



苏联大百科全书选译

直流发电机 · 交流发电机

电力工业出版社

書号 306

直流發電機・交流發電機

*

電力工業出版社出版(北京右安門外大街26號)

北京市書刊出版業營業許可證出字第 032 号

北京市印刷一廠排印 新華書店發行

*

787×1092 $\frac{1}{32}$ 開本 * 16印張 * 18千字 * 印1—7,100册

1956年3月北京第1版第1次印刷

定價(第8類)0.15元

直 流 發 電 機

直流發電機是把旋轉的機械能量轉變為直流(見直流電流)電能的機器。

直流發電機在很多現代的電力裝置中獲得了應用：在直流發電廠；對在寬廣調節轉速的拖動中的電動機供電；在交流同步發電機中作為勵磁機；在直流電焊設備中；在內燃機車中對電動機供電；在鐵路列車中用於照明；在飛機和汽車的電氣設備中等等。在現代設備中應用的直流發電機的容量從1瓩以下直到20000瓩和更高。

當 M. 法拉第於 1831 年發現了電磁感應定律以後，立刻產生了用直接變換機械能為電能的方法創造直流發電機的思想。第一次嘗試設計製造直流發電機是在 1832—34 年，這些發電機是極不完善的，也沒有工業上的意義。1833 年 11 月 29 日俄羅斯學者 Э. X. 楞次在彼得堡科學院的報告中第一次表述了電機的可逆性原理——它既作發電機運行又作電動機運行的可能性。可是在最初期間直流發電機和電動機的發展還是互不相關的。預定作為電動機運行且適合於實用目的的直流電機，是在 1834 年由俄羅斯院士 Б. С. 雅可比所提出的。Э. X. 楞次首次嘗試創立直流發電機的理論並論證它的計算(論文「關於磁極機的理論」，1842)。在 1847 年他指出了，在直流發電機運行時不僅必須考慮場極的磁場，而且也要考慮由電樞本身的電流所引起的磁場(電樞反應)，並指出了相對於場極磁場的中綫

把电刷移过某一角度是合適的。初期的直流發电机(磁电式)应用永久磁鉄作为磁極，而用电磁鉄來代替永久磁鉄(1845)是直流發电机發展的重要階段，且導致新型的所謂電動式的电机的出現。下一同等重要的階段(1854)是在直流發电机中利用电磁極自勵原理。在1860年A. 帕奇諾季提出了环形电樞，它隨後(1870)在格拉姆工廠的直流电机中獲得了廣泛的实际应用。在同一期間由俄罗斯發明家提出了許多獨創性的結構(B. H. 季柯列夫，A. И. 雅基莫夫，A. И. 拉基万諾夫斯基)。从十九世紀七十年代開始，直流發电机已被大量地生產：它們的基本結構原件仍被保留於現代的直流發电机中。直流發电机的進一步的發展方向是構造の改良和电机尺寸の減小：环形电樞由較為輕便而簡單的鼓形电樞所代替(赫夫納·阿歷坦納克，1873)；除了在初期已有的勵磁繞組的串聯接入外，開始通行了对直流發电机更为適合的並聯和混聯接入的結綫。採用了附加磁極(1884)以後，电刷电流的整流条件得到了重大的改善。以後是为公用电廠創造了大容量的电机；对三綫制供电的極為簡單的直樞發电机的構造，曾由M. O. 多里沃——多布罗勿斯基提出(1893)。製造直流發电机的巨大成功決定於科學研究的發展，迅速累積起來的大量实际經驗，冶金工業在創造高品种磁性材料方面的成就，机械製造業的成就等等。俄罗斯学者对直流發电机的理論工作作出了很大的貢獻。在1880年Д. А. 拉契諾夫發表了電動式和磁电式电机的理論基礎。A. Г. 斯托列托夫在鉄磁材料方面的研究使有可能科學地論証电机磁路系統的計算。

在偉大的十月社会主义革命以後，隨着全俄國家电气化計劃的实现，电机製造在苏联獲得了廣泛的發展。在所有的巨大的电气工業的工廠中，製造着直流發电机(例如，在大型軋压

机的拖动机组中的发电机等)。在斯大林五年计划的年代裏，完全掌握了为发展工业所必需的一切型式的直流发电机的製造。科学研究工作的發展，特别是在直流发电机整流方面的發展(К. И. 孫菲尔, В. Г. 卡西雅諾夫等)，促進了直流电机製造工业的發展。在製造大型直流发电机和特殊直流发电机領域的成就，由斯大林獎金的授予可以看出。

