單元 2

直流發電機

單元重點

直流發電機就是產生直流電的機器，依據弗萊明右手 (發電機) 定則，發電機的各種設計就是要將拇指代表的【力】順利轉換成中指所代表的直流【電】能，而食指所代表的【磁】場則扮演關鍵的協助者。為了因應不同的用途，直流發電機有許多型式或是加裝一些輔助設備。掌握好上述觀念，對於本單元的學習會有很大的幫助。

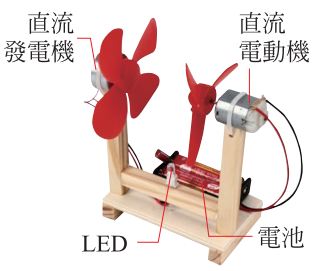
單元綱要

第三章　直流發電機之原理
第四章　直流發電機之構造
第五章　直流發電機之一般性質
第六章　直流發電機之分類、特性及運用
第七章　直流發電機之耗損及效率

本單元學習時間　18 小時

單元二　生活知識家　直流電機的兩種運轉模式

西元 1873 年比利時人格拉美和他的夥伴在維也納展示發電機時，有人無意間將兩部相隔很遠的發電機用電線接在一起，當蒸汽機推動其中一部發電機時，另一部位於遠處的發電機卻開始轉動起來，變成電動機，人們意外發現原來把發電機倒過來使用就變成電動機，如圖是一具小型風力發電機教具，右側直流電動機將電池電能轉變成機械能後，帶動風扇模擬風力吹向左側，直流發電機將機械能轉變成直流電能後，點亮下方 LED。



思考看看，如果再將直流發電機產生的直流電能提供給直流電動機，是否就可以創造出源源不絕的動力？YOUTUBE 的熱門搜尋「永動機」是真是假呢？

CHAPTER 3

直流發電機之原理

本章重點

西元 1831 年法拉第發現磁鐵與線圈間有相互運動時可以產生電流後，開啓了後續科學家如冷次 (Lenz)、弗萊明 (Fleming) 以及西門子 (Siemens) 的持續研究。西元 1873 比利時人格拉美 (Gramme) 終於取得重大突破，生產出符合市場需求的直流發電機，這種設計的基礎也一直延續到今，本章將回溯一百多年前這些偉大科學家的重要發現，一起認識直流發電機的基本原理。

3-1 直流發電機基本原理

(一) 簡易發電機

法拉第發現導體與磁場間有交互運動就能產生感應電勢。由於圓周運動比直線運動容易進行，因此最簡易的發電機構造如圖 3-1，將直導線繞成口字形的線圈後放入磁場中並以外力旋轉，此時線圈兩端導體因爲與磁場割切而產生電壓，再透過滑環與電刷將電能輸送出來，原理說明如下：

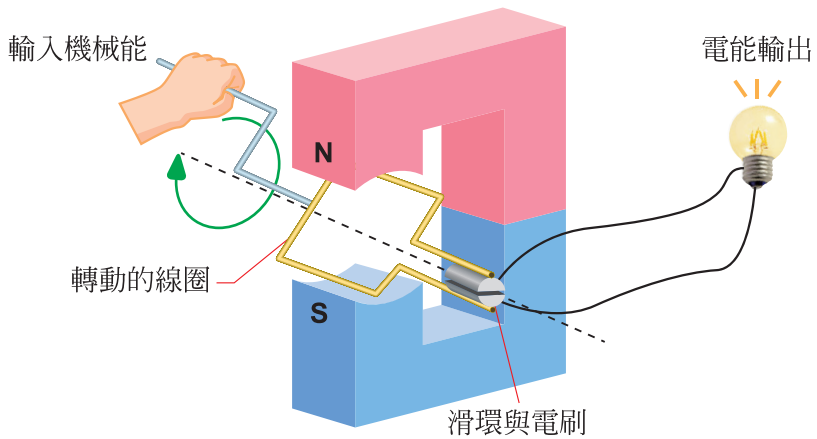


圖 3-1　簡易發電機

範例 01

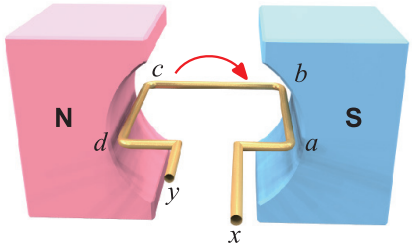
如右圖所示，將一根導線繞成 0.5 m × 0.5 m 的單匝線圈，在磁通密度 $B = 2\ \text{Wb/m}^2$ 的磁場中順時針旋轉，倘若導體瞬間移動速度為 6 m/sec，求：

(1) 導體 ab 兩端的電壓大小、

(2) 導體 bc 兩端的電壓、

(3) 導體 cd 兩端電壓、

(4) xy 兩端電壓。



解 (1) 導體 ab 瞬間向下垂直運動 ($\theta = 90°$)，因此

$e = B\ell v \sin\theta = 2 \times 0.5\ \text{m} \times 6 \times \sin 90° = 6\ \text{V}$，

依據弗萊明右手定則，電流

由 a 端流出，$e_{ab} = +6\ \text{V}$

(2) 導體 bc 方向與磁場方向平行 ($\theta = 0°$)，$e = 0\ \text{V}$

(3) 導體 cd 瞬間向上垂直運動 ($\theta = 90°$)，因此

$e = B\ell v \sin\theta = 2 \times 0.5\ \text{m} \times 6 \times \sin 90° = 6\ \text{V}$，

依據弗萊明右手定則，電流由 c 端流出，因此 $e_{cd} = +6\ \text{V}$

(4) xy 兩端的電壓：$e_{xy} = e_{ab} + e_{bc} + e_{cd} = 6 + 0 + 6 = 12\ \text{V}$

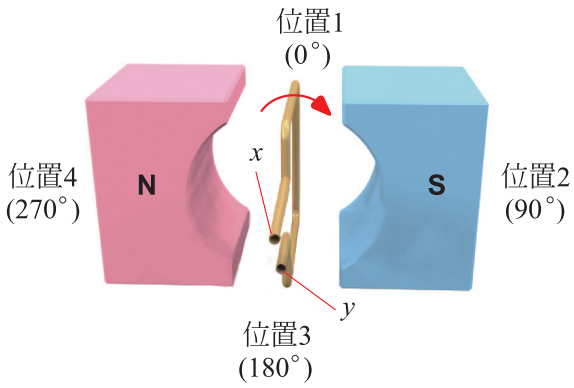
由範例 01 可以發現，**1 匝線圈中只有 2 根 (ab 以及 cd) 導體因爲移動方向能與磁場垂直而產生感應電勢，稱爲有效線圈邊**。與磁場方向平行的導體 (bc) 雖然無法產生感應電勢，但是可以將有效線圈邊的電壓串接起來，因此不可省略。

(二) 交流電的產生

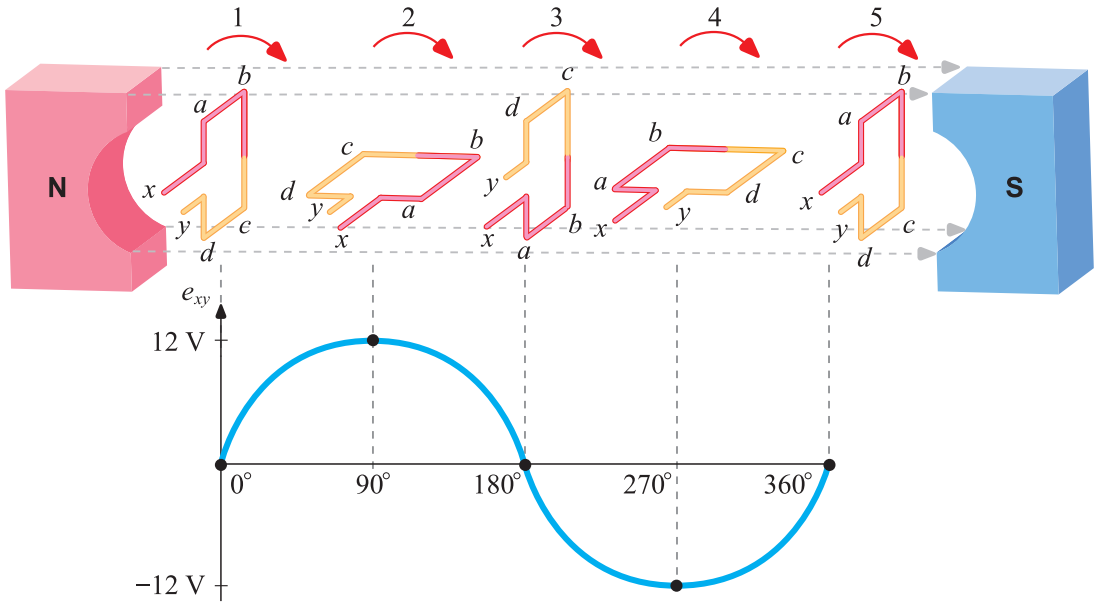
單匝線圈在圖 3-2(a) 磁場中以順時針方向旋轉時產生的電壓關係爲：

1. 位置 1：ab 與 cd 的瞬間運動方向與磁場平行 ($\theta = 0°$)，應電勢爲 $e_{xy} = 0\ \text{V}$。
2. 位置 2：導體瞬間運動方向與磁場垂直 ($\theta = 90°$)，兩根導體感應電勢最大，電流由 x 端流出。依據範例 04 數據，線圈兩端的電壓 $e_{xy} = 12\ \text{V}$。
3. 位置 3：導體運動方向與磁場平行 $e_{xy} = 0\ \text{V}$。

4. 位置 4：導體運動方向與磁場垂直 ($\theta = 90°$)，兩根導體感應電勢最大，但此時電流由 y 端流出，故線圈兩端的電壓 $e_{xy} = -12$ V。



(a) 單匝線圈在磁場中運動



(b) 單匝線圈在磁場中運動一圈產生的感應電勢波形

圖 3-2　交流電的產生

依據上述，線圈在磁場旋轉時所產生的電源型態爲交流電，而線圈每經過一對磁極 (N 極與 S 極) 就會感應產生一個正弦波。

為了增加線圈兩端的電壓，最常用的方式就是增加線圈的匝數，如圖 3-3 所示，將導線以相同方式繞製 3 圈 (3 匝) 後產生的電壓就是單匝線圈的 3 倍，再把線圈兩端安裝於轉部的滑環 (slip ring) 後與固定的電刷接觸，就能將線圈產生的交流電連續提供給負載使用，此種發電機稱為『旋轉電樞式交流發電機』。

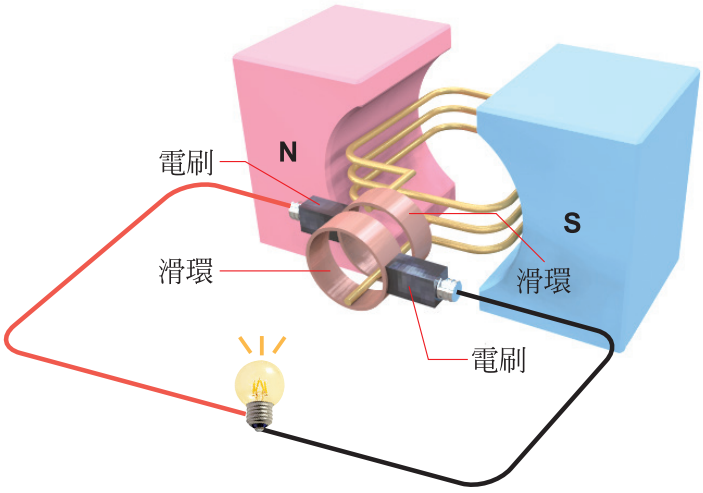


圖 3-3 旋轉電樞式交流發電機

隨堂練習

( ) 1. 直流發電機電樞繞組內部產生的電源型態為
(A) 脈波 (B) 直流 (C) 交流 (D) 整流方波。

( ) 2. 有一部 6 極直流發電機，電樞繞組旋轉 1 圈，其應電勢變化
(A) 1 個 (B) 3 個 (C) 6 個 (D) 12 個 正弦波。

( ) 3. 如圖 3-3 所示，電樞線圈有幾根有效導體
(A) 2 根 (B) 3 根 (C) 6 根 (D) 12 根。

(三) 交流電轉換成直流電

1. 發展歷史

1831 年法拉第示範了發電機的基本概念後，不少科學家花了終身之力研究實用的直流發電機，法國人畢克西 (Pixii) 在 1832 年示範了第一架發電機，但是功能與效率都很差，直到 1866 年，德國科學家西門子 (圖 3-4) 用強力的電磁鐵取代永久磁鐵後，性能才提升。

1871 年比利時人格拉美 (Gramme)(圖 3-5) 解決了空氣隙太大以及電樞繞組繞線不良的難題後，於 1873 年推出符合市場需求的直流發電機 (Gramme machine)，其構造如圖 3-5(b) 所示。

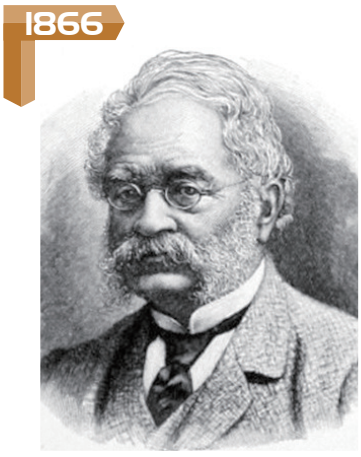
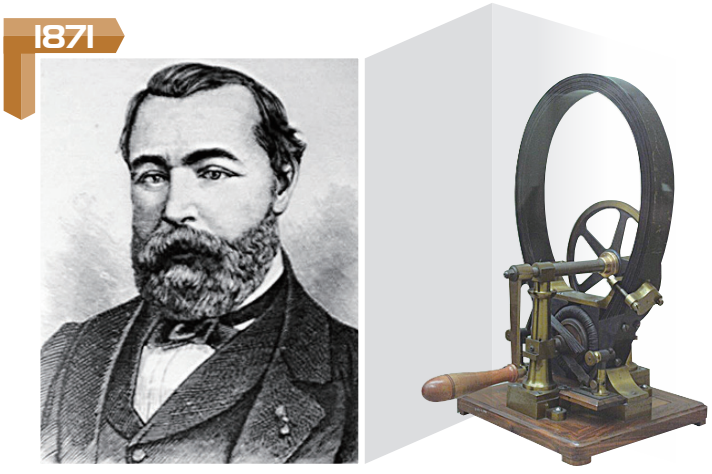


圖 3-4　西門子
(Ernst Werner von Siemens)
(圖片來源：維基百科)



(a) 格拉美 (Zenone Gramme)　(b) 格拉美機器 (Gramme machine)

圖 3-5　格拉美與其設計的直流發電機
(圖片來源：維基百科)

目前大多數的直流發電機仍延續格拉美在 100 多年前的設計，包括三個基礎部分，圖 3-6 中**兩側靜止不動的稱爲定子 (stator) 目的是供給磁場；在定子裡面旋轉的線圈稱爲電樞 (armature)**，旋轉的動力來自於水輪機或是渦輪機。由於電樞在磁場中旋轉時產生的是交流電，因此**直流發電機必須加裝換向器 (commutator)，將電樞產生的交流電轉變成直流電後**，透過電刷傳遞給負載使用。

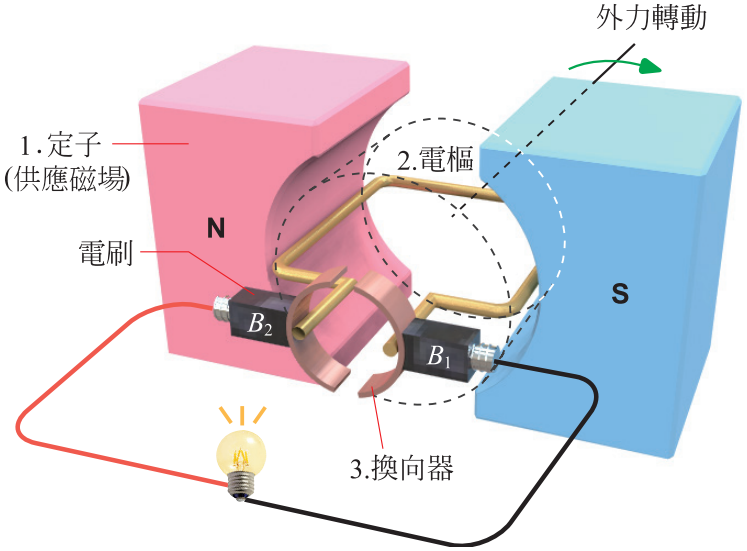
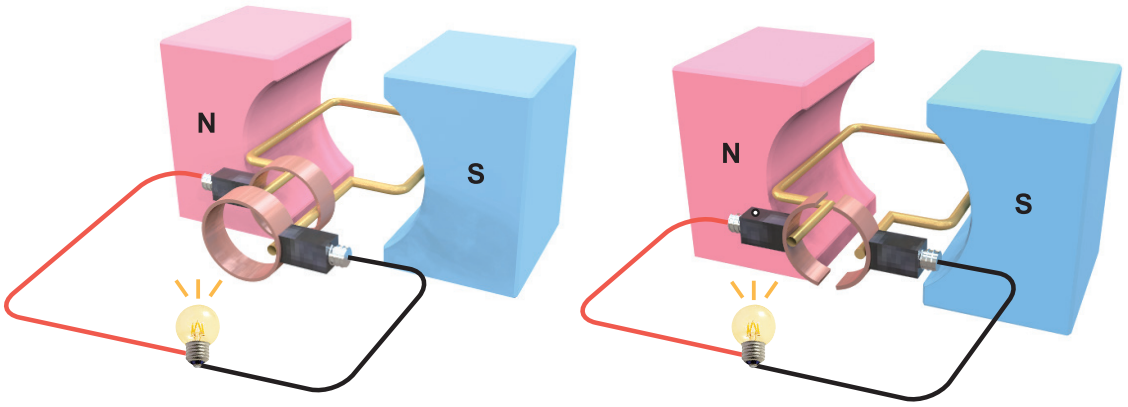


圖 3-6　直流發電機基本構造

2. 換向器的原理

交流發電機所使用的滑環構造如圖 3-7(a) 所示，爲兩個類似戒指的金屬中空圓環以同軸安置並與內部線圈連接。當線圈旋轉時，滑環也跟著旋轉，並與二側的電刷持續接觸，其運作方式由圖 3-2 可知，輸出的電源型態爲交流電。



(a) 滑環　　(b) 換向器

圖 3-7　滑環與換向片的比較

直流發電機所使用的換向器構造如圖 3-7(b) 所示，可以看做將 1 個滑環剖開而成的半圓形金屬環，兩端留有空隙再與內部的線圈連接，當線圈旋轉時，換向器也跟著旋轉，並與兩側固定的電刷輪流接觸，其運作方式由圖 3-8 可知，巧妙的將電樞內部產生的交流電轉換成直流電輸出。

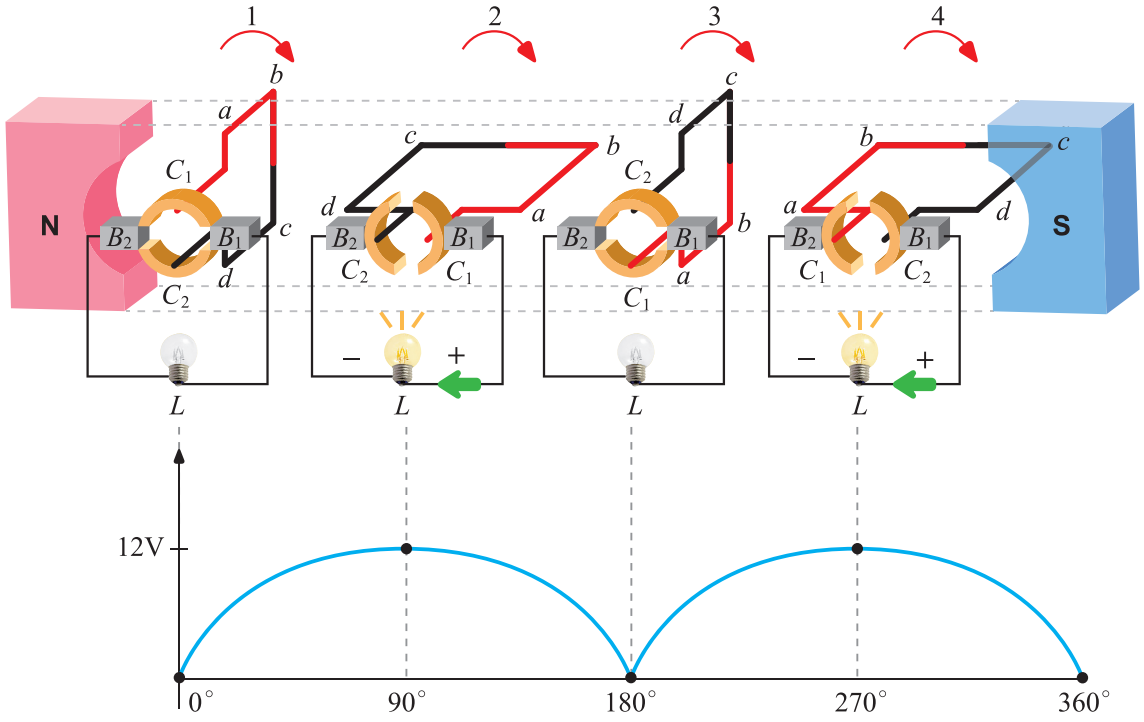


圖 3-8　利用換向器將交流電轉變成直流電的過程

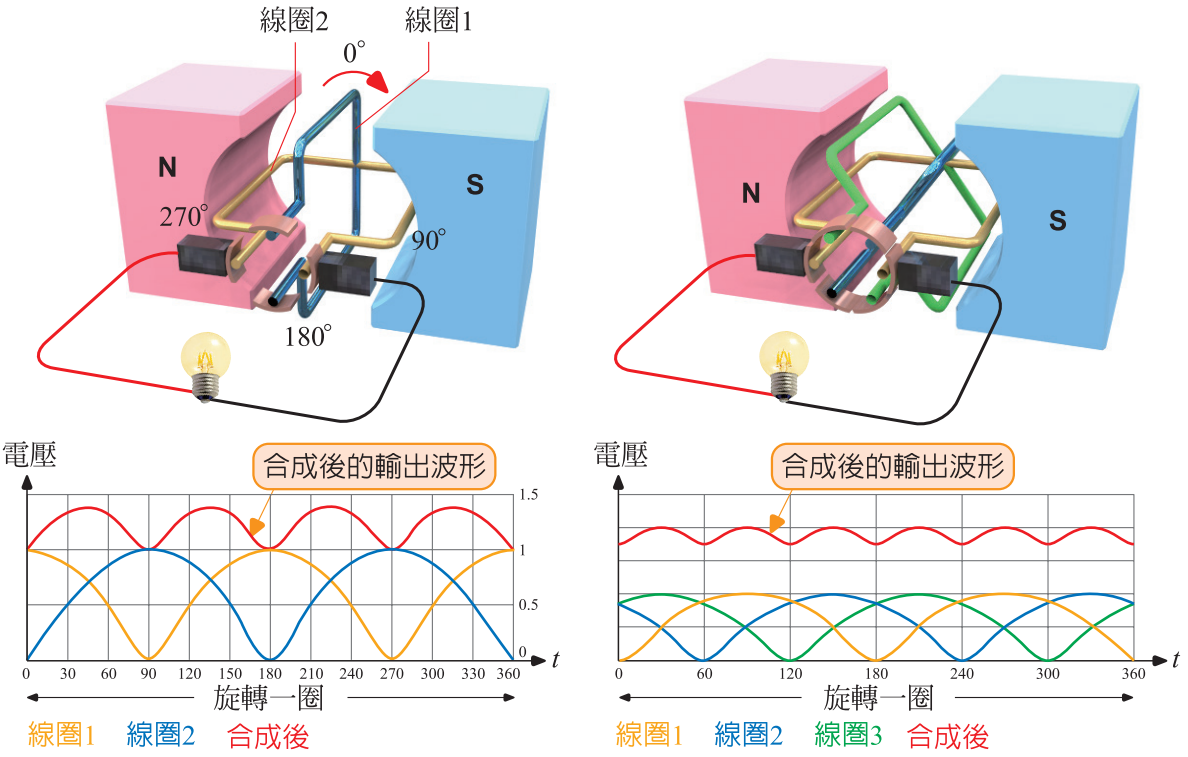
(1) 位置 1：導體瞬間運動方向與磁場平行 ($\theta = 0°$)，電刷兩端的電壓 $e_{B1-B2} = 0$ V。

(2) 位置 2：導體瞬間運動方向與磁場垂直 ($\theta = 90°$)，兩線圈邊應電勢爲最大，依據 43 頁範例 01，倘若 $e_{ab} = 6$ V、$e_{cd} = 6$ V，則兩個電刷之間的電壓 $e_{B1-B2} = 12$ V，電流由線圈 $a \Rightarrow C_1 \Rightarrow B_1 \Rightarrow L \Rightarrow B_2 \Rightarrow C_2 \Rightarrow d$ 回到線圈內。

(3) 位置 3：導體瞬間運動方向與磁場平行 ($\theta = 0°$)，電刷兩端的電壓 $e_{B1-B2} = 0$ V。

(4) 位置 4：導體瞬間運動方向與磁場垂直 ($\theta = 90°$)，兩線圈邊應電勢爲最大，$e_{dc} = 6$ V、$e_{ba} = 6$ V，雖然電樞內部的電壓變成負的最大值，但是電流由線圈 $d \Rightarrow C_2 \Rightarrow B_1 \Rightarrow L \Rightarrow B_2 \Rightarrow C_1 \Rightarrow a$ 回到線圈，兩電刷間的電壓 $e_{B1-B2} = 12$ V 維持不變，燈泡再度點亮。

依據上述，線圈在磁場中旋轉時，感應電勢爲交流電，但是透過換向器的轉換，電流固定會由 B_1 電刷 (+) 流出，B_2 電刷 (−) 流入，輸出電壓型態轉變成脈動直流。爲了讓輸出波形更接近直流電，可增加線圈的組數並均勻放置在電樞內部，透過圖 3-9 多組線圈輪流產生電壓，產生的直流電才能更平穩。



(a) 兩組線圈，每線圈邊間隔 90°　　(b) 三組線圈，每線圈邊間隔 60°

圖 3-9　多組線圈合成後的輸出波形

隨堂練習

(　　) 1. 直流發電機電樞內部感應的電壓型態為

(A) 直流　(B) 脈動直流　(C) 交流　(D) 脈波。

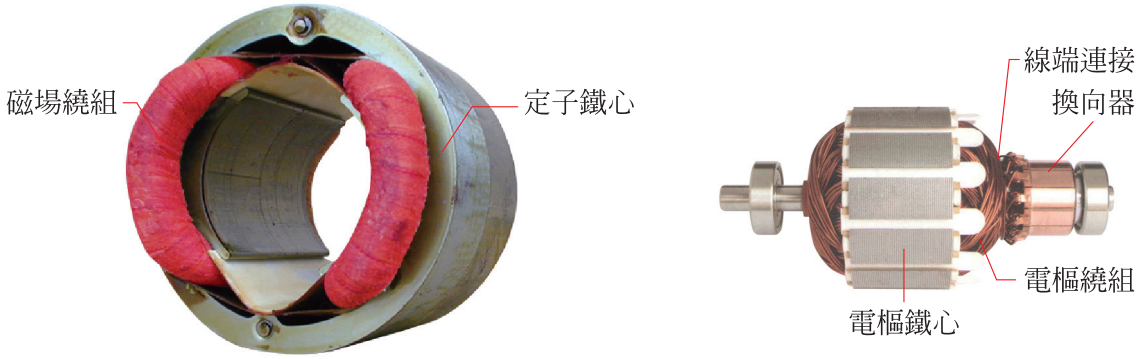
(　　) 2. 直流發電機欲將電樞應電勢轉變為直流電壓輸出，因此必須加裝

(A) 滑環　(B) 換向器　(C) 電刷　(D) 磁極。

Unit 02-CH03 to CH07.indd 49　2020/8/19 下午 12:26:00

3. 應電勢計算

爲了獲得穩定直流電能，實用上直流發電機構造如圖 3-10，定子裝有磁場繞組，其磁極數量爲 P，每極磁通量爲 ϕ。而轉子電樞繞組由 Z 根導體分成 a 個路徑，再引接至換向器上。當原動機以轉速 n 帶動轉子時，整部發電機的感應電勢：



(a) 定子的磁場繞組 (P-2)　　(b) 轉子的電樞繞組

圖 3-10　直流發電機的定子與轉子

$$E = \frac{PZ}{60a} n\phi \qquad (3\text{-}1)$$

E ：感應電勢 (伏特；V)　　a ：電流路徑數

P ：極數　　Z ：電樞總導體數 (根)

n ：每分鐘轉速 (r.p.m.)　　ϕ ：每極磁通量 (韋伯； Wb)

發電機出廠時磁極數 P、導體數 Z、電流路徑數 a 都由製造商設計並連接妥當，使用者很難改變，因此 $\frac{PZ}{60a}$ 可視爲常數 K_n，應電勢可以簡化成：

$$E = K_n n\phi \qquad (3\text{-}2)$$

即**直流發電機所產生的感應電勢與發電機的轉速 n 及磁通量 ϕ 成正比**，使用者可以調整原動機轉速或是磁場繞組的電流來獲得所需要的電壓。

範例 02

有一台 4 極直流發電機，電樞內部共有 1000 根導體，連接成 4 個路徑，已知每極磁通為 5×10^{-3} 韋伯，當電樞以 1200 rpm 之轉速持續旋轉，則：

(1) 每根導體感應電勢為何？

(2) 整部發電機的感應電壓為何？

(3) 若轉速降為 960 rpm，其他條件不變，應電勢為何？

解 (1) $e=\dfrac{P}{60}\times n\times\phi=\dfrac{4}{60}\times1200\times5\times10^{-3}=0.4\text{ V}$

(2) $e=\dfrac{PZ}{60a}n\phi=\dfrac{4\times1000}{60\times4}\times1200\times5\times10^{-3}=100\text{ V}$

(3) $E=K_n n\phi$，$\dfrac{E_2}{E_1}=\dfrac{n_2}{n_1}\Rightarrow\dfrac{E_2}{100\text{ V}}=\dfrac{960\text{ rpm}}{1200\text{ rpm}}\Rightarrow E_2=80\text{ V}$

隨堂練習

(　) 1. 有一台 4 極直流發電機，電樞總導體數為 500 根，每極磁通量為 10^{-2} 韋伯，轉速為 1500 轉，電樞分成 2 個並聯路徑數，則發電機應電勢為
(A) 62.5 V (B) 125 V (C) 250 V (D) 500 V。

(　) 2. 同上題，若磁通減少 20 %，轉速增加 20 %，則其應電勢值將
(A) 不變 (B) 增加 4 % (C) 減少 4 % (D) 減少 10 %。

自我評量

一、選擇題

3-1

( )1. 4 極直流發電機，電樞有 90 槽，每槽有 20 根導體，電樞分爲 4 個電流路徑，每極磁通爲 5×10^{-3} 韋伯，當電樞轉速爲 1200 rpm 時，應電勢爲 (A) 90 V (B) 120 V (C) 150 V (D) 180 V。

( )2. 有一台 6 極直流發電機，電樞繞組總導體數 1000 根，轉速 1500 rpm，電樞並聯路徑數爲 2，若要應電勢爲 150 V，則每極磁通量應爲

(A) 2×10^{-3} Wb (B) 4×10^{-3} Wb

(C) 6×10^{-2} Wb (D) 10^{-2} Wb。

( )3. 同上題，若要將應電勢增加至 180 V，則磁通量應爲

(A) 1.66×10^{-3} Wb (B) 2.4×10^{-3} Wb

(C) 1.2×10^{-2} Wb (D) 7.2×10^{-2} Wb。

( )4. 直流發電機轉速增大爲 2.5 倍，磁通密度減小爲原來的 0.8 倍，感應電勢爲原來的幾倍？

(A) 0.8 倍 (B) 1.7 倍 (C) 2 倍 (D) 2.5 倍。

( )5. 八極直流發電機，其應電勢變化一個正弦波，須旋轉

(A) 4 轉 (B) 1 轉 (C) $\frac{1}{2}$ 轉 (D) $\frac{1}{4}$ 轉。

( )6. 有一部 6 極直流發電機，每極磁通量爲 0.02 韋伯，電樞繞組有 1000 匝，電樞並聯路徑數爲 6，若要應電勢爲 120 伏特，則原動機的轉速應該爲

(A) 180 rpm (B) 360 rpm (C) 1800 rpm (D) 3600 rpm。

( )7. 有一部 2 極直流發電機，以 1200 rpm 的轉速持續旋轉，則該發電機的導體通過一個磁極所需的時間爲

(A) $\frac{1}{120}$ 秒 (B) $\frac{1}{80}$ 秒 (C) $\frac{1}{40}$ 秒 (D) $\frac{1}{20}$ 秒。

二、問答題

1. 畫圖說明線圈在磁場旋轉中產生交流電的過程。

2. 畫圖說明換向器將線圈感應的交流電轉變成直流電的過程。

CHAPTER 4

直流發電機之構造

本章重點

直流發電機的基本元件包括：(1) 供給磁場的定子、(2) 產生交流電的電樞、(3) 將交流電轉變成直流的換向器、(4) 傳遞電能的電刷。本章將進一步說明各元件的構造、種類以及特性。最後則是介紹電樞繞組的不同繞製方式。提醒各位可以搭配弗萊明定則來思考各元件的功能及關係，對於學習會有很大幫助。

4-1 直流電動機與直流發電機的關係

許多人都有拆解四驅車等小型馬達的經驗，拆解後如圖 4-1 所示，定子外殼兩側貼有永久磁鐵，負責旋轉的轉子溝槽內裝有電樞繞組，電樞繞組的接線引接到後方的換向器，再與端蓋上的電刷緊密接觸，此種電機稱爲直流永磁式電機。

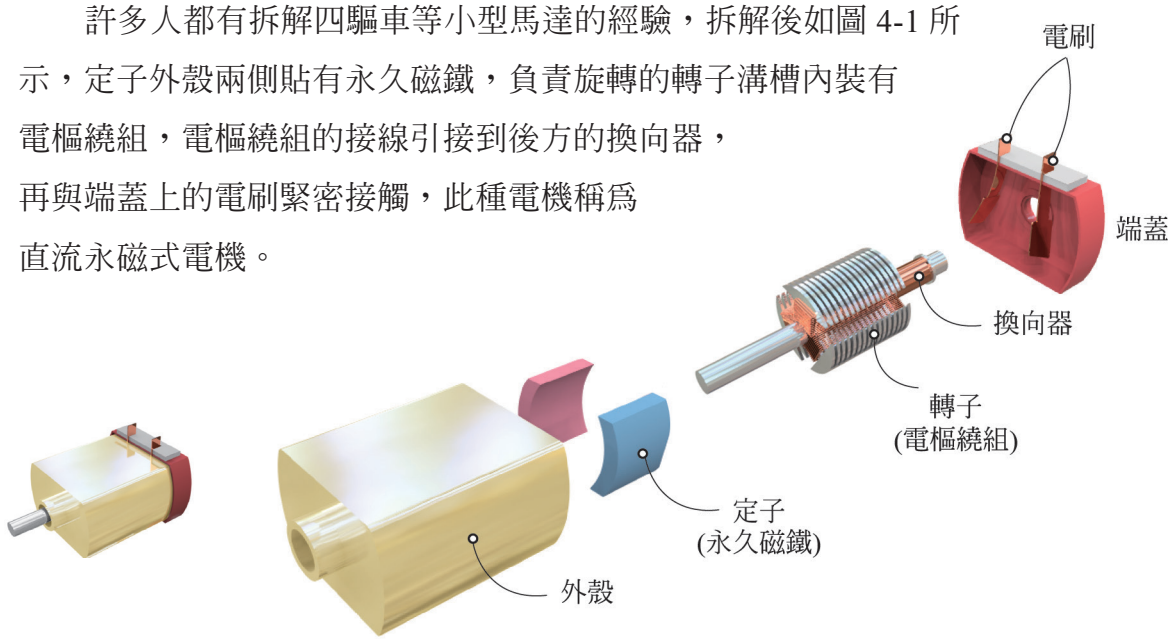
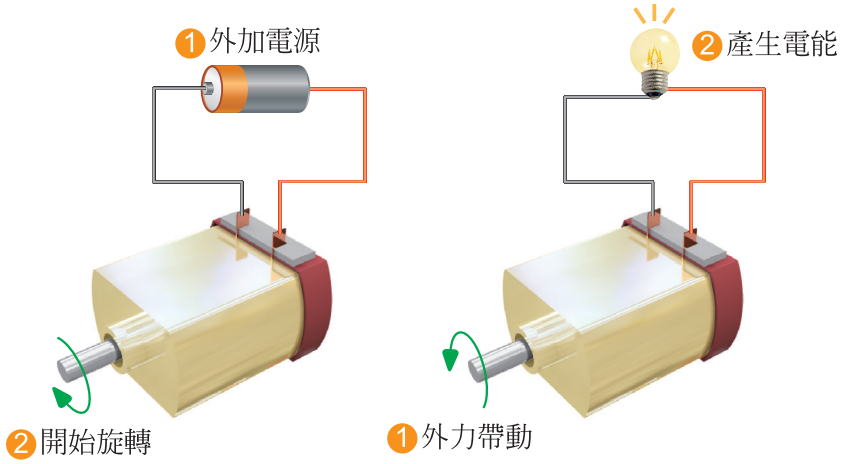


圖 4-1　小型直流永磁式電機構造圖

如圖 4-2(a) 的永磁式電機接上電池後，電樞繞組內有電流流動並與定子磁場作用，依據弗萊明左手定則，電樞產生作用力開始旋轉。在轉軸上安裝齒輪就可驅動四驅車或作爲小型電扇使用，其構造簡單；普遍用於小型玩具。

將永磁式電機接線改接小燈泡或是直流電表，如圖 4-2(b) 以外力轉動轉軸，此時轉軸內的電樞繞組與定子磁場作用，依據弗萊明右手定則，電樞內部會產生交流電，經由換向器轉換成直流電後，透過電刷傳遞使得燈泡點亮。



(a) 直流電動機　　(b) 直流發電機

圖 4-2　直流電機的兩種用途

依據上述簡單實驗可知，**直流電機可以當作直流發電機或是直流電動機使用**。這個現象早在西元 1873 年格拉美和他的夥伴在維也納展示他們的發電機作品時，有人無意間將兩部相隔很遠的發電機用電線接在一起，當蒸汽機推動其中一座發電機時，另一部遠處的發電機卻開始轉動起來，變成電動機！這是歷史上第一次產生了實用的電動機，也是第一次用電線輸送電能，人們意識到原來把發電機倒過來使用就變成電動機，這個重大發現，也將人類帶入了第二次工業革命。

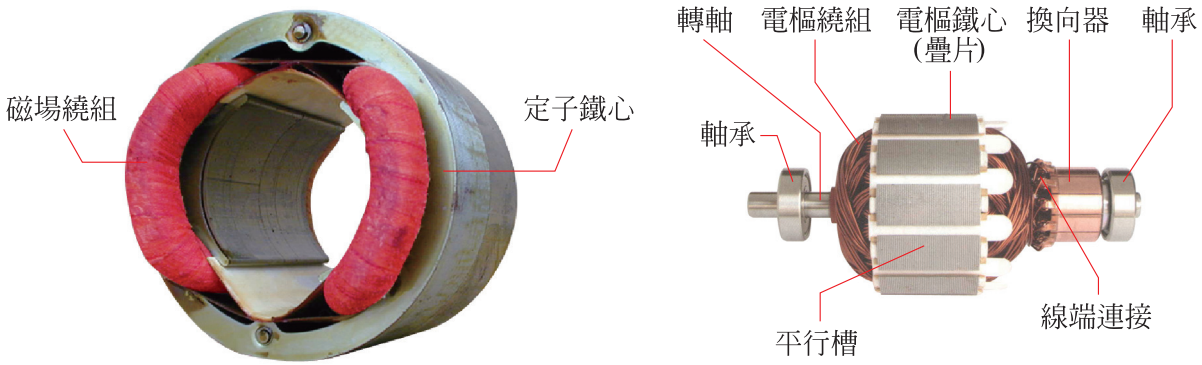
隨堂練習

(　　) 1. 直流電動機與直流發電機構造

(A) 完全不同　(B) 完全相同　(C) 大同小異　(D) 小同大異。

4-2 直流電機的整體構造

圖 4-3 爲小型直流電機的主要構造圖。圖 4-3(a) 稱爲定子 (stator)，定子鐵心內部裝有磁場繞組，當加入直流電後二側分別產生 N 極及 S 極。圖 4-3(b) 稱爲轉子 (rotor) 或電樞，電樞鐵心內繞有電樞繞組並連接到換向器。



