

大學用書選譯

# 基本電工學

(下冊)



盛慶球譯

教育部出版  
正中書局印行

大學用書選譯

基本電工學  
(下)

盛慶球等  
A. E. Fitzgerald  
著譯

正中書局印行  
教育部出版



版權所有

翻印必究

中華民國五十八年三月臺初版  
中華民國六十一年二月臺三版

大學用書選譯 基本電工學 (全二冊)

BASIC ELECTRICAL ENGINEERING  
(CIRCUITS MACHINES ELECTRONICS CONTROL)

下冊 基本定價 二元二角  
外埠酌加運費滙費

著者	者	A. E. Fitzgerald	等
譯者	者	盛慶	球
出版者	者	教育	部
發行人	者	李	潔
發行印刷	者	正中	書局

(臺灣臺北市衡陽路二十號)

暫遷臺北市南昌路一段十二號

海外總經銷 集成圖書公司

(香港九龍亞皆老街一一號)

海風書店

(日本東京都千代田區神田神保町一丁目五六番地)

內政部登記證 內版臺業字第〇六七八號 (6326) 銘  
(1000)

## 第十一章 直流電機

第 10—5 及 10—6 節中所曾簡單敘述之直流電機，其主磁束係由磁場或定子繞組中之直流電所產生。其電樞或轉子端點亦加以或取出直流電。直流電動機及發電機有極具伸縮性及融通性之行為特性。當可控制性甚為重要時，此種特性特別有用處。在本章中將對此種特性作一量之考察。

### 11—1. 整流作用

整流子在直流電機中達成二重要功用：將電樞導體中之交變電壓及電流波形整流，俾可供應發電機之直流輸出或配合電動機之直流輸入，又使電樞或轉子之磁場不顧電樞之迴轉，而仍靜止於空間中，因而在發電機中供應一反轉矩或在電動機中供應一軸輸出轉矩。

欲考察在較圖 10—29 中者更為接近於現實繞組之作用，可考慮圖 11—1 中之簡單二極繞組。圖 11—1 *a* 中係垂直於軸之一截面圖。在圖 11—1 *b* 中，電樞乃扭曲為一截圓錘體之形狀，俾可較為充分顯示繞組及整流子連接之細節。圓錘之底部係在讀者之另一面，而圓錘之尖端則正對讀者。圖 11—2 *b* 中標以數字之軸射線，為電樞感應體 (Inductors)，此乃實際置於圓柱形電樞周圍之槽中者。靠近中心之扇形片為銅整流片 (Commutator segments)，而將感應體與感應體及感應體與整流片相連接之曲線，則為後端及前端連接 (Back and front connections)。所有此種部分俱隨電樞而迴轉。承於二整流片上之二黑塊為炭刷 (Carbon brushes)，此乃靜止者。此種炭刷之電氣位置，乃以圖 11—1 *a* 中之黑色長方塊表示。

整流可藉視圖 11—1 之電樞為逆時鐘方向迴轉而見之。靠近感應體之矢於是表示電壓升之方向，或當此電機為一有載之發電機時電流之方向。有二並聯通路自電刷經電樞而至電刷，一條經過感應體 8, 5, 2, 及 7 而另一條經過感應體 3, 6, 1, 及 4。

於是電刷間之電壓在二通路中，均為各個感應體電壓之和，如圖 11—3a 中所示，再減去其電阻降。在任一條通路中之感應體，均有相同方向之電壓。在四分之一轉以後之情況，如圖 11—2 及圖 11—2b 中所示，係與前相同，惟在並聯迴路中之感應體當其自一定子磁極下移至另一磁極下時，乃重行組合者。是以跨越電刷之電壓為一直流電壓。