直流发电机包含有(圖 1)不動部分——机架 1，在它裏面沿圓周配置有不同極性的电磁極 2，以及旋轉部分——轉子或电樞 3，由原动机(內燃机，水輪机，風力机，蒸汽机，电动机等)驅使旋轉。发电机的电樞由特种鋼(見电机鋼)的薄(達 0.5 毫米)片製成(圖 2)，薄片間用漆膜或薄紙來絕緣。压製的薄片組成了电樞的芯体 1，楔住在机軸上(所謂鼓形电樞)。在鋼片的外圓周上衝有缺口，当电樞裝配好以後在它的表面上形成了軸向溝(槽)，电樞繞組放入槽中。当电樞旋轉時，在它的繞組導綫中(見电磁感应)感应着交变电动势，它的頻率 f 等於

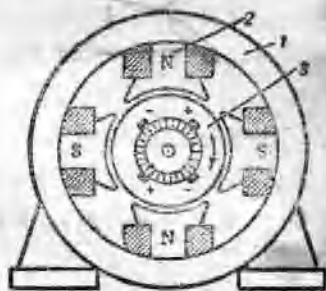


圖 1

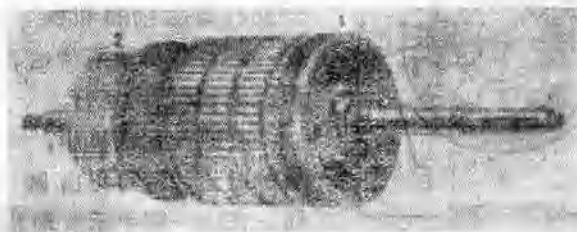


圖 2

$$f = \frac{p \cdot n}{60},$$

其中 p 为極对數(一北極和一南極), n 为电樞的每分轉數。繞組導線串聯联接, 以使它們的電動勢相加。在圖 3 中指出了实际上应用的把繞組串聯的兩種方法(疊繞組和波繞組)。为了在發電机的端點上獲得对時間为不变的(直流)电压, 要把感应发电機中的交变電動勢, 应用特殊的机械整流器[整流子(見整流



圖 3

子)]來整流, 整流子在結構方面和电樞組成一个整体(圖 2, 2)。这样, 直流發電机實質上是在結構上連有机械整流器的交流發電机 (見交流發電机)。單極直流發電机(見單極电机)是極少遇到的。

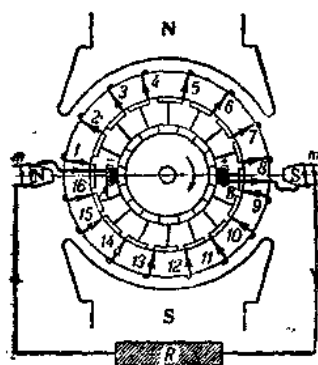


圖 4

和一切电机一样, 直流發電机也具有可逆性, 就是在一定的条件下, 它可以完成把直流电能变成旋轉运动的机械能的逆变換, 这样就成为直流電動机(見直流電動机)的运行。

在直流發電机中, 交变電動勢的整流过程可以由圖 4 來說明。在这一圖中示意地表示着具有环形电樞的兩極直流發電机

($p=1$)。为了簡單起見，繞組表示为繞在 樞体上的 綫匝 的形式，在这种情形下电樞具有环形圆柱的形狀(在电樞 表面上的槽沒画出)。繞組的每一匝(圖 3 和 4)和相应的整流器銅片(整流子)間有电气联接。整流子是圆柱形的且和樞体固定在共同的軸上。整流器截片分佈成圆柱形且互相絕緣(圖 2, 2)。在整流器的圆柱形表面上放着接觸电刷(見电刷) A 和 B (通常由受到特殊技術加工的碳粉或石墨粉压製)，它們相對於机架磁極有固定不移的位置(通常在中綫 $m-m$ 上，圖 4)。設取任一綫匝，例如 4，則当电樞旋轉時在它中間感应有交变电動勢，其波形約如圖 5 所示。这一電動勢曲綫的波形，与磁感应在电磁極面下沿着电樞圆周的分佈相对应。在那种情况下，当綫匝 4 通过磁場的中綫 $m-m$ 時電動勢有零值，当綫匝通过極面中心時電動勢有最大值。在相当於如圖 4 所示的电樞位置的瞬間，在电刷 A 和 B

