉子內的淨電壓被減少，為維持負載時所需之轉矩，其轉子應電勢必須加大，方能於克服外加電壓之餘產生適量之轉子電流。就是說轉子必須以更大的相互速率割切磁力綫，其速率必須降低，而轉差率變大。外加反相電壓愈大，其速率愈低。

所以說，我們可利用一個與轉子應電勢同相或反相的電壓，引入轉子內，使電動機之速率在同步速率之上下任意變動。當然，這外加電壓的頻率必須和轉子本身的頻率相等，這就是所以要換向器的道理，後面當加解釋。

外加電壓可以調整功率因數

上面已經解釋，變更外加電壓之值，可以調節感應電動機的速率，同時如變更外加電壓的相位，也可以調整電動機的功率因數。功率因數由定子電流 I_1 與定子電壓 V_1 間之相角 ϕ_1 決定之，如圖一(a)， E_s 為轉子的應電勢，假定轉差率很

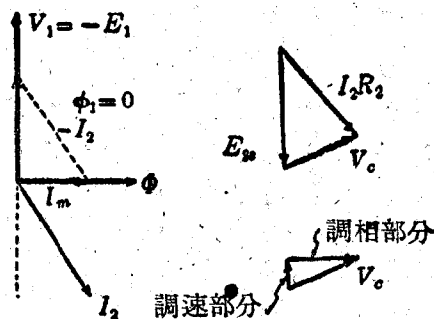


圖一 引入電壓相位與功率因數之關係

小，轉子只有電阻 R_2 ，轉子電流 I_2 與電阻 R_2 之乘積即 E_{2r} ，即 $I_2 = E_{2r}/R_2$ 且與 E_{2r} 同相。再假定定子繞組與轉子繞組圈數相等，並略去定子的電阻及磁漏等不計，定子應電勢 E_1 和電源施於定子的電壓 V_1 相反而相等，即 $V_1 = -E_1$ ， V_1 也和 E_{2r} 及 I_2 相反，如圖一(a)。但因爲定子電流 I_1 ，一部分克服轉子電流的效应，一部分供給勵磁電流 I_m ，即 I_1 爲 I_m 及 $-I_2$ 的矢量和，在圖一(a)中較 V_1 落後 φ_1 角度。功率因數爲 $\cos \varphi_1$ 。

如果外加一電壓 V_c 於轉子內，而 V_c 較轉子應電勢 E_{2r} 超前 90° ，此二者之矢量和爲轉子總電勢，仍等於 $I_2 R_2$ ，不過現在的 $I_2 R_2$ 較 E_{2r} 相差 $-\psi$ 角度，如圖一(b)。若 V_c 之值選擇適當，則 I_2 的有功部分和 E_{2r} 同相的仍和圖一(a)相同，使能擔任同樣的負載。而 I_2 現在多了一個和 E_{2r} 相差 90° 的無功部分，確能和勵磁電流 I_m 相抵消。以 I_m 和 $-I_2$ 求得之矢量和得 I_1 ，可以和 V_1 同相，而 $\varphi_1 = 0$ ，即功率因數爲 1。如果加大 V_c 之值，則 I_2 的無功部分也如大，其 $-I_2$ 和 I_m 之矢量和可以較 V_1 超前，而得超前的功率因數。

但是實際上引入轉子的電壓，並非和轉子電勢 E_{2r} 確實超前 90° 的。如超前的角度大於 90° ，則 V_c 可分析爲兩部：一部和 E_{2r} 相差 90° 發生調相的作用；另一部和 E_{2r} 反相發生調速作用，見圖二。若超前的角度小於 90° ，則其調速部分和 E_{2r} 同相。

