

同濟電工叢書

感應電機之原理與設計

電機系1950級譯

程 福 秀 校

龍門聯合書局印行

同濟電工叢書

感應電機之原理與設計

Induktionsmaschinen

Franz Unger 著

電機系1950級合譯

程福秀校

同濟大學工學院電機系

編審委員會編輯

龍門聯合書局印行

電工叢書引言

中國科學的所以落後，原因固然很多，中文科學書籍的缺乏，也是主要原因之一。有許多科學工作者，對於他們所研究的部門都是深具心得，甚或是有獨特的貢獻的，祇因大都不習慣於中文的寫作，不願從事編著中文科學書籍；即使有論文發表，也往往應用外國文字，這就對於中國科學的地位和發展，成為很大的障礙。

由於中文科學書籍的缺乏，大學裏所採用的教本和參考書，幾乎全都是外國文的，因此學生除了學習業務之外，還不得不在外國文上面化費許多的時間和精力，以致降低了學習的效率，這是何等值得惋惜的事。

同濟大學電機系全體師生有鑒於此，深感編譯中文書籍，刻不容緩，乃決定成立電工叢書編譯委員會，着手編譯電工書籍。我們相信如果這個工作能夠搞好的話，對於研究電工的學者，是有相當的幫助的。

我們希望在本叢書內，對於每一門電工學科都能有專冊介紹；只因電工技術發展奇速，所牽涉的範圍異常廣泛，這點能否辦到，實在難有把握；但是我們總盡力向這目標進行。

到目前為止，英文還是為我國最普遍的外國語，平常看到的科學書籍，也以英文的為最多。其實德國的學術地位，不在英美之下，德文電工書籍也不乏精濶和獨到之作。祇由於德文在國內不普遍，能閱讀的人很少，致使寶貴的知識湮沒無聞，何等可惜。同濟向以德文為第一外國語，和德文書籍接觸較多，我們自當致力於德文電工書籍的翻譯，以介紹並推廣德國學術。如果在某些學科方面，沒有適當或完善的外國書籍可資翻譯時，則預備利用本校教學的參考資料，並參考有關書籍，從事撰述。

本系全體教授講師助教，和本校的校友，都預備共同擔負這編譯的工作。為求內容充實和完善，有所編譯，必縝密校訂。因為現在還在嘗試時期，我們預備先譯應用技術書籍，將來再從事編譯較高深的著作。

承龍門聯合書局擔負本叢書的出版和發行，我們表示萬分的謝意。他們提倡中文科學書籍的熱忱，也是值得我們敬佩的。

這任務是非常艱巨的，我們的學力和經驗都有限得很，希望各電工界先進對我們不吝指教，多多批評，使我們的工作得以改善。同時更希望我們的工作能引起各界對於編譯中文科學書籍的興趣，一齊來從事這項工作。如果優良精濶的巨著因此源源而來，中國的科學地位因此而提高的話，那麼即使我們的成績是渺小而不足道的，我們也可引以自慰了。

黃席椿 一九五〇年八月

序

感應電機爲電機中最年青的一種，但其發展之速，與用途之廣，除同步發電機外，在電機中佔着最重要的地位。其主要原因乃構造簡單，成本低廉，以及開動與轉速調整之方便故也。

本書原爲德國渤城工業大學教授 Unger 所著，Unger 教授爲德國電界權威之一，畢生專攻電機製造，對於電機方面發表論文甚多。本書內容與其教材大致相同。精彩扼要，簡明易懂。不單講理論，同時對於設計準備了良好的基礎。並常用簡單的數學，解釋重要的原理。茲將其特殊各點，分別予以介紹。第一，Unger 對於圓圖之改良：圓圖爲感應電機中最重要之一部。整個電機工作的關係，都可藉之清楚的掌握。Heyland 氏圓圖忽略了定子繞組中的電壓降。Ossañna 氏圓圖雖甚精確，但其出發數值之計算却甚困難。Unger 氏圓圖，對於鐵損失計算在內，而其導引方法，非常簡單。關於這一點 Unger 曾於 1939 年有專題論文“雙激磁路的簡單圓圖”發表。第二，Unger 對於雙鼠籠式轉子計算方法之改良：爲了增加開動轉矩，減少開動電流以及改善功率因數，往往常用雙鼠籠式轉子，但其計算過程相當麻煩。Baffrey 曾給過一個簡單的半圖解的方法。Unger 加以改良，變成純粹計算的方法。Unger 亦於 1940 年發表專題論文“計算雙鼠籠式電動機的簡單方法”。此外，Unger 終身從事電機製造，經驗豐富，其設計的方法，亦有獨到之處。