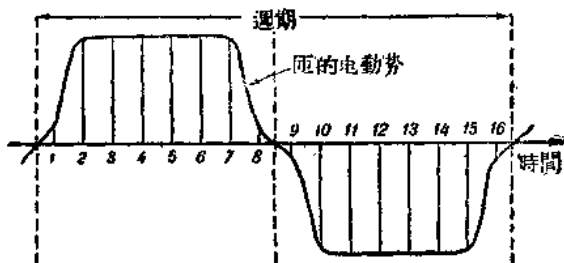


圖 5

間於繞組內部形成兩 条回路：其中 之一 包含有串联接的綫匝 1—8，另一回路包含有綫匝 9—16。当所研究的瞬間，在这些綫匝中作用着的電動勢，相当於在圖 5 中的曲綫的縱座标 1—8 和 9—16。作用於每一回路中的總電動勢，等於座标 1—8 和 9—16 的總和。在下一瞬間，当綫匝 8 从上面的回路轉入下面的回路，而綫匝 16 从下面的回路轉入上面的回路時，回路

的總電動勢保持它的數值，祇有當所指綫匝通過介乎二者之間的位置時感受到微小的振盪。當在每一回路中有足夠多的匝數時，這些振盪是微不足道的，而作用於每一回路中在電刷 A 和 B 間的總電動勢，實際上是不隨時間而變化的。假如把負載 R 接至電刷 A 和 B (圖 4)，則沿着負載回路流過了實際上不隨時間變化的電流(直流)。必須指出，這時在電樞繞組的每一綫匝中流過梯狀波形的交變電流(圖 6)：當綫匝處於同一回路中時



圖 6

(例如，上面的回路)，其中的電流不變，當它轉入另一回路中時(下面的回路)，電流突然變化，此後重新保持不變的數值，一直到再度轉入另一回路。這樣，在

直流發電機中，藉助於整流子，實現了把在繞組綫匝中感应的交變電動勢，轉變為作用於整流子電刷上的實際上是恒定的電動勢，以及把流過繞組綫匝的交變電流，轉變為在發電機負載回路中的直流。用整流子轉變電流和電動勢稱為整流，整流時不可避免地要有一部分繞組綫匝被電刷週期性地短路。這在許多情形下將導致電刷接觸點的火花，導致電刷和整流子的損壞。為了達到電刷接觸點的無火花運行，必須使作用在被電刷所短路的綫匝中的總電動勢接近於零。在現代的直流電機中，藉助於裝在整流帶(沿 $m-m$ 綫)且由負載電流勵磁的附加磁極 N 和 S (圖 4)來達到這一目的。附加磁極的磁場是這樣選擇的，要使在一切負載下，當電樞旋轉時，它在被電刷所短路的綫匝中感應一電動勢，平衡着在整流過程中當綫匝中的電流改變時(圖 6)發生在它們中間的自感和互感電動勢。

作用在未加負載的直流發電機的電樞繞組回路中的電動勢 E ，等於電刷間的電壓，正比於電樞的轉速 n 和場極磁通 Φ ：

$$E = kn\Phi,$$

式中 k 为比例常数。

当直流发电机加上负载时，端点(电刷)电压被改变，因为在电枢绕组中和在电刷接触点中，当电流通过时发生电压降，又因为由于在电磁极的磁场上叠加了电枢本身的磁场(所谓电枢反应)，以及由于在负载时机架电磁铁①的励磁电流的变化(在某些情形下)所引起的磁通 Φ 的变化。