(a) 定子　　(b) 轉子

圖 4-3　直流電機的分解圖　(圖片來源：開富電機)

直流發電機的基本運作原理如圖 4-4 所示，可分爲磁路與電路兩大部分：

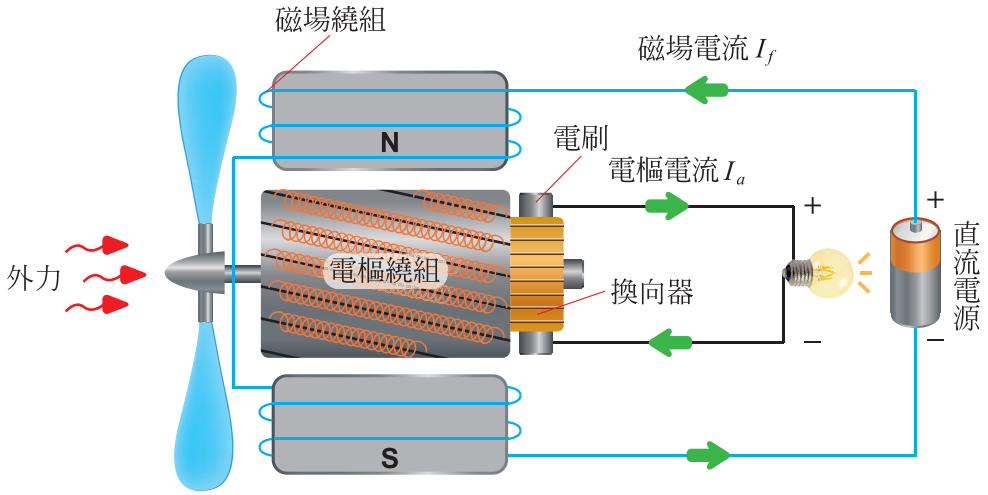


圖 4-4　直流發電機基本運作原理

(一) 磁路部分

定子的磁場繞組通電後產生磁場，**磁力線由 N 極出發，經過空氣隙進入電樞後由另一側的空氣隙進入 S 極，再經由外殼或是場軛 (yoke) 回到 N 極。**

(二) 電路部分

轉子由外力帶動，使得電樞繞組持續與磁場切割感應產生交流電，經過換向器轉變成直流電後，透過電刷傳送給外部負載使用。

爲了提升性能，大型直流電機還會加裝許多設備 (如中間極與補償繞組) 等，如圖 4-5 所示爲直流電機的構造圖。

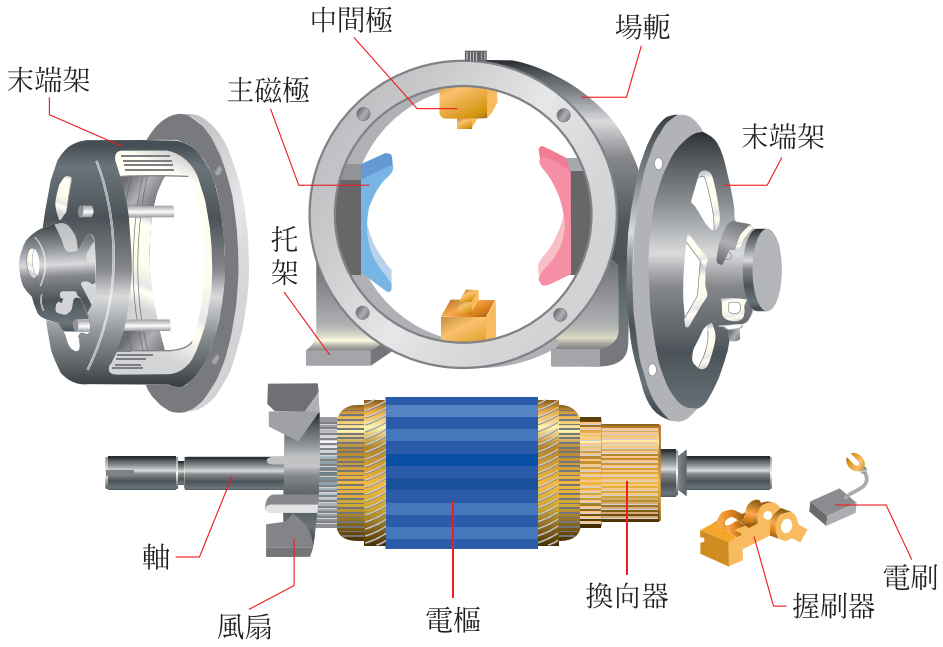


圖 4-5 直流電機的構造圖

隨堂練習

( ) 1. 下列何者不是磁路的一部分？ (A) 場軛 (B) 電刷 (C) 電樞鐵心 (D) 空氣隙。

( ) 2. 直流電機的電樞繞組屬於

(A) 固定部分 (B) 轉動部分 (C) 整流部分 (D) 散熱部分。

4-3 直流機的定子（固定部分）

電機中不會旋轉的部分統稱爲定子，直流電機的定子主要分成機殼、磁極與繞組、端蓋與軸承以及電刷，各部分的構造與功能分述如下：

（一）機殼 (frame)

機殼又稱場軛，除了**支持電機的所有機件外**，也作爲**磁路的一部分**，因此機殼使用機械強度大且導磁係數高的鍛鋼或鋼板製成。機殼外觀如圖 4-6 所示。

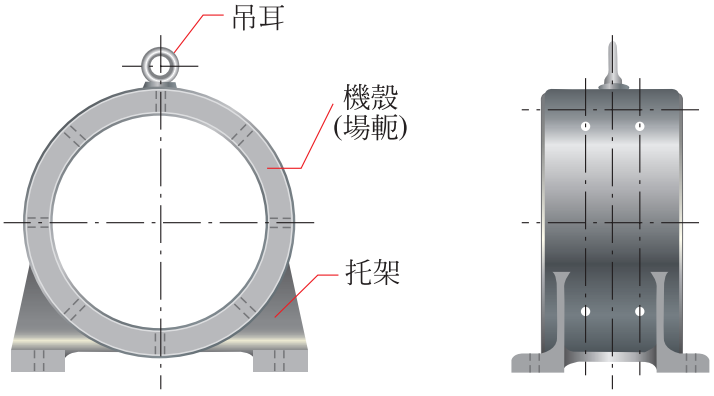


圖 4-6　直流電機的機殼

（二）磁極與繞組

1. 直流電機的磁場來源

除了小型電機採用永久磁鐵外，**一般直流電機爲了方便控制，大多採用電磁鐵式，**如圖 4-7 所示，**只要改變電流強弱與方向可以調節磁通量與磁極方向。**

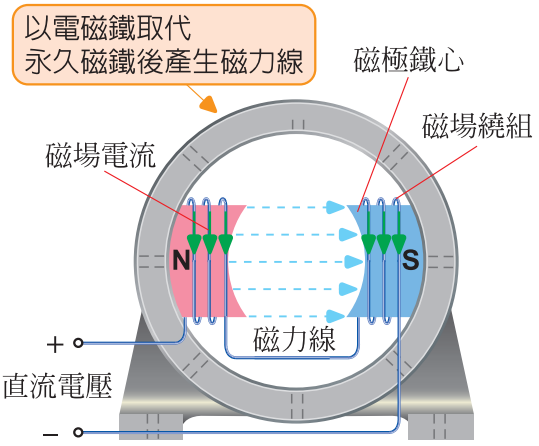
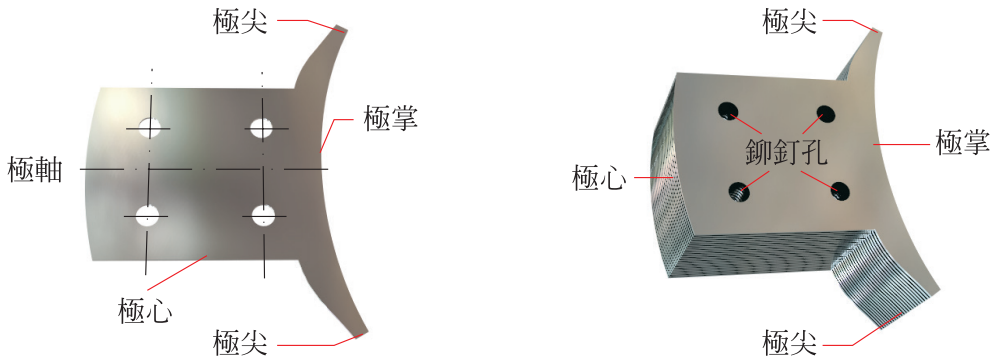


圖 4-7　直流電機的磁場來源

2. 磁極鐵心

主磁極 (main pole) 鐵心爲磁力線通過的重要路徑。爲了增加導磁量及減少損失，主磁極鐵心如圖 4-8(a)，以高導磁係數，厚度約 0.8 ～ 1.6 mm 的矽鋼絕緣薄片製成，再將許多薄片疊積後經過壓緊及鉚釘固定而成；如圖 4-8(b) 所示。

主磁極的鐵心分爲極心 (pole core) 與極掌 (pole shoe) 兩部分，極心截面積小，可減少磁場繞組用銅量，並使磁場繞組牢固。鐵心末端展開呈掌狀的部分稱爲極掌。兩側末端部分稱爲極尖 (tip)。

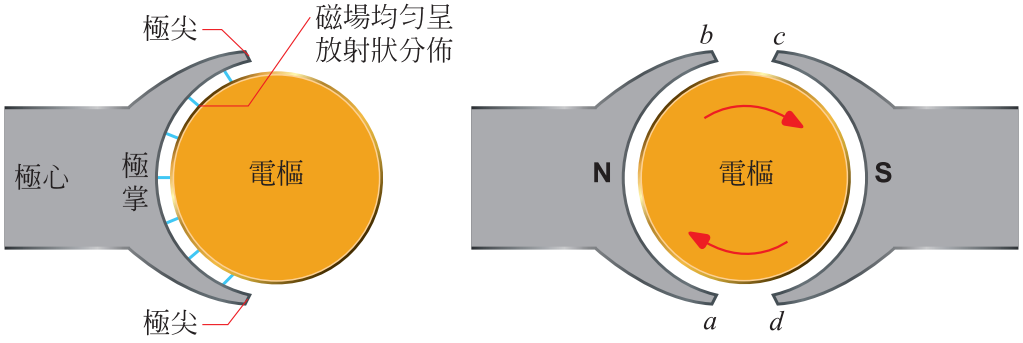


(a) 一片矽鋼薄片　　(b) 矽鋼薄片疊積

圖 4-8　直流電機的主磁極鐵心

爲了配合電樞形狀，極掌會設計成如圖 4-9(a) 的圓弧狀使磁場均勻分佈。極尖依據電樞轉向分爲前、後極尖。以圖 4-9(b) 爲例，倘若電樞順時針旋轉，則 *a*、*c* 稱爲前極尖，*b*、*d* 稱爲後極尖。倘若電樞逆時針方向旋轉，則 *b*、*d* 位置就會稱爲前極尖，*a*、*c* 位置則換稱爲後極尖。

中、大型直流電機爲了獲得良好換向，會在主磁極的中間加裝小的磁極，稱之爲中間極 (inter pole) 或稱爲換向磁極，換向磁極鐵心的寬度比主磁極窄、而且沒有極掌 (參考圖 4-5)，目的是爲了改善換向，後續章節會再說明。



(a) 圓弧狀極掌　　(b) 前後極尖

圖 4-9　極掌與極尖

3. 磁場繞組

直流電機的磁場來源大多採用圖 4-10 的電磁鐵，這種用以產生磁場的繞組稱爲磁場繞組 (field winding)、激磁繞組 (exciting winding) 或場繞組。

磁場繞組依據連接方式不同，在材料與構造上會有不同設計，可以分爲：

(1) 分激磁場繞組 (shunt winding)：磁場繞組準備與電樞繞組並聯使用，因通過的電流較小，故使用**線徑細的導線繞製多匝**而成。

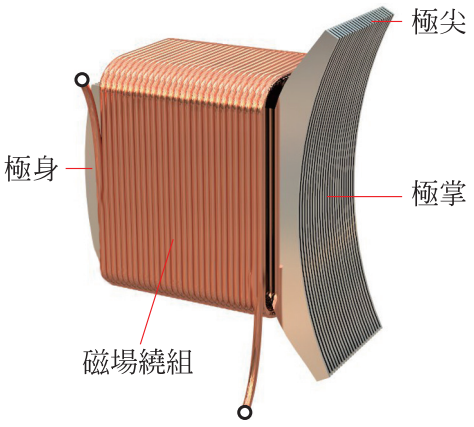
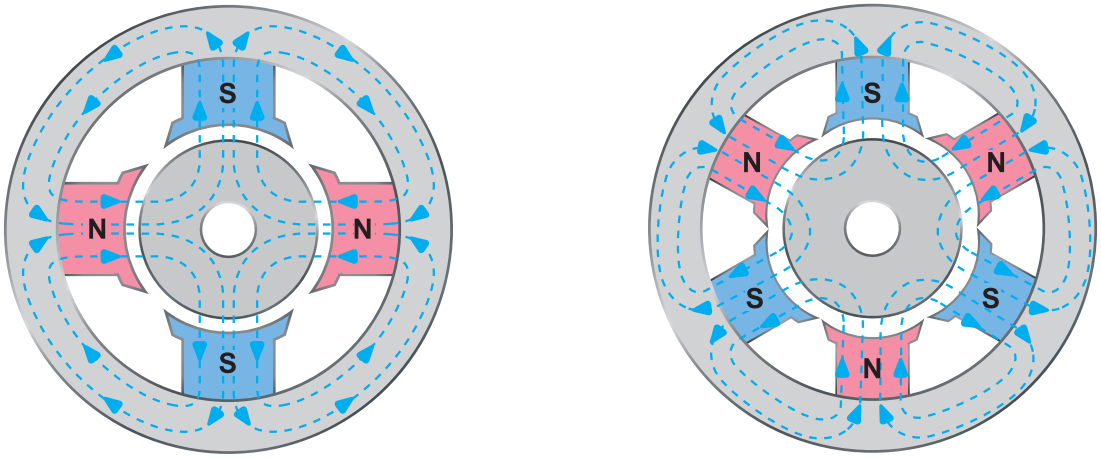


圖 4-10　主磁極與磁場繞組

(2) 串激磁場繞組 (series winding)：磁場繞組準備與電樞繞組串聯使用，因通過的電流較大，故使用**線徑粗的導線繞製少匝**而成。

(3) 複激磁場繞組 (compound winding)：磁極鐵心上**同時繞製有分激磁場繞組 (線細多匝) 及串激磁場繞組 (線粗少匝)**，分別與電樞繞組進行並聯與串聯。

直流電機主磁極一定爲偶數，各主磁極之間的繞組會互相連接，使得相鄰兩極的極性相反，即 **N 極與 S 極間隔配置**，圖 4-11 爲 4 極及 6 極電機的主磁極配置與磁路路徑，圖中可以看出**機殼所通過的磁力線爲任一主磁極的一半**。



(a) 四極　　(b) 六極

圖 4-11　主磁極配置與磁場路徑

隨堂練習

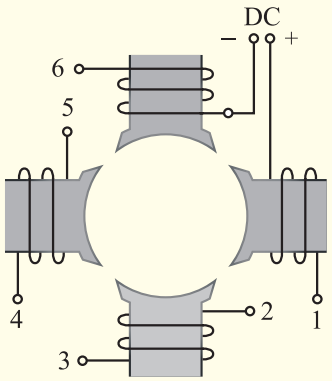
( ) 1. 如右圖為 4 極直流電機的磁場繞組，正確的連接法為何？

(A) 1 － 2、3 － 4、5 － 6

(B) 1 － 3、2 － 4、5 － 6

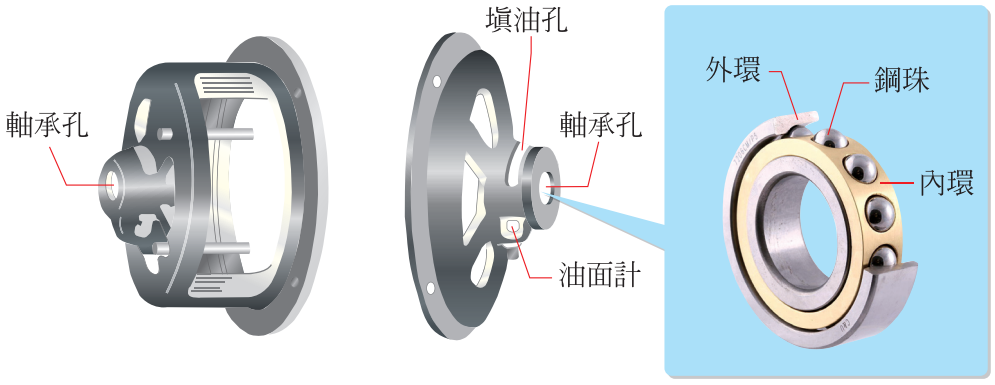
(C) 1 － 2、3 － 6、4 － 5

(D) 1 － 3、2 － 6、4 － 5



(三) 軸承及末端架

端蓋或稱爲末端架，裝置於機殼兩側用來支撐整個轉子的圓形盤狀物，外觀如圖 4-12(a)。末端架中央留有圓孔以放置軸承 (bearing) 或稱培林，軸承的目的在於支撐轉軸以低摩擦狀態下持續旋轉，外觀如圖 4-12(b) 所示：



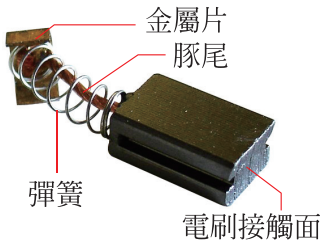
(a) 末端架　　(b) 軸承

圖 4-12　末端架與軸承

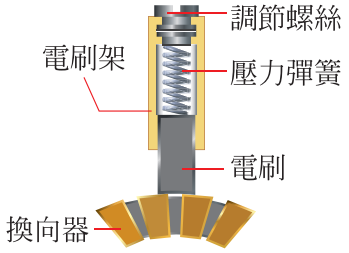
(四) 電刷與電刷架

電刷 (brush) 負責在旋轉部件與靜止部件間傳導電流，是一種滑動型接觸體，具有光滑、耐磨、導電性佳等特性。**對於直流發電機而言，電樞繞組產生的交流電經過換向器轉成直流後，再透過電刷將電流傳遞給負載使用。**

圖 4-13(a) 爲小型直流電機使用的電刷，爲了使電刷能夠與換向器良好接觸，會將電刷的接觸面如圖 4-13(b) 所示磨成與換向器相同的弧度，並透過末端的調節螺絲與彈簧迫使電刷與換向器緊密接觸，而電流由換向器經過電刷本體及後端的引接線 (豚尾) 連接到金屬片，再與外部電路連接。



(a) 小型電刷

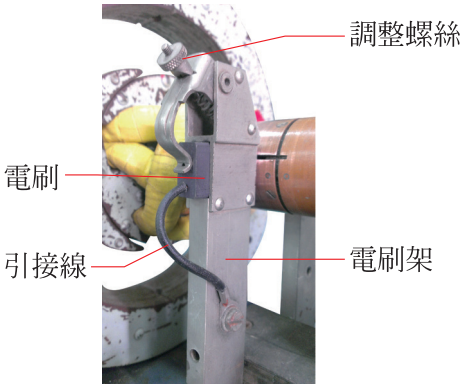


(b) 小型握刷器

圖 4-13　小型電機的電刷與電刷架

中、大型電機所使用的電刷本身沒有彈簧的設計，因此必須由圖 4-14(b) 的電刷架 (brush holder) 來固定電刷的位置與角度。電刷架後方的調整螺絲可以調整電刷與換向器以適當壓力 (約 0.1 ～ 0.2 kg/cm^2) 接觸，**壓力太低會造成接觸不良產生壓降或火花，壓力太高則會磨損造成高熱。**

(a) 大型電刷



(b) 電刷架

圖 4-14　大型電機的電刷與電刷架　(圖片來源：金石機電)

爲了配合不同容量和轉速，直流電機常用的電刷有下列四種材質：

1. 碳質電刷 (硬電刷)：以瀝青、焦煤爲原料。質地細密且堅硬，電阻係數與摩擦係數皆大，容許電流小。適用於小容量，低轉速的直流電機。
2. 石墨電刷 (軟電刷)：以天然石墨爲原料。具有潤滑特性，固有電阻小、接觸電阻小。適用中、低電壓，高速度的電機。
3. 電化石墨電刷：以碳精經加熱壓製而成。潤滑性好，接觸電阻大、容許電流大。廣泛使用於一般的直流電機。
4. 金屬石墨電刷：以銅粉及石墨爲原料。具有潤滑特性，容許電流大。適用於低電壓大電流的電機。

隨堂練習

( ) 1. 直流電機主磁極的極掌面積大於極心的主要目的為
(A) 易於絕緣 (B) 提高旋轉速度
(C) 使磁通能夠均勻分佈 (D) 減少旋轉時的噪音。

( ) 2. 有關直流發電機主磁極產生磁場的敘述，下列何者錯誤？
(A) 主磁極必為偶數個
(B) 相鄰兩個主磁極的極性不同
(C) 磁力線由 N 極出發經過電樞後進到 S 極
(D) 機殼通過的磁力線數目為任一主磁極的兩倍。

( ) 3. 由碳粉及石墨混壓而成，並可將直流發電機之電流輸送至負載電路之組件為
(A) 換向器 (B) 滑環 (C) 磁極 (D) 電刷。

4-4 直流機的轉子（旋轉部分）

直流電機的轉子構造如圖 4-15 所示，各部分的功能與構造分述如下：

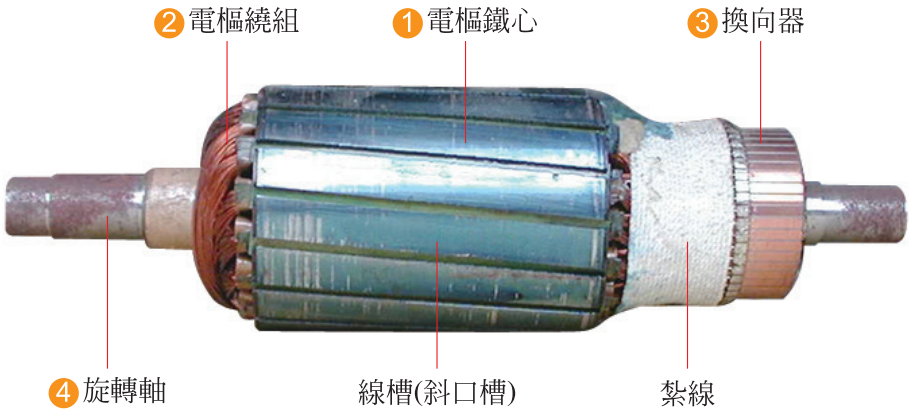
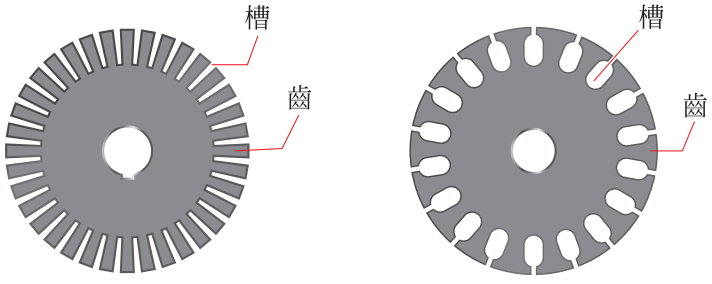


圖 4-15　轉子構造圖　（圖片來源：開富電機）

（一）電樞鐵心

電樞鐵心的功用有：(1) 磁力線順利通過、(2) 電樞繞組能安置穩固、(3) 方便旋轉。因此電樞鐵心具備高導磁係數、低磁滯損失及高機械強度。**目前直流電機大多採用含矽量 1 ～ 2 %，厚度 0.35 ～ 0.5 mm 的矽鋼薄片**。鐵心加矽可以減少磁滯損，但是含量不宜過高否則材料過於脆弱。而每一片矽鋼片會先經過絕緣處理後與轉軸垂直方向疊積在一起，以降低鐵心本身因爲應電勢所造成的渦流損。

爲了讓電樞繞組能安置穩固，電樞鐵心的線槽分成圖 4-16 的開口槽及半閉口槽兩種。開口槽方便繞組放置，但是無法承受大的離心力，適用於大容量與低轉速的電機。半閉口槽的槽口較窄，繞組放置不易，但是可以承受離心力，並且避免槽部與齒部間的空氣隙導致磁通分佈不均勻的現象，常用於小型或高轉速的電機。



(a) 開口槽　(b) 半閉口槽

圖 4-16　電樞鐵心表面的線槽形狀

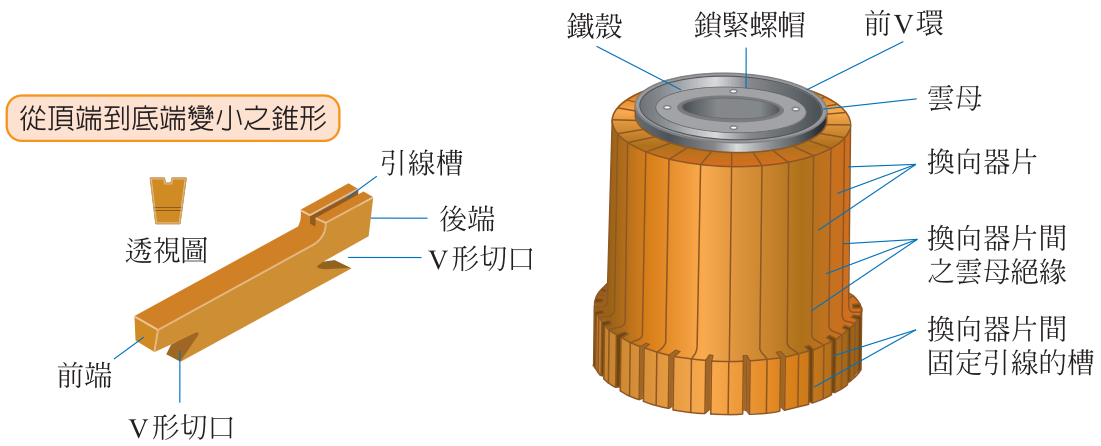
電樞鐵心在疊製時，採用電樞槽不與轉軸平行的斜型槽，外觀可參考圖 4-15。一般而言相差約爲一個槽距，其目的爲**減少旋轉時因爲槽、齒之間磁阻不同而造成的噪音與振動**。

(二) 電樞繞組

依據公式 (3-1) 直流發電機感應電勢 $E=\frac{PZ}{60a}n\phi$ 得知，應電勢 E 與電樞繞組的導體總數 Z 成正比，與電流路徑數 a 成反比。如何將這些導體以適當方式連接並輪流產生感應電勢，將在下節詳細說明。

(三) 換向器

對直流發電機而言，換向器 (commutator) 是將電樞繞組產生的交流電轉變成直流電，功能如同一個旋轉的二極體。換向器的基本構造如圖 4-17(a) 所示。以硬抽銅或是銀銅合金等材料製成的楔型截片爲主體，每個楔型截片間利用雲母片絕緣，將截片逐步拼合成圖 4-17(b) 所示的圓柱體。



(a) 換向器截片　　(b) 換向器的結構

圖 4-17　直流電機的換向器

圖 4-18 中電刷會與旋轉中的換向器持續摩擦，爲了保持旋轉平順及避免接觸不良所造成的火花，用於**片間絕緣的雲母片高度必須低於換向器表面約 1 ～ 1.5 mm**，但不宜太深以避免電刷粉末聚集而干擾整流。電刷與換向器表面要定期清潔、保養，並適當調整電刷壓力，以提高運轉效率，延長壽命。

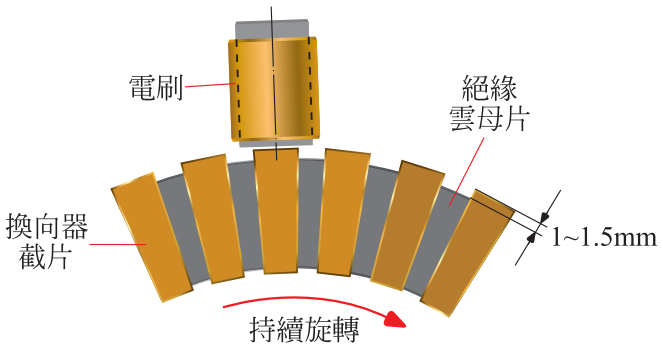


圖 4-18　換向器與雲母片

(四) 旋轉軸

直流發電機的轉軸上除了裝有準備發電的電樞鐵心、電樞繞組以及換向器外，軸端還必須與原動機連接，以便讓外力 (火力、水力或風力) 帶動電樞繞組持續在磁場中旋轉，電樞繞組才能將這些機械能持續轉變成電能。**容量越大的發電機所需要的動力也越大**，因此轉軸一般以鍛鋼、鎳鋼等鋼材鍛造或是銲接成型，再經由適當之熱處理、精密加工，使轉軸具備高強度，不易變形。

隨堂練習

(　　) 1. 下列何者屬於直流機轉子的一部分？
(A) 電刷　(B) 換向器　(C) 場軛　(D) 激磁線圈。

(　　) 2. 直流電機鐵心通常採用薄矽鋼片疊製而成，其主要目的為何？
(A) 減低噪音 (B) 減低磁滯損　(C) 減低渦流損　(D) 避免磁飽和。

(　　) 3. 直流機換向片的功能與下列哪一種元件相類似？
(A) 突波吸收器　(B) 整流二極體　(C) 消弧線圈　(D) 正反器。

4-5 直流機的電樞繞組

(一) 繞組繞製方式

直流電機的電樞需要高速旋轉，因此電樞線圈會埋入鐵心內的狹窄線槽內，爲了有效利用空間，線圈通常用軟銅圓線或平角線爲材料，小型電機以手繞方式直接將導線纏繞在電樞槽內。而中、大型電機會先將導線繞在模具上製成線圈後，再將線圈依序放在電樞槽內進行連接，稱爲型繞。

電樞繞組的繞製方式分成環形、盤形及鼓型等三種，由於**鼓型繞組具有繞置容易、有效利用導體等優點，因此使用最爲普遍。**

圖 4-19 介紹鼓型繞組的繞法，首先將直導線繞成線圈後，依據線槽調整形狀並在外層包覆絕緣材料。最後將線圈埋入電樞鐵心的線槽內。同一個線圈的兩個線圈邊通常會相隔數個線槽。

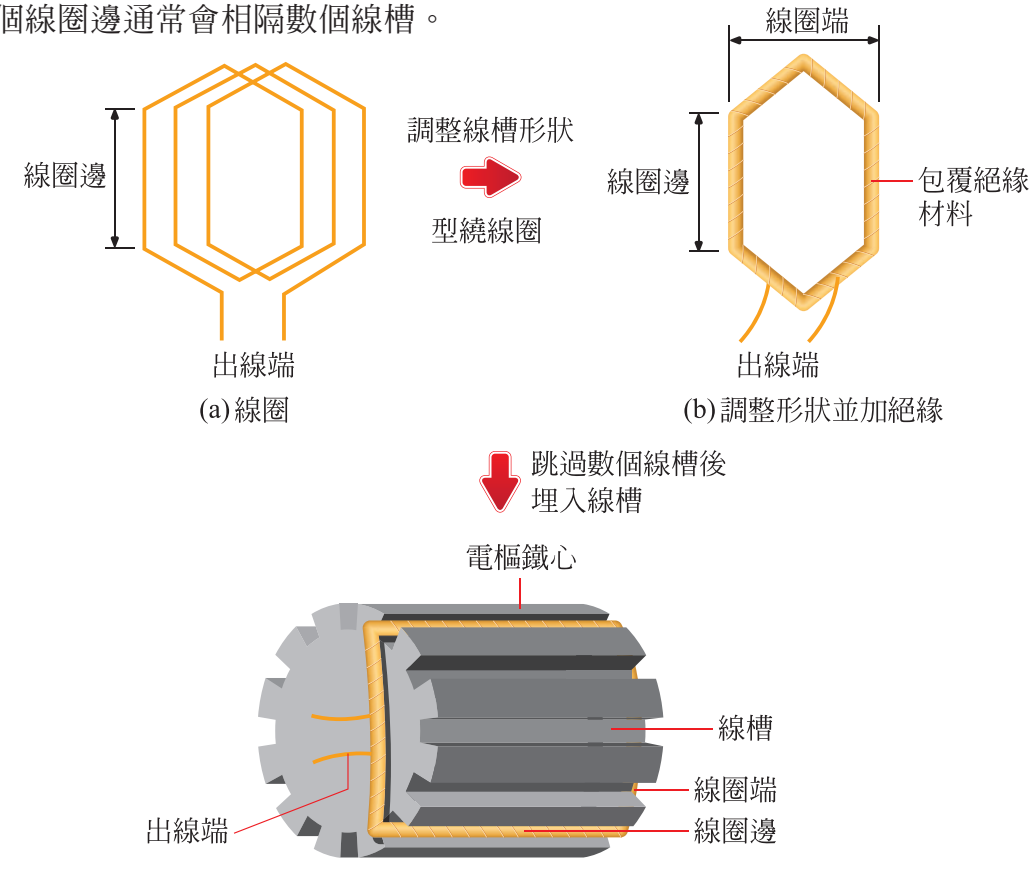


圖 4-19 鼓形繞組繞製過程

依序將多組線圈埋入不同線槽後，再將線圈的出線端連接在換向器上，之後在線槽外部打入楔片，避免線圈因爲高速旋轉而飛脫，就完成如圖 4-20 所示的鼓形繞組。

電樞內所有線圈出線端互相連接後統稱爲電樞繞組。**直流電機的電樞繞組會經過換向器形成一個封閉路徑，因此又稱爲閉路式繞組。**

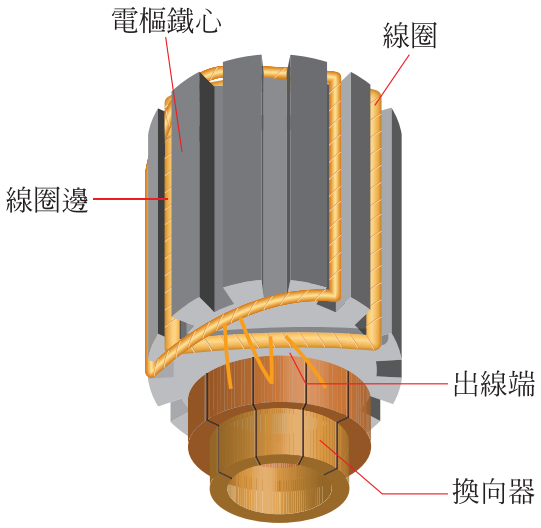


圖 4-20　鼓形繞組

(二) 電樞繞組基本名詞

1. **匝數與根數**：將直導線繞成 1 圈後稱爲 1 匝線圈 ($N=1$)，圖 4-21(a) 只有左右兩側放在電樞槽內的導體 (ab 與 cd) 能夠產生作用，因此 1 匝線圈會有 2 根有效導體 ($Z=2$)。以 Z 表示有效導體數，N 表示線圈匝數，則

$$Z=2N \qquad (4\text{-}1)$$

圖 4-21(b) 繞有 2 匝線圈 ($N=2$) 共有 4 根有效導體。線圈兩端的導體雖然與磁力線平行無法產生作用，但卻是電路連接的重要橋樑，不可省略。

2. **線圈邊 (coil side)**：**放在線槽內能夠切割磁通的有效導體部分稱爲線圈邊，**一個線圈會依據需要繞成不同匝數 (N)，但總歸爲兩個有效線圈邊。

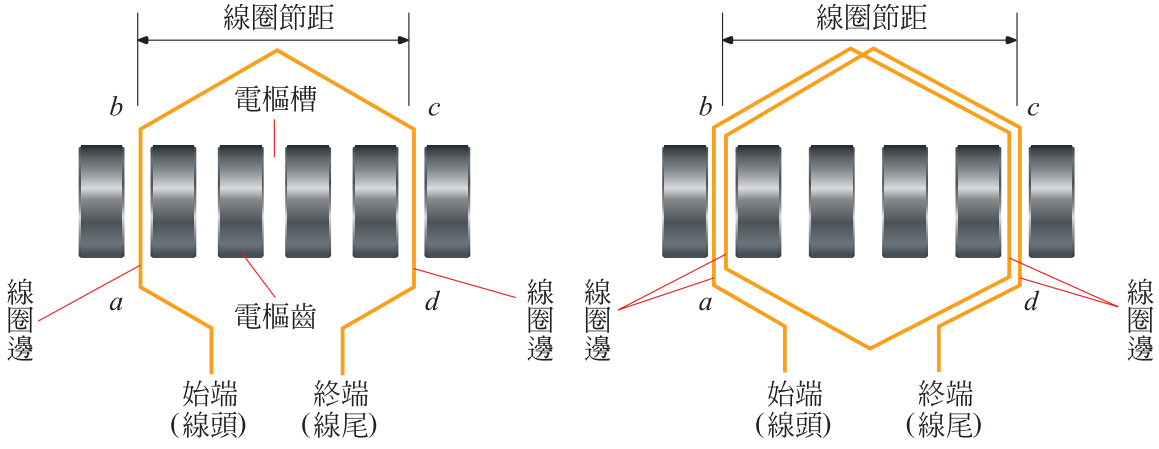


圖 4-21　線圈構造與說明

3. **極距 (pole pitch)**：極距是指相鄰兩磁極的中心距離，如圖 4-22(a) 所示，一般以間隔的槽數或是角度爲單位，即：

$$\text{極距} = \frac{\text{總槽數 } S}{\text{極數 } P} \qquad (4\text{-}2)$$

由於線圈在 2 極電機中旋轉 1 週會產生 1 個正弦波 ($\theta_e = 360°$)，因此一個**極距相當於 180° 電機角**。

在 P 極電機中。遇到電機角 (θ_e) 與機械角 (θ_m) 需要轉換時，其關係爲

$$\theta_e = \frac{P}{2} \times \theta_m \qquad (4\text{-}3)$$

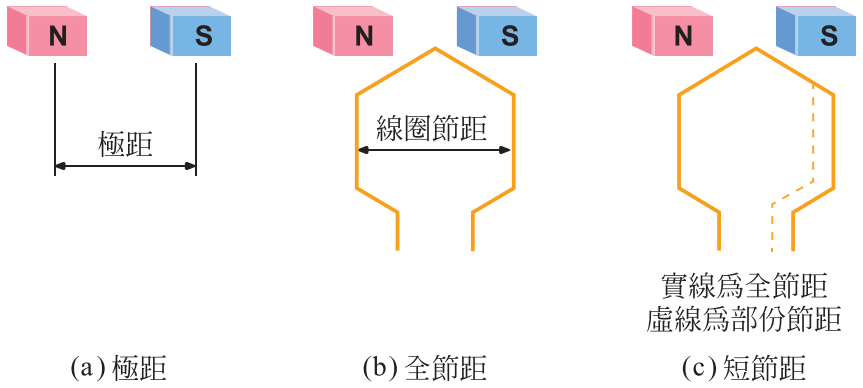
4. **槽距 (slot pitch)**：**相鄰兩電樞槽中心線間的距離**。
5. **線圈節距 (coil pitch)**：**同一個線圈兩邊間的跨距 (span)，也就是一個線圈的平均寬度**。一般以槽數爲單位，以圖 4-21 爲例，線圈節距均爲 4 槽。

線圈依據線圈節距與極距的關係可以分成：

(1) 全節距線圈 (full pitch coil)：**線圈節距等於極距，也就是線圈兩邊分別放在相距 180° 電機角的兩個槽中，外觀如圖 4-22(b)**。

(2) 短節距線圈 (short pitch coil)：**線圈節距略小於極距，因此線圈寬度略小於 180° 電機角**，又稱爲分數節距或是部分節距，外觀如圖 4-22(c)。

一般直流電機大多採用短節距線圈，可以節省銅線並改善換向。



(a) 極距　(b) 全節距　(c) 短節距

圖 4-22　線圈構造與說明

6. **單層繞**：電樞的每個線槽如圖 4-23(b) 僅放置一個線圈邊。
7. **雙層繞**：同一線槽內如圖 4-23(c) 放置兩個不同線圈的線圈邊，**雙層繞可以妥善利用空間，因此最常使用。**

