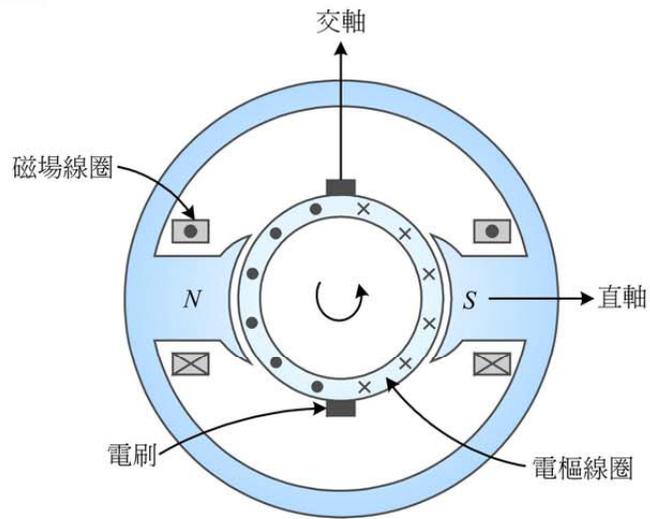


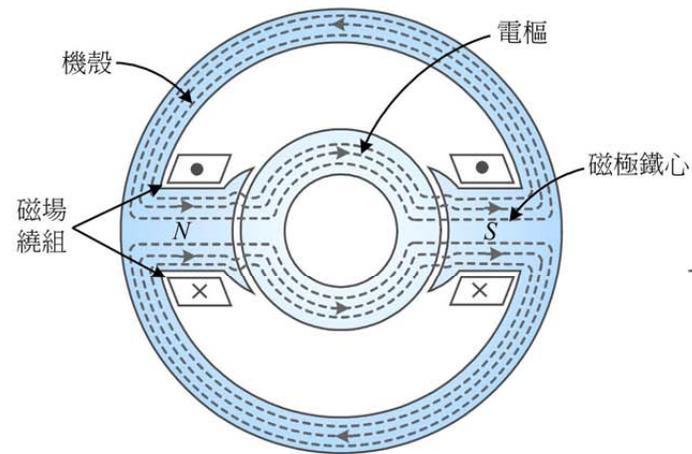
Ch8 直流電機

- ▶ 直流電機中將機械能轉換為直流電能者，為直流發電機；而將直流電能轉換為機械能者，為直流電動機。兩者在功用上雖然不同，但構造卻完全一樣，都是以轉子繞組為電樞 (armature)，以定子繞組為場 (field)，或稱激磁場。

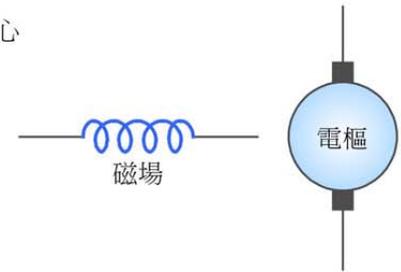
8-1 直流電機的構造



(a) 兩極直流電機的簡圖



(b) 兩極直流電機磁路



(c) 直流電機等效電路表示符號

圖 8-1 直流電機的簡圖、磁路和等效電路表示符號

8-2 直流電機的基本原理

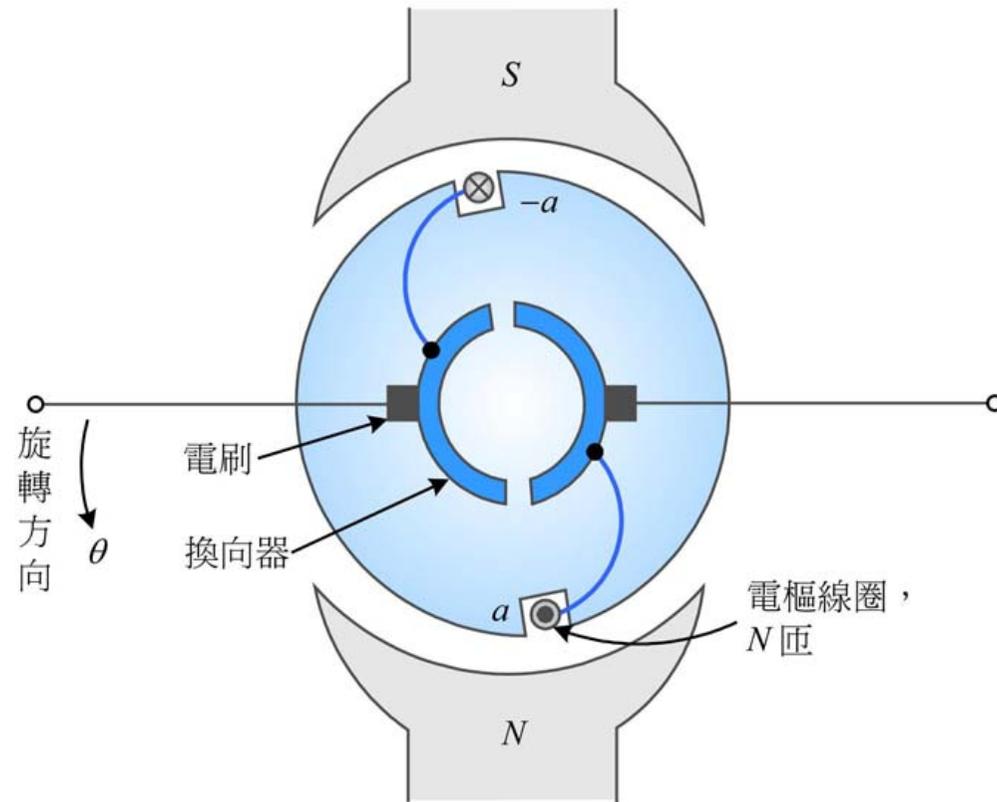


圖 8-2 基本直流電機結構及磁通空間分布圖

8-2 直流電機的基本原理

一、場磁通分布

- ▶ 此電機之場繞組所產生的氣隙磁通分布如圖8-3所示，相對於圖8-2的電機角 θ 而言為一近似方波函數，在這樣的場磁通分布環境之下，

$$\phi = BA = B \cdot \pi r \ell \quad (8-1)$$

8-2 直流電機的基本原理

一、場磁通分布 (續)

- ▶ 圖8-3所示的場磁通分布是單純地考慮場繞組電流 (field current) I_f 的激磁效應，因著定子幾何結構的對稱性之故，當以直流 I_f 通入場繞組時，隨即在氣隙中產生如圖所示的主磁場對稱分布，其大小與 I_f 成正比。同時，這樣的對稱性分布，分別在角度 $\theta = 0$ 與 $\theta = \pi$ 處顯示了磁場南、北極的交接點，稱之為磁中性點 (neutral position)，為最適合電樞電流換向之處，故圖8-2中的電刷與換向器就安排在磁中性點的位置。

8-2 直流電機的基本原理

一、場磁通分布 (續)

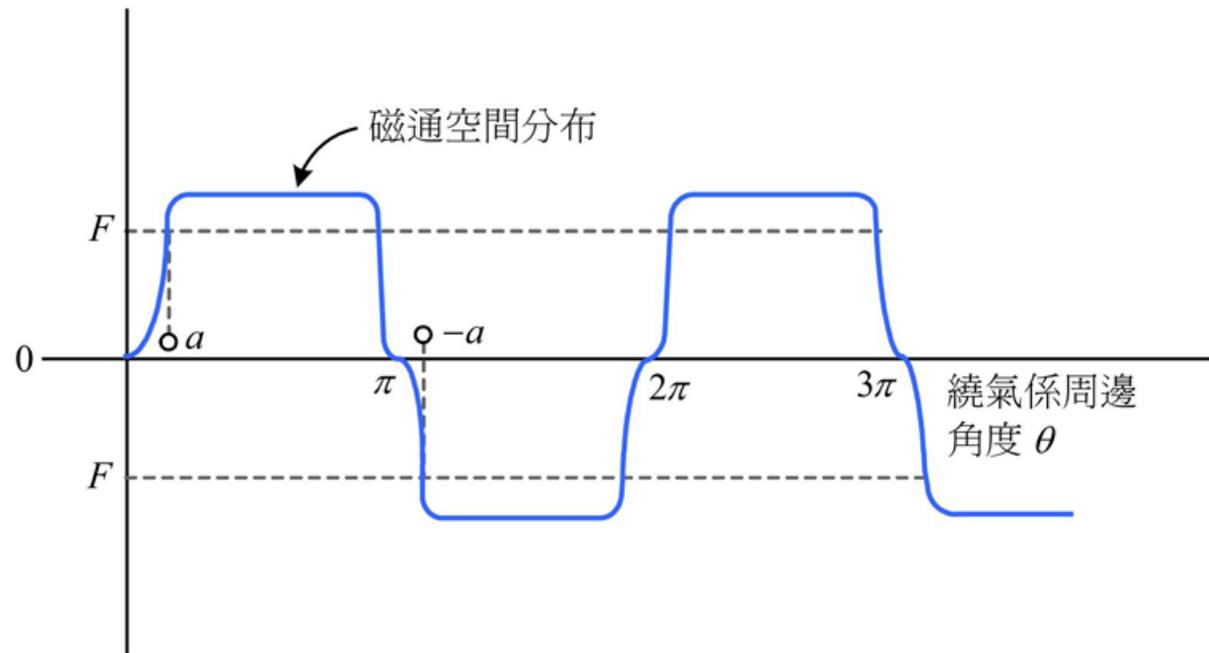


圖 8-3 基本直流電機氣隙磁通空間分布圖

8-2 直流電機的基本原理

二、電樞對外做功

(一) 電樞感應電動勢

- ▶ 今轉子及其槽內之導體都是在相同的磁場環境（磁通密度 B ）下運轉，令角速度為 ω ，則槽1導體與槽2導體各自感應出電動勢大小為

$$e = Blv = Blr\omega \quad (8-2)$$

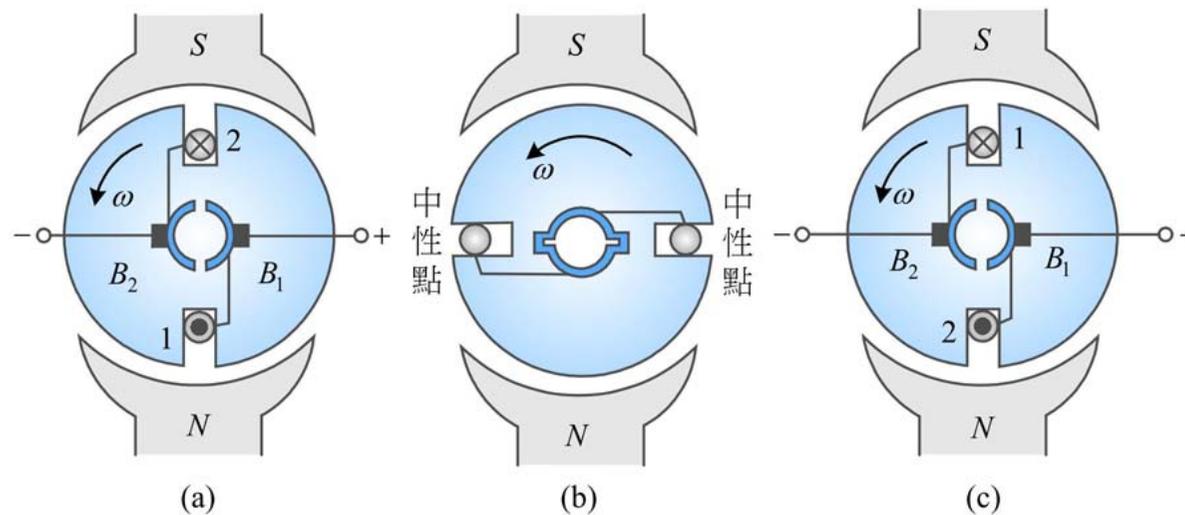


圖 8-4 直流發電機的換向情形

8-2 直流電機的基本原理

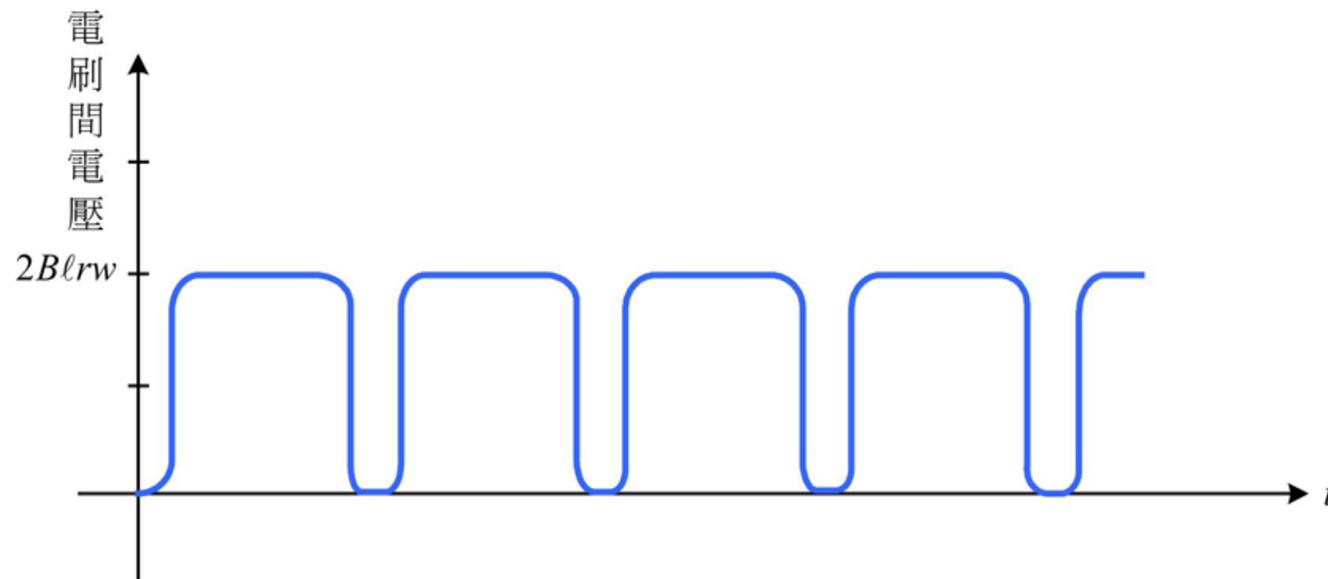


圖 8-5 電刷間的電壓波形

8-2 直流電機的基本原理

▶ Z極：
$$E_a = \frac{Z}{m} e = \frac{Z}{m} B \ell r \omega \quad (8-3)$$

▶ P極：
$$E_a = \frac{PZ}{60 m} \phi n = K_n \phi n \quad (8-9)$$

▶ 直流電機的電樞電壓可由下列三個條件決定：

1. 電機設計常數 K_ω 或 K_n ；
2. 電機每極平均磁通量 ϕ ；
3. 轉子轉速 n 或角速度 ω 。

8-2 直流電機的基本原理

例 8-1

一部六極直流電機，每極磁通 0.003 韋伯，電樞導體有 720 根，連接成單重疊繞，電樞導體並聯路徑 m 等於極數 P ，此直流發電機轉速為 1100 rpm，試求發電機電樞感應電勢為若干？

解

$$E_a = \frac{PZ}{60m} \phi n = \frac{P \times 720}{60 \times P} \times 0.003 \times 1100 = 396 \text{ V}$$

End

8-2 直流電機的基本原理

例 8-2

一部直流發電機的磁通保持不變，當轉速在 1800 rpm 時，感應電勢為 200 V，當轉速下降至 1600 rpm 時，試求此時發電機感應電勢為若干？

解

$$\because E_a = K_n \phi n, E'_a = K_n \phi n'$$

$$\therefore \frac{E_a}{E'_a} = \frac{n}{n'}$$

$$E_a = E'_a \frac{n}{n'} = 200 \times \frac{1600}{1800} = 177.78 \text{ V}$$

End

8-2 直流電機的基本原理

(二) 電樞發展轉矩

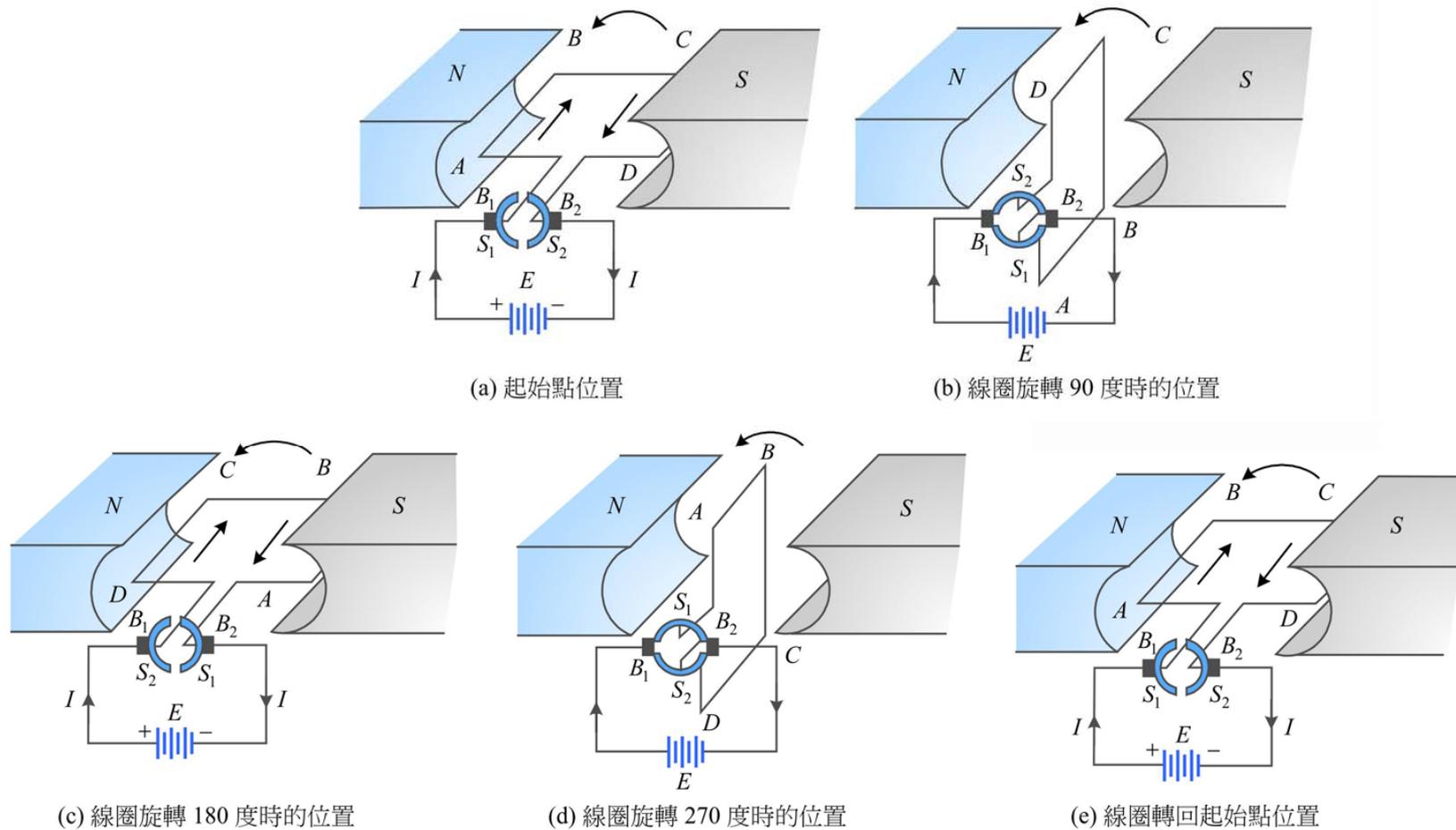


圖 8-8 直流電機之電樞發展轉矩原理

8-2 直流電機的基本原理

- ▶ 圖8-8(a)中與定子磁場方向垂直 (90°) 的導體 \overline{AB} 與 \overline{CD} 各自所受磁場力之大小為

$$F_{AB} = F_{CD} = I\ell B \quad (8-10)$$

- ▶ 其中 I 為兩導體內所流通之電流值， ℓ 為電樞之有效軸長度， B 為磁極之磁通密度。

8-2 直流電機的基本原理

- ▶ 以實際運用之 P 極直流電機來看，電樞內之總導體數為 Z ，且每個轉子槽內共有 m 條並聯相接的導體，則當電樞總電流為 I_a 時，每導體電流即為 I_a / m ，則電樞整體所受之磁場力總和為

$$F_a = Z \times \frac{I_a}{m} \ell B \quad (8-11)$$

- ▶ 以 r 為電樞半徑可得電樞發展轉矩值為

$$T = F_a \times r = Z \times \frac{I_a}{m} \ell B \times r \quad (8-12)$$

$$T = \frac{ZI_a \ell r}{m} \times \frac{P}{2\pi r \ell} \phi = \frac{PZ}{2\pi m} \phi I_a = K_\omega \phi I_a \quad (8-13)$$

8-2 直流電機的基本原理

▶ 故由上式可知，直流電動機之電樞發展轉矩可由下列三個因素決定：

1. 電機設計常數 K_{ω} ；
2. 電機激磁場磁通 ϕ ；
3. 電機電樞電流 I_a 。

▶ 比對 (8-13) 式的電樞發展轉矩與 (8-7) 式的電樞感應電壓，得到一個重要的關聯：就是轉矩常數與電壓常數為同一個 K_{ω} ，統稱為電機之設計常數。這使我們確認運轉中的直流電機之機械功率與電功率間的轉換關係

$$T \times \omega = E_a \times I_a \quad (8-14)$$

8-2 直流電機的基本原理

例 8-3

一部四極，單重疊繞直流電動機，電樞總導體數 800 根，電樞電流 50 A，電流路徑數為 4，每極磁通量 0.05 韋伯，試求此電動機所產生的轉矩為若干？

解

$$T = \frac{PZ}{2\pi m} \phi I_a = \frac{4 \times 800}{2\pi \times 4} \times 0.05 \times 50 = 318.3 \text{ N} \cdot \text{m}$$

End

8-2 直流電機的基本原理

例 8-4

一部六極直流電動機在額定電樞電流及磁通量時產生 200 N·m 轉矩，若將電機電樞電流增加 20%，場磁通量減少 10%，試求此時電動機的轉矩變為若干？

解

$$\because T = K_{\omega} \phi I_a, \quad T' = K_{\omega} \phi' I'_a$$

$$\therefore \frac{T}{T'} = \frac{\phi I_a}{\phi' I'_a}$$

$$T = T' \frac{\phi I_a}{\phi' I'_a} = 200 \frac{0.9 \phi' \times 1.2 I'_a}{\phi' I'_a} = 216 \text{ N} \cdot \text{m}$$

End

8-3 電樞反應

$$\text{電樞感應電動勢 } E_a = K_\omega \phi I_a \quad (8-15)$$

$$\text{電樞發展轉矩 } T = K_\omega \phi \omega$$

- ▶ 其中 ϕ 為電機主磁場的磁通量，而 I_a 與 ω 則是電樞在磁場 ϕ 中的行為表現。
 1. 磁中性面偏移；
 2. 去磁效應 (demagnetizing effect)。

8-3 電樞反應

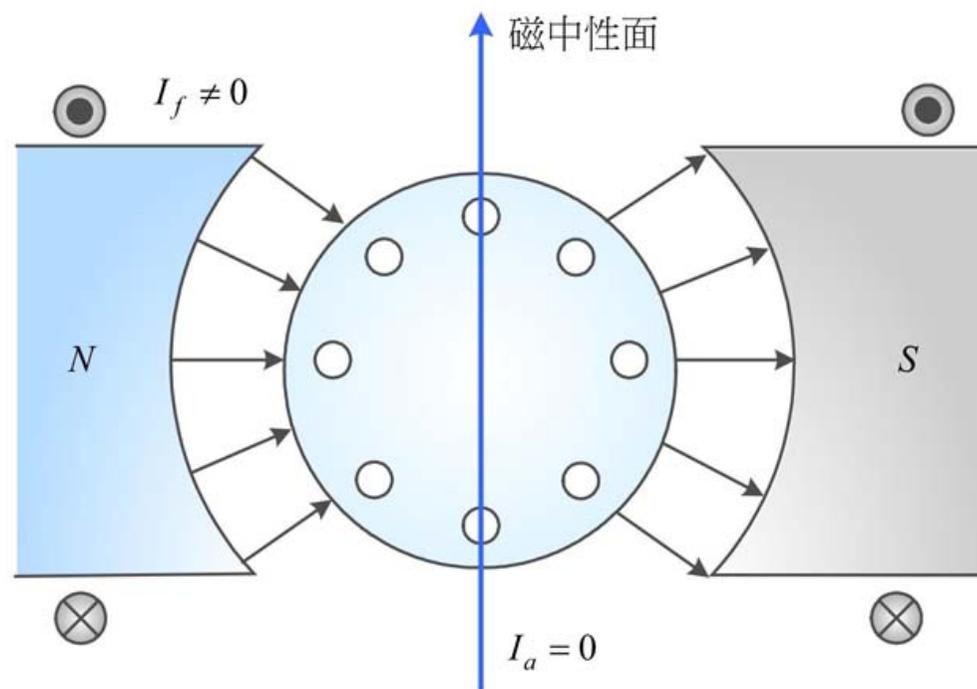


圖 8-9 激磁電流 $I_f \neq 0$ 且電樞電流 $I_a = 0$ 時之主磁場磁通分布狀態

8-3 電樞反應

一、磁中性面偏移

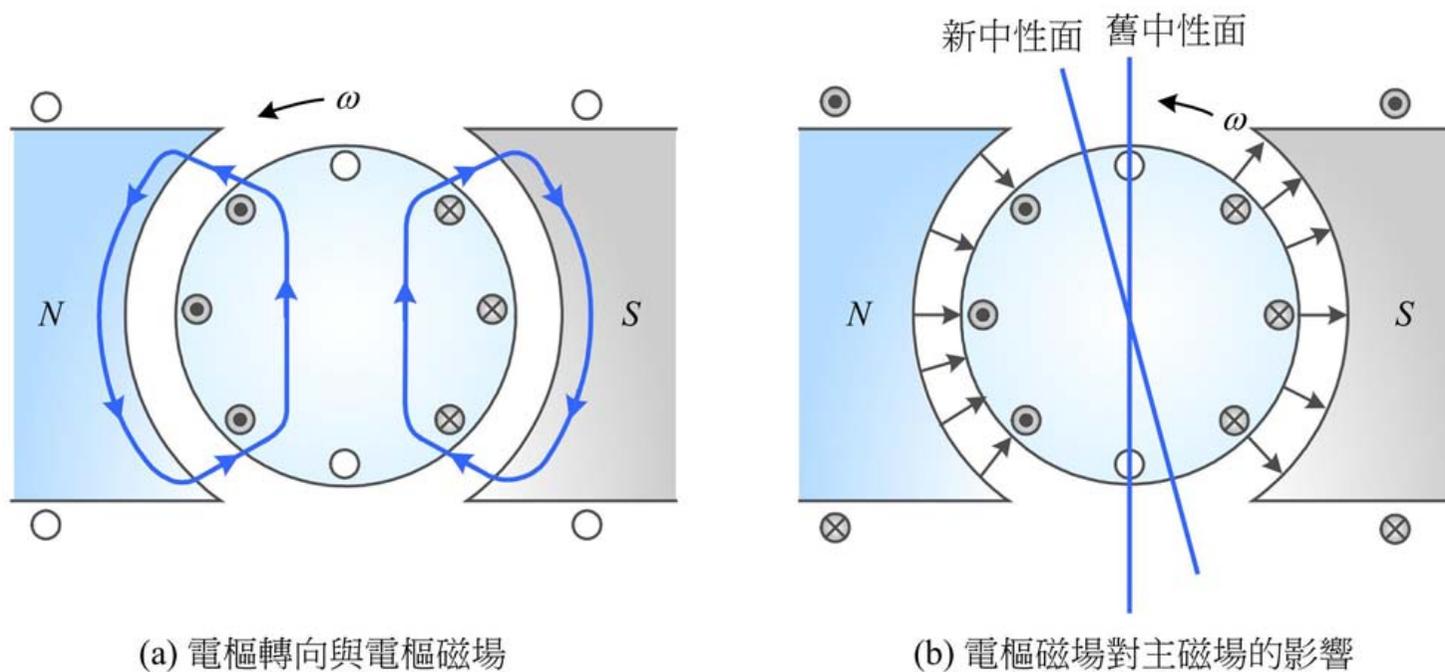


圖 8-10 直流發電機的電樞反應 —— 磁中性面偏移

8-3 電樞反應

一、磁中性面偏移 (續)

