



單元

5

感應電動機

» 單元重點

1880 年代末期，愛迪生推廣的直流配電方式，正與特斯拉及威斯汀豪斯所推廣的交流配電方式互相競爭。重要轉捩點在 1882 年，特斯拉發明了使用交流電源的感應電動機，除了終結直流電動機的獨霸地位外，同時也凸顯交流電能夠遠距離高壓傳輸的優點，讓交流電成為這場「電流大戰」的最後贏家。這款百年前的經典設計，直到現在還是做為許多電車或是大型機具的動力來源，本單元將一探這款設計簡單且特性良好的工業產品。

» 單元綱要

- 第一章 三相感應電動機之原理
- 第二章 三相感應電動機之構造及分類
- 第三章 三相感應電動機之特性及等效電路
- 第四章 三相感應電動機之起動及速率控制
- 第五章 單相感應電動機之原理
- 第六章 感應電動機之試驗運用與維護

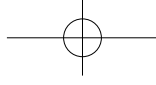
單元五 生活知識家 普悠瑪號 - 快速的大眾運輸新寵

2013 年起開始加入台鐵營運的普悠瑪，其優異的性能與設計，大幅縮短西部地區往返東部的行車時間。其主要特性有：

1. 強大的驅動能力：每部列車共有 16 組日本東芝所製造的 220 kW 三相鼠籠式感應電動機，合計牽引功率 3520 kW。最高時速可達 150 km/h，營運最高時速為 140 km/h。
2. 動力分散式系統：列車編組採用 4 M(motor/ 動力車) 4 T(Trailer/ 無動力車廂) 設計，每台動力車各安裝 4 組電動機，故普悠瑪的起動與加速較傳統自強號的推拉式更快。
3. 先進的傾斜式設計：列車行進中會依據路況自動傾斜 1 ~ 2 度，以利在彎道居多的宜蘭線，能夠高速通過彎道，大幅縮短八堵到頭城路段的行車時間。



圖片來源：台灣鐵路管理局



CHAPTER 1

三相感應電動機之原理

» 本章重點

本章先介紹阿拉哥圓盤的原理，之後說明如何產生三相旋轉磁場，最後介紹旋轉磁場以及轉子轉速的關係。需要特別注意的是，直流電機的磁場繞組外加直流電後，繞組產生的磁場位置不變，稱為固定磁場。而交流電機的三相繞組外加三相交流電源後，所產生的磁場會隨時間不斷變換位置，稱為旋轉磁場，此現象是各式交流電動機運轉的重要原理。

1-1 阿拉哥圓盤

西元 1824 年法國物理學家阿拉哥 (Arago) 將銅盤與磁鐵裝置成如圖 1-1 的迴轉機構；其中銅為反磁性物質 (相對導磁係數 $\mu_r < 1$) 不會受到磁鐵直接吸引，以手轉動轉盤帶動右側上方磁鐵開始旋轉後，下方的銅盤也會朝著磁鐵旋轉方向開始旋轉。此種構造稱為阿拉哥圓盤 (Arago disk)。

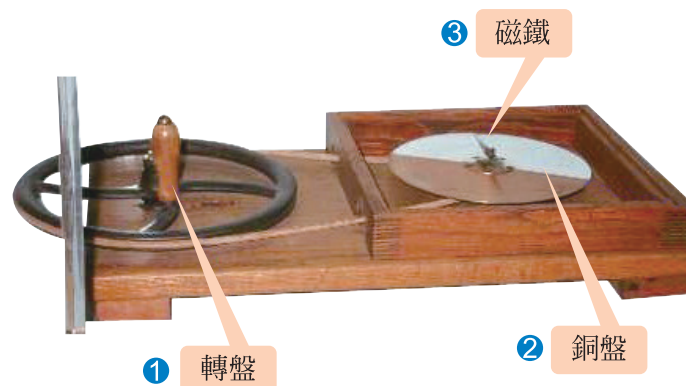
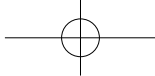


圖 1-1 阿拉哥圓盤
(圖片來源：physics.kenyon.edu)

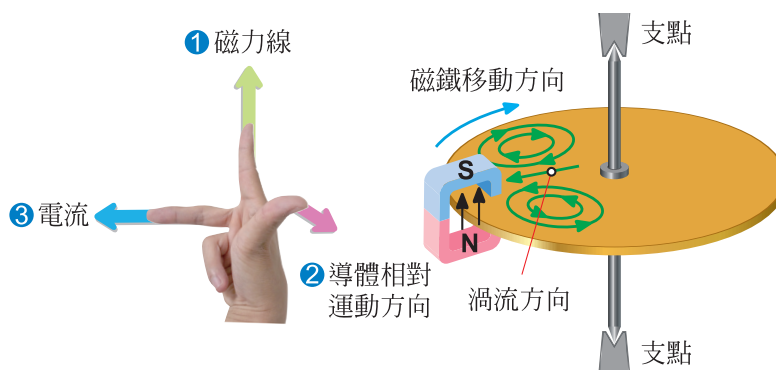


西元 1855 年，法國科學家傅科 (Foucault)，觀察阿拉哥圓盤後，證實這是因為渦流 (eddy current) 所形成的現象，其原理如圖 1-2 所示：

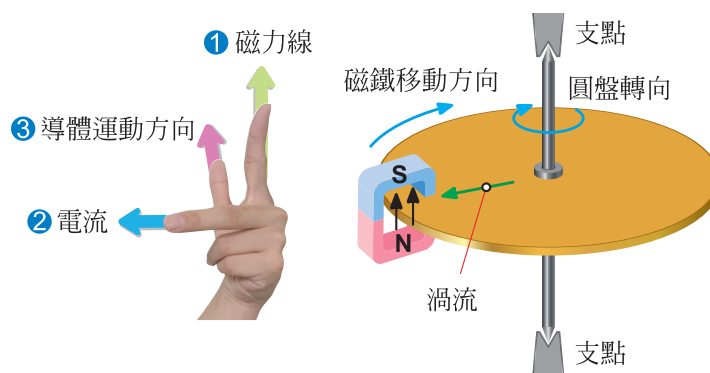
將圖 1-2(a) 的磁鐵沿著銅盤以順時針方向旋轉時，磁力線會切割圓盤，由於圓盤相對運動方向為逆時針，依據發電機 (弗萊明右手) 定則，銅盤會產生感應電勢，並形成如圖 1-2(a) 所示之渦流。

由圖 1-2(b) 中可知圓盤內的渦流與磁力線作用產生作用力，根據電動機 (弗萊明左手) 定則，銅盤會形成轉矩，並追隨磁場以順時針方向開始旋轉。

傳統機械式電度表 (瓦時計) 便是應用阿拉哥圓盤原理，當負載電流變大時，磁場變強使得圓盤轉速變快，圓盤轉動時會帶動計數齒輪，就能正確記錄用電度數。



(a) 圓盤中的渦流方向



(b) 圓盤旋轉方向

圖 1-2 阿拉哥圓盤動作原理

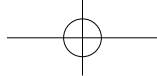


圖 1-3 是將銅盤換成鋁罐，當永久磁鐵以順時針方向旋轉時，鋁罐表面會產生渦流。此渦流與旋轉磁場作用，促使鋁罐開始朝順時針方向旋轉。圖中鋁罐（轉子）並沒有外接電源，內部的渦流完全是透過電磁感應而生，利用轉子感應電流這種原理所設計出的電動機便稱為感應電動機 (induction motor)。

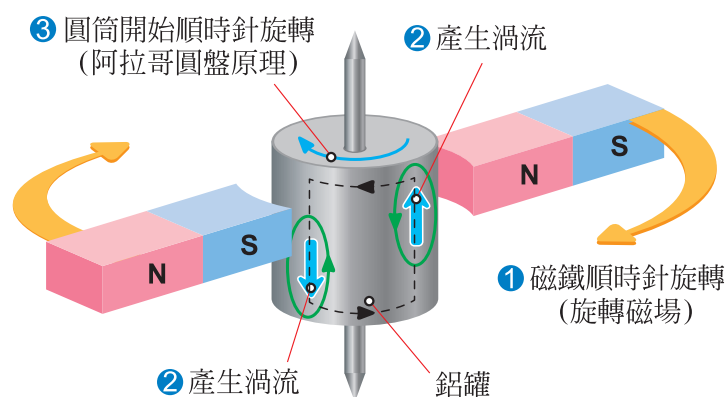
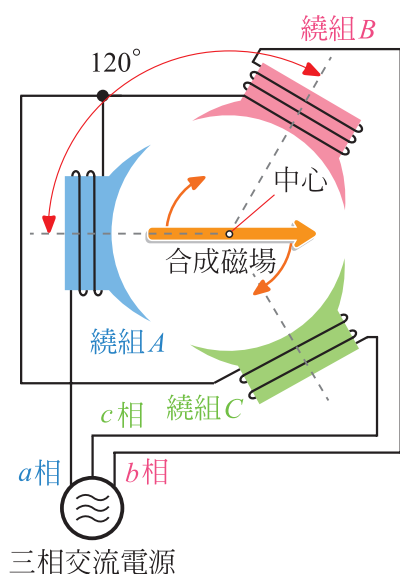
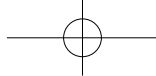