(a) 線圈外觀　(b) 單層繞　(c) 雙層繞

圖 4-23　單層繞與雙層繞

電樞繞組繞製的重要原則之一就是線圈節距必須接近極距，之後根據電樞槽數放置繞組，最後將繞組彼此連接才能發揮效用。爲了實際了解電樞繞組的繞製，進一步介紹下列名詞：

(1) 後節距 (back pitch，Y_b)：同一線圈兩邊間的跨距，即爲線圈節距。用來代表一個線圈需要製作的寬度。

(2) 前節距 (front pitch，Y_f)：同一個換向片上的兩個線圈邊間的跨距，用來表示線圈間的連接方式。

(3) 換向器節距 (commutator pitch，Y_c)：同一線圈之兩線圈邊引接線連接至換向片之距離，以換向片的號碼差表示。

範例 01

某 4 極 16 槽直流發電機，其中一組電樞線圈二邊分別放置於第 1 槽與第 5 槽，試問：

(1) 總機械角為何？總電機角為何？

(2) 極距為多少槽？相當於多少機械角？

(3) 槽距等於多少機械角，相當於多少電機角？

(4) 線圈節距為多少槽？相當於多少機械角及電機角？

(5) 本題線圈繞法為全節距或是短節距？

解 (1) 4 極電機：

(a) 總機械角 $(\theta_{mT}) = 360°$

(b) 總電機角 $(\theta_{eT}) = 4 \text{ 極} \times \frac{180°}{\text{極}} = 720°$。

(2) 極距：(a) $\frac{\text{總槽數}}{\text{極數}} = \frac{16}{4} = 4$ 槽　(b) $\frac{360°}{4 \text{ 極}} = 90°$ 機械角

(3) 槽距：(a) $\frac{360°}{16 \text{ 槽}} = 22.5°$ 機械角　(b) $\frac{720°}{16 \text{ 槽}} = 45°$ 電機角

(4) 線圈節距：(a) $5-1=4$ 槽　(b) $4 \text{ 槽} \times \frac{22.5°}{\text{槽}} = 90°$ 機械角

(c) $4 \text{ 槽} \times \frac{45°}{\text{槽}} = 180°$ 電機角

(5) 線圈節距為 180° 電機角等於極距，因此為全節距繞法

隨堂練習

1. 有一部 6 極 36 槽直流發電機，其中一組電樞線圈的線圈邊分別放置於第 1 槽與第 6 槽，試問本題線圈繞法為全節距或是短節距？

範例 02

如右圖所示為一部 4 極、16 槽直流電機電樞繞組的部分接線圖，試以槽數計算本機：

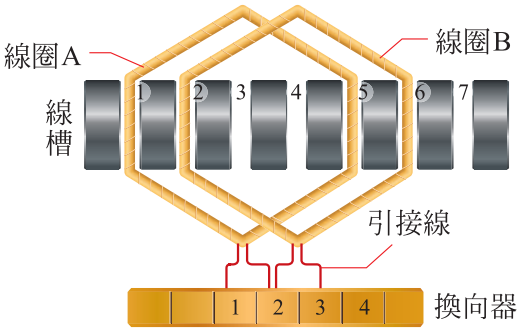
(1) 極距、

(2) 後節距、

(3) 繞法為全節距或短節距、

(4) 前節距、

(5) 換向器節距為多少？



解 (1) 極距：$\frac{\text{總槽數 } S}{\text{極數 } P} = \frac{16}{4} = 4$ 槽

(2) 後節距 (Y_b)：指同一線圈之兩邊跨距。線圈 A 的二邊分別在 1 號槽與 5 號槽，故後節距 $Y_b = 5 - 1 = 4$ 槽。(線圈 B 的後節距 $Y_b = 6 - 2 = 4$ 槽)

(3) 本題線圈節距等於極距，因此為全節距

(4) 前節距 (Y_f) 是指同一個換向片上的兩個線圈邊間的跨距。以 2 號換向片為例，A 線圈終端在 5 號槽，B 線圈始端在 2 號槽，因此前節距 $Y_f = 5 - 2 = 3$ 槽

(5) 換向器節距 (Y_c)：同一線圈之兩線圈邊引接線連接至換向片之距離。A 線圈的始端引接線 (線頭) 接在 1 號換向器，終端引接線 (線尾) 接在 2 號換向器，換向器節距 $Y_c = 2 - 1 = 1$ 片

範例 03

如下圖所示為一部 4 極 17 槽直流電機電樞繞組的部分接線圖，請問本機：

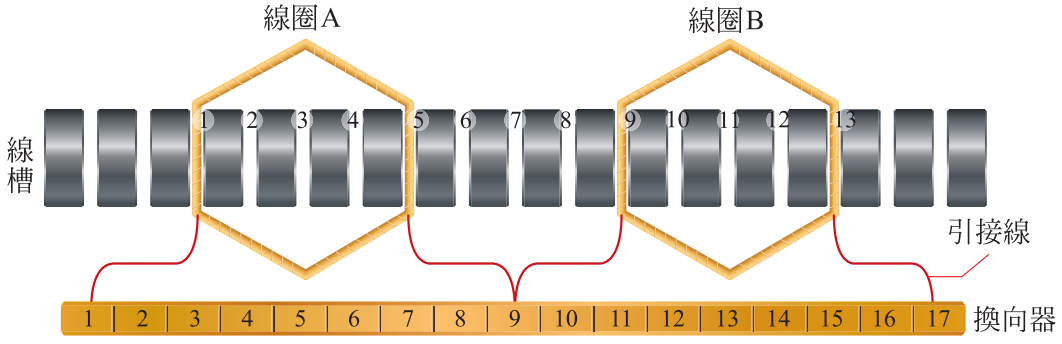
(1) 極距、

(2) 後節距、

(3) 繞法為全節距或短節距、

(4) 前節距、

(5) 換向器節距為多少？



解 (1) 極距：$\dfrac{\text{總槽數 } S}{\text{極數 } P} = \dfrac{17}{4} = 4.25$ 槽

(2) 後節距 Y_b：以線圈 A 為例，二邊分別在 1 號槽與 5 號槽，

故後節距 $Y_b = 5 - 1 = 4$ 槽

(3) 本題線圈節距略小於極距，故為短節距

(4) 前節距 (Y_f)：以 9 號換向片為例，線圈 A 的終端在 5 號槽，線圈 B 的始端在 9 號槽，因此前節距 $Y_f = 9 - 5 = 4$ 槽

(5) 換向器節距 (Y_c)：線圈 A 的線頭接在 1 號換向器，線尾接在 9 號換向器，因此換向器節距 $Y_c = 9 - 1 = 8$ 片

(三) 鼓型繞組的類型

目前直流電機大多採用鼓型繞組，而鼓型繞組依據繞製方式不同，主要有範例 02 的疊繞 (lap winding) 及範例 03 的波繞 (wave winding) 兩種類型。

電樞繞組要順利繞製完成，要注意下列事項：

1. **準備多少線圈**：線圈數量會依據槽數以及放置的線圈邊數 (單層繞與雙層繞) 來決定，以最常用的雙層繞爲例，電樞有幾個線槽，就準備幾個線圈。若是單層繞，準備的線圈數只要槽數的一半即可。
2. **線圈要繞多寬**：爲了讓同一線圈之兩線圈邊應電勢能夠相加，線圈之兩線圈邊必須要放置在不同磁極 (一 N 一 S) 下，也就是線圈節距 (後節距 Y_b) 必須要接近一個極距 (180° 電機角)。
3. 換向器節距 Y_c：爲了讓線圈感應產生的交流電轉成直流電，直流電機必須計算換向器節距，才能將始端與終端之引接線接到適當的換向片上。
4. **線圈之間如何連接**：鐵心內的各組線圈在旋轉過程中依序發電，爲了使線圈相互合作，還必須依據不同繞法計算出前節距 Y_f。
5. 依據上述資料，將相關資料繪圖或製成繞線表確認無誤，就可以進行繞製。

(四) 疊繞組

1. 基本特徵

疊繞組又稱爲並聯繞組 (parallel winding) 或是複路繞組 (multiple winding)，外觀如圖 4-24 所示，兩個線圈邊的距離稱爲線圈節距或後節距 (Y_b)，**線圈引接線接到相鄰的換向片上**。

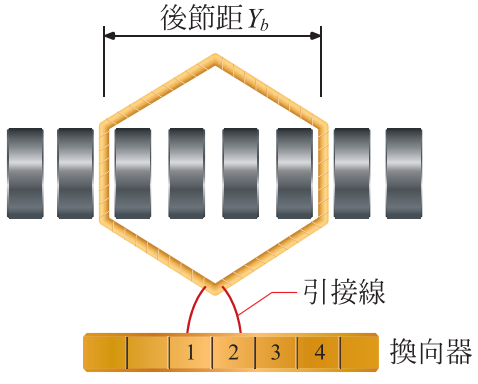


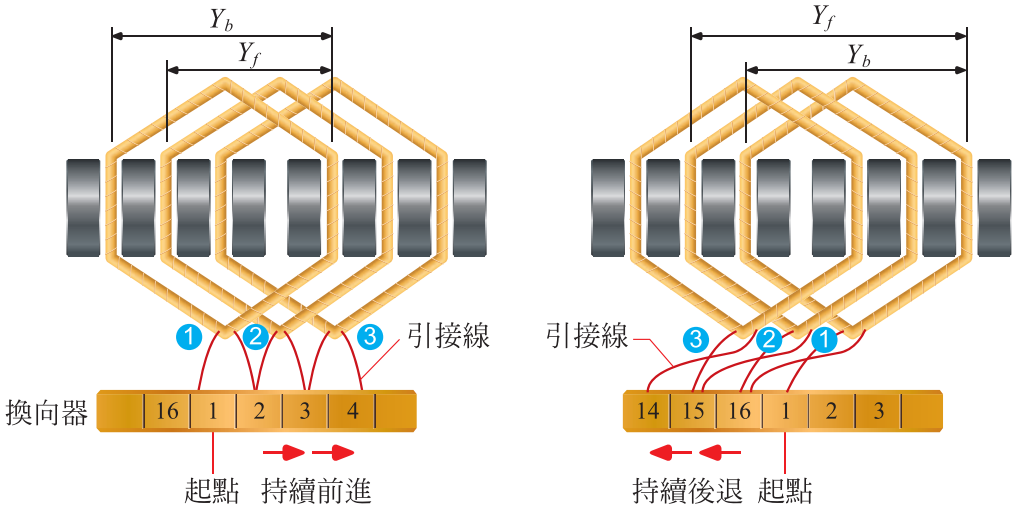
圖 4-24　疊繞組基本外觀圖

2. 前進繞與後退繞

依據線圈及換向器的連接方式，疊繞分爲：

(1) 前進繞：線圈依序向右疊放，而所連接的換向片編號如圖 4-25(a) 向右逐漸增加 (Y_c 爲正)，而 $Y_b > Y_f$。

(2) 後退繞：線圈依序向左疊放，而所連接的換向片編號如圖 4-25(b) 向左逐漸遞減 (Y_c 爲負)，而 $Y_b < Y_f$。



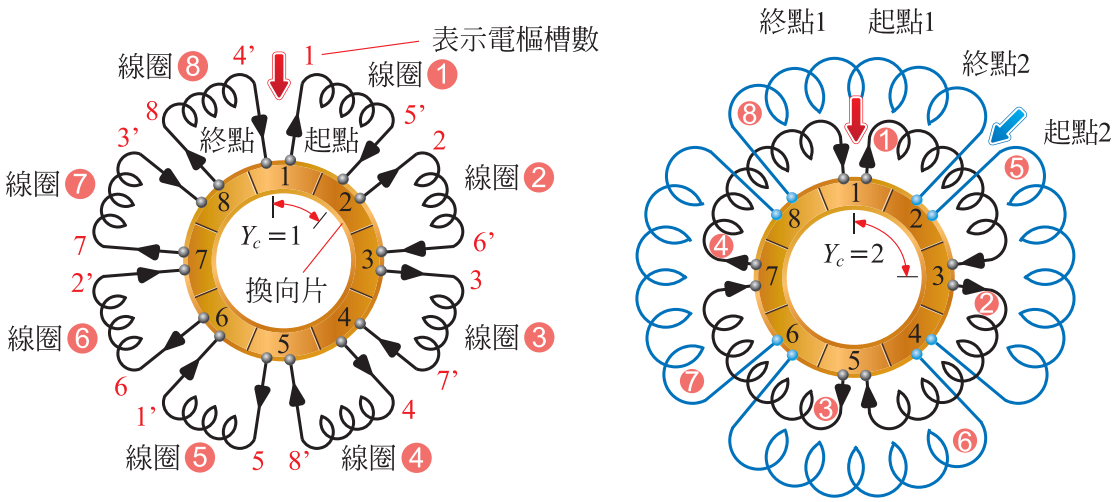
(a) 前進疊繞 $Y_c = +1$　　(b) 後退疊繞 $Y_c = -1$

圖 4-25　前進疊繞與後退疊繞

由圖 4-25 可以看出，**前進疊繞組接到換向器的導線較短，可節省用銅量**；且連接線不會交叉絕緣處理較容易。因此**疊繞大多採用前進繞組**。

3. 複分數與重入數

(1) 複分數：複分數代表同一線圈引接線間隔的換向片數。圖 4-26(a) 所示爲兩極、8 槽、雙層疊繞的接線圖。線圈①的兩個線圈邊分別放在 1 號槽的上層與 5 號槽的下層，而引接線則是接在相鄰的換向片 1 及 2 上，線圈②的引接線則是接在換向片 2 及 3 上。此種接法的換向器節距 $Y_c = +1$，稱爲單分前進疊繞。



(a) 單分前進疊繞($Y_c=+1$)　　(b) 雙分前進疊繞($Y_c=+2$)

圖 4-26　單分前進疊繞與雙分前進疊繞

爲了得到更大的電流，可以將兩組以上相同繞法的電樞繞組同時繞在一個電樞鐵心內，就稱爲複分繞組。圖 4-26(b) 線圈放置的位置與圖 4-26(a) 相同，但是線圈① 兩端引接線改接在換向片 1 及 3 上，而線圈②的引接線則接在換向片 3 及 5 上，此種接法的換向器節距 $Y_c=+2$ 稱爲雙分前進疊繞。

(2) 重入數：電樞繞組依據閉合迴路的數目分爲單重入、雙重入等。如圖 4-26(a)，線圈① 到線圈⑧ 依序連接成一個封閉路徑稱爲單重入。而圖 4-26(b)，線圈① 到線圈④ 連成一個封閉路徑，而線圈⑤到線圈⑧連接成另一個封閉路徑，稱爲雙重入。

4. 疊繞的計算步驟

(1) 決定線圈總數：雙層繞 (線圈總數等於槽數)，單層繞 (線圈總數等於槽數之半)。

(2) 後節距：$Y_b=\dfrac{\text{總槽數}\,S}{\text{極數}\,P}$(取最接近的整數)

(3) 換向器節距：$Y_c=$繞組的複分數 $(\pm m)\begin{cases}+：\text{前進繞}\\-：\text{後退繞}\end{cases}$

(4) 前節距：$Y_f=Y_b-Y_c$

範例 04

有一部直流電機，定子有 4 個磁極，轉子有 8 個線槽，換向器有 8 個截片，試設計雙層、單分、前進疊繞，並說明電流路徑。

解 1. 電樞採用雙層繞，線圈數等於槽數，因此必須準備 8 個線圈

2. 後節距：$Y_b = \dfrac{\text{總槽數 } S}{\text{極數 } P} = \dfrac{8}{4} = 2$ 槽 (每個線圈之兩線圈邊寬度為 2 槽)

3. 換向器節距：$Y_c = m = +1$ 片，(單分 $m = 1$，前進繞取 +)

4. 前節距：$Y_f = Y_b - Y_c = 2 - 1 = 1$ 槽

5. 放置繞組：依據上述結果，首先準備 8 個 (編號 ① ～ ⑧) 寬度為 2 槽的線圈，先將 ① 號線圈一邊放入 1 號槽的上層，另一邊放入 3 號槽的下層 (1 + 2 = 3′)。② 號線圈則放入 2 號槽的上層以及 4 號槽的下層 (2 + 2 = 4′)，以同樣方式將 8 個線圈放置完成後，每個線槽內的上、下兩層各有一個線圈邊，其放置位置如表 4-1 所示，線圈放置情形如圖 4-27 所示：

表 4-1 線圈放置位置表

線圈編號	始邊槽號		終邊槽號	線圈編號	始邊槽號		終邊槽號
①	1	–	3′	⑤	5	–	7′
②	2	–	4′	⑥	6	–	8′
③	3	–	5′	⑦	7	–	1′
④	4	–	6′	⑧	8	–	2′

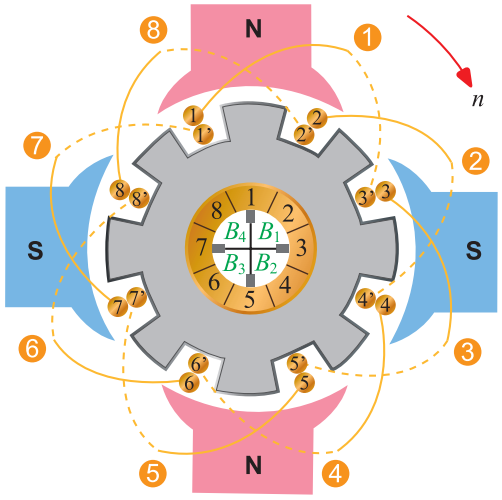
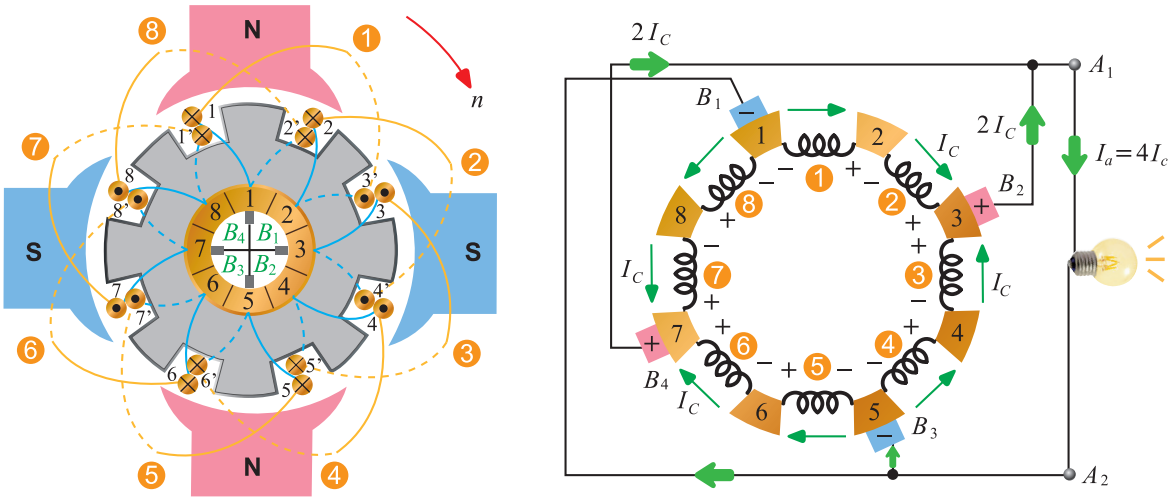


圖 4-27 線圈放置狀態圖

6. 連接換向器：線圈放置完成後，由於採用前進疊繞，換向器節距 ($Y_c = +1$)，因此 ① 號線圈的線頭接在 1 號換向片，線尾接在 2 號換向片。而 ② 號線圈的線頭接在 2 號換向片，線尾接在 3 號換向片，依此順序將所有線圈引接線與換向片連接完成後，其結果如圖 4-28(a) 所示：



(a) 繞組圖　　(b) 電流路徑圖

圖 4-28　繞組圖與電流路徑圖

7. 電流路徑：倘若電樞順時針旋轉到圖 4-28(a) 的瞬間，依據弗萊明右手定則依序將線圈電流 (流入紙面為 + ，流出紙面為 −) 整理成圖 4-28(b)，可以看出 8 個線圈分成 4 個電流路徑。倘若每個線圈所流過的電流為 I_c，4 個路徑上的電流分別經由兩個正電刷 (B_2、B_4) 流到外部負載，因此總電流 $I_a = 4I_c$，再經過兩個負電刷 (B_1、B_3) 流回線圈內。

5. 電流路徑數與電刷數

依據範例 04 可知，**疊繞所需的電刷數量與極數相同**，而電流路徑數 (a) 也與極數 (P) 成正比，若是考慮繞組分數 (m)，則疊繞的電流路徑數為：

$$a = mP \qquad (4\text{-}4)$$

6. 均壓線

電樞採用疊繞組時，不同電流路徑的線圈會分佈在不同磁極下，受到磁極強度、磁阻等些微差異，每個路徑感應電勢會不相等，導致循環電流經過電刷，造成電刷發生火花，甚至燒毀。因此 4 極 (含) 以上疊繞組會使用圖 4-29 之低電阻的粗導線，將相隔 2 個極距 (360° 電機角) 的各點連接在一起，稱爲均壓線 (equalizer)，線圈內的循環電流 (交流型態) 經過均壓線，而不經過換向片與電刷，可延長電刷壽命並有利換向。

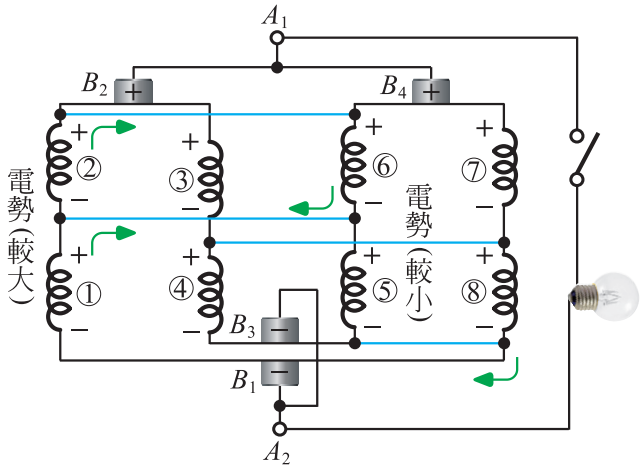


圖 4-29 疊繞加裝均壓線

隨堂練習

( ) 1. 直流電機，電樞繞組的線圈節距約為
(A) 1 極距 (B) 2 極距 (C) 3 極距 (D) 4 極距。

( ) 2. 4 極直流電機，若電樞採用雙分疊繞組，電流路徑數與電刷數分別為
(A) 4、4 (B) 4、8 (C) 8、4 (D) 8、8。

( ) 3. 下列何者為直流電機均壓線的功用？
(A) 抵消電樞反應 (B) 提高絕緣 (C) 提高溫升限度 (D) 改善換向。

(五) 波繞組

1. 基本特徵

波繞組又稱爲串聯繞組 (series winding) 或是雙路繞組 (two-path winding)，線圈外觀如圖 4-30 所示，兩個線圈邊的距離稱爲線圈節距或後節距 (Y_b)。線圈引接線接到接近兩個極距 (360° 電機角) 之換向片上。

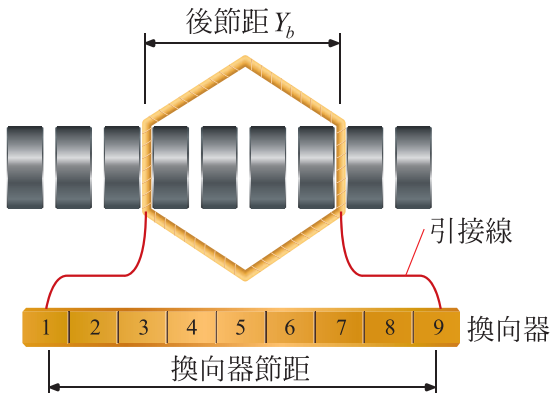


圖 4-30　波繞組基本外觀圖

2. 換向器節距 (Y_c)

波繞的換向器節距必須接近但是不可以等於兩個極距 (360° 電機角)，否則會在連接 $P/2$ 個線圈後就自行短路，無法繼續與其他線圈連接，因此波繞的換向器節距；

$$Y_c = \frac{c \pm m}{P/2} \quad \begin{cases} + : \text{前進繞} \\ - : \text{後退繞} \end{cases} \tag{4-6}$$

c：換向片數　　m：繞組複分數　　P：極數

3. 前進繞與後退繞

依據換向器節距的大小，波繞分爲前進繞與後退繞，圖 4-31 爲例，爲一部 4 極 17 槽，17 個換向器截片的電樞繞組，

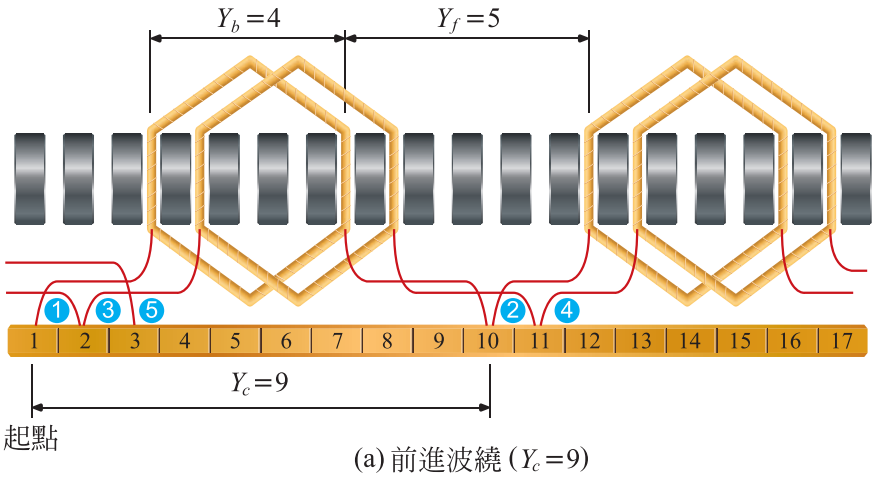
後節距 $Y_b = \dfrac{\text{總槽數 } S}{\text{極數 } P} = \dfrac{17}{4} = 4.25$ 槽，取整數 $Y_b = 4$ 槽，若採用：

(1) 前進繞：換向器節距 $Y_c = \dfrac{17+1}{4/2} = 9$ 片，換向器節距 $Y_c > 360°$ 電機角；

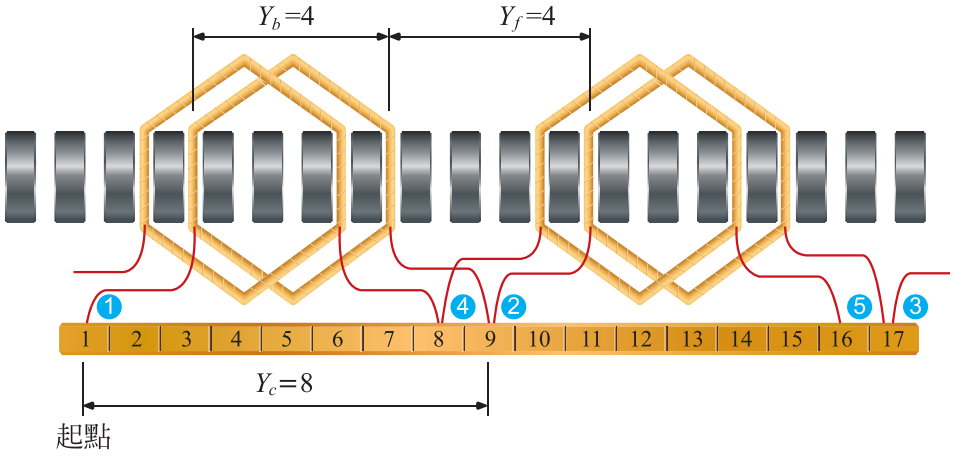
前節距 $Y_f = Y_c - Y_b = 9 - 4 = 5$ 槽。線圈接線如圖 4-31(a) 所示，線圈向右前進持續串接，所連接的換向片編號也向右逐漸增加。

(2) 後退繞：換向器節距 $Y_c = \dfrac{17-1}{4/2} = 8$ 片，換向器節距 $Y_c < 360°$ 電機角；

前節距 $Y_f = Y_c - Y_b = 8 - 4 = 4$ 槽。線圈接線如圖 4-31(b) 所示，線圈向左後退持續串接，所連接的換向片編號也向左逐漸後退。



(a) 前進波繞 ($Y_c=9$)



(b) 後退波繞 ($Y_c=-1$)

圖 4-31 前進波繞與後退波繞

由圖 4-31 可以看出，**波繞採用後退繞時接到換向器的引接線比較短，可以節省用銅量，故波繞大多採用後退繞組。**

4. 波繞的計算步驟

(1) 決定線圈總數：雙層繞 (線圈總數等於槽數)，單層繞 (線圈總數等於槽數之半)。

(2) 後節距：$Y_b=\dfrac{\text{槽數}\,S}{\text{極數}\,P}$ (取最接近的整數)。

(3) 換向器節距：$Y_c=\dfrac{c\pm m}{P/2}$ $\begin{cases}+：\text{前進繞}\\ -：\text{後退繞}\end{cases}$

(4) 前節距：$Y_f=Y_c-Y_b$

範例 05

有一部 4 極直流電機，轉子鐵心內有 9 個線槽，換向器有 9 個截片，試設計雙層、單分、後退波繞，並說明電流路徑。

解 1. 採用雙層繞，線圈數等於槽數因此必須準備 9 個線圈。

2. 後節距：$Y_b = \dfrac{\text{總槽數 } S}{\text{極數 } P} = \dfrac{9}{4} = 2.25$ 槽 (取整數 $Y_b = 2$ 槽)

3. 換向器節距：$Y_c = \dfrac{c \pm m}{P/2} = \dfrac{9-1}{4/2} = 4$ 片 (後退繞取 −)

4. 前節距：$Y_f = Y_c - Y_b = 4 - 2 = 2$ 槽

5. 放置繞組：依據上述結果，準備 9 個線圈寬度都是 2 槽的線圈 (編號 ① ～ ⑨)，參考表 4-2 將線圈依序放入線槽後，放置結果如圖 4-32 所示。

表 4-2　線圈放置位置表

線圈編號	始邊槽號		終邊槽號	線圈編號	始邊槽號		終邊槽號
①	1	–	3′	⑥	6	–	8′
②	2	–	4′	⑦	7	–	9′
③	3	–	5′	⑧	8	–	1′
④	4	–	6′	⑨	9	–	2′
⑤	5	–	7′				

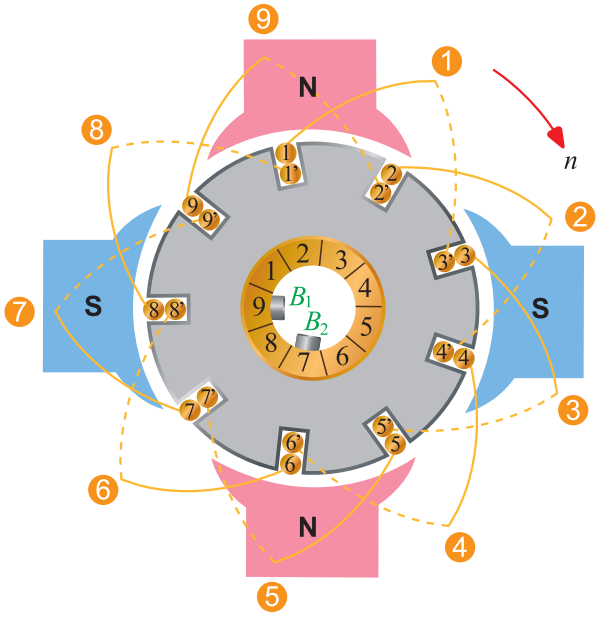
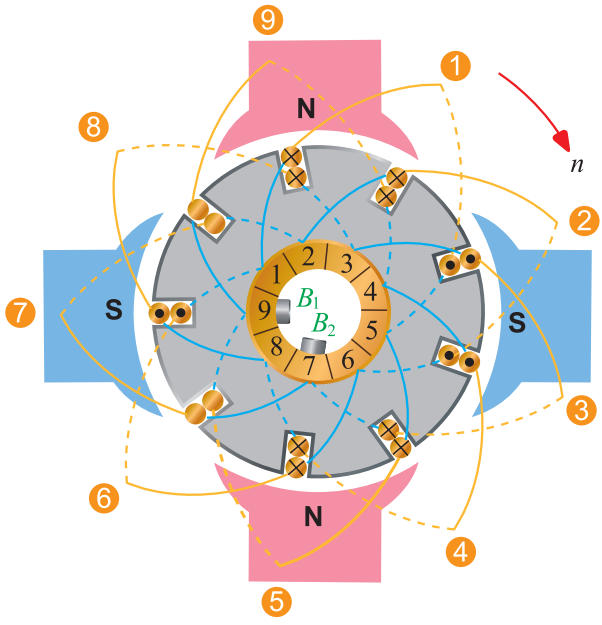


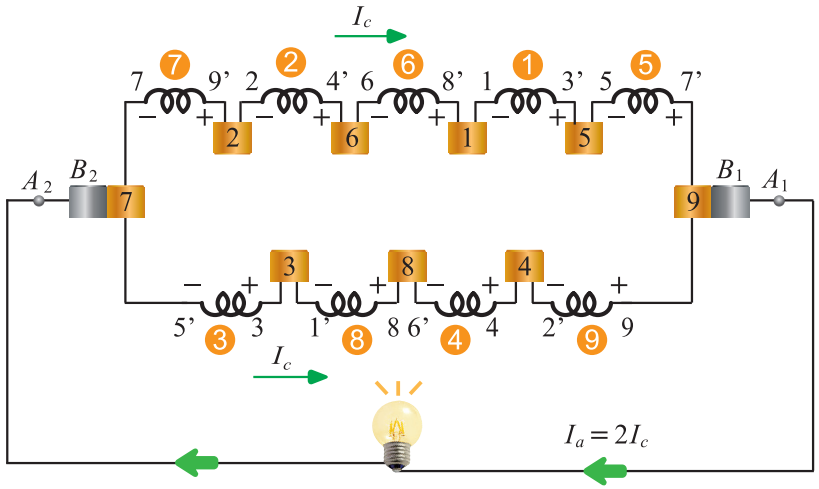
圖 4-32　線圈放置狀態圖

6. 連接換向器：由於採用後退波繞，換向器節距 $Y_c = 4$ 片，因此 ① 號線圈的線頭接在 1 號換向片，線尾接在 5 號換向片 (1 + 4 = 5)。而 ② 號線圈的線頭接在 2 號換向片，線尾接在 6 號換向片 (2 + 4 = 6)，依此順序將所有線圈引接線與換向片連接完成後，如圖 4-33(a) 所示。

7. 電流路徑：倘若電樞順時針旋轉到圖 4-33(a) 瞬間，由圖 4-33(b) 可知，依據弗萊明右手定則可以看出線圈分成 2 個電流路徑，倘若每個線圈的電流為 I_c，2 個路徑的電流經由正電刷 (B_1) 流往外部負載，總電流 $I_a = 2I_c$，再經過負電刷 (B_2) 流回線圈。



(a) 繞組圖



(b) 電流路徑圖

圖 4-33 繞組圖與電流路徑圖

5. 電流路徑數

依據範例 05 可知，波繞的電流路徑數 (a) 與極數 (P) 無關，因此僅需準備兩個電刷即可，實用上也可以裝置與極數相同的電刷數來分擔電流。至於波繞的電流路徑數 (a) 若是考慮繞組分數 (m)，則：

$$a = 2m \qquad (4\text{-}7)$$

由於波繞每個路徑的線圈同時都經過所有磁極，因此不會造成路徑間的電壓不同，因此採**用波繞時不需要加裝均壓線**。

6. 虛設線圈 (dummy coil)

波繞中，若電樞槽數與換向片數配合不當，導致換向器節距 $Y_c = \frac{c \pm m}{P/2}$ 不爲整數，此時電樞會有多餘空槽，此空槽內仍需放入線圈但不予接線，稱爲虛設線圈，以達到機械平衡。

隨堂練習

( ) 1. 直流電機電樞採用波繞時，線圈節距約為
(A) 1 極距 (B) 2 極距 (C) 3 極距 (D) 4 極距。

( ) 2. 直流電機電樞採用波繞時，換向器節距約為
(A) 1 極距 (B) 2 極距 (C) 3 極距 (D) 4 極距。

( ) 3. 4 極直流電機，若電樞採用單分波繞組，電流路徑數以及最少需要的電刷數分別為
(A) 2、2 (B) 2、4 (C) 4、2 (D) 4、4。

( ) 4. 波繞組採用虛設線圈其主要目的為
(A) 機械平衡 (B) 電路平衡 (C) 提升效率 (D) 美觀。

(六) 疊繞與波繞的比較

因應用戶對於電壓或電流的需求，電樞繞組可以設計成不同繞法，但是繞組內的每根導體都以相同長度與速度切割磁力線，因此每根導體產生的應電勢 (e) 都相同。相同導體所能通過的電流 (i) 也相同。

因此，電樞導體數量不變下，電流路徑數 (a) 越多，則每個路徑所能連接的導體數目 (Z) 變少，輸出電壓 (V) 降低，但是輸出電流變大；反之，若是電流路徑越少，則每個路徑所連接的導體數越多，輸出電壓則會增加，但是輸出電流變小；而整體功率 (P) 維持不變。

範例 06

有一部 4 極直流發電機，電樞繞組內有 800 根導體，採用單分疊繞，已知每根導體產生的平均感應電勢為 1 V，每根導體最大容許電流為 30 A，求本機：(1) 電樞端電壓、(2) 電樞電流、(3) 輸出功率？

解 單分 ($m = 1$) 疊繞，電流路徑數 $a = mP = 1 \times 4 = 4$，

每路徑串聯導體數 $Z' = \dfrac{800}{4} = 200$ 根，如圖 4-34 所示：

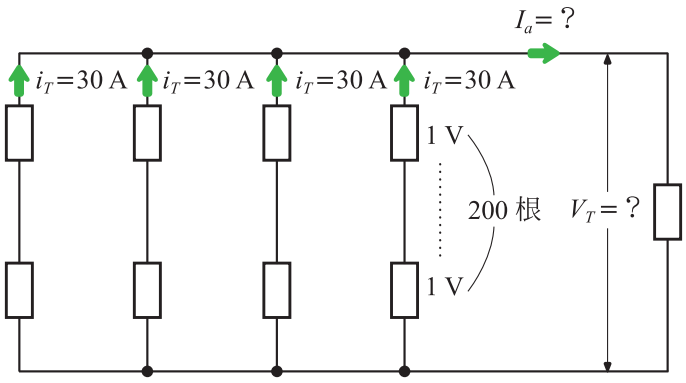


圖 4-34

(1) 每路徑總電壓：$e_T = 200 \times 1\ \text{V} = 200\ \text{V}$，並聯電壓相等，因此端電壓 $V_T = e_T = 200\ \text{V}$

(2) 每根導體最大容許電流 $i = 30\ \text{A}$，串聯電流相等，因此每個路徑 $i_T = 30\ \text{A}$，4 個路徑合計電樞電流 $I_a = 4 \times 30\ \text{A} = 120\ \text{A}$

(3) 輸出功率 $P_o = V_T \times I_a = 200\ \text{V} \times 120\ \text{A} = 24\ \text{kW}$

範例 07

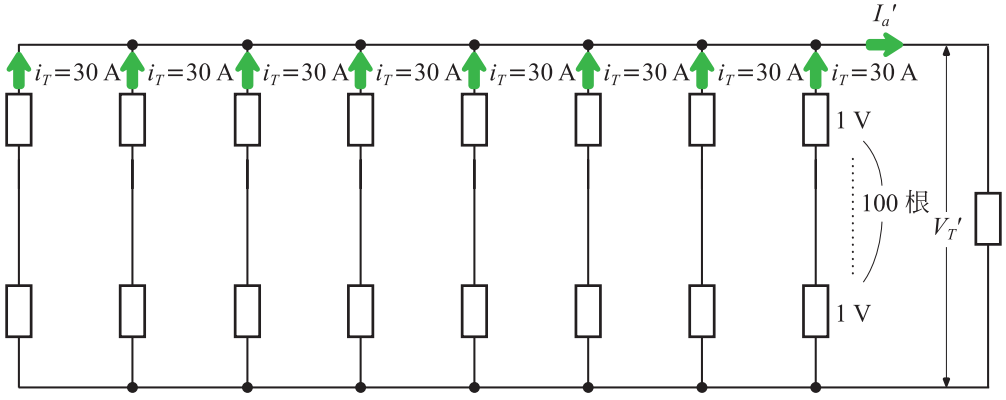
倘若導體總數不變下，將範例 06 之電樞分別改為 (1) 雙分疊繞、(2) 單分波繞時，則電樞端電壓、電樞電流與輸出功率分別為何？