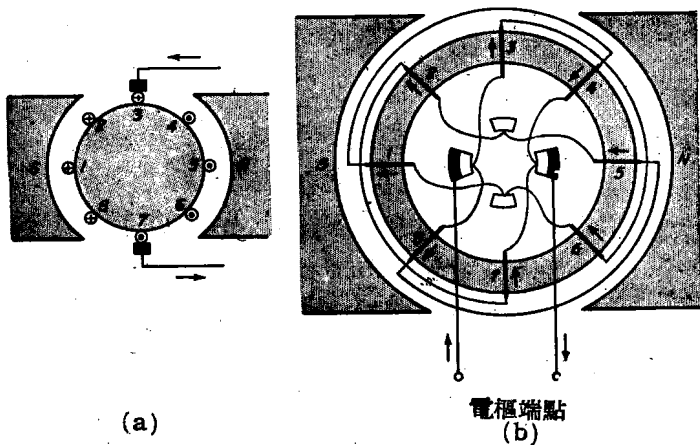


圖11-1. 基本2極直流電機電樞

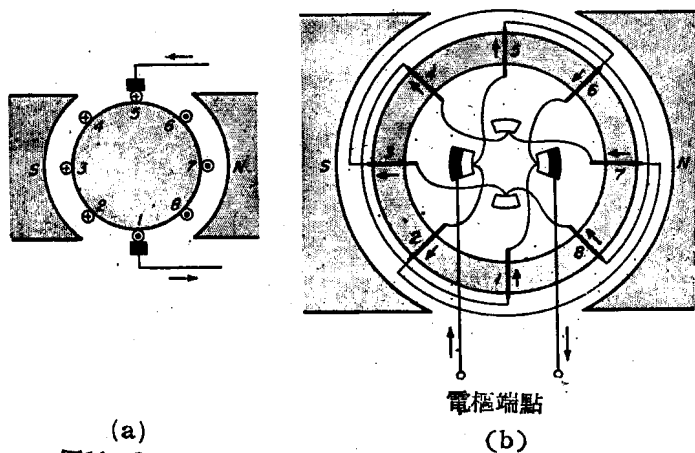


圖11-2. 基本2極直流電機電樞自圖 11-1之位置迴轉四分之一轉。

欲考察電樞對磁場所產生之效應，令圖11—2*b*代表一電動機之電樞，而有直流電供應至電刷於圖所示之方向。於是二並聯通路感應體中之電流方向乃如圖 11—2*b* 中之矢及圖 11—2*a* 中之點及十字所示。自圖11—2*a*可見電樞感應體產生一磁場，其北極係在底部電刷處，南極在頂部電刷處，而其軸為垂直。不同轉子

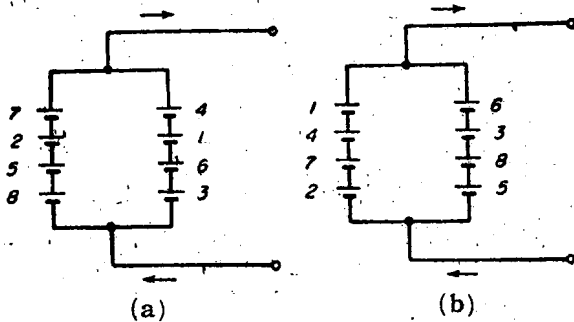


圖11—3. (a)圖11—1及(b)圖11—2 繞組中各個感應體電壓之簡單代表

與定磁極之相吸及相同磁極之相斥在電樞上產生一順時鐘轉矩。在四分之一轉以後，如圖 11—1 所示，其磁氣情況係與前相同，而仍有一順時鐘轉矩產生。於此可見整流子乃保持轉子磁場在空間中沿一由電刷軸所決定之軸向而靜止，不論電樞如何迴轉。因此有一單方向之轉矩產生。

圖11—1及11—2之繞組為二極鼓繞組 (drum winding)。實際繞組之一般性質與此相同，但具有較多之感應體因而亦有較多之整流片。圖 10—3 示一典型直流電樞及整流子裝置，而圖 10—26則示一自整流子端所見直流電機之完全裝置。在多於二極之電機中，有二種鼓繞組型式，稱為重疊繞組及波形繞組 (lap windings and wave windings)。在重疊繞組中，所需之電刷數及經過電樞之並聯通路數俱等於磁極數。在波形繞組中，所需之電刷數及並聯通路數，不論磁極數為何均等於 2；然而通常用等於磁極數之電刷數，以期減低電刷中之電流密度。