圖 1-3 感應電動機運轉原理

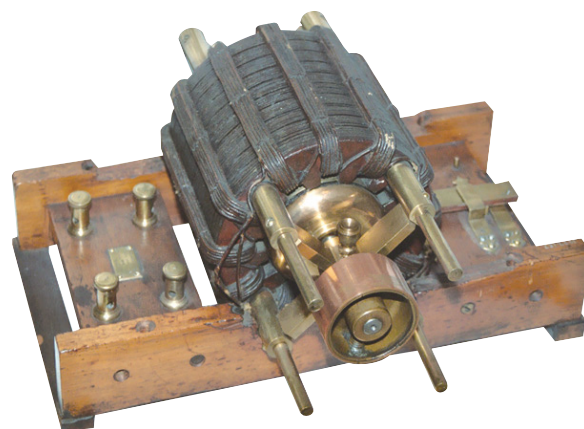
1-2 三相旋轉磁場

一、基本設計

1880 年間特斯拉 (Tesla) 設計出圖 1-4(a)，將三個繞組安置在外側鐵心後，經過適當連接後外加三相交流電源也能產生旋轉磁場，穩定的朝著同一方向持續轉動，效果如同圖 1-3 永久磁鐵所做的物理性旋轉動作。這種利用定子的三個繞組合成產生 2 極旋轉磁場的方式，就稱為「三相 2 極定子繞組」。圖 1-4(b) 為當年特斯拉所設計的交流電動機外觀，被譽為當代十大傑出發明。



(a) 三相2極定子繞組

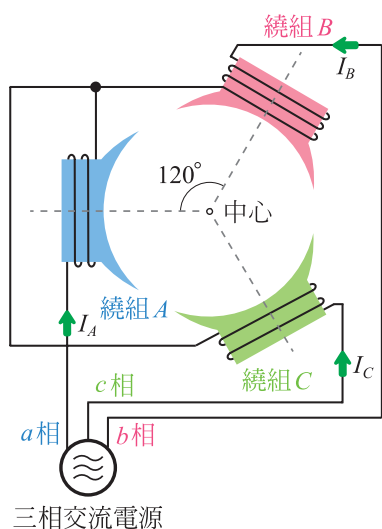


(b) 特斯拉設計的交流電動機

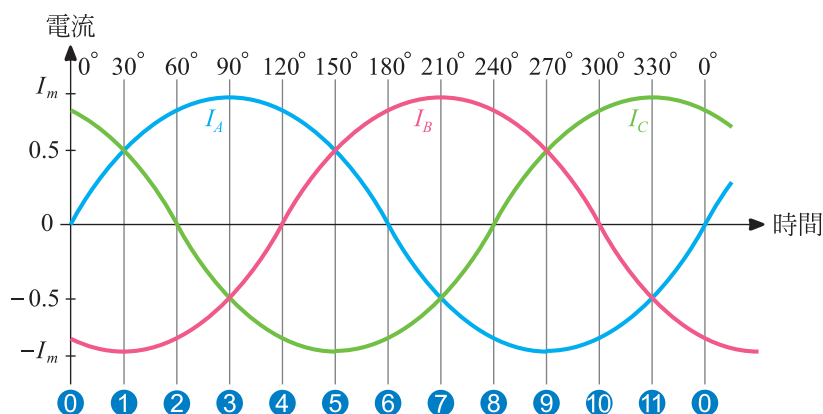
圖 1-4 交流電動機基本設計
(圖片來源：teslasociety.com)

二、旋轉磁場的產生

圖 1-5(a) 為三相 2 極電機之定子繞組； A 、 B 、 C 三組繞組位置互隔 120° 電機角；圖 1-5(b) 為平衡三相之電流波形，每相電流也互隔 120° 電機角。

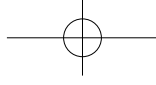


(a) 三相2極定子繞組



(b) 平衡三相電流

圖 1-5 三相繞組與三相電流



三相交流電流通過三相繞組後，各相繞組分別產生磁場，磁通大小與通過的電流大小成正比，方向則視電流方向而定。倘若電流依 ①②③④⑤ 之順序變化，各相繞組產生的磁場大小與方向分別如圖 1-6 所示：

(1) 時間為 ① 位置 ($\omega t = 0^\circ$) 時：電流 $I_A = 0$ ， $I_B = -\frac{\sqrt{3}}{2}I_m$ ， $I_C = \frac{\sqrt{3}}{2}I_m$ ，

A 相繞組磁勢 $H_A = 0$ 、 B 相繞組磁勢 $H_B = -\frac{\sqrt{3}}{2}H_m$ 、 C 相繞組磁勢

$H_C = \frac{\sqrt{3}}{2}H_m$ ，三組繞組合成後的磁勢為單一繞組最大值的 1.5 倍，即

($H_T = 1.5H_m$)，三組繞組合成後的磁通朝 12 點鐘方向。

(2) 時間為 ② 位置 ($\omega t = 30^\circ$) 時：電流 $I_A = \frac{1}{2}I_m$ ， $I_B = -I_m$ ， $I_C = \frac{1}{2}I_m$ ，

各相繞組的磁勢分別為 $H_A = \frac{1}{2}H_m$ 、 $H_B = -H_m$ 以及 $H_C = \frac{1}{2}H_m$ ，合成磁

勢也為單一繞組最大值的 1.5 倍，但是合成磁通方向較位置 ① 時，朝順時針移動 30° (1 點鐘方向)。

(3) 時間為 ③ 位置 ($\omega t = 60^\circ$) 時：各相繞組的磁勢分別為 $H_A = \frac{\sqrt{3}}{2}H_m$ 、

$H_B = -\frac{\sqrt{3}}{2}H_m$ 以及 $H_C = 0$ ，合成磁勢仍為單一繞組最大值的 1.5 倍，但

是合成磁通方向較位置 ① 時，又朝順時針移動 30° (2 點鐘方向)。

依此類推，當電流隨時間繼續變動，三相繞組所合成之磁通也將持續順時針轉動，對於圖 1-5 所示的 2 極磁場而言，磁場移動的角度與電流變化角度完全同步。因此當電流變化一週 (360°)，磁場也跟著旋轉一週。而合成磁勢大小始終維持單一繞組最大值的 1.5 倍。