解 (1) 電樞改為雙分疊繞，電流路徑數 $a = mP = 2 \times 4 = 8$，如圖 4-35(a) 所示：

每個路徑串聯的導體數變成 100 根，端電壓 $V_T' = 100 \times 1\ \text{V} = 100\ \text{V}$；

每個路徑電流 $i_T = 30\ \text{A}$，電樞電流 $I_a' = 8$ 路 $\times 30\ \text{A} = 240\ \text{A}$

輸出功率 $P_o' = V_T' \times I_a' = 100\ \text{V} \times 240\ \text{A} = 24\ \text{kW}$。



雙分疊繞

圖 4-35(a)

(2) 電樞改為單分波繞，電流路徑數

$a = 2m = 2 \times 1 = 2$，如圖 4-35(b) 所示：

每個路徑串聯的導體數變成 400 根，

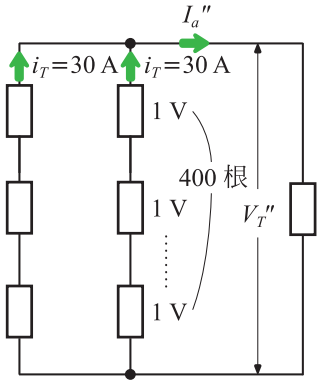
端電壓 $V_T'' = 400 \times 1\ \text{V} = 400\ \text{V}$；

每個路徑電流 $i_T = 30\ \text{A}$，

電樞電流 $I_a'' = 2$ 路 $\times 30\ \text{A} = 60\ \text{A}$；

輸出功率 $P_o'' = V_T'' \times I_a''$

$= 400\ \text{V} \times 60\ \text{A} = 24\ \text{kW}$



單分波繞

圖 4-35(b)

將範例 06 與範例 07 整理成表 4-3 後，可以看出，**在導體數相同下，電流路徑數越多，輸出端電壓越低，電樞電流越大，但總功率不變。疊繞組由於電流路徑數較多，因此適用於低壓大電流的機種。波繞組則因爲電流路徑數較少，多用於高壓小電流的機種。**

表 4-3 疊繞與波繞比較表

繞法 ($P = 4$)	電流路徑數 a	電樞端電壓 V_T	電樞電流 I_a	輸出功率 P_o	每條路徑電流 i_T
單分疊繞	$a = mP = 4$	200 V	120 A	24 kW	30 A
雙分疊繞	$a = mP = 8$	100 V	240 A	24 kW	30 A
單分波繞	$a = 2m = 2$	400 V	60 A	24 kW	30 A

直流電機最常用的疊繞與波繞重點整理如成表 4-4 所示：

表 4-4 疊繞與波繞比較表

	疊繞組 (並聯繞組)	波繞組 (串聯繞組)
電流路徑數	$a = mP$	$a = 2m$
線圈節距 (後節距)	$Y_b = \frac{S \text{ 總槽數}}{P \text{ 極數}}$ (取整數)	
換向器節距	$Y_c = \pm m$(小)	$Y_c = \frac{c \pm m}{P/2}$ (接近兩極距)
前節距	$Y_f = Y_b - Y_c$	$Y_f = Y_c - Y_b$
適用場所	低電壓大電流	高電壓小電流
電刷數	等於磁極數	2 或磁極數
均壓線	4 極 (含) 以上需要，均壓線數 $= \frac{\text{總圈總數}}{P/2} \times$ 百分數 %	不需要
虛設繞組	不需要	$Y_c = \frac{c \pm m}{P/2}$ 不爲整數時需要
導線之節省	前進繞	後退繞

隨堂練習

(　　) 1. 某台 6 極直流發電機電樞為單分疊繞組，其電樞導體數為 600 根，而每一電樞導體之平均應電勢為 1.5 V，每根所載之電流為 20 A，則該機之輸出功率為多少瓦特？
(A) 2000 W　(B) 6000 W　(C) 9000 W　(D) 18000 W。

(　　) 2. 8 極、40 V、80 A 直流發電機，原本採用單分疊繞，在導體數不變下改裝為單分波繞組，則電壓與電流分別為
(A) 160 V、20 A　(B) 20 V、160 A　(C) 320 V、10 A　(D) 320 V、20 A。

自我評量

一、選擇題

4-2 (　) 1. 何者爲直流發電機定子的一部分？
(A) 電樞鐵心　(B) 電樞繞組　(C) 換向器　(D) 電刷。

(　) 2. 直流電機的磁路中，磁阻最大的部分是
(A) 空氣隙　(B) 磁極　(C) 場軛　(D) 電樞鐵心。

4-3 (　) 3. 主磁極上的磁場繞組，其作用是產生電機所需要的
(A) 磁通　(B) 功率　(C) 感應電勢　(D) 轉矩。

(　) 4. 碳質電刷，最適合應用於下列何種特性之直流電動機？
(A) 小容量、低轉速　(B) 小容量、高轉速
(C) 大容量、低轉速　(D) 大容量、高轉速。

4-4 (　) 5. 直流電機的電樞部分屬於
(A) 固定部分　(B) 轉動部分　(C) 磁路部分　(D) 散熱部分。

(　) 6. 在直流發電機內其換向器的功用
(A) 將交流變爲直流　(B) 將直流變爲交流
(C) 引導直流　(D) 引導交流。

(　) 7. 正逆轉方向經常變動的直流機，其電刷與換向器之接觸形式宜用
(A) 垂直形　(B) 追隨形　(C) 逆動形　(D) 以上皆非。

(　) 8. 電樞上採用斜形槽的目的是
(A) 減少噪音　(B) 減少鐵損　(C) 增大轉矩　(D) 起動容易。

(　) 9. 直流電機鐵心加入矽的主要目的爲何？
(A) 減低銅損　(B) 減低磁滯損
(C) 減低渦流損　(D) 避免磁飽和。

4-5 (　)10. 六極電機，其一周之電工角度爲
(A) 180°　(B) 360°　(C) 720°　(D) 1080°。

(　)11. 一般 P 極直流機而言，電機角度等於幾倍機械角度？
(A) $\frac{P}{4}$　(B) $\frac{P}{2}$　(C) P　(D) $2P$。

自我評量

(　　)12. 直流機電樞繞組有疊繞及波繞，就單重繞組而言，下列何者錯誤？
(A) 疊繞之電流路徑數等於極數　(B) 疊繞較適於低電壓大電流
(C) 波繞之電流路徑數爲 2　　(D) 波繞需有均壓環連接。

(　　)13. 某 6 極 36 槽電機，電樞繞組採雙層、單式疊繞、全節距繞，則其線圈節距爲
(A) 36 槽　(B) 12 槽　(C) 6 槽　(D) 4 槽。

(　　)14. 某 4 極 32 槽電機，電樞繞組採雙層、單式疊繞、短節距繞，某線圈的一個線圈邊置於第 3 槽，另一個線圈邊最可能置於第
(A) 4 槽　(B) 10 槽　(C) 11 槽　(D) 12 槽。

(　　)15. 下列那一種直流機應作均壓線連接？
(A) 二極疊繞機　　(B) 四極疊繞機
(C) 二極波繞機　　(D) 四極波繞機。

(　　)16. 單式疊繞組之直流機，連接同一均壓線上的各線圈應相距
(A) 90 度　(B) 180 度　(C) 360 度　(D) 720 度　電工角。

(　　)17. 4 極、100 V 直流發電機若將電樞繞組由單分疊繞改爲單分波繞，則端電壓變成
(A) 400 V　(B) 200 V　(C) 100 V　(D) 50 V。

(　　)18. 6 極直流發電機，電樞導體相同，則單式疊繞的每根導體的電流額定爲繞成單式波繞時的
(A) 1/3 倍　(B) 1 倍　(C) 3 倍　(D) 6 倍。

(　　)19. 繞組中虛設線圈其主要目的爲
(A) 機械平衡　(B) 電路平衡　(C) 提升效率　(D) 美觀。

(　　)20. 四極單分波繞之直流發電機，其電樞上共有 400 根導體，若每根導體之平均電勢爲 2 伏特，所載電流爲 20 安培，則該發電機之額定電壓及電流分別爲
(A) 800 V，20 A　　(B) 400 V，40 A
(C) 200 V，80 A　　(D) 400 V，80 A。

自我評量

二、問答題

1. 有一台 4 極、36 槽直流電機，電樞繞組採用雙層，單分、前進疊繞，求：(1) 後節距、(2) 換向片節距、(3) 前節距、(4) 電流路徑數、(5)100 % 均壓時需要幾條均壓線。

2. 有一台 4 極 36 槽之直流電機，電樞繞組繞成雙層、雙分、後退波繞，求：(1) 後節距、(2) 換向片節距、(3) 前節距、(4) 電流路徑數、(5) 虛設線圈數。

3. 有一台 6 極直流發電機，電樞內部共有 450 根有效導體，每導體之平均應電勢爲 2 伏特，其所載之電流爲 10 安培，試求電樞繞組分別採用：(1) 單分疊繞、(2) 單分波繞時之 (a) 電流路徑數、(b) 端電壓、(c) 電樞電流、(d) 輸出功率分別爲何？

CHAPTER 5

直流發電機之一般性質

本章重點

直流發電機目的是產生直流電能，但是實際供電過程中，卻發生原本設想不到的情形，主要包括：

(1) 電樞反應：電樞繞組在供電過程中本身竟然也產生磁場，而且對原本磁場繞組所供給的磁場造成干擾現象。

(2) 火花：換向器的功能是將電樞繞組產生的交流電轉變成直流電；但是轉換過程受到電樞反應及電樞電抗影響，造成電流變化過程不穩定而發生火花。

本章將針對上述現象發生的原因及因應方法進行說明。

5-1 電樞反應的現象

(一) 直流發電機的剖面簡圖

圖 5-1 爲一部 2 極、8 槽直流發電機的剖面圖。磁極鐵心上繞有磁場繞組 (F_1-F_2)。電樞繞組採用雙層疊繞，因此轉子鐵心的 8 個線槽內總共放有 8 個線圈，爲了方便閱讀，省略了繞組及換向器間的接線。8 個線圈經換向器連接後透過電刷 (B_1-B_2) 將電能傳遞給外部負載 (L) 使用。整個電樞繞組的接線端以 (A_1-A_2) 表示。

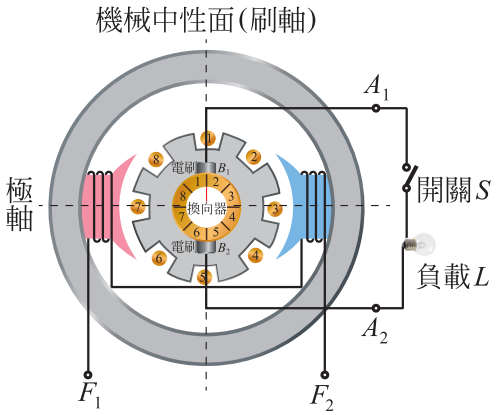


圖 5-1　2 極 8 槽直流發電機的剖面簡圖

(二) 相關名詞定義

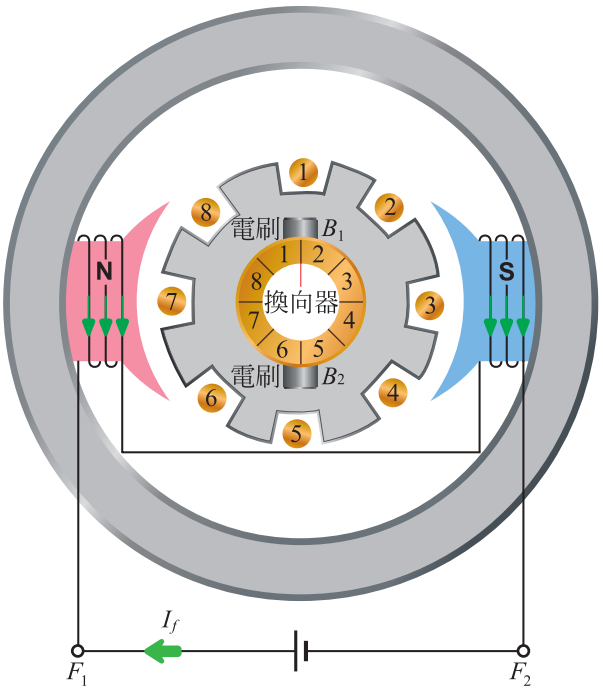
1. 極軸：通過相鄰兩個磁極的假想直線。
2. 機械中性面：又稱**幾何中性面，相鄰兩磁極正中間位置**，此軸不會移動。
3. 電機中性面：又稱**磁中性面，眞正使電樞中線圈之應電勢爲零的位置**，此軸會隨負載改變而移動。
4. 刷軸：兩個電刷放置的假想直線，**電刷左、右二邊電流方向相反**。大型直流電機裝有移刷器，可以依據實際情況移動電刷的位置。

(三) 電樞反應的形成

1. 主磁場 **(F_m)**：將圖 5-2(a) 中的磁場繞組 (F_1-F_2) 兩端外加直流電壓後，電流在磁場繞組中流動，此電流稱爲激磁電流、磁場電流或場電流，以 I_f 表示，依據右螺旋定則，左側磁極產生 N 極，右側磁極產生 S 極。

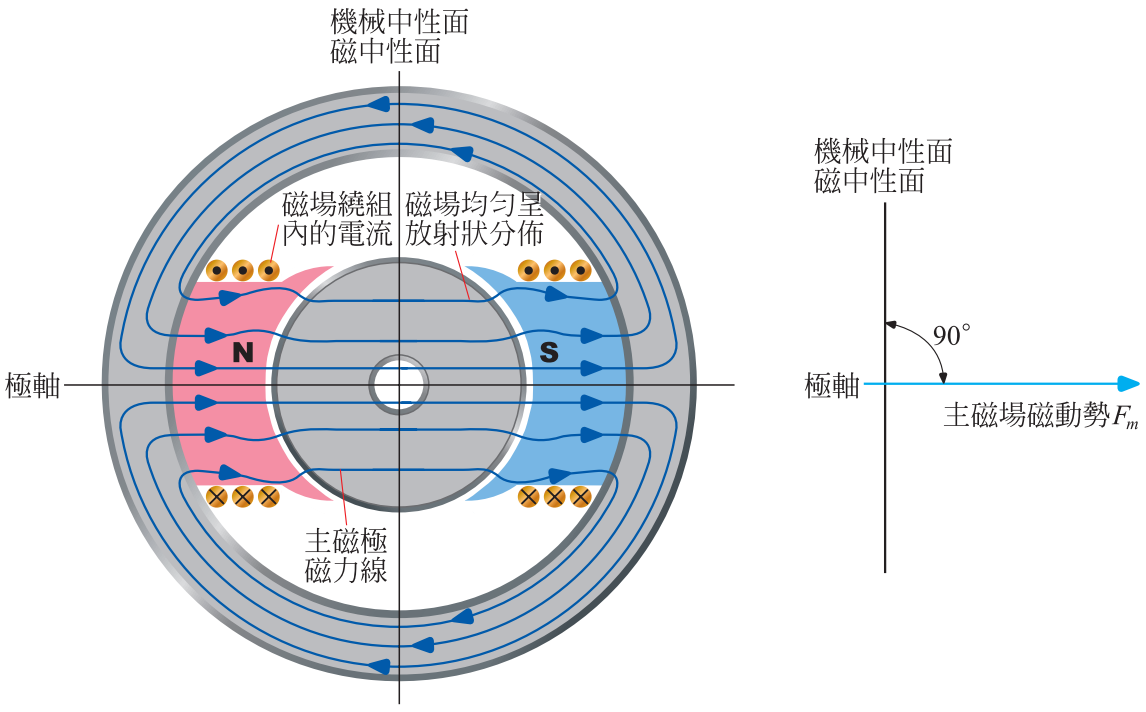
將圖 5-2(a) 簡化成圖 5-2(b) 後，可以清楚看出主磁極產生的磁力線由N極出發，經過空氣隙、電樞、空氣隙來到 S 極。再經由機殼回到 N 極。

主磁極所產生的磁通量 (ϕ) 是發電機產生應電勢 ($E=Kn\phi$) 的必要條件。透過圖 5-2(c) 可看出，主磁場的磁動勢 (F_m) 方向與極軸平行，與機械中性面垂直，發電機在無載時，磁中性面與機械中性面重疊。



(a) 磁場繞組外加激磁

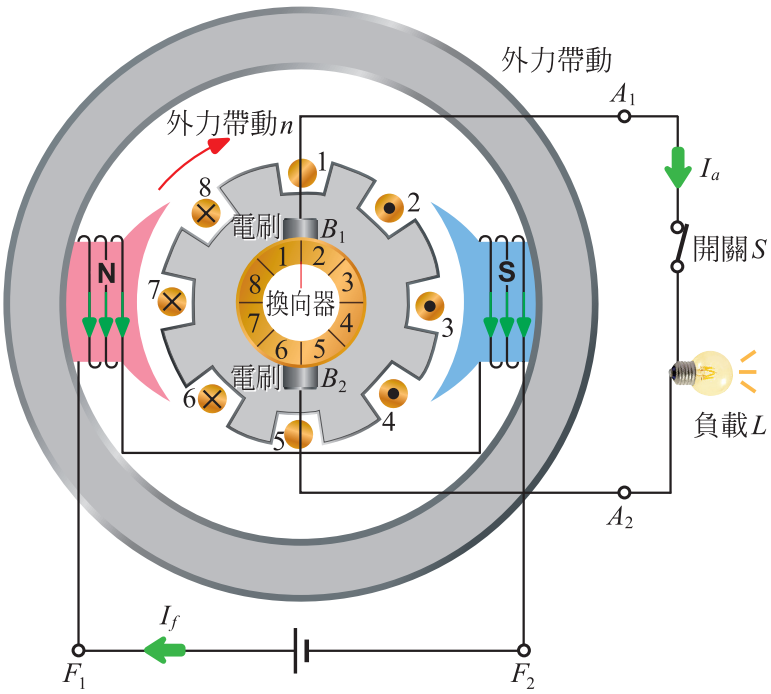
圖 5-2　直流發電機的主磁場



(b) 主磁極的磁通分佈　　(c) 相量圖

圖 5-2　直流發電機的主磁場 (續)

2.　電樞磁場 (F_a)：圖 5-3(a) 中將轉子順時針方向旋轉，依據弗萊明右手定則得知，左側電樞導體應電勢方向爲流入紙面，右側電樞繞組導體爲流出紙面。將開關 S 閉合，電樞繞組內的電流開始流動，經由換向片與電刷流向負載，此電流稱爲電樞電流 (I_a)。



(a) 電樞電流路徑

圖 5-3　直流發電機的電樞磁場

將圖 5-3(a) 簡化成圖 5-3(b) 後，依據右螺旋定則可得整個電樞繞組產生向下的磁場，此由電樞電流 (I_a) 產生的磁場稱爲電樞磁場，因此**電樞磁動勢 (F_a) 與電樞電流成正比**。**發電機無載時 $I_a = 0$，可視爲無電樞反應**。

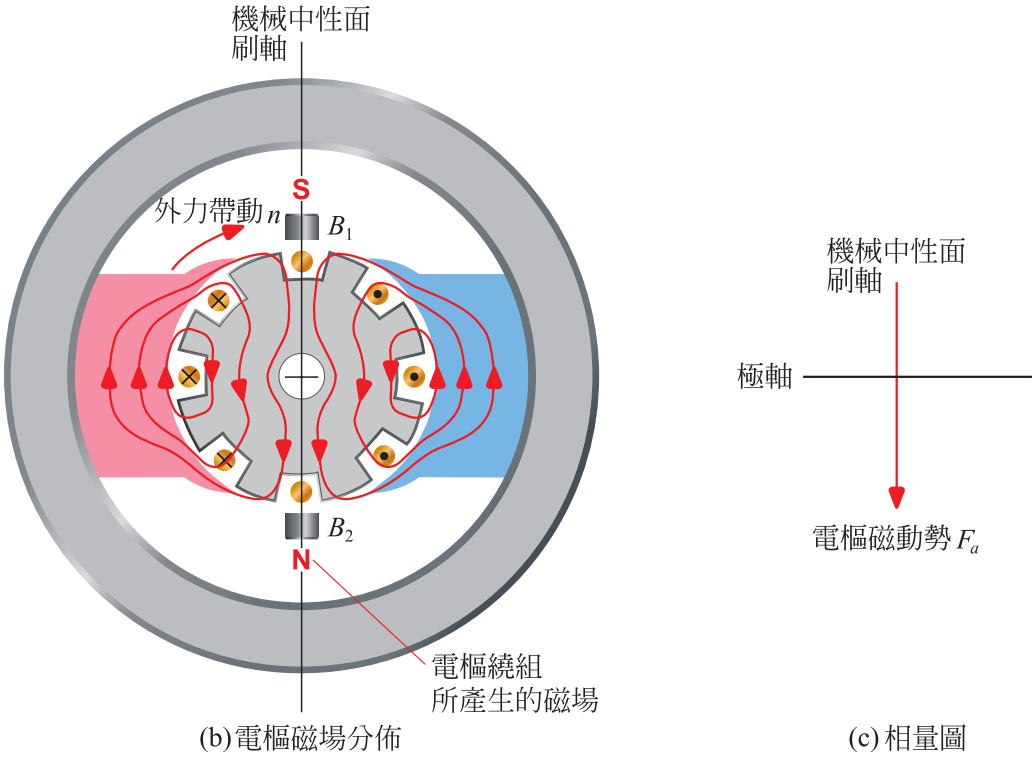


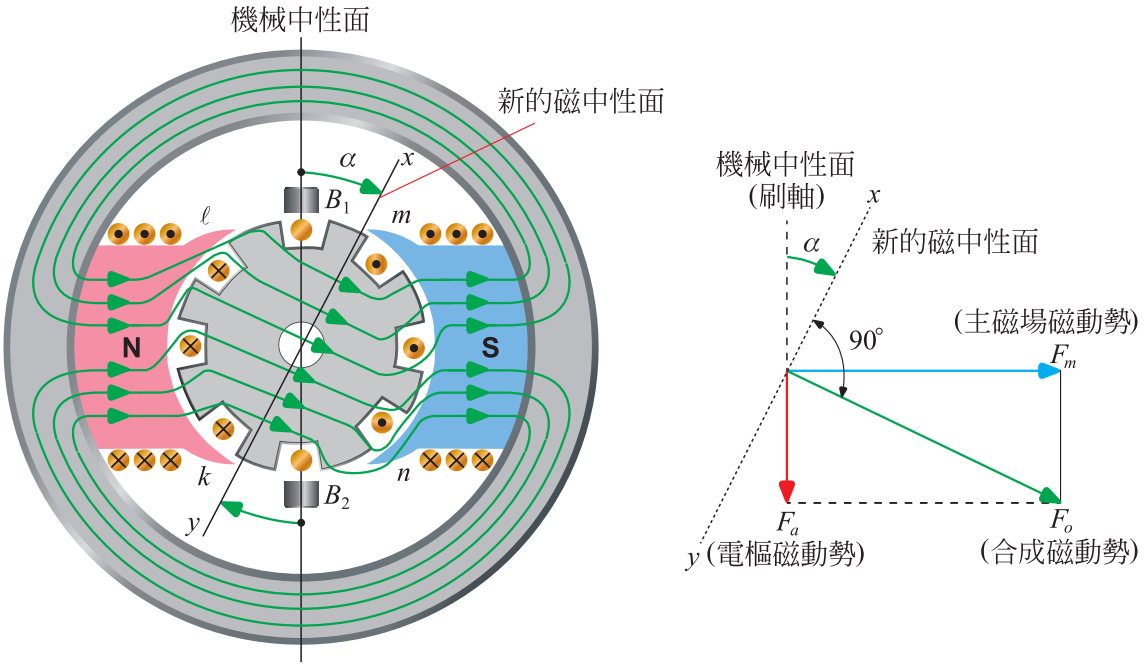
圖 5-3　直流發電機的電樞磁場 (續)

3. **合成磁場**：將圖 5-2(b) 主磁場與圖 5-3(b) 電樞磁場合成後，可得到直流發電機在有載情況下磁場分佈情形，如圖 5-4(a) 所示：

(1) 磁極的 m、k 處 (前極尖)，電樞磁場方向與主磁場方向相反，綜合磁通量削弱。

(2) 磁極的 n、ℓ 處 (後極尖)，電樞磁場方向與主磁場方向相同，綜合磁通量增強。

(3) 由圖 5-4(b) 可以看出，主磁場磁動勢 (F_m) 受到電樞磁動勢 (F_a) 的干擾，使得合成磁動勢 (F_o) 方向產生傾斜，造成合成磁場的磁中性面不會停留在機械中性面的刷軸上。換言之，因爲電樞反應使得磁中性面順著轉向移動了 α 角。



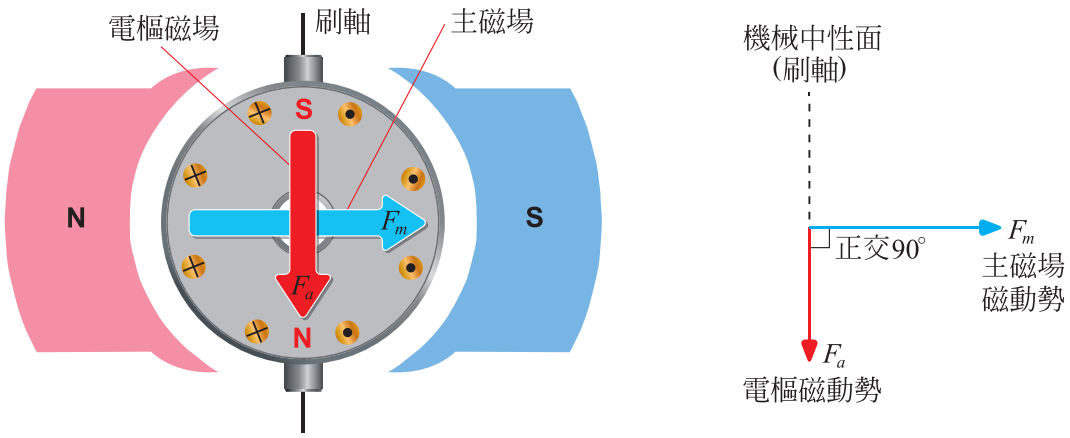
(a) 主磁場與電樞磁場作用　　(b) 綜合相量圖

圖 5-4　直流發電機的電樞反應

(四) 電刷移位對直流發電機的影響

由於電樞反應會造成磁中性面移位。小型電機由於電樞電流小，產生的電樞反應輕微。但對大型電機而言，爲了避免電刷發生火花，可以裝置移刷器，視電樞電流的大小移動位置，不同的電刷移位方式對直流發電機影響如下：

1. **電刷不移位**：圖 5-5(a) 是將電刷放在機械中性面上不移動。由於電刷左、右兩邊的電流方向相反，因此電樞磁場 (F_a) 與主磁場 (F_m) 垂直，使得主磁場扭斜，稱爲交磁效應，兩者的相量關係如圖 5-5(b) 所示。由於**電刷不移動**，因此被電刷短路的線圈仍有感應電勢存在，會使得**換向器間發生環流而產生火花**。



(a) 交磁現象　　(b) 綜合向量圖

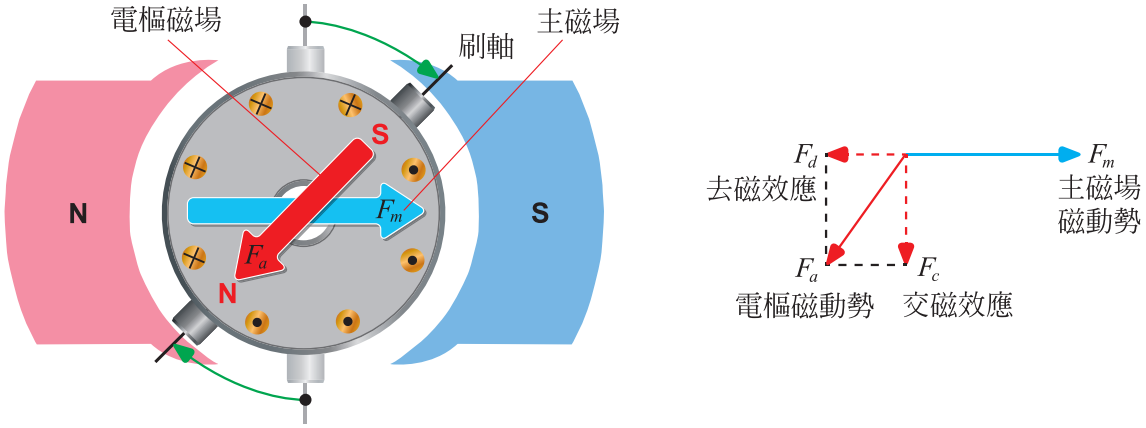
圖 5-5　電刷不移位

2. 電刷移位正確：直流發電機電樞反應會造成磁中性面順轉向移動 a 角。此時若如圖 5-6(a) 所示將**電刷順著轉向移到新的磁中性面**，電樞磁場 (F_a) 方向變成偏左下方而非垂直向下，移位後的電樞磁動勢 (F_a) 可分解兩部分：

(1) 去磁效應 (demagnetizing)：電樞反應的去磁效應 F_d 與主磁通方向 F_m 相反，導致**主磁通 (ϕ) 減弱，造成應電勢降低**。

(2) 交磁效應 (cross-magnetizing)：電樞反應的交磁效應 F_c 與主磁通方向 F_m 垂直，造成**主磁場扭斜，導致換向困難**。

倘若電刷移位正確，被電刷短路的線圈沒有感應電勢，不會產生火花。



(a) 交磁現象　　(b) 綜合向量圖

圖 5-6　發電機的電刷順轉向移動

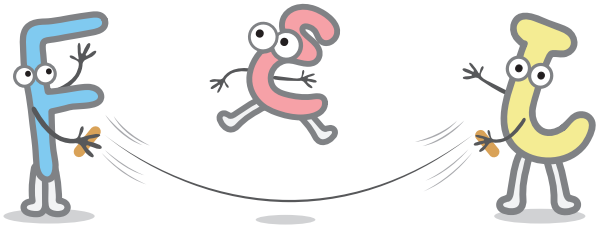
3. **電刷移位錯誤**：直流發電機若是將電刷逆著轉向移動，電樞磁場會產生磁與助磁現象，但是被電刷短路的線圈還有感應電勢存在，故電刷會產生劇烈火花，應避免發生。

4. **結論**：電樞反應對直流發電機的影響：
   (1) **前極尖磁通減少，後極尖磁通增多**，受限於磁通飽和，總磁通減少。
   (2) **磁中性面順著旋轉方向偏移**，因此電刷必須順著轉向移動。
   (3) 電樞反應的交磁效應，使得合成磁場發生扭斜，造成換向困難。
   (4) 電樞反應的去磁效應，使得總磁通量減少，造成應電勢降低。

隨堂練習

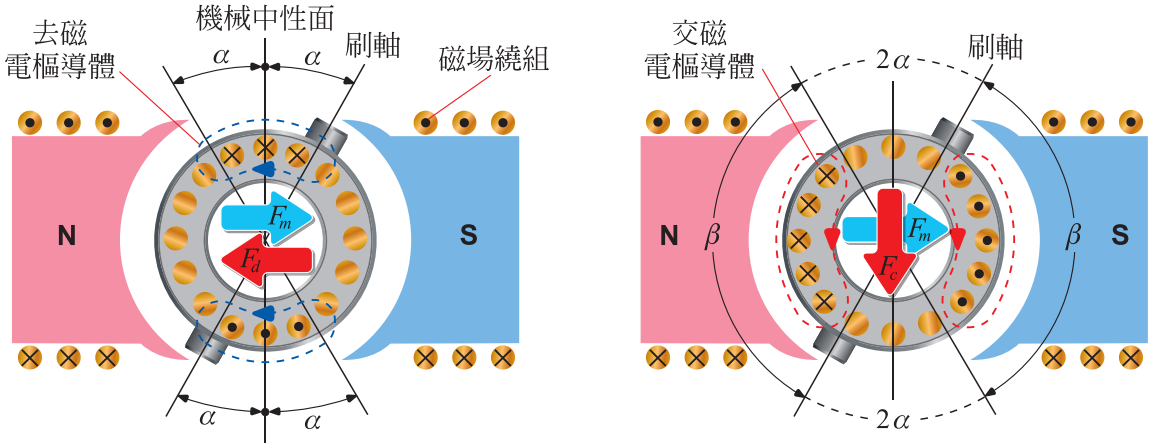
(　　) 1. 無補償繞組之直流發電機，其電樞反應將造成
(A) 前、後極尖磁通均減弱
(B) 前極尖磁通減弱、後極尖磁通增強
(C) 前、後極尖磁通均增強
(D) 前極尖磁通增強、後極尖磁通減弱。

(　　) 2. 直流電機電樞反應之去磁與交磁部分，分別與主磁場方向
(A) 相同、垂直　(B) 相同、相反
(C) 相反、垂直　(D) 垂直、相反。



5-2 電樞反應的計算

若是將圖 5-7(a) 的電刷由機械中性面順著轉向移動 α 角，根據右螺旋定則，有 4α 角度之電樞導體產生與主磁場 (F_m) 方向相反之去磁 (F_d) 效應。依據圖 5-7(b) 可知，扣除 4α 後其餘的 2β 電樞導體，產生與主磁場 (F_m) 方向垂直之交磁 (F_c) 效應，換言之 $4\alpha + 2\beta = 360°$。



(a) 去磁磁動勢 F_d　　(b) 交磁磁動勢 F_c

圖 5-7　電樞反應的去磁與交磁

其中電樞磁動勢 (F_a)，又稱爲電樞總安匝數，其值爲：

$$F_a = N \times I = \frac{Z}{2} \times \frac{I_a}{a} \qquad (5\text{-}1)$$

F_a ：電樞磁動勢 (安匝；AT)　　Z ：電樞總導體數 (根)

a ：電流路徑數　　I_a ：電樞電流 (安培；A)

將電刷由機械中性面順轉向移動 $\alpha°$ 電機角，則每一個磁極 ($\theta_e = 180°$) 內都會有 $2\alpha°$ 的電樞導體產生去磁效應，因此總去磁磁動勢又稱爲總去磁安匝數：

$$F_d = \frac{2\alpha}{180°} \times \frac{Z}{2} \times \frac{I_a}{a} \text{ (安匝)} \qquad (5\text{-}2)$$

註　$\alpha°$ 爲電機角 θ_e，若爲機械角 θ_m，則先利用公式 $\theta_e = \frac{P}{2}\theta_m$ 轉換。

將電樞磁動勢 (F_a) 扣除總去磁磁動勢 (F_d) 後可得整部電機總交磁磁動勢 (F_c)，又稱爲總交磁安匝數，其值爲：

$$F_c = F_a - F_d = \frac{180° - 2\alpha°}{180°} \times \frac{Z}{2} \times \frac{I_a}{a} \text{ (安匝)} \qquad (5\text{-}3)$$

若要求得每個磁極的電樞反應安匝，將上述公式分別除以磁極數 P 即可。

範例 01

有台 6 極直流發電機，電樞總導體數 720 根，繞製成單分波繞組，已知電樞電流為 500 安培，當電刷前移 10° 機械角，則此機之：

(1) 總電樞磁動勢、(2) 總去磁磁動勢、(3) 每極交磁磁動勢為多少？

解 電刷移位的電機角：$\theta_e = \frac{P}{2} \times \theta_m = \frac{6}{2} \times 10° = 30° \ (\alpha)$

單分波繞：電流路徑數：$a = 2m = 2 \times 1 = 2$

(1) 總電樞磁動勢：$F_a = \frac{Z}{2} \times \frac{I_a}{a} = \frac{720}{2} \times \frac{500}{2} = 90000 \text{ AT}$

(2) 總去磁磁動勢：$F_d = \frac{2\alpha°}{180°} \times (\frac{Z}{2} \times \frac{I_a}{a}) = \frac{2 \times 30°}{180°} \times 90000 = 30000 \text{ AT}$

(3) 總交磁磁動勢：$F_c = F_a - F_d = 90000 - 30000 = 60000 \text{ AT}$

或是 $F_c = \frac{180° - 2\alpha°}{180°} \times \frac{Z}{2} \times \frac{I_a}{a} = \frac{180° - (2 \times 30°)}{180°} \times 90000 = 60000 \text{ (AT)}$

因此每極交磁安匝：$\frac{F_c}{P} = \frac{60000}{6} = 10000 \text{ AT}$ 。

隨堂練習

( ) 1. 有台 4 極直流發電機，電樞總導體數 288 根，繞製成單分疊繞組，其電樞電流為 120 A，其電刷前移 12° 機械角，則此機之每極去磁安匝為
(A) 288 AT (B) 792 AT (C) 1152 AT (D) 3168 AT。

( ) 2. 4 極直流發電機，電刷中性面移 15° 機械角，則總去磁安匝為總電樞安匝的
(A) $\frac{1}{2}$ (B) $\frac{1}{3}$ (C) $\frac{1}{4}$ (D) $\frac{1}{6}$ 。

( ) 3. 同上題，總去磁安匝為總交磁安匝的 (A) $\frac{1}{2}$ (B) $\frac{1}{3}$ (C) $\frac{1}{4}$ (D) $\frac{1}{6}$ 。

5-3 電樞反應的對策

電樞反應會干擾磁通分佈，使得磁中性面偏移造成換向不良外；總磁通減少也造成發電機應電勢降低。爲了降低電樞反應的影響，常用的做法包括：

(一) 改良主磁極結構，增加電樞磁路磁阻

藉由改良磁極結構，在不影響主磁場下，盡量增加電樞磁場磁阻，以降低電樞反應，方法包括：

1. 增加主磁極數目

在不影響電壓下增加磁極數 P，可以減少電樞繞組導體數 Z，使得電樞磁動勢 F_a 降低，減低電樞反應。

2. 增加磁極尖部的空氣隙

將磁極面的弧度與電樞鐵心的弧度設計不同，使極尖磁阻變大，**讓主磁通盡量如圖 5-8 由低磁阻的中央通過**，抑制磁通偏移。

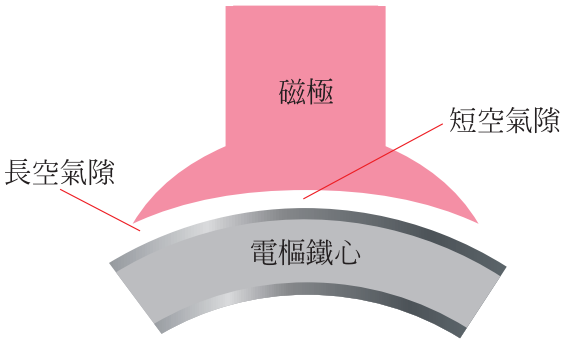


圖 5-8 增加磁尖空氣隙

3. 磁極鐵心採用單極尖的薄片疊置

磁極鐵心利用圖 5-9 的缺左尖與缺右尖的薄矽鋼片交互疊置，由於**極尖面積減半容易飽和，主磁通盡量由磁極中央通過**，抑制磁通偏移現象。

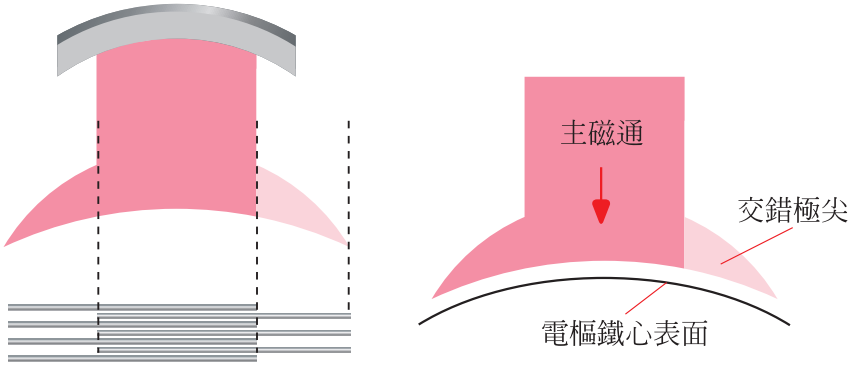
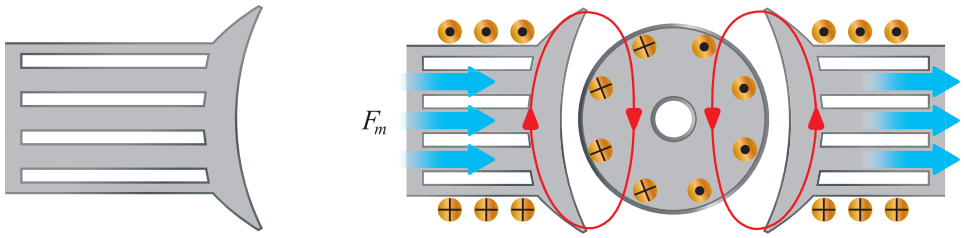