## 11-2. 電樞電動勢

電樞繞組在氣隙磁場中之迴轉感應得一電壓，稱為電樞電動勢 (Armature emf)，通常在發電機中稱為發生電動勢 (Generated emf)，而在電動機中稱為反電動勢 (Counter emf)。當每極之磁束  $\phi$  韋勃，磁極數  $p$ ，電樞速率  $n$  轉每分，電樞感應體數  $Z$ ，及經過電樞繞組並聯通路數  $a$  為已知時，此電動勢之大小，即可用法拉第定律而計算得。

現考慮一指定之電樞感應體，如圖 11-1 中之 1。在一完全轉中，此感應體切割  $p\phi$  條磁束線。此磁束量在每秒中切割  $n/60$  次，故平均切割磁束率為  $p\phi n/60$  伏特。但因經過電樞之通路不只一條，故在一正電刷與一負電刷間僅有  $Z/a$  感應體串聯（例如在圖 11-1 中之電刷間僅有四感應體串聯，而並非全部八個）於繞組之總感應電壓為

$$E = \frac{Z}{a} p\phi \frac{n}{60} \quad \text{伏特} \quad (11-1)$$

如第 11-1 節中所論，對於波形繞組  $a=2$ ，而對於重疊繞組則  $a=p$ 。因  $Z$ ， $a$ ，及  $p$  為由特殊設計所決定之常數，故公式 (11-1) 可重寫為

$$E_a = k\phi n \quad (11-2)$$

在電動機中， $E_a$  反抗電樞端電壓。電樞端電壓與電樞感應電壓之差，為電樞電阻降而決定電樞電流。在發電機中， $E_a$  係較電樞端電壓大以電樞電阻降。若電樞繞組為開路因而並無電樞電阻降，則感應電壓與端電壓將為相等。事實上感應電壓可用七方法而由實驗求得為磁場電流之函數，此將於第 11-4 節中較為詳細討論之。

## 11-3. 等效迴路

將以上之考慮，電動機或發電機電樞之等效迴路為包含電樞

電阻  $R_a$ ，在其一端有電樞端電壓  $V_a$  存在而在另一端則有電樞電動勢  $E_a$  存在。此迴路係示於圖 11—4 中。

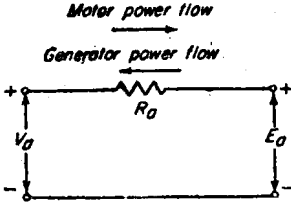


圖 11—4. 直流電機電樞之等效迴路

Motor power flow  
 電動機功率流動  
 Generator power flow  
 發電機功率流動

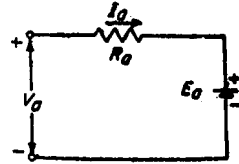


圖 11—5. 直流電動機電樞之等效迴路

功率流動之方向，可用以區別發電機與電動機之作用。為強調之故，專為電動機之電樞等效迴路，重繪於圖 11—5 中，而專為發電機者，係重繪於圖 11—6 中。在此二圖中， $I_a$  為電樞電流。就整個電機而言，必須計及分激及串激磁場之存在。包括分激及串激磁場之複激電動機之連接圖與等效迴路間之比較，係示於圖 11—7a 及 b 中。複激發電機相應之等效迴路，係示於圖 11—8 中。在此種圖中， $I_f$  為分激磁場電流， $I_L$  為線電流， $V_t$  為電機端電壓， $R_f$  為分激磁場迴路電阻，而  $R_s$  為串激磁場電阻。若為一分激電機，串激磁場及  $R_s$  即被略去，而電壓  $V_t$  與  $V_a$  相等；若為一串激電機，則分激磁場， $R_f$  及  $I_f$  即被略去，而電流  $I_a$  與  $I_L$  相等；若為一另激電機，則其迴路即為圖 11—5 或 11—6 中者，其磁場係由另一分開之電源所供給。