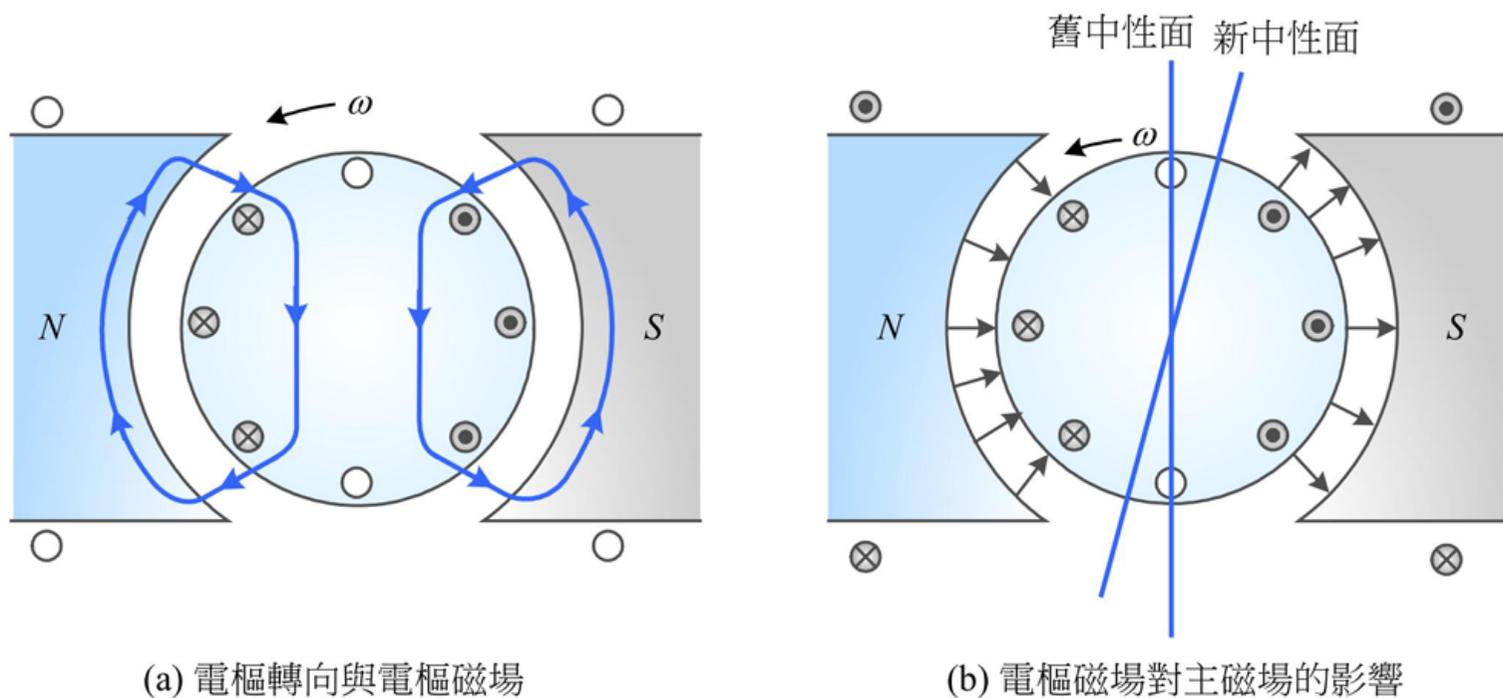


圖 8-11 直流電動機的電樞反應 —— 磁中性面偏移

8-3 電樞反應

二、去磁效應

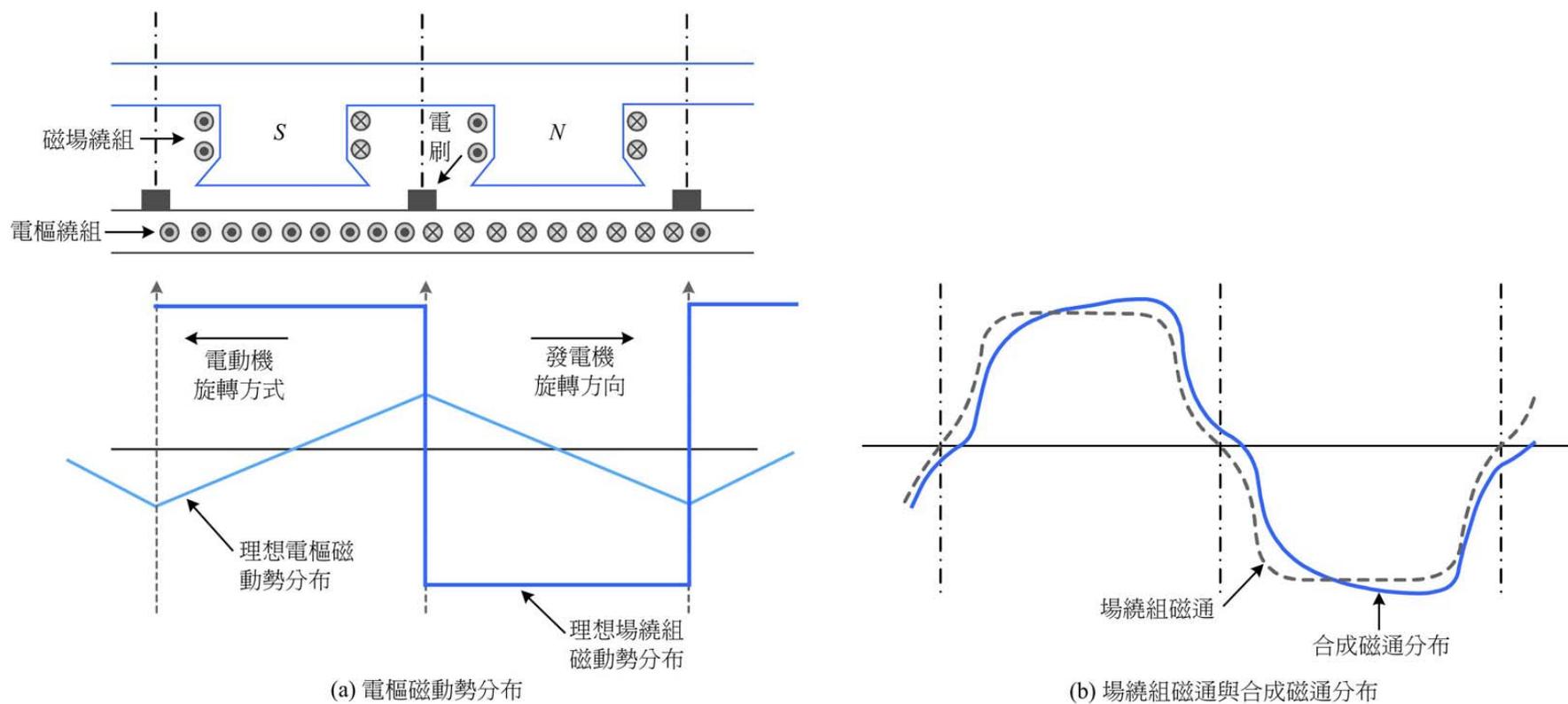


圖 8-12 直流電機的電樞反應 —— 去磁效應

8-3 電樞反應

三、電樞反應所造成的運轉問題與其改善對策

(一) 機構抑制電樞磁通

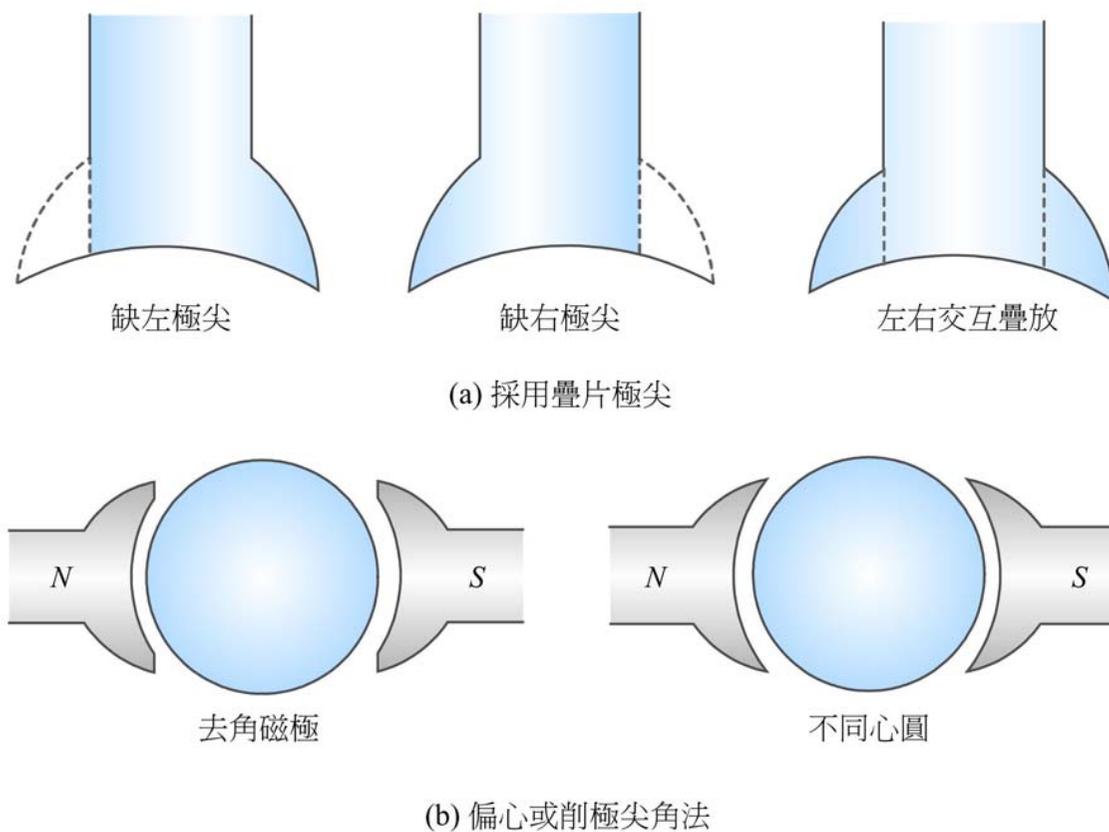


圖 8-13 不同磁極結構增加電樞磁通的磁阻

8-3 電樞反應

(二) 移動電刷

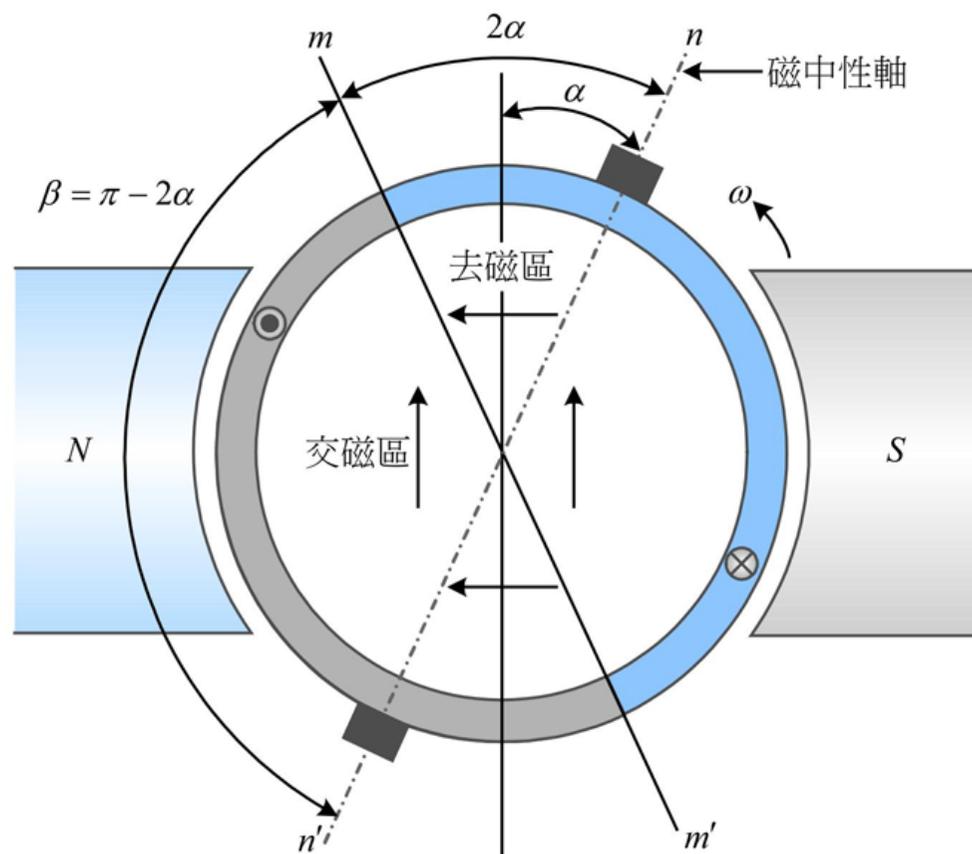


圖 8-14 電刷移位後的電刷反應

8-3 電樞反應

(三) 設置中間極

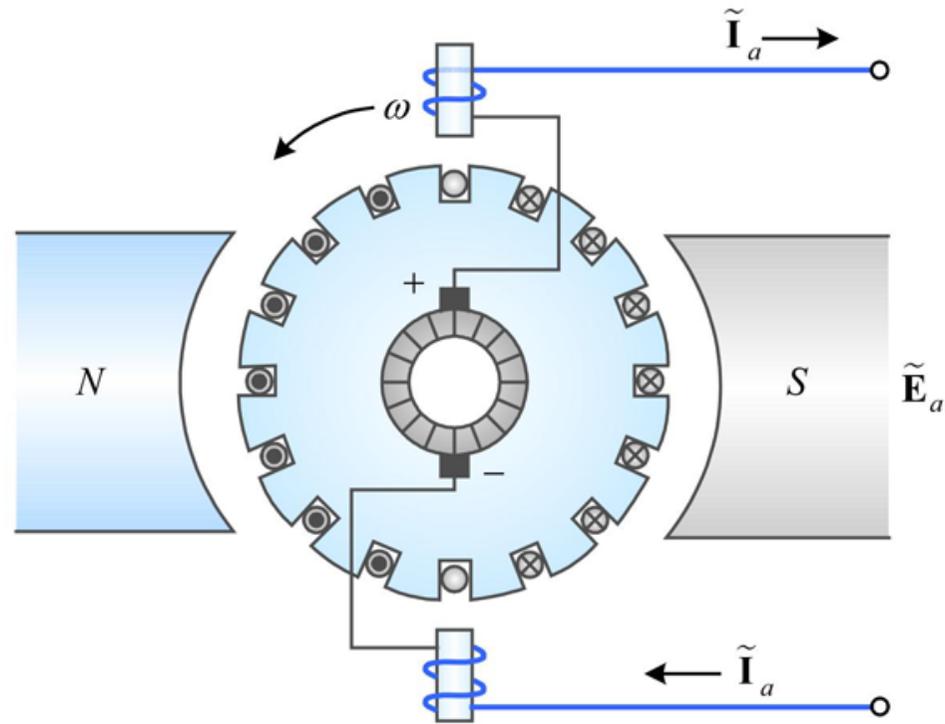
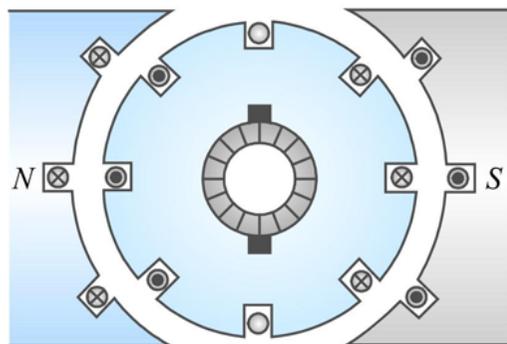


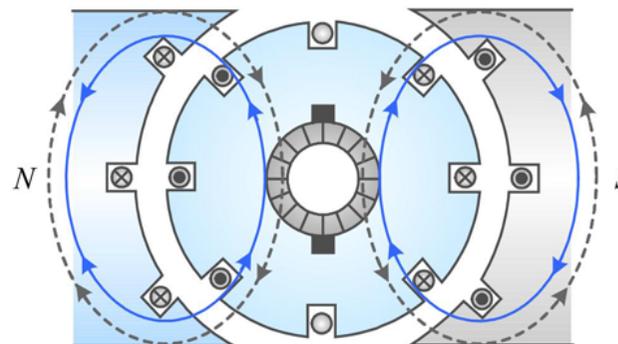
圖 8-15 有中間極之直流電機

8-3 電樞反應

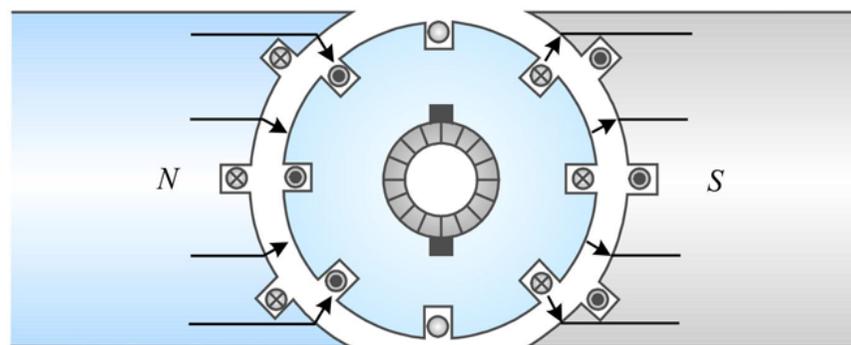
(四) 設置補償繞組



(a) 極面有補償繞組的直流電機



(b) 補償繞組之磁通及電樞繞組磁通



(c) 電機淨磁通恰為原始磁極磁通

圖 8-16 補償繞組在直流電機的效應

8-4 等效電路

一、直流機與交流同步機

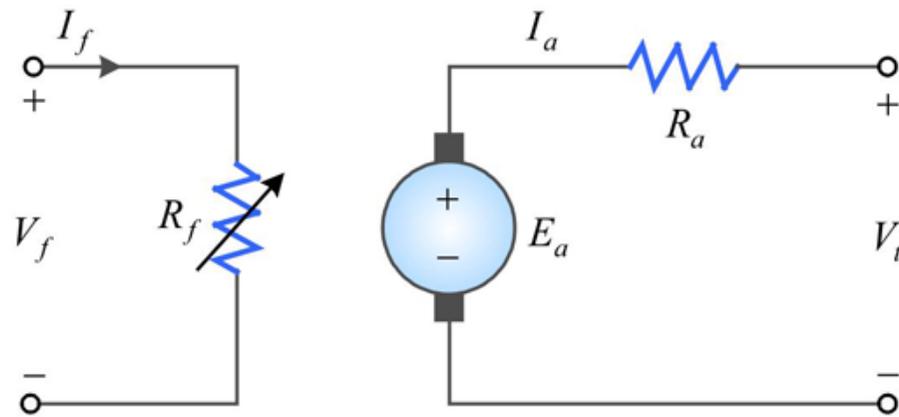


圖 8-17 直流電機的等效電路

- ▶ 就電基本體的物理結構來看，直流機正是交流同步機的內外翻轉 (inside-out)，且兩者的激磁與感應原理皆相同，所以它們具有相同的等效電路。

8-4 等效電路

一、直流機與交流同步機 (續)

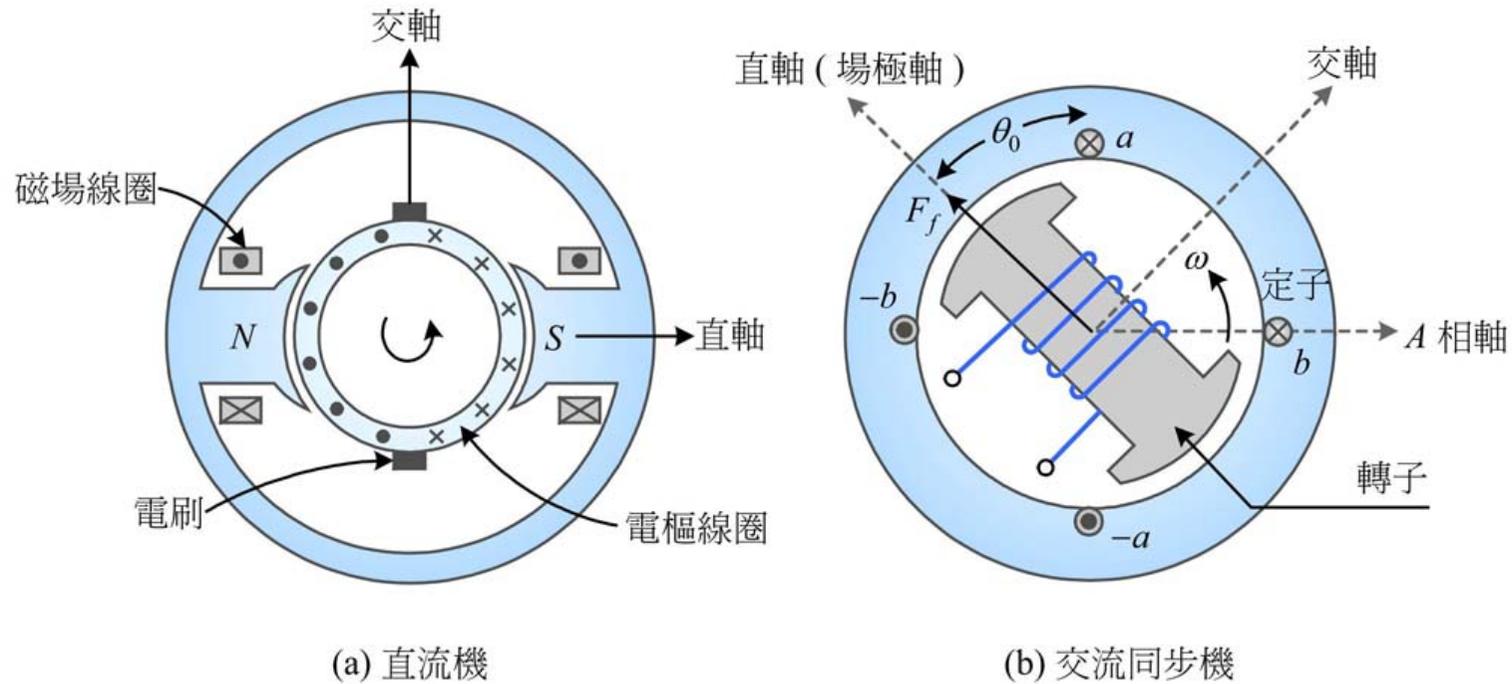


圖 8-18 直流機與交流同步機結構圖

8-4 等效電路

二、感應電動勢 E_a

- ▶ 直流機等效電路中的感應電動勢 E_a 如 (8-7) 式所示，與電機轉速 ω 和激磁場磁通量 ϕ 成正比，而其中的磁通 ϕ 乃是由場繞組電流 I_f 所激發。令場繞組線圈數為 N_f ，則場繞組之磁動勢為

$$F = N_f I_f \quad (8-16)$$

8-4 等效電路

二、感應電動勢 E_a (續)

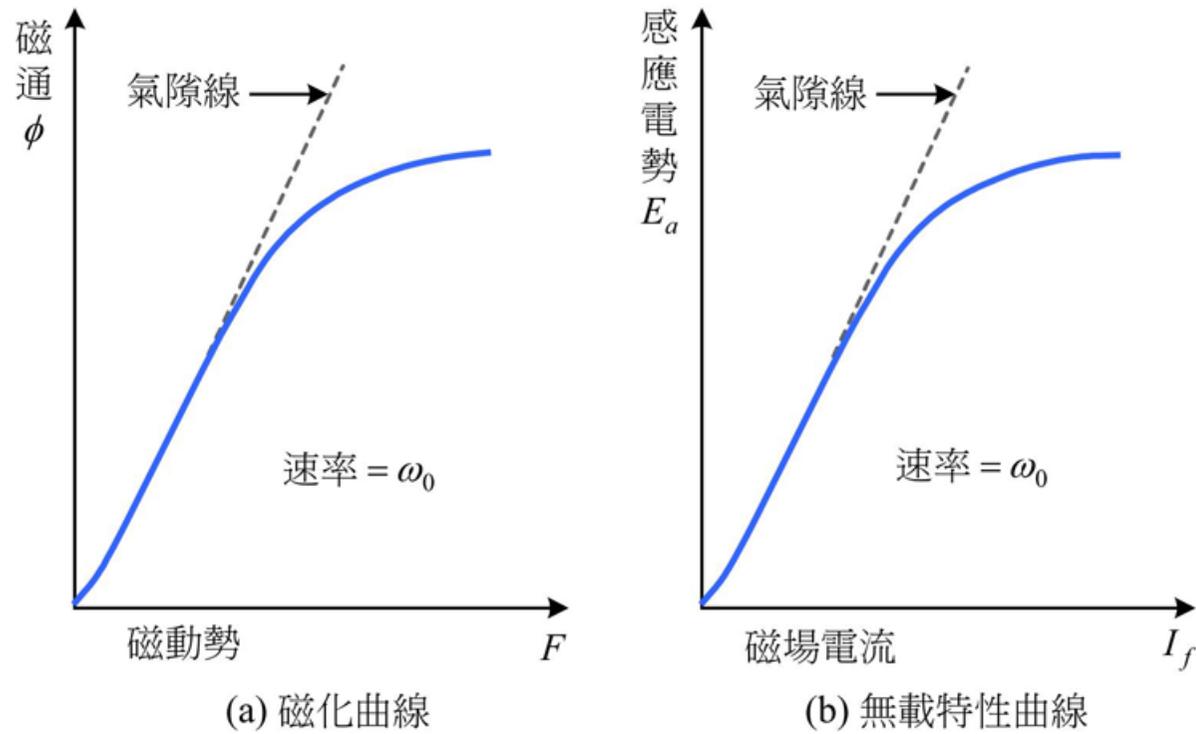


圖 8-19 直流電機無載特性曲線

8-4 等效電路

三、電樞反應

- ▶ 考慮直流發電機的運轉狀態，當電樞電流 $I_a \neq 0$ 時，則根據圖8-17的電樞等效電路，其輸出端電壓 V_t 與電樞電流 I_a 的關係式為

$$V_t = E_a - I_a R_a \quad (8-17)$$

8-4 等效電路

三、電樞反應 (續)