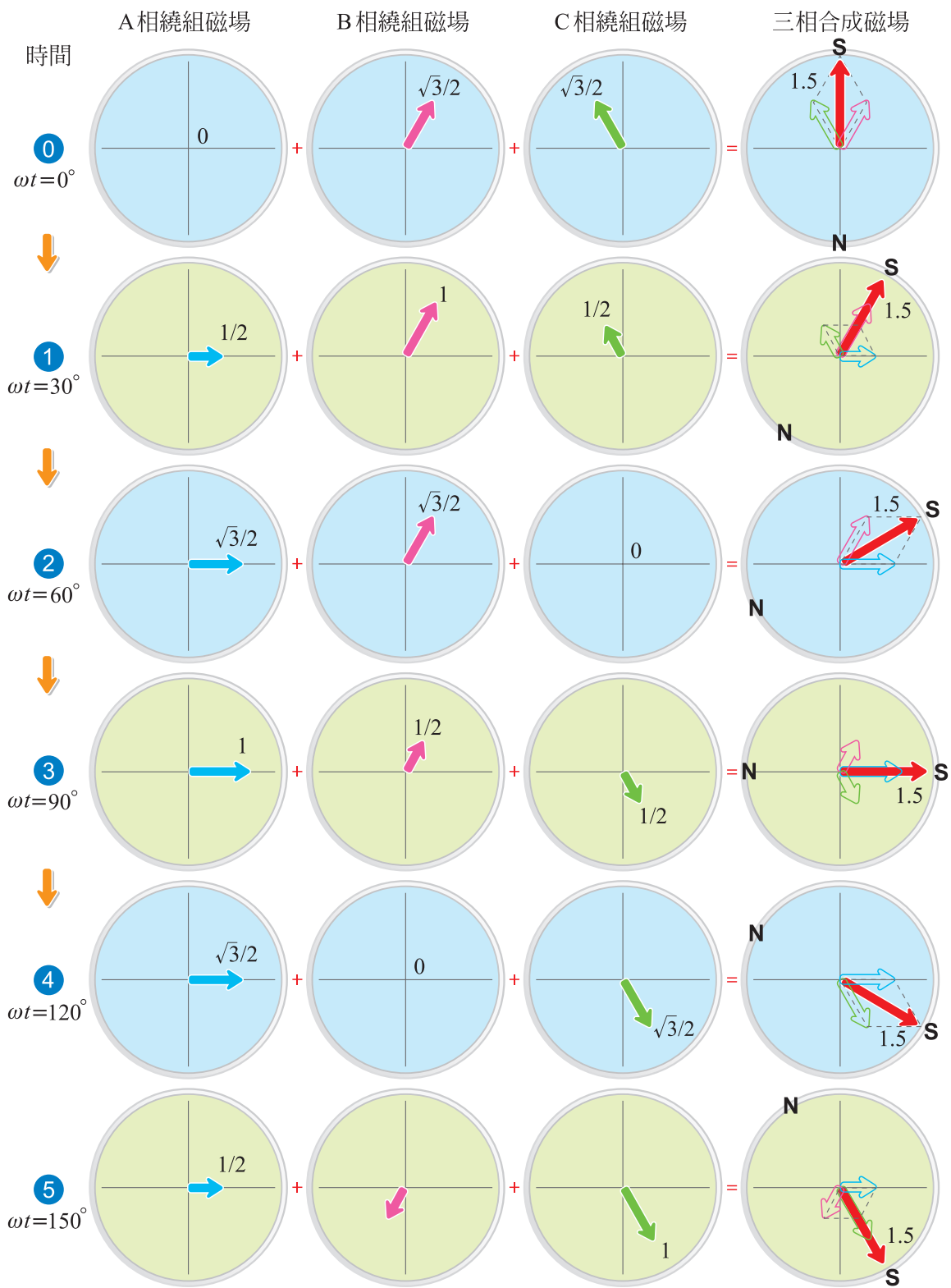
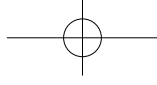
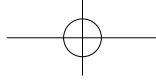
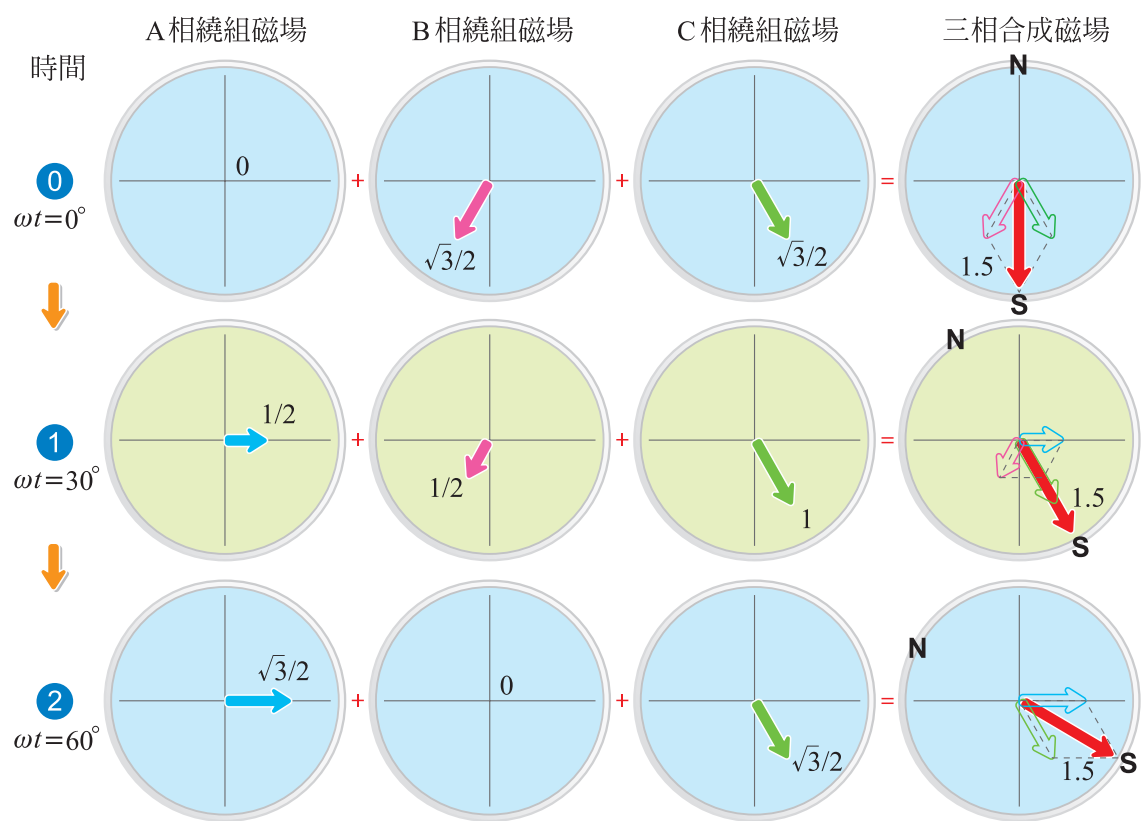
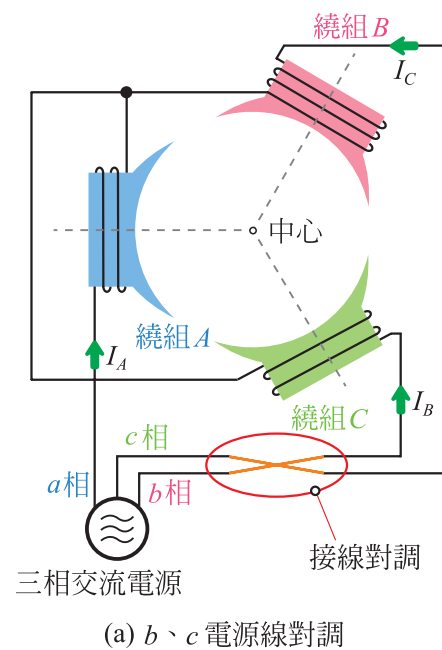


圖 1-6 三相旋轉磁場示意圖



磁場的旋轉方向可由電流相序與繞組配置方式決定；如圖 1-7(a) 將三相電源線中的任意二條對調，合成磁場如圖 1-7(b) 所示改以逆時針方向旋轉，轉子也會跟著反轉。亦即**三相感應電動機**只要將任意二條電源線對調即可改變其轉向。



(b) 旋轉磁場相反

圖 1-7 反向旋轉磁場

三、極數

爲了妥善利用空間圖 1-8(a) 改用三個繞組 (AA' , BB' , CC') 間隔 120 度排列，並加以連接後外加三相電源也能產生三相旋轉磁場，由於只有 N 極與 S 極 1 組磁極在旋轉，故稱爲 2 極旋轉磁場。若如圖 1-8(b) 改將線圈數量增加 1 倍並間隔 60 度排列，就可得到 4 極旋轉磁場。因此只要增加線圈數目，就可以設計出更多的極數。當然 N 極與 S 極必須爲 1 組，所以感應電動機的極數必定爲偶數。

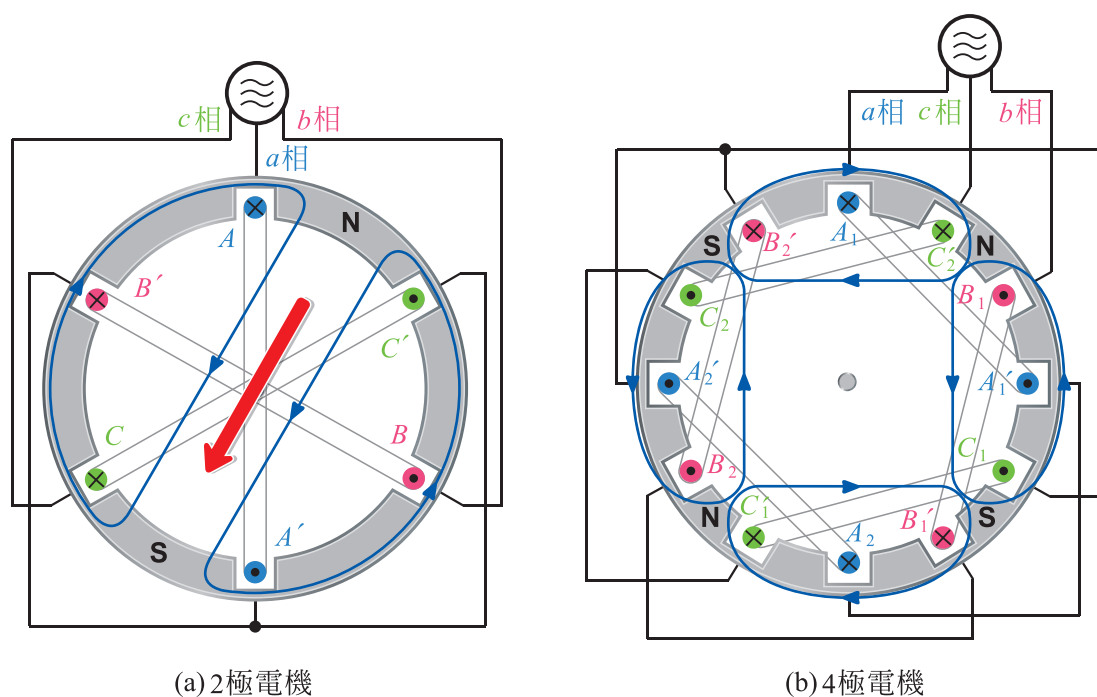
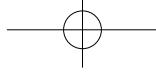