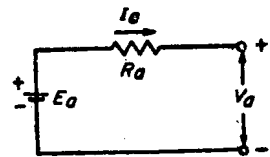


圖 11—6. 直流發電機電樞之等效迴路

圖 11—7 及 11—8 示一所謂長分連接 (Long shunt connection)，其意乃指分激磁場係直接跨接於線間，而串激磁場則處於其與電樞之間。另一種可能連接，為短分連接 (Short shunt connection)，則分激磁場直接跨接於



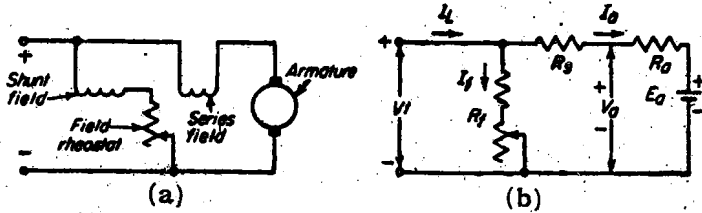


圖11—7. 直流複激電動機之(a)連接圖及(b)完全等效迴路

Shunt field	分激磁場
Field rheostat	磁場變阻器
Series field	串激磁場
Armature	電樞

電樞，而串激磁場處於其與外線之間。此二種連接法之實際差別極小，故以後對此，不再加以區別，而所有情形均將依照圖11—7及11—8而處理。

自此種等效迴路中，電壓與電流之基本關係，立即顯然可見。此種關係為

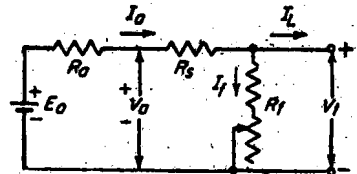


圖11—8. 直流複激發電機之完全等效迴路

$$V_a = E_a \pm I_a R_a \quad (11-3)$$

$$V_t = E_a \pm I_a (R_a + R_{sf}) \quad (11-4)$$

及  $I_L = I_a \pm I_f \quad (11-5)$

正號係用於電動機，而負號則用於發電機。上述對分激及串激電機之簡化，當然亦可應用於此種公式中。功率  $V_a I_L$  為電動機之輸入及發電機之輸出。

例題11—1. —230 伏特分激電動機有 0.1 歐姆之電樞電阻。此電動機係運轉於 230 伏特幹線而有 1,150 轉每分之速率，並取 100 安培之電樞電流。現將 —1.0 歐姆之外在電阻插入與電樞串聯。磁場變阻器定置係維持不變，而負載則係如此調準，使電樞電流維持與前相同。

計算此外在電阻對於電樞迴路輸入，電樞電動勢，及速率之效應。

解：在電阻插入之前，

$$\text{電樞迴路輸入} = V_t I_a = (230)(100) = 23,000 \text{ 瓦}$$

$$E_a = V_t - I_a R_a = 230 - (100)(0.1) = 220 \text{ 伏特}$$

在電阻插入以後，

$$\text{電樞迴路輸入} = (230)(100) = 23,000 \text{ 瓦}$$

$$E_a = 230 - 100(0.1 + 1.0) = 120 \text{ 伏特}$$

因磁場變阻器定置未曾改變，故  $I_f$  及  $\phi$  亦均未改變。因此，根據公式 (11—2)， $E$  與  $n$  間有正比存在，而

$$n = 120 / 220 (1,150) = 627 \text{ 轉每分}$$

#### 11—4. 磁化曲線

除公式 (11—1) 至 (11—5) 之外，另有一種關係，對於直流電機行為之決定，甚為重要：即磁場電流或磁場安匝與電樞電動勢  $E_a$  間之關係。此可藉磁路計算而自設計數據求得，並藉公式 (11—1) 而表示出電路中之電壓  $E_a$  以代替磁路中之磁束  $\phi$ 。或如前所述，亦可將電機作為無載發電機於所需之速率驅動之，並記錄其相應於一串磁場電流值之一串電樞電壓值而實驗求得。如此獲得之曲線為磁化曲線，飽和曲線，或開路特性 (Magnetization curve, saturation curve, or open-circuit characteristic)。圖 11—9 中者即為此種曲線之典型。