圖 5-9 磁極鐵心採用缺左缺右極尖交互疊置

4. 楞德爾磁極法 (Lundall pole)

主磁極鐵心極身上刻有數道長槽，由圖 5-10 可以看出長槽對於水平通過的主磁場 (F_m) 影響不大，但電樞磁場 (F_a) 會因爲空氣隙造成的磁阻變大，電樞反應因而減輕。



(a) 磁極鐵心的水平槽　　(b) 主磁場與電樞磁場的磁路

圖 5-10　楞德爾磁極法

(二) 增設繞組

大型直流電機，在空間允許下會加裝新的繞組，抵消電樞反應，包括：

1. 裝設補償繞組

補償繞組 (compensating winding) 又稱爲湯姆生 - 雷恩磁極 (Thompson-Ryan pole) 或是極面繞組 (pole-face winding)，如圖 5-11(a) 所示。

在主磁極的極面上特設的槽內安裝繞組，並將補償繞組 ($T_1 - T_2$) 與電樞繞組 ($A_1 - A_2$) 串聯，**但電流方向相反**。如圖 5-11(b) 所示，由於兩個繞組串聯通過的電流 (I_a) 相同，因此無論負載大小，補償繞組的磁勢 (F_t) 都能抵消電樞繞組磁勢 (F_a)。

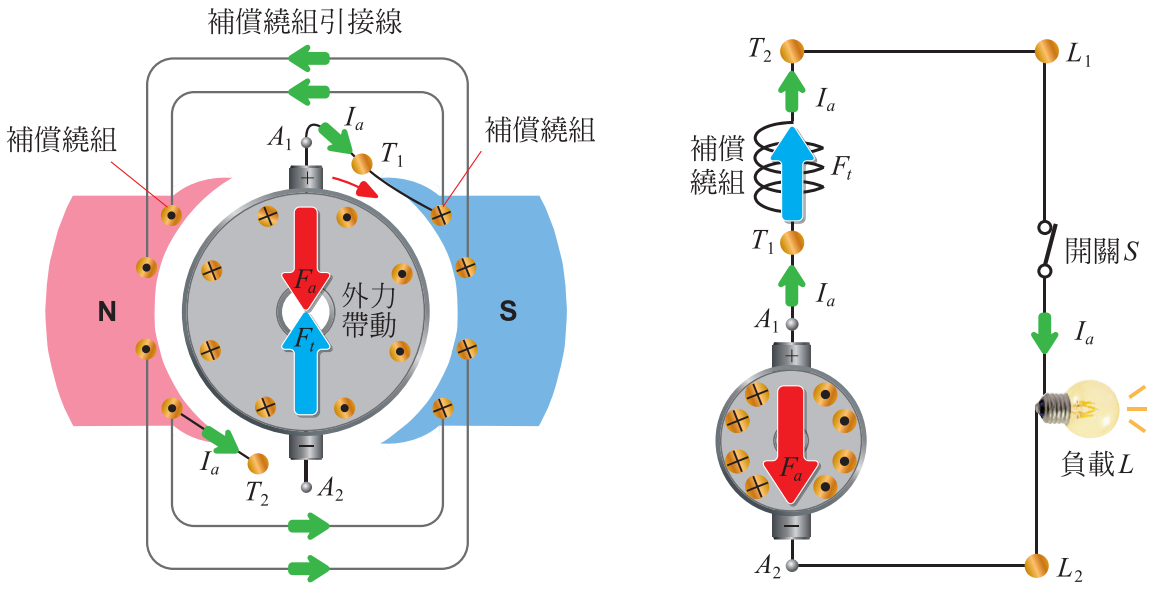
補償繞組是抵消電樞反應最有效的方法。而且加裝補償繞組的直流電機，電刷放在機械中性面即可，不需移位。缺點是電機體積增大。

爲了抵消電樞反應，每個磁極內應該裝置的補償繞組導體數：

$$Z_t = \frac{Z}{P} \times \frac{\psi}{a} \text{ (根 / 極)} \qquad (5\text{-}4)$$

Z_t ：每磁極補償繞組 (根)　　P ：磁極數 (極)

a ：電流路徑數　　ψ ：磁極面弧長與極距的比值



(a) 補償繞組裝置位置　　(b) 補償繞組與電樞繞組串聯

圖 5-11　補償繞組裝置與接線

隨堂練習

(　) 1. 有一部 10 極直流發電機，電樞繞組採用單分疊繞，電樞導體共有 860 根導體，電樞電流為 100 A，已知極面弧長為極距的 0.7 倍，欲完全抵消電樞反應，每個磁極面上應該加裝多少根補償繞組？　(A) 12　(B) 10　(C) 8　(D) 6。

2. 中間極法

中間極 (inter-pole) **又稱換向磁極** (commutating pole)，是裝設於各主磁極中間之狹長小磁極，**用線徑粗、匝數少之導線繞成後與電樞相串聯**，極數通常與主磁極數相同。

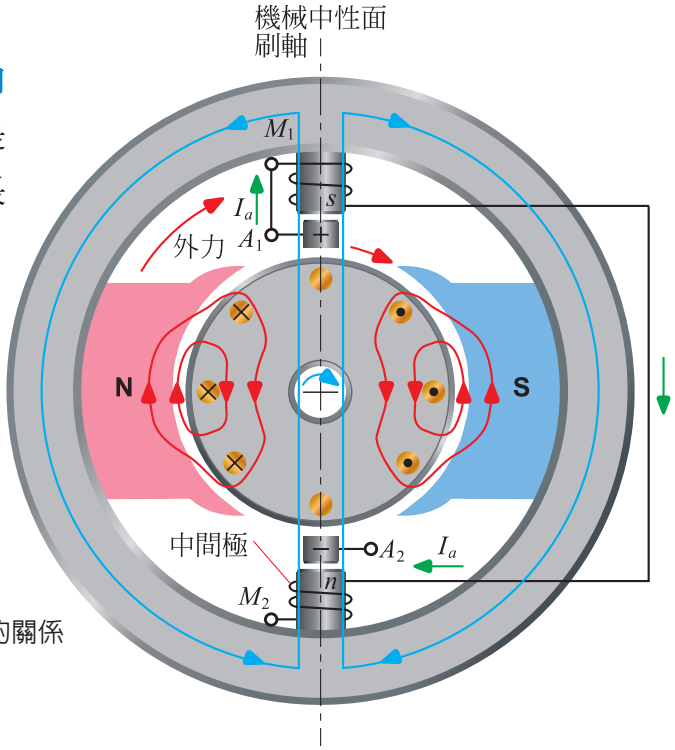


圖 5-12　中間極繞組與電樞磁場的關係

主磁極的中間加裝中間極繞組 (M_1-M_2) 並與電樞繞組 (A_1-A_2) 串聯後，由圖 5-12 可看出中間極所產生的磁通抵消了換向區的電樞反應磁通，因此電刷放在機械中性面即可，不需移位。但是缺點是中間極對於主磁極附近的電樞反應無法完全消除。

爲了使中間極發揮功能，**直流發電機主磁極 (N、S) 與中間極 (n、s) 的順序依據旋轉方向爲 $\overrightarrow{\text{NsSn}}$**，換言之，中間極與順轉向所遇到的主磁極之極性相同。

隨堂練習

(　) 1. 有關直流機補償繞組的敘述何者錯誤？

(A) 可抵消電樞反應　(B) 補償繞組必須與電樞繞組並聯

(C) 補償繞組裝設在主磁極極面上　(D) 補償繞組的電流與對應電樞繞組電流方向相反。

(　) 2. 直流發電機使用中間極的主要目的是

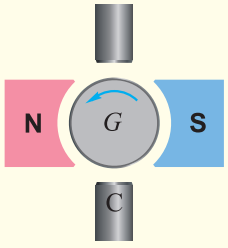
(A) 增強主磁場　(B) 抵消電樞反應

(C) 改善換向　(D) 減少噪音。

(　) 3. 如右圖所示為一部直流發電機，電樞朝逆時針方向旋轉，則換向磁極 C 的極性為

(A) S 極　(B) N 極

(C) P 極　(D) K 極。



5-4 換向 (commutation)

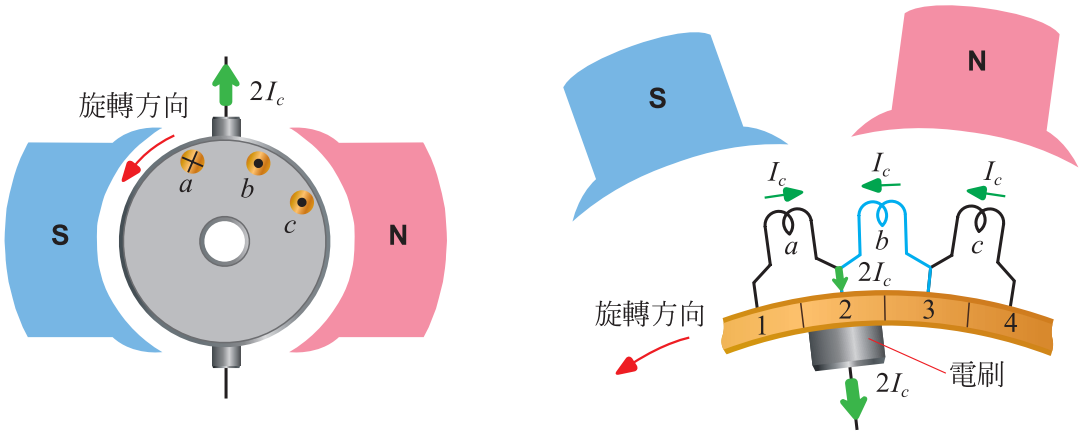
直流發電機透過換向器將電樞產生的交流電轉變成直流電，基本原理已經在第三章介紹過，本節將進一步說明換向過程中電流變化情形，並針對干擾換向的因素說明改善對策。

(一) 換向過程

圖 5-13 爲直流發電機之一角，用來說明線圈 *b* 在接觸電刷前後期間，電流方向改變的過程，其中：

1. 準備換向

由圖 5-13(a) 可以看出，當電樞繞組以外力朝向逆時針方向旋轉時，依據弗萊明右手定則，線圈 a 由於瞬間運動方向朝下，因此應電勢所生的電流方向爲流入紙面；線圈 b 與線圈 c 由於瞬間運動方向朝上，因此應電勢所生的電流方向爲流出紙面。



(a) 電樞瞬間應電勢　　(b) 電樞電流方向(線圈b電流向左)

圖 5-13　線圈 b 準備換向

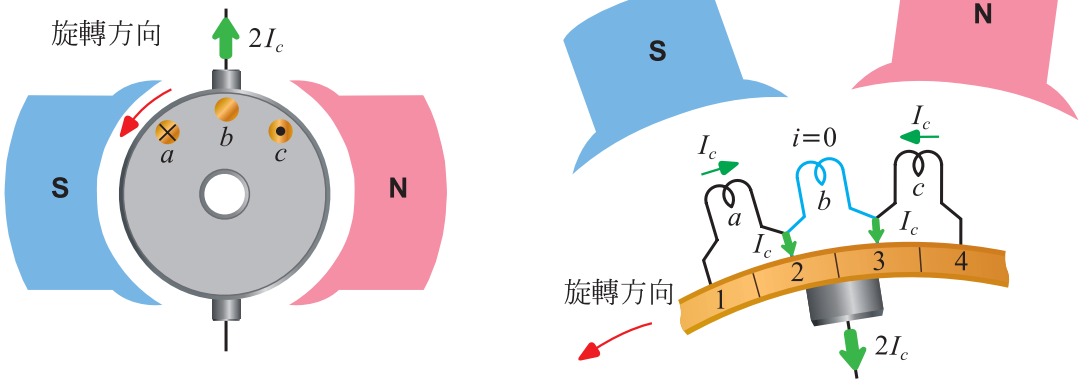
將圖 5-13(a) 改畫成圖 5-13(b)，線圈 a 的電流方向爲流入紙面 (假設向右流動，大小爲 I_c)；而線圈 b 與線圈 c 的電流方向爲流出紙面 (電流向左流動，大小爲 I_c)。此時電刷位置與 2 號換向片完全接觸，經過電刷流出的電流是線圈 $a(\overrightarrow{I_c})$ 與線圈 $b(\overleftarrow{I_c})$ 所合成的 $2I_c$。

2. 換向進行中

當電樞繞組繼續旋轉至圖 5-14(a) 位置時，線圈 a 電流方向仍爲流入紙面；線圈 b 位於磁中性面，應電勢爲零；線圈 c 電流方向仍爲流出紙面。

將圖 5-14(a) 改畫成圖 5-14(b)，線圈 a 的電流 I_c 向右流動；線圈 c 的電流 I_c 向左流動；至於線圈 b 由於位於磁中性面，應電勢爲零。

此時電刷位置與 2 號及 3 號換向片接觸，造成線圈 b 被短路，因此線圈 b 沒有電流。經過電刷流出的電流是線圈 $a(\overrightarrow{I_c})$ 與線圈 $c(\overleftarrow{I_c})$ 所合成的 $2I_c$。

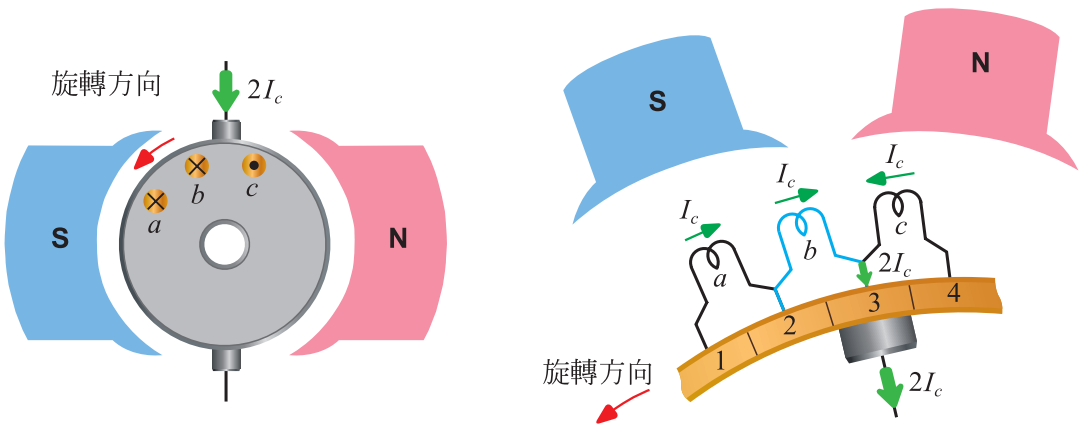


(a) 電樞瞬間應電勢　　(b) 電樞電流方向(線圈*b*電流為0)

圖 5-14　線圈 *b* 換向進行中

3. 換向完成

當電樞繞組繼續旋轉至圖 5-15(a) 位置時，線圈 *a* 與線圈 *b* 的電流流入紙面；線圈 *c* 的電流方向流出紙面，如圖 5-15(b) 所示經過電刷流出的電流，維持 $2I_c$ 不變。



(a) 電樞瞬間應電勢　　(b) 電樞電流方向(線圈*b*電流向右)

圖 5-15　線圈 *b* 換向完成

(二) 換向期間

依據上述說明，線圈 b 在由 N 極往 S 極過程中，電流由流出紙面 $(+I_c)$ 變成 0 最後換成流入紙面 $(-I_c)$，期間的電流變化情形如圖 5-16 所示，每次經過磁極中性面時電流都會改變方向，因此線圈內部爲交流電，但是透過換向片與電刷的巧妙配合，經過電刷流到外部的電流始終維持 $2I_c$ 不變。

線圈自被電刷短路到換向完成期間稱爲換向期間 T_c (the period of commutation)，圖 5-16 爲換向過程。倘若發電機以 600 rpm 旋轉，電樞有 50 個換向片，則通過一個換向片所需的換向期間 $T_c = 2$ ms，時間非常短暫。

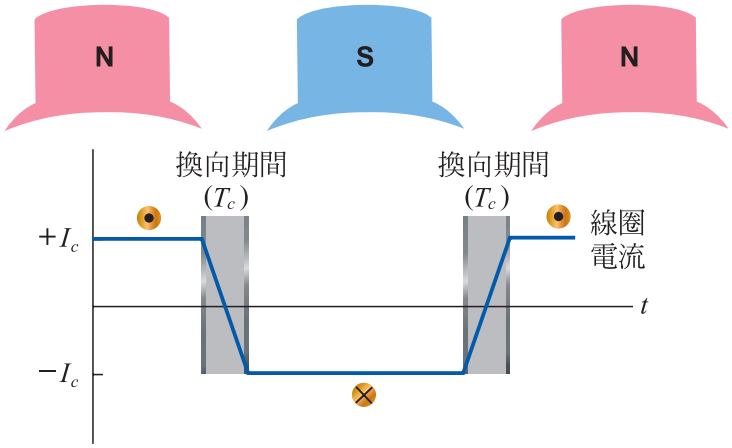


圖 5-16　換向線圈內電流的變化

線圈在很短的換向期間 (T_c) 內必須將電流由 $+I_c$ 變成 $-I_c$ 或是將 $-I_c$ 變回 $+I_c$ ($\Delta i = 2I_c$)。將過程中電流變化繪成圖表就稱爲換向曲線，常見的有下列四種情形：

1. **直線換向 (straight line commutation)**：忽略電樞反應及線圈電感量的理想情況下，利用電刷與換向片間之接觸面積變化，使得整個換向期間電流變化保持均勻的狀態，是最理想的換向曲線。期間電流變化如圖 5-17 的曲線①所示，由於**電刷之電流密度保持均勻，因此電刷不會產生火花**。

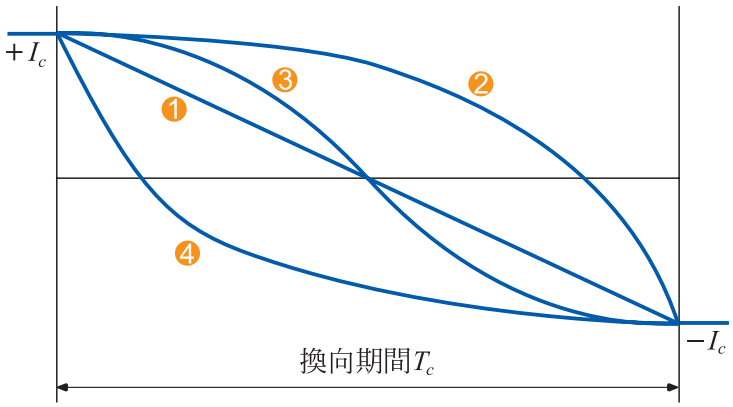


圖 5-17　四種換向曲線

2. **欠換向 (under commutation)**：線圈本身有電感量 L，因此在換向過程中會產生電抗電壓 $e = L\frac{\Delta i}{\Delta t} = L \times \frac{2I_c}{T_c}$，此電壓有反抗電流變化的趨勢，造成電流變化如曲線②所示，**換向開始時電流變化慢，直到換向末期電流急遽變化**，造成電刷的後刷邊電流密度過大，**導致後刷邊及換向片表面容易燒毀。**
對於直流發電機而言，由於電樞反應造成磁中性面順著轉向偏移，若電刷沒有順著轉向移動或是移動的角度不足，則會導致發電機尚未到達磁中性面就被電刷短路，使得電刷後端不但要流過負載電流還有短路電流，造成電流過大而產生火花。
3. **正弦換向 (sinusoidal commutation)**：直流電機可以透過移動電刷或是中間極等方式，讓線圈在換向過程中切割主磁極或是中間極的磁力線而產生感應電勢，**透過換向電勢來抵消線圈的電抗電壓，此種方式又稱爲電壓換向。**
電流變化如曲線③所示，換向開始與結束時電流變化較慢，電刷不致產生火花。
4. **過換向 (over commutation)**：倘若電刷移位過度，使得發電機之線圈已過磁中性面才被電刷短路；**或是換向電勢大於線圈本身的電抗電壓**，造成電流變化如曲線④所示，**線圈換向開始時電流變化過快，造成電刷的前刷邊電流密度過大，而燒毀前刷邊及換向片表面。**

(三) 改善換向的方法

1. **延長換向期間**：透過增加電刷寬度或是降低轉速的方式，將換向期間 T_c 變長，以降低線圈電抗電壓，改善換向。
2. **減少線圈電感量**：採用直徑大，長度短的電樞鐵心；或是減少電樞繞組的匝數來降低線圈的自感量。而電樞繞組採用短節距 (線圈跨距 <180° 電機角)，也可以降低線圈互感量，減少電抗電壓。
3. **增加電刷電阻**：提高電刷的接觸電阻，降低短路時的環流。
4. **設置補償繞組**：藉由主磁極的極面槽內所裝置的補償繞組，完全抵消電樞反應，使得磁中性面不會扭斜，可獲得良好的換向。
5. **移動電刷**：電樞反應造成直流發電機磁中性面順著轉向前移，因此將電刷順著轉向移動到新的磁中性面，使線圈感應出適當的電壓 (換向電勢) 以克服電抗電壓。
6. **裝置中間極**：中間極裝置在兩個主磁極的中間，剛好就是換向線圈的正上方，只要中間極的匝數設計妥當，由**中間極所產生的換向電勢可以抵消線圈本身的電抗電壓，而獲得良好的換向**。

隨堂練習

(　　) 1. 直流發電機欠換向時，將使得電刷

(A) 前端發生火花　(B) 後端發生火花　(C) 不發生火花　(D) 不一定。

(　　) 2. 下列何者不是直流機獲得良好換向的條件？

(A) 減少電感　(B) 減少電刷接觸電阻　(C) 降低轉速　(D) 移動電刷。

(　　) 3. 直流機使用中間極的主要目的是

(A) 增強主磁場　(B) 改善換向　(C) 抵消電樞反應　(D) 減少噪音。

自我評量

一、選擇題

5-1 (　　)1. 電樞反應結果，使直流發電機的電機中性面

(A) 順著轉向移動一個角度　(B) 逆著轉向移一個角度

(C) 維持不變　(D) 視負載種類而定。

(　　)2. 無中間極的直流發電機中，若電刷不移動，則電樞反應產生

(A) 僅有交磁效應　(B) 僅有去磁效應

(C) 交磁、去磁效應同時存在　(D) 交磁、去磁效應同時不存在。

(　　)3. 直流發電機電樞反應發生時，若將電刷移動至新的磁中性面，會導致感應電動勢

(A) 增加　(B) 減少　(C) 不變　(D) 視情況而定。

5-2 (　　)4. 一部 4 極 16 kW、電樞電流爲 80 A、電樞總導體數 400 根，採雙分後退波繞之直流發電機，接上負載後所產生的電樞反應使磁中性面向前移 18° 機械角，則電樞反應之總去磁安匝數約爲何？

(A) 600 安匝　(B) 1600 安匝　(C) 2400 安匝　(D) 4000 安匝

(　　)5. 同上題，電樞反應之總交磁安匝數約爲何？

(A) 600 安匝　(B) 1600 安匝　(C) 2400 安匝　(D) 4000 安匝

(　　)6. 4 極直流發電機，電刷前移 15° 電機角，則總去磁安匝爲總交磁安匝的

(A) 1/6　(B) 1/5　(C) 1/4　(D)1/3。

5-3 (　　)7. 下列何者不是減少電樞反應的方法？

(A) 裝設換向磁極　(B) 裝設補償繞組

(C) 增加主磁極數目　(D) 減少電樞磁路磁阻。

(　　)8. 有關補償繞組與極面下電樞繞組兩者電流及導體數量的比較，下列何者正確？

(A) 兩者電流和導體數必須相等

(B) 導體數一定要相等，電流可不相等

(C) 電流一定要相等，但導體數可不相等

(D) 雙方安匝數相等即可。

( )9. 欲消除電樞反應最有效的方法爲下列哪一項？
(A) 中間極 (B) 均壓線 (C) 補償繞組 (D) 移動電刷位置。

( )10. 直流電動機設置中間極之目的爲
(A) 增強主磁場 (B) 增強電樞磁場
(C) 改善換向 (D) 幫助散熱。

( )11. 一直流發電機 N、S 表示主磁極，磁性 n、s 表示換向磁極之磁性，則循電機之旋轉方向各極極性依序爲
(A) NnSs (B) nNSs (C) nSsN (D) NsSn。

( )12. 在直流發電機中，中間極之極性必須依轉向和
(A) 順轉向的下一個主磁極相同 (B) 順轉向的前一個主磁極相同
(C) 固定爲 n 極 (D) 固定爲 s 極。

5-4

( )13. 具有中間極之直流發電機，其電刷位置
(A) 換向良好，故不必移位
(B) 必須順轉向移位，以改善換向
(C) 必須逆轉向移位，以改善換向
(D) 視負載種類決定順轉向或逆轉向移動。

( )14. 直流發電機負載電流一定時，若轉速增加則換向
(A) 越困難 (B) 越容易 (C) 不一定 (D) 與轉速無關。

( )15. 換向時，線圈之電抗電壓大於換向電勢，則換向爲
(A) 欠換向 (B) 過換向 (C) 直線換向 (D) 正弦換向。

( )16. 直流發電機若電刷移位不足，將會產生
(A) 欠換向 (B) 過換向 (C) 直線換向 (D) 正弦換向。

( )17. 使換向線圈預先切割另一磁極所生磁力線而感應另一電勢來抵消電抗電壓，使換向良好之方法爲
(A) 電阻換向 (B) 電壓換向 (C) 直線換向 (D) 欠換向。

自我評量

二、問答題

1. 畫圖說明直流發電機的換向曲線？

2. 如圖 (1) 所示爲一部直流發電機，已知主磁極及中間極極性，試回答下列問題。

   (1) 電樞旋轉方向爲何？

   (2) 電樞導體 B 與 C 之電流方向分別爲何？

   (3) 裝置於主磁極面槽內的 A、D 導體名稱爲何？

   (4) 導體 A、D 的電流方向分別爲？

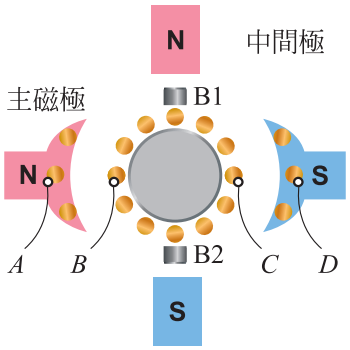


圖 (1)

3. 某 4 極直流電機，電樞導體總數爲 720 根，繞製成單分疊繞組，電樞電流爲 500 A，若電刷前移 15 個機械角度，則此直流機之：

   (1) 總電樞安匝、(2) 總去磁安匝、(3) 每極交磁安匝分別爲何？

4. 有一部 4 極 36 槽單分疊繞直流發電機，換向器上有 36 片換向片，已知電樞電流爲 50 A，當此機由外力以 1800 rpm 帶動時，求：

   (1) 換向期間、(2) 換向期間電流變動率爲何？

心得筆記

CHAPTER 6

直流發電機之分類、特性及運用

本章重點

為了因應不同的用電需求，直流發電機的電樞繞組與磁場繞組會有不同的設計與組合方式。本章將依序介紹各種直流發電機的特性與用途，最後說明如何將多部發電機並聯以共同供應電能。

6-1 直流發電機之分類

直流發電機主要繞組的位置如圖 6-1，其中各繞組的特性為：

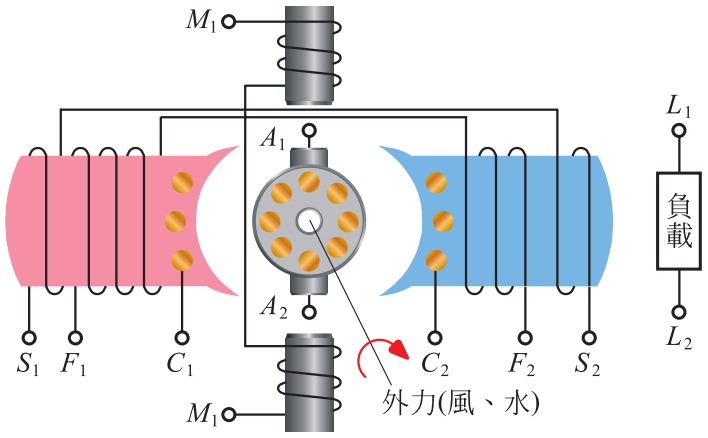


圖 6-1　直流電機各繞組位置示意圖

1. 電樞繞組 ($A_1 - A_2$)：轉子**內部的電樞繞組以疊繞或波繞等方式連接**，當外力帶動時，繞組感應產生交流電透過換向片轉成直流電，再經由電刷引接到外部。
2. 分激磁場繞組 ($F_1 - F_2$)：在定子磁極鐵心上以**線徑細的導線繞製多匝而成**，由於電阻值較大，適合與電樞繞組並聯，通過少量電流以產生穩定磁通。

3. 串激磁場繞組 (S_1-S_2)：在定子的磁極鐵心上**以線徑粗的導線繞製少匝而成**，由於電阻值小，適合與電樞繞組串聯，通過的電流越大產生的磁通就越強。
4. 補償繞組 (C_1-C_2)：安裝於定子磁極鐵心的極面槽內，以線徑粗的導線繞製少匝而成，與電樞繞組串聯但電流方向相反，**目的爲抵消電樞反應**。
5. 中間極繞組 (M_1-M_2)：在主磁極中間所裝設的小磁極，以線徑粗的導線繞製少匝而成，與電樞繞組串聯，**目的爲改善換向**。
6. 負載 (L_1-L_2)：使用直流電能的用電設備。

依據上述，直流發電機分成圖 6-2 所示的幾種類型：

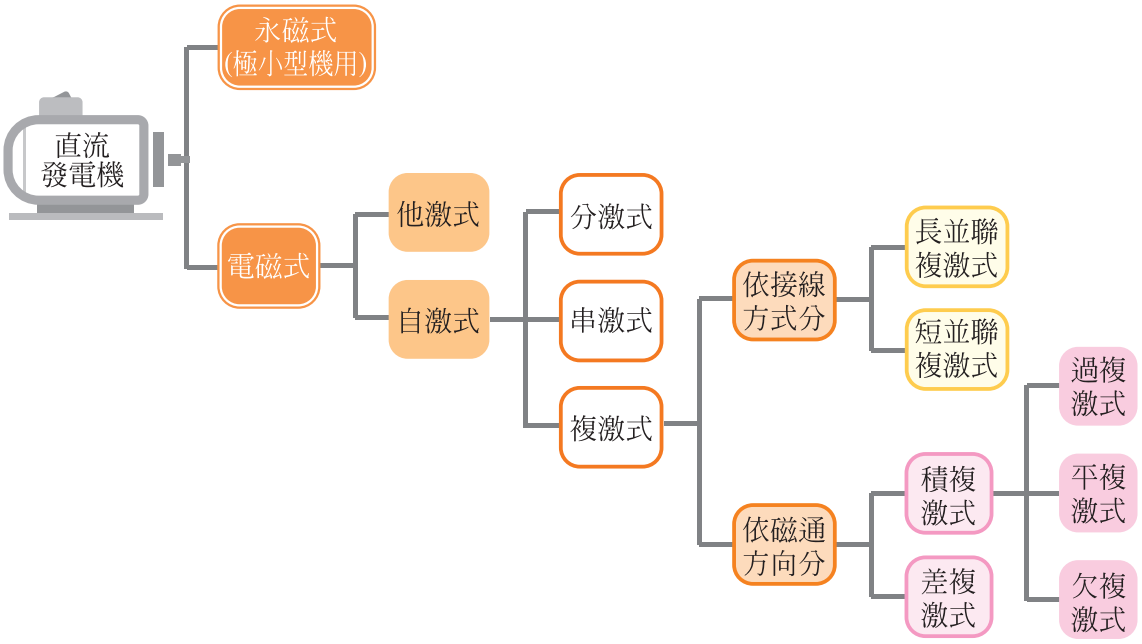


圖 6-2　直流發電機的分類

隨堂練習

(　　) 1. 直流電機中之分激磁場繞組，其

(A) 線徑粗，匝數少　(B) 線徑細，匝數多

(C) 線徑粗，匝數多　(D) 線徑細，匝數少。

(　　) 2. 直流電機中沒有與電樞繞組串聯的繞組為

(A) 串激磁場繞組　(B) 中間極繞組

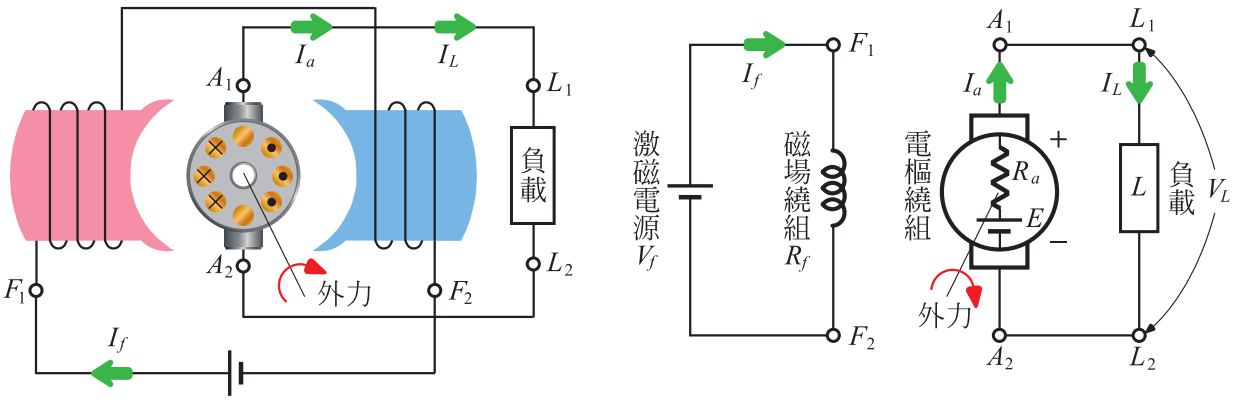
(C) 補償繞組　(D) 分激磁場繞組。

6-2 直流發電機之構造與電路計算

直流發電機依據電樞繞組與磁場繞組的組合方式，分爲下列機種：

(一) 外激式直流發電機 (separately excited DC generator)

外激式發電機又稱爲他激式發電機，如圖 6-3(a) 所示，磁場繞組所需要的電流由獨立的電源 (電池、激磁機) 供給。爲了方便表示與計算，可簡化成如圖 6-3(b) 所示的等效電路圖。



(a) 構造圖　　(b) 等效電路圖

圖 6-3　外激式直流發電機

由圖 6-3(b) 等效電路圖可得，若磁場繞組電阻值爲 R_f ，當外加激磁電壓 V_f ，依據歐姆定律可得磁場電流 I_f 爲：

$$I_f = \frac{V_f}{R_f} \qquad (6\text{-}1)$$

外激式發電機的電樞繞組直接與負載連接，因此電樞電流 I_a 等於負載電流 I_L ，電樞繞組產生感應電勢 $E = Kn\phi$ 後，由於繞組本身由銅線繞成，假設電樞繞組電阻值爲 R_a ，依據克希荷夫電壓定律可得負載端電壓 V_L 爲：

$$V_L = E - I_a R_a \qquad (6\text{-}2a)$$

實際發電機運轉時，負載端電壓 V_L 較易用儀表測量，因此應電勢 E 爲：

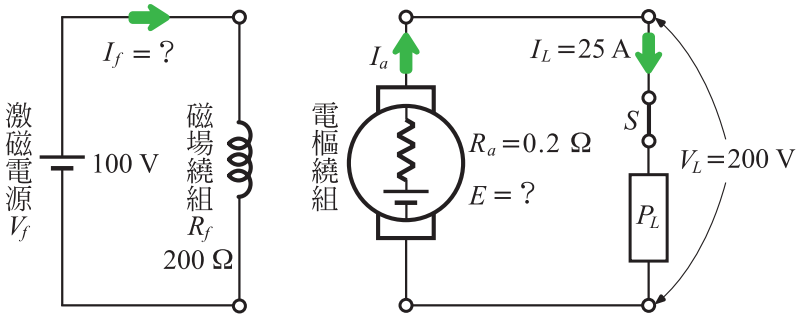
$$E = V_L + I_a R_a \qquad (6\text{-}2b)$$

範例 01

有一台他激式直流發電機，已知磁場繞組 200 Ω，激磁電壓 100 V，電樞電阻 0.2 Ω，當負載兩端電壓為 200 V，負載電流為 25 A 時，求：

(1) 激磁電流、(2) 電樞感應電勢為何？

解 依照題意畫出他激式直流發電機等效電路圖，並將已知數值填入：



(1) 激磁電流 $I_f = \dfrac{V_f}{R_f} = \dfrac{100\text{ V}}{200\ \Omega} = 0.5\text{ A}$

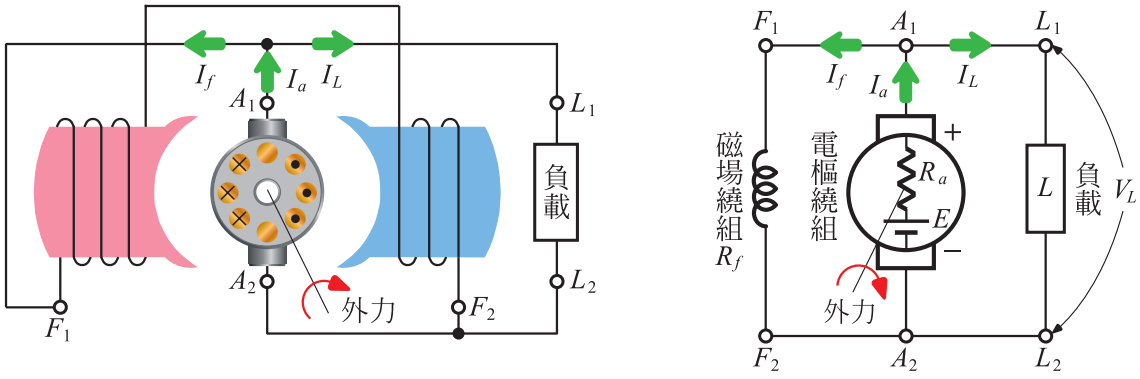
(2) 電樞感應電勢 $E = V_L + I_a R_a = 200 + (25 \times 0.2) = 205$ V ($I_a = I_L = 25$ A)

隨堂練習

(　) 1. 範例 01 中，倘若激磁電流與負載不變下，原動機的轉速變為 1.2 倍，則負載端電壓為多少伏特？ (A) 220 V (B) 241 V (C) 246 V (D) 260 V。

(二) 分激式直流發電機 (shunt excited DC generator)

分激式發電機又稱爲並激式發電機，其構造如圖 6-4(a) 所示，分激磁場繞組 (F_1-F_2) 與電樞繞組 (A_1-A_2) 及負載 (L_1-L_2) 並聯，因此電樞電流 (I_a) 會有部分進入磁場繞組產生磁通者稱爲磁場電流 (I_f)，提供負載使用者則稱爲負載電流 (I_L)。



(a) 構造圖　　(b) 等效電路圖

圖 6-4　分激式直流發電機

由圖 6-4(b) 等效電路可以看出，倘若分激磁場繞組電阻爲 R_f，負載端電壓爲 V_L，負載電流爲 I_L，依據歐姆定律可得，分激磁場電流：

$$I_f = \frac{V_L}{R_f} \tag{6-3}$$

依據克希荷夫電流定律，電樞電流 I_a 爲負載電流 I_L 與分激磁場電流 I_f 之和：

$$I_a = I_L + I_f \tag{6-4}$$

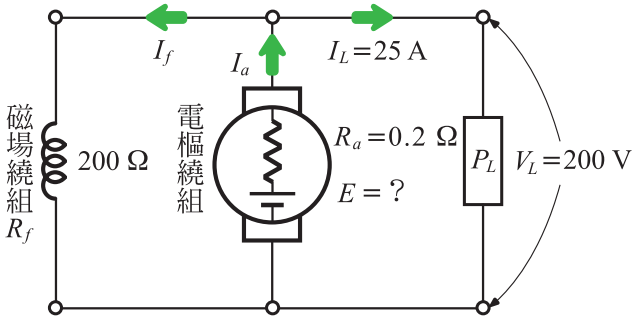
依據克希荷夫電壓定律，應電勢 E 爲負載端電壓 V_L 加上電樞繞組壓降 I_aR_a，即：

$$E = V_L + I_aR_a \tag{6-5}$$

範例 02

有一台分激式直流發電機，已知磁場繞組電阻為 200 Ω，電樞繞組電阻為 0.2 Ω，已知在某轉速時，測得負載兩端電壓為 200 V，負載電流為 25 A。試求：(1) 分激磁場電流、(2) 電樞電流、(3) 電樞感應電勢為何？