際此新中國工業建設伊始，培養大量的建設人材，乃當前重要的任務。爲減少文字的隔閡，節省時間，增加效率以及普及科學智識起見，編譯中文科學書籍，實有必要。故本校電機系 1950 級畢業同學將本書譯成中文，以供參考。希我電界先進，予以指正，無任歡迎與感謝。

目 次

第一章	引 言	1
第二章	構 造	3
第一節	一般構造	4
第二節	繞組	5
第三章	工作原理	9
第一節	旋轉磁場	9
第二節	特性	12
第四章	感應電機的理論	15
第一節	電勢和繞組因數	15
第二節	轉矩	17
第三節	無載電流	20
第四節	漏磁	25
a.	槽漏磁	25
b.	繞端漏磁	29
c.	齒端漏磁	30
d.	空隙漏磁	39
第五節	圖圖	35
第六節	無載試驗和短路試驗	44
第七節	Heyland 氏圖圖	46
第八節	圖圖的差異	50
第五章	感應發電機	51
第六章	變頻機	53
第七章	滑環式電機	55

第一節	開動和開動電流的限制	55
第二節	直接短路和電刷抬起設備	56
第 八 章	鼠籠式電機	58
第一節	工作原理	58
第二節	星形——三角形接法	59
第三節	電流集膚作用的轉子	61
第四節	開動聯結器	63
第五節	潛行轉數	64
第 九 章	單相感應電機	68
第一節	工作原理	68
第二節	開動接法	70
第三節	分相電動機	71
第 十 章	轉數調整	73
第一節	電阻調節	73
第二節	改變極數法	73
第三節	串級接法	74
第 十 一 章	設 計	76
第一節	設計用的數據	76
第二節	鼠籠式轉子	89
第三節	電流集膚作用的轉子	80
第四節	設計舉例二則	84
a.	滑環式感應電動機	84
b.	雙鼠籠式電動機	99
第 十 二 章	感應電機的樣式	109
參考文獻		112

第一章 引 言

異步交流電機(通常稱為感應馬達)的歷史祇有五十多年,是電機中最年青的,因它今天在各種電機中,得到了最大的發展,且有排擠其他電動機的趨勢,所以它已和同步交流發電機並駕齊驅,同為最重要的電機。

感應電機的發明是和旋轉磁場的發現不可分的,很顯然的,我們的確可以說:感應電機的成功,完全是由於研究旋轉磁場的結果;這個事實可借 Ferraris 氏(1)和 Tesla 氏(2)兩人的論文來證實。這兩位學者,早在 1885 年及 1886 年,先後獨立地從事旋轉磁場的試驗,而且互不相涉地幾乎同時達到了感應電機的發明,雖然 Tesla 氏於 1886 年專利註冊時間較先,但從歷史的觀點出發,這是無關緊要的,最重要的,還是 Ferraris 氏首先從事於三相旋轉磁場的研究。

由於 Brown(3)和 Dolivo-Dobrowolski(4)兩構造家傑出的技術構造能力,與其對於實際需要精密的感覺,使感應電動機在 1890 年於實用方面才得到一大進步。第一部滑環式感應電動機製造成功,已於 1891 年用在德國 Lauffen 到 Frankfurt 兩地間的三相交流電力傳輸系中;至於鼠籠式感應電動機雖已在 1889 年為 Bradley 氏發明,但其重要性却在最近十幾年才顯示出來,因為現在在許多情形下鼠籠式已取代了滑環式的地位,自滑環式用的短路及電刷抬起設備已經大多不用之後,同時似有這種趨勢:感應電動機要鼠籠式化的日子是不遠的。