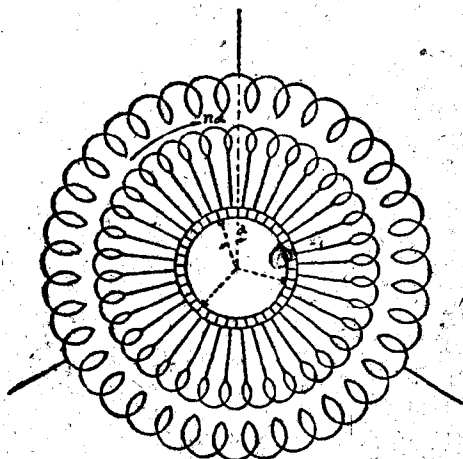


圖二 引入電壓之變速與調相部分之分析

爲什麼要用換向器？

三相換向電動機的定子繞組和普通電動機的三相繞組相同，其轉子具有一直流電機的繞組及換向器，在換向器上有三套電刷，每兩鄰刷之位置互成 120° 電的角度。若爲二極電動機有三組電刷，每兩刷互成 120° 機械角度；四極電動機

有六組電刷，每兩刷互成 60° 機械角度；餘類推。其大概佈置見圖三：該圖示二極機之情形，外圈為定子繞組，引出三綫接至電源，內圈為轉子繞組，最內圈為換向器，三黑小塊為電刷。



圖三 換向器與電刷之一般連接方式

在直流發電機中，磁場靜定不動，電樞導體因旋轉而割切磁力綫產生交流電勢，經換向器與電刷之換向作用，在電刷端出現者為直流電壓，其值視電樞之轉速及電刷位置為定。如果將電刷也旋轉起來，這情形就不同了，因為當某一電樞導體由 N 極旋轉至 S 極下時，與其相接之換向片並不能由正刷區移至負刷區，所以在電刷上出現的是交流電壓。此交流電壓之頻率視電刷旋轉之速率而定，與電樞旋轉之速率無關。如果電刷轉速和電樞轉速相等，其頻率與電樞之頻率相等。

在感應電動機中，磁場是以同步速率 n_s 旋轉着的，如果電刷靜定不動，其作用相當於磁場靜定不動而電刷以同步速率旋轉着。所以在電刷間出現的是交流電勢，其頻率和定子頻率 f 相等，與轉子的轉速無關。但是當轉子以速率 n 旋轉時，轉子以 $n_s - n$ 的相對速率割切磁場的磁力綫，轉子導體內應電勢的頻率為

$$f_2 \triangleq \frac{n_s - n}{n_s} f_1 = s f_1,$$

其 s 為轉差率。

由上所述可見，在多相換向式電動機電刷端的交流電壓頻率和定子周，可以和定子繞組同時接在同一電源上，與轉子之速率無關。而換向器之作用，就是將電源或定子的頻率 f_1 ，轉變為轉子的頻率 $s f_1$ 輸入轉子，以便轉子繞組可自電源輸入與其本身相同頻率之電壓，以資調相與調速。

三相串联换向电动机

三相换向式电动机中，其引入轉子电压的方法，分串联与并联两种。在串联式电动机中，其定子绕组係一普通三相绕组，各相之一端接於电源，另一端或直接或经过一中间变压器接於换向器之电刷上，如图四所示，其定子与轉子係串联的。变压器之作用在降低电压以利换向。

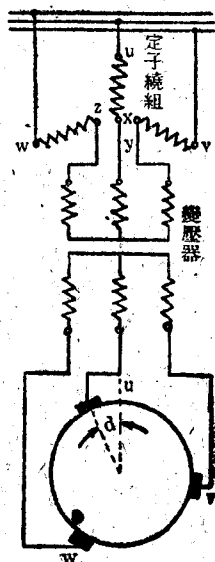
电刷的位置是可以變更的，變更其位置即可控制轉子之速率。如图示，定子磁場之軸在 U 处，电刷之軸和該軸成一角度 α 。在电动机內之總磁通勢，為定子磁通勢与轉子磁通勢之總和，而轉子磁通勢之軸隨电刷之軸為轉移，所以總磁通勢也隨电刷之軸為轉移。