这样，加上了负载的直流发电机的端点电压等于

$$U = E - I_a r,$$

而

$$E = kn(\Phi \pm \Delta\Phi),$$

式中 I_a 为电枢总电流(等于绕组各回路的电流之和)， r 为电枢绕组和电刷接触点的电阻， $\Delta\Phi$ 为在负载时场极磁通 Φ 的变化。沿着电枢绕组的导线而流通的直流发电机的负载电流，和电磁极的磁通相互作用，产生了反抗旋转的机械力。为了克服由于这些力所产生的力矩，原动机所发出的机械功率，应当和直流发电机的电磁功率 $E I_a$ 相当。直流发电机的特性(例如，

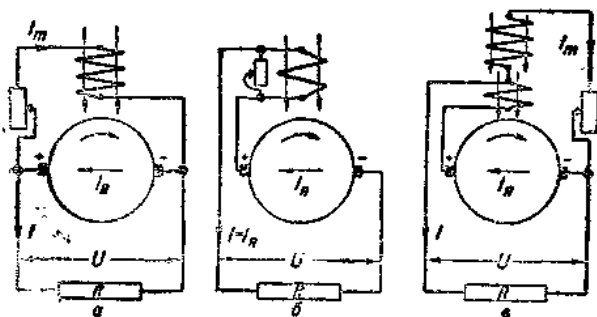


圖 7

① 指場極。——譯者

發電機的端點電壓 U 對負載電流 I 的關係基本上要看機架電磁鐵的勵磁方法而定。勵磁方法分為兩種：自勵和他勵。在第一种情形，電磁鐵的繞組由單獨的電源供電，且它們的勵磁和直流發電機的負載電流完全無關。自勵由不同的方法來實現，最通行的為：勵磁繞組並聯（分路）接入（圖7，a）；串聯（串勵）接入（圖7，b）；混聯接入——串聯和並聯（複勵）（圖7，c）；綜合接入，（各種較複雜的接線）。在 a, b, 和 c 的情形下，直流發電機的自勵過程如下：最初，在旋轉電樞中由電磁鐵的剩餘磁場感應一微小的電動勢，在這一電動勢的影響下，在電磁鐵回路中流過勵磁電流，起始勵磁電流加強了電磁鐵的磁場，這又導致了電樞電動勢的增長。自勵的可能性是直流發電機的可貴的特性，且容許直流發電機不向另外的電源求援而實現勵磁。

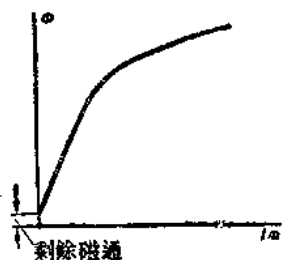


圖 8

磁通 Φ 對勵磁電流 I_m 的關係（所謂磁化特性），由於直流發電機磁路系統的飽和現象，具有非直線性的性質（圖 8）。關於磁路系統的飽和程度，也可以根據無載特性來判斷，無載特性是當電樞的轉速恆定時，未加負載的發電機的電壓對它的勵磁電流的關係。

當直流發電機為他勵時，在負載時的磁通變化 $\Delta\Phi$ 僅只由於電樞反應而發生，且通常是不大的（電樞反應通常減小磁通）。因此，對於這種類型的發電機，在負載時的端點電壓主要地隨着在電樞繞組中和在電刷接觸中的電壓降 $I_a r$ 而變化（圖 9，a）。在並勵發電機中（圖 7，a），磁通變化 $\Delta\Phi$ 的發生，既由於電樞反應，也由於因為端點電壓逐步降低而引起的勵磁電流的減小。因此，在這種類型的電機中，電壓 U 對負載電流

I 的關係曲線(外特性), 比在他勵時下傾得較多。在串勵發電機中(僅在特殊情況下應用), 負載電流同時也是勵磁電流。因此當負載電流增大時, 發電機的磁通增長, 端點電壓也增長(直到一定的極限)(圖 9, δ)。在複勵發電機中, 負載電流沿着電磁極繞組的一部分繞匝流通, 從而增大電機的磁通, 那種增大程度,