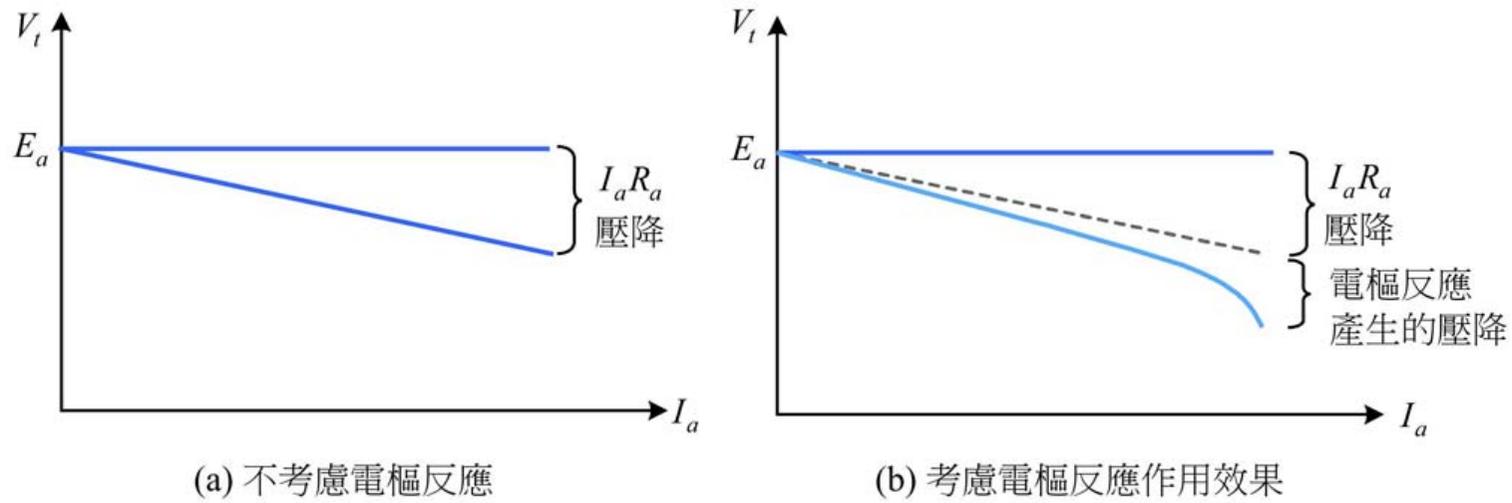


圖 8-20 直流發電機的電壓 - 電流特性曲線

8-5 直流電機的分類

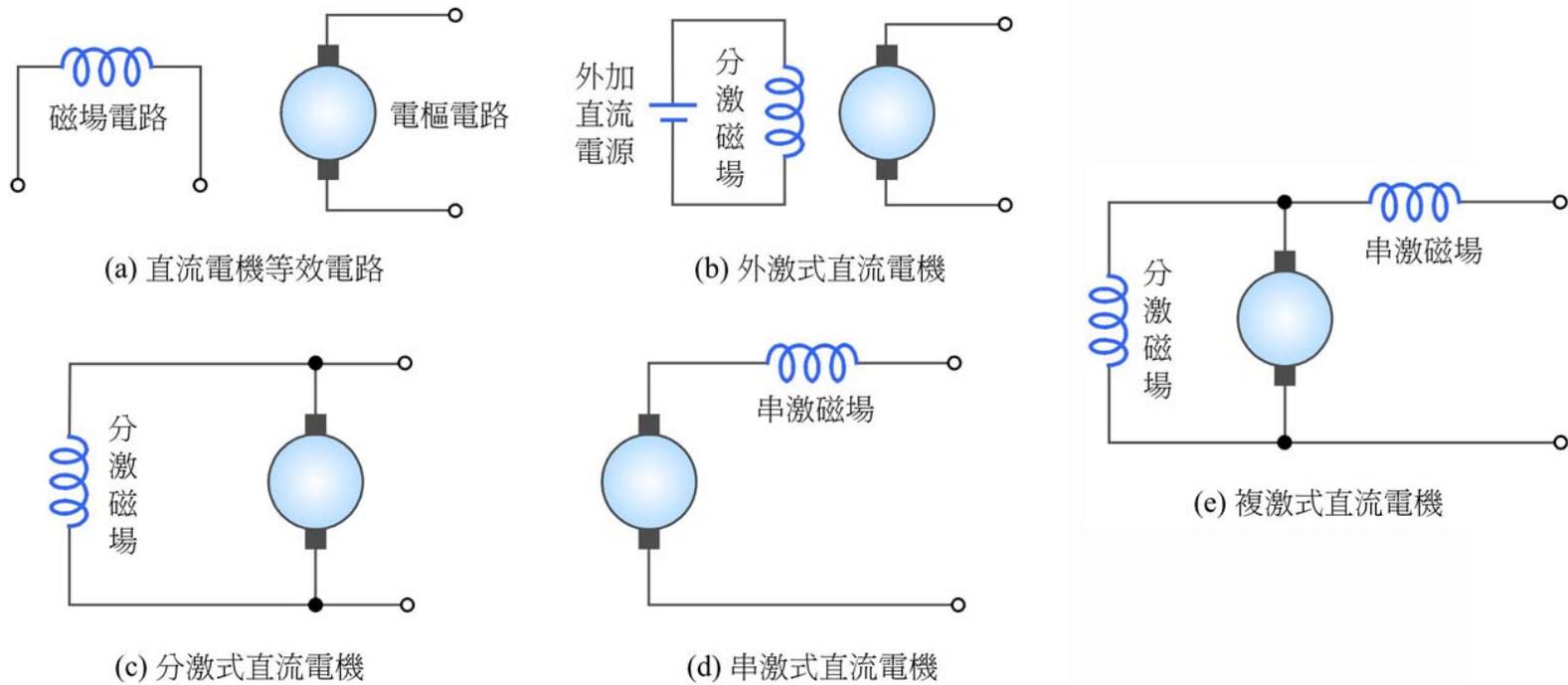


圖 8-21 直流電機的磁場接線圖

8-5 直流電機的分類

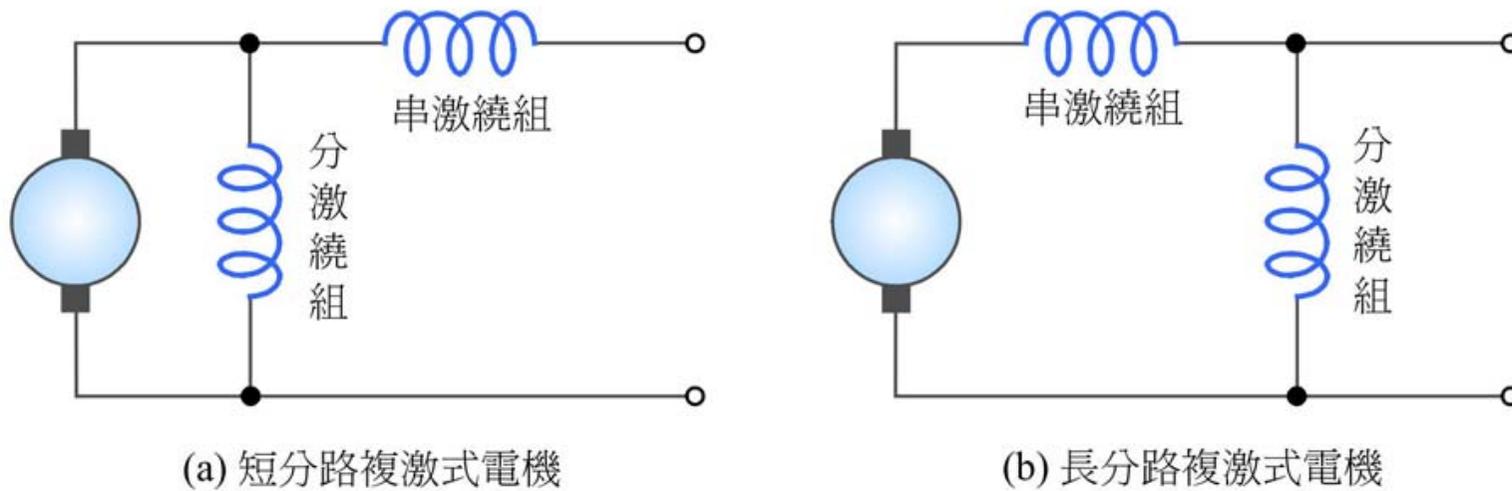


圖 8-22 複激式電機磁場繞組接線方式

8-5 直流電機的分類

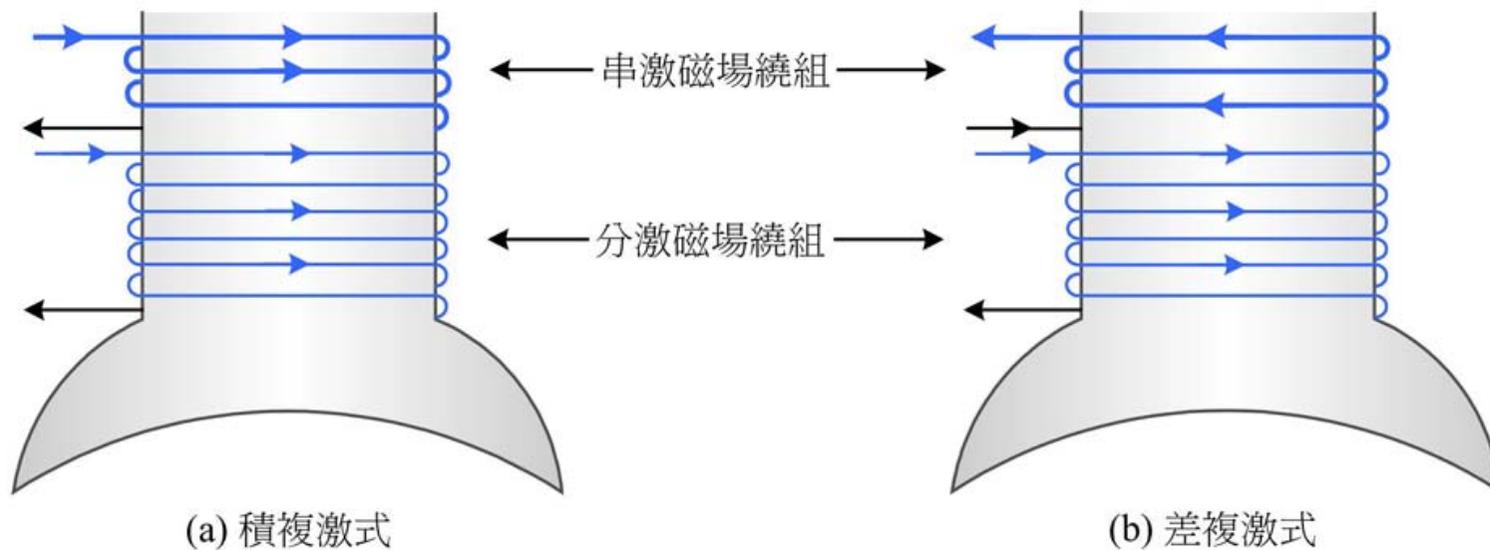


圖 8-23 積複式與差複式直流電機磁場繞組電流方向

8-6 直流發電機的特性與運用

一、外激式直流電機

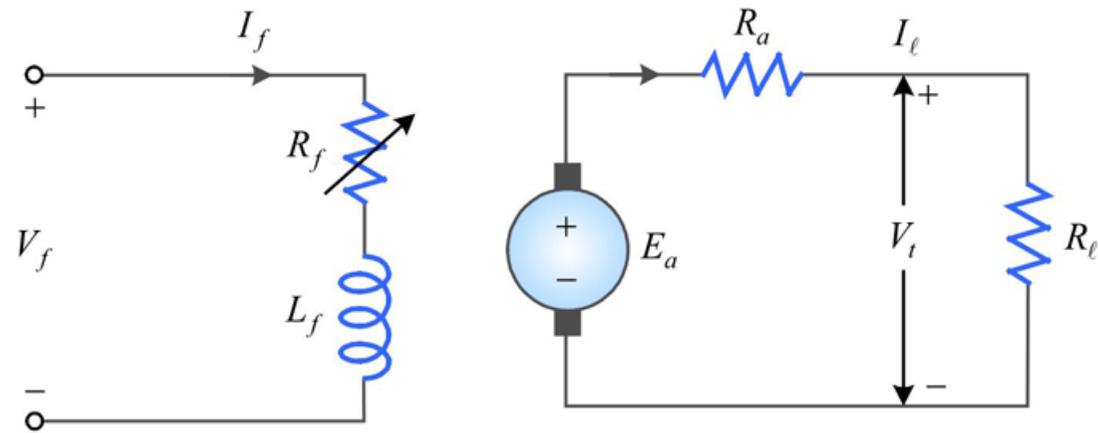


圖 8-24 外激式直流發電機等效電路

8-6 直流發電機的特性與運用

一、外激式直流電機

$$I_a = I_\ell \quad (8-18)$$

$$V_t = E_a - I_a R_a \quad (8-19)$$

$$E_a = K_n \phi n \quad (8-20)$$

▶ 發電機的電樞電壓和轉速關係為

$$\frac{E_a}{E_{ao}} = \frac{n}{n_o} \quad (8-23)$$

8-6 直流發電機的特性與運用

例 8-5

一部 100 kW，220 V，200 A，1800 rpm 外激式直流發電機，系統參數如圖 8-25 所示。此發電機裝置有補償繞組，其磁化曲線如圖 8-26 所示。

- (1) 將 R_{adj} 調整為 33Ω ，且原動機轉速降為 1600 rpm，試求發電機無載端電壓？
- (2) 將 2Ω 負載電阻接在發電機輸出端，試求發電機的端電壓？
- (3) 調整電機磁場可調電阻器調整磁場電流，使 (2) 項的端電壓提升到 (1) 項所求出的值，試求所需的 I_f 及 R_{adj} 值？

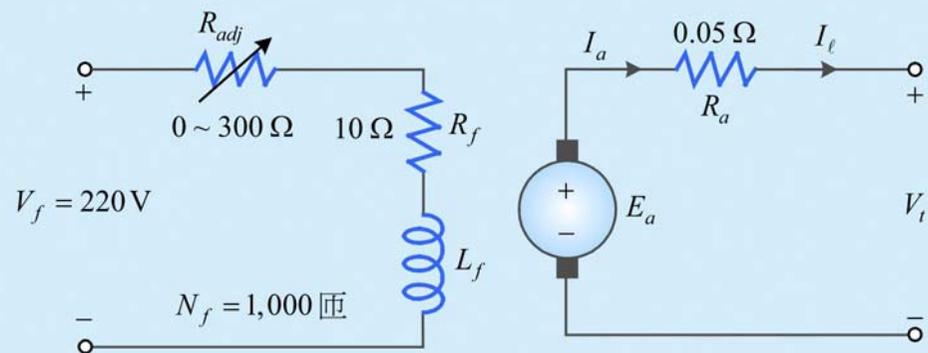
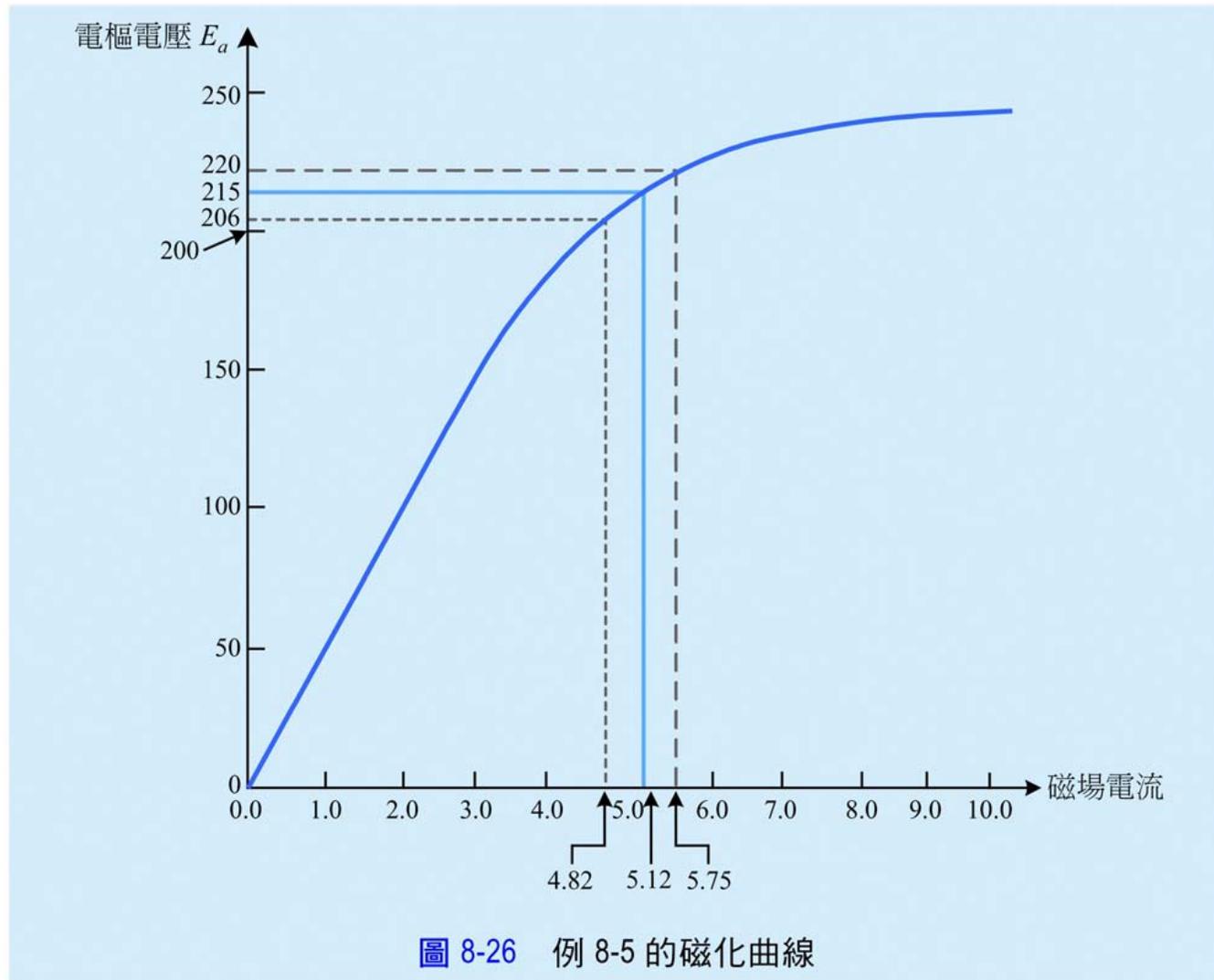


圖 8-25 例 8-5 外激式直流發電機接線圖

8-6 直流發電機的特性與運用



8-6 直流發電機的特性與運用

解 (1) 發電機總磁場電阻為

$$R_f + R_{adj} = 33 + 10 = 43\Omega$$

磁場電流為

$$I_f = \frac{V_f}{R_f + R_{adj}} = \frac{220}{43} = 5.12 \text{ A}$$

由圖 8-26 磁化曲線查出，對激磁電流 $I_f = 5.12 \text{ A}$ 時，電樞電壓 $E_{ao} = 215 \text{ V}$ 。則相對於轉速 1600 rpm 的 E_a 為

$$E_a = \frac{n}{n_o} E_{ao} = \frac{1600}{1800} \times 215 = 191.1 \text{ V}$$

無載時 $V_t = E_a$ ，故 $V_t = 191.1 \text{ V}$ 。

(2) 將 2Ω 負載連接到發電機輸出端，則發電機電樞及負載電流為

$$I_a = I_\ell = \frac{E_a}{R_a + R_\ell} = \frac{191.1}{0.05 + 2} = 93.2 \text{ A}$$

發電機端電壓為

$$V_t = I_\ell R_\ell = 93.2 \times 2 = 186.4 \text{ V}$$

8-6 直流發電機的特性與運用

(3) 端電壓提升到 191.1 V 時，線電流 I_ℓ 將提升為

$$I_\ell = \frac{V_t}{R_\ell} = \frac{191.1}{2} = 95.55 \text{ A}$$

所需的電樞電壓 E_a 應提升為

$$E_a = V_t + I_a R_a = 191.1 + 95.55 \times 0.05 = 195.88 \text{ V}$$

在 $n = 1600 \text{ rpm}$ 下得到 195.88 V，則 1800 rpm 時的等效電壓為

$$E_{ao} = \frac{n_o}{n} E_a = \frac{1800}{1600} \times 195.88 = 220.4 \text{ V}$$

由磁化曲線查出所需的磁場電流 $I_f = 5.75 \text{ A}$ ，則 R_{adj} 須調整為

$$R_{adj} = \frac{V_f}{I_f} - R_f = \frac{220}{5.75} - 10 = 28.26 \Omega$$

8-6 直流發電機的特性與運用

Matlab

```
Vf=220;      %外激式電機之激磁電壓值
Ra=0.05;
Rf=10;
n0=1800;     %磁化曲線之轉速

% (1)
Radj=33;
If=Vf/(Rf+Radj);
Ea0=215;     %以 I=5.12A 查表磁化曲線所得之電樞電壓值
              (轉速為 1800rpm)
n=1600;     %發電機轉速
Ea1=n/n0*Ea0;
Vt1=Ea1;     %無載時 (Ia=0) 之端電壓值

% (2)
RL=2;
Ia2=Ea1/(Ra+RL);
Vt2=Ia2*RL;  %負載電阻 RL 下，發電機之端電壓值

% (3)
Vt3=Vt1;
Ia3=Vt1/RL;
Ea3=Vt3+Ia3*Ra; %1600rpm 下之 Ea 值
Ea0=n0/n*Ea3;
If=5.75;     %以 Ea0=220.3750V 查表磁化曲線所得之激磁電流值
              (轉速為 1800rpm)
Radj3=Vf/If-Rf; %所需之 Radj 值
```

End

8-6 直流發電機的特性與運用

例 8-6

一部如例 8-5 中所述相同發電機，但此部電機沒有補償繞組，此機在全載時的電樞反應為 400 安 - 匝。當發電機負載電流為 150 A 時，試求發電機的端電壓？

8-6 直流發電機的特性與運用

解 發電機電樞反應正比於電樞電流，當全載電流 $I_\ell = 200 \text{ A}$ 時，電樞反應為 400 安 - 匝，因此在負載電流 $I_\ell = 150 \text{ A}$ 時的電樞反應為

$$F_{ar} = \frac{I_f}{I'_f} F'_{ar} = \frac{150}{200} \times 400 = 300 \text{ 安 - 匝}$$

等效磁場電流為

$$I_f^* = I_f - \frac{F_{ar}}{N_f} = 5.12 - \frac{300}{1000} = 4.82 \text{ A}$$

由磁化曲線上查出 $E_{ao} = 206 \text{ V}$ ，則 $n = 1600 \text{ rpm}$ 時的等效電壓為

$$E_a = \frac{n}{n_o} E_{ao} = \frac{1600}{1800} \times 206 = 183.1 \text{ V}$$

端電壓為

$$V_t = E_a - I_a R_a = 183.1 - 150 \times 0.05 = 175.6 \text{ V}$$

End

8-6 直流發電機的特性與運用

二、分激式直流發電機

- ▶ 電樞電流同時供應磁場電流和負載電流，即

$$I_a = I_f + I_\ell \quad (8-24)$$

- ▶ 在直流穩態的運轉情況下，電感 L_f 所表現的阻抗值為零，故 I_f 值乃由端電壓 V_t 與場繞組電阻 R_f 所決定。

$$I_f = \frac{V_t}{R_f} \quad (8-25)$$

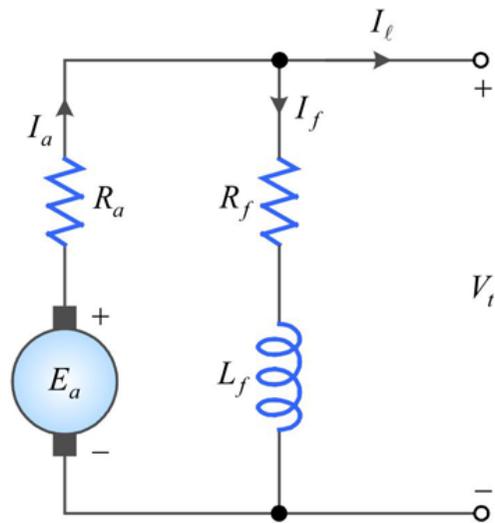


圖 8-27 分激式直流發電機等效電路圖

8-6 直流發電機的特性與運用

例 8-7

一部 11 kW，220 V 分激式發電機電樞電阻 $R_a = 0.05\Omega$ ，分激場電阻 $R_f = 220\Omega$ ，若不考慮電樞反應、電刷接觸壓降，在額定運轉時，試求：

- (1) 電樞感應電勢 E_a 為多少？
- (2) 電樞所產生的輸出功率 P_a 為多少？

8-6 直流發電機的特性與運用

解 已知

$$P_o = 11 \text{ kW}, V_t = 220 \text{ V}, R_a = 0.05 \Omega, R_f = 220 \Omega$$

額定負載電流 I_ℓ 為

$$I_\ell = \frac{P_o}{V_t} = \frac{11 \times 10^3}{220} = 50 \text{ A}$$

磁場電流 I_f 為

$$I_f = \frac{V_t}{R_f} = \frac{220}{220} = 1 \text{ A}$$

電樞電流 I_a 為

$$I_a = I_\ell + I_f = 50 + 1 = 51 \text{ A}$$

(1) 發電機額定時的感應電樞電壓 E_a 為

$$E_a = V_t + I_a R_a = 220 + 51 \times 0.05 = 222.55 \text{ V}$$

(2) 電樞所產生的輸出功率 P_a 為

$$P_a = E_a I_a = 222.55 \times 51 = 11350.05 \text{ W} \cong 11.35 \text{ kW}$$

8-6 直流發電機的特性與運用

Matlab

```
Po=11E3;  
Vt=220;  
Ra=0.05;  
Rf=220;  
  
%(1)  
I_l=Po/Vt; %額定輸出電流  
If=Vt/Rf; %磁場電流  
Ia=If+I_l; %分激式發電機之電樞電流  
  
Ea=Vt+Ia*Ra; %電樞電壓  
  
%(2)  
Pa=Ea*Ia; %電樞所產生之功率輸出
```