總磁通勢產生旋轉磁場，在定子绕组中產生一應電勢，在轉子內也感應一電勢，此二者合成之电压与外施原电压相平衡（阻抗降略去不計）。因為總磁通是由电刷軸的角度 α 及電流決定的，若負載及电刷位置不變，則定子應電勢亦為恒定，此時轉子速率即自行變化，致所生轉子應電勢適足達到电压平衡而後止。在同步速率時，轉子應電勢為零；在其他速率時，此應電勢之值決定速率在同步之上或同步之下之程度，其方向則決定速度在同步之上抑同步之下。

所以移動电刷之位置，即可任意變動轉子之速度。

其速率除隨电刷位置而變動外，尚与電流有關。在輕載時電流小，磁通量也小，轉子需產生高电压以保持电压平衡，故速率增加。反之，負載加重則速率減低，此种特性和直流电动机相同。

此机在低速時運用不甚穩定，所以普通可達到之速率比最大不过 3:1 左右。另一缺點即轉速隨負載之增加而減低之串联特性。但是，如果在任何速率下欲轉矩不變，此机極為適用且亦價廉。此式电动机常用以轉動離心抽水机、吹風机及



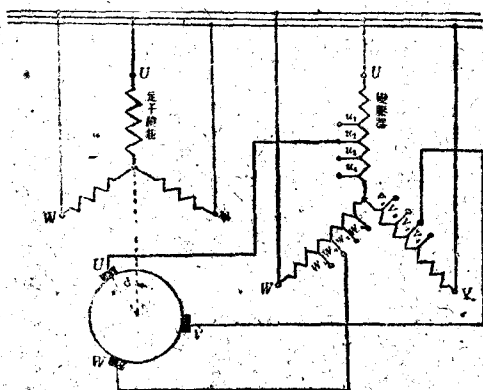
圖四 串联换向电动机之連接線路圖

通風机等。

定子供電式並聯電動機

並聯換向式電動機的制式有兩種：一種以定子繞組作為原繞組，功率自定子輸入的，稱為定子供電式；另一種功率自轉子輸入稱為轉子供電式。

定子供電式換向電動機如圖五所示，定子接於電源，另自電源接出一變壓

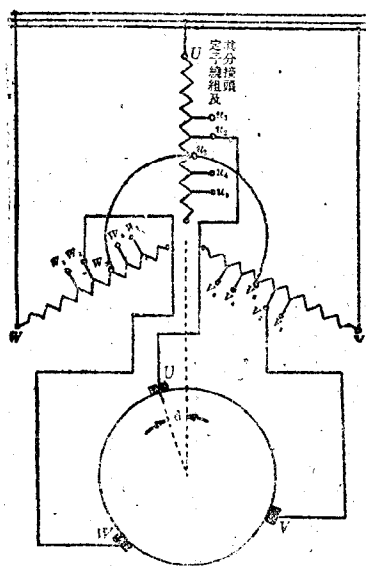


圖五 定子供電式並聯換向電動機之線路圖——用中間變壓器

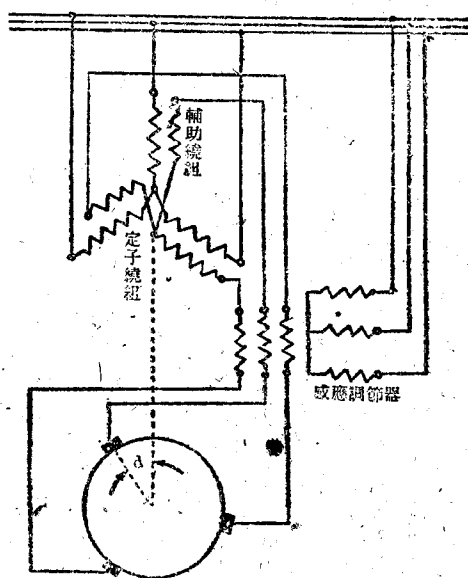
器，其副繞圈即經換向器及電刷接於轉子。電源頻率之電壓，經換向器之轉變，輸入一種和轉子頻率相等之電壓於轉子內，變更變壓器上之分接頭用以調節引入電壓，即可控制速率。不過其速率之變化非連續的而係分級的，其應用至為有限。