當然，直流電機之速率不一定維持恆定。為之故，圖 11—9 示在若干不同速率之磁化曲線。自公式 (11—1) 及 (11—2)，可知在固定磁束或磁場電流時，電壓係與速率成正比，故任一曲線可自任何其他曲線求得。又直流電機可有一分激及一串激繞組，如此連接俾其磁動勢能相加。就複激電機而言，其磁化曲線係在僅有分激磁場電流時求得。如圖 11—9 中所示，其橫座標可乘以每極之分激磁場匝數而改變為每極之安匝數。於是新橫座標可

解釋為在磁路上所有磁動勢之淨總值。

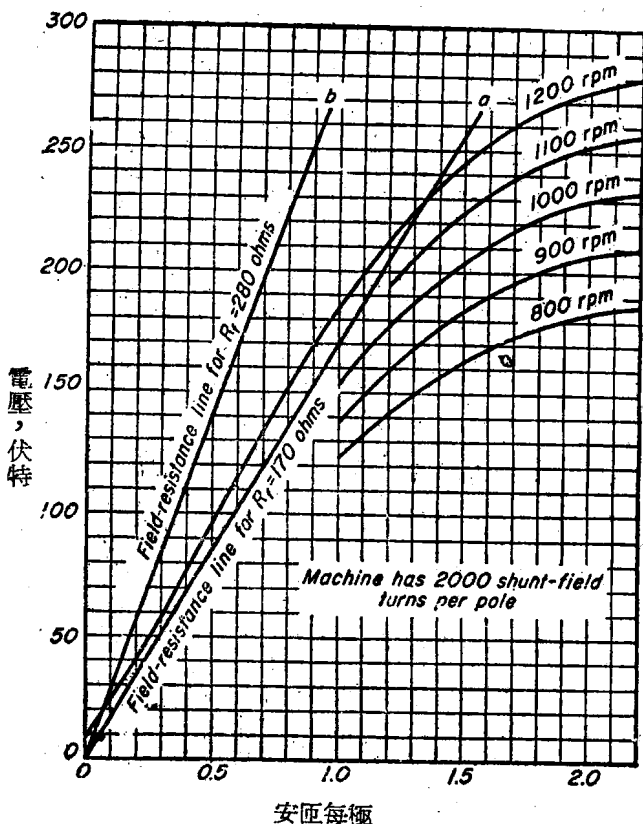


圖11—9. —230 伏特 1,200 轉每分直流電機之磁化曲線。  
此為 15 瓩發電機或 15 馬力電動機之典型曲線

Field resistance line for  $R_f = 280$  ohms  $R_f = 280$  歐姆時之磁場電阻線  
rpm 轉每分  
Machine has 200 shunt-field turns per pole 電機每極有 2,000 分激磁場匝  
Shunt-field current, amperes 分激磁場電流，安培

例題11—2. —15 瓩 230 伏特直流發電機有 0.1 歐姆之電樞電阻及圖11—9之磁化曲線。當電樞電流保持恆定於 50 安培時，

如速率自 1,200 降至 1,100 轉每分，磁場磁動勢必須改變至如何程度，方可保持其電極端電壓恆定於 230 伏特？

解：電樞電動勢必須保持恆定於

$$E_a = V_a + I_a R_a = 230 + 50 \times 0.1 = 235 \text{ 伏特}$$

在 1,200 轉每分時，自圖 11—9 知其相應之磁場磁動勢 2,800 安匝每極。在 1,100 轉每分時，其磁場磁動勢為 3,300 安匝每極。祇以分激磁場之激磁表示，磁場電流之改變為自 1.40 至 1.65 安培。

應記任何磁化曲線，乃代表在一磁壓環（參閱第 8—4 節）中之平均運轉情況。故在固定運轉情況下，發電機之電壓或電動機之速率，乃視運用於磁壓環上之特殊部分而定，因而亦視鐵心迴路之磁歷史而定。是以例題 11—2 中之結果中，有某種程度之不準確，乃無可避免者。