圖 1-8 定子繞組配線圖

四、同步轉速

三相感應電動機定子繞組接三相電源後，旋轉磁場轉動的電機角與電源之電機角同步，因此將旋轉磁場的轉速稱爲同步轉速 (synchronous speed)，以 n_s 表示。



在 2 極電機中，電流每變化一個週期，磁場旋轉一週；而在 4 極電機中，電流同樣變化一個週期，磁場實際上僅有旋轉半週，因此**定子旋轉磁場的轉速會與定子極數 P 成反比，而與電源頻率 f 成正比**，即同步轉速：

$$n_s = \frac{f}{\frac{P}{2}} = \frac{2f}{P} (\text{rps}) = \frac{120f}{P} (\text{rpm}) \quad (1-1)$$

n_s ：同步轉速 (rpm) 或 (rps)

P ：定子磁極數 (極)

f ：電源頻率 (Hz)

旋轉磁場的速度也常用同步角速度 ω_s (rad/sec) 表示如下：

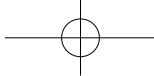
$$\omega_s = \frac{2f}{P} \times 2\pi = \frac{4\pi f}{P} (\text{rad/sec}) \quad (1-2)$$

ω_s ：同步角速度，弧度 / 秒 (rad/sec)

目前臺灣採用的電力系統，電源頻率為 60 Hz，因此交流旋轉電機的極數及同步轉速的關係整理成表 1-1：

表 1-1 極數與同步轉速

極數	$f = 60\text{Hz}$		
	$n_s(\text{rpm})$	$n_s(\text{rps})$	$\omega_s(\text{ 弧度 / 秒 })$
$P = 2$	3600	60	120π
$P = 4$	1800	30	60π
$P = 6$	1200	20	40π
$P = 8$	900	15	30π



範例

01

有一部三相、4 極感應電動機外加 220VAC、50Hz 的三相電源，其旋轉磁場的 (1) 每分鐘轉速、(2) 每秒鐘轉速、(3) 同步角速度分別為多少？

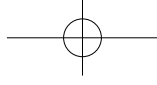
解 (1) $n_s = \frac{120f}{P} = \frac{120 \times 50}{4} = 1500 \text{ rpm}$

(2) $1500 \text{ rpm} = \left(\frac{1500}{60} \right) \text{ rps} = 25 \text{ rps}$

(3) $\omega_s = \frac{4\pi f}{P} = \frac{4\pi \times 50}{4} = 157 \text{ (rad/sec)}$

隨堂練習

- () 1. 某三相平衡感應電動機，定子接三相平衡電源，其每相繞組於氣隙中所建立之磁動勢最大值為 F_m ，試問三相繞組於氣隙中所建立之合成磁動勢最大值為多少？
(A) $6F_m$ (B) $3F_m$ (C) $3/2F_m$ (D) $1/4F_m$ 。
- () 2. 交流電機定子繞組通電後所產生之三相旋轉磁場，下列敘述何者錯誤？
(A) 三相合成磁通大小隨時間呈現正弦變化
(B) 旋轉磁場速度與外加之電流頻率成正比
(C) 磁極數目加倍，旋轉磁場速度減半
(D) 改變電源相序，旋轉磁場方向隨之改變。
- () 3. 某三相、6 極感應電動機，電源頻率為 60Hz，則其旋轉磁場轉速何者正確？
(A) 2400 rpm (B) 1200 rps (C) 1200 rpm (D) 1200 rad/sec。



五、轉子轉速與轉差率

將圖 1-9 感應電動機定子繞組外加三相電源時，交流電流在定子繞組內流動，此時繞組立刻形成旋轉磁場，以同步轉速 n_s 持續旋轉。依據阿拉哥原理，感應電動機的轉子會感應電流，並且沿著旋轉磁場方向由零開始加速，轉子經過一段時間加速後，會以略低於同步轉速的速度持續旋轉，轉子轉速以 n_r 表示。

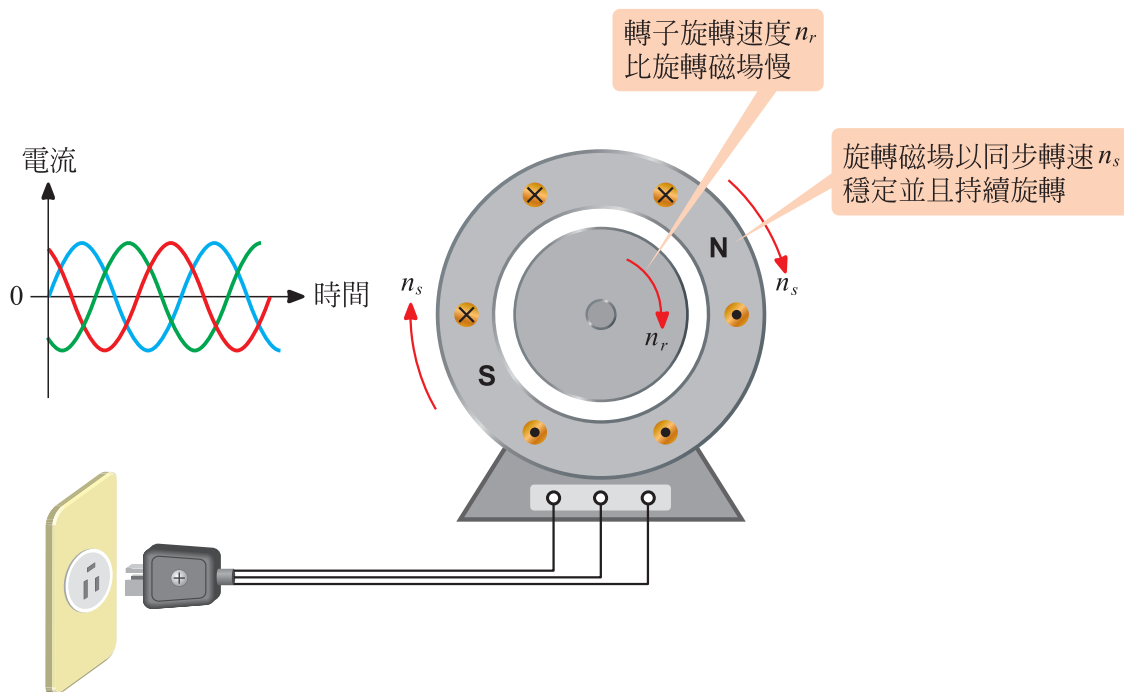
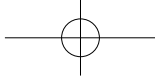


圖 1-9 轉子轉速與轉差率

正常運轉過程中，轉子轉速不可能到達同步轉速。倘若因為外力使得轉子轉速等於同步轉速時，轉子導體與旋轉磁場間沒有相對運動，轉子導體無法產生感應電勢，造成轉子電流為零，無法產生電磁轉矩；轉子失去驅動力使得轉速降到同步轉速之下，因此，感應電動機又稱為非同步電動機或異步電動機。



旋轉磁場以同步轉速牽引轉子，但是感應電動機的轉子轉速 n_r 恆低於同步轉速 n_s ，彷彿轉子出現「打滑」現象，因此將兩者間的差距稱為轉差或是滑差，即：

$$\text{轉 (滑) 差速率} = n_s - n_r \quad (1-3)$$

轉差速率與同步轉速的比例稱為轉差率 S (slip rate)，其公式為：

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (1-4)$$

將公式 1-1 與公式 1-4 合併可得轉子轉速

$$n_r = (1 - S)n_s = (1 - S)\frac{120f}{P} \quad (1-5)$$

依據公式 1-4 可以得知感應電動機：

1. 通電起動瞬間，轉子轉速 $n_r = 0$ ，轉差率 $S = 1$ 。
2. 正常運轉中，轉子轉速略低於同步轉速 ($n_r < n_s$)， $0 < \text{轉差率 } S < 1$ 。
3. 倘若因外力導致轉子轉速等於同步轉速 ($n_r = n_s$)，轉差率 $S = 0$ 。

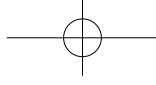
範例

02

有一部三相感應電動機，其銘牌標示摘錄如下：0.25 hp、450 VAC、60 Hz、6 P。若其滿載轉速為 1140 rpm，試求 (1) 同步轉速、(2) 滿載轉差率分別為多少？

解 (1) $n_s = \frac{120f}{P} = \frac{120 \times 60}{6} = 1200 \text{ rpm}$

(2) $S = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{1200 - 1140}{1200} = 0.05 = 5\%$



範例

03

三相 230V，60Hz 感應電動機的同步轉速為 720 rpm，於額定負載下轉差率為 0.05，則 (1) 轉子轉速、(2) 極數應分別為多少？

解 (1) $n_r = (1 - S)n_s = (1 - 0.05) \times 720 = 684 \text{ rpm}$

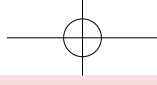
$$(2) n_s = \frac{120f}{P} \Rightarrow 720 = \frac{120 \times 60}{P} \Rightarrow P = 10 \text{ 極}$$