End

8-6 直流發電機的特性與運用

(一) 剩磁與電樞電壓的建立

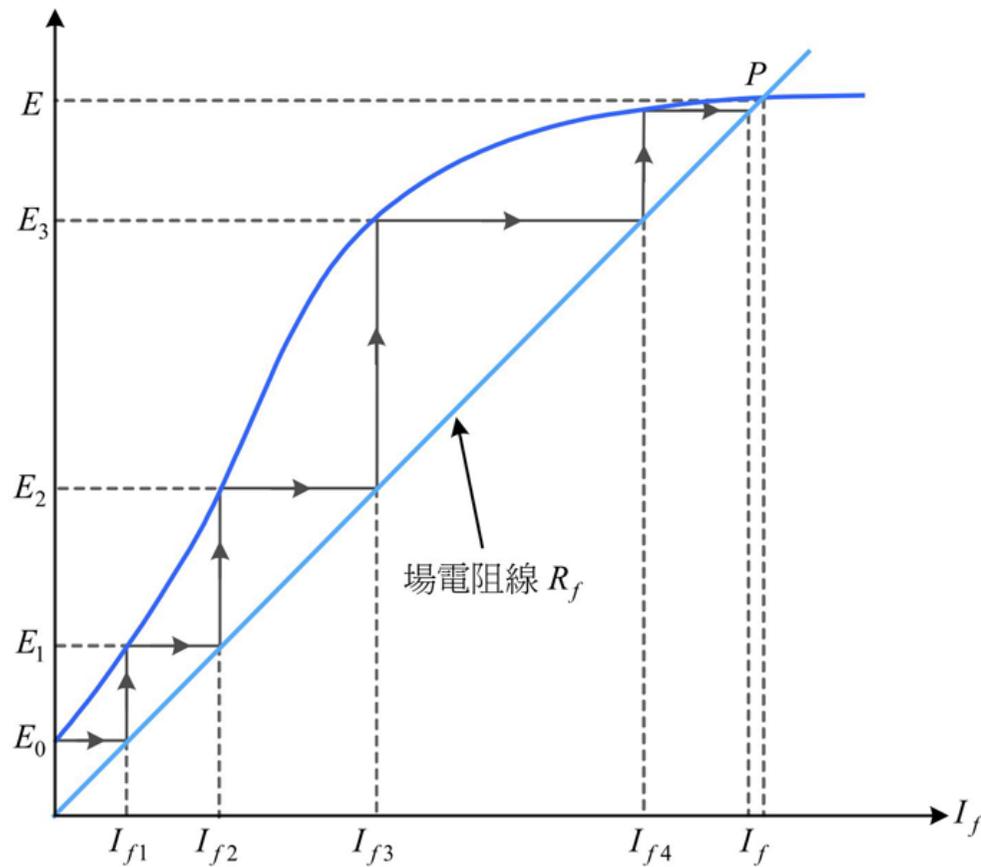


圖 8-28 分激式發電機之電壓建立過程

8-6 直流發電機的特性與運用

(二) 臨界場電阻與臨界轉速

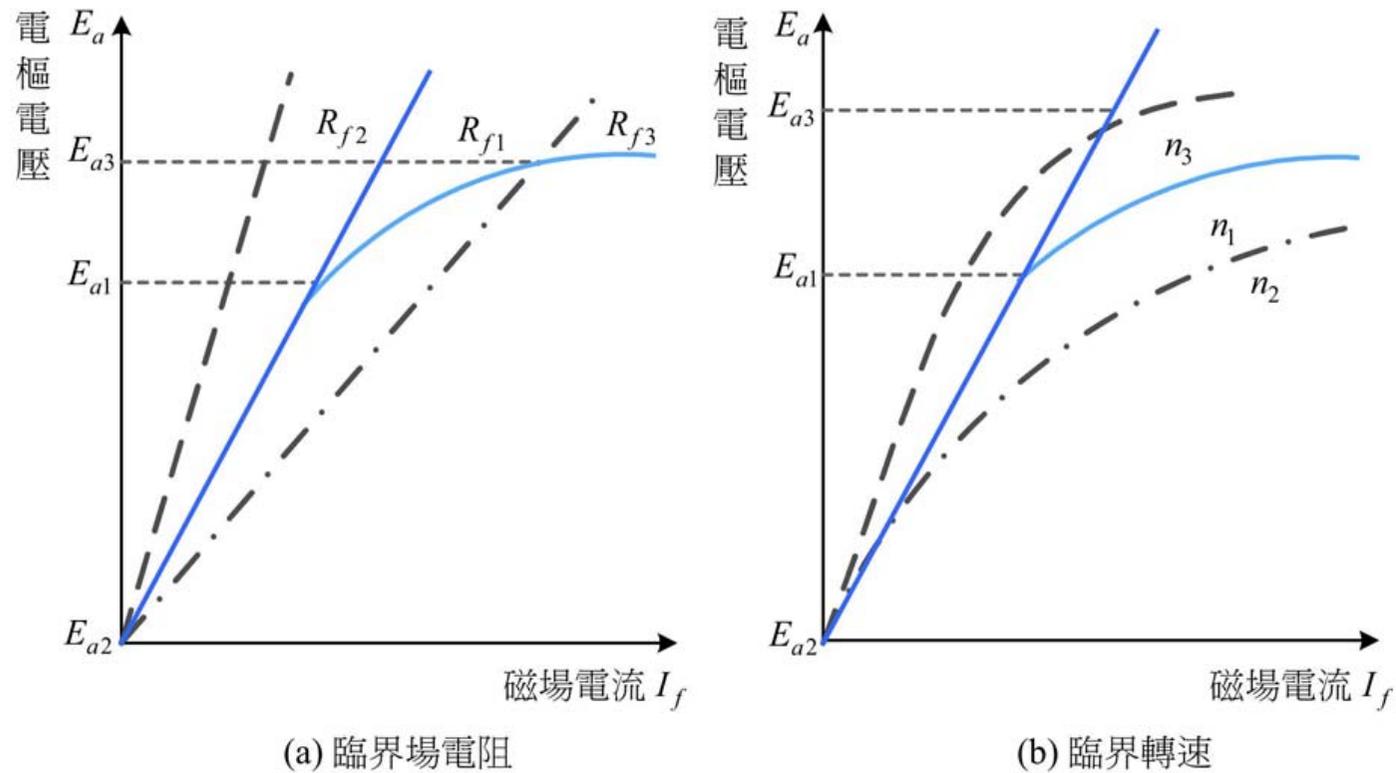


圖 8-29 臨界場電阻及臨界轉速特性曲線

8-6 直流發電機的特性與運用

例 8-8

一部 20 kW、200 V 直流分激式發電機，當負載短路時短路電流 50 A，剩磁電壓 3 V，試求：

- (1) 電樞電阻 R_a 為多少？
- (2) 若磁場電阻為 100Ω 時，感應電勢 E_a 為多少？
- (3) 試比較短路電流及額定負載電流的大小？

8-6 直流發電機的特性與運用

解 (1) $\because I_{as} = 50 \text{ A}, E_{as} = 3 \text{ V}$

$$\therefore R_a = \frac{E_{as}}{I_{as}} = \frac{3}{50} = 0.06 \Omega$$

(2) $\because I_f = \frac{V_t}{R_f} = \frac{200}{100} = 2 \text{ A}$

$$I_\ell = \frac{P_o}{V_t} = \frac{20 \times 10^3}{200} = 100 \text{ A}$$

$$\therefore I_a = I_f + I_\ell = 2 + 100 = 102 \text{ A}$$

$$E_a = V_t + I_a R_a = 200 + 102 \times 0.06 = 206.12 \text{ V}$$

(3) 額定電樞電流 $I_a = 102 \text{ A}$ ，而短路時短路電流 $I_{as} = 50 \text{ A}$ ，小於額定電流，故分激式發電機短路時有自我保護作用。 **End**

8-6 直流發電機的特性與運用

三、串激式直流發電機

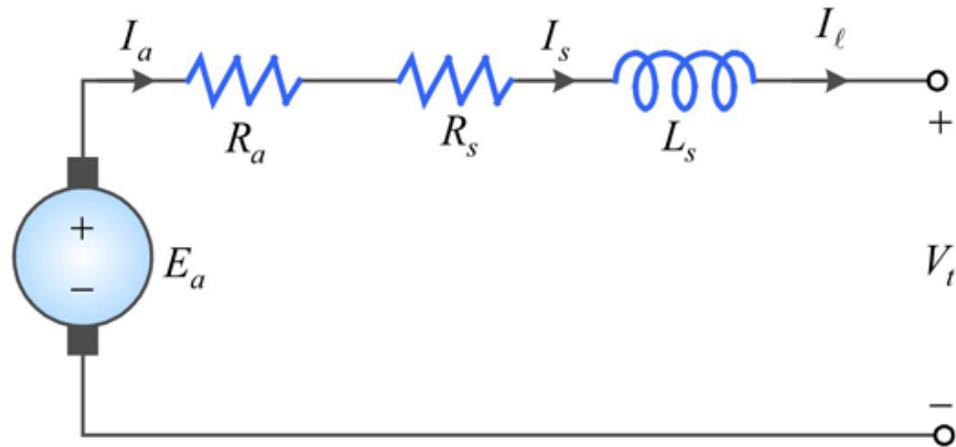


圖 8-30 串激式發電機等效電路

8-6 直流發電機的特性與運用

(一) 輸出電壓 - 電流特性曲線

$$V_t = E_a - I_a (R_a + R_s) - E_{ar} \quad (8-26)$$

(二) 串激式發電機之用途

- ▶ 串激式發電機是一種特性很差的定電壓源，其電壓調整率為一很大的負值。但串激式發電機如使用在圖8-31中的 *cd* 段時，具有定電流特性，很適合需要定電流源的串聯弧光街燈之用，或是作為電焊機這種需要陡峭特性曲線的設備電源。

8-6 直流發電機的特性與運用

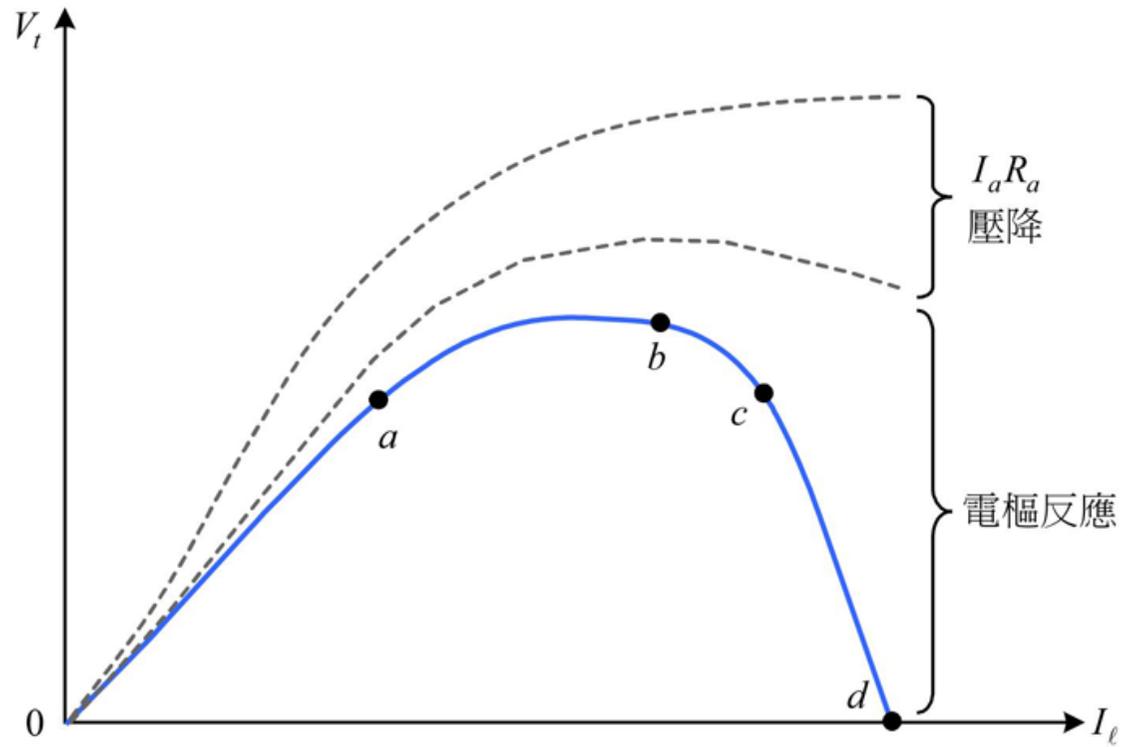


圖 8-31 串激式發電機輸出特性曲線

8-6 直流發電機的特性與運用

例 8-9

一部串激式發電機其電樞繞組及串激繞組電阻均為 0.15Ω ，若設磁路未飽和，並忽略電樞反應，當負載電流為 50A 時，端電壓為 200 V ，試求負載電流變為 30 A 時，轉速維持不變條件下，端電壓為多少？

8-6 直流發電機的特性與運用

解 當負載電流為 50 A 時，串激發電機電樞電壓為

$$\begin{aligned} E_a &= V_t + I_a(R_a + R_s) \\ &= 200 + 50(0.15 + 0.15) = 215 \text{ V} \end{aligned}$$

由 $E_a = K_n \phi n$ 公式知，在 50 A 時的磁通量為 ϕ ，而在 30 A 負載電流的磁通量為 ϕ' ，則 30 A 負載時電樞電勢 E'_a 為

$$\begin{aligned} E'_a &= \frac{\phi'}{\phi} E_a = \frac{I'_a}{I_a} E_a = \frac{30}{50} \times 215 \\ &= 129 \text{ V} \end{aligned}$$

故負載電流 30 A 時的端電壓為

$$\begin{aligned} V_t &= E'_a - I_a(R_a + R_s) \\ &= 129 - 30(0.15 + 0.15) = 120 \text{ V} \end{aligned}$$

End

8-6 直流發電機的特性與運用

四、複激式直流發電機

(一) 積複激式發電機

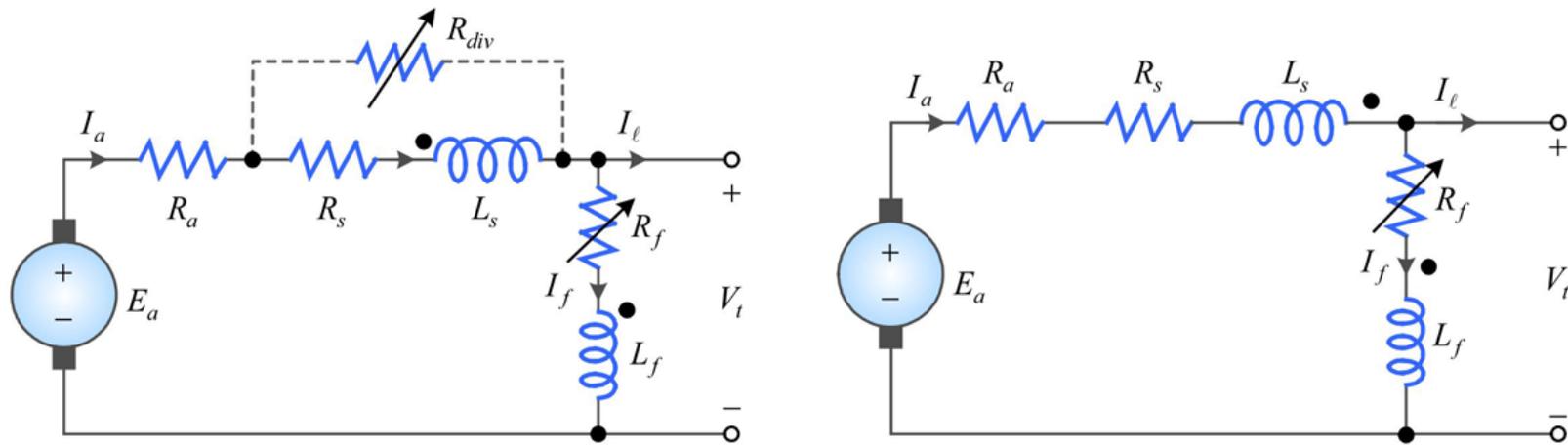
- ▶ 圖8-32(a)所示的長並式積複激發電機等效電路中，其串激場磁通 ϕ_s 與分激場磁通 ϕ_f 方向相同，所以合成磁通為 $\phi_t = \phi_s + \phi_f$ ，故電機的總磁動勢為

$$F_{net} = F_h + F_s - F_{ar} = N_f I_f + N_s I_a - F_{ar} \quad (8-28)$$

- ▶ 將上式除以分激繞組線圈 N_f 得該電機之等效分激磁場電流為

$$I_f^* = I_f + \frac{N_s}{N_f} I_a - \frac{F_{ar}}{N_f} \quad (8-29)$$

8-6 直流發電機的特性與運用



(a) 長並式積複激發電機等效電路

(b) 長並式差複激發電機等效電路

圖 8-32 複激式直流發電機等效電路

8-6 直流發電機的特性與運用

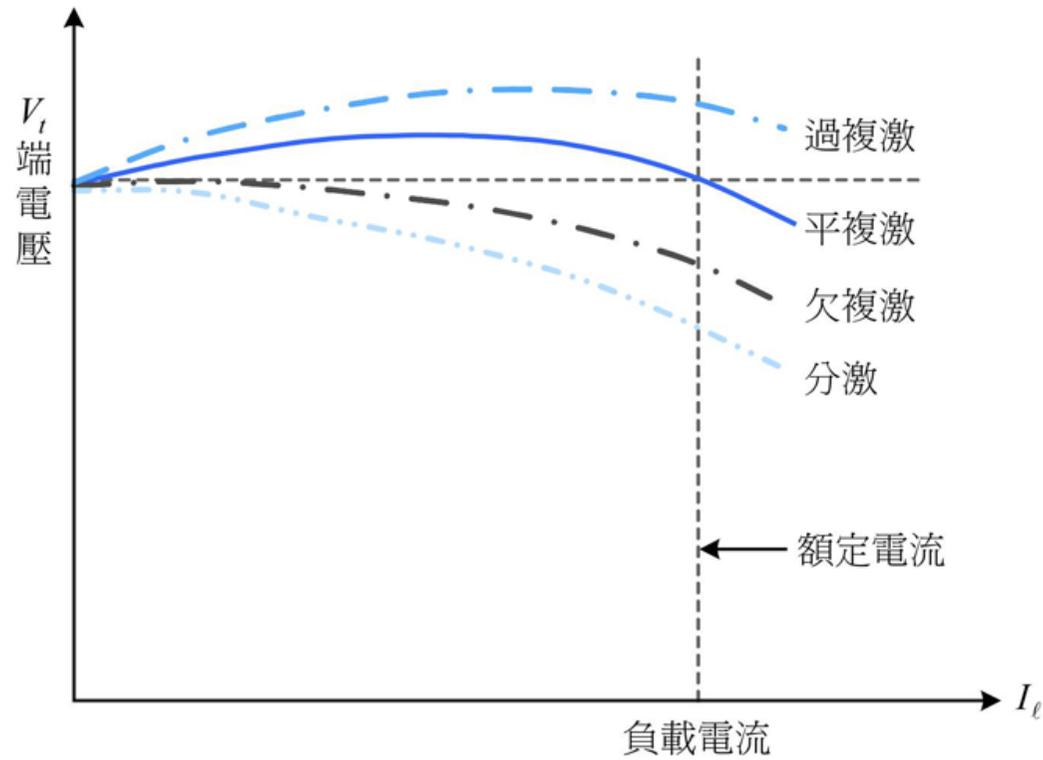


圖 8-33 各種積複激式發電機輸出特性曲線

8-6 直流發電機的特性與運用

(二) 差複激式發電機

- ▶ 圖8-32(b)所示之差複激式發電機等效電路中，串激場繞組和分激場繞組所產生磁勢方向正好相反，故其淨磁勢 F_{net} 為

$$F_{net} = F_h - F_s - F_{ar} = N_f I_f - N_s I_a - F_{ar} \quad (8-30)$$

- ▶ 等效分激磁場電流為

$$I_f^* = I_f - \frac{N_s}{N_f} I_a - \frac{F_{ar}}{N_f} \quad (8-31)$$

- ▶ 複激式發電機輸出特性具有電壓急速下垂的特性，故適用於直流電焊機用發電機或蓄電池充電用發電機。

8-6 直流發電機的特性與運用

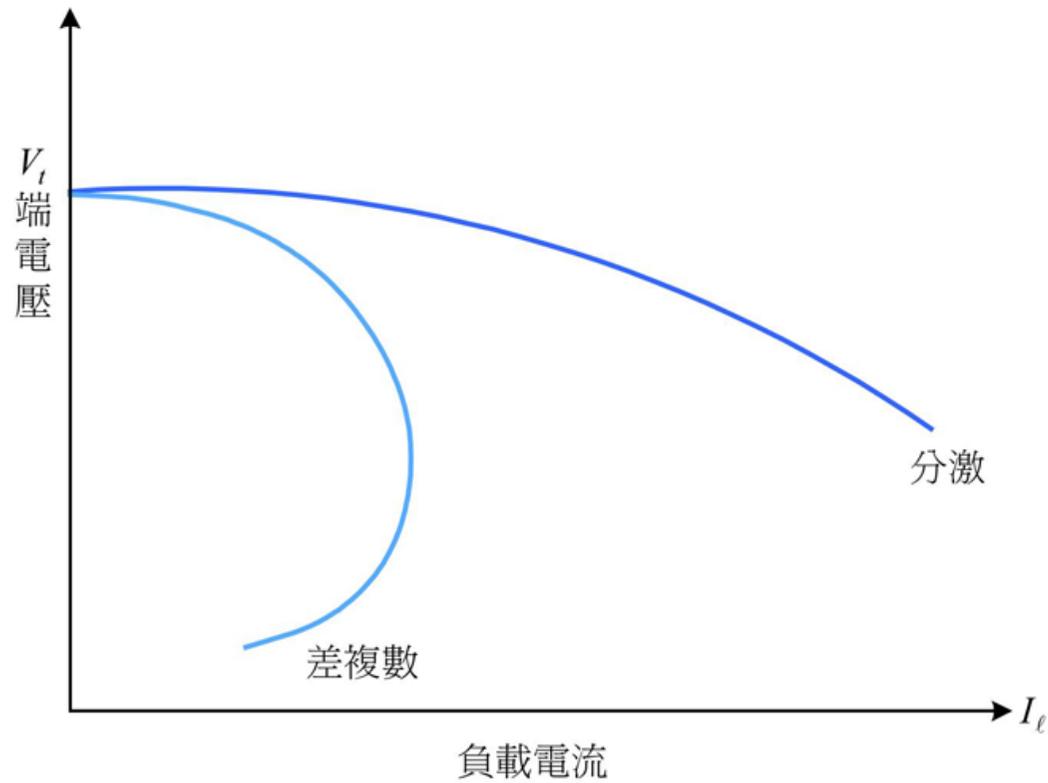


圖 8-34 差複激式發電機輸出特性曲線

8-6 直流發電機的特性與運用

例 8-10

一部短分路複激式發電機，如圖 8-35 所示，分激場繞組電阻 $R_f = 100\Omega$ ，串激場繞組電阻 $R_s = 0.05\Omega$ ，電樞電阻 $R_a = 0.1\Omega$ ，滿載時端電壓 $V_t = 200\text{ V}$ ，負載電流 100 A ，試求：

- (1) 分激場電流 I_f 與電樞電流 I_a ？
- (2) 電樞電阻、分激場繞組電阻及串激場繞組電阻所消耗功率？
- (3) 電樞感應電壓 E_a ？

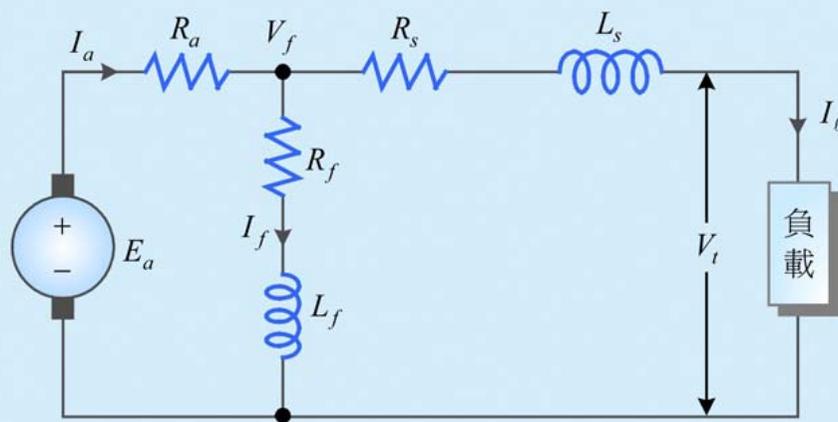


圖 8-35 例 8-10 之短分路複激式直流發電機等效電路

8-6 直流發電機的特性與運用

解 (1) 分激場端電壓 V_f 為

$$V_f = V_t + I_\ell R_s = 200 + 100 \times 0.05 = 205 \text{ V}$$

分激場電流

$$I_f = \frac{V_f}{R_f} = \frac{205}{100} = 2.05 \text{ A}$$

電樞電流

$$I_a = I_f + I_\ell = 2.05 + 100 = 102.05 \text{ A}$$

(2) 電樞電阻所消耗功率

$$I_a^2 R_a = (102.05)^2 \times 0.1 = 1050.6 \text{ W}$$

分激場繞組電阻所消耗功率

$$I_f^2 R_f = (2.05)^2 \times 100 = 420.25 \text{ W}$$

串激場繞組電阻所消耗功率

$$I_\ell^2 R_s = (100)^2 \times 0.05 = 500 \text{ W}$$

(3) 電樞感應電壓

$$E_a = V_f + I_a R_a = 205 + 102.05 \times 0.1 = 215.2 \text{ V}$$

8-6 直流發電機的特性與運用

Matlab

```
Vt=200;  
Ra=0.1;  
Rf=100;  
Rs=0.05;  
I_1=100;  
  
%(1)  
Vf=Vt+I_1*Rs; %分激場端電壓  
If=Vf/Rf; %分激電流  
Ia=If+I_1; %電樞電流值  
  
%(2)  
Pa=Ia^2*Ra; %電樞電阻所消耗功率  
Pf=If^2*Rf; %分激場電阻所消耗功率  
Ps=I_1^2*Rs; %串激場電阻所消耗功率  
  
%(3)  
Ea=Vf+Ia*Ra; %電樞感應電壓值
```

End

8-6 直流發電機的特性與運用

例 8-11

一部 20 kW、200 V 長並聯式積複激發電機，如圖 8-36 所示，分激場電阻 $R_f = 100\Omega$ ，串激場電阻 $R_s = 0.03\Omega$ ，變阻器電阻 $R_{div} = 0.06\Omega$ ，電樞電阻 $R_a = 0.05\Omega$ ，不考慮電樞反應去磁效應及電刷接觸壓降，在額定電壓下供應額定電流，試求：

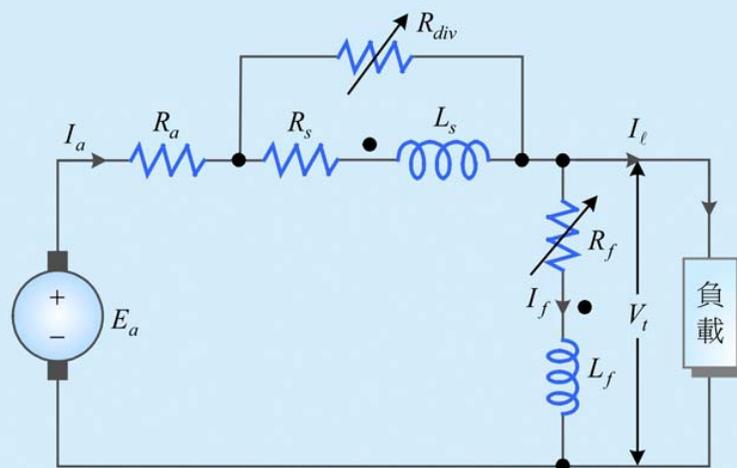


圖 8-36 例 8-11 接線電路圖

- (1) 電樞感應電勢 E_a ?
- (2) 電樞內生功率 P_a ?
- (3) 此機的效率 $\eta(\%)$?