### 11—5. 發電機行爲

如第 10—7 節中所示，直流發電機中之損耗包括磁路中之鐵心損耗，摩擦與風力，雜散負載損耗，及發電機電路中之  $I^2 R$  損耗。鐵心損耗加摩擦與風力乃稱為無載迴轉損耗 (No load rotational loss)。總銅損耗必須包括炭刷與銅整流子間電壓降者，炭刷接觸損耗 (Brushcontact loss)。電刷接觸降通常乃取為 2 伏特，故電刷接觸損耗為  $2 I_a$  瓦。

有分激及串激磁場（參閱圖 11—8）直流發電機之功率平衡表係示於圖 11—10 中。其記號係用第 11—3 節中者。在 1 至 100 瓦範圍內之發電機，其全載時損耗成分之典型大小程度，以電機輸入之百分數表示，亦示於圖 11—10 中，其中較小之百分數乃用於較大之定額者，發電機效率則可自公式 (10—6) 至 (10—8) 求得。

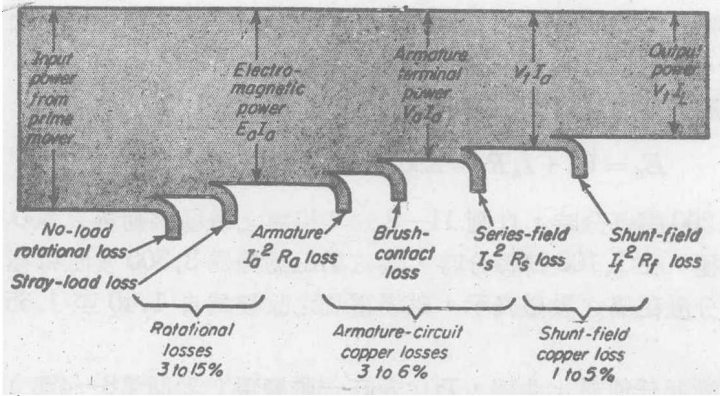


圖11—10. 直流發電機中之功率分配

Input power from prime mover	來自原動機之輸入功率
No-load rotational loss	無載迴轉損耗
Stray-load loss	雜散負載損耗
Electromagnetic power $E_a I_a$	電磁功率 $E_a I_a$
Armature $I_a^2 R_a$ loss	電樞 $I_a^2 R_a$ 損耗
Brush contact loss	電刷接觸損耗
Armature terminal power $V_a I_a$	電樞端點功率 $V_a I_a$
Series-field $I_s^2 R_s$ loss	串激磁場 $I_s^2 R_s$ 損耗
Shunt-field $I_f^2 R_f$ loss	分激磁場 $I_f^2 R_f$ 損耗
Output power $V_t I_L$	輸出功率 $V_t I_L$
Rotational losses 3 to 15%	迴轉損耗 3 至 15%
Armature-circuit copper losses 3 to 6%	電樞迴路銅損耗 3 至 6%
Shunt-field copper loss 1 to 5%	分激磁場銅損耗 1 至 5%

電磁功率 ( Electromagnetic power )

$$P_m = E_a I_a \quad (11-6)$$

為自能量變換過程所獲得之內部電樞功率。此為圖 11—8 之迴路中假想蓄電池之功率輸出。此功率較諸機械功率輸入小以迴轉損耗之量。而較發電機輸出大以銅損耗之量。是以圖 11—8 之等效迴路又係包括銅損耗，但並不包括迴轉損耗。故在計算總輸入時，必須對後者另行計及。

公式 ( 11—1 ) 至 ( 11—5 ) 所表示之關係，圖 11—9 所代表

之磁化曲線，及圖 11—10 中所說明之功率平衡觀念，組成發電機分析之主要部分。彼等特別易於應用於另激發電機，蓋磁場電流係由一分開之電源所供應，因而在物理上與電樞情況無關之故。在恆定磁場電流及恆定速率時，在此情形中，當負載增加時由於電樞電阻降增加之故，端電壓稍稍下降。此種下降係如圖 11—11 中之虛線所示。