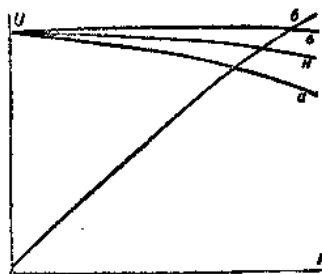


圖 9

正是為了補償電樞反應的祛磁作用和電壓降 $I_A r$ 所必需的。因此, 複勵發電機的外特性可能接近於一條和橫軸平行的直線(圖 9, δ)、大容量的直流發電機有時製成「補償的」。在那種發電機的電磁極中, 在電樞對面有軸向槽, 在它們中間放有所謂補償繞組的導線, 和電樞串聯連接。繞組是如此設計的, 使由它所產生的磁場補償電樞磁場。在那種發電機中, 電樞反應不再呈現, 而僅需考慮在電樞回路中的電壓降。直流發電機容許調整在端點上的電壓, 電壓調整或者由改變電樞的轉速來實現, 或者用接入相應的電阻的方法(圖 7)來改變在電磁極繞組中的勵磁電流。在必要的場合下, 兩台或幾台直流發電機可以在共同的負載上運行(直流發電機的並聯接入)。這時在直流發電機間的負載分配由相應地調節勵磁電流或原動機的功率來實現。

發電機的電壓通常不超過數百伏, 而高達數千伏的情況是比較少有的。隨着自動化的發展, 直流發電機作為電流調整器(見放大機, 電機調整器), 也獲得了廣泛的應用。當自動控制機構作用於發電機-調整器的勵磁電流時, 後者在調節繞路中加入了具有一定量值和方向的電動勢。應用了特殊的綜合勵磁



圖 10

接綫，達到了為自動化過程所必需的發電機-調整器的快速作用。

由直流發電機所完成的機械能(功率)至電能的轉變過程，不可避免地伴有能量損耗，那些損耗以熱量的形式而消散。由發電機所發出的電功率 P_2 ，對於由原動機所傳輸給它的機械功率 P_1 的比率，便是發電機的效率，且表徵着它的運行經濟性。發電機的效率 $(\eta = \frac{P_2}{P_1})$ 隨着它的正常功率的增長而增長。當功率 P_2 約為 1 瓩時 $\eta \approx 0.75$ ，當功率 $P_2 = 1000$ 瓩時 $\eta \approx 0.93$ 。由於在發電機中的能量發散而得到的熱量，引起它的發熱。為了避免過分地發熱(特別是通導電流部分的絕緣)，直流發電機具有特殊設計的且和旋轉着的轉子相聯繫着的空氣冷卻系統。現代直流發電機的概貌如圖 10 所示。

參 考 書 目

Э. X. 楞次：論由電動感應所引起的電流方向的確定，見楞次論文選集(Т. П. 克拉維茨編，1950 年列寧格勒版)。

Э. X. 楞次：論旋轉速率對由電磁機所感生的感應電流的影響，出處同上。

Э. X. 楞次：論磁力機原理，見電動機及其歷史發展。文件和資料(Д. В. 葉夫列莫夫，М. И. 拉多夫斯基，莫斯科——列寧格勒 1936 年第 1 版)。

Д. А. 拉勃諾夫：電力機械的工作。見「電」，1830 年第 1—2, 5—7 期。

Г. Н. 彼得洛夫：電機學，第 2 卷，1947 年莫斯科——列寧格勒版。

Л. М. 皮歐特洛夫斯基：電機學，1949 年列寧格勒——莫斯科版。

交流發電機

交流發電機是把旋轉的機械能量轉變為交流電能的機器。交流發電機區分為同步電機和異步電機(無整流子式和整流子式)。在交流同步發電機中，和異步電機相反，所發電流的頻率和電機轉子的轉速成正比。同步發電機應用最廣。交流發電機的特殊種類為異頻和高頻同步發電機(見高頻發電機)。異步發電機祇有在特殊裝置中獲得應用。

交流發電機的開始建造比直流發電機要遲得多，雖然交流感應原理是早已知道的。從實用觀點來注意大容量交流發電機，開始於十九世紀七十年代，由於那時 П.Н. 亞布洛契可夫(見亞布洛契可夫)之燭已被採用。由於他的倡導，建造了首批應用交流發電機的交流照明裝置。可是祇有在 М.О. 多里沃-多布羅夫斯基(見 М.О. 多里沃-多布羅夫斯基)作出了三相電流系統，以及在他直接參加下實現了從勞芬鎮至美因河上的法蘭克福城的第一次用三相交流的遠程(175 公里)電能輸送以後，交流同步發電機才獲得了廣泛的發展。在這一裝置中應用了 300 馬力，55 伏，30—40 赫的水力發電機(原動機為水輪機)。由於三相交流用於輸送和分配電能的無可置辯的優點，同步發電機的進一步的發展推進得極為順利。