8-6 直流發電機的特性與運用

解 (1) 串聯繞組與變阻器並聯等值電阻 R 為

$$R = \frac{R_s \times R_{div}}{R_s + R_{div}} = \frac{0.03 \times 0.06}{0.03 + 0.06} = 0.02\Omega$$

負載電流

$$I_\ell = \frac{P}{V_t} = \frac{20 \times 10^3}{200} = 100 \text{ A}$$

分激場電流

$$I_f = \frac{V_t}{R_f} = \frac{200}{100} = 2 \text{ A}$$

電樞電流

$$I_a = I_f + I_\ell = 2 + 100 = 102 \text{ A}$$

電樞電壓

$$\begin{aligned} E_a &= V_t + I_a(R_a + R) = 200 + 102 \times (0.05 + 0.02) \\ &= 207.14 \text{ V} \end{aligned}$$

8-6 直流發電機的特性與運用

(2) 電樞內生功率

$$P_a = E_a I_a = 207.14 \times 102 = 21128.28 \text{ W}$$

(3) 此機效率

$$\eta(\%) = \frac{P}{P_a} \times 100\% = \frac{20 \times 10^3}{21128.28} \times 100\% = 94.66\%$$

End

8-6 直流發電機的特性與運用

五、電壓調整率

- ▶ 直流發電機之電壓調整率定義為

$$VR (\%) = \frac{V_{nl} - V_{fl}}{V_{fl}} \times 100\% \quad (8-32)$$

- ▶ 式中 V_{nl} 為無載端電壓， V_{fl} 為滿載端電壓。

8-6 直流發電機的特性與運用

五、電壓調整率 (續)

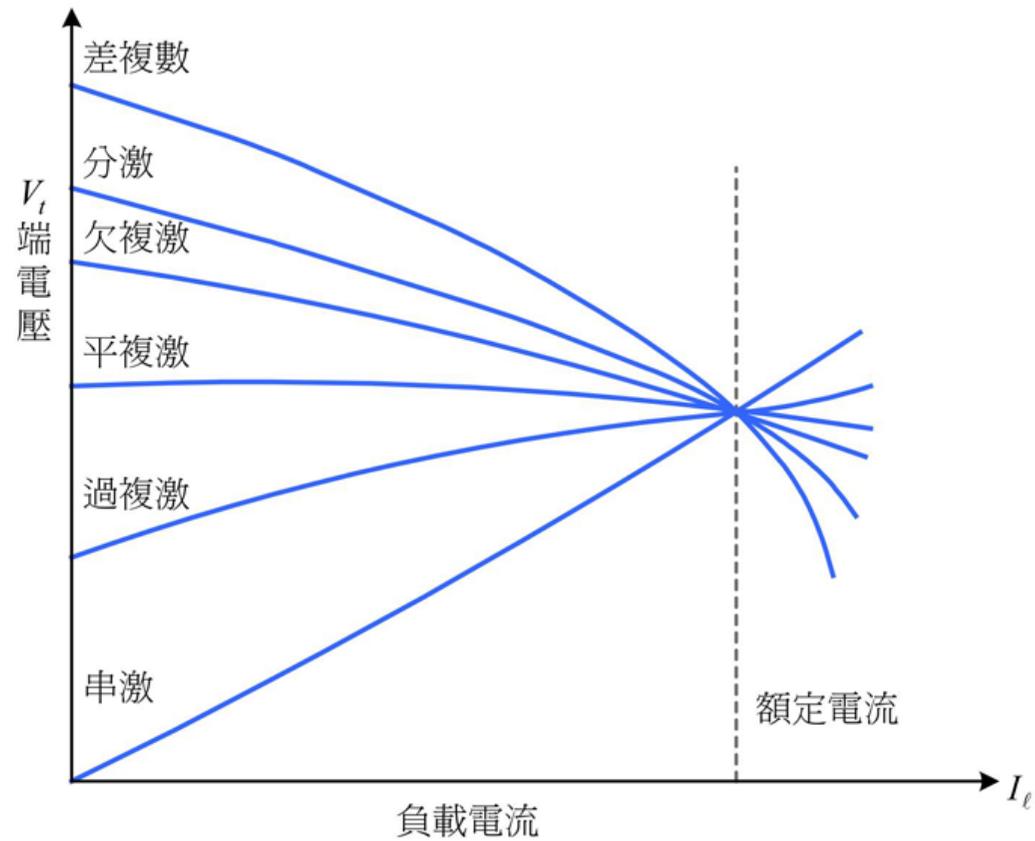


圖 8-37 直流發電機輸出特性曲線

8-6 直流發電機的特性與運用

五、電壓調整率 (續)

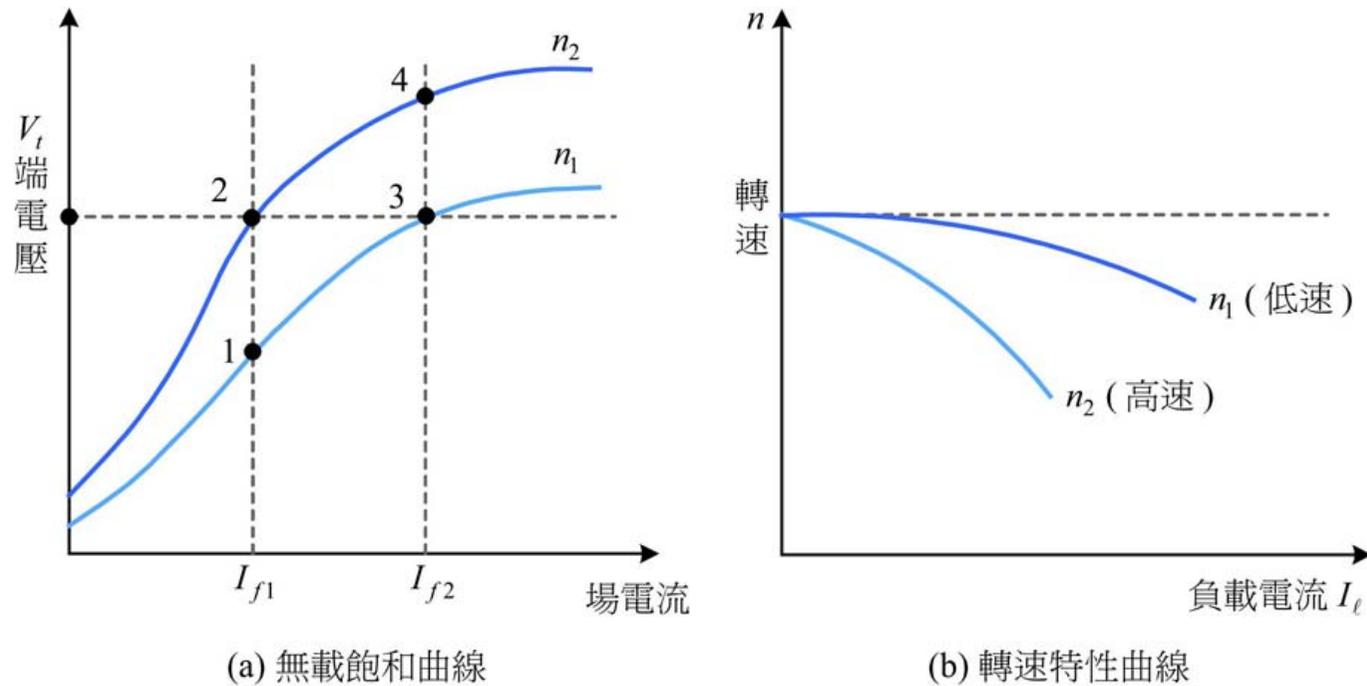


圖 8-38 分激式發電機不同轉速飽和曲線及轉速特性曲線

8-6 直流發電機的特性與運用

例 8-12

一部 200 V，40 kW 直流外激式發電機，電樞電阻 $R_a = 0.1\Omega$ 。若省略電樞反應及電刷接觸壓降，試求發電機的電壓調整率為若干？

解 電樞額定電流

$$I_a = \frac{P_o}{V_t} = \frac{40 \times 10^3}{200} = 200 \text{ A}$$

電樞電壓

$$\begin{aligned} E_a &= V_t + I_a R_a = 200 + 200 \times 0.1 \\ &= 220 \text{ V} \end{aligned}$$

電壓調整率

$$\begin{aligned} VR(\%) &= \frac{V_{nl} - V_{fl}}{V_{fl}} \times 100\% \\ &= \frac{220 - 200}{200} \times 100\% = 10\% \end{aligned}$$

End

8-7 直流發電機的並聯運轉

一、分激式發電機的並聯運轉

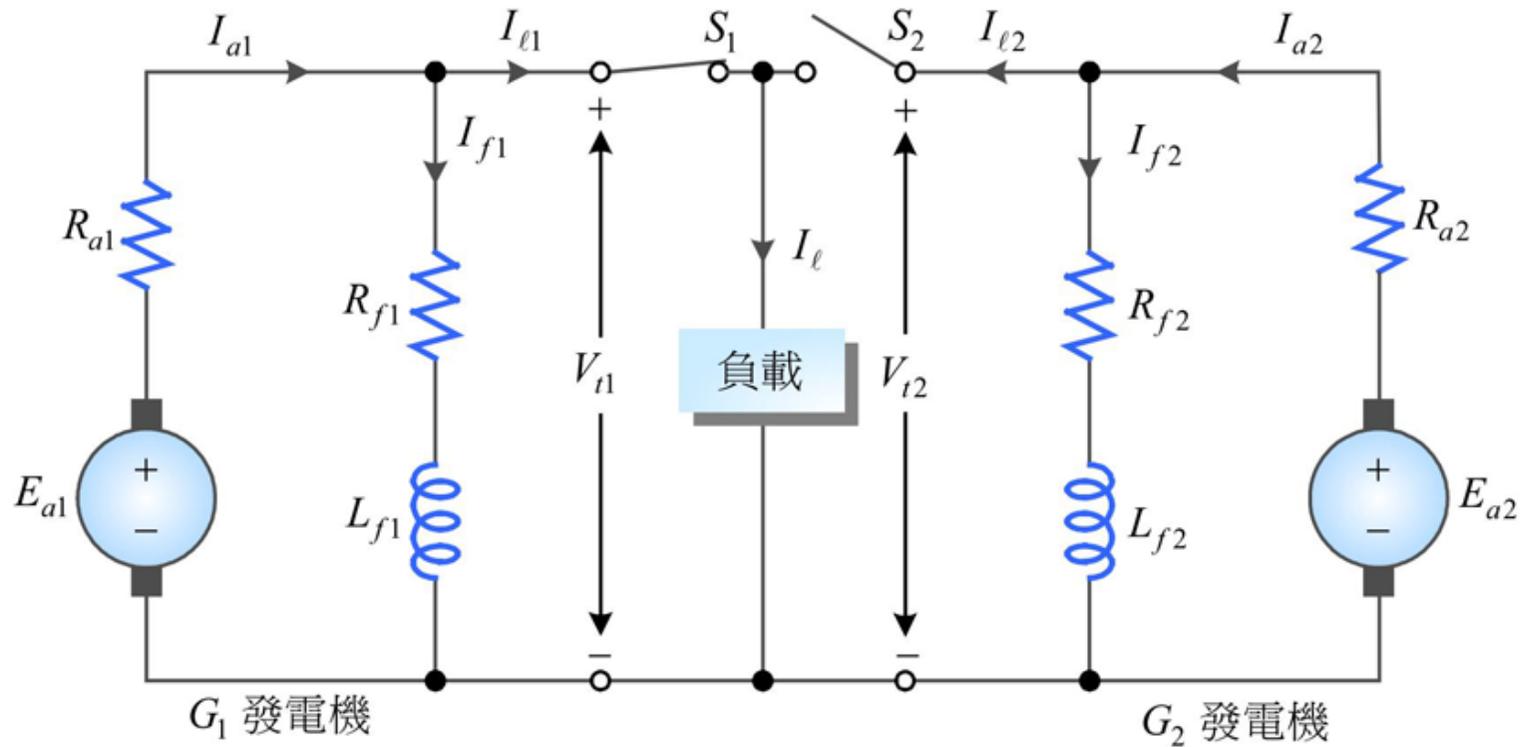


圖 8-39 兩部發電機並聯接線圖

8-7 直流發電機的並聯運轉

一、分激式發電機的並聯運轉 (續)

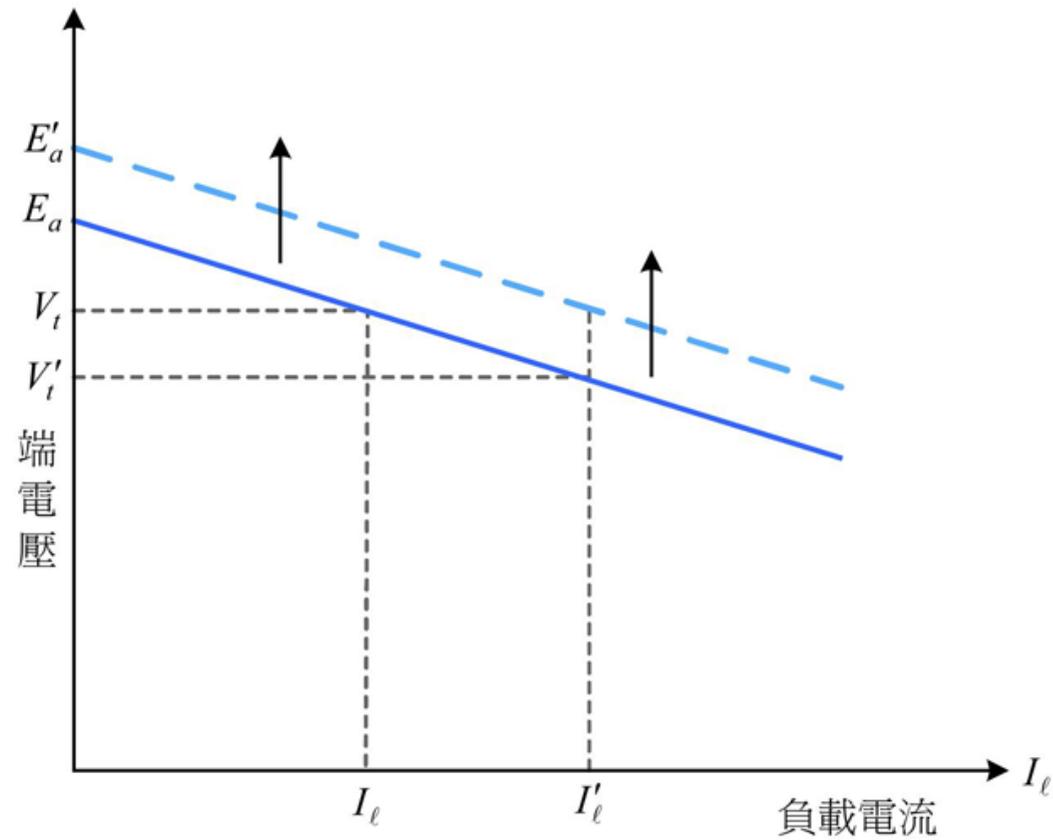


圖 8-40 單部發電機維持穩定端電壓的操作曲線

8-7 直流發電機的並聯運轉

一、分激式發電機的並聯運轉 (續)

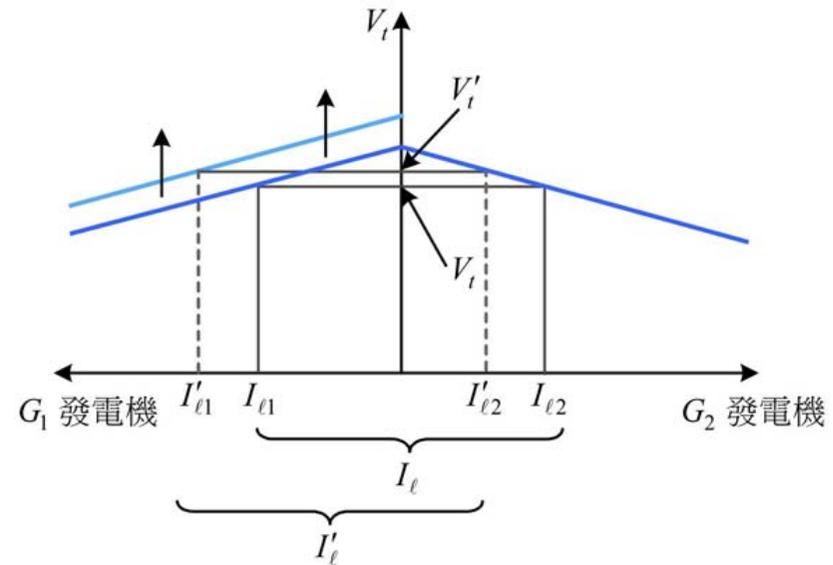
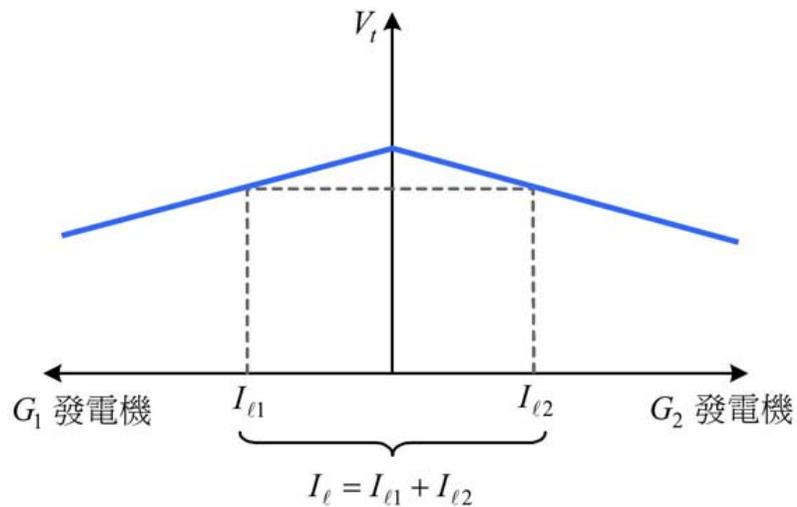


圖 8-41 發電機並聯運轉負載分配曲線

8-7 直流發電機的並聯運轉

一、分激式發電機的並聯運轉 (續)

$$I_{\ell} = I_{\ell 1} + I_{\ell 2} \quad (8-33)$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{I_{\ell 1}}{I_{\ell 2}} \quad (8-34)$$

$$E_{a1} - I_{a1}R_{a1} = E_{a2} - I_{a2}R_{a2} \quad (8-35)$$

$$P_1 = VI_{\ell 1} \quad (8-36)$$

$$P_2 = VI_{\ell 2} \quad (8-37)$$

8-7 直流發電機的並聯運轉

例 8-13

兩部直流分激式發電機做並聯運轉，若電樞電勢 $E_{a1} = 200 \text{ V}$ ， $E_{a2} = 202 \text{ V}$ ，電樞電阻 $R_{a1} = 0.02 \Omega$ ， $R_{a2} = 0.02 \Omega$ ，若忽略場電流，而總負載電流為 200 A ，試求：

- (1) 匯流排上的端電壓及各機所分擔的電流各為多少？
- (2) 若匯流排上的端電壓不變，為使各機平均分擔負載電流，則各機的電樞電勢 E_{a1} 及 E_{a2} 分別為多少？

8-7 直流發電機的並聯運轉

解 (1) 忽略場電流，負載總電流及端電壓關係方程式為

$$I_{a1} + I_{a2} = I_{\ell} = 200 \text{ A} \quad \textcircled{1}$$

$$E_{a1} - I_{a1}R_{a1} = E_{a2} - I_{a2}R_{a2}$$

$$200 - I_{a1} \times 0.02 = 202 - I_{a2} \times 0.02 \quad \textcircled{2}$$

由①及②式可得

$$I_{a1} = 50 \text{ A} , I_{a2} = 150 \text{ A}$$

端電壓

$$V_t = E_{a1} - I_{a1}R_{a1} = 200 - 50 \times 0.02 = 199 \text{ V}$$

(2) 端電壓保持 199 V，且各機負擔 100 A 時的電樞電壓為

$$E_{a1} = V_t + I_{a1}R_{a1} = 199 + 100 \times 0.02 = 201 \text{ V}$$

$$E_{a2} = V_t + I_{a2}R_{a2} = 199 + 100 \times 0.02 = 201 \text{ V}$$

End

8-7 直流發電機的並聯運轉

二、複激式發電機的並聯運轉

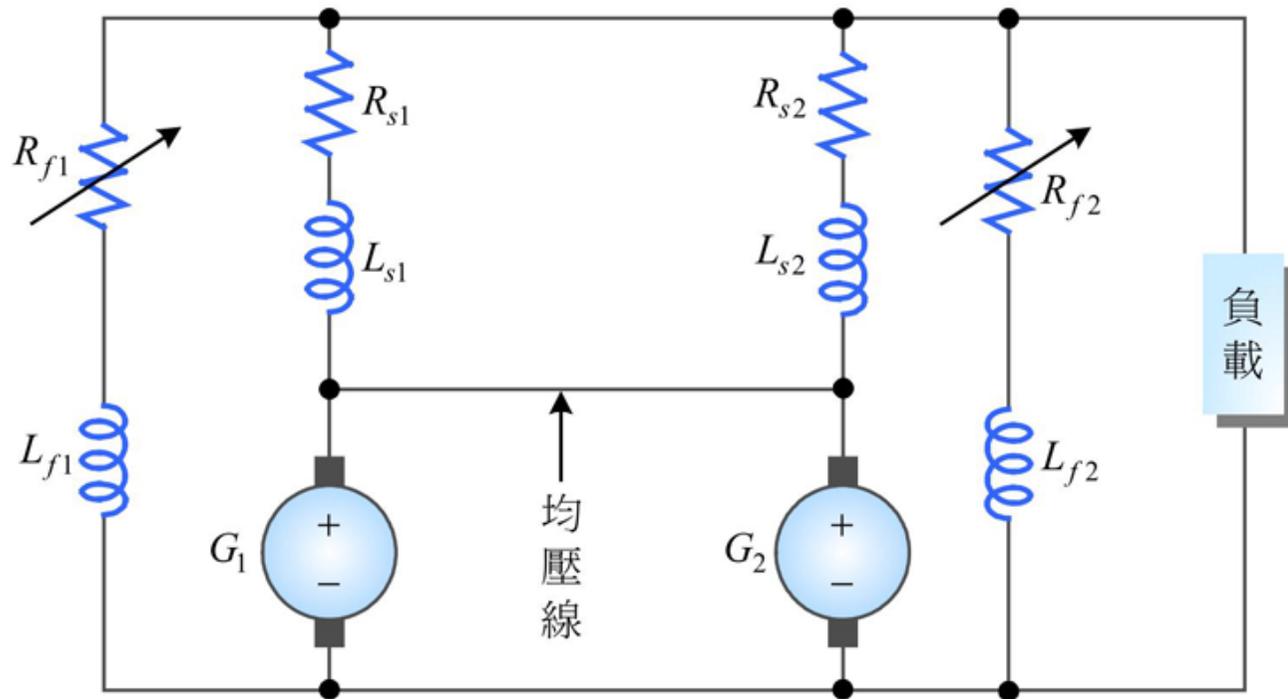


圖 8-42 置有均壓線的兩部複激式發電機之並聯運用接線圖

8-7 直流發電機的並聯運轉

例 8-14

兩部複激式發電機作並聯運轉，其容量分別為 $P_1 = 50 \text{ kW}$ ， $P_2 = 75 \text{ kW}$ 。已知 G_1 發電機串激場電阻 $R_{s1} = 0.03 \Omega$ ，當兩機共同供給負載 400 A 時，若每機均忽略分激場電流，試求：

- (1) 使兩機負載作合理分配， G_2 發電機串激場電阻 R_{s2} 應為多少？
- (2) 若兩機端電壓為 200 V ，則各機所分擔的負載電流為若干？

解 (1) 複激式發電機並聯端電壓 V_t 相同，且串激場電阻與輸出電流成反比，即

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{V_t I_{a1}}{V_t I_{a2}} = \frac{I_{a1}}{I_{a2}} = \frac{R_{s2}}{R_{s1}}$$
$$\therefore R_{s2} = \frac{P_1}{P_2} R_{s1} = \frac{50}{75} \times 0.03 = 0.02 \Omega$$

8-7 直流發電機的並聯運轉

(2) 忽略分激場電流，則

$$\frac{I_{a1}}{I_{a2}} = \frac{I_{\ell 1}}{I_{\ell 2}} = \frac{R_{s2}}{R_{s1}} = \frac{0.02}{0.03} \quad \textcircled{1}$$

$$I_{\ell} = I_{\ell 1} + I_{\ell 2} = 400 \quad \textcircled{2}$$

由①及②式解得

$$I_{\ell 1} = 160 \text{ A} , I_{\ell 2} = 240 \text{ A}$$

G_1 發電機所分擔負載功率為

$$P_{\ell 1} = V_t I_{\ell 1} = 200 \times 160 = 32 \text{ kW}$$

G_2 發電機所分擔負載功率為

$$P_{\ell 2} = V_t I_{\ell 2} = 200 \times 240 = 48 \text{ kW}$$

End

8-8 直流電動機的激磁特性與運用

- ▶ 直流電動機依場電流激磁方式可分為：
 1. 外激式（又稱他激式）直流電動機 (separately excited DC motor)；
 2. 分激式直流電動機 (shunt DC motor)；
 3. 串激式直流電動機 (series DC motor)；
 4. 複激式直流電動機 (compounded DC motor)；
 5. 永磁式直流電動機 (permanent magnet DC motor)。