解 依照題意畫出分激式直流發電機等效電路圖，並將已知數值填入：



(1) 分激磁場電流 $I_f = \dfrac{V_L}{R_f} = \dfrac{200\text{ V}}{200\ \Omega} = 1\text{ A}$

(2) 電樞電流 $I_a = I_L + I_f = 25 + 1 = 26$ A

(3) 電樞感應電勢 $E = V_L + I_a R_a = 200 + (26 \times 0.2) = 205.2$ V

隨堂練習

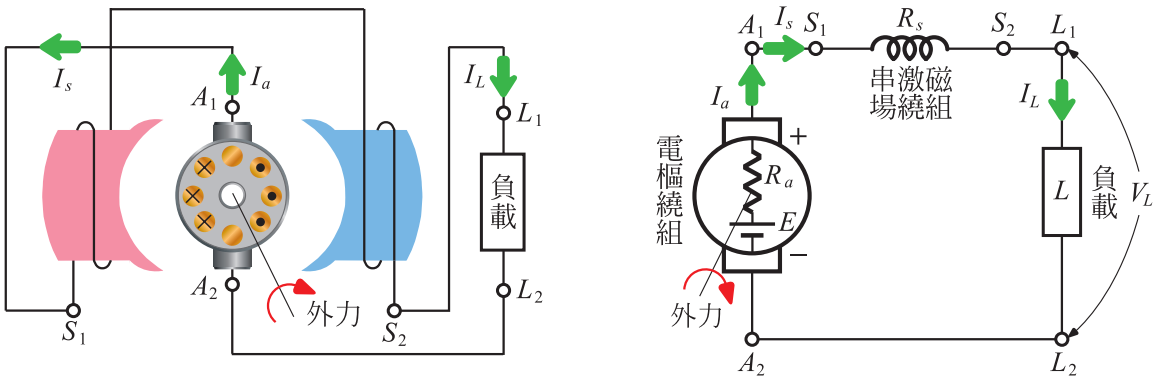
(　) 1. 一部 12.5 kW，250 V 分激直流發電機，其磁場電阻為 50 Ω，電樞電阻為 0.1 Ω，則其電樞電流及電樞應電勢分別為

(A) 45 A，255 V (B) 50 A，255.5 V (C) 55 A，244.5 V (D) 55 A，255.5 V。

(三) 串激式直流發電機 (series excited DC generator)

串激發電機的構造如圖 6-5(a) 所示。由於串激磁場繞組 ($S_1 - S_2$) 與電樞繞組 ($A_1 - A_2$) 及負載 ($L_1 - L_2$) 相互串聯，因此由電樞流出的電流 (I_a) 全部經過串激磁場繞組後再流往負載。

因此，電樞電流 I_a 等於串激磁場電流 I_s 也等於負載電流 I_L，即 $I_a = I_s = I_L$。



(a) 構造圖　　(b) 等效電路圖

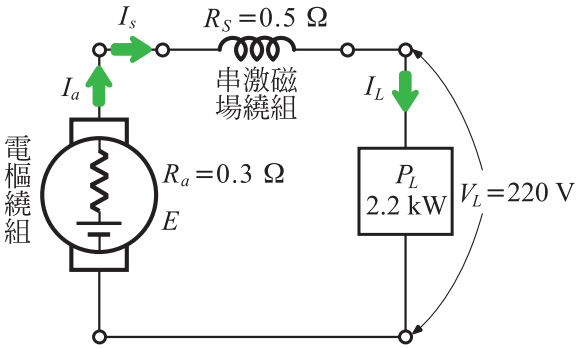
圖 6-5　串激式直流發電機

由圖 6-5(b) 中，依據克希荷夫電壓定律可得電樞應電勢 E 等於端電壓 V_L 加上電樞電流 I_a 通過串激磁場繞組電阻 R_s 及電樞繞組電阻 R_a 壓降，即應電勢 E 爲：

$$E = V_L + I_a(R_a + R_s) \qquad (6\text{-}6)$$

範例 03

有一部直流串激式發電機提供 220 V、2.2 kW 之負載，其電樞電阻為 0.3 Ω，串激場繞組電阻為 0.5 Ω，求此發電機之：(1) 負載電流、(2) 電樞電流、(3) 感應電勢？



解　依照題意畫出串激式直流發電機等效電路圖，並將已知數值填入：

(1) $P_L = V_L \times I_L \Rightarrow$ 負載電流 $I_L = \dfrac{P_L}{V_L} = \dfrac{2.2\text{ kW}}{220\text{ V}} = 10\text{ A}$

(2) 電樞電流 $I_a = I_L = 10\text{ A}$

(3) 感應電勢 $E = V_L + I_a(R_a + R_s) = 220 + 10 \times (0.3 + 0.5) = 228\text{ V}$

隨堂練習

( ) 1. 直流串激發電機供給 200 V、4 kW 負載，串激場電阻為 0.2 Ω，電樞電阻為 0.4 Ω，則此發電機的感應電勢為多少？ (A) 212 V (B) 204 V (C) 192 V (D) 188 V。

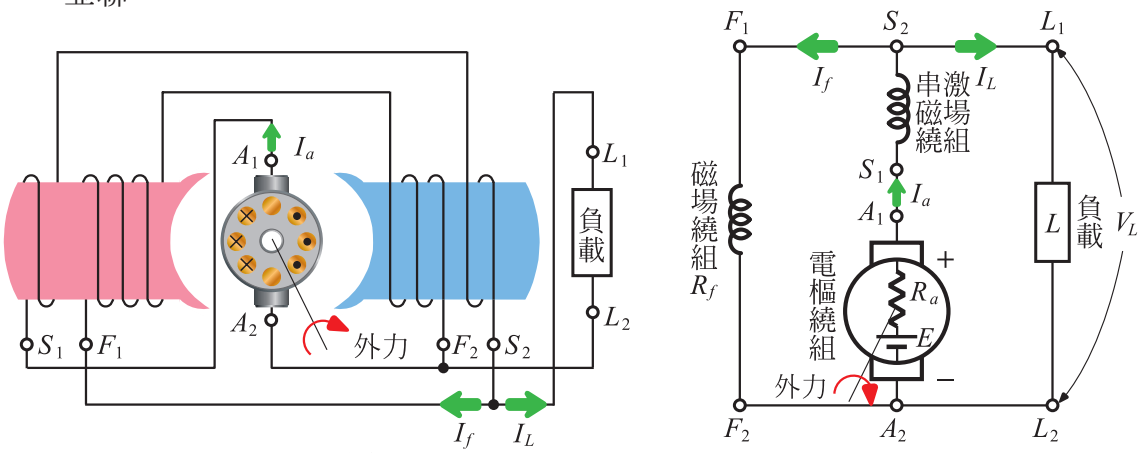
( ) 2. 有一串激發電機，供給每只為 500 W，電流為 10 A，串接弧燈共 20 只，若其電樞電阻為 5 Ω，場電阻為 3 Ω，線路電阻為 2 Ω，則此串激發電機的電樞應電勢為 (A) 900 V (B) 1000 V (C) 1050 V (D) 1100 V。

(四) 複激式直流發電機 (compound excited DC generator)

複激式直流發電機在磁極上分別繞有分激磁場繞組 (線細、多匝、電阻高) 與串激磁場繞組 (線粗、少匝、電阻低)。依據接線方式可分爲長並聯複激式 (long-shunt) 以及短並聯複激式 (short-shunt) 兩種型式：

1. 長並聯複激式直流發電機

長並聯複激式的接線方式如圖 6-6(a)，電樞繞組 (A_1-A_2) 先與串激磁場繞組 (S_1-S_2) 串聯後，再與分激磁場繞組 (F_1-F_2) 並聯，最後再與負載 (L_1-L_2) 並聯。



(a) 構造圖　　(b) 等效電路圖

圖 6-6　長並聯複激式直流發電機

由圖 6-6(b) 等效電路可知，將端電壓 V_L 除以分激磁場繞組電阻 R_f，可得分激磁場電流 I_f 爲：

$$I_f = \frac{V_L}{R_f} \qquad (6\text{-}7)$$

負載電流 I_L 加上分激磁場電流 I_f 可得電樞電流 I_a ：

$$I_a = I_L + I_f \tag{6-8}$$

將端電壓加上電樞電流 I_a 在串激磁場繞組電阻 R_s 與電樞繞組電阻 R_a 的壓降，可得應電勢 E 爲：

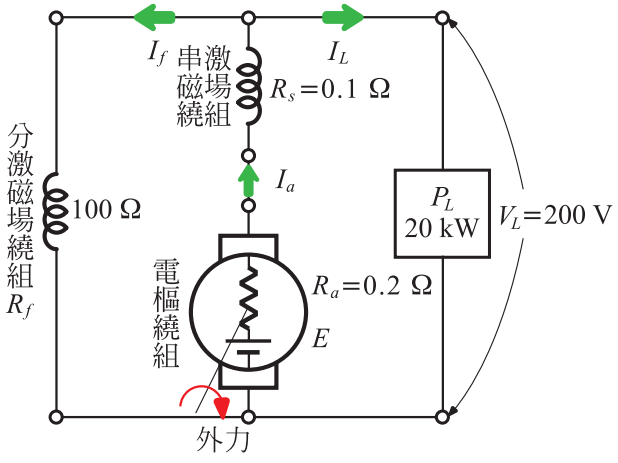
$$E = V_L + I_a(R_a + R_s) \tag{6-9}$$

範例 04

有一部 20 kW、200 V 直流長並聯複激式發電機，已知電樞電阻為 0.2 Ω，串激場電阻為 0.1 Ω，分激場電阻為 100 Ω，求此發電機滿載時：

(1) 負載電流、(2) 分激磁場電流、(3) 電樞電流、(4) 感應電勢。

解 依照題意畫出長並聯複激式發電機等效電路圖，並將已知數值填入：



(1) 負載電流

$$I_L = \frac{P_L}{V_L} = \frac{20\,\text{kW}}{200\,\text{V}} = 100\,\text{A}$$

(2) 分激磁場電流

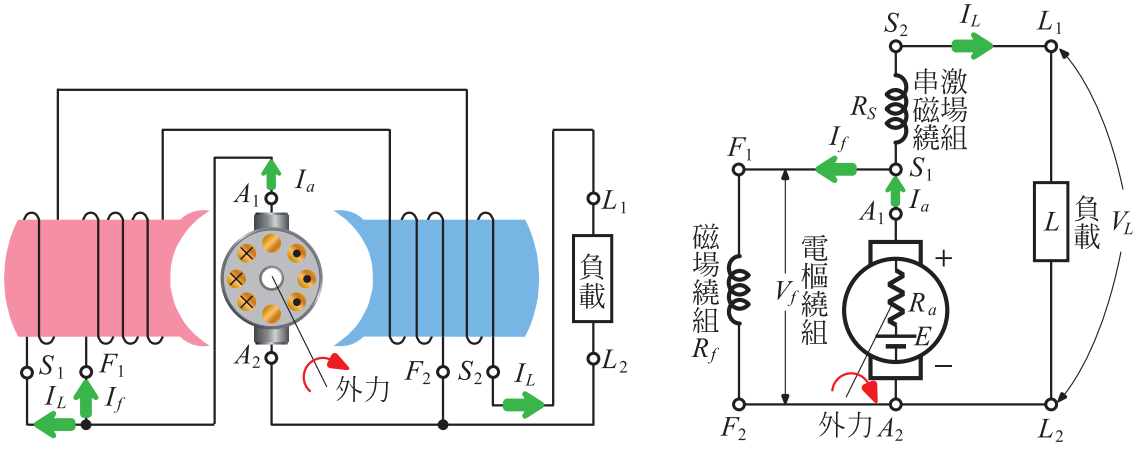
$$I_f = \frac{V_L}{R_f} = \frac{200\,\text{V}}{100\,\Omega} = 2\,\text{A}$$

(3) 電樞電流 $I_a = I_L + I_f = 100 + 2 = 102$ A

(4) 電樞感應電勢 $E = V_L + I_a(R_a + R_s) = 200 + 102 \times (0.1 + 0.2) = 230.6$ V

2. 短並聯複激式直流發電機

短並聯複激式的接線方式如圖 6-7(a)，電樞繞組 (A_1-A_2) 先與分激磁場繞組 (F_1-F_2) 並聯後，再與串激磁場繞組 (S_1-S_2) 串聯，最後再與負載 (L_1-L_2) 並聯。



(a) 構造圖　　(b) 等效電路圖

圖 6-7　短並聯複激式直流發電機

由圖 6-7(b) 等效電路可以看出短並聯複激式發電機的重要公式爲：

$$V_f = V_L + I_L R_s \tag{6-10}$$

$$I_f = \frac{V_f}{R_f} \tag{6-11}$$

$$I_a = I_L + I_f \tag{6-12}$$

$$E = V_f + I_a R_a \tag{6-13}$$

V_f：分激場繞組電壓 (伏特；V)　　V_L：負載端電壓 (伏特；V)

E ：應電勢 (伏特；V)　　I_f ：分激場電流 (安培；A)

I_a ：電樞電流 (安培；A)　　I_L ：負載電流 (安培；A)

R_a：電樞電阻 (歐姆；Ω)　　R_f：分激場電阻 (歐姆；Ω)

R_s：串激場電阻 (歐姆；Ω)

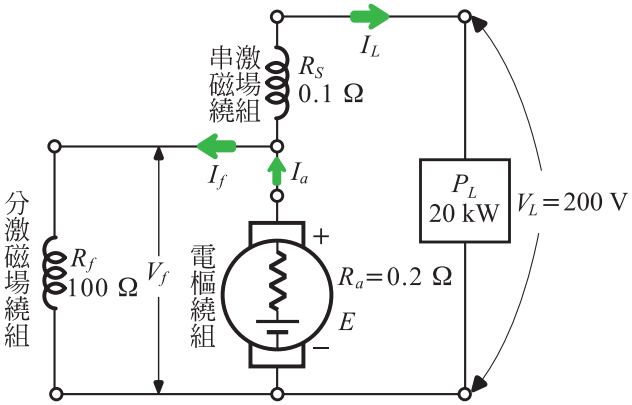
範例 05

有一部 20 kW、200 V 直流短並聯複激式發電機，已知電樞電阻 0.2 Ω，串激場電阻 0.1 Ω，分激場電阻 100 Ω，求滿載時：

(1) 負載電流、(2) 分激磁場電流、

(3) 電樞電流、(4) 感應電勢。

解 依照題意畫出短並聯複激式發電機等效電路圖，並將已知數值填入：



(1) 負載電流

$$I_L = \frac{P_L}{V_L} = \frac{20\,\text{kW}}{200\,\text{V}} = 100\,\text{A}$$

(2) 分激磁場繞組電壓

$$V_f = V_L + I_L R_s = 200 + (100 \times 0.1) = 210\,\text{V}$$

分激磁場電流 $I_f = \dfrac{V_f}{R_f} = \dfrac{210\,\text{V}}{100\,\Omega} = 2.1\,\text{A}$

(3) 電樞電流 $I_a = I_L + I_f = 100 + 2.1 = 102.1\,\text{A}$

(4) 電樞感應電勢 $E = V_f + I_a R_a = 210 + (102.1 \times 0.2) = 230.42\,\text{V}$

將範例 04 與範例 05 的數據比較後可以發現，複激式發電機採用長並聯或是短並聯接線，各項數值差距幅度很小，實際使用時，兩者特性也很接近。

隨堂練習

(　　) 1. 一部 20 kW、400 V 直流長並聯複激發電機，其電樞電阻為 0.06 Ω，串激磁場繞組為 0.04 Ω，分激磁場繞組為 200 Ω，求發電機之感應電勢為多少？

(A) 400 V　(B) 405 V　(C) 405.12 V　(D) 405.2 V。

(　　) 2. 同上題，若該機為短並聯複激發電機，求發電機之感應電勢為多少？

(A) 400 V　(B) 405 V　(C) 405.12 V　(D) 405.2 V。

6-3 直流發電機的特性及用途

(一) 特性與特性曲線

由於設計與材料不同，每種機械獨特的性質稱爲特性 (characteristic)。將機器以科學化的方式進行實驗後，將其**特性記錄下來再以圖表方式呈現就稱爲特性曲線** (characteristic curve)。使用者可以依據特性曲線選擇適合的機種，而設計與製造者也可依據特性曲線進行修改與調整，使機器性能更加優良。

直流發電機常用的特性曲線爲：

1. 無載特性曲線 (no load characteristic curve)：測量激磁電流 I_f 與應電勢 E 的關係，又稱爲磁化特性曲線或是飽和特性曲線。
2. 負載特性曲線 (load characteristic curve)：測量負載電流 I_L 與負載端電壓 V_L 的關係，又稱爲外部特性曲線。

(二) 外激式發電機特性與運用

外激式發電機的磁場繞組是由獨立電源供應，因此激磁電流 I_f 不會受到電樞應電勢 E 及負載的干擾，方便進行各項特性實驗，其中：

1. 外激式發電機無載特性

依據圖 6-8(a) 所示完成接線後，將開關 S 均打開形成開路 ($I_L = I_a = 0$ A)，忽略電樞繞組壓降，電壓表Ⓥ所量測數值幾乎等於應電勢 E，之後開始進行實驗：

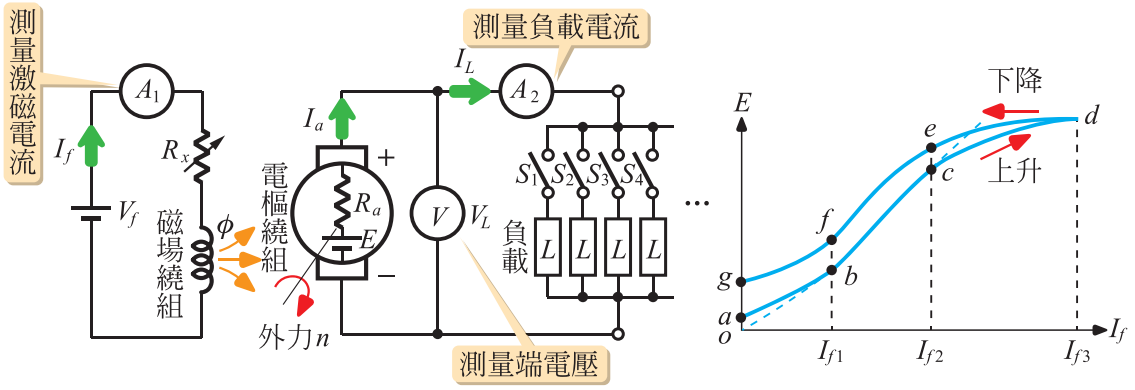
(1) 將電樞透過外力 (原動機) 以額定轉速 n 持續旋轉。當激磁電流 $I_f = 0$ 時，磁通量 $\phi = 0$，應電勢 $E = Kn\phi = 0$ V 【o 點】，但實際上磁極內有微量剩磁 ϕ_r，因此會有剩磁電壓【a 點】。

(2) 加入激磁電壓 V_f 後，先將磁場可變電阻值 R_x 分段降低，此時電流表Ⓐ$_1$所量測到的激磁電流 I_f 逐漸上升，磁通量 ϕ 增加，電壓表Ⓥ所量測到的應電勢 $E = Kn\phi$ 成正比增加。直到 c 點後由於鐵心飽和使得磁通量不再增加，應電勢的變化較爲遲緩呈現曲線後變成水平線。

(3) 增加磁場可變電阻 R_x，使得激磁電流 I_f 下降，磁通量 ϕ 降低，應電勢也逐漸下降，受到鐵心磁滯現象，下降的路徑會比先前上升時的路徑較高。

(4) 激磁電流再降爲 0，此時電樞產生低值剩磁電壓【g 點】，剩磁現象會隨著時間而逐漸減弱【g 往 o 點】，剩磁現象對於後續介紹自激式發電機電壓建立時會扮演關鍵角色。

圖 6-8(b) 所示的無載特性曲線與圖 2-10 的磁滯迴線非常類似，**因此無載特性曲線又會稱爲磁化特性曲線或是飽和特性曲線。**



(a) 接線圖　　(b) 無載特性曲線圖

圖 6-8　外激式發電機無載特性實驗

外激式發電機激磁電流 I_{f1} 相同下，若是外力 (原動機) 的轉速 n 增加，則發電機的應電勢 $E = Kn\phi$ 也成正比增加。兩者關係如圖 6-9 所示。

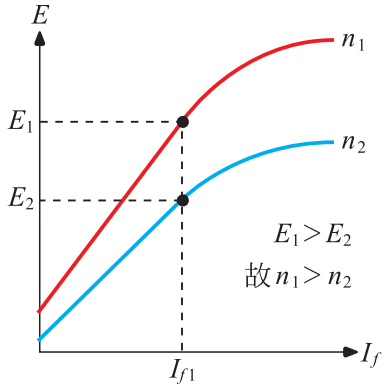


圖 6-9　不同轉速下的無載特性曲線

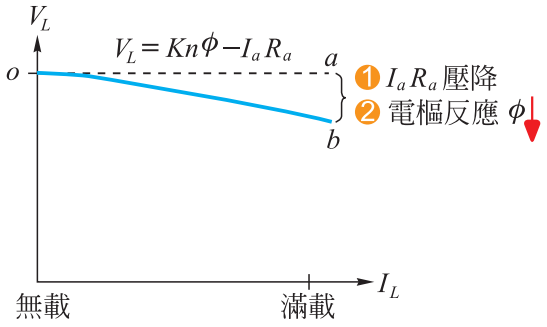


圖 6-10　外激式發電機負載 (外部) 特性曲線

2. 外激式發電機負載特性

負載特性實驗又稱爲外部特性實驗，接線方式如圖 6-8，先調整轉速 n 與激磁電流 I_f 使得發電機端電壓等於額定值，之後將負載側的開關 ($S_1 \sim S_4$) 依序閉

合，過程中隨時將負載電流 I_L 與端電壓 V_L 紀錄下來，直到負載電流達到額定值為止。再依據結果繪出後，可得圖 6-10 所示的負載 (外部) 特性曲線。理想情況下，負載增加時，發電機的端電壓應該維持不變，如圖 6-10 的 $\overline{oa}$ 線段呈現直線，但是受到下列因素：

(1) 負載增大，電流增加，造成電樞繞組壓降 I_aR_a 變大。

(2) 電樞反應的去磁效應使主磁通 ϕ 減少，造成感應電勢 $E=Kn\phi$ 降低。

因此負載端電壓 V_L 會隨著負載電流 I_L 增加而逐漸降低，所形成的外部特性曲線如圖 6-10 的 $\overline{ob}$ 線段為下降曲線。

一般常用電壓調整率 (voltage regulation，*V.R.*) 來評估電壓變動幅度，其值越小代表電壓越穩定，理想電壓調整率為 0，其公式為：

$$V.R.\ \% = \frac{V_{NL} - V_{FL}}{V_{FL}} \times 100\ \% \qquad (6\text{-}14)$$

V_{NL}：無載 (no load) 端電壓　　V_{FL}：滿載 (full load) 端電壓

3. 外激發電機的運用

外激式發電機的激磁電流由外部電源獨立供應，不會受到負載影響，因此優點包括：(1) 電壓調整範圍寬廣、(2) 沒有剩磁也可以建立電壓、(3) 改變激磁電流方向或旋轉方向可建立反向電壓、(4) 電壓調整率小，具備定電壓特性。**外激式發電機的缺點是必須專門準備直流電源做為激磁使用**，設備成本高。一般用於交流發電機的激磁機、華德黎翁納德系統的電源、高壓小電流或特別低壓大電流等特殊場所。

範例 06

有一發電機，激磁電流 1.5 A，轉速 900 rpm 時應電勢為 120 V。若激磁電流保持不變而將轉速升高至 1200 rpm，則應電勢為何？

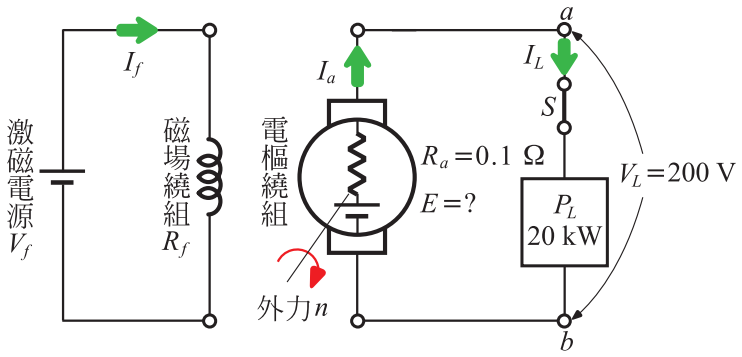
解 發電機應電勢 $E=Kn\phi$，激磁電流保持不變表示磁通 ϕ 不變，因此應電勢

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow E_2 = 120\ \text{V} \times \frac{1200\ \text{rpm}}{900\ \text{rpm}} = 160\ \text{V}$$

範例 07

一台 20 kW、200 V 之直流外激式發電機，已知電樞繞組電阻為 0.1 Ω，不考慮電樞反應與電刷壓降，求本機：(1) 應電勢、(2) 電壓調整率為何？

解 (1) 依題意畫出外激式發電機等效電路圖，並將已知數值填入圖中：



(2) 已知本機額定電壓 (滿載時端電壓) $V_L = 200$ V

滿載電流 $I_L = \dfrac{P_L}{V_L} = \dfrac{20\text{ kW}}{200\text{ V}} = 100\text{ A}$ $(I_a = I_L = 100\text{ A})$

應電勢 $E = V_L + I_a R_a = 200 + 100 \times 0.1 = 210$ V

(3) 無載時 (開關 S 打開)，負載電流 $I_L = 0$ A，此時負載兩端電壓

$V_{ab} = E = 210$ V

電壓調整率 $\text{V.R.} = \dfrac{V_{NL} - V_{FL}}{V_{FL}} = \dfrac{E - V_L}{V_L} = \dfrac{210\text{ V} - 200\text{ V}}{200\text{ V}} = 0.05 = 5\,\%$

隨堂練習

(　) 1. 直流發電機之無載特性曲線是指下列何者關係曲線？

(A) 端電壓與負載電流　(B) 端電壓與激磁電流

(C) 應電勢與負載電流　(D) 應電勢與激磁電流。

(　) 2. 有關外激式直流發電機的負載 (外部) 特性曲線之敘述，何者正確？

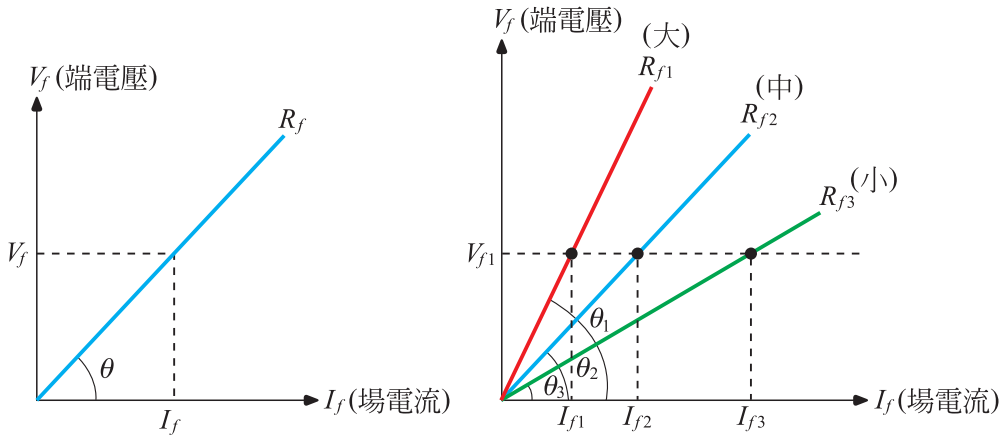
(A) 轉速與電樞電流　(B) 轉速與端電壓

(C) 磁場電流與端電壓　(D) 電樞電流與端電壓。

(三) 分激式發電機特性與運用

1. 場電阻線 (field resistance line)

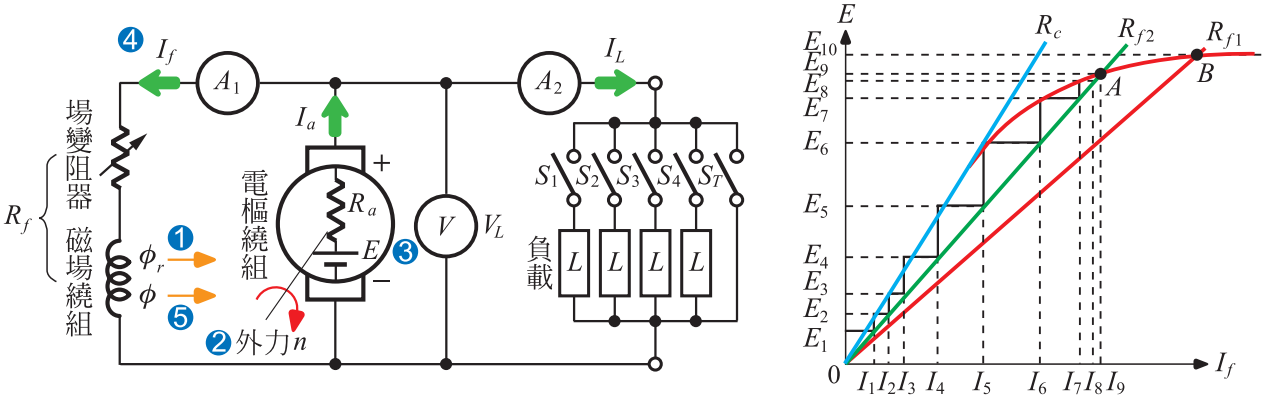
磁場電阻 R_f 爲磁場繞組本身電阻與可變電阻器 (場變阻器) 之和。依據歐姆定律，倘若磁場電路兩端電壓爲 V_f，磁場電流爲 I_f，則磁場電阻 $R_f = \dfrac{V_f}{I_f}$ ，兩者的關係曲線稱爲磁場電阻線，其結果如圖 6-11(a) 所示。



(a) 場電阻　　(b) 場電阻與斜率的關係

圖 6-11　磁場電阻線

在端電壓 V_{f1} 不變下，將圖 6-12 中與磁場繞組串聯的可變電阻 (場變阻器) 調的越低，磁場電流越大，磁通量 ϕ 隨之增強，其結果如圖 6-11(b) 所示。此種方式稱爲磁場控制法，是直流電機常用的控制方式。



(a) 接線圖　　(b) 電壓建立過程

圖 6-12　分激發電機電壓建立過程

2. 分激發電機的電壓建立過程：

分激發電機的磁場繞組與電樞繞組並聯，因此磁場電流必須仰賴電樞感應電勢提供。有關分激發電機的電壓建立過程，如圖 6-12(a) 所示：

(1) 發電機靜止時，雖然有剩磁 ϕ_r，但是轉速 $n=0$，應電勢 $E=Kn\phi=0$。

(2) 將電樞透過外力 (原動機) 以額定轉速 n 持續旋轉。

(3) 電樞繞組切割剩磁產生微量的剩磁電壓 $E_1=Kn\phi_r$。

(4) 微量剩磁電壓 E_1 加在分激場繞組 R_f 上，產生微量磁場電流 ($I_f=I_1=\frac{E_1}{R_f}$)。

(5) 磁場電流 I_1 通過磁場繞組，產生微量主磁通 ϕ，倘若繞組接線正確，總磁通量 ϕ_T 增加 ($\phi_T=\phi_r+\phi$)。

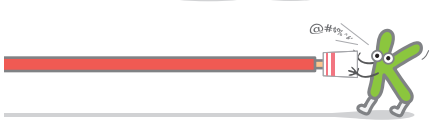
(6) 磁通量增加，使得電樞應電勢由 E_1 增加至 $E_2[E_2=Kn(\phi_r+\phi)]$。

(7) 應電勢增加至 E_2，使得磁場電流上升 ($I_2=\frac{E_2}{R_f}$)，磁通量隨之增加。

(8) 如此不斷循環，電樞應電勢逐漸提高，至場電阻線與無載飽和曲線之交點 A 點爲止，受到磁場飽和的限制，應電勢才趨於穩定不再增加。

3. 輸出電壓與場電阻的關係

圖 6-12(b) 是不同場電阻與電壓的關係，原本場電阻爲 R_{f2} 時，分激發電機的電壓建立到場電阻線 R_{f2} 與無載飽和曲線之交點 A 點，此時端電壓爲 E_9。倘若將可變電阻器調低使得場電阻下降至 R_{f1}，則發電機的電壓會建立到 B 點，電壓會由 E_9 上升到 E_{10}。相反的若是將場變阻器調高，使得場電阻上升，發電機的輸出電壓則會降低。但若是場變阻器上升到場電阻線與無載飽和曲線相切之點 (R_c)，此時發電機的電壓極不穩定，場電阻或是轉速稍微變化，應電勢變動幅度就很大。



因此將**與無載飽和特性曲線相切之場電阻線稱爲臨界場電阻** (critical field resistance)。**當場電阻低於臨界場電阻，發電機可以順利建立電壓。而此時原動機速度對於場電阻而言就稱爲臨界轉速** (critical speed)，**原動機的轉速則必須高於臨界轉速，電壓才可以順利建立。**

綜合上述，直流分激式發電機的電壓能順利建立，需滿足下列條件：

(1) 磁極鐵心中，需有適量的剩磁。

(2) 繞組所產生的磁通方向必須與剩磁方向相同。

(3) 轉速固定時，場電阻必須小於臨界場電阻。

(4) 場電阻固定時，轉速必須高於臨界轉速。

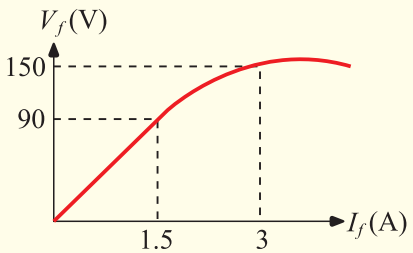
(5) 電樞旋轉方向、場電阻連接及剩磁方向，必須正確，其結果如表 6-1 所示。

表 6-1 直流分激發電機電壓建立關係表

	電樞旋轉方向	場繞組連接方向	剩磁方向	應電勢
a	正轉	正常	正常	正常
b	反轉	正常	正常	無法建立
c	正轉	反接	正常	無法建立
d	正轉	正常	反向	反向電壓
e	反轉	反接	正常	反向電壓

隨堂練習

( ) 1. 如右圖為分激發電機之飽和曲線，則此發電機之臨界場電阻應為
(A) 90 Ω (B) 60 Ω (C) 50 Ω (D) 25 Ω。



( ) 2. 欲建立分激發電機的電壓，其必要條件為
(A) 場電阻大於臨界值，速率大於臨界值
(B) 場電阻大於臨界值，速率小於臨界值
(C) 場電阻小於臨界值，速率大於臨界值
(D) 場電阻小於臨界值，速率小於臨界值。

4. 分激發電機負載特性

依據圖 6-12(a) 所示，無載情形下，先將分激發電機端電壓建立到額定值後，如圖 6-13 中之【O 點】，之後依序進行負載實驗：

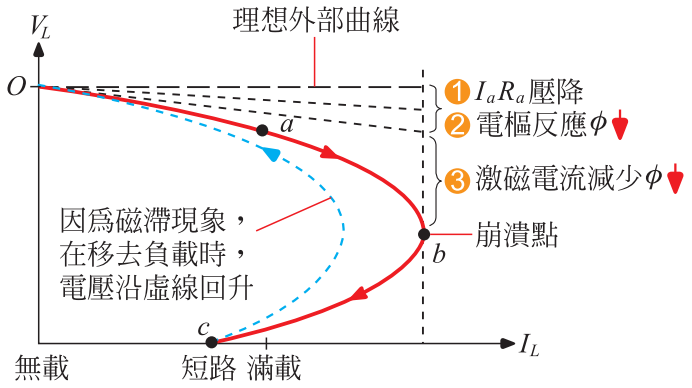


圖 6-13　分激發電機外部特性曲線圖

(1) 將負載側開關 ($S_1 \sim S_4$) 逐漸閉合，隨著負載增加，負載電流 I_L 上升，負載端電壓 V_L 逐漸下降至 a 點，其原因有：

① 電樞繞組壓降 I_aR_a。

② 電樞反應的去磁效應導致主磁通 ϕ 減少，應電勢 $E = Kn\phi$ 降低。

③ 上述原因造成端電壓 V_L 降低，連帶使得磁場電流 $I_f = \dfrac{V_L}{R_f}$ 下降，主磁通 ϕ 減弱，應電勢 $E = Kn\phi$ 更加下降。

因此**分激式發電機電壓下降程度較外激式發電機大**。

(2) 當負載增大到磁通無法維持足夠應電勢時，端電壓會急速降低，該點稱爲崩潰點 (b 點)。

(3) 分激發電機當輸出端短路時 (S_T 閉合)，負載端電壓 $V_L = 0$ V，此時磁場電流 $I_f = \frac{V_L}{R_f} = 0$ A ，磁場繞組僅剩下微量剩磁 ϕ_r，此時電樞繞組產生的剩磁電壓 E_r，使得短路電流 $I_{sc} = \frac{E_r}{R_a}$ 不致於太大 (c 點)，因此**分激發電機具有短路保護的功能**。

(4) 將短路開關 (S_T) 打開並將負載逐漸移除後，因爲磁滯作用，使得電壓重新上升時的磁通較小，因此回升曲線會在下降曲線的下方。

5. 分激發電機的運用

分激式發電機的電壓調整範圍及電壓調整率較外激式差。但是優點爲：

(1) 不需要另外裝設激磁電源。

(2) 利用與分激場繞組串聯的可變電阻可以適度控制輸出電壓。

(3) 具有短路保護功能。

因此廣泛使用於一般直流電源、蓄電池充電或是短距離直流供電。

隨堂練習

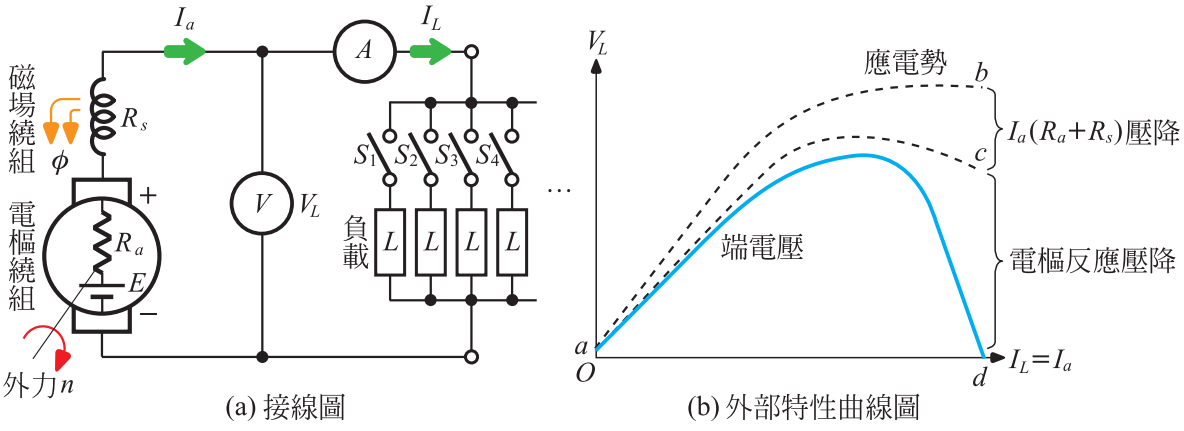
( ) 1. 下列何者<u>不是</u>直流分激發電機建立電壓必須的條件？
(A) 剩磁要夠大 (B) 場電阻要夠低 (C) 剩磁方向要適當 (D) 負載特性要適當。

( ) 2. 若把直流分激發電機之兩線端短路，則將
(A) 電流甚大發電機立刻燒毀 (B) 長時間短路電機才會燒毀
(C) 電壓與電流甚大，但不致燒毀電機 (D) 電壓及電流立即減少。

( ) 3. 44 kW、220 V 之分激發電機，不考慮激磁電流，已知電壓調整率為 6 %，此電機之電樞電阻為 (A) 0.036 Ω (B) 0.046 Ω (C) 0.056 Ω (D) 0.066 Ω。

(四) 串激式發電機負載特性

串激發電機的接線如圖 6-14(a)，磁場繞組和電樞繞組及負載相互串聯，因此電流相等 ($I_a = I_L$)，造成串激場繞組磁通 ϕ 與負載電流 I_L 有連動關係。