由於應用多相感應電動機時,偶然其中一相斷路而電動機不停的經驗,所以單相感應電動機在多相感應電動機出世不久後也跟着發明了。近來電力應用的容電器的製造日臻完備,單相感應電動機用在小的機器中已漸漸的重要了,因為用容電器和副相不但很容易開動,而且

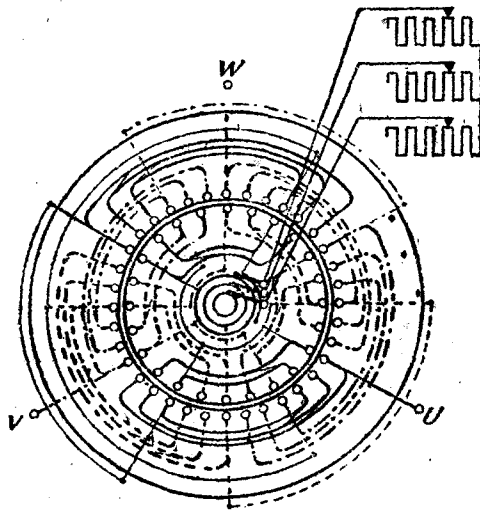
可以得到很好的功率因數和很大的轉矩。

()內的數字代表參考文獻，見第十三章。

第二章 構造

感應電機由轉子和定子兩部份構成，定子是固定不動的，由開槽的鈔鋼片湊成，槽中纏着多相繞組，轉子是旋轉的，也是用開槽的鈔鋼片湊成，槽中纏着多相繞組(常是三相或多相)，定子和轉子上的槽數不可相同。

第1圖係表示一三相四極的繞組的基本安排，如圖定子上有三組



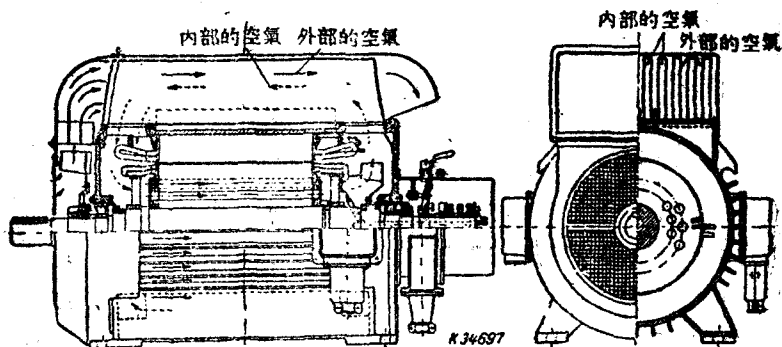
第1圖 滑環式三相感應電機的繞組的基本安排

繞組，它們的軸互相間的距離，對幾何的角講是 60° ，對電的角講是 120° ，在每個槽裏並不只一根導線，而是有很多根導線(Leiter)互相串聯起來的，紙面前後的繞端(Spulenköpfe)，它們的形式和位置應該是一樣的，繞端裏面的導線數目自然是和線捲(Spule)裏面的相同。此圖中定子的繞組是三孔繞組(Dreilochwicklung)，所謂三孔繞組就是說每相繞組

在每一極距內佔用三個槽。同一相的線捲應該串聯起來，各相的繞組可以聯接成星形或三角形。在兩種接法中我們都用 UVW 三字來代表整個繞組的三個自由端，這三個端點是可以接到一個三相交流電源的，在第1圖中每一相的繞組，在每極下佔有三個槽，因此在定子上共有 $3 \cdot 4 \cdot 3 = 36$ 個槽。第1圖所示的轉子，有一三相二孔繞組，每一相的繞組末端各接一隻滑環，由此將電流用電刷引到三個相等的調節電阻上去，這三個電阻的一端互相連接成一星形。以後我們可以討論到，圖中所畫的電阻地位，是開動或調節的地位。如果定子和轉子上的槽數相同，更容易產生很強的諧波，和突擊的轉矩震動，因此欲求良好工作，定子和轉子的槽數總是選不相同的。