8-8 直流電動機的激磁特性與運用

一、外激式直流電動機

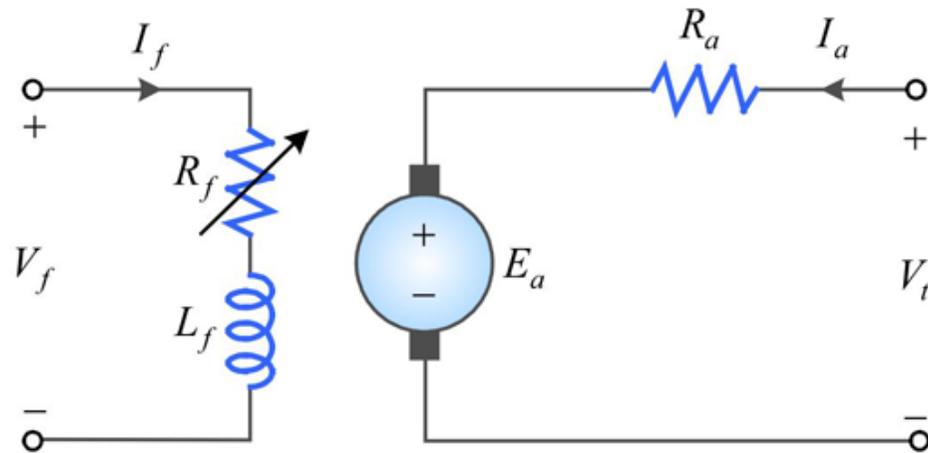


圖 8-43 直流電動機等效電路

8-8 直流電動機的激磁特性與運用

一、外激式直流電動機 (續)

$$n = \frac{E_a}{K_n \phi} = \frac{V_t - I_a R_a}{K_n \phi} \quad (8-41)$$

$$T = K_\omega \phi I_a \quad (8-42)$$

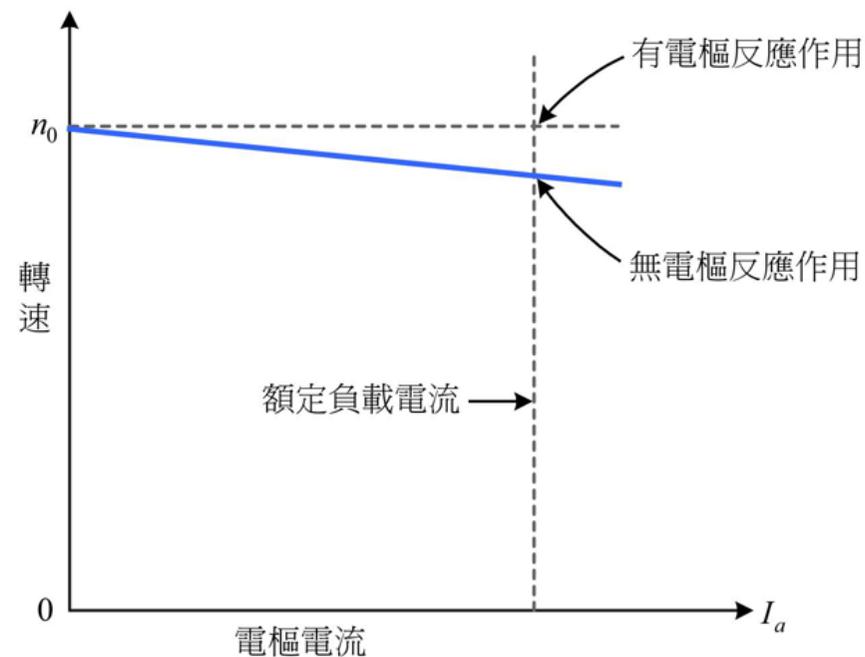


圖 8-44 外激式電動機轉速特性曲線

8-8 直流電動機的激磁特性與運用

二、分激式直流電動機

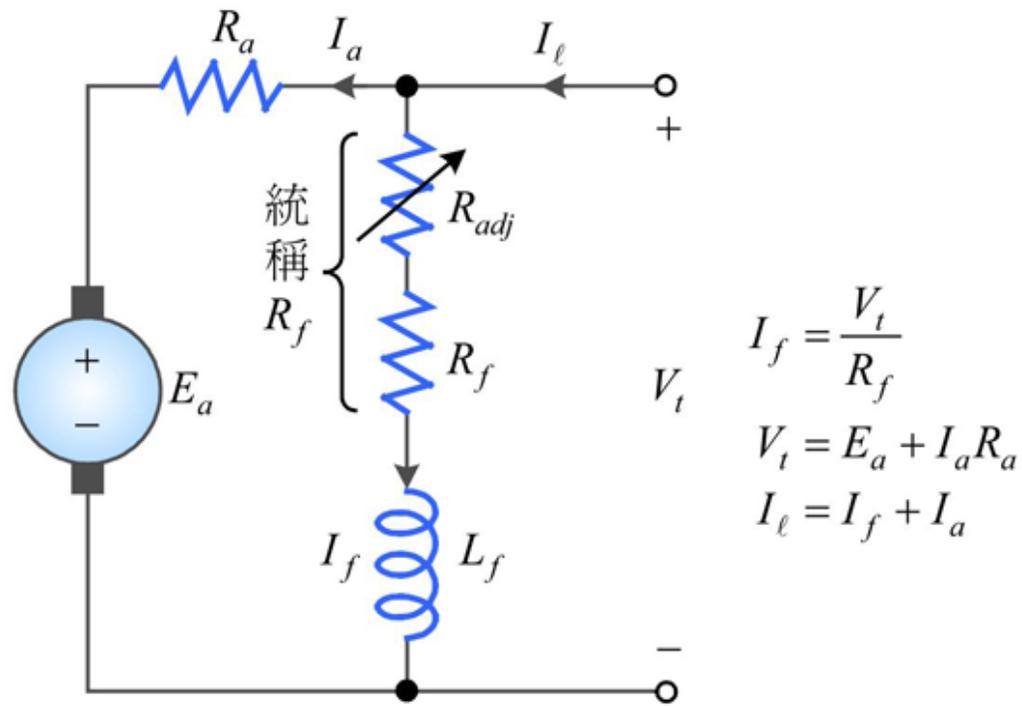


圖 8-46 分激式直流電動機等效電路

8-8 直流電動機的激磁特性與運用

二、分激式直流電動機 (續)

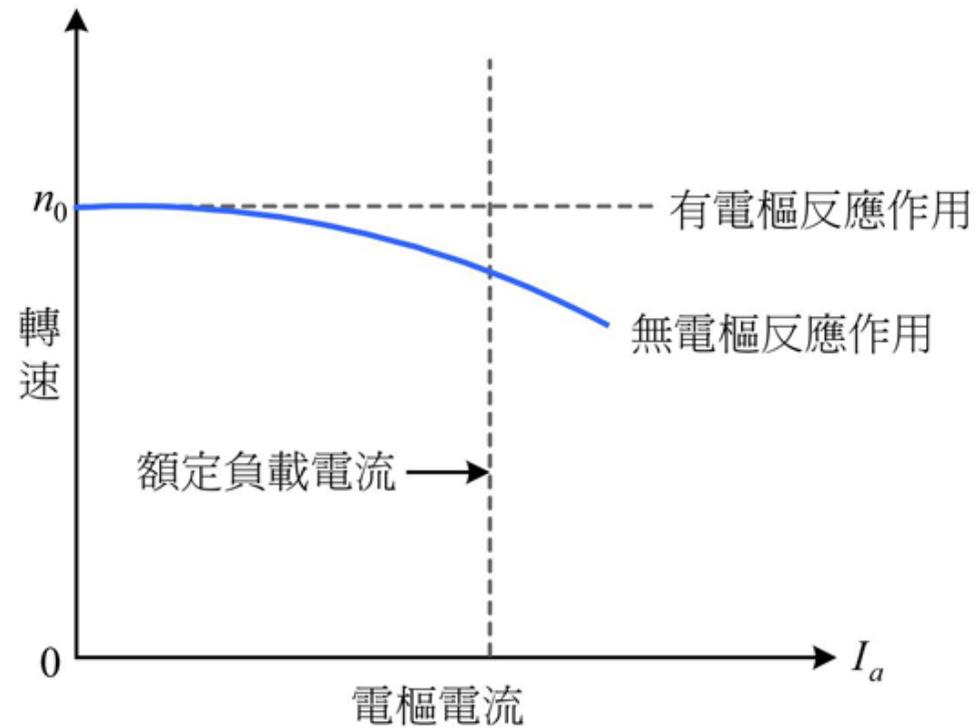


圖 8-47 分激電動機轉速特性曲線

8-8 直流電動機的激磁特性與運用

二、分激式直流電動機 (續)

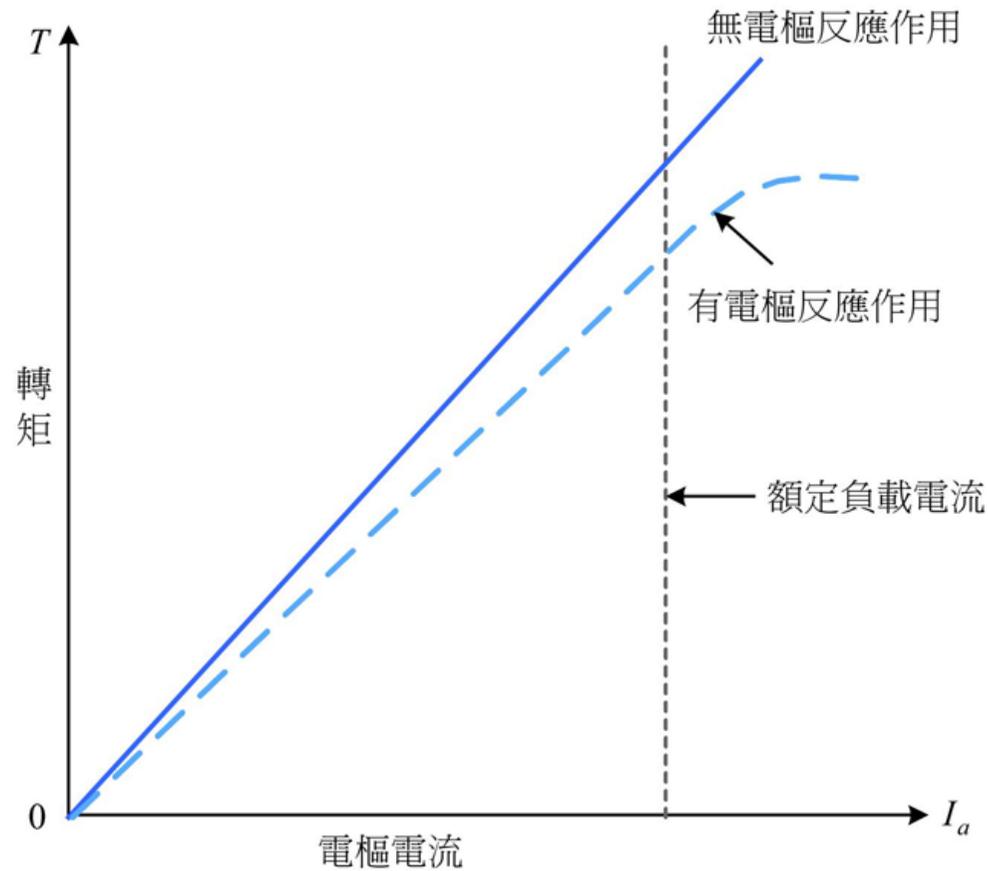


圖 8-48 分激電動機轉矩特性曲線

8-8 直流電動機的激磁特性與運用

例 8-15

一部 200 V 分激電動機，電樞電阻 $R_a = 0.1\Omega$ ，場電阻 $R_f = 200\Omega$ ，滿載時總電流為 60 A，額定轉速 1500 rpm，若忽略電刷壓降，試求：

- (1) 線電流為滿載 50% 時的轉速。
- (2) 線電流為滿載 120% 時的轉速。

解 滿載時

$$I_f = \frac{V_t}{R_f} = \frac{200}{200} = 1 \text{ A}$$

$$I_a = I_\ell - I_f = 60 - 1 = 59 \text{ A}$$

$$E_a = V_t - I_a R_a = 200 - 59 \times 0.1 = 194.1 \text{ V}$$

8-8 直流電動機的激磁特性與運用

(1) 線電流為滿載 50% 時

$$I'_\ell = 0.5 \times 60 = 30 \text{ A}$$

$$I'_a = I'_\ell - I_f = 30 - 1 = 29 \text{ A}$$

$$E'_a = V_t - I'_a R_a = 200 - 29 \times 0.1 = 197.1 \text{ V}$$

由 $E_a = K_n \phi n$ 得知電樞電勢 E_a 與轉速 n 成正比

$$\therefore n' = \frac{E'_a}{E_a} n = \frac{197.1}{194.1} \times 1500 = 1523.2 \text{ rpm}$$

(2) 線電流為滿載 120% 時

$$I''_\ell = 1.2 \times 60 = 72 \text{ A}$$

$$I''_a = I''_\ell - I_f = 72 - 1 = 71 \text{ A}$$

$$E''_a = V_t - I''_a R_a = 200 - 71 \times 0.1 = 192.9 \text{ V}$$

$$\therefore n'' = \frac{E''_a}{E_a} n = \frac{192.9}{194.1} \times 1500 = 1490.7 \text{ rpm}$$

End

8-8 直流電動機的激磁特性與運用

例 8-16

一部 200 V，10 HP 直流分激電動機，滿載時負載電流 50 A，轉速 1800 rpm，若電樞電阻 $R_a = 0.05\Omega$ ，磁場電阻 $R_f = 100\Omega$ ，試求：

- (1) 電磁轉矩 T_e ；
- (2) 效率 $\eta(\%)$ 。

8-8 直流電動機的激磁特性與運用

解

$$I_f = \frac{V_t}{R_f} = \frac{200}{100} = 2 \text{ A}$$

$$I_a = I_\ell - I_f = 50 - 2 = 48 \text{ A}$$

$$E_a = V_t - I_a R_a = 200 - 48 \times 0.05 = 197.6 \text{ V}$$

(1) 電磁轉矩 T_e 為

$$T_e = \frac{P_a}{\omega} = \frac{E_a I_a}{2\pi \times \frac{n}{60}} = \frac{197.6 \times 48}{2\pi \times \frac{1800}{60}} = 50.32 \text{ N} \cdot \text{m}$$

(2) 效率 $\eta(\%)$ 為

$$\eta(\%) = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% = \frac{10 \times 746}{200 \times 50} \times 100\% = 74.6\%$$

End

8-8 直流電動機的激磁特性與運用

三、串激式電動機

$$V_t = E_a + I_a (R_a + R_s) \quad (8-43)$$

$$n = \frac{E_a}{K_n \phi} = \frac{V_t - I_a (R_a + R_s)}{K_n \phi} \quad (8-44)$$

$$T = K_\omega \phi I_a = K_\omega (K_1 I_a) I_a = K_6 I_a^2 \quad (8-47)$$

8-8 直流電動機的激磁特性與運用

三、串激式電動機 (續)

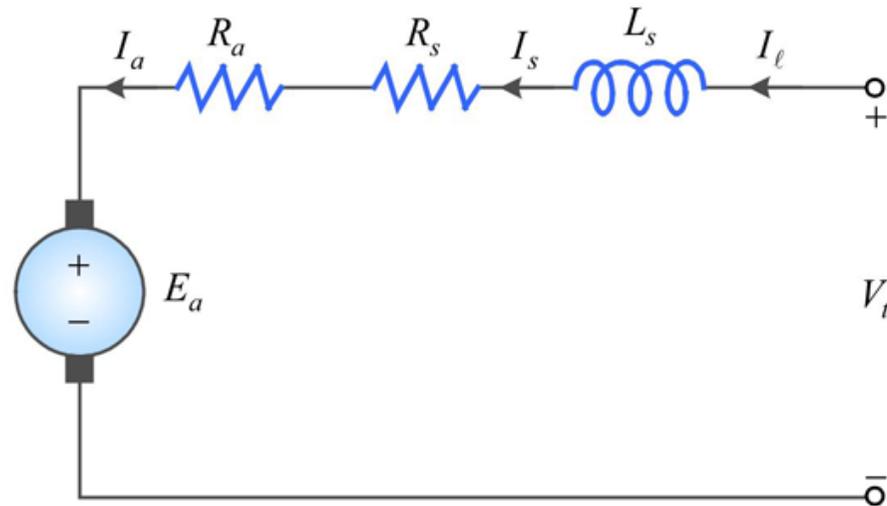


圖 8-49 直流串激電動機等效電路

8-8 直流電動機的激磁特性與運用

三、串激式電動機 (續)

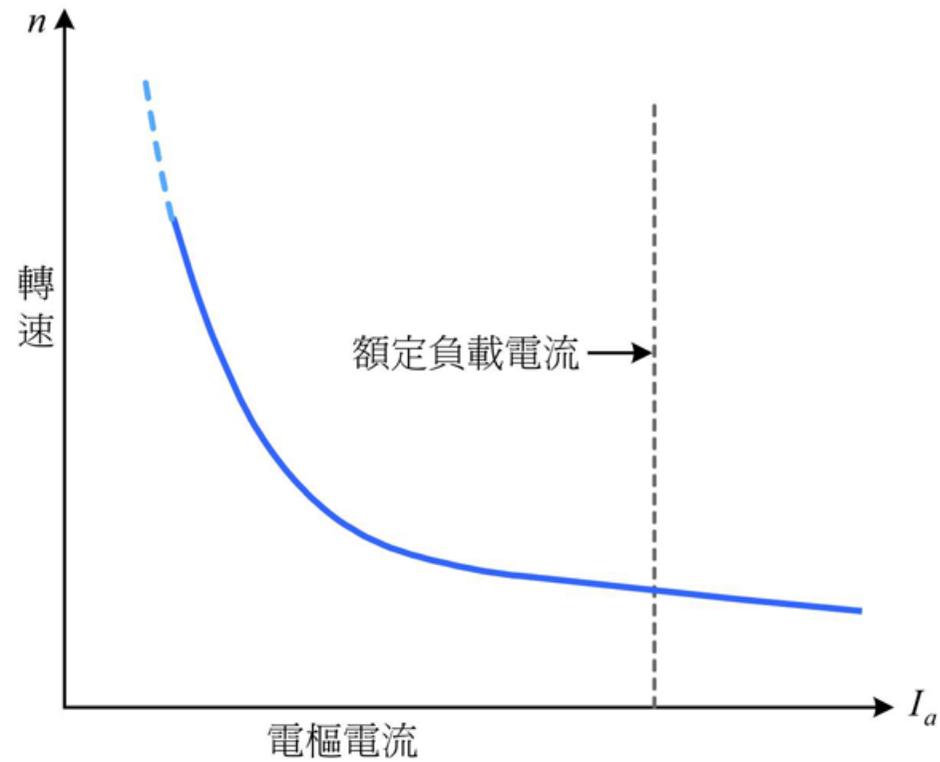


圖 8-50 串激電動機轉速特性曲線

8-8 直流電動機的激磁特性與運用

三、串激式電動機 (續)

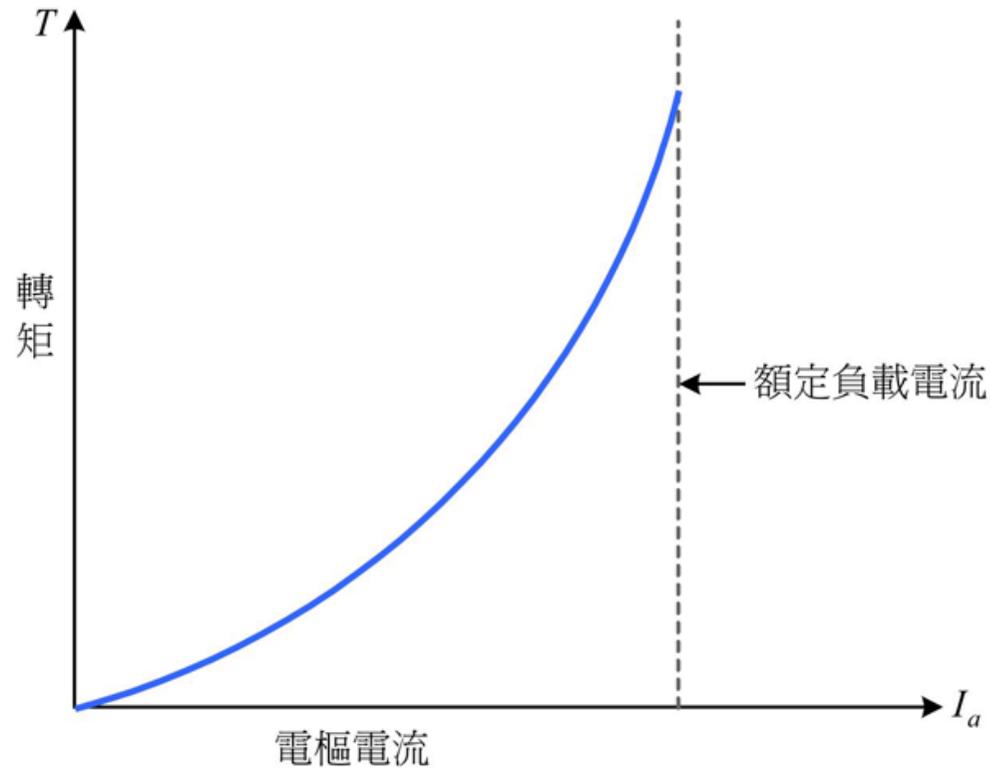


圖 8-51 串激電動機轉矩特性曲線

8-8 直流電動機的激磁特性與運用

例 8-17

一部 400 V 串激電動機，串激場電阻 $R_s = 0.3\Omega$ ，電樞電阻 $R_a = 0.1\Omega$ ，在額定電壓及負載電流 40A 時，轉速為 1800rpm，若設磁化曲線為一直線且電樞反應不計，試求負載電流為 50 A 時的轉速 n' 與電磁轉矩 T_e' 。

8-8 直流電動機的激磁特性與運用

解 負載電流 $I_\ell = 40 \text{ A}$ 時，電樞反電勢 E_a 為

$$E_a = V_t - I_a(R_a + R_s) = 400 - 40(0.1 + 0.3) = 384 \text{ V}$$

當負載電流 $I'_\ell = 50 \text{ A}$ 時，電樞反電勢 E'_a 為

$$E'_a = V_t - I'_a(R_a + R_s) = 400 - 50(0.1 + 0.3) = 380 \text{ V}$$

$$\because E_a = K_n \phi n \qquad \therefore \frac{E_a}{E'_a} = \frac{\phi \cdot n}{\phi' \cdot n'}$$

轉速

$$n' = \frac{\phi}{\phi'} \cdot \frac{E'_a}{E_a} \cdot n = \frac{I_a}{I'_a} \cdot \frac{E'_a}{E_a} \cdot n = \frac{40}{50} \cdot \frac{380}{384} \cdot 1800 = 1425 \text{ rpm}$$

電磁轉矩 T_e 為

$$T_e = \frac{P}{\omega} = \frac{E'_a I'_a}{2\pi \times \frac{n}{60}} = \frac{380 \times 50}{2\pi \times \frac{1425}{60}} = 127.3 \text{ N} \cdot \text{m}$$

8-8 直流電動機的激磁特性與運用

Matlab

```
Vt=400;  
Ra=0.1;  
Rs=0.3;  
Ia1=40;  
n1=1800;    %負載電流為 Ia1 時之轉速  
Ea1=Vt-Ia1*(Ra+Rs); %負載電流為 Ia1 時之電樞電壓值  
  
Ia2=50;  
Ea2=Vt-Ia2*(Ra+Rs); %負載電流為 Ia2 時之電樞電壓值  
n2=(Ia1/Ia2)*(Ea2/Ea1)*n1;    %負載電流為 Ia2 時之轉速  
  
P2=Ea2*Ia2;  
w2=2*pi*n2/60;  
T2=P2/w2;    %負載電流為 Ia2 時之電磁轉矩
```

End

8-8 直流電動機的激磁特性與運用

例 8-18

一部串激電動機，於負載電流 10 A 時產生 20 N·m 轉矩，試求：

- (1) 當負載電流增至 20 A 時，若磁場尚未飽和，此時電動機產生的轉矩為若干？
- (2) 當負載電流增至 30 A 時，磁通量增加 80%，此時電動機產生的轉矩為若干？

8-8 直流電動機的激磁特性與運用

解 (1) 磁場未飽和，所以轉矩 $T = K_{\omega} \phi I_a = K I_a^2$

$$\therefore \frac{T}{T'} = \frac{I_a^2}{(I'_a)^2}$$

$$T' = \left(\frac{I'_a}{I_a} \right)^2 \cdot T = \left(\frac{20}{10} \right)^2 \cdot 20 = 80 \text{ N} \cdot \text{m}$$

(2) 磁場產生飽和現象

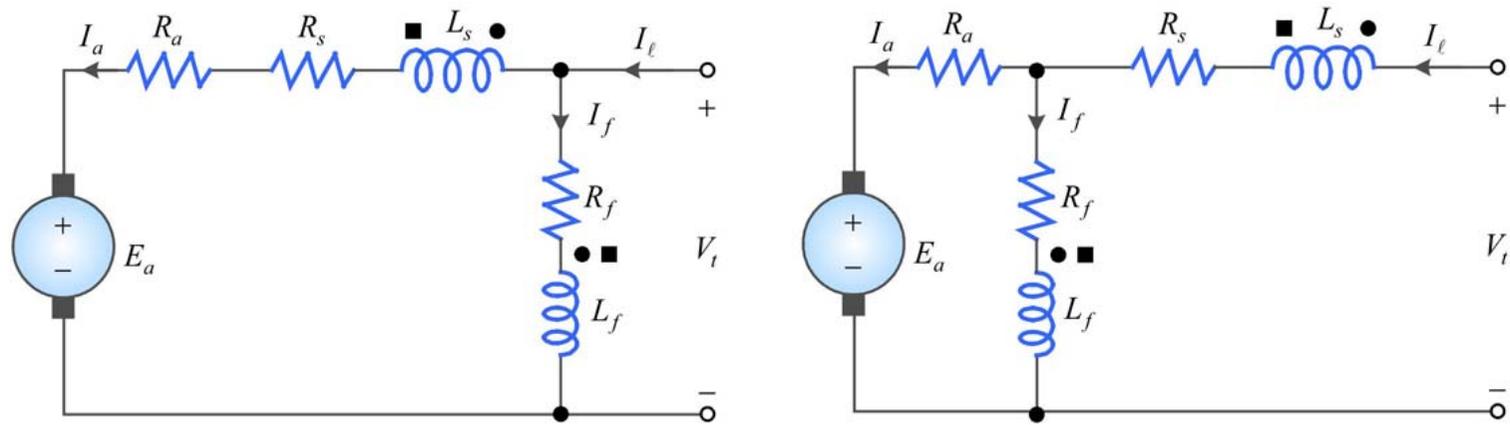
$$\therefore \frac{T}{T'} = \frac{\phi \cdot I_a}{\phi' \cdot I'_a}$$

$$T' = \frac{\phi'}{\phi} \cdot \frac{I_a}{I'_a} \cdot T = \frac{1.8}{1} \cdot \frac{30}{10} \cdot 20 = 108 \text{ N} \cdot \text{m}$$

End

8-8 直流電動機的激磁特性與運用

四、複激式電動機



(a) 長並式複激動電動機

(b) 短並式複激動電動機

圖 8-52 複激式直流電動機等效電路

$$F_{net} = F_h \pm F_s - F_{ar} \tag{8-48}$$

$$I_f^* = I_f \pm \frac{N_s}{N_f} I_a - \frac{F_{ar}}{N_f} \tag{8-49}$$

8-8 直流電動機的激磁特性與運用

四、複激式電動機 (續)