如果省去一套變壓器，而直接利用定子繞組作自耦式變壓器，其联接方法如圖六所示。

另一種联接方式，需用一套三相的感應調壓器（即副繞圈可以轉動的變壓器，用以變更輸出電壓的），其原繞圈接於電源，副繞圈接於換向器的電刷；此調壓器供給一部分的轉子電壓。另一部分電壓由定子上設置之輔助繞圈供給之，見圖七，此輔助繞圈在減少調壓器所需之容量。定子輔助繞圈供給之電壓與調壓器



圖六 定子供電式並聯換向電動機之線路圖——不用中間變壓器



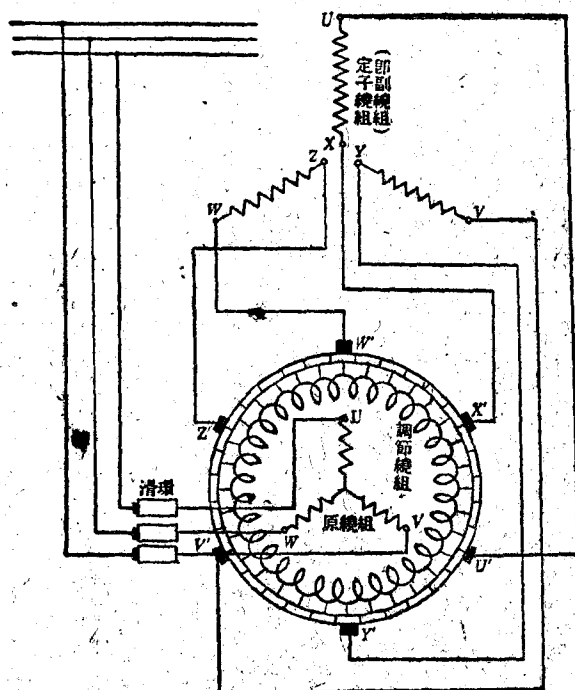
圖七 定子供電式並聯換向電動機之線路圖——用感應調壓器及輔助繞組

供給之電壓之矢量和，為經換向器供給於轉子之電壓，所以變更調壓器轉子之位置，即變更引入轉子之電壓，因此變更速率。不過在調整電壓時，引入電壓的相角也隨之而變，所以電刷的位置必須同時變換。用這種制度，速率可以連續地調節。

轉子供電式電動機

轉子供電式換向電動機，通常稱為許拉格變速電動機。

其定子鐵心及其繞組与普通感應電動機相似，但其三相並不接成Y形或三角形，其每相之兩端分接於換向器上的一對電刷。兩極三相電動機應有三對電刷，餘類推，每對電刷與鄰對電刷之位置互差 120° 電的角度，如圖八所示。此定子繞組並不由電源直接輸入功率，而係經轉子之轉移而輸入功率的，所以定子繞組實乃副繞組以轉子的繞組為原繞組，和普通感應電動機的情形相反。



圖八 轉子供電式並聯換向電動機之換路圖。

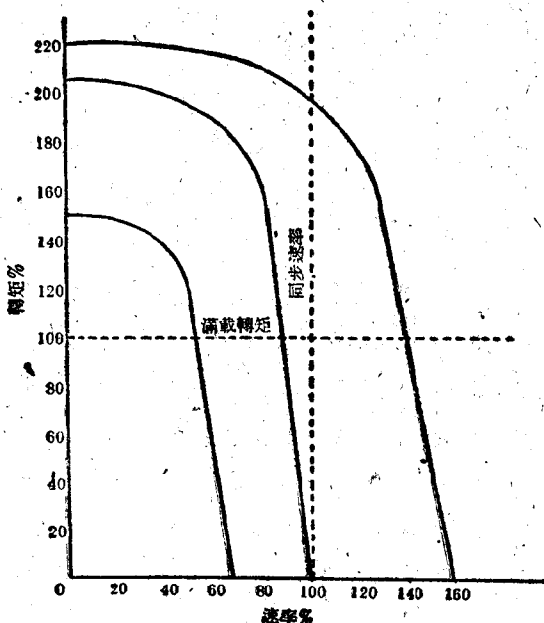
其轉子內有兩組繞組，一組經滑環及電刷接於電源，是為原繞組。另一組繞組接於換向器上，其作用在轉變轉子之頻率 sf_1 為電源之頻率 f_1 而供給於定子，同時供給副繞組以外加電壓，為變速及調相之需，通常稱為調節繞組。