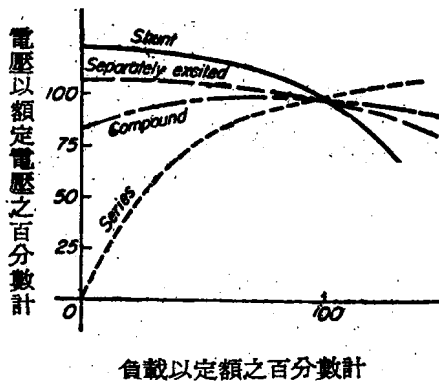


圖 11—11. 直流發電機負載電壓曲線。發電機係調準至在全載時有額定電壓

Shunt	分激
Separately excited	另激
Compound	複激
Series	串激

### 11—6. 自激發電機

在分激發電機中，激磁與端電壓係直接由歐姆定律所關聯：

$$V_t = I_f R_f \quad (11-7)$$

公式 (11—7) 之圖形表示，如圖 11—9 中之 oa 線，乃稱為磁場電阻線 (Field-resistance line)。此為端電壓對分激磁場電流運轉點之軌跡。是以 oa 線係為  $R_f = 170$  歐姆而繪成，因而經

過原點及(1.0 安培, 170 伏特)點。

磁場電阻線之用處，可藉先考察分激發電機電壓之建起 (Build-up)，及其次考察當加以負載時電壓之改變而說明之。設發電機被驅動於 1,200 轉每分。當將磁場迴路關閉時，自剩磁所得之小電壓 (圖 11—9 中磁化曲線之 8 伏特截點) 引起一小磁場電流。若其安匝所產生之磁束加於剩磁之上，即得逐漸增大之電壓及磁場電流，而發電機即稱為建起。若磁場安匝與剩磁相反，則分激磁場端點必須顛倒方可建起。建起可繼續至磁化曲線及磁場電阻線所代表之關係能同時符合為止，即直至其交點處 (圖 11—9 中之 230 伏特)。注意若磁場電阻太高，如 0b 線所示之  $R_f = 280$  歐姆，則交點在一極低電壓處，而不能獲得建起。又注意若磁場電阻線切於磁化曲線之較低部分，相當於圖 11—9 中之 190 歐姆，則交點可在約自 40 至 160 伏特之任何處，因而引起極不穩定之情況。此乃稱為臨界磁場電阻 (Critical field resistance)，在此之外即不能獲得建起。

當負載增加時，分激發電機之端電壓即將減低，此乃由於電樞電阻降之增加，及隨電壓下降而致磁場電流減低之故。電壓隨負載之降低係示於圖 11—11 中。因磁場電阻線為  $V_t$  對  $I_f$  之軌跡，而磁化曲線為  $E_a$  對  $I_f$  之軌跡，故在任何  $I_f$  值時，此二曲線間之垂直距離，必為在相應於此負載情形時之  $I_a R_a$  降。此一事實，可用以求得在一已定電樞電流及磁場電阻時之端電壓。

例題 11—3 —15 瓦發電機有 0.0985 歐姆之電樞電阻及圖 11—9 之磁化曲線。此發電機係由一恆定速率 1,200 轉每分之原動機所驅動。其分激磁場變阻器係調準至 230 伏特之無載端電壓。求在 66 安培電樞電流時之端電壓及功率輸出。

解：oa 線 (圖 11—9) 經過磁化曲線上之 230 伏特點，因而即為此情形之磁場電阻線。 $I_a R_a$  降為 (66) (0.0985) = 6.5 伏特。在  $I_f = 1.20$  安培時，oa 線與磁化曲線間之垂直距離為 6.5 伏特。自 oa 上之此點，其端電壓為 206 伏特。又

$$I_L = I_a - I_f = 66 - 1.2 = 64.8 \text{ 安培}$$

而 輸出  $= V_f I_L = (206)(64.8) = 13,350$  瓦

在串激發電機中，因負載電流即為磁場電流，故磁束隨負載而大為改變。其電壓負載特性與磁化曲線相類似，但因電阻降之故而稍低。如圖 11—11 中之點線所示。因工業電力系統幾均為恆定電壓系統，故極少用串激發電機。