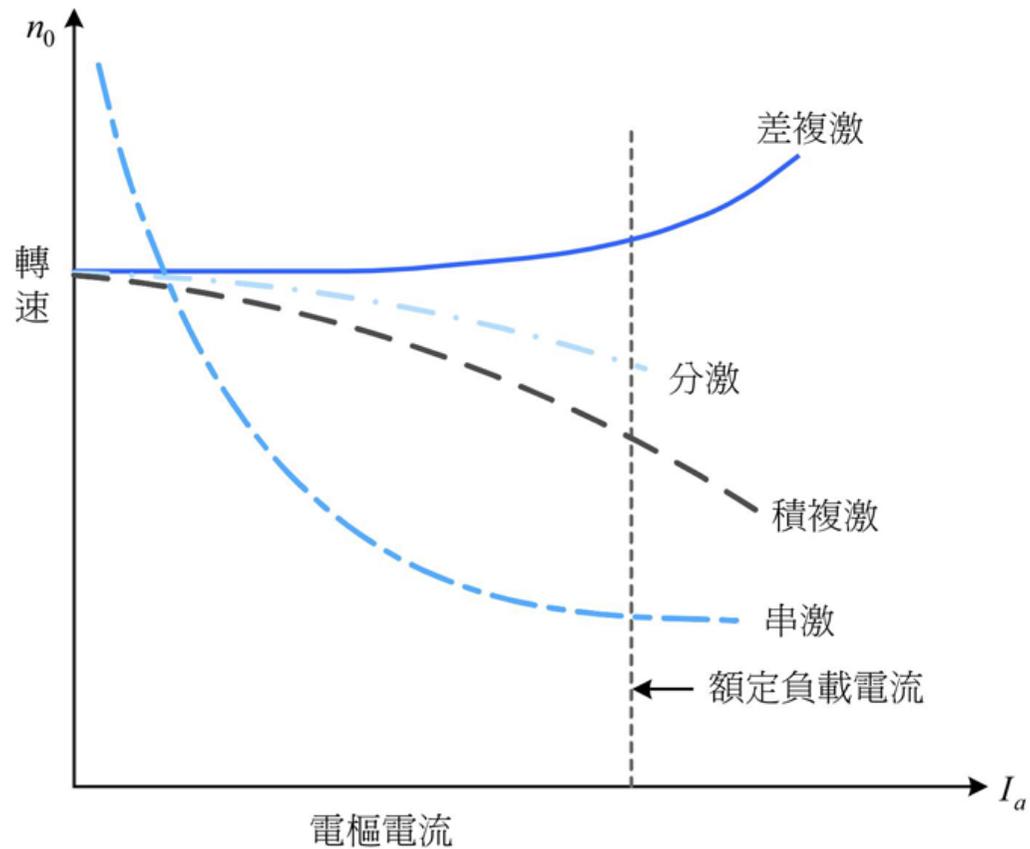


圖 8-53 複激電動機轉速特性曲線

8-8 直流電動機的激磁特性與運用

四、複激式電動機 (續)

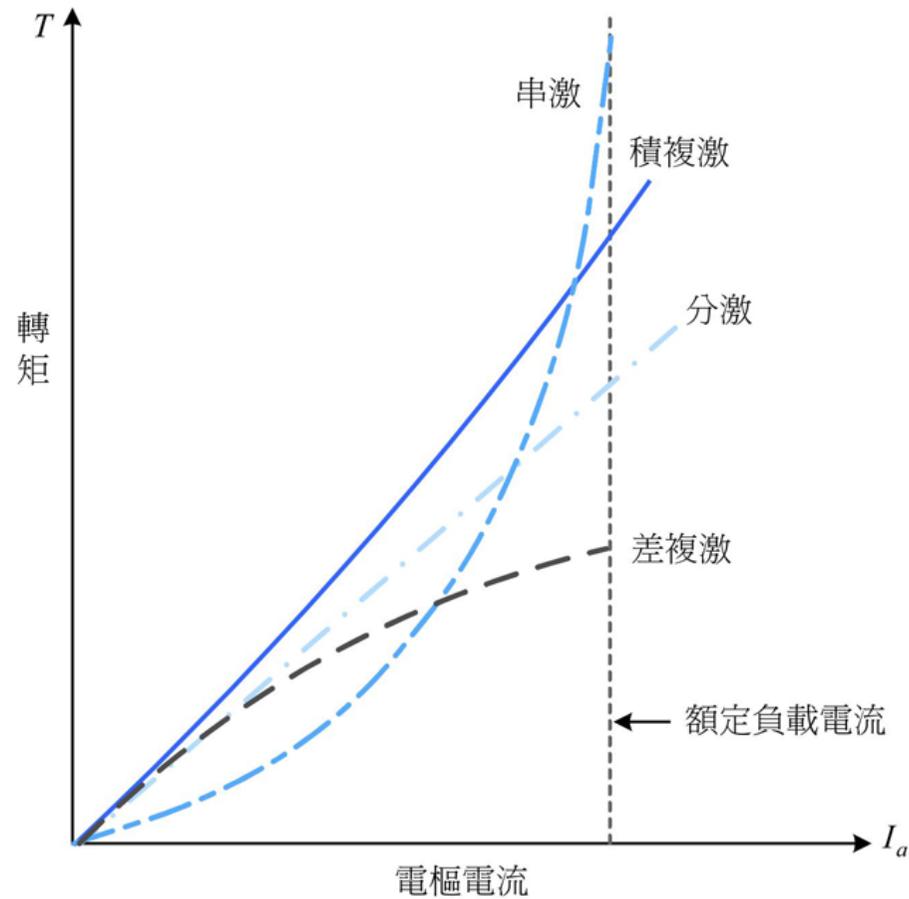


圖 8-54 複激電動機轉矩特性曲線

8-8 直流電動機的激磁特性與運用

例 8-19

一部長並式積複激電動機在額定狀態下運轉，電樞電流為 100 A 時產生 100 N·m 轉矩。若將串激場短路，使成為分激式電動機運轉。電樞電流維持不變情況下，產生 90 N·m 轉矩，試求：

- (1) 串激繞組所增加磁通百分比？
- (2) 當積複激電動機電樞電流增加 20% 時，所產生的轉矩為若干？
(設串激繞組磁化曲線尚未飽和)

8-8 直流電動機的激磁特性與運用

解 (1) 積複激電動機轉矩 T 為

$$T = K_{\omega} (\phi_f + \phi_s) I_a$$

分激電動機轉矩 T' 為

$$T' = K_{\omega} \phi_f I_a$$

$$\therefore \frac{T}{T'} = \frac{\phi_f + \phi_s}{\phi_f} = 1 + \frac{\phi_s}{\phi_f}$$

$$\frac{\phi_s}{\phi_f} \times 100\% = \left(\frac{T}{T'} - 1 \right) \times 100\% = \left(\frac{100}{90} - 1 \right) \times 100\% = 11.1\%$$

(2) 負載增加時 $I_a'' = 1.2I_a$, $\phi'' = \phi_f + 1.2\phi_s$

$$\therefore T'' = K_{\omega} \phi'' I_a'' = K_{\omega} \phi_f \left(1 + 1.2 \frac{\phi_s}{\phi_f} \right) \times 1.2 I_a$$

$$= 1.2 \times \left(1 + 1.2 \times \frac{\phi_s}{\phi_f} \right) \times K_{\omega} \phi_f I_a$$

$$= 1.2 \times (1 + 1.2 \times 0.111) \times 90 = 122.39 \text{ N} \cdot \text{m}$$

8-8 直流電動機的激磁特性與運用

Matlab

```
Ia=100;  
T1=100; %長並式積複激電動機之轉矩  
T2=90; %分激式電動機之轉矩  
  
%(1) 串激磁通對並激磁通之比值  
phi_s_to_f=T1/T2-1;  
  
%(2) 電樞電流增加 20%時  
Ia3=1.2*Ia;  
T3=T2*(Ia3/Ia)*(1+(Ia3/Ia)*phi_s_to_f); %長並式積複激電  
動機之轉矩
```

End

8-8 直流電動機的激磁特性與運用

五、直流電機的損失與效率

(一) 直流電機損失

- ▶ 直流電機的損失可歸納為四種：(1) 銅損；(2) 鐵損；(3) 機械損；(4) 雜散負載損。

(二) 直流電機效率

$$\eta (\%) = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (8-54)$$

$$\eta(\%) = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}} \times 100\% \quad (\text{發電機用}) \quad (8-55)$$

$$\eta(\%) = \frac{P_{in} - P_{loss}}{P_{in}} \times 100\% \quad (\text{電動機用}) \quad (8-56)$$

8-8 直流電動機的激磁特性與運用

例 8-20

一部 220 V，10 HP 直流電動機，滿載運轉時銅損 500 W，機械損、鐵損與雜散損失 400 W，試求：(1) 總損失；(2) 效率 $\eta(\%)$ 。

解 (1) 總損失 $P_{loss} = 500 + 400 = 900 \text{ W}$

(2) $P_{in} = P_{out} + P_{loss} = 10 \times 746 + 900 = 8360 \text{ W}$

$$\eta(\%) = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% = \frac{10 \times 746}{8360} \times 100\% = 89.2\%$$

End

8-8 直流電動機的激磁特性與運用

例 8-21

一部分激發電機滿載時端電壓 200 V，供給負載 50 A 電流，此發電機分激場繞組電阻 $R_f = 100\Omega$ ，電樞繞組電阻 $R_a = 0.05\Omega$ ，在額定轉速和電壓時鐵損和機械總損失 500 W，若電刷與換向器接觸壓降為 2 V，而雜散損失不計，試求滿載時效率為多少？

8-8 直流電動機的激磁特性與運用

解 輸出功率 $P_{out} = V_t I_\ell = 200 \times 50 = 10,000 \text{ W}$

$$\text{場激磁電流 } I_f = \frac{V_t}{R_f} = \frac{200}{100} = 2 \text{ A}$$

$$\text{場繞組銅損 } I_f^2 R_f = 2^2 \times 100 = 400 \text{ W}$$

$$\text{電樞繞組銅損 } I_a^2 R_a = (I_f + I_\ell)^2 R_a = (2 + 50)^2 \times 0.05 = 135.2 \text{ W}$$

$$\text{電刷與換向器接觸損失 } V_b I_a = 2 \times (2 + 50) = 104 \text{ W}$$

$$\text{總損失 } P_{loss} = 400 + 135.2 + 104 + 500 = 1139.2 \text{ W}$$

$$\begin{aligned} \text{效率 } \eta(\%) &= \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}} \times 100\% = \frac{10,000}{10,000 + 1139.2} \times 100\% \\ &= 89.77\% \end{aligned}$$

End

8-8 直流電動機的激磁特性與運用

例 8-22

一部 50 kW 直流發電機，其固定損失和滿載變動損失均為 4 kW，設此機在全日運轉狀態為，滿載 6 小時，半載 12 小時，其餘時間為空載，試求該發電機：

- (1) 滿載效率為多少？
- (2) 半載效率為多少？
- (3) 全日效率為多少？

8-8 直流電動機的激磁特性與運用

解 (1) 滿載效率

$$\begin{aligned}\eta(\%) &= \frac{P_{out}}{P_{out} + P_c + I_\ell^2 R} \times 100\% \\ &= \frac{50 \times 10^3}{50 \times 10^3 + 4 \times 10^3 + 4 \times 10^3} \times 100\% = 86.2\%\end{aligned}$$

(2) 半載效率

$$\begin{aligned}\eta(\%) &= \frac{\frac{1}{2} P_{out}}{\frac{1}{2} P_{out} + P_c + \left(\frac{1}{2}\right)^2 I_\ell^2 R} \times 100\% \\ &= \frac{\frac{1}{2} \times 50 \times 10^3}{\frac{1}{2} \times 50 \times 10^3 + 4 \times 10^3 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 4 \times 10^3} \times 100\% = 83.3\%\end{aligned}$$

8-8 直流電動機的激磁特性與運用

(3) 全日效率

$$\eta(\%) = \frac{6 \times 50 \times 10^3 + 12 \times \frac{1}{2} \times 50 \times 10^3}{6 \times 50 \times 10^3 + 12 \times \frac{1}{2} \times 50 \times 10^3 + 24 \times 4 \times 10^3 + 6 \times 4 \times 10^3 + 12 \times \left(\frac{1}{2}\right)^2 4 \times 10^3} \times 100\%$$
$$= 81.96\%$$

End

8-8 直流電動機的激磁特性與運用

例 8-23

一部 20 kW，380 V 長分路複激發電機，中間極和電樞繞組總和電阻為 0.2Ω ，串激場繞組電阻 0.2Ω 。所有電阻均已換算至 75°C ，若忽略電刷接觸壓降，且固定損失功率為 1100 W，試求：

- (1) 效率最大時電機輸出功率為多少？
- (2) 最大效率為多少？

8-8 直流電動機的激磁特性與運用

解 (1) $R = R_a + R_s = 0.2 + 0.2 = 0.4\Omega$

$$I_\ell = \sqrt{\frac{P_c}{R}} = \sqrt{\frac{1100}{0.4}} = 52.44 \text{ A}$$

最大效率的輸出功率為

$$P_{out} = V_t I_\ell = 380 \times 52.44 = 19.93 \text{ kW}$$

(2) 最大效率為

$$\begin{aligned}\eta_{\max} (\%) &= \frac{V_t I_\ell}{V_t I_\ell + P_c + I_\ell^2 R} \times 100\% \\ &= \frac{V_t I_\ell}{V_t I_\ell + 2P_c} \times 100\% \\ &= \frac{19.93 \times 10^3}{19.93 \times 10^3 + 2 \times 1100} \times 100\% \\ &= 90.06\%\end{aligned}$$

End

8-9 直流電動機的起動

$$I_{a,s} = \frac{V_t - E_a}{R_a} = \frac{V_t}{R_a} \quad (8-63)$$

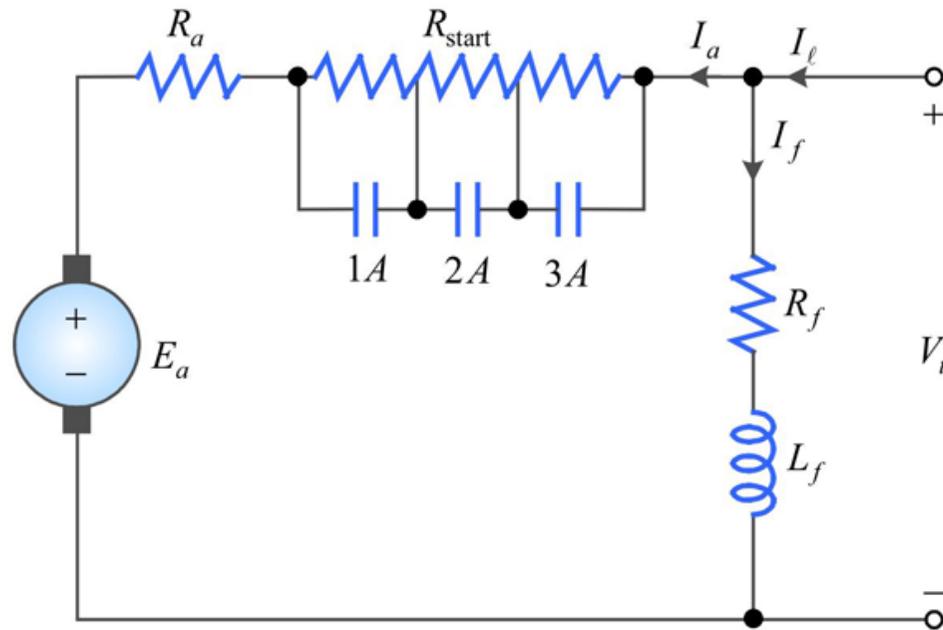
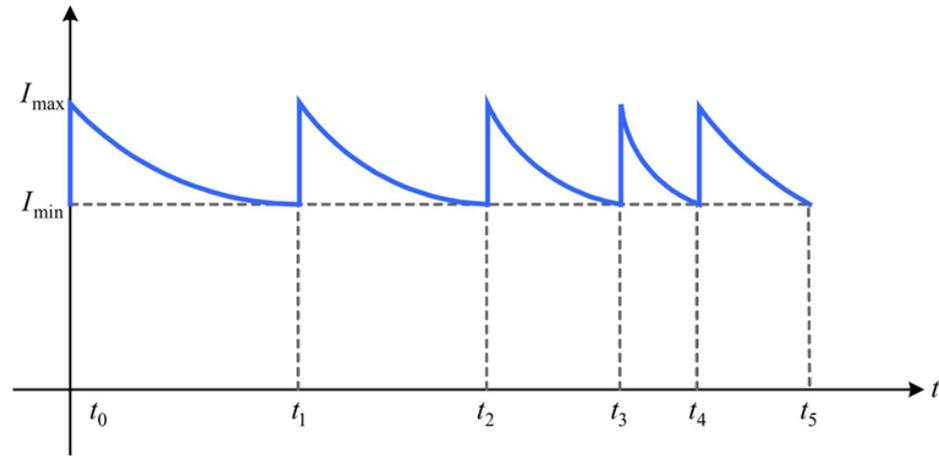
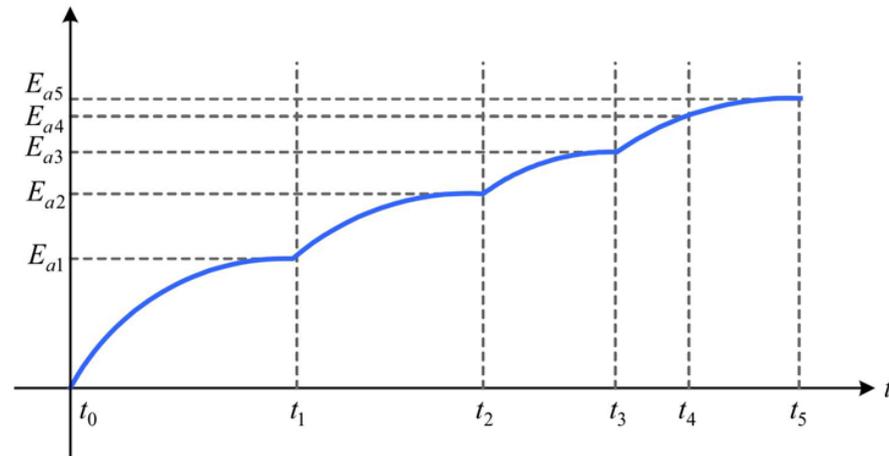


圖 8-55 分激電動機串接起動電阻接線圖

8-9 直流電動機的起動



(a) 起動電流 - 時間特性曲線



(b) 電樞反電勢 - 時間特性曲線

圖 8-56 直流電動機起動電流及反電勢時間特性曲線

8-9 直流電動機的起動

一、起動電阻移除計算

$$I_a = \frac{V_t}{R_a + \sum_{i=1}^m r_i} = I_{\max} \quad (8-64)$$

$$I_a = \frac{V_t - E_a}{R_1} = I_{\min} \quad (8-65)$$

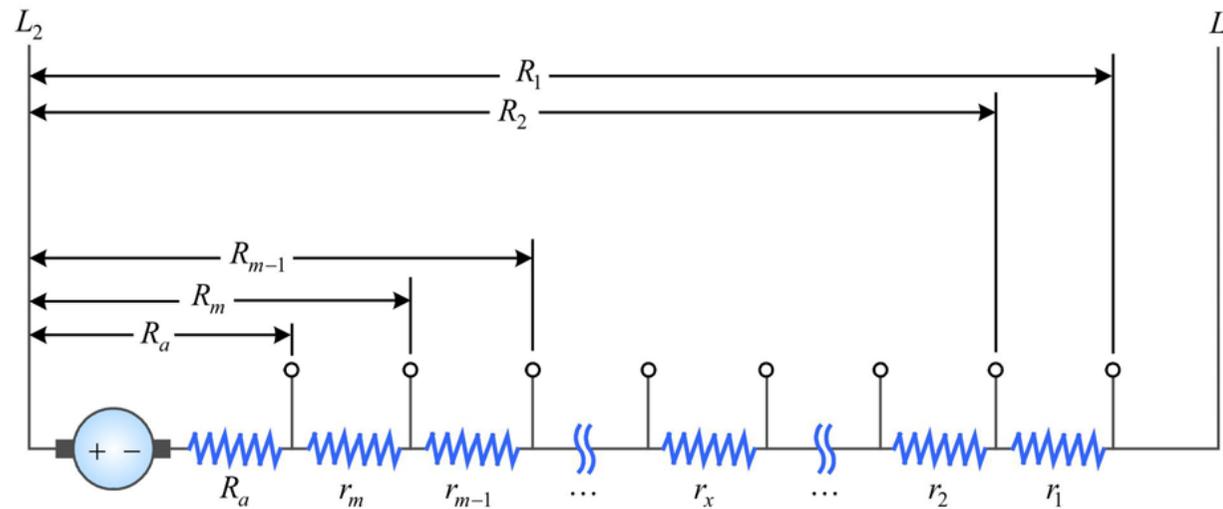


圖 8-57 m 個起動電阻值， $(m+1)$ 段起動步驟

8-9 直流電動機的起動

一、起動電阻移除計算(續)

$$I_a = \frac{V_t - E_a}{R_2} = I_{\max} \quad (8-66)$$

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{I_{\max}}{I_{\min}} \quad (8-67)$$

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_2}{R_3} = \dots = \frac{R_x}{R_{x+1}} = \dots = \frac{R_{m-1}}{R_m} = \frac{R_m}{R_a} = \frac{I_{\max}}{I_{\min}} \quad (8-68)$$

8-9 直流電動機的起動

一、起動電阻移除計算(續)

$$\begin{aligned}r_1 &= R_1 - R_2 \\r_2 &= R_2 - R_3 \\&\vdots \\r_x &= R_x - R_{x+1} \\&\vdots \\r_{m-1} &= R_{m-1} - R_m \\r_m &= R_m - R_a\end{aligned}\tag{8-69}$$

8-9 直流電動機的起動

二、起動控制法

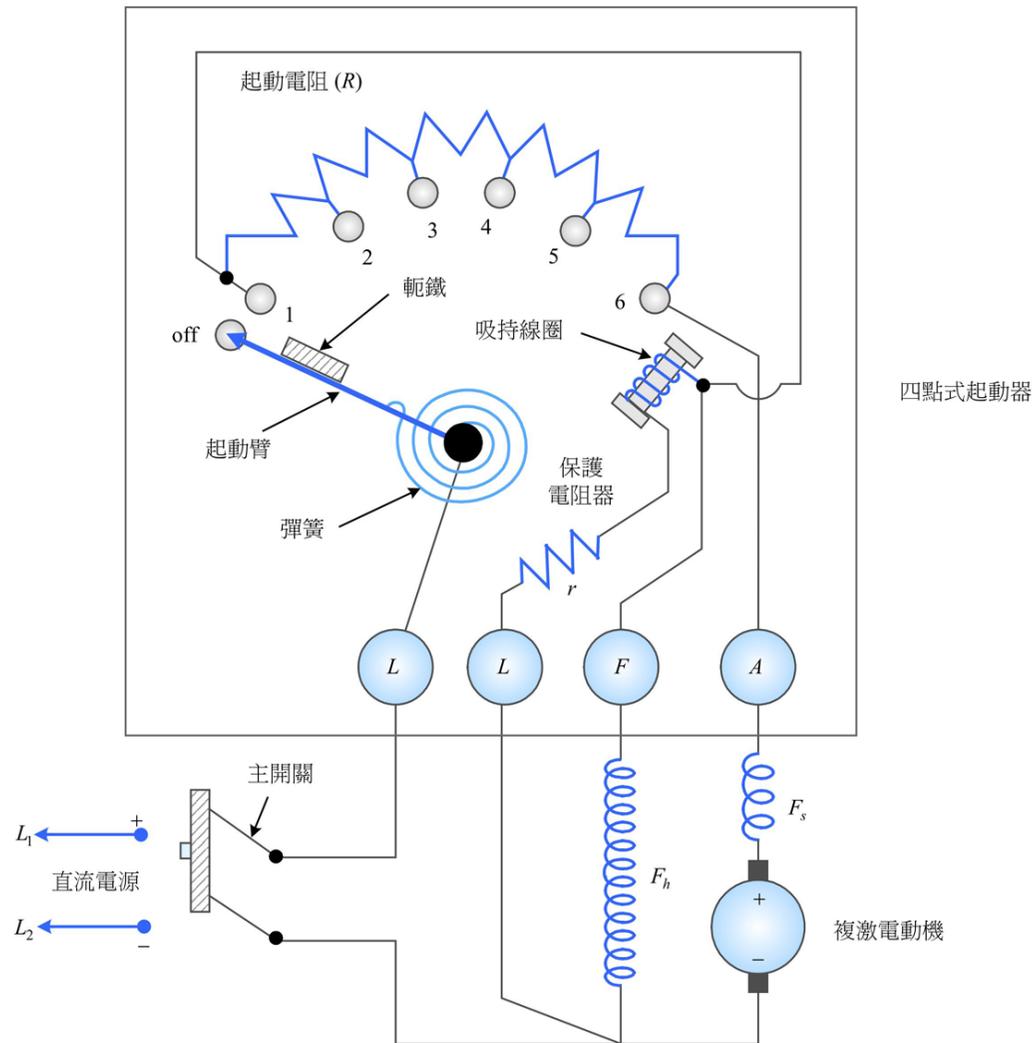
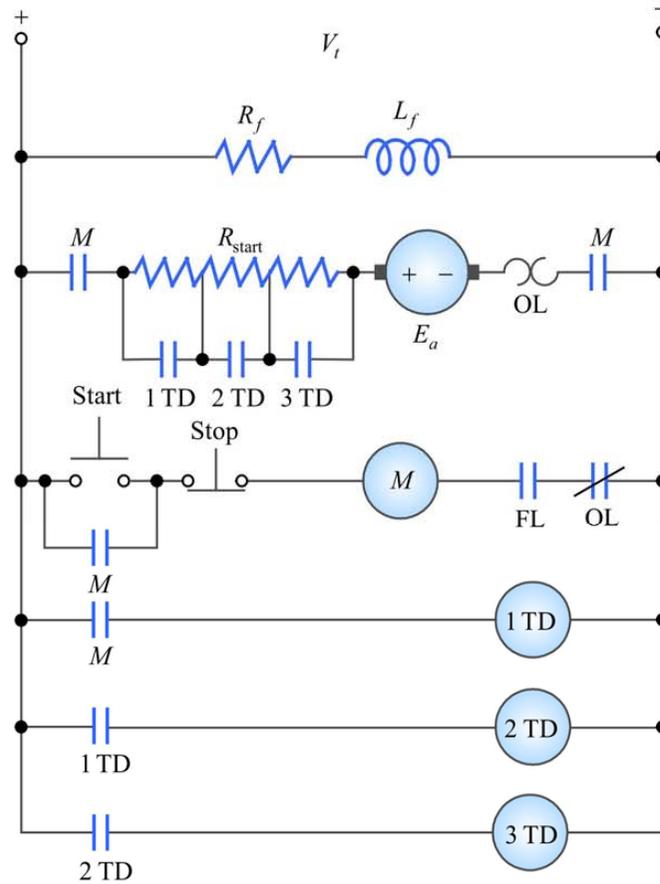