變更每對電刷內兩刷之間隔，即可變更外加電壓之大小，用以調節速率。若每對內兩刷之位置在同一換向器片上，即將副繞組之每相線圈捷接，外加電壓為零，此時該機之作用与普通鼠籠式感應電動機相似。每對內兩刷之距離愈大，則引入之電壓也愈大，速率也隨之作較大之變動。如將每對間兩刷之連接掉換，即反轉引入電壓之相位；如將每對電刷循同一方向移轉而保持相互距離不變，則引入電壓之相角隨之而變。所以變速及調相均可利用電刷之移動得之。為便利計每

对中電刷之一，如圖八中之 U' 、 V' 及 W' 可裝於同一轉環上，其餘三刷 X' 、 Y' 及 Z' 也裝於另一轉環上，可藉手輪移動任何一環或兩環之位置。如果再用小電機來推動手輪則電動機之速率可加以遙控。

欲逆轉電動機之旋轉方向，可將電源引入繞中任何二線掉換即可，与普通感應電動機同。通常為調整在某一重要速率下之功率因數，常將電刷偏向於一方，若令電動機循反方向轉動，則其功率因數及效率均較順向時為小，溫度也較高。所以作反方向時，僅可作短期之運用。

圖九示國產 7.5 馬力轉子供電式換向電動機之轉速與轉矩之關係，此曲綫下部約與垂直綫相近，表示由滿載（即 100% 轉矩）至空載（即 0% 轉矩）間之速率降落甚少。該機之設計適使最大轉矩發生於啓動之際，在最低速啓動時，其啓動轉矩約為滿載轉矩之二倍，毋需插入電阻於副繞組中。

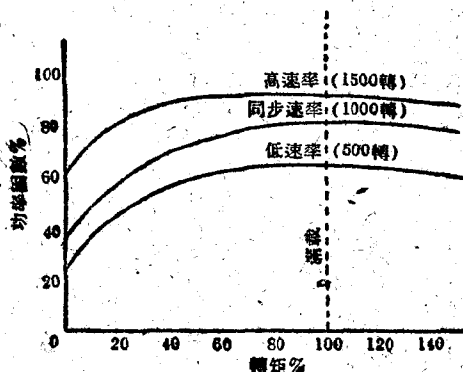


圖九 7.5 馬力 220 伏 500~1500 分轉換向電動機之轉矩速率曲綫

在低於同步速率時，換向器引入電壓是和副繞組中應電壓相反的，兩電壓之差產生副繞組中之電流，所以副電流可保持合理之值不致過大。再則反映於原電路中之磁通勢，為調節繞組與副繞組中兩磁通勢之差，若啟動時副電流為其滿載值之二倍，則原電流或僅為滿載值之一倍餘，所以也毋需特殊啟動設備，僅在電

刷轉輪上最低速位置時裝一連鎖裝置即可。有此連鎖裝置可在最低速時啟動，而無差錯。

圖十示 7.5 馬力電動機之功率因數與負載之關係，在最高速率滿載時功率因數為 1，在其他負載及低速時，其功率因數仍甚大，由半載以上，功率因數常在 60% 以上。至於效率亦佳，常在 80% 以上，以在同步速率及滿載時為最大。



圖十 7.5 馬力 220 伏 500~1500 分轉換向電動機之功率因數與負載關係

又此機之輸入與輸出功率是與速率成比例的，例如速率比若為 3:1，則在低速時之輸出為在高速時 $\frac{1}{3}$ 的。因在普通運用範圍內，並聯機之磁通量及副電流均屬恒定，轉矩也屬恒定，輸出功率當然和速率成比例了。