(a) 接線圖　　(b) 外部特性曲線圖

圖 6-14　串激發電機特性實驗接線圖

1. 串激式發電機特性

(1) 發電機由外力以轉速 n 帶動，無載 (開關 $S_1 \sim S_4$ 打開) 時，負載電流 $I_L = I_a = 0$，磁場繞組無法產生磁通 ϕ，電樞只有極低的剩磁電壓，如圖 6-14(b) 中的 oa 所示。**欲求出串激式發電機的無載特性必須改以外激方式，因此其特性與外激發電機相同**，如圖中 ab 線段所示。

(2) 當負載逐漸增加 ($S_1 \sim S_4$ 逐漸閉合)，由於負載電流 I_L 增加，使得磁通 ϕ 增加，連帶應電勢 $E = Kn\phi$ 也成正比上升，起初應電勢上升速度較繞組電阻壓降 $I_a(R_a + R_s)$ 大，因此端電壓 V_L 會隨負載增加而上升。

(3) 負載持續增加到磁路趨近於飽和時，應電勢 E 變化趨緩，但是繞組電阻壓降 $I_a(R_a + R_s)$ 仍持續增加，造成端電壓 V_L 反而開始降低，其過程如圖中的 ac 線段所示。若是考慮電樞反應所造成的去磁效應，則端電壓如圖中的 ad 所示，下降幅度更大。

2. 串激式發電機的運用

串激式發電機**端電壓會隨負載變化產生劇烈變動**，因此不適合做爲一般電壓源使用，根據其外部特性曲線，串激式發電機的應用有下列兩種：

(1) 電壓上升部分：**外部特性曲線的前半段，負載增加端電壓隨之增加，可做爲升壓機**，用來補償長距離配電 (電化鐵路) 線路所發生的壓降。

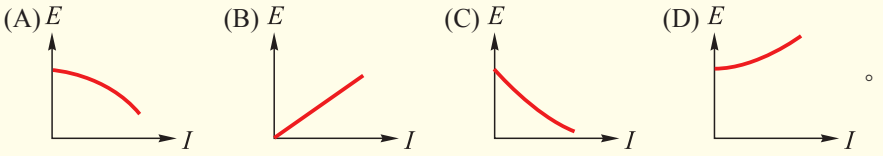
(2) 電壓下降部分：**外部特性曲線的後半段，雖然負載增加使得電壓快速下降，但是負載電流幾乎保持恆定**，因此可以設計成有很大的電樞反應，以做爲定電流配電 (串聯弧光燈) 或電焊用。

隨堂練習

( ) 1. 直流串激發電機無載時，端電壓太低的主要原因為

(A) 電樞反應太大 (B) 轉速太高 (C) 沒有場電流 (D) 沒有剩磁。

( ) 2. 串激發電機之感應電勢與負載電流 (E-I) 近似曲線為



(五) 複激式發電機的特性與運用

1. 複激式發電機的構造

複激式發電機之構造如圖 6-15 所示，磁極鐵心內分別繞有：

(1) 分激場繞組 ($F_1 - F_2$)：線徑細、匝數多、電阻值高，分激場磁通以ϕ_f表示。

(2) 串激場繞組 ($S_1 - S_2$)：線徑粗、匝數少、電阻值低，串激場磁通以ϕ_s表示。

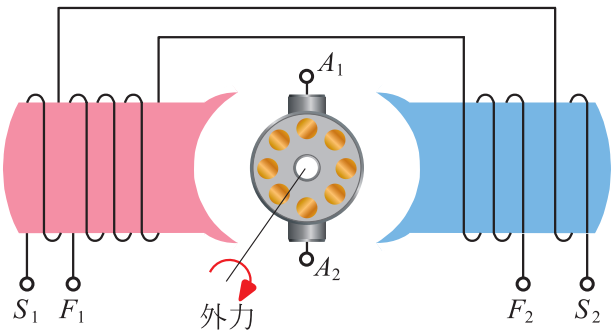


圖 6-15 複激式發電機基本構造圖

2. 接線方式與特性的關係

複激式發電機依據兩個磁場繞組的接線方式分爲：

(1) 短並聯複激式：電樞繞組先與分激場繞組並聯，再與串激場繞組串聯。

(2) 長並聯複激式：電樞繞組先與串激場繞組串聯，再與分激場繞組並聯。

由前一節範例 04 與範例 05 可知，上述兩種接線的計算值差距不大，因此電路特性也很接近，爲方便分析，後續說明以短並聯複激式接線方式爲主。

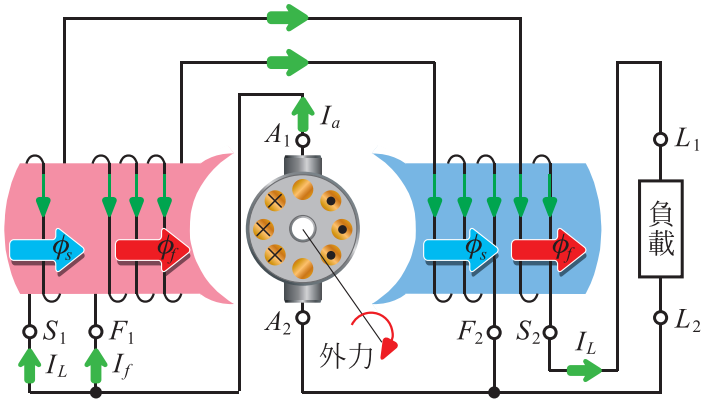
3. 磁通方向與特性的關係

複激式發電機依據兩繞組所產生的磁通方向分爲：

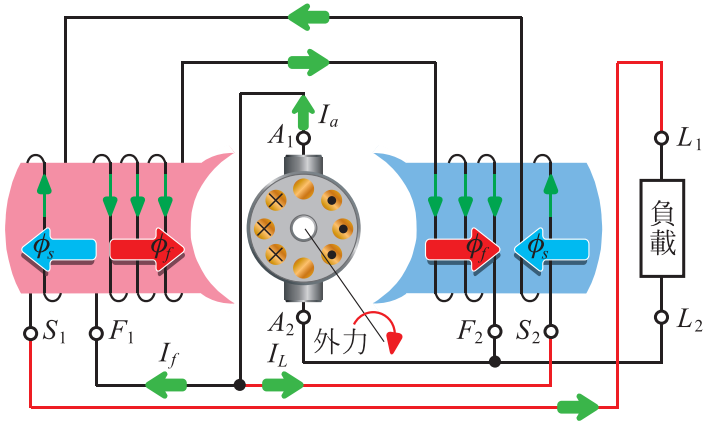
(1) 積複激式發電機：接線方式如圖 6-16(a) 所示，分激場磁通 ϕ_f 與串激場磁通 ϕ_s 方向相同，總磁通爲兩者之和 ($\phi_T=\phi_f+\phi_s$)。

(2) 差複激式發電機：接線方式如圖 6-16(b) 所示，將串激磁場繞組反接，使得串激場磁通 ϕ_s 方向相反，總磁通爲兩者之差 ($\phi_T=\phi_f-\phi_s$)。

對於複激式發電機而言，總磁通方向主要由匝數多的分激場磁通 ϕ_f 決定，至於串激場磁通 ϕ_s 會隨著負載電流大小而改變，成爲影響整體磁通量的重要變數，導致積複激式與差複激式的特性截然不同。



(a) 積複激式



(b) 差複激式

圖 6-16　複激式發電機依據磁通方向分類

綜合上述，複激式發電機的分類如圖 6-17 所示。

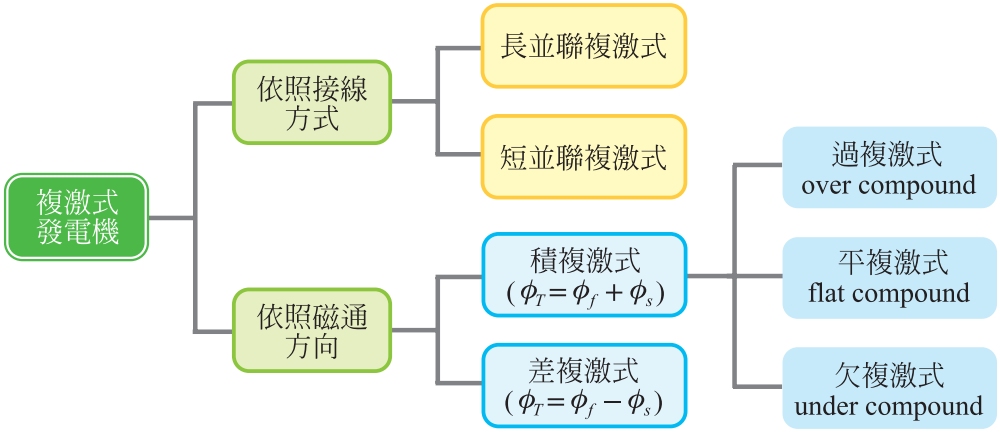


圖 6-17　複激式發電機的分類方式

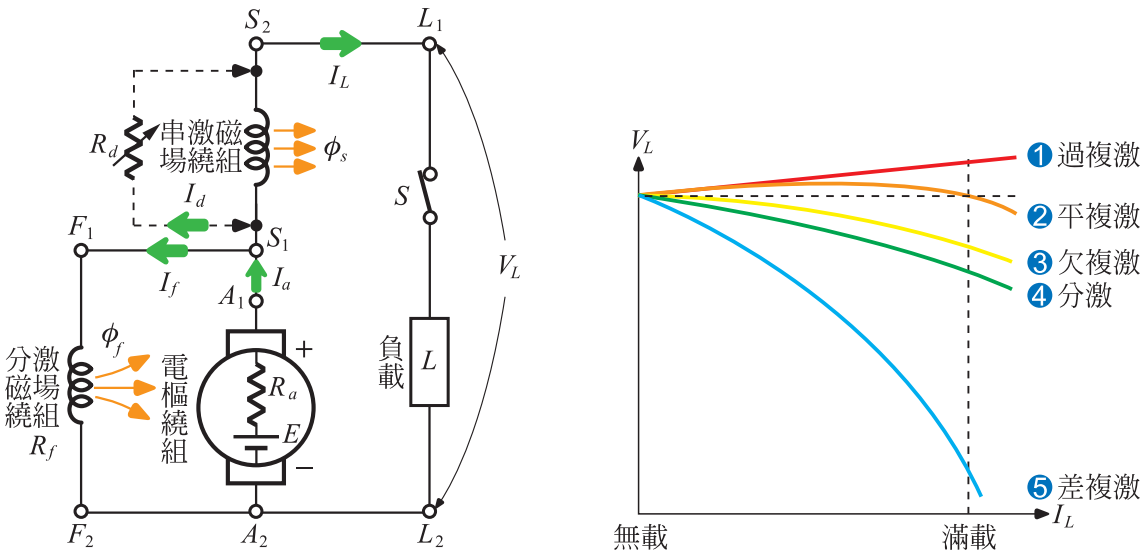
4. 積複激式發電機負載特性

積複激式發電機透過調整串激場繞組匝數或是分流器電阻，可分爲圖 6-18(a) 的三種工作模式：

(1) 過複激式：串激磁場繞組 ($S_1 \sim S_2$) 匝數設計較多，當負載增加時，負載電流 I_L 使得串激磁場磁通 (ϕ_s) 大幅增加，造成電樞應電勢 $E = Kn\ (\phi_f + \phi_s)$ 上升幅度比電樞繞組及電樞反應所造成的壓降大，使得**滿載端電壓比無載端電壓高，電壓調整率** $V.R. < 0$，其外部特性曲線如圖 6-18(b) 的①號曲線。

(2) 平複激式：串激磁場繞組 ($S_1 \sim S_2$) 匝數設計正好使得串激磁場磁通增加量所生的電勢恰好抵消電樞繞組及電樞反應壓降，因此**滿載端電壓與無載端電壓幾乎相同，電壓調整率** $V.R. = 0$，如圖中②號曲線。

(3) 欠複激式：串激磁場繞組 ($S_1 \sim S_2$) 匝數設計較少，因此串激磁場磁通增加量所生的電勢不足以彌補電樞繞組及電樞反應壓降，因此端電壓還是會隨著負載增加而下降，如圖中③號曲線，**電壓調整率** $V.R. > 0$，**但是下降幅度較④號曲線的分激發電機小**。



(a) 接線圖　　(b) 外部特性曲線圖

圖 6-18　複激發電機特性實驗接線圖

除了上述利用改變串激磁場繞組匝數進行控制外，複激式發電機也可以利用可變電阻器 R_d 並聯在串激磁場繞組兩端，稱爲分流器。在負載不變下，將分流器電阻 R_d 調到很大，則分流器電阻電流 I_d 很小，大部分的電流會通過串激磁場繞組，使得串激磁場磁通 (ϕ_s) 快速增加，發電機呈現過複激特性；反之若將分流器電阻 R_d 調到很小，則大部分的電流改通過分流器電阻，串激磁場繞組只能產生些微的磁通 (ϕ_s)，發電機呈現欠複激特性；若是適度調整分流器電阻，使得發電機滿載端電壓等於無載端電壓就稱爲平複激式。

5. 差複激式發電機負載特性

將圖 6-18(a) 的串激場繞組 ($S_1 \sim S_2$) 兩接線端對調，造成串激場磁通 ϕ_s 與分激場磁通 ϕ_f 方向相反，就變成差複激發電機。

無載時串激場磁通 $\phi_s=0$，差複激發電機如同分激發電機可以順利建立電壓。但是隨著負載增加，負載電流 I_L 上升使得串激場磁通 ϕ_s 增強，電樞應電勢 $E = Kn\ (\phi_f - \phi_s)$ 開始降低，再加上電樞繞組及電樞反應壓降，導致差複激發電機端電壓隨著負載增加快速下降，電壓調整率 $V.R. >> 0$，其外部特性曲線如圖 6-18(b) 的⑤號曲線。

6. 複激式發電機的運用

(1) **過複激發電機的滿載電壓比無載電壓高**，因此適用於礦區、電車等**長距離供電場所彌補線路壓降**，使負載端電壓維持穩定。

(2) 平複激發電機由於電壓穩定度高，適用於一般電源或是大型發電機的激磁機等需要恆定電壓的場所。

(3) 欠複激電壓調整率較分激發電機低，但是差異不夠顯著因此很少使用。

(4) **差複激發電機負載增加時電壓快速下降**，但是電流變動不大，**適用在需要限制電流的場合**，例如蓄電池充電或是電弧焊接之電源。

隨堂練習

( ) 1. 積複激式直流發電機，可加裝分流器以調整其外部特性曲線，下列對分流器之接線方式何者正確？

(A) 與電樞繞組串聯　(B) 與分激磁場繞組並聯

(C) 與電樞繞組並聯　(D) 與串激磁場繞組並聯。

( ) 2. 欲將欠複激式直流發電機調整為過複激式直流發電機，則下列敘述何者正確？

(A) 提高發電機之轉速　(B) 增大分激磁場繞組之場變阻器

(C) 增大串激磁場繞組分流器電阻值　(D) 降低串激磁場繞組分流器電阻值。

(六) 直流發電機的外部特性曲線與用途

綜合上列敘述，將各式直流發電機的外部特性曲線彙整成圖 6-19，可以發現除了串激發電機外，其餘各種直流發電機無載時都可以順利建立電壓。

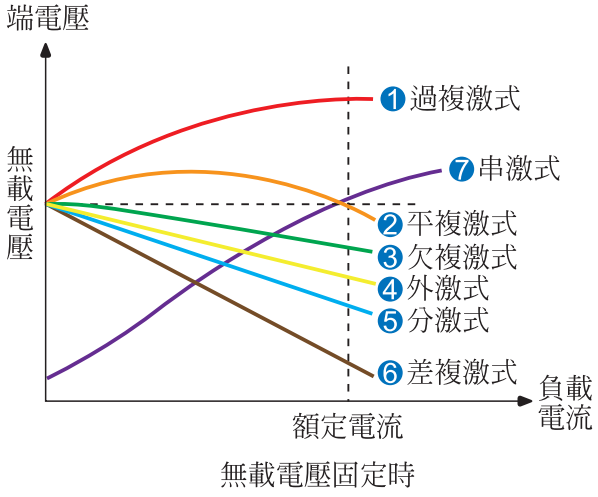


圖 6-19　各式直流發電機的外部特性曲線

隨著負載增加，發電機的端電壓也有不同變化，其中：

1. 過複激式：負載增加，端電壓增加；滿載電壓大於無載電壓，電壓調整率 < 0。早期作爲礦坑或電車等遠距離供電使用。
2. 平複激式：負載增加，端電壓變化不大；滿載電壓約等於無載電壓，電壓調整率 = 0。早期作爲一般直流電源使用。
3. 欠複激式：負載增加，端電壓略微降低；電壓調整率較外激式小。但特性不夠顯著，很少採用。
4. 外激式：負載增加，端電壓略微降低，電壓調整率小。由於採用獨立直流電源做爲激磁來源，因此能獲得寬廣的電壓。早期用於華德黎翁納德控制系統或是特別高壓小電流或特別低壓大電流的場所。
5. 分激式：負載增加，端電壓降低，電壓調整率稍大；但由於構造簡單，且具備短路保護功能。早期作爲蓄電池充電或是交流發電機之激磁機。
6. 差複激式：負載增加，端電壓急降，電壓調整率很大，但是電流變化不大。早期用於電焊或是汽車蓄電池充電用。
7. 串激式：無載時無法建立電壓；負載加大，端電壓逐漸增加，崩潰後則迅速降低，電壓變化情形大，電壓調整率 < 0。電壓上升部份可做爲升壓機用，電壓下降部份可做爲定電流源用。

綜合上述，各式直流發電機的特性及用途整理如表 6-2 所示：

表 6-2 各式直流發電機的特性與用途

類別		主要特性	用途
外激式		控制激磁電流能供給寬廣的電壓。 電壓調整率 V.R.% 小。 缺點：需要獨立的直流電源做爲激磁來源	激磁機、測力計、華德黎翁納德系統的電源、特別高壓小電流或特別低壓大電流的場所。
分激式		電壓調整幅度較窄，電壓調整率較外激式大。 出線端被短接時，電壓電流立即減小。	一般直流電源、蓄電池充電、交流發電機之激磁機
串激式		無載時無法建立電壓；負載加大，端電壓逐漸增加，崩潰後則迅速降低，電壓變化情形大。 電壓調整率 V.R.＜0。	電壓上升部分做升壓機 電壓下降部分做定電流源
積複激式	過複激式	負載增加，端電壓增加。 滿載電壓大於無載電壓，電壓調整率 V.R.＜0	礦坑或電車等遠距離供電
	平複激式	外部曲線幾乎呈現水平。 滿載電壓等於無載電壓，電壓調整率 V.R.＝0	一般直流電源 激磁機使用
	欠複激式	負載增加，端電壓略微降低。 電壓調整率較外激式小，V.R.＞0	很少採用
差複激式		負載增加，端電壓急降，電壓調整率 V.R.>>0，具有限制電流特性。	電焊、汽車蓄電池充電

隨堂練習

( ) 1. 由外部特性曲線可知適合用於升壓場所之發電機為
(A) 分激 (B) 串激 (C) 積複激 (D) 他激。

( ) 2. 何種直流發電機，電壓調整率為負？
(A) 串激式 (B) 分激式 (C) 他激式 (D) 欠複激式。

( ) 3. 有關直流發電機之敘述，下列何者正確？
(A) 差複激式發電機負載增加時，總有效磁通會增加
(B) 串激式發電機之電壓調整率最小
(C) 分激式發電機將電樞反轉，將無法建立電壓
(D) 他激式發電機無載時，電壓無法建立。

6-4 直流發電機之並聯運用 (parallel operation)

(一) 並聯運用的定義與優點

將多部發電機相同極性的接線端連接在一起，共同提供電能給負載使用，稱爲發電機的並聯運用。其優點包括：

1. 增加負載供應量：直流電機須要換向，因此不易製成高電壓大電流的大型機組，爲了供應大容量直流負載，可以採用多部機組並聯運轉。
2. 提高供電穩定度：採用多部機組並聯運轉，整個供電系統不致於因爲一部發電機故障而完全停擺。
3. 提高運轉效率：**電機效率以滿載或接近滿載時爲最高**。因應用電需求，彈性調整運轉機組數量，使發電機盡量接近滿載運轉，可以提高整體效率。
4. 減少備載容量：對相同設備容量而言，並聯的發電機台數越多，每台發電機的容量越小，由於發電機不會同時故障，備用的發電機容量也可以減少。
5. 延長發電機壽命：各機組可輪流停機檢驗與保養，延長壽命。

(二) 分激發電機的並聯運用

1. 分激發電機並聯運用的條件

(1) 端電壓須相同。

(2) 極性連接要一致。

(3) 負載分配要適當：**負載大小與發電機容量成正比，與電樞電阻成反比**。

(4) 具備下垂外部特性，才可以合理分配且轉移負載。

2. 分激發電機並聯運用步驟

二部分激式發電機並聯運用之接線方式如圖 6-20，假定發電機 G_1 已經運轉供電給用戶使用，當用戶用電量接近發電機 G_1 額定 (最大供電) 容量時，必須將發電機 G_2 加入並聯運轉，以分擔部分負載電流，並聯運用之步驟如下：

(1) 將 G_2 發電機磁場可變電阻器 R_{f2} 置於最大處，起動 G_2 之原動機 (如引擎、鍋爐等) 使 G_2 運轉於額定轉速。

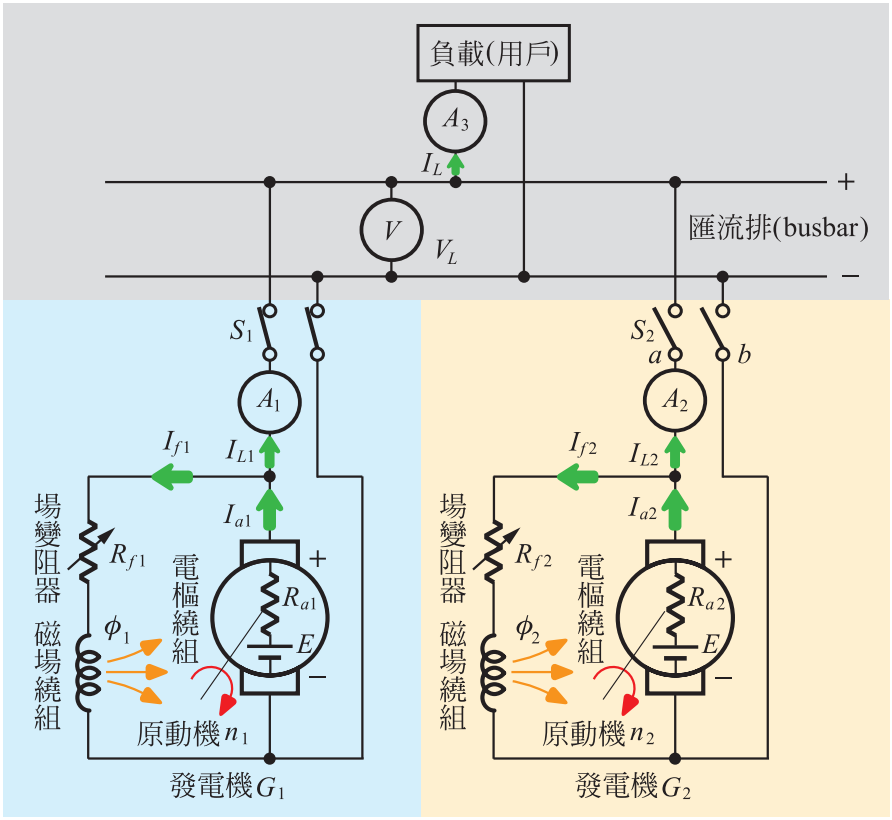


圖 6-20 分激發電機並聯運用接線圖

(2) 將場變阻器 R_{f2} 逐漸降低，此時 G_2 端電壓 (可用電表測量 a、b 兩端) 逐漸上升，直到端電壓略高於系統電壓 V_L 停止調整。

(3) 確認 G_2 電壓極性 ($a+$、$b-$) 與系統一致後，將開關 S_2 閉合，完成 G_2 並聯接線，此時 G_2 所分擔的負載電流可由電流表 A_2 觀察之。

兩機並聯供電時，若負載需求降低時，可以考慮將其中一部發電機停機，除了節省原動機燃料成本外，也可進行保養維護。但在停機前，必須將原本所分擔的負載轉移到另一部機組。以圖 6-20 爲例，倘若 G_1 需要停機保養時，必須一邊將 G_1 的場變阻器 R_{f1} 調大，使場電流 I_{f1} 下降，此時 G_1 應電勢 $E_1 = Kn\phi_1$ 下降，所分擔的負載電流 I_{L1} 下降；同時將 G_2 的場變阻器 R_{f2} 調小，使場電流 I_{f2} 上升，此時 G_2 應電勢 $E_2 = Kn\phi_2$ 上升，所分擔的負載電流 I_{L2} 增加，如此才能使負載端電壓維持定值。

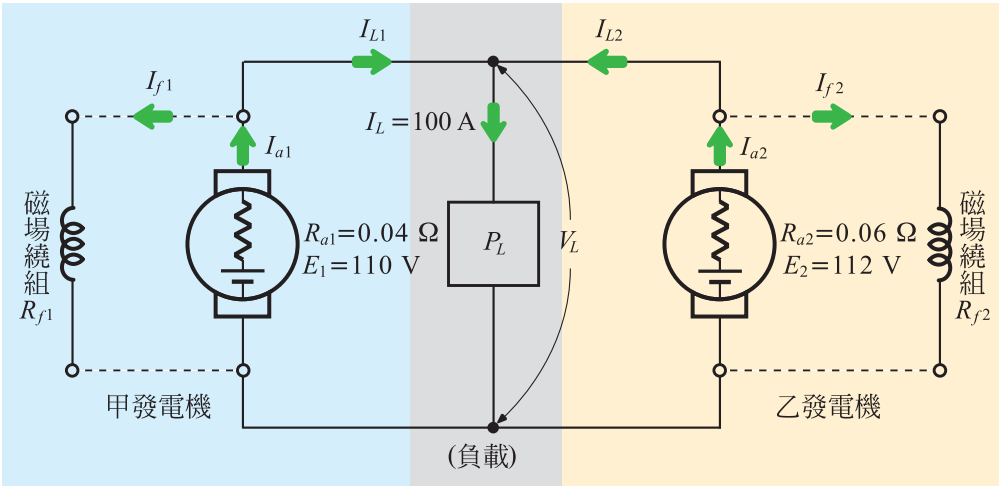
3. 分激發電機並聯運用的電路計算

分激發電機並聯運用牽涉兩部機種的電路計算，看似複雜但是只要利用並聯電路的兩大特性：(1) **端電壓相等**、(2) **總電流爲各分路電流之和**，搭配基本電學的基本公式就可以進行計算。

範例 08

甲、乙兩台分激發電機並聯供給 100 A 負載，甲發電機無載電壓為 110 V，電樞電阻為 0.04 Ω。乙發電機無載電壓為 112 V，電樞電阻為 0.06 Ω。若不計激磁電流，則負載端電壓為何？

解 依照題意畫出兩部分激式並聯供電之等效電路圖，並將已知數值填入：



由圖可知，二部發電機共同供應負載，原本 $I_{L1} + I_{L2} = 100$ A，因為忽略磁場電流，

故 $I_{a1} + I_{a2} = 100$ A..... (1)

甲發電機端電壓：$V_L = E_1 - I_{a1}R_{a1} \Rightarrow V_L = 110\text{ V} - I_{a1} \times 0.04$..... (2a)

乙發電機端電壓：$V_L = E_2 - I_{a2}R_{a2} \Rightarrow V_L = 112\text{ V} - I_{a2} \times 0.06$..... (2b)

由於兩機並聯端電壓相等，因此將 (2a) 與 (2b) 合併後得

$(V_L) = 110\text{ V} - 0.04\ I_{a1} = 112\text{ V} - 0.06 I_{a2}$..... (3)

將 (1) 與 (3) 解聯立方程式可得 $I_{a1} = 40$ A　$I_{a2} = 60$ A

再將 $I_{a1} = 40$ A 或是 $I_{a2} = 60$ A 代回 (3) 式，可得負載端電壓 $V_L = 108.4$ V

(三) 複激發電機的並聯運用

複激式發電機負載增加時可透過串激磁場繞組的升壓性能補償線路壓降，因此常用於早期直流供電系統，但是**兩部以上複激發電機並聯運用時，必須加裝均壓線，以免各機串激場繞組升壓特性不同造成負載分配不穩定甚至燒毀發電機。**

1. 均壓線的功能

二部積複激式發電機並聯運用之接線方式如圖 6-21，倘若並聯過程中發電機 G_2 應電勢 E_2 稍高，使得輸出電流 I_{L2} 上升，串激場磁通 ϕ_{S2} 因而增強，G_2 應電勢 E_2 變的更高；同時間 G_1 會因爲分擔減輕，輸出電流 I_{L1} 下降，串激場磁通 ϕ_{S1} 減弱，使得 G_1 感應電勢 E_1 變低，輸出電流 I_{L1} 下降更多。如此惡性循環，除了所有負載由 G_2 單獨承擔外，G_2 的電流還會經過開關 S_1 反向進入 G_1，造成 G_1 反而變成差複激電動機，除了失去並聯運用的目的，G_2 也會因爲負擔過大而燒毀。

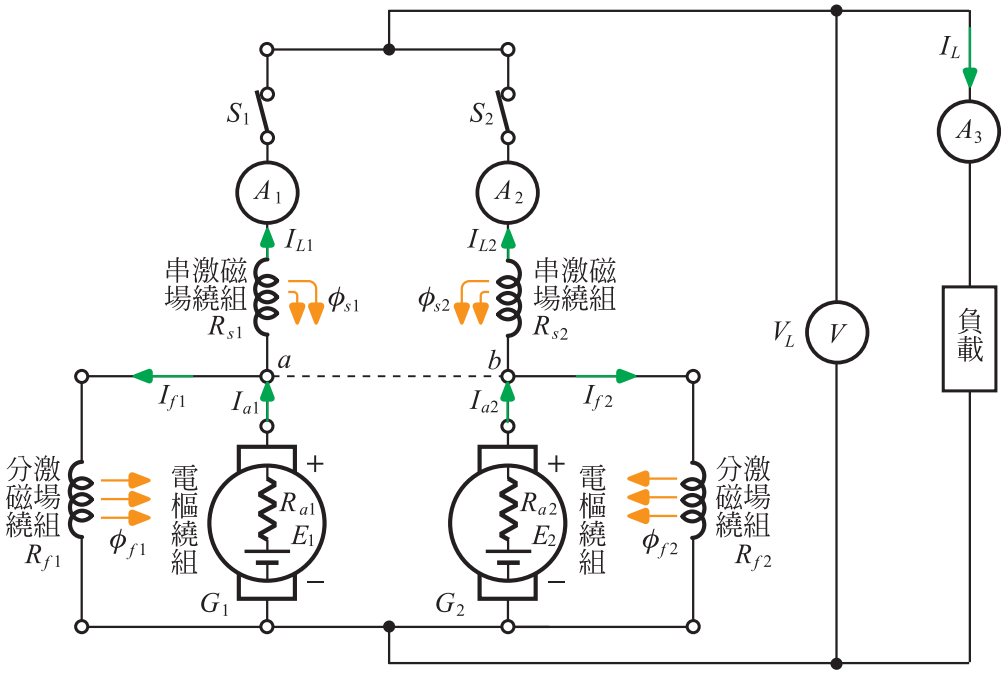


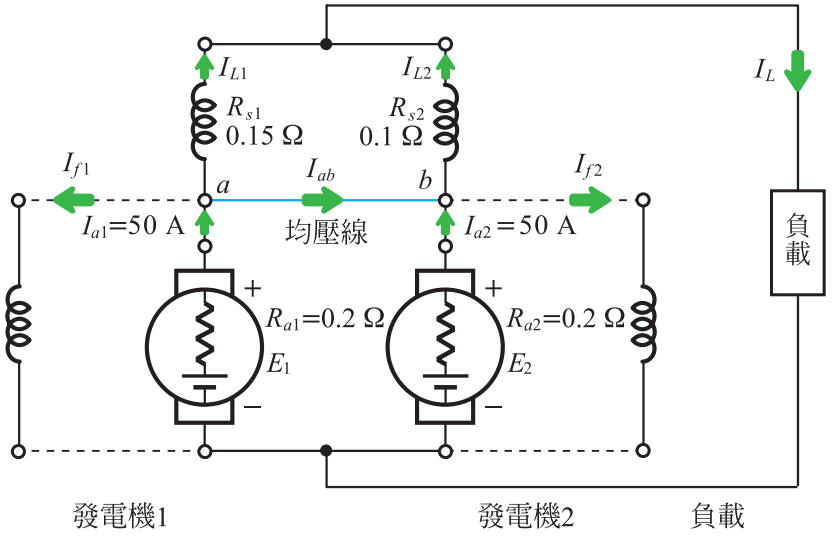
圖 6-21 複激發電機並聯運用 - 沒有使用均壓線

爲了避免上述情形，只要用一條線徑粗、電阻值低的導線將兩部發電機的串激場繞組 (a、b) 兩端並聯在一起，使得兩機串激磁場繞組電壓相等，故稱爲均壓線。當負載增加或分擔變動時，所增加的電流會分流於兩機的串激磁場繞組中，使得兩機的串激場磁通維持平衡狀態而穩定的運轉。

範例 09

兩部短並聯複激式發電機使用均壓線進行並聯供電。已知 1 號機電樞電阻 0.2 Ω，串激磁場電阻為 0.15 Ω，電樞電流為 50 A；2 號機電樞電阻為 0.2 Ω，串激磁場電阻為 0.1 Ω，電樞電流為 50 A，分激磁場繞組電阻與均壓線電阻忽略不計，求：(1) 總負載電流、(2) 均壓線電流 I_{ab}、(3) 負載不變下，因故 2 號發電機電樞電流增加為 70 A，則均壓線電流 I_{ab} ？

解 依照題意畫出兩部複激式並聯供電之等效電路圖，並將已知數值填入：



(1) 忽略分激磁場繞組，兩機的電樞電流等於負載電流 ($I_a = I_L$)，

因此 $I_L = I_{a1} + I_{a2} = 50 + 50 = 100$ A

(2) 如圖所示，兩機串激磁場繞組因均壓線連接而被並聯，依據分流定則

$$I_{L1} = I_L \times \frac{R_{s2}}{R_{s1} + R_{s2}} = 100 \times \frac{0.1}{0.15 + 0.1} = 40 \text{ A} \quad ; \quad I_{L2} = I_L \times \frac{R_{s1}}{R_{s1} + R_{s2}} = 60 \text{ A}$$

依據克希荷夫電流定律，均壓線上的電流 $I_{ab} = I_{a1} - I_{L1} = 50 - 40 = 10$ A

(3) 負載不變 ($I_L = 100$ A) 下，若 I_{a2} 增加為 70 A，則 I_{a1} 降至 30 A，由於串激磁場繞組被均壓線並聯，因此電流 ($I_{L1} = 40$ A；$I_{L2} = 60$ A) 不變

依據克希荷夫電流定律，均壓線的電流 $I_{ab} = I_{a1} - I_{L1} = 30 - 40 = -10$ A

2. 複激發電機並聯運用的條件

綜合上述，複激發電機並聯時，除了必須滿足並聯端電壓相同、極性連接一致等基本條件外，還必須注意下列事項：

(1) 兩機必須都爲積複激接線。

(2) 串激場繞組要接於匯流排的同一側。

(3) **兩機必須有均壓線連接**，且均壓線之電阻值應低於臨界電阻。

(4) **串激場電阻和容量成反比，而容量和擔任之負載成正比，即：**

$$\frac{P_2}{P_1}=\frac{I_{L2}}{I_{L1}}=\frac{R_{s1}}{R_{s2}}$$ 。

範例 10

有兩台直流複激式發電機並聯運用時，1 號機容量為 150 kW，串激場電阻值為 0.02 Ω，2 號機容量為 100 kW，欲使各機作合理負載分配時，則：(1) 2 號機之串激場電阻值？(2) 當負載電流為 400 A，則兩部發電機各分擔多少電流？

解 (1) 串激場電阻和容量成反比，$\frac{P_2}{P_1}=\frac{R_{s1}}{R_{s2}}\Rightarrow\frac{100\text{ kW}}{150\text{ kW}}=\frac{0.02\,\Omega}{R_{s2}}\Rightarrow R_{s2}=0.03\,\Omega$

(2) 負載分配與容量成正比：$\frac{P_2}{P_1}=\frac{I_{L2}}{I_{L1}}\Rightarrow\frac{100\text{ kW}}{150\text{ kW}}=\frac{I_{L2}}{I_{L1}}\Rightarrow 2I_{L1}=3I_{L2}$

因此 $\begin{cases}I_{L1}+I_{L2}=400\text{ A}\\2I_{L1}=3I_{L2}\end{cases}\Rightarrow\begin{cases}I_{L1}=240\text{ A}\\I_{L2}=160\text{ A}\end{cases}$

隨堂練習

(　) 1. 多部直流發電機在並聯運作時，下列哪項不是應該具備的條件？
(A) 發電機容量要相同　(B) 極性要一致
(C) 負載分配要適當　(D) 端電壓必須相等。

(　) 2. 兩台分激發電機作並聯運轉，供應 100 A 負載，若場電流不計，發電機 G_1 的應電勢 $E_1=110$ V，電樞電阻 $R_{a1}=0.1\,\Omega$；發電機 G_2 的應電勢 $E_2=112$ V，電樞電阻 $R_{a2}=0.1\,\Omega$，則兩機分擔電流分別為
(A) 30 A、70 A　(B) 40 A、60 A　(C) 60 A、40 A　(D) 70 A、30 A。

(　) 3. 同上題，負載端電壓為何？　(A) 114 V　(B) 110 V　(C) 106 V　(D) 104 V。

(　) 4. 有 A、B 兩台複激式直流發電機並聯運轉，若 A 發電機容量為 100 kW，B 發電機容量為 200 kW，A 發電機的串激場繞組為 0.2 Ω 時，則 B 發電機的串激場繞組為多少？
(A) 0.1 Ω　(B) 0.2 Ω　(C) 0.4 Ω　(D) 0.6 Ω。

自我評量

一、選擇題

6-1 (　　) 1. 直流電機內不與電樞電路串聯之繞組爲
(A) 串激磁場繞組　(B) 分激磁場繞組
(C) 中間極繞組　(D) 補償繞組。

6-2 (　　) 2. 一部他激式直流發電機供給 20 kW、200 V 負載，其電樞電阻爲 0.2 Ω，場電阻爲 50 Ω。若每只電刷壓降爲 1 V，發電機應電勢爲何？　(A) 220 V　(B) 221 V　(C) 222 V　(D) 224 V。

(　　) 3. 一部外激式直流發電機，無載感應電勢爲 100 V，如負載電阻爲 4.8 Ω，消耗功率 1920 W，若電樞電阻爲 0.2 Ω，且不計電樞反應時，端電壓爲多少？
(A) 96 V　(B) 98 V　(C) 102 V　(D) 104 V。

(　　) 4. 20 kW，200 V 直流分激式發電機，電樞電阻 0.1 Ω，分激場電阻 200 Ω，在供給額定輸出時，應電勢爲
(A) 210.1 V　(B) 206.1 V　(C) 201.1 V　(D) 200 V。

(　　) 5. 有一部 5 kW、100 V 直流分激式發電機，場電阻爲 100 Ω，當供給額定負載時，應電勢爲 120 V，若電刷壓降忽略不計，則電樞電阻約爲多少？　(A) 0.68 Ω　(B) 0.53 Ω　(C) 0.47 Ω　(D) 0.39 Ω。

(　　) 6. 串激式發電機提供 220 V、2.2 kW 負載，其電樞電阻爲 0.3 Ω，串激場繞組電阻爲 0.5 Ω，則關於此發電機之敘述下列何者正確？
(A) 此發電機電樞電流爲 100 A
(B) 此發電機產生之感應電勢爲 228 V
(C) 此發電機激磁電流爲 50 A
(D) 此發電機產生之感應電勢爲 220 V。

(　　) 7. 串激式發電機，供給 55 只串接弧燈，電流爲 5 A，每只爲 400 W，其電樞電阻爲 10 Ω，磁場電阻爲 8 Ω，線路電阻爲 6 Ω，則此發電機電樞之應電勢爲　(A) 4520 V　(B) 4470 V　(C) 4400 V　(D) 4280 V。

( ) 8. 如圖 (1) 所示中的直流機爲

(A) 串激式 (B) 分激式 (C) 長分路複激式 (D) 短分路複激式。

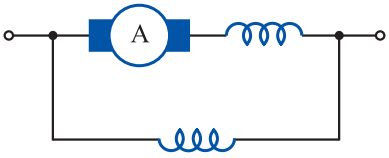


圖 (1)