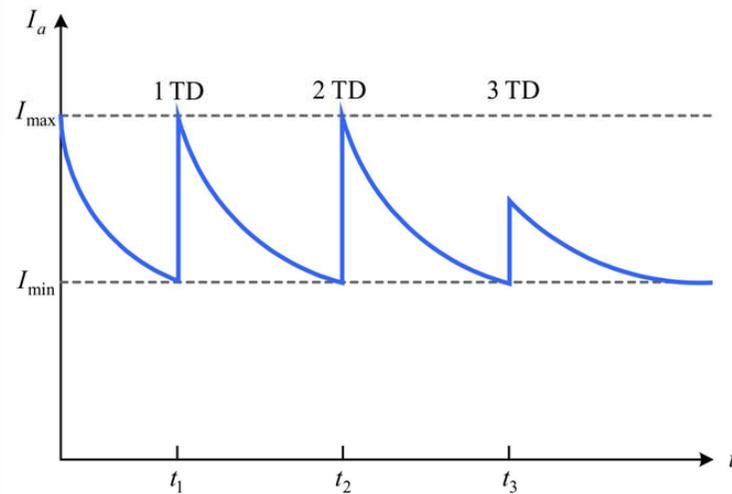
圖 8-58 四點式起動器與複激式電動機之接線圖

8-9 直流電動機的起動

二、起動控制法 (續)



(a) 使用延時電驛的直流電動機起動電路



(b) 起動過程中電動機電樞電流波形

圖 8-59 利用延時電驛控制起動電阻電路及相對電樞電流波形

8-9 直流電動機的起動

例 8-24

如圖 8-55 所示，一部額定 50 HP，200V，200A 分激電動機，電樞電阻 0.07Ω 。現欲設一起動器使起動電流不超過額定電流的兩倍。當電樞電流降至額定值時將下一段起動電阻移除，試求：

- (1) 要限制起動電流在上述範圍內，則起動電阻須分成幾段？
- (2) 計算每一段所需移除的電阻值，並求出每一段電阻移除時的電樞電壓值？

解 (1) 起動時 $E_a = 0$ ，所需總起動電阻 R_{tot} 為

$$R_{tot} = R_a + R_{start} = \frac{V_t}{I_{max}} = \frac{200}{2 \times 200} = 0.5\Omega$$

$$\text{起動電阻比 } SRR = \frac{R_{tot}}{R_a} = \frac{0.5}{0.07} = 7.14$$

$$\text{起動電流比 } CR = \frac{I_{max}}{I_{min}} = \frac{400}{200} = 2$$

$$\text{起動階段 } m = \frac{SRR}{CR} = \frac{7.14}{2} = 3.57$$

因此電動機須有三個起動階段，即須將起動電阻分成三段。

8-9 直流電動機的起動

(2) 設起動電阻分為 R_1 、 R_2 及 R_3

起動時 $E_a = 0$ ， $I_{a,s} = I_{\max} = 2I_a = 2 \times 200 = 400 \text{ A}$

$$R_{tot} = R_a + R_1 + R_2 + R_3 = \frac{V_t}{I_{\max}} = \frac{200}{400} = 0.5 \Omega$$

當轉速上升，電樞電流 I_a 下降至 200 A 時， E_a 為

$$E_a = V_t - I_a R_{tot} = 200 - 200 \times 0.5 = 100 \text{ V}$$

當 $E_a = 100 \text{ V}$ 時，須將 R_1 電阻由電路移除，此時 I_a 又上升至 400 A，因此

$$R'_{tot} = R_a + R_2 + R_3 = \frac{V_t - E_a}{I_{\max}} = \frac{200 - 100}{400} = 0.25 \Omega$$

當轉速繼續上升， I_a 又下降至 200 A，此時 E_a 為

$$E_a = V_t - I_a R'_{tot} = 200 - 200 \times 0.25 = 150 \text{ V}$$

8-9 直流電動機的起動

當 $E_a = 150 \text{ V}$ 時，須將 R_2 電阻由電路移除，此時 I_a 又上升至 400 A ，因此

$$R''_{tot} = R_a + R_3 = \frac{V_t - E_a}{I_{\max}} = \frac{200 - 150}{400} = 0.125 \Omega$$

當轉速繼續上升， I_a 又下降至 200 A ，此時 E_a 為

$$E_a = V_t - I_a R''_{tot} = 200 - 200 \times 0.125 = 175 \text{ V}$$

當 $E_a = 175 \text{ V}$ 時，須將 R_3 電阻由電路移除，此時電樞電路僅剩 R_a 電樞電阻，因此 I_a 上升到

$$I_a = \frac{V_t - E_a}{R_a} = \frac{200 - 175}{0.07} = 357.1 \text{ A} < 400 \text{ A}$$

由此點開始，電動機自行加速至穩定轉速為止。

8-9 直流電動機的起動

由上述過程可求得每段電阻為

$$R_1 = R_{tot} - R'_{tot} = 0.5 - 0.25 = 0.25\Omega$$

$$R_2 = R'_{tot} - R''_{tot} = 0.25 - 0.125 = 0.125\Omega$$

$$R_3 = R''_{tot} - R_a = 0.125 - 0.07 = 0.055\Omega$$

其中 R_1 、 R_2 、 R_3 分別在 E_a 達到 100 V、150 V、175 V 時被移除。

8-9 直流電動機的起動

Matlab

```
Vt=200;
Irated=200; %額定電流
Imax=2*Irated; %最大容許電流
Ra=0.07;

% (1)
Rtot=Vt/Imax; %總起動電阻值
SRR=Rtot/Ra; %起動電阻比
CR=Imax/Irated; %起動電流比
m=floor(SRR/CR); %起動階段數

% (2)
Ea1=Vt-Irated*Rtot;
Rtot1=(Vt-Ea1)/Imax;
Ea2=Vt-Irated*Rtot1;
Rtot2=(Vt-Ea2)/Imax;

R1=Rtot-Rtot1;
R2=Rtot1-Rtot2;
R3=Rtot2-Ra;
```

End

8-9 直流電動機的起動

例 8-25

一部分激電動機，端電壓 200 V，電樞電阻 $R_a = 0.2\Omega$ ，在額定負載時電樞電流 50 A，若起動最大電流限制為滿載電流的 2 倍，且當電樞電流降至滿載電流時將各段電阻依序移除，試求：

- (1) 起動電阻應分為幾段？
- (2) 各段移除的電阻大小為若干？

8-9 直流電動機的起動

解

$$\therefore \frac{R_1}{R_2} = \frac{R_2}{R_3} = \dots = \frac{R_{m-1}}{R_m} = \frac{R_m}{R_a} = \frac{I_{\max}}{I_{\min}}$$

且

$$I_{\max} = 2I_a = 2 \times 50 = 100 \text{ A}$$

$$I_{\min} = I_a = 50 \text{ A}$$

$$R_1 = \frac{V_t}{I_{\max}} = \frac{200}{100} = 2 \Omega$$

$$\therefore R_2 = \frac{I_{\min}}{I_{\max}} \times R_1 = \frac{50}{100} \times 2 = 1 \Omega$$

$$R_3 = \frac{I_{\min}}{I_{\max}} \times R_2 = \frac{50}{100} \times 1 = 0.5 \Omega$$

$$R_4 = \frac{I_{\min}}{I_{\max}} \times R_3 = \frac{50}{100} \times 0.5 = 0.25 \Omega$$

$$R_5 = \frac{I_{\min}}{I_{\max}} \times R_4 = \frac{5}{100} \times 0.25 = 0.125 \Omega$$

8-9 直流電動機的起動

由於 $R_5 = 0.125\Omega < R_a = 0.2\Omega$ ，所以起動電阻應分四段，與五個操作步驟，如圖 8-60 所示，每段電阻為

$$r_1 = R_1 - R_2 = 2 - 1 = 1\Omega$$

$$r_2 = R_2 - R_3 = 1 - 0.5 = 0.5\Omega$$

$$r_3 = R_3 - R_4 = 0.5 - 0.25 = 0.25\Omega$$

$$r_4 = R_4 - R_a = 0.25 - 0.2 = 0.05\Omega$$

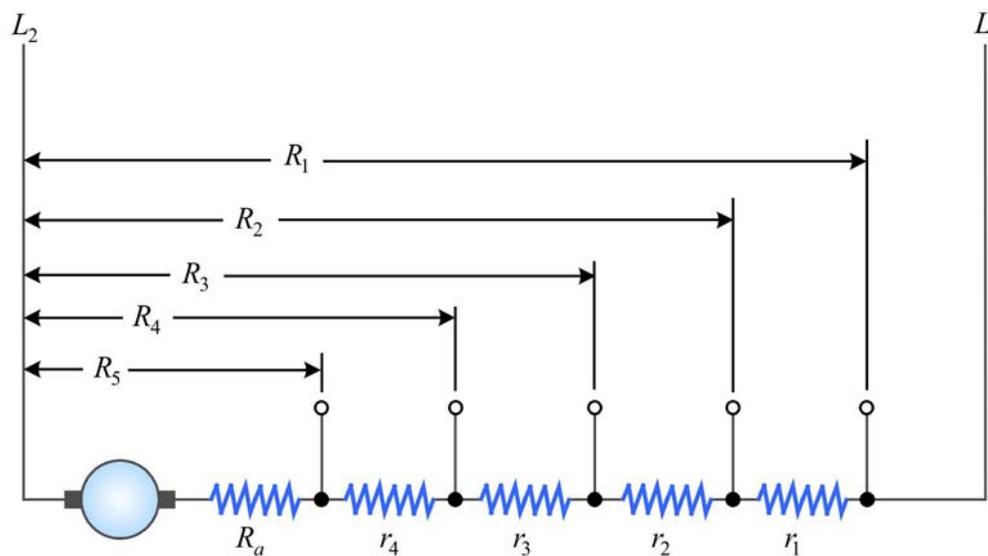


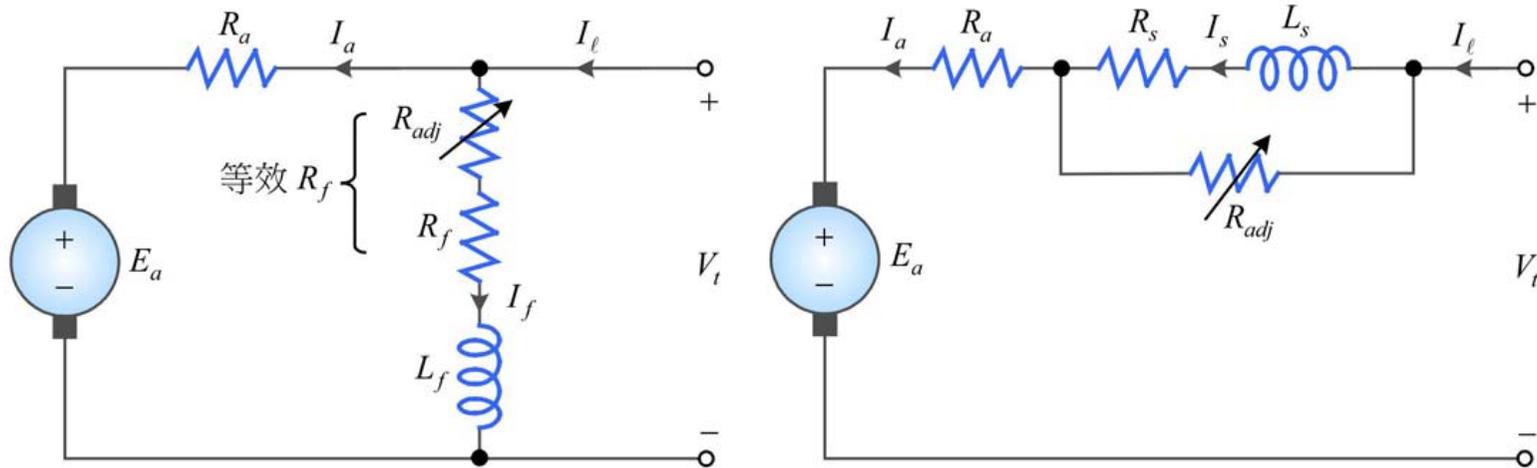
圖 8-60 例 8-25 串接起動電阻電路圖

End

8-10 直流電動機的轉速控制

$$n = \frac{V_t - I_a R_a}{K_n \phi}$$

一、改變場磁通 ϕ 的轉速控制



(a) 分激電動機轉速控制

(b) 串激電動機轉速控制

圖 8-61 改變場磁通控制電動機轉速接線圖

8-10 直流電動機的轉速控制

一、改變場磁通 ϕ 的轉速控制 (續)

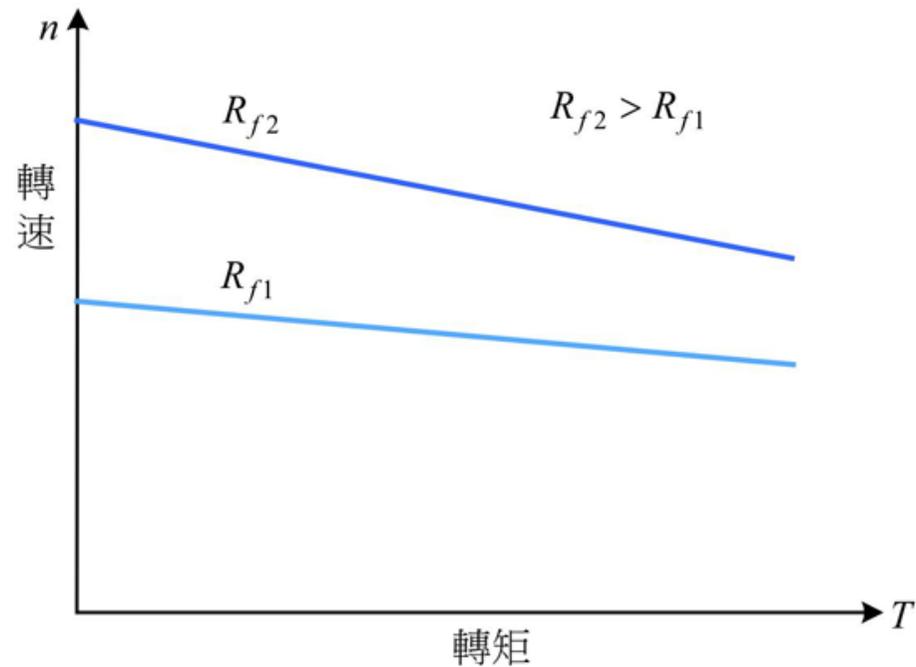


圖 8-62 直流分激電動機不同場電阻的轉速 - 轉矩特性曲線

8-10 直流電動機的轉速控制

例 8-26

一部 50 HP，400 V 直流分激電動機，電樞電阻 $R_a = 0.1\Omega$ ，在額定電壓與滿載轉速 1200 rpm 時，電樞電流 100 A 設突然增加場電阻，使磁通量減少 5% 但負載維持不變情況下，試求：

- (1) 在此瞬間的電樞電壓為多少？
- (2) 在此瞬間的電樞電流為多少？
- (3) 在此瞬間的電磁轉矩為多少？
- (4) 穩定後的電樞電壓及轉速為多少？

8-10 直流電動機的轉速控制

解 (1) 初始滿載時的電樞電壓 E_a 為

$$E_a = V_t - I_a R_a = 400 - 100 \times 0.1 = 390 \text{ V}$$

場電阻突然改變使磁通量減少 5%，但電樞轉子轉速因慣性關係，無法立即改變，故此瞬間的電樞電勢 E'_a 為

$$E'_a = \frac{K_n \phi' n}{K_n \phi n} \times E_a = \frac{\phi'}{\phi} \times E_a = \frac{95}{100} \times 390 = 370.5 \text{ V}$$

(2) 此瞬間的電樞電流 I'_a 為

$$I'_a = \frac{V_t - E'_a}{R_a} = \frac{400 - 370.5}{0.1} = 295 \text{ A}$$

(3) 初始滿載時的電磁轉矩 T 為

$$T = \frac{E_a I_a}{\omega} = \frac{E_a I_a}{2\pi \times \frac{n}{60}} = \frac{390 \times 100}{2\pi \times \frac{1200}{60}} = 310.4 \text{ N}\cdot\text{m}$$

8-10 直流電動機的轉速控制

磁通改變瞬間的電磁轉矩 T' 為

$$\begin{aligned} T' &= \frac{K_{\omega} \phi' I'_a}{K_{\omega} \phi I_a} \times T = \frac{\phi'}{\phi} \times \frac{I'_a}{I_a} \times T = \frac{95}{100} \times \frac{295}{100} \times 310.4 \\ &= 869.9 \text{ N} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

- (4) 穩定後由於負載維持不變，轉矩 $T' = K_{\omega} \phi' I'_a$ 仍維持與初始滿載轉矩相同，因此由磁通所造成的減少量將由電樞電流來抵補，故穩定後電樞電流 I'_a 為

$$I'_a = \frac{\phi}{\phi'} \times I_a = \frac{100}{95} \times 100 = 105.3 \text{ A}$$

穩定後電樞電壓

$$E'_a = V_t - I'_a R_a = 400 - 105.3 \times 0.1 = 389.47 \text{ V}$$

穩定後轉速

$$\begin{aligned} n' &= \frac{E'_a}{E_a} \times \frac{\phi}{\phi'} \times n = \frac{389.47}{390} \times \frac{100}{95} \times 1200 \\ &= 1261.4 \text{ rpm} \end{aligned}$$

End

8-10 直流電動機的轉速控制

二、改變電樞電壓的轉速控制

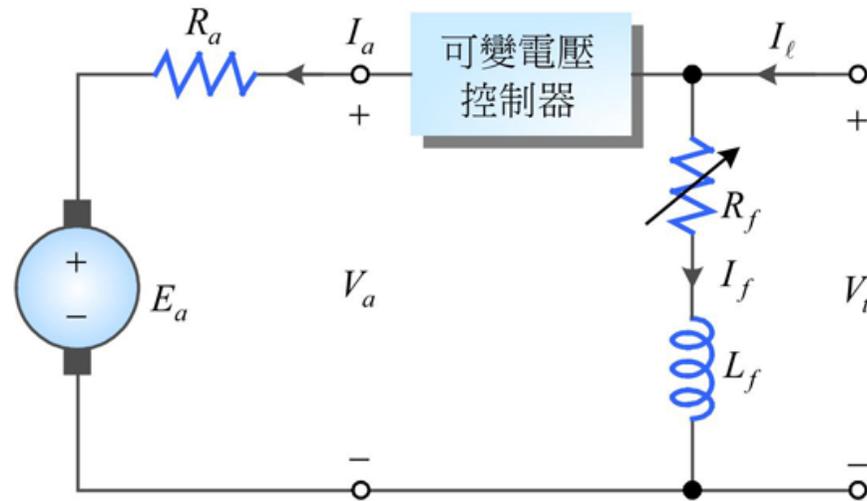


圖 8-63 改變電樞電壓的控速接線圖

8-10 直流電動機的轉速控制

二、改變電樞電壓的轉速控制 (續)

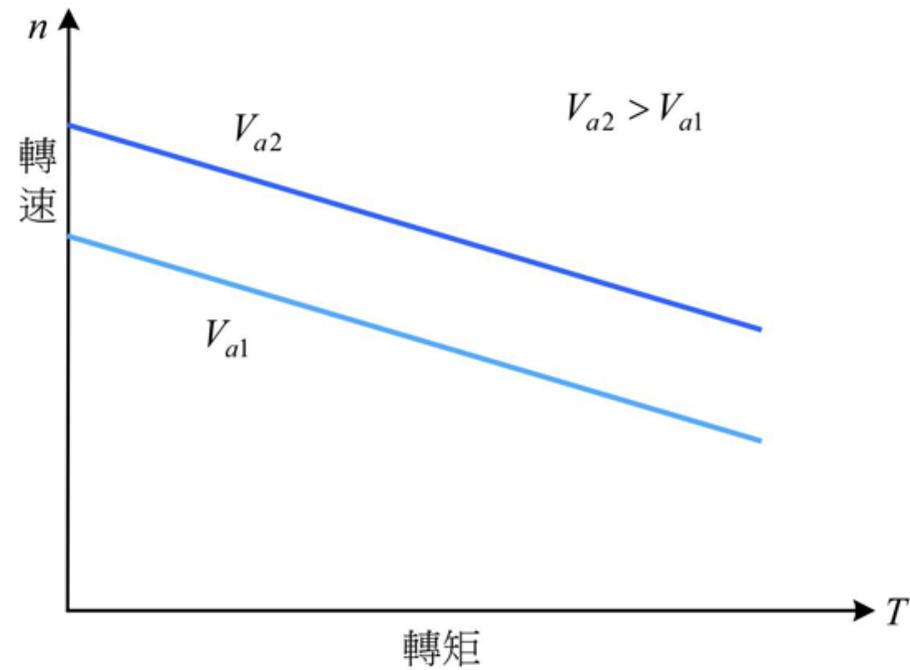
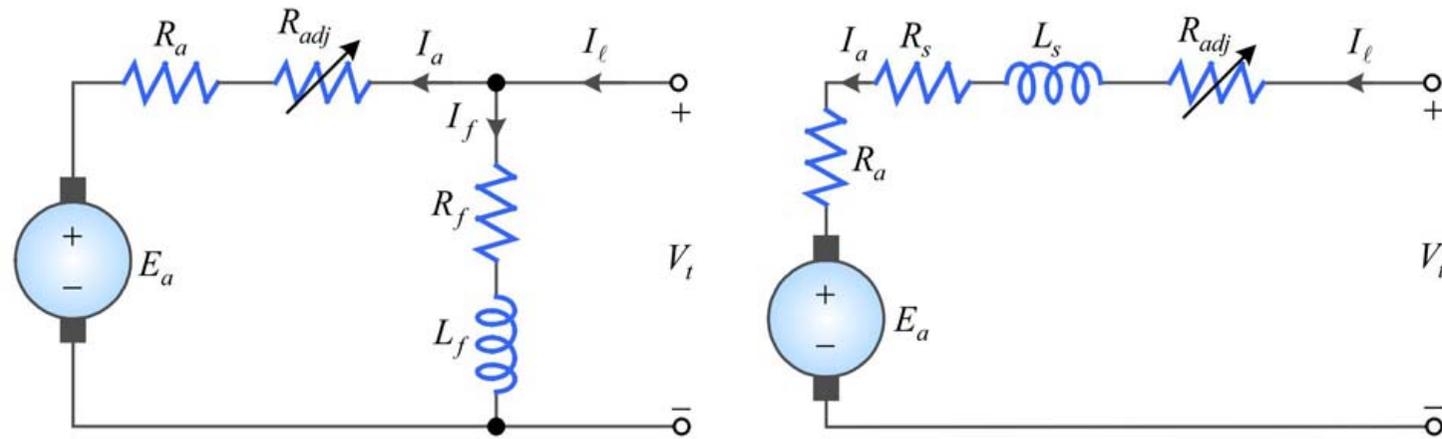


圖 8-64 不同電樞電壓時的轉速 - 轉矩特性曲線

8-10 直流電動機的轉速控制

三、改變電樞電阻的轉速控制



(a) 分激電動機轉速控制

(b) 串激電動機轉速控制

圖 8-65 改變電樞電阻控制電動機轉速

8-10 直流電動機的轉速控制

三、改變電樞電阻的轉速控制 (續)

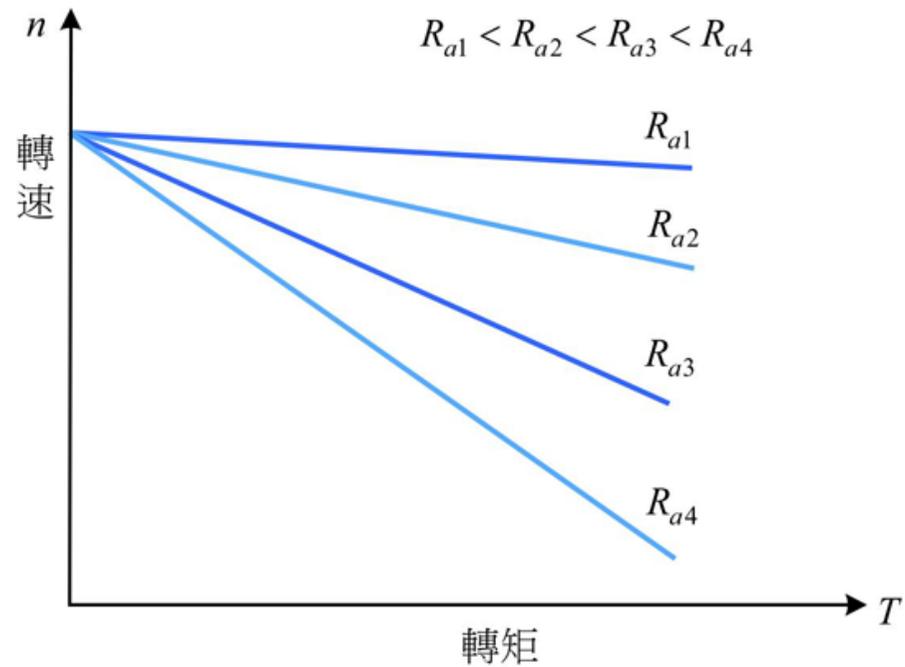


圖 8-66 不同電樞電阻的轉速 - 轉矩特性曲線

8-10 直流電動機的轉速控制

四、速率調整率

$$SR(\%) = \frac{n_o - n_f}{n_f} \times 100\% \quad (8-70)$$

8-10 直流電動機的轉速控制

例 8-27

一部 200 V 分激電動機，電樞電阻 $R_a = 0.1\Omega$ ，滿載電樞電流 50 A，轉速 1200 rpm。若不計場電流和電樞反應，試求電動機的速率調整率為多少？

8-10 直流電動機的轉速控制

解 無載時電樞電流 $I_a \cong 0 \text{ A}$

$$E_a = V_t - I_a R_a = 200 - 0 = 200 \text{ V}$$

滿載時電樞電流 $I'_a = 50 \text{ A}$

$$E'_a = V_t - I'_a R_a = 200 - 50 \times 0.1 = 195 \text{ V}$$

$$\therefore E_a = K_n \phi n$$

$$\therefore \frac{E_a}{E'_a} = \frac{n_o}{n_f}$$

$$n_o = \frac{E_a}{E'_a} \times n_f = \frac{200}{195} \times 1200 = 1230.77 \text{ rpm}$$

速率調整率

$$\begin{aligned} SR(\%) &= \frac{n_o - n_f}{n_f} \times 100\% \\ &= \frac{1230.77 - 1200}{1200} \times 100\% = 2.564\% \end{aligned}$$

End

8-10 直流電動機的轉速控制

例 8-28

一部電動機滿載額定轉速為 1500 rpm，在額定條件下由無載至滿載時速率調整率為 5%，試求無載時電動機每分轉速為若干？

解

$$\therefore SR(\%) = \frac{n_o - n_f}{n_f} \times 100\%$$

$$5\% = \frac{n_o - 1500}{1500} \times 100\%$$

$$\therefore n_o = 1575 \text{ rpm}$$

End