第一節 一般構造

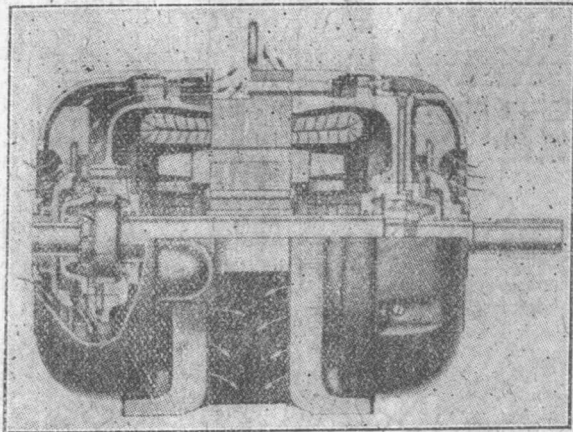
第2圖表示一全封式，表面散熱的德國 AEG 廠滑環式感應電動機，畫的是剖面圖，短路和電刷拾起的設備也畫在內。定子繞組是雙層繞組 (Zweischichtwicklung)，繞端相等。轉子繞組是雙層單銅條繞組，也是用等繞端 (見下節)。定子和轉子的鐵的部份是用開槽的鈎鋼片湊成的，兩端用厚鐵板做的端片緊緊的壓牢，裝配時所用的壓力大約是 8 個大氣壓。轉子上的繞組用繞組架支柱，並用絲帶細牢，以防離心力的作用，定子的繞組是用絕緣物做的壓板支在機殼上的。上述的例子，



第2圖 AEG 廠出品的滑環式感應電動機剖面圖 (外冷卻式)

機殼是全封閉的，對外不通空氣，所以機殼上有散熱的鱗片，還有一由鐵片做的冷却器，機軸上裝有一隻風扇，熱空氣就借這隻風扇的作用由冷却器中吹出來，這隻風扇是裝在機殼裏面的。還有一隻裝在機器外面，自然也是裝在機軸上的，它把外面的冷空氣吹進冷却器裏去，方向和熱風相反，冷風當然要經過散熱鱗片。轉子是用滾筒軸承托着的。滑環在機殼之外另用一個小匣子裝着。短路和電刷抬起設備也裝在這隻小匣子裏，這裏只可以看到帶曲臂的手柄，調節桿，裝有環槽的和接觸指的調節套，以及固定在滑環體上的和每一滑環連結的短路觸點。

第3圖是西門子公司 R55s 內冷却鼠籠式感應電動機。機殼和軸



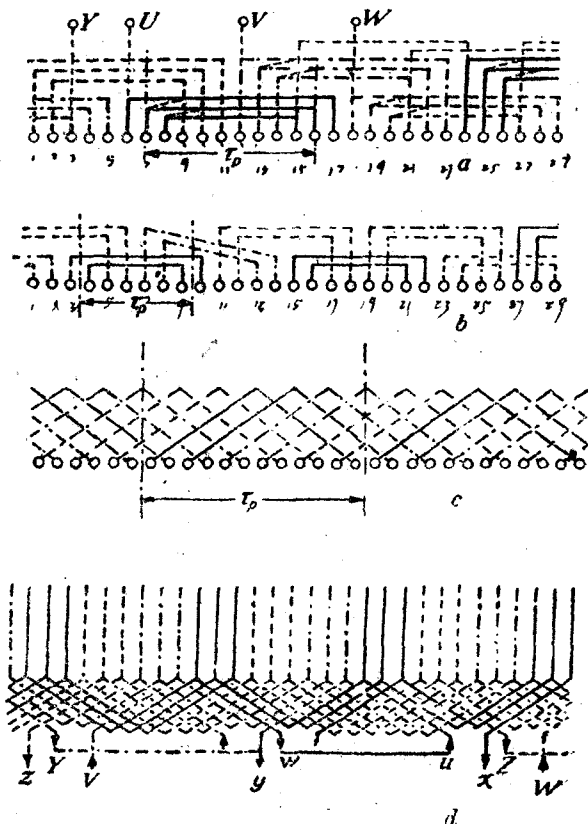
第3圖 西門子製造的鼠籠式電動機剖面模型，它也是封閉式的和通行通風式的。承蓋是鑄鐵做的，轉子用滾動軸承托着，左端裝一風扇，冷却左邊的繞端和機殼與定子鐵片間的空間，右邊裝一隻較小的風扇，僅用作冷却右邊的繞端。轉子繞組是鼠籠式，定子繞組是等繞端的雙層繞組。