無載複激發電機之建起係與分激發電機相同，因在無載時串激磁場載有零或微不足道計電流之故。當發電機有載時，分激與串激磁場二者均存在。串激磁場可為疊積 (Cumulatively) 連接俾其磁動勢可加於分激磁場之上，或為差異 (Differentially) 連接，俾其適相反。差異連接者極少使用。

就複激發電機而言，用安匝或每極之安匝作為磁化曲線之橫座標甚為方便。對於疊積連接，此量即為分激與串激磁場安匝之和。在分激發電機中，自無載至全載電壓減低之原因可藉加以串激磁場，而將其一部分或全部或過份抵消。在平複激發電機 (Flat-compounded generator) 中，乃全部抵消，故無載與全載端電壓相等。若全載電壓較無載電壓為低，則發電機為欠複激 (Under compounded)；若較高，則為過複激 (Over compounded)。圖 11—11 之複激特性乃一過複激發電機者。

例題 11—4. 在例題 11—3 中發電機之分激磁場繞組上有 2,000 匝每極。求欲使發電機成為 230 伏特平複激所需之串激磁場匝數。

解：因無載激磁完全在分激繞組中，故為 230 伏特之無載電壓時  $I_f = 1.34$ 。此值必須亦為全載時  $I_f$  之值，因磁場電阻並未改變而端電壓仍為 230 伏特之故。即在無載及全載時分激磁場磁動勢為  $(2,000)(1.34) = 2,680$  安匝每極。

在全載時

$$I_L = \frac{15,000}{230} = 65.2 \text{ 安培}$$

$$I_a = 65.2 + 1.34 = 66.5 \text{ 安培}$$



而

$$E_a = 230 + (66.5)(0.0985) = 236.5 \text{ 伏特}$$

自磁化曲線知，此值需要 2,820 安匝每極之磁動勢。故串激磁場需要

$$\frac{2,820 - 2,680}{66.5} = 2.1 \text{ 匝每極}$$

此值必須改至半匝之倍數。事實上，通常係繞較多之匝數並藉置一低電阻分路與串激繞組並聯，以分散一部分電樞電流，而使電機調準至所需之複激。

## 11-7. 電動機行爲

兼有分激及串激磁場直流電動機之圖解功率平衡表係示於圖 11-12 中。其損耗係與相當之發電機中者相同。在 1 至 100 馬力範圍內，電動機全載時損耗之大小程度以輸入之百分數表示，亦示於圖 11-12 中。在電動機中，其電磁功率，即公式 (11-6)，係較軸輸出大以迴轉損耗之量，而較電動機輸入小以銅損耗之量。

如發電機然，公式 (11-1) 至 (11-5)，即磁化曲線及功率平衡表為分析之基礎。電動機問題常為關於速率，轉矩，及其相互關係者。電動機之運轉速率係如此，使其能符合公式 (11-1) 或 (11-2)，其中之反電動勢  $E_a$  係由電路量與等效迴路 (圖 11-5 或 11-7) 所決定，而磁束  $\phi$  則由磁動勢考慮與磁化曲線 (圖 11-9) 所決定。當運轉情況改變而磁束  $\phi$  維持恆定時，速率係與  $E_a$  成正比。當磁束改變時，常便於將  $E_a/n$  以伏特每轉每分計繪為磁化曲線之縱座標。根據公式 (11-2)，此程序乃相當於繪出  $k\phi$ 。圖 11-9 之曲線係如此重繪於圖 11-13 中。注意橫座標維持恆定，而縱座標則成為圖 11-9 之 1,000 轉每分曲線除以 1,000。於是單獨一條曲線包括所有之可能速率在內。電動機轉矩普通係藉考察相應於運轉速率  $n$  時，電磁功率  $P_m$  之電磁轉矩  $T_m$  (Electromagnetic torque) 而研究之。即，根據