6-3

( ) 9. 250 V，50 kW 他激式直流發電機，電樞電阻爲 0.08 Ω，忽略電樞反應與電刷壓降，滿載時電壓調整率爲

(A) 0.046 % (B) 0.064 % (C) 4.6 % (D) 6.4 %。

( )10. 他激直流發電機作無載飽和實驗，當 I_f 由 0 A 上升至 1 A 時測得端電壓爲 50 V，當 I_f 由 1 A 上升至 2 A 測得端電壓增加至 100 V，當 I_f 由 2 A 減小至 1 A 時，則端電壓最可能爲

(A) 等於 50 V (B) 略大於 50 V (C) 略小於 50 V (D) 0 V。

( )11. 直流電機中有關場電阻敘述，何者正確？

(A) 場電阻斜率越大電阻越小

(B) 場電阻必須高於臨界電阻才能建立電壓

(C) 相同轉速時，場電阻越小，建立電壓越高

(D) 相同場電阻時，轉速越低，建立電壓越高。

( )12. 自激直流發電機若磁場中沒有剩磁，欲建立電壓必須

(A) 提高速率

(B) 減少磁場電阻

(C) 磁場線圈反接

(D) 先以外激產生剩磁後，再重新建立。

( )13. 直流分激式 (並激式) 發電機運轉於額定電壓，如果發電機的轉速突然升高，若要維持發電機的輸出電壓爲額定電壓，其調整方式爲何？

(A) 增加磁通 (B) 減少負載

(C) 減少磁通 (D) 調整換向片的角度。

自我評量

( )14. 有三台直流複激發電機，額定電壓均標示爲 220 V，無載時測得 A 機端電壓爲 240 V，B 機端電壓爲 220 V，C 機端電壓爲 200 V，哪一部爲過複激發電機

(A) A (B) B (C) C (D) B、C。

( )15. 欲將過複激式直流發電機調整爲平複激式直流發電機，下列敘述何者正確？

(A) 降低轉速 (B) 分流器電阻調小

(C) 分激場變阻器電阻調小 (D) 分流器電阻調大。

( )16. 一般而言，當負載斷路即無法產生應電勢者爲

(A) 直流外激發電機 (B) 直流分激發電機

(C) 直流串激發電機 (D) 直流差複激發電機。

( )17. 若把直流發電機的兩輸出端短路、電壓和電流迅速降低，不會燒毀；此直流發電機應爲

(A) 他激式 (B) 分激式 (C) 串激式 (D) 過複激式。

( )18. 下列有關直流發電機的運用，何者錯誤？

(A) 分激發電機用於一般直流供電用

(B) 串激發電機適合做爲升壓機或是定電壓供電

(C) 過複激發電機適合做爲長距離供電用

(D) 差複激發電機適合做爲蓄電池充電或電焊。

6-4

( )19. 多部直流發電機在並聯運作時，下列哪項敘述正確？

(A) 容量要相同 (B) 極性要相同

(C) 極數要相同 (D) 電流要相同。

( )20. 兩台分激發電機作並聯運轉，供應 100 A 負載，若場電流不計，發電機 G_1 應電勢 $E_1 = 110$ V，電樞電阻 $R_{a1} = 0.1\ \Omega$；發電機 G_2 應電勢 $E_2 = 112$ V，電樞電阻 $R_{a2} = 0.1\ \Omega$，則端電壓爲

(A) 104 V (B) 106 V (C) 110 V (D) 114 V。

(　　)21. 積複激發電機並聯運用時需要加裝均壓線，以確保兩台發電機串激場繞組的電流分別爲
(A) 各機的電樞電流
(B) 與電樞電阻成反比所分配的負載電流
(C) 與分激場電阻成反比所分配的負載電流
(D) 與串激場電阻成反比所分配的負載電流。

(　　)22. 有 *A*、*B* 兩台直流發電機並聯運轉而供給負載，今欲變更負載分配，由 *B* 機逐漸轉移 *A* 機，但須維持系統之電壓於定值，則
(A) *A*、*B* 兩機之場電阻須同時增大
(B) *A*、*B* 兩機之場電阻須同時減少
(C) 將 *A* 機之場電阻增大，而 *B* 機減少
(D) 將 *A* 機之場電阻減少，而 *B* 機增大。

二、問答題

1. 比較各式直流發電機的特性與用途。

2. 採用多部發電機並聯供電的優點有哪些？

自我評量

3. 將二台 50 kW，250 V 之分激發電機 *A*、*B* 並聯使用。在無載時將其電壓均調整爲 250 V，若 *A* 機單獨使用，其滿載端電壓爲 244 V；若 *B* 機單獨使用，其滿載端電壓爲 238 V，在分激場電阻與電刷壓降忽略不計，求 (1) 兩部發電機電樞電阻分別爲何？ (2) 兩機並聯供應 240 A 時，端電壓爲何？ (3) 兩機可供應最大負載電流爲何？ (4) 兩機供應最大負載電流時，端電壓爲何？

4. 有 *A*、*B* 兩台複激式直流發電機並聯運轉，若 *A* 發電機容量爲 100 kW，*B* 發電機容量爲 50 kW，*A* 發電機的串激場繞組爲 0.2 Ω，欲使負載合理分配則 (1) *B* 發電機的串激場繞組爲多少 Ω ？ (2) 當負載電流爲 150 A，*A*、*B* 兩機的電樞電流分別爲何？ (3) 負載不變下，因故 *A* 機電樞電流瞬間上升至 110 A，此時均壓線的電流爲何？

心得筆記

CHAPTER 7

直流發電機之耗損及效率

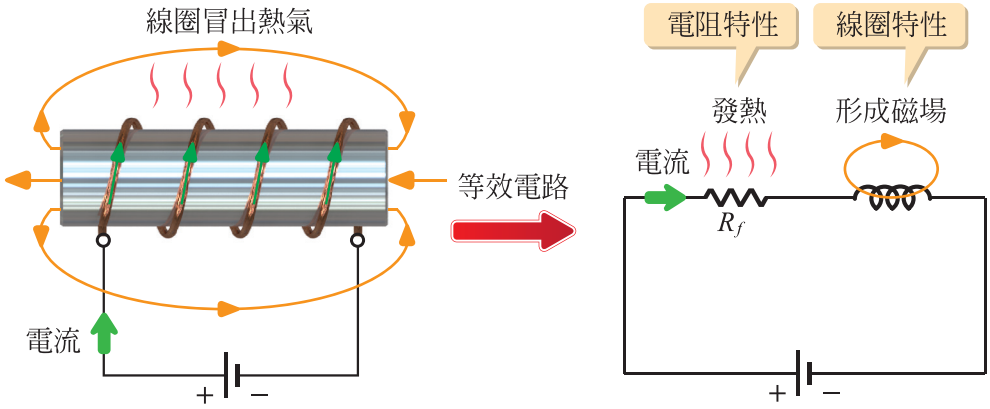
本章重點

直流發電機將原動機的機械能 (風力、內燃機) 轉變成直流電能過程中，受限於材料特性，部分能量會以發熱型態而消失，這些耗損除了造成能量浪費外，也會導致高溫而降低電機壽命。因此本章先以等效電路分析電機的構造，之後探討電機發生耗損的原因，最後說明耗損與效率的關係。

7-1 等效電路

在探討複雜的電機結構或現象時，常將其特性與功能彙整後，再以基本電路元件來表達其特性，此種方式稱爲等效電路。

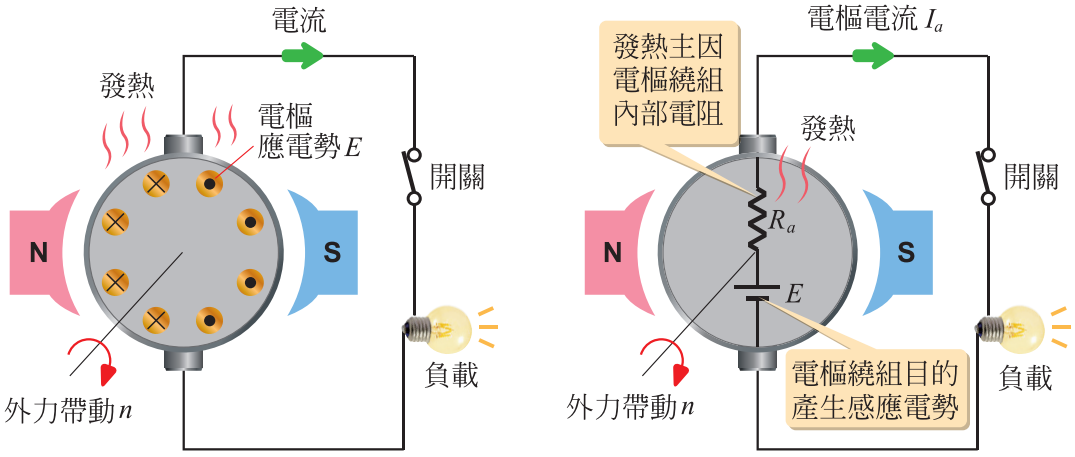
以圖 7-1(a) 爲例，激磁線圈通電之目的是爲了形成磁場，但是線圈會因爲本身電阻與電流的關係而發熱，這種**無法避免的現象所造成的能量浪費，就稱爲耗損或損失** (loss)。爲了描述激磁線圈的功能與特性，會以圖 7-1(b) 所示的等效電路圖來表達。其中線圈中抑制電流及產生發熱現象以電阻 R_f 來代表，而形成磁場的特性則以電感來表達。



(a) 構造簡圖　　(b) 等效電路圖

圖 7-1　激磁線圈構造與等效電路

以圖 7-2(a) 爲例，發電機電樞繞組目的是產生應電勢 E，當開關閉合時應電勢驅使電流往負載流動，但是電樞繞組也會因爲本身電阻與電流的關係造成壓降與發熱，爲了描述其特性，可以改用圖 7-2(b) 等效電路圖表示，其中電樞繞組產生的應電勢以電壓源 E 來表達，電樞繞組本身的壓降及發熱的特性則以電樞電阻 R_a 來代表。



(a) 構造簡圖　　(b) 等效電路圖

圖 7-2　電樞繞組構造與等效電路

7-2 直流發電機之耗損

受到材料與設計限制，電機在能量轉換過程中都會產生耗損，若是損失持續發生且大小幾乎不變者，稱爲固定損失。倘若損失會因爲負載大小而發生顯著變化者，則會被歸類爲變動損失。常見的損失分爲下列幾類：

(一) 銅損 (copper loss)(P_c)

銅損又稱爲電阻損，是指電流通過繞組時，由於繞組本身電阻所產生的發熱耗損 ($P_c = I^2R$)，直流電機的銅損包含：

1. 電樞繞組銅損

電樞繞組的功能是產生應電勢 E，但繞組本身電阻 R_a 在電樞電流 I_a 通過時會產生能量耗損因而發熱，其值爲 $P_{ca} = I_a{}^2R_a$ 。無載時，電樞電流 I_a 幾乎爲 0，因此銅損爲 0。而負載加倍，則電樞繞組銅損就會變爲 4 倍，因此電樞繞組銅損會被歸類成變動損失。

2. 分 (外) 激磁場繞組銅損

分 (外) 激磁場繞組的功能是當電流 I_f 通過繞組時產生磁通 ϕ_f 。繞組本身（含變阻器）電阻 R_f 也會因爲能量耗損而發熱，其值爲 $P_{cf} = I_f{}^2R_f$ 。

由於外激磁場繞組使用獨立電源供電，而分激磁場繞組則與負載並聯，兩者電流大小與負載幾乎無關，因此**分（外）激磁場繞組銅損被歸類爲固定損失。**

3. 串激磁場繞組銅損、中間極繞組與補償繞組之銅損

這三個繞組都與電樞繞組串聯，因此其銅損也隨著電流平方成正比改變，歸類成變動損失。

4. 電刷接觸損

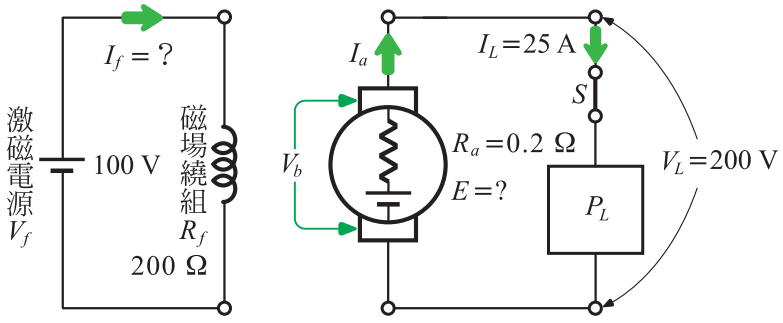
當電樞電流 I_a 通過電刷與換向器時也都會造成壓降及損失。每個電刷壓降 V_b 約爲 1 伏特，正負電刷合計爲 2 伏特。因此電刷銅損 $P_b = V_bI_a$ ，也被歸類成變動損失。

直流電機的銅損，主要以電樞繞組銅損爲主，整體而言，會將銅損視爲變動損。

範例 01

有一台直流他激式發電機，已知磁場繞組 200 Ω，激磁電壓 100 V，電樞電阻為 0.2 Ω，滿載時測得負載兩端電壓為 200 V，負載電流為 25 A，每只電刷壓降為 1 V。求本機：(1) 激磁電流、(2) 電樞應電勢、(3) 滿載時總銅損、(4) 無載時總銅損為何？

解 依照題意畫出他激式直流發電機等效電路圖，並將已知數值填入：



(1) 激磁電流 $I_f = \dfrac{V_f}{R_f} = \dfrac{100\text{ V}}{200\ \Omega} = 0.5\text{ A}$

(2) 電樞應電勢 $E = V_L + I_a R_a + V_b = 200\text{ V} + (25\text{ A} \times 0.2\ \Omega) + (2\text{ 個} \times 1\text{ V}) = 207\text{ V}$

(3) 滿載時 ($I_f = 0.5$ A，$I_a = 25$ A)

a. 磁場繞組銅損：$P_{cf} = I_f^2 R_f = 0.5^2 \times 200 = 50$ W

b. 電樞繞組銅損：$P_{ca} = I_a^2 R_a = 25^2 \times 0.2 = 125$ W

c. 電刷接觸損：$P_b = V_b I_a = (2\text{ 個} \times 1\text{ V}) \times 25 = 50$ W

合計總銅損 $P_c = 50 + 125 + 50 = 225$ W

(4) 無載時 ($I_f = 0.5$ A，$I_a = 0$ A)

a. 磁場繞組銅損：$P_{cf} = I_f^2 R_f = 0.5^2 \times 200 = 50$ W

b. 電樞繞組銅損：$P_{ca} = I_a^2 R_a = 0$ W

c. 電刷接觸損：$P_b = V_b I_a = (2\text{ 個} \times 1\text{ V}) \times 0\text{ A} = 0$ W

合計總銅損 $P_c = 50$ W

(二) 鐵損 (iron loss，P_i)

電機鐵心多以矽鋼薄片疊置而成，目的是形成低磁阻的路徑讓磁通ϕ順利通過。但是鐵心本身具有磁滯特性及導電性，因此磁通流動時也會因爲功率損失而發熱，稱之爲鐵心耗損 (core loss)，簡稱鐵損，若電機在額定電壓下以固定轉速運轉，則鐵損大小不變，因此歸類爲固定損失。

鐵損依據發生原因又可細分爲磁滯損與渦流損二類：

1. 磁滯損 (hysteresis loss，P_h)

電樞鐵心在旋轉過程中受到定子磁極切割，造成鐵心本身極性不斷改變，鐵心在磁化過程的循環稱爲磁滯迴線，變化過程中的能量損失稱爲磁滯損。在電機**鐵心中加矽可以降低磁阻，使鐵心不易老化並可減少磁滯損失。**

磁滯損與圖 2-10 磁滯迴線內所含面積成正比，電機的磁滯損爲：

$$P_h = K_h B_m^X f G \qquad (7\text{-}1)$$

P_h ：磁滯損 (瓦特；W)　　K_h ：比例常數，因鐵心材料而定

B_m ：最大磁通密度 (韋伯 / 平方公尺；Wb/m^2)　G ：鐵心重量 (公斤；kg)

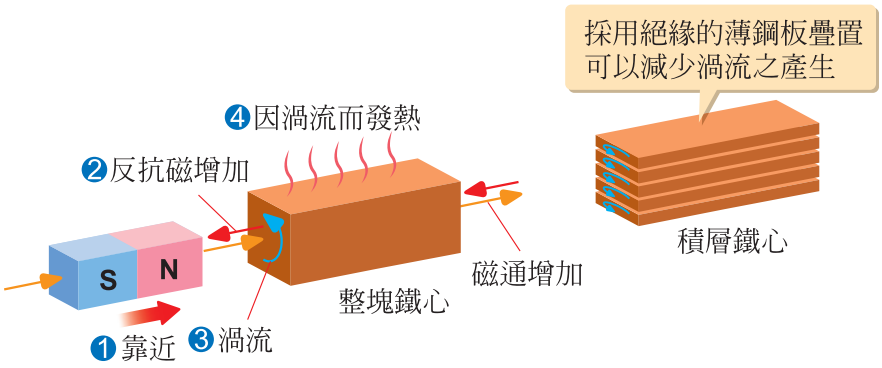
f ：頻率 (赫茲；Hz)

X ：司坦麥茲係數（steinmetz index）$X = \begin{cases} 2 : B_m \geq 1\ Wb/m^2 \\ 1.6 : B_m < 1\ Wb/m^2 \end{cases}$

2. 渦流損 (eddy current loss，P_e)

以圖 7-3(a) 爲例，將磁鐵向右靠近導體 (鐵心) 時，由於磁通量增加，依據冷次定理，鐵心會產生逆時針漩渦狀的電流 (渦流) 以反抗磁通增加。若將磁鐵遠離導體或是磁極方向對調時，渦流也跟著改變方向，電流在鐵心內交互流動而造成發熱。

改將整塊**鐵心如圖 7-3(b) 先分解成許多疊片** (lamination)，**將每片塗佈絕緣樹脂後再並排疊置**，由於渦流路徑侷限在很小區域中，因此感應電壓低，形成的渦流變小，**可減少渦流損**，電機的渦流損爲：



(a) 電樞鐵心產生的渦流　　(b)採用薄片疊置

圖 7-3　渦流損與對策

$$P_e = K_e B_m^2 f^2 t^2 G \qquad (7\text{-}2)$$

上式中 P_e ：渦流損 (瓦特；W)

B_m ：最大磁通密度 (韋伯 / 平方公尺；Wb/m^2)

K_e ：比例常數，因電機鐵心材料而定　f ：頻率 (赫茲；Hz)

t ：鐵心疊片厚度 (公尺；m)　　G ：鐵心重量 (公斤；kg)

渦流現象雖然會造成電器發熱與損失，但是巧妙運用此特性，也能開發出許多產品。例如市售的 IH(Induction Heating) 調理爐 (電磁爐)，以及下冊介紹的感應電動機等。

範例 02

有一部直流發電機運用於 1000 rpm 時，已知磁滯損為 300 瓦，渦流損為 100 瓦。倘若磁通維持不變，當原動機速率上升至 2000 rpm 時，求：(1) 磁滯損、(2) 渦流損為多少？

解　當轉速 (n) 加倍時，電樞鐵心所產生的應電勢頻率 (f) 也加倍。因此：

(1) 磁滯損 $P_h = K_h B_m^X f G$，

$$P_h \propto f \Rightarrow P_h' = 300\ \text{W} \times \left(\frac{2000\ \text{rpm}}{1000\ \text{rpm}} \right) = 600\ \text{W}$$

(2) 渦流損 $P_e = K_e B_m^2 f^2 t^2 G$，

$$P_e \propto f^2 \Rightarrow P_e' = 100\ \text{W} \times \left(\frac{2000\ \text{rpm}}{1000\ \text{rpm}} \right)^2 = 400\ \text{W}$$

(三) 機械損失

電機在旋轉過程因爲**摩擦所造成的損失統稱爲機械損失**，包括：軸承摩擦損、電刷與換向器摩擦損以及風阻損失等。轉速越快，機械損失越大，但與負載無關，因此機械損失歸類爲固定損。

(四) 雜散損失

當外加負載時會有**少部分難以估計的損失稱爲雜散損**。由於無法測定，因此大型電機會以輸出容量的 1 % 來估計，小型電機則會加以忽略。

隨堂練習

(　　) 1. 直流發電機的負載量由輕載增到滿載，下列哪一種銅損的大小不變？
(A) 電樞繞組銅損　(B) 分激場繞組銅損
(C) 串激場繞組銅損　(D) 電刷接觸電阻損失。

(　　) 2. 直流電機鐵心通常採用薄矽鋼片疊製而成，其主要目的為何？
(A) 減低銅損　(B) 減低磁滯損
(C) 減低渦流損　(D) 避免磁飽和。

(　　) 3. 有一部直流發電機滿載時，固定損失為 600 W，變動損失為 600 W，求半載時總耗損為多少瓦特？　(A) 1200 W　(B) 750 W　(C) 600 W　(D) 300 W。

(五) 耗損對電機的影響

1. 耗損造成溫度上升，限制電機容量並增加成本

電機運轉時產生的耗損最後都轉變成熱能，導致電機溫度上升，直至散熱速度與發熱速度相等時，溫度上昇才趨緩。高溫環境除了容易造成線圈燒毀外；**溫度每上升 10 °C，絕緣材料的電阻值減半**，也容易引發漏電或燒毀。

爲了避免溫度升高，除了添購散熱設備外，也可以使用耐溫更高的材料，我國國家標準 (CNS) 有關絕緣材料之最高容許溫度規範可參考表 7-1：

表 7-1　最高容許溫度

絕緣材料級別	Y	A	E	B	F	H	C
最高容許溫度 (°C)	90	105	120	130	155	180	180 以上

2. 耗損造成輸出功率減少，電機效率降低

以圖 7-4 所示的風力發電機爲例，在相同輸入條件 (風能) 下，使用較佳的材料或設計，降低發電機的損失，則輸出的電能越大，效率就越佳。

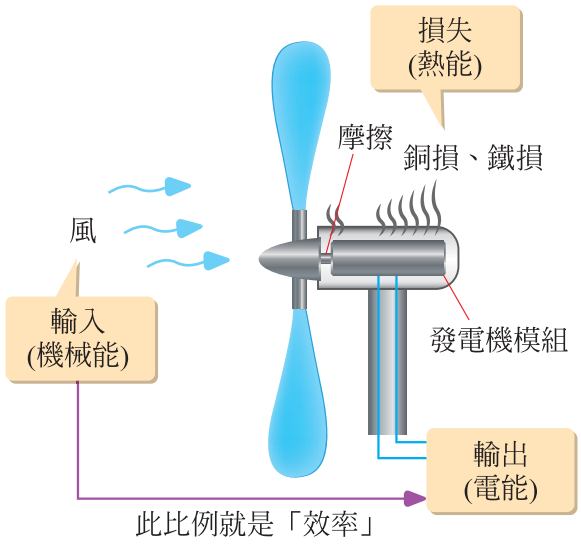


圖 7-4　發電機損失與效率的關係

隨堂練習

(　　) 1. 直流電機的損失大多以何種能量形態表現？

(A) 動能　(B) 電能　(C) 熱能　(D) 光能。

(　　) 2. 溫度每昇高 10 °C，絕緣電阻值將

(A) 降低為原來的 1/2 倍　(B) 增大為原來的 1.5 倍

(C) 增大為原來的 2 倍　(D) 維持不變。

7-3 效率 (efficiency)

(一) 效率的定義

效率爲輸出功率與輸入功率之比值，一般以百分比來表示，即

$$\text{效率 } \eta = \frac{\text{輸出功率 } P_o}{\text{輸入功率 } P_{in}} \times 100\ \% \qquad (7\text{-}3)$$

(二) 效率的分類

實際計算電機的效率時，有下列幾種方式：

1. 實測效率 (measured efficiency)：機器組立後使用實測法直接測定電機的輸入功率與輸出功率，並將結果代入公式 7-3 直接計算出效率。此法最準確，但礙於設備因素，只適用於小型電機。
2. 公定效率 (conventional efficiency)：對於發電機而言，機械功率 (如圖 7-4 的風能) 測量不易。因此會將較易測量的輸出電功率 (P_o) 加上損耗功率 (P_{loss}) 後做爲輸入功率 (P_{in}) 來取代機械功率，再利用公式 7-4 計算出公定效率。

$$\text{公定效率 } \eta\,\% = \frac{\text{輸出功率 } P_o}{\text{輸出功率 } P_o + \text{損失}_{loss}} \times 100\ \% \qquad (7\text{-}4)$$

損失與效率的關係如圖 7-5 所示。

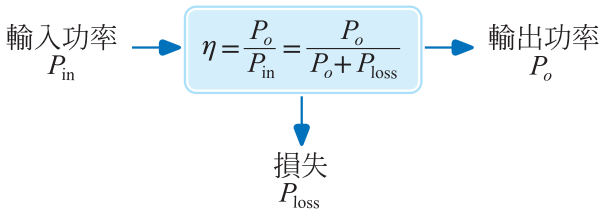


圖 7-5　損失與效率的關係

3. 全日效率 (all day efficiency)：由於用電量會因時間而變動，因此會以全日效率來計算一天 24 小時之平均效率，全日效率爲：

$$\text{全日效率} = \frac{\text{全日輸出能量}}{\text{全日輸出能量} + \text{全日固定損失能量} + \text{全日變動損失能量}} \times 100\ \% \quad (7\text{-}5)$$

範例 03

有一部 3 kW 之直流發電機，已知滿載時固定損失為 400 W，變動損失為 600 W。求本機：(1) 滿載效率、(2) 半載效率各為多少？

解 (1) 滿載時：已知輸出功率 $P_o = 3000$ W；

總損失 $P_{\text{loss}} = 400 + 600 = 1000$ W，

滿載效率：$\eta = \dfrac{P_o}{P_o + P_{\text{loss}}} = \dfrac{3000}{3000+1000} = 0.75 = 75\ \%$

(2) 半載時：輸出功率 $P_o = 3000 \times \dfrac{1}{2} = 1500$ W ；固定損失為 400 W 不變，

變動損失為 $P_o = 600 \times (\dfrac{1}{2})^2 = 150$ W ，總損失 $P_{\text{loss}} = 400 + 150 = 550$ W，

半載效率：$\eta_{半} = \dfrac{1500}{1500+550} = 0.731 = 73.1\ \%$

範例 04

有一部 10 kW 直流發電機，其滿載銅損為 800 W，鐵損為 200 W，若在一日運轉中，8 小時為滿載，10 小時為半載，其餘時間無載，求此機：

(1) 全日輸出能量、(2) 全日固定損失能量、(3) 全日變動損失能量、

(4) 全日效率分別是多少？

解 (1) 全日輸出能量 $W_o = (10\ \text{kW} \times 1 \times 8\ \text{hr}) + (10\ \text{kW} \times \dfrac{1}{2} \times 10\ \text{hr}) = 130\ \text{kWH}$

(2) 全日固定損失能量 $W_i = 200\ \text{W} \times 24\ \text{hr} = 4.8\ \text{kWH}$

(3) 全日變動損失能量

$W_c = (800\ \text{W} \times 1 \times 8\ \text{hr}) + (800\ \text{W} \times \dfrac{1}{2}^2 \times 10\ \text{hr}) = 8.4\ \text{kWH}$

(4) 全日效率 $\eta = \dfrac{130}{130+4.8+8.4} \times 100\ \% = 90.8\ \%$

(三) 效率與輸出的關係

由範例 03 可知發電機的效率會隨著負載大小而變；如圖 7-6 所示爲發電機負載與效率之關係曲線。無載時由於輸出功率爲零，故效率爲零。考量實用性，電機會設計在滿載附近時效率最高。爲使電機發揮較佳的效率，應儘量避免電機在輕載或超載情況使用。

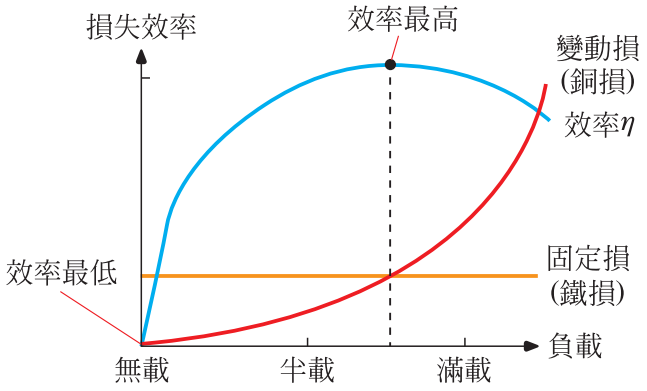


圖 7-6　負載大小與效率之關係

一般而言，直流電機的容量越大，效率越高。相同容量時，高壓機種由於電流小、銅損低，因此效率也會比低壓機種略高。

隨堂練習

(　　) 1. 若直流發電機之輸出功率 P_o、輸入功率 P_i 及總損失功率 P_l，則其效率 η 的計算，下列何者正確？

(A) $\eta = \dfrac{P_o}{P_o - P_l}$　(B) $\eta = \dfrac{P_o - P_l}{P_i}$　(C) $\eta = \dfrac{P_i - P_l}{P_o - P_l}$　(D) $\eta = \dfrac{P_i - P_l}{P_o + P_l}$。

(　　) 2. 有一部直流發電機在滿載時，可變損失為 1200 W，固定損失為 300 W，則在半載時總損失約為多少？

(A) 1500 W　(B) 900 W　(C) 750 W　(D) 600 W。

(　　) 3. 某 100 kW 直流發電機，固定損和滿載時的可變損失均為 6 kW，若此發電機於一天內滿載 4 小時，半載 12 小時，無載 8 小時，則此電機全日電能損失為多少？

(A) 144 kWH　(B) 186 kWH　(C) 240 kWH　(D) 280 kWH。

單元摘要

第三章

1. 線圈在磁場中旋轉時每經過一對磁極 (N 極與 S 極) 就會感應產生一個正弦波。
2. 直流發電機必須透過換向器將電樞產生的交流電轉變成直流電後，透過電刷傳遞給負載使用。
3. 直流發電機應電勢 $E=\frac{PZ}{60a}n\phi=Kn\phi$ ，感應電勢與轉速 n 及磁通量 ϕ 成正比，藉由調整原動機的轉速或是磁場繞組的電流值來獲得所需的電壓。

第四章

4. 電樞鐵心採用含矽量 1 % ～ 2 %，厚度 0.35 mm ～ 0.5 mm 的矽鋼薄片疊置而成。鐵心加矽可以減少磁滯損，採用薄片疊積可以減少渦流損。鐵心設計成斜型槽，可減少磁阻變化，減少噪音與振動。
5. 磁場繞組分爲 (1) 分激磁場繞組 (線徑細、匝數多)、(2) 串激磁場繞組 (線徑粗、匝數少) 以及 (3) 複激磁場繞組 (同時繞有分激磁場繞組及串激磁場繞組)。
6. 2 極電機中，線圈旋轉 1 週會產生 1 個正弦波 ($\theta_e=360°$)，一個極距相當於 180° 電機角。
7. 同一個線圈兩邊間跨距稱爲線圈節距，線圈節距等於極距 (180° 電工度) 者稱爲全節距。略小於極距 (< 180° 電工度) 稱爲短 (部份) 節距。
8. 疊繞的線圈引接線接到相鄰的換向片，電流路徑數 $a=mP$，適用於低壓大電流，採用前進繞可節省用銅量，4 極以上必須使用均壓線。
9. 波繞的線圈引接線接到接近兩個極距 (360° 電機角) 之換向片。電流路徑數 $a=2m$，適用於高壓小電流，採用後退繞可節省用銅量，視情況必須使用虛設繞組。
10. 電樞導體數量不變下，電流路徑數 (a) 越多，每個路徑導體數 (Z) 變少，輸出電壓 (V) 降低，輸出電流 (I) 變大。

單元摘要

第五章

11. 電樞繞組通電過程中產生的電樞磁場，對原本磁場繞組所供給的主磁場造成的干擾現象稱爲電樞反應。無載時可視爲無電樞反應。
12. 電樞反應造成直流發電機前極尖磁通減少，後極尖磁通增多，磁中性面隨著旋轉方向偏移。
13. 電樞反應的交磁效應，使得合成磁場發生畸斜，造成換向困難。去磁效應使得磁通量減少，應電勢降低。
14. 補償繞組裝在主磁極極面槽內，電流方向與電樞電流相反，是抵消電樞反應最有效的方法。
15. 中間極的目的是改善換向，直流發電機主磁極與中間極依據旋轉方向爲 $\overrightarrow{\text{NsSn}}$ 。
16. 直流發電機電刷沒有移動或移動角度不足，使得換向電流變化先慢後快者稱爲欠換向，易造成電刷後刷邊燒燬。

第六章

17. 無載特性曲線測量激磁電流 I_f 與應電勢 E 的關係，又稱爲磁化或飽和特性曲線，起初應電勢隨激磁電流正比增加呈一直線；當鐵心飽和後，應電勢的變化趨緩呈現曲線。
18. 負載特性曲線測量測量負載電流 I_L 與負載端電壓 V_L 的關係，又稱爲外部特性曲線。
19. 電壓調整率 $V.R.\% = \dfrac{V_{NL} - V_{FL}}{V_{FL}} = \dfrac{E - V_L}{V_L} \times 100\%$ ，越小代表電壓越穩定，理想值爲 0。
20. 外激式發電機電壓調整率低，電壓調整範圍大，但需要外加激磁電源。
21. 直流分激式發電機順利建立電壓的條件 (1) 適量的剩磁、(2) 磁通方向與剩磁方向相同、(3) 場電阻小於臨界場電阻、(4) 轉速高於臨界轉速、(5) 轉向、場電阻連接及剩磁方向必須正確
22. 分激式發電機電壓調整率較外激式大，但是不需外部激磁，具有短路保護。
23. 串激式發電機無載時無法建立電壓，電壓隨負載增加時而上升，電壓調整

率爲負值，適用於升壓或是定電流場所。

24. 複激式發電機依據接線方式分爲：長並聯 (電樞先串再並) 與短並聯 (電樞先並再串)，兩者特性相似。依據磁通方向分爲：積複激 ($\phi_T = \phi_f + \phi_s$) 與差複激 ($\phi_T = \phi_f - \phi_s$)，兩者特性差異很大。
25. 過複激發電機電壓調整率爲負值，適用於長距離輸電。平複激發電機電壓調整率爲 0，欠複激電壓調整率略大於 0，差複激發電機電壓調整率最大。
26. 分激式發電機並聯運用時，負載大小與發電機容量成正比，與電樞電阻成反比。
27. 複激式發電機並聯運用時，必須加裝均壓線，串激場電阻和容量成反比，容量和擔任之負載成正比。

第七章

28. 銅損 (P_c) 是指電流通過繞組本身電阻時所產生的發熱耗損 ($P_c = I^2R$)，除了分 (外) 激場繞組外，大部分的銅損與負載有關，歸類爲變動損。
29. 鐵損 (P_i) 分爲磁滯損 (P_h) 與渦流損 (P_e) 二大類，其值與負載無關，歸類爲固定損。
30. 磁滯損 $P_h = K_h B_m^X f G$，鐵心加矽可以減少磁滯損。
31. 渦流損 $P_e = K_e B_m^2 f^2 t^2 G$，鐵心採用絕緣薄片疊置可以減少渦流損。
32. 電機運轉時產生的耗損轉變成熱能，導致溫度上升；溫度每上升 10°C，絕緣電阻值減半。
33. 效率爲輸出功率與輸入功率之比值，即 $\eta = \dfrac{P_o}{P_{\text{in}}} = \dfrac{P_o}{P_o + P_{\text{loss}}}$，無載時效率爲零，滿載附近時效率最高。

自我評量

一、選擇題

7-2

( ) 1. 直流電機的鐵心損失是指
(A) 渦流損失及機械損失 (B) 渦流損失及磁滯損失
(C) 磁滯損失及機械損失 (D) 軸承及電刷摩擦損失。

( ) 2. 爲了減低渦流損，直流電機會採用何種措施？
(A) 採用高導磁係數鐵心 (B) 鐵心採用薄矽鋼片疊製而成
(C) 增快轉速 (D) 提高電壓。

( ) 3. 某直流電機於 500 rpm 時之渦流損失 P_e 爲 30 W，磁滯損失 P_h 爲 100 W，當磁通密度保持不變時，在 1000 rpm 時，渦流損失 P_e 及磁滯損失 P_h 分別爲何？
(A) $P_e=30$ W，$P_h=100$ W (B) $P_e=60$ W，$P_h=200$ W
(C) $P_e=120$ W，$P_h=200$ W (D) $P_e=120$ W，$P_h=400$ W。

( ) 4. 一直流電機在轉速 500 rpm 時之鐵損爲 200 W，在 1000 rpm 時之鐵損爲 500 W，在磁通密度保持不變時，則下列敘述何者正確？
(A) 渦流損與轉速成正比
(B) 磁滯損與轉速平方成正比
(C) 在 1000 rpm 時之磁滯損爲 100 W
(D) 在 500 rpm 時之渦流損爲 50 W。

( ) 5. 負載變化時，大小不變的損失稱爲
(A) 可變損 (B) 雜散負載損 (C) 固定損 (D) 銅損。

( ) 6. 電機內的銅損與負載大小
(A) 成正比 (B) 平方成正比 (C) 成反比 (D) 平方成反比。

( ) 7. 某直流電機在 30 °C 時的絕緣電阻爲 400 MΩ，當運轉時溫度升高爲 60 °C，則其絕緣電阻應爲
(A) 200 MΩ (B) 100 MΩ (C) 50 MΩ (D) 25 MΩ。

( ) 8. 電磁爐是利用哪一種能量而產生作用？
(A) 機械損失 (B) 電樞銅損 (C) 場繞組銅損 (D) 鐵心損失。

( ) 9. 設直流電機的轉速固定不變，下列哪一種損失與負載大小無關？
(A) 銅損 (B) 機械損
(C) 串激場繞組銅損 (D) 電刷接觸電阻損失。

7-3

( )10. 2000 W 的直流發電機，滿載時固定損失爲 200 W。已知發電機半載效率爲 80 %，則滿載時總損失爲多少？
(A) 800 W (B) 600 W (C) 400 W (D) 250 W。

( )11. 同上題滿載效率爲多少？
(A) 90.1 % (B) 86.6 % (C) 83.3 % (D) 80 %

( )12. 一 3 kW 之直流發電機，於滿載運轉時，總損失爲 1000 W，則此時運轉效率爲 (A) 90 % (B) 85 % (C) 75 % (D) 70 %。

( )13. 有台額定滿載輸出 2 kW 之直流發電機，滿載時效率爲 80 %，求該機於滿載時總損失爲多少？
(A) 400 W (B) 500 W (C) 1600 W (D) 2500 W。

( )14. 有一部 20 kW 直流發電機，滿載時固定損失爲 1200 W，可變損失爲 1200 W，其半載效率爲多少？
(A) 92.4 % (B) 89.3 % (C) 87 % (D) 80.6 %。

( )15. 有一台 2000 W 直流發電機，滿載時固定損失爲 200 W。已知此發電機滿載效率爲 80 %，則半載效率爲何？
(A) 72.5 % (B) 78.4 % (C) 83.3 % (D) 88 %。

( )16. 電機在滿載時的損失，比輕載時
(A) 少 (B) 多 (C) 相等 (D) 不一定。

( )17. 直流發電機無載時效率爲
(A) 100 % (B) 90 % (C) 50 % (D) 0 %。

自我評量

二、問答題

1. 說明耗損對直流發電機的影響。

2. 有一部 330 V、40 A 直流發電機，以柴油引擎作爲原動機，若發電機之效率爲 80 %，則 (1) 發電機輸出功率、(2) 發電機輸入功率、(3) 柴油引擎需要提供的馬力數爲多少？

3. 有一部 100 V、100 A 直流分激式發電機，磁場電阻爲 50 Ω，電樞電阻爲 0.05 Ω，滿載時，電刷壓降爲 2 V，機械損及鐵損爲 800 W，雜散負載損以輸出之 1 % 計，試求滿載時 (1) 輸出功率、(2) 總耗損、(3) 效率分別爲何？

4. 200 kW 直流發電機，滿載時之變動損失爲 20 kW，定值損失 5 kW，若此機每天滿載 4 小時，半載 8 小時，其餘時間爲無載，試求此機之 (1) 滿載效率、(2) 半載效率、(3) 無載效率、(4) 全日效率分別是多少？