隨堂練習

- () 1. 實習工廠中有一台三相感應電動機，銘牌上標示為 6 極、60 Hz，轉差率 3%，測量電動機滿載運轉時的轉子轉速，下列量測數值何者最有可能？
(A)36 rpm (B)54 rpm (C)1164 rpm (D)1200 rpm。
- () 2. 同上題，這一台電動機的轉差速率為何？
(A)36 rpm (B)54 rpm (C)1164 rpm (D)1200 rpm。

一、選擇題

- 1-2** () 1. 目前臺灣電力公司在臺灣地區的電力系統，其電源電壓頻率為多少？ (A) 50 Hz (B) 60 Hz (C) 100 Hz (D) 400 Hz。
- () 2. 交流電機之極數為 P ，電機角 θ_e 與機械角 θ_m 之關係為
 (A) $\theta_m = \frac{P}{2}\theta_e$ (B) $\theta_m = \frac{P}{4}\theta_e$ (C) $\theta_e = \frac{P}{2}\theta_m$ (D) $\theta_e = \frac{P}{4}\theta_m$ 。
- () 3. 空間位置相差 120° 電機角的三組繞組，欲產生旋轉磁場，三組繞組之電流須
 (A) 同相 (B) 相差 90° 電機角
 (C) 相差 120° 電機角 (D) 相差 180° 電機角。
- () 4. 感應電動機轉子旋轉方向與旋轉磁場方向
 (A) 相同 (B) 相反 (C) 無關 (D) 視電源相數而定。
- () 5. 感應電動機之公式 $n_s = \frac{120f}{P}$ 中，下列敘述何者錯誤？
 (A) f 係指電源頻率 (B) P 係指該機極數
 (C) n_s 係指旋轉磁場轉速 (D) 極數愈少，轉速愈低。
- () 6. 某三相、6 極感應電動機，電源頻率為 60 Hz，則旋轉磁場轉速為多少？
 (A) 7200 rpm (B) 3600 rpm (C) 1800 rpm (D) 1200 rpm。
- () 7. 三相感應電動機在正常運轉下，若電源電壓的頻率 f_e 其單位為 Hz，此電動機轉軸之機械轉速 N_r 其單位為 rpm，極數為 P ，滑差率 (轉差率) 為 S ，則下列何者正確？
 (A) $N_r = (1+S)\frac{120}{P}f_e$ (B) $N_r = (1-S)\frac{120}{P}f_e$
 (C) $N_r = \frac{120}{P}f_e$ (D) $N_r = (2-S)\frac{120}{P}f_e$ 。
- () 8. 三相 6 極感應電動機，電源電壓為 220 V，頻率為 50 Hz，若在額定負載下，滑差率 (轉差率) 為 5%，則電動機滿載時轉軸轉速為何？ (A) 950 rpm (B) 1000 rpm (C) 1050 rpm (D) 1200 rpm。



自我評量

- () 9. 三相 4 極的感應電動機，接 50 Hz 電源，測量出轉速為 1410 rpm，則其轉差率為多少？
(A) 3 % (B) 6 % (C) 12 % (D) 22 %。
- () 10. 有一部三相感應電動機，其銘牌標示摘錄如下：0.25 hp、450 VAC、60 Hz、6 P。若其滿載轉速為 1140 rpm，請問起動瞬間轉差率為多少？ (A) 1 (B) 0.95 (C) 0.05 (D) 0。
- () 11. 三相 4 極 50 Hz 感應電動機，正常運轉中轉子速率最可能為
(A) 2000 rpm (B) 1500 rpm (C) 1450 rpm (D) 50 rpm。
- () 12. 三相 60 Hz 感應電動機，滿載轉速每分鐘 1140 轉，試問極數及轉差為多少？
(A) 2 極，0.68 (B) 4 極，0.37 (C) 6 極，0.05 (D) 8 極，-0.27。
- () 13. 三相 6 極感應電動機的三組繞組，彼此置於定子槽內應相互間隔多少機械角？ (A) 120° (B) 90° (C) 60° (D) 40°。
- () 14. P 極感應電動機中，其旋轉磁場之每秒轉數等於電流頻率 f 之每秒週數的 (A) $\frac{P}{2}$ 倍 (B) $\frac{2}{P}$ 倍 (C) P 倍 (D) $2P$ 倍。
- () 15. 感應電動機之轉子電流是藉由
(A) 電刷傳遞 (B) 直接傳導
(C) 電磁感應 (D) 感應與傳導皆有。
- () 16. 有關三相感應電動機之敘述何者錯誤？
(A) 旋轉磁場磁動勢峰值為每相定子激磁繞組的 $\frac{3}{2}$ 倍
(B) 又稱非同步機，因其轉子轉速恆大於旋轉磁場之同步轉速
(C) 欲改變轉子轉向，僅需將三相接線中之二條線對調即可
(D) 旋轉磁場同步轉速與電源頻率成正比，與定子極數成反比。

二、問答題

1. 畫圖說明阿拉哥圓盤的動作原理。

2. 將三相感應電動機加入如圖 (1) 所示之平衡三相電流，參考課本圖 1-6 的說明，分別畫出時間①、②、③合成磁通的位置與大小，並據以判斷電動機轉向為何？

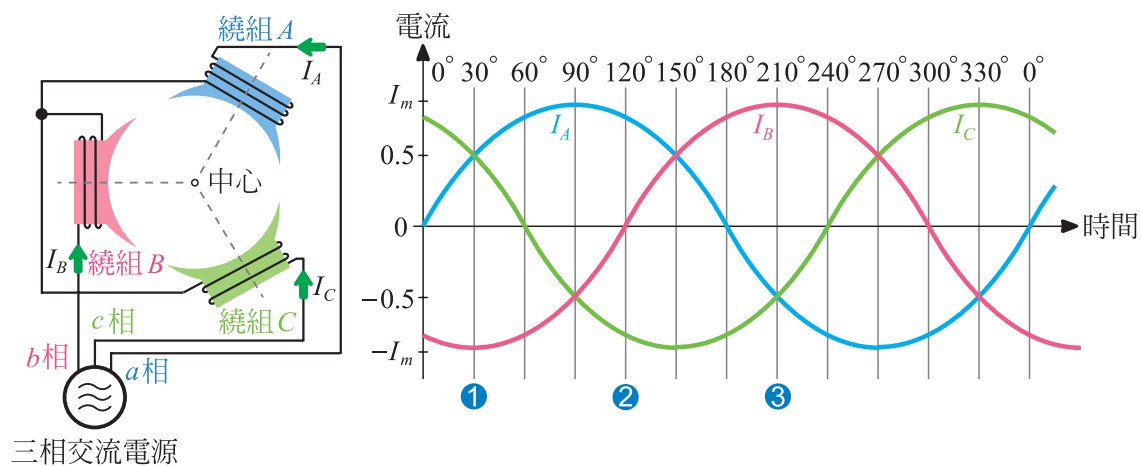
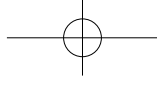


圖 (1)

3. 有一部 8 極 60 Hz 之三相感應電動機，其滿載轉速為 882 rpm，求此時
(1) 每分鐘同步轉速、(2) 每秒鐘同步轉速、(3) 同步角速度、(4) 轉差速率、
(5) 轉差率、(6) 旋轉磁場對轉子轉速、(7) 旋轉磁場對定子轉速、(8) 定子
對轉子轉速分別為多少？



CHAPTER 2

三相感應電動機之構造及分類

» 本章重點

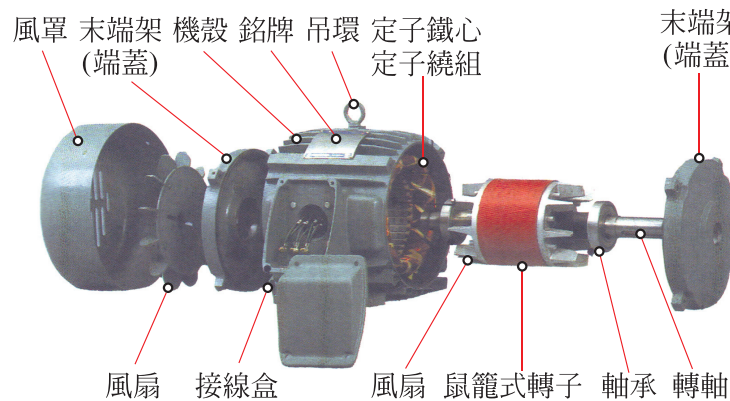
三相感應電動機構造簡單而且可以自行起動，加上近年來變頻設備普及，解決了傳統感應電動機轉速控制不易的缺點。因此，目前無論是大動力輸出的場所（如高鐵、電車）或是家用的冷氣、冰箱等設備，普遍使用感應電動機搭配變頻器進行控制，本章將針對三相感應電動機之構造及分類詳細介紹。

2-1 三相感應電動機之構造

三相感應電動機的外觀如圖 2-1(a)，拆解後的構造如圖 2-1(b) 主要分成定子 (stator) 與轉子 (rotor) 兩部分：

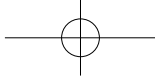


(a) 外觀圖
末端架
(端蓋)