蘇聯的電氣工業在製造同步發電機方面的成就很大。在執行全俄國家電氣化計劃(ГОЭЛРО)的過程中，蘇聯的電氣工業已經全盤掌握並製出了為蘇聯國民經濟所必需的一切型式和容

量的交流發電機，從數十瓩開始到數十萬瓩為止。

交流發電機由不動部分——定子(電樞) 1 和旋轉部分——轉子(感應子) 2 所組成(圖 1)。在定子內表面上在軸向溝(槽) 3 中置有交流繞組的導線 4。發電機的定子由特殊鋼(見電機鋼)所壓成的薄(達 0.5—0.35 毫米)片製成，薄片用漆膜或紙來絕緣。定子的鋼片楔住於電機的機架上。轉子放入定子內孔中。在高速電機中(汽輪發電機)轉子為有軸向槽的整塊銅柱(圖 2)，槽中置有直流勵磁繞組。在低速電機中(水力發電機)轉子是輪形(星形)的，在它的外表面上楔



圖 1



圖 2

住着極性依次輪換的電磁極(圖 3)，電磁極用直流電勵磁(見水輪發電機)。在小容量的同步發電機中，有時採用另外一種

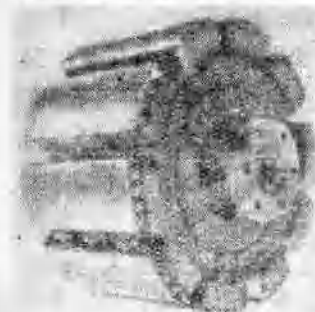


圖 3

結構，把交流繞組放在轉子上，而把勵磁繞組放在定子上。高速電機的轉子製成凹極式，而低速電機的轉子製成凸極式。發電機的轉子由原動機(汽輪機，水輪機，內燃機，風力機，電動機)驅動。由於原動機的不同，發電機可區分為：1) 蒸汽輪機發電機(或汽輪發電機)，2) 水輪發電機，3) 柴油發電機，4) 電

動發電機(原動機為電動機)。

轉子繞組由通常和交流發電機位於同一軸上且和它一起旋轉的直流發電機(所謂勵磁機)供電,有時也由直接接在交流發電機端點上的整流設備供電。在小容量的發電機中(例如,為了拖拉機上的照明而裝設的),代替電磁極採用永久磁極來勵磁。

當轉子旋轉時,依次經過定子繞組的導線旁邊的電磁極,按照電磁感應定律,將在導線中感應着正弦波形的或接近於正弦波形的交變電動勢(ЭДЭ),其頻率為

$$f = \frac{p \cdot n}{60},$$

式中 p 為極對數(一南極和一北極), n 為轉子轉速,以每分鐘的轉數表示, $\left(\frac{n}{60}\right)$ 轉子的每秒轉數。交流繞組的導線串聯連接,使在它們中間的感應電動勢相加(圖4)。交流發電機製成單相機和三相機。在最為通行的三相交流發電機中,交流繞組的導線對稱地被分為三組(相)。轉子磁極,依次在每相導線旁邊通過,在它們中間感應出電動勢 e_I, e_{II}, e_{III} , 按時間互移 $\frac{1}{3}$ 週期(120 電度)(圖1和5)。在交流發電機中繞組各相通常聯成星形(見多相交變電流)。用分佈每相導線於幾個相鄰的槽中、且把各相連接成星形的方法,能夠在交流發電機中獲得實際上為正弦波形的繞線電動勢(在發電機的端點上),即使每導線的感應電動勢是非正弦波形的。如同一切電機一樣,交流同步發電機也具有可逆性質,亦即,在一定的條件下,它可能實現交流電能變為旋轉機械能量的逆變換,作為電動機運行(見同步電機)。