轉子供電式電動機之優點

(1) 此式電動機之速率，可藉電刷之移動，作廣泛的變動，普通低速與高速之比為 1:3，最大可達 1:30，較滑環式的調速範圍為大。又控制速率時，僅須轉動電刷的手輪，甚為便利。

(2) 此機之速率變動，係用調節繞組之電壓經換向器引入副繞組內，不增加額外功率損失，其效率較滑環式的為高。

(3) 在移動電刷以變速時，調節繞組電壓的相角也自動隨着調整，在任何速率及負載下，其功率因數均較普通電動機為高。但因此調相關係，此機僅能循指



圖十一 換向電動機之轉子結構

定方向(即機座上箭頭指示的)運轉,若反向運轉,功率因數將減小而溫度升高。

(4) 啓動此機時,毋需啓動裝置,僅備一普通油開關即可。啓動時將電刷移至最低速位置,將開關拉上即可。且在最低速位置上有連鎖機構,只有在最低速時方能啓動,甚爲安全。

(原載電世界月刊 3 卷 10 期 324~428 頁)

珂矢秦珂感應電動機圓圖及其應用

踐 理

1. 略論圓圖的各種作法

感應電動機從圓圖中可以得出功率、損耗、效率、轉差、轉距等各種特性，並可用圖解法表示其變化的軌跡。圓圖的作法視簡略情況而不同。先說所謂準確圓圖的作法。根據準確等值電路，即 T 形電路寫出下列方程式：

$$I_1 = U_1 \frac{1}{Z_1 + \frac{1}{\frac{1}{Z_m} + \frac{1}{Z_2'}}}$$

式中所用符號均為普通所用，方程式中 Z_2' 為轉差率的函數。如將所有阻抗均以複數表示而加以演算，中間再略加簡略，最後得

$$I_1 = U_1 \frac{a + bs}{c + ds}$$

其中 a, b, c, d 均為複數而 s 為轉差率。 a, b, c 及 d 均為電機參數所表示。此式可以証明為圓。從此方程式中我們可以得出三點：一為 $s=0$ 時，即 $I_1 = U_1 \frac{a}{c}$ ；其次 $s=1$ 時， $I_1 = U_1 \frac{a+b}{c+d}$ ，再其次為 $s=\infty$ 時，即 $I_1 = U_1 \frac{b}{d}$ 。有此三點，圓即可決定。此方法頗為繁複，讀者如欲知其詳，可參看 Liwshitz 電機學附錄。

其次用圖解法作圓圖。先求 Z_2' 的軌跡。次求 $Y_2' = \frac{1}{Z_2'}$ 的軌跡。次求 $Y_m = \frac{1}{Z_m}$

及 Y'_2 兩者之和的軌跡。次求 $\frac{1}{Y_m + Y'_2}$ 的軌跡。次求 $Z_1 + \frac{1}{Y_m + Y'_2}$ 的軌跡，最後求 $Y = \frac{1}{Z_1 + \frac{1}{Y_m + Y'_2}}$ 的軌跡。於是 $I_1 = U_1 Y$ 。此法亦是極其繁複，但道理非常簡單，容易了解。

最簡略的作法即是普通實驗室所用根據空載及制動實驗數據。將等值電路簡化為激磁電路與定子及轉子串聯電路相並聯，而不加校正。將空載時激磁電流在定子中銅耗、定子鐵耗及機械損失均併為不變損失。以空載時激磁電流在定子中銅耗與負載時負載電流在定子中銅耗合併起來作為定子中負載時銅耗。此為普通教本中所講述，茲不多加討論。惟須指出此種方法對於大電機尚無大誤，而對於小電機則不相宜。