(b) 構造圖

圖 2-1 三相感應電動機
(圖片來源：東元電機)



一、定子

三相感應電動機定子的構造，主要包含機殼、定子鐵心、定子繞組、端蓋及軸承等。

(一) 機殼

機殼 (frame) 又稱為框架，圖 2-2 為其外觀圖，為電動機最外層部份，小型機以鑄鐵整體鑄成，大型機則以鋼板熔接延壓而成。其**功能有安置定子鐵心及繞組、支持軸承與轉子、保護電機內部機件並可幫助散熱。**

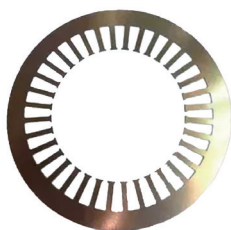


圖 2-2 機殼
(圖片來源：東元電機)

(二) 定子鐵心

定子鐵心 (stator core) 以矽含量 1 % ~ 3 %，厚度 0.35 mm ~ 0.5 mm 之矽鋼片製成。小型機先將矽鋼片沖成如圖 2-3(a) 所示之圓環薄片，再加以**疊製以減少渦流損失**。大型機定子鐵心則採用扇形矽鋼沖片，每疊積 50 mm ~ 60 mm 厚度即設置風道，以便通風散熱。完成後的定子鐵心如圖 2-3(b)。

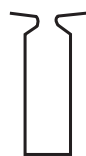
定子鐵心內的線槽型式，中、小型電機大多採用如圖 2-3(c) 所示的**半閉口槽 (semi-closed slot)**，以減低空氣隙之磁阻及損失；而高壓大型電機為了方便定子繞組放置，則採用如圖 2-3(d) 的**開口槽 (open slot)** 型式。



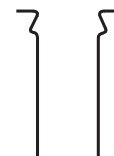
(a) 定子沖片



(b) 定子鐵心

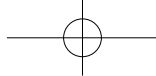


(c) 半閉口槽



(d) 開口槽

圖 2-3 定子鐵心與線槽



(三) 定子繞組

定子繞組 (stator winding) 係指裝置於定子鐵心槽內之三相繞組，圖 2-4 為繞製完成的定子。繞組多由漆包線或絕緣的平角銅線繞製；中、大型機之繞組則以模型繞成所需之形狀後，再予以包紮紗帶或其他絕緣材料。

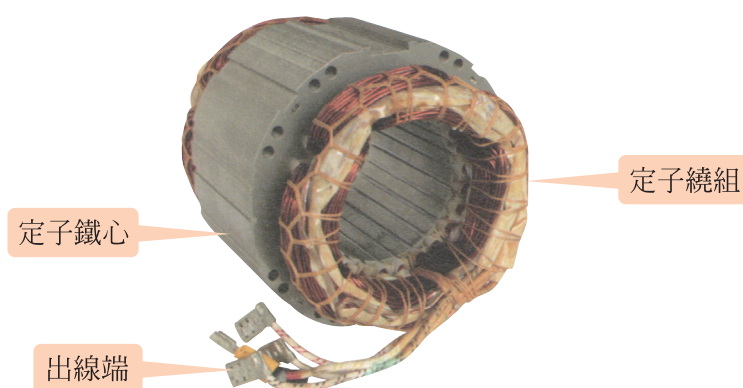


圖 2-4 定子鐵心與繞組

圖 2-5 為 3 相、4 極、12 槽、雙層繞定子繞組之佈線圖，由於使用雙層繞，線圈總數等於槽數，因此需要準備 12 個線圈。

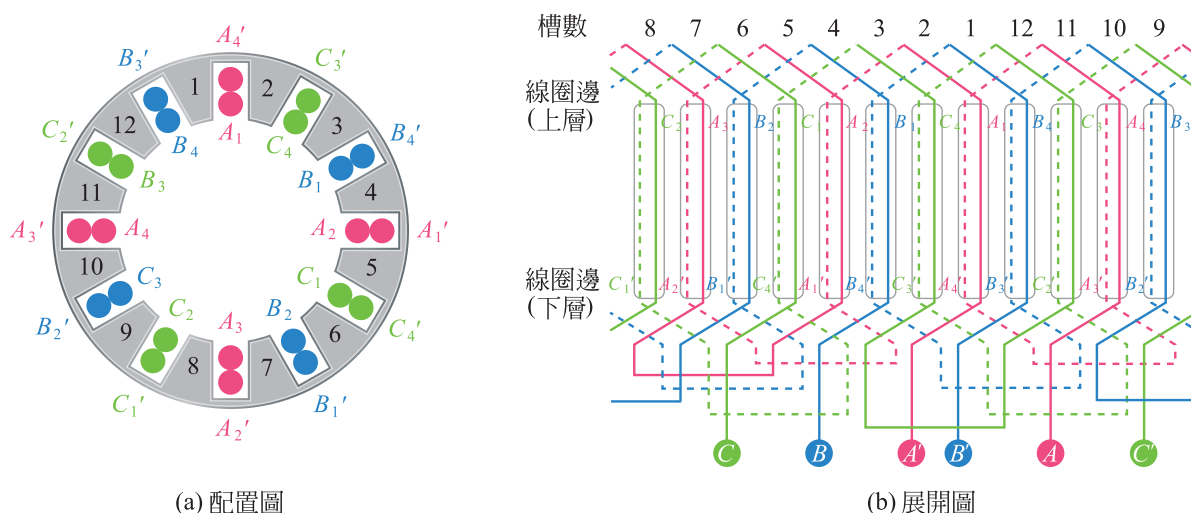


圖 2-5 定子繞組佈線圖

- (1) 總電機角：每極電機角 $\theta_e = 180^\circ$ ，4 極電機總電機角 $\theta_{eT} = 720^\circ$ 。
- (2) 槽距：定子鐵心有 12 槽，每槽間隔電機角 $\theta_e = 60^\circ$ 。
- (3) 線圈跨距：採用全節距，同一線圈的兩線圈邊間隔 180° ，相當於 3 個槽。
例如 A_1 線圈的兩邊 ($A_1 - A_1'$) 分別放在 1 號槽的上層與 4 號槽的下層。
- (4) 三相繞組：每相間隔 120° ，相當於 2 個槽。例如 A_1 線圈放在 1 號槽、 B_1 線圈放在 3 號槽、 C_1 線圈放在 5 號槽。

中、大型感應電動機的定子繞組通常採用雙層、分佈、短節距 (線圈跨距 $< 180^\circ$) 的繞法，使磁通儘量接近正弦波形分佈，以獲得等角速度的圓滑旋轉磁場，減少磁擾動所產生之噪音。

三相感應電動機定子繞組繞製完畢後，如圖 2-5(b) 會有 6 個【 $A-A'$ 、 $B-B'$ 、 $C-C'$ 】出線端，使用者可以依據需要，將三相定子繞組如圖 2-6 所示，進行星形結線 (Y 連接) 或三角形結線 (Δ 連接) 後，再與外部的三相交流電源連接。

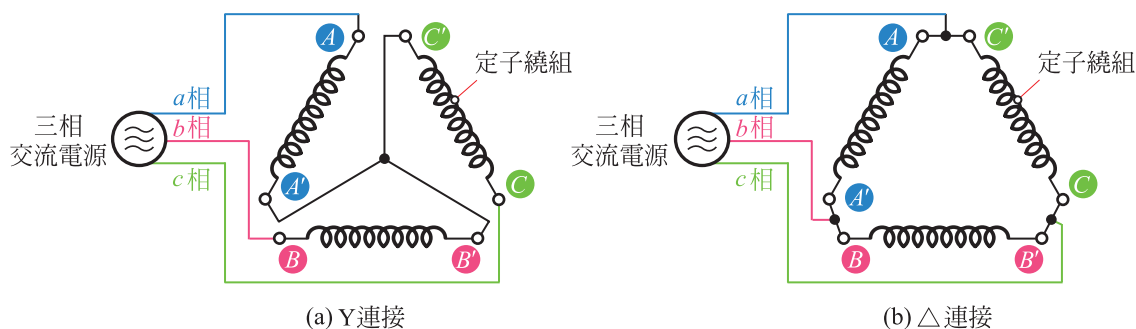


圖 2-6 定子繞組的接線方式

(四) 端蓋與軸承

端蓋係裝置於外殼之兩端，用來保護定子繞組，中央位置裝有軸承，用以支承轉軸承擔機械負載。軸承的規格、編號，記載於銘牌上，以便更換時參考。

隨堂練習

- () 1. 將一部三相、6 極、72 槽感應電動機定子繞組重新繞置，如果 A 相線圈的始端設計放置在 1 號槽，則 B 相線圈的始端應該安置在哪一槽，定子繞組才能順利繞置且正常工作？ (A)7 (B)8 (C)9 (D)10 槽。

二、轉子

三相感應電動機的轉子如圖 2-7，主要由下列部分所組成：

1. 轉軸：以鋼鐵製成，用來支持轉子，並且傳遞機械能至外部負載。
2. 轉子鐵心：轉子鐵心與定子鐵心材質相同，也是使用矽鋼薄片疊積而成，以減少渦流損。由於感應電動機沒有電樞反應，因此可將定子與轉子間的空隙儘可能地縮短，以減少激磁電流，提高功率因數。