第二節 繞 組

通常多相繞組是由多數繞組合成的，組數等於相數。如果要將各組繞組互相並聯，則每組都用二根或三根銅線（圓線）並起來繞。只有在很少的情形下，或者是特別線路（變極接法），我們才把各個線捲分別

纏繞，然後經過一個特殊的接線設備，使其可以串聯或並聯。一個槽內通常有很多根銅線（銅線繞組），只有在轉子繞組及大電動機的定子繞組才用一根或兩根銅條（銅條繞組）。銅線繞組在電機兩頭的繞端是一樣的，畫起圖來，只要畫前面一邊就行了。因為後面的完全被前面的遮住了。為簡便計，我們畫起圖來，當作每一槽內只有一根導線，並且將槽與槽間和線捲與線捲間的連接線略去。

第4圖表示感應電機最常用的繞組的展開形狀，即是將電機的直徑當作無限大時的情形，第4a圖表示一三相二疊（Zweiebene）不等繞端繞組，繞端有兩種長度，相間排列。一種是短繞端，沿軸向由槽中伸



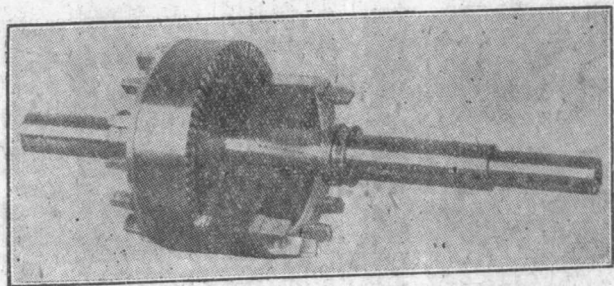
第4圖 各種多相繞組

出，略作弧形彎曲；一種是長繞端，向軛部作較深的弧形彎曲。 UX ， VY 及 WZ 表示三相繞組的首尾兩端。 τ_p 表極距， $g=3$ 是每極每相的槽數。每相繞組在每極對內有一個鋸捲。因為每疊的繞端數必須相等，所以這種三相繞組只能適用於磁極對數 p 等於偶數的時候，如果 p 等於奇數，則必有一個繞端一半在這一疊上，其他一頭在另一疊上。第4b圖是一三相二疊繞組， $g=2$ ， p 等於奇數（如6極電機， $p=3$ ），我們清楚的看到在 V 相有一個折亂的鋸捲。

第4c圖是一單層三相繞組，各鋸捲等寬，繞端自然也相等， $g=4$ ， p 等於任意整數，很明顯的，只有 g 是偶數時才行，我們設想同相的相鄰兩個鋸捲的導線在一個槽裏上下疊放起來，便可由4c得到 $g=2$ 的三相雙層繞組。繞端仍然相等。雙層繞組也可用奇數 g 。近來對中型和大型電動機的製造，多用雙層繞組。

第4d圖是三相雙層銅條繞組。鋸捲寬度相等， $g=3$ ，中型和大型電動機的轉子繞組常是用這種方式，每個槽裏上下疊放兩根導線。每相由兩個繞組(Wicklungssträngen)組成，即 UX, VY, WZ 及 ux, vy, wz ，再用 Xu, Yv 及 Zw 等互相連接起來。

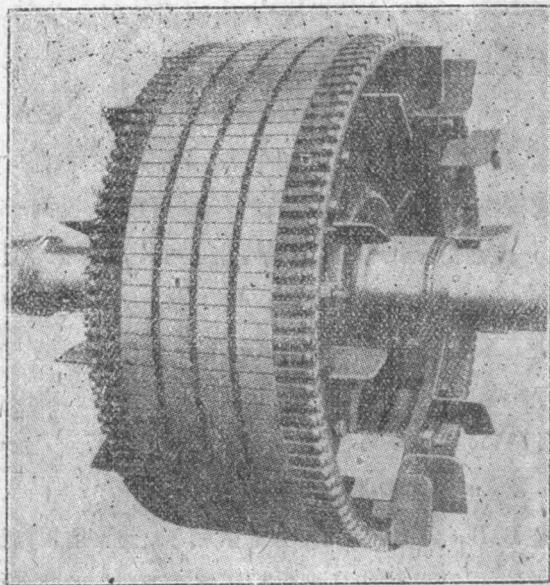
第5圖是B. B. C. 廠出品的一鼠籠式轉子，鼠籠是用鋁鑄成，風扇葉子也是鑄成的。短路繞組是由多數鋁條和兩個短路環組成的，是完全短路連接，就像鼠籠一樣，普通相數等於所有的條數。如果每對磁極下的金屬條數是整數，則相數等於每兩極距下的金屬條數。為了避免噪響，我們須將槽對轉子軸斜着安排。