2. 柯矢泰珂較準確圖圖的說明

柯矢泰珂較準確圖圖係根據下列等值電路：

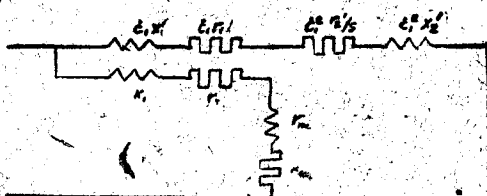


圖 一

圖中 $c_1 = 1 + \frac{Z_1}{Z_m}$

現在將 c_1 略為簡化， $c_1 = 1 + \frac{Z_1}{Z_m} = 1 + \frac{r_1 + jx_1}{r_m + jx_m} \approx 1 + \frac{r_1 + jx_1}{jx_m}$

$$= \left(1 + \frac{x_1}{x_m}\right) - j \frac{r_1}{x_m} = c_1 (\cos \psi - j \sin \psi) = c_1 e^{-j\psi} \quad (1)$$

式中 $c_1 = |c_1| = \sqrt{\left(1 + \frac{x_1}{x_m}\right)^2 + \frac{r_1^2}{x_m^2}} \approx 1 + \frac{x_1}{x_m} = 1 + r_1 \quad (2)$

設定子及轉子串聯電路的阻抗為 Z_n

$$\begin{aligned} Z_n &= Z_1 c_1 + Z'_1 c_1^2 = Z_1 c_1 e^{-j\psi} + Z'_1 c_1^2 e^{-j2\psi} = e^{-j2\psi} (Z_1 c_1 e^{j\psi} + Z'_1 c_1^2) \\ &= e^{-j2\psi} \left[(r_1 + jx_1) c_1 (\cos \psi + j \sin \psi) + \left(\frac{r'_1}{s} + jx'_1 \right) c_1^2 \right] \end{aligned} \quad (3)$$

式中

$$\left. \begin{aligned} \sin \psi &= \frac{r_1}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_m)^2}} \approx \frac{r_1}{x_1 + x_m} \\ \cos \psi &= \frac{x_1 + x_m}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_m)^2}} \approx 1 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其中 r_1^2 當與 $(x_1 + x_m)^2$ 相比較時是被忽略了。

以(4)代入(3)，加以演算，

$$\begin{aligned} Z_n &= e^{-j2\psi} \left\{ \left[\left(r_1 - x_1 \frac{r_1}{x_1 + x_m} \right) c_1 + \frac{r'_1}{s} c_1^2 \right] + j \left(x_1 c_1 + x'_1 c_1^2 + \frac{r_1}{x_1 + x_m} c_1 \right) \right\} \\ &= e^{-j2\psi} \left[\left(r_1 + \frac{r'_1 c_1^2}{s} \right) + j \left(x_1 c_1 + x'_1 c_1^2 + \frac{r_1^2}{x_m} \right) \right] \end{aligned} \quad (5)$$

由此

$$-I'_2 = \frac{U_1 e^{j2\psi}}{\left[\left(r_1 + \frac{r'_1 c_1^2}{s} \right) + j \left(x_1 c_1 + x'_1 c_1^2 + \frac{r_1^2}{x_m} \right) \right]} \quad (6)$$

從式(6)我們可以看出珂矢奈珂圓圖与普通圓圖不同的地方，是把普通圓圖轉了一只角度 2ψ 。圓的直徑在普通最簡略的圓圖中是 $\frac{U_1}{x_1 + x'_1}$ ，而珂矢奈珂圓圖的直

徑是 $\frac{U_1}{x_1 c_1 + x'_1 c_1^2 + \frac{r_1^2}{x_m}}$ 。 c_1 總是大大於 1，所以直徑是小了一些。

$$\text{所轉角度 } 2\psi = \tan^{-1} \frac{2r_1}{x_1 + x_m} = \tan^{-1} \frac{2I_0 r_1}{I_0 (x_1 + x_m)} = \tan^{-1} \frac{I_0 r_1}{U_1}$$

式中 U_1 為相電壓， $I_0 r_1$ 為空載時定子電阻壓降。由此可見珂矢奈珂圓圖對於小電機確有必要，因小電機中 $\frac{I_0 r_1}{U_1}$ 不應該忽略。

以上為珂矢奈珂圓圖所根據的公式，惟照本文作者之意 $\frac{r_1^2}{x_m}$ 當與 $(x_1 c_1 + x'_1 c_1^2)$ 相比較時，普通亦是可忽略的。如將此項忽略，則：