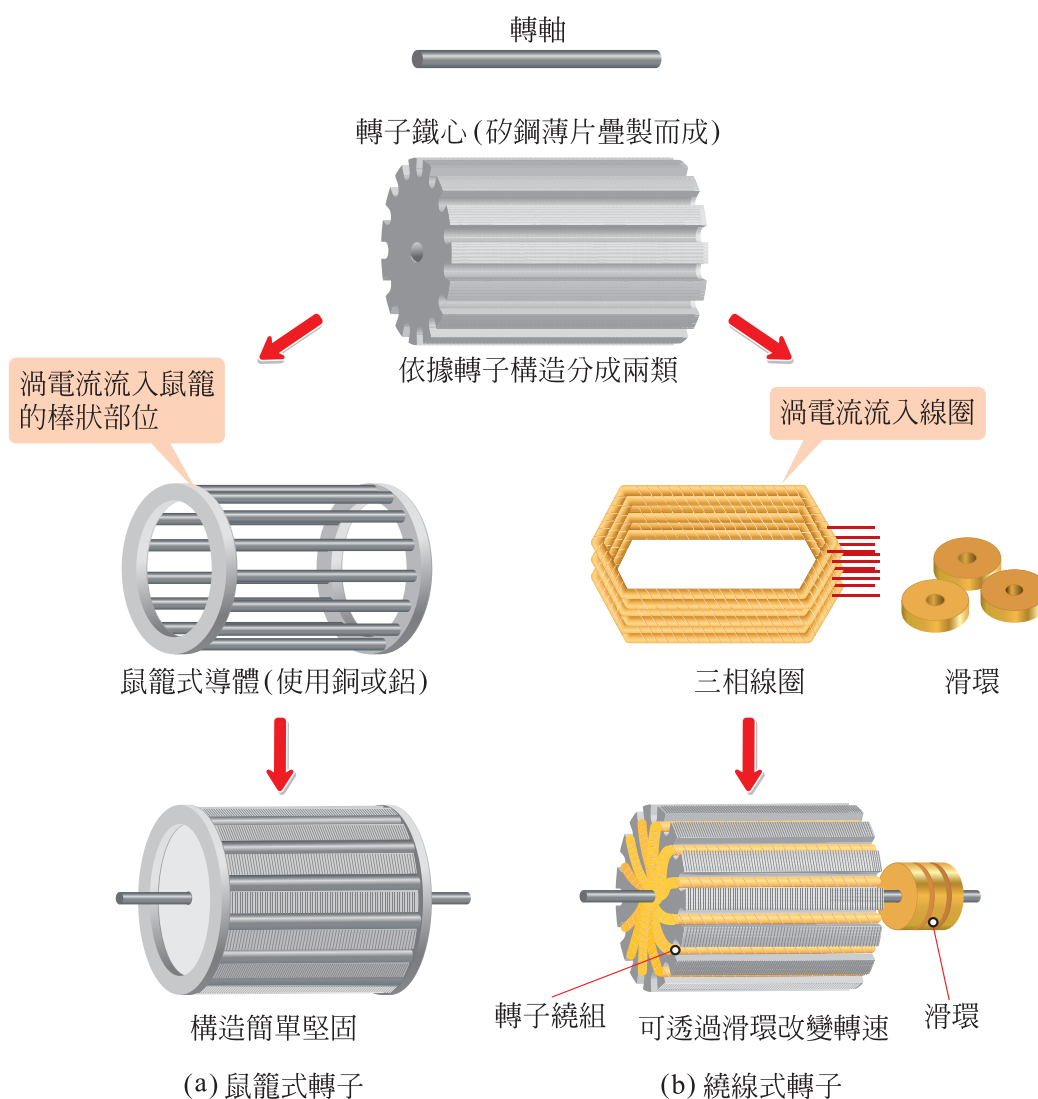
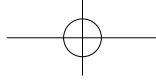


圖 2-7 轉子的製造流程



3. 轉子導體：感應電動機依據轉子導體構造分成鼠籠式 (squirrel-cage rotor) 與繞線式 (wound rotor) 兩大類，其構造如下所述：

- (1) 鼠籠式轉子：製造鼠籠式繞組時，大型機採用如圖 2-8 之方式，將未經絕緣之銅棒或鋁棒裝置於鐵心線槽內，兩端再與端絡環 (end ring) 焊接，使得轉子導體間形成短路。5 hp 以下的小型機則採用鑄入型轉子 (cast rotor)，將熔融之鋁倒入預熱數百度之轉子鐵心槽內，或以壓力壓入，並將端絡環及鼓風器同時鑄出。

鼠籠式轉子堅固耐用，適合大量生產，也可以適用於不同極數的定子繞組。轉子導體與鐵心採用斜槽型式，可以減緩定子與轉子間磁阻之變化，降低轉子旋轉時之噪音及轉矩的脈動。

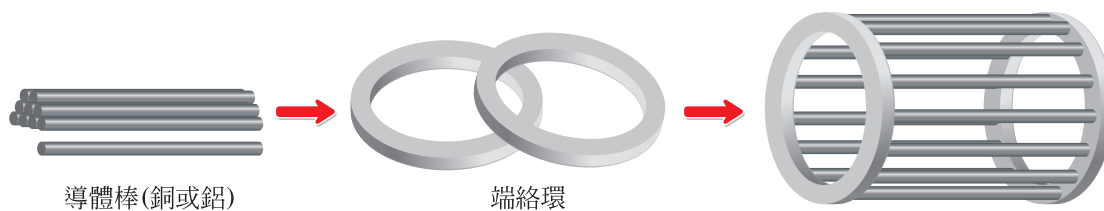


圖 2-8 鼠籠式轉子的製造

- (2) 繞線式轉子：圖 2-9 為繞線式轉子外觀，轉子鐵心內裝有三相繞組採用 Y 接線，透過引接線連接到滑環，再經由電刷與外部的電路連接。由於轉子上具有滑環裝置，因此又被稱為滑環式 (slip ring type) 感應電動機。

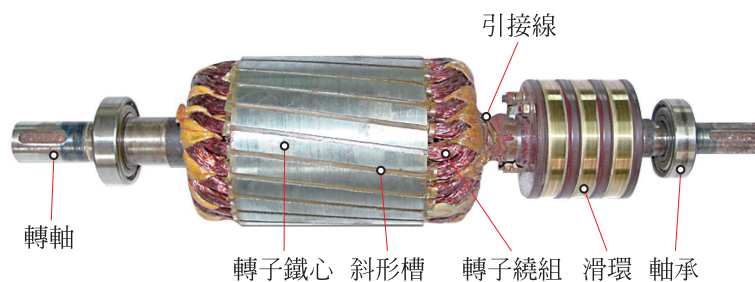
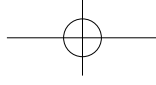


圖 2-9 繞線式轉子
(圖片來源：開富公司)

繞線式轉子的優點在於起動時，透過滑環與外部電阻連接，可以限制起動電流並增加起動轉矩；正常運轉時，改變外部電阻之大小可以控制轉速。但是繞線式轉子之繞組極數必須配合定子之極數繞製，構造複雜、製作成本高，目前已很少使用。



隨堂練習

- () 1. 在感應電動機定子組裝過程中，不需要使用到哪一項元件？ (A) 外殼 (B) 軸 (C) 末端架 (D) 銘牌。
- () 2. 早期工業界會採用繞線式轉子感應電動機，主要考量到的優點為何？ (A) 轉子電路可插入電阻，增加起動轉矩，減少起動電流 (B) 損失小、效率高 (C) 製造容易、成本低 (D) 散熱佳，堅固耐用。
- () 3. 感應電動機之轉子繞組會使用斜槽設計，主要考量到的優點為何？ (A) 起動方便 (B) 消除電樞反應 (C) 減少激磁電流 (D) 降低噪音。

2-2 三相感應電動機之分類

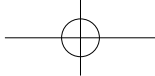
三相感應電動機依據裝置的場所與目的，在轉子構造、額定電壓、機殼外型、絕緣、保護等各方面做不同的設計，是目前產業界經常使用的電動機型式。

以台灣高鐵 700T 型列車為例，爲了達到營運時速 300 公里的要求，整部列車裝有 36 個日本東芝製造，輸出功率 285 kW 的三相鼠籠式感應電動機，總輸出功率高達 10,260 kW ($\approx 13,753$ hp)。

有關三相感應電動機的分類如下：

一、依轉子的構造可分為

- 1. 繞線式感應電動機。
- 2. 鼠籠式感應電動機：依據轉子導體設計又分爲：
 - (1) 普通鼠籠式轉子。
 - (2) 特殊鼠籠式轉子：又可細分爲深槽型鼠籠式轉子、雙鼠籠式轉子以及高電阻式轉子。