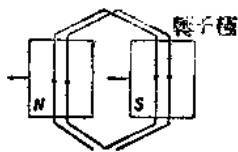


圖4

交流同步發電機通常用作恒定頻率的交流電源,這祇有在

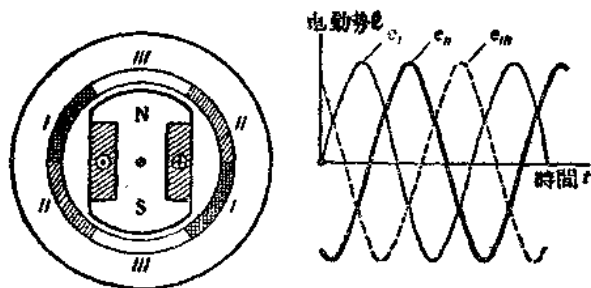


圖 5

轉子的轉速 n 為不變時才有可能。在定子三相繞組中所感应的交变电動勢 E_0 (電動勢 e_I, e_{II}, e_{III} 的有效值), 由改变轉子的直流勵磁电流 I_m 來調節。由於电机磁路系統的飽和現象, 電動勢和勵磁电流間的關係, 當 I_m 的數值不變時, 具有非直線性的性質, 如圖 6 所示(所謂磁化特性或無載特性)。



圖 6

當交流同步發電機有三相對稱負載時, 沿着定子繞組流過對稱三相電流。這一電流產生了它自己的磁場, 磁軸沿着定子圓周連續移動(旋轉), 其速率嚴格地等於感應這一電流的轉子的轉速(見旋轉磁場)。

由此得到「同步電機」的名稱, 着重指出了轉子旋轉和定子磁場旋轉的同步性。

決定着交流發電機在負載時的運行(行為)的定子旋轉磁場和轉子電磁鐵磁場間的相互作用的特徵, 隨着負載電流 I 與發電機電動勢 E_0 間的位移相角 ψ 而變化。當有純粹的有功電流時 ($\psi=0$), 即當交流發電機把機械功率轉變為有功電功率時, 定子磁場和轉子磁場間的相互作用導致了制動力矩的產生, 當克服這一制動力矩時由原動機所發出的機械功率適和電功率 $mE_0 I$ 相等 (m 為發電機的相數)。在這一情形下, 當它們一起

旋轉時，轉子磁場軸超前於定子磁場軸半個極距（90 電度）（圖 7, a）。

當有純粹的感應性電流時，電流 I 按相位較電動勢 E_0 滯後一角度 $\psi = 90^\circ$ ，且發電機的有功功率等於零，定子磁場和轉子磁場間的相互作用不產生制動力矩。在這一情形下它們的磁軸重合，而且定子磁場和轉子磁場反向，並產生了祛磁作用（圖 7, b）。为使發電機的轉子旋轉而消耗於原動機中的機械功率是極小的，且僅只決定於發電機的機械損耗和磁性損耗。當有純粹的電容性電流時，電流按相位較電動勢超前一角度 $\psi = 90^\circ$ ，這時發生了類似的現象，僅只在這一情形下，定子磁場形成磁化作用（圖 7, c）。定子（電樞）電流對於旋轉著的轉子的作用稱作電樞反應。

在一般情形下，當負載電流 I 較電動勢 E_0 滯後一角度 $0 < \psi < 90^\circ$ 時，它可以被分解為有功分量 $I_q = I \cos \psi$ 和無功分量 $I_d = I \sin \psi$ 。有功電流 I_q 以反抗力矩的形式產生了機械反應，而無功電流 I_d 產生了磁性反應（削弱或加強轉子磁場）。

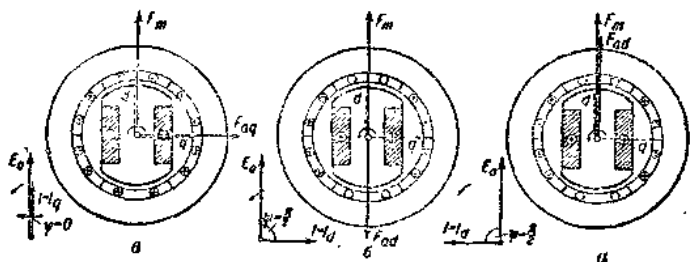


圖 7

由於交流發電機的電流和電動勢隨着時間按照接近於正弦波形的規律變化，而且在定子和轉子間的空氣隙中的旋轉磁場的磁感應也近似地按照同一規律變化，所以為了研究交流發電