第5圖 鋁鑄鼠籠式轉子

第6圖也是 B. B. C. 廠出的鼠籠式轉子，每三根金屬條並在一起，放在一個短路環的槽內共同銲起來。

孔數為分數的繞組，在每極每相槽數不多的情形下，用以改善電勢的曲線或壓制磁場分佈曲線中的高次諧波，在感應電機很少用的。這種以及其他尚未提到的繞組，請參考文獻(5)。



第6圖 金屬條分組銲在短路環的鼠籠式轉子

第三章 工作原理

爲了充分地了解多相感應電機的工作原理，我們必須先明瞭旋轉磁場及其特性。我們可以叫感應電機爲變頻率的變壓器，因爲各交變磁流合成一旋轉磁流，這種磁流可以在定子及轉子各繞組裏產生交流電勢，它們的頻率是由旋轉磁流和繞組間的相對轉速（相當於相對頻率）來決定的。

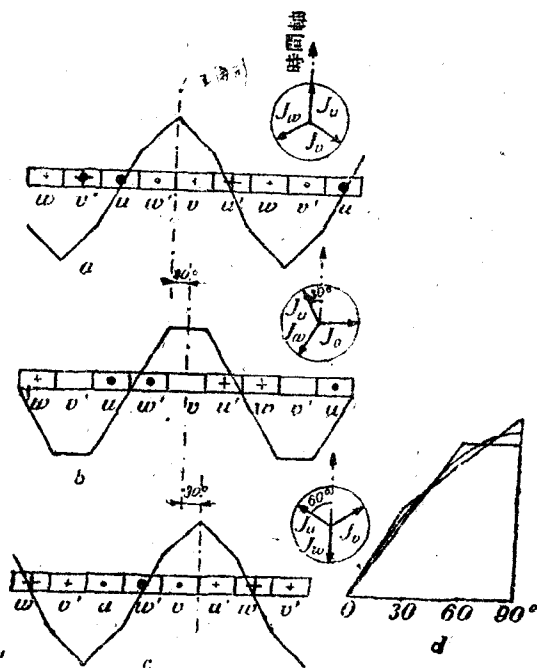
第一節 旋轉磁場

我們如果將第1圖中的定子繞組的三個線頭 UVW 接在一個三相交流電源上，電源的相電壓爲 U_1 ，頻率爲 f_1 ，則在定子繞組裏定有三個互差 120° 相角的電流通過，這三個電流分別相當於電源的三個互差 120° 相角的電壓與繞組阻抗的比值。在開關關閉的瞬間，電機裏沒有磁力線，它必須慢慢建立起來。如果在開關關閉的瞬間，有一相電壓是零，則在第一半週中有相當於電壓的波形的磁流產生，其最大值爲正常情形最高值的兩倍，能使鐵心飽和，因此第一半週中產生的磁化電流可能比短路電流大。因繞組的電阻和磁路的電感的關係，這個瞬變電流在幾週後就降到正常的無載電流值了。假定轉子繞組是開路的，則在正常情形下，每相都有一定大小的無載電流。這個電流的實數項代表鐵損耗電流，用以克服磁化損失；它的虛數項代表磁化電流，用以維持（激勵）磁流。

假定 g 很大，即是說繞組每極每相的槽數很多，並且每個槽裏有 2 根導線串聯，同時設將定子剖開展平，那麼第7圖就表示定子電流所激勵的磁場。第7a圖表示在某瞬間 U 相的磁化電流 I_μ 爲最大值，其餘兩相的電流是負的最大值的一半，由於三個電流的共同作用，得到左邊

所繪的五角形，它是代表每極對磁路中總磁勢，很簡便的算一算就知道這個磁勢的大小是 $2 \cdot \sqrt{2} I_u \cdot g \cdot z$ 。右邊是電流 $\sqrt{2} I_u$ 的向量圖，互差 120° ，這裏我們假設時間軸由下向上不動，同時電流向量以角速度 $\omega_1 = 2\pi f_1$ 左轉。屬於每相的 $(\frac{1}{3} \tau_p)$ ，並在其間均勻分佈的繞組，用 UVW 及 $U'V'W'$ 來表示。如果 g 小，則所繪的不是多邊形而是梯形，但其形式與多邊形相似。

我們如果再觀察轉 30° 以後的電流，即是說把電流向量左轉 30° ，則由三相電流瞬時值的共同作用得第 7b 圖所表示的梯形總磁勢曲線，其大小是 $\sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \cdot I_u \cdot g \cdot z$ 。梯形的中線和 7a 中五角形的中線差 30° ，簡言之是向右移 $\frac{1}{6}$ 極距。



第 7 圖 旋轉磁場的產生

如果再將電流向量向左轉 30° ，則 U, V 兩相在時間軸上的投影為 $+\frac{1}{2}\sqrt{2} I_u$ ， W 相在時間軸上的投影為 $-\sqrt{2} I_u$ ，三個繞組中的電流共同作用如第 7c 圖所示，也是一個五角形的曲線，磁勢大小仍是 $2 \cdot \sqrt{2} \cdot I_u \cdot g \cdot z$ ，

其軸對 7b 圖而言又向右移 30° 。

由此可知三相繞組的磁勢是在大小為 $2\sqrt{2}I_{\mu}gz$ 的五角形波，和大小為 $\sqrt{3}\sqrt{2}I_{\mu}gz$ 的梯形波之間變化的，而且沿着極距以一角速度前進。這個角速度是與交流電壓及磁化電流的角速度相等的。若為二極 ($p=1$) 電機，則

$$(1) \quad \omega_1 = \frac{2\pi n_1}{60}$$

其中 n_1 表示磁勢波每分鐘的轉數，若為多極 ($p>1$) 電機，則磁勢波要慢 p 倍，因之由下列關係得到轉數 n_1

$$(2) \quad f_1 = \frac{p \cdot n_1}{60}$$

設將五角形和梯形互相重疊並使其軸互相重合，然後用二者縱坐標的平均值作縱坐標，畫一平均曲線，則得到近似正弦曲線，如第 7d 圖所示，在 $g=\infty$ 時，其幅值為

$$2 \times 0.933 \sqrt{2} \cdot I_{\mu} \cdot g \cdot z$$

如果 $g=3$ 則得

$$2 \times 0.92 \sqrt{2} I_{\mu} \cdot g \cdot z$$

故我們可以說多相繞組的旋轉磁場或磁勢波是正弦的波，且以同步速度轉動。我們稱 $0.933\sqrt{2}$ 及 $0.92\sqrt{2}$ 為安匝因數 k_a 。旋轉磁場波形的週期正好佔二個極距，如 $p>1$ ，則在定子內圓周上分佈的相繼轉過去的旋轉磁場波數，等於磁極的對數。

這個旋轉磁場在磁路——空氣隙，定子齒，定子軛，定子齒，空氣隙，轉子齒，轉子軛，到轉子齒——中產生一旋轉磁流，其轉速與旋轉磁場的相等，這個旋轉磁流在它掃過的各個鐵捲中感應一交變電壓。因為鐵捲軸互有差角，所生的電勢相對的彼此也有相差。由於旋轉磁流的作用，我們在定子繞組中得到了交流電勢，它在三相繞組中彼此有 120° 相差。若這個電勢和電源電壓相抵，所剩電壓僅能維持無載電流時，感應電壓就不再增加了，正常狀態即已達到了。由 (2) 式可知，在一定的電源頻率 f_1 之下，旋轉磁場每分鐘僅能以一定的轉速 n_1 轉動。