二、依使用電壓高低可分為

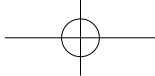
1. 高壓電動機：使用電壓在 600 V 以上者，一般為大輸出馬力的電動機。
2. 低壓電動機：使用電壓在 600 V 以下者。

三、依機殼外型可分為

1. 開放型：電動機之外殼設有通風口，以利散熱。
2. 半閉型：通風口使用細孔鋼網遮閉，避免異物進入。
3. 閉鎖型：除了特別設置的通風口外，外殼全為閉鎖構造。
4. 全閉型：外殼及軸承完全密封，電動機內外不能通風

四、依絕緣材料等級可分為

各級絕緣材料	最高容許溫度
Y 級絕緣材料	90°C
A 級絕緣材料	105°C
E 級絕緣材料	120°C
B 級絕緣材料	130°C
F 級絕緣材料	155°C
H 級絕緣材料	180°C
C 級絕緣材料	180°C 以上



五、依保護方式分類

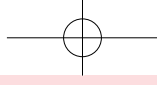
類 型	保護方式
防滴型	電機之外殼具有防止垂直 15 度以內之水滴直接或沿著機體浸入電機內部之開放型構造。
防爆型	可在具有爆炸性氣體之場合使用的電動機。
防塵型	軸承及導電部份具有防止塵埃侵入的電動機。
防水型	軸方向短時間注水，水份不會侵入機體內部及軸承部份的電動機。
浸水型	可在一定壓力之水中使用的電動機。

六、依用途分類

1. 減速電動機：透過齒輪、鏈條或皮帶等方式將速度降低。
2. 變速電動機：利用改變磁極數或是變頻器控制轉速。
3. 起重機用電動機：通常採用繞線式感應電動機。
4. 工具機用電動機：包括車床、磨床、銑床、鉋床等。
5. 風扇馬達。
6. 剎車馬達。

一、選擇題

- 2-1** () 1. 感應電動機所用之矽鋼片，其矽含量一般約為
(A) 1 % ~ 3 % (B) 10 % ~ 15 %
(C) 50 % ~ 60 % (D) 95 % ~ 98 %。
- () 2. 定子鐵心採矽鋼薄片疊積而成，其目的是為了減少
(A) 磁滯損 (B) 渦流損 (C) 銅損 (D) 旋轉損。
- () 3. 有關三相感應電動機構造之敘述，下列何者錯誤？
(A) 主要是由定子及轉子兩部份所構成
(B) 定子上有三相線圈
(C) 轉子為鼠籠式或繞線式
(D) 電刷應適當移位至磁中性面。
- () 4. 三相感應電動機之轉子構造，最常採用者是
(A) 繞線式 (B) 鼠籠式 (C) 永磁式 (D) 電磁式。
- () 5. 感應電動機定子繞組採短節距繞組，其目的何者錯誤？
(A) 縮短線圈末端銅線 (B) 使電動機轉動圓滑
(C) 改善電勢波形 (D) 提升運轉速度。
- () 6. 中、大型感應電動機為了使磁通儘量接近正弦波，以獲得圓滑運轉，有關定子繞組的設置方式，一般會採用何種設計方式？
(A) 雙層、分佈繞、全節距 (B) 雙層、集中繞、短節距
(C) 雙層、分佈繞、短節距 (D) 單層、分佈繞、短節距。
- () 7. 三相繞線式轉子感應電動機，起動時若在其轉子電路中串加電阻，其目的為何？
(A) 增加起動電流，增加起動轉矩
(B) 增加起動電流，降低起動轉矩
(C) 限制起動電流，增加起動轉矩
(D) 限制起動電流，降低起動轉矩。
- 2-2** () 8. 下列哪兩級的絕緣標準，容許溫度分別為最高與最低？
(A) Y 最高，C 最低 (B) E 最高，A 最低
(C) B 最高，C 最低 (D) C 最高，Y 最低。

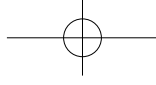


自我評量

- () 9. 中大型電機定子線槽多採用何種型式，以方便放置線圈？
(A) 開口槽 (B) 半閉口槽 (C) 閉口槽 (D) 斜口槽。
- () 10. 三相、4 極感應電動機，每相繞組之間應該互隔多少機械角？
(A) 180° (B) 120° (C) 90° (D) 60° 。

二、問答題

- 說明感應電動機定子構造與功能。
- 比較鼠籠式轉子與繞線式轉子的優缺點。
- 說明絕緣材料的等級以及容許最高溫度分別為何？
- 有一部 3 相、4 極、24 槽感應電動機，定子繞組採用雙層、分佈、全節距，試求本機之：
 - 總電機角為多少？
 - 每槽間隔電機角為多少？
 - 需要準備線圈數量為多少？
 - A 相線圈始邊放在 1 號槽，則其另一邊會在第幾槽？
 - A 相線圈始邊放在 1 號槽， B 相線圈始邊會在第幾槽？



CHAPTER 3

三相感應電動機之特性及等效電路

» 本章重點

三相感應電動機的定子外加三相交流電後產生旋轉磁場，轉子導體受到磁場感應出渦流，因而產生轉矩開始旋轉。隨著轉速上升，電動機的轉子特性會產生不同變化。由於本章內容與公式較多，使用等效電路圖幫助分析，可以更了解感應電動機的各项特性。

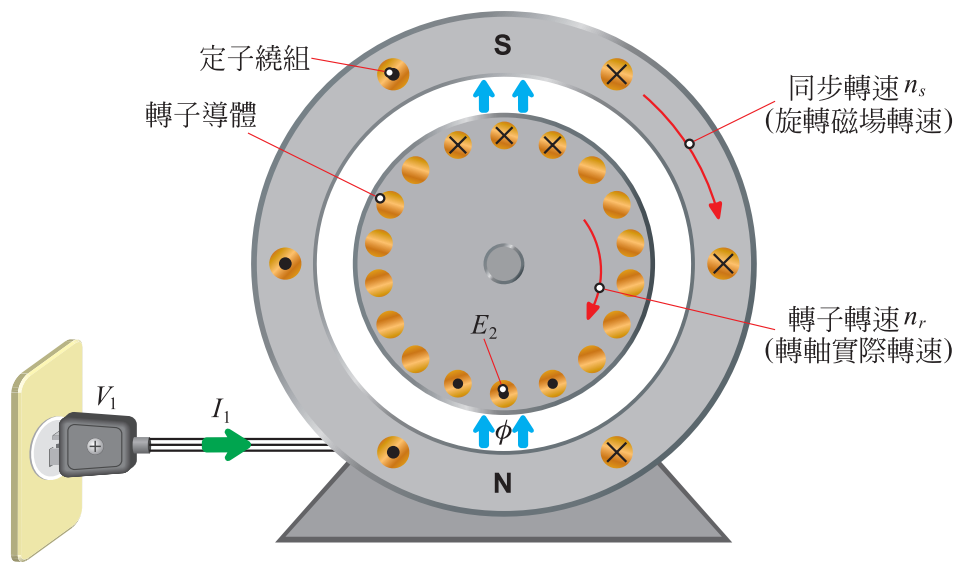
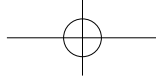
3-1 轉子感應電勢、頻率與電感抗

一、基本原理

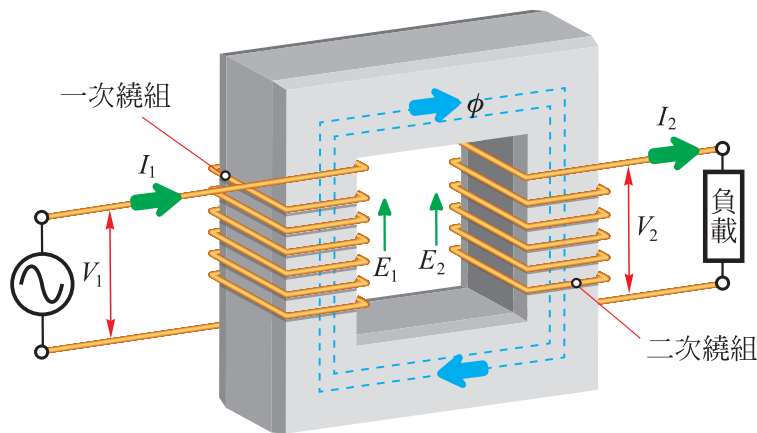
將圖 3-1(a) 的三相感應電動機定子繞組外加三相交流電 V_1 後，交流電流 I_1 流入定子繞組產生旋轉磁場並以同步轉速 n_s 持續旋轉。依據阿拉哥圓盤原理，轉子導體受到磁通 ϕ 切割產生感應電勢 E_2 ，並感應電流 I_2 ，使得轉子導體產生轉矩，朝旋轉磁場方向轉動。

圖 3-1(b) 則為變壓器的基本原理，當一次側繞組外加交流電 V_1 後，電流 I_1 流入一次側繞組，產生磁通 ϕ 沿著鐵心流動，一、二次繞組分別產生感應電勢，其中二次側繞組感應電勢 E_2 驅使電流 I_2 流往負載。

比較上述兩圖可以發現，感應電動機的定子繞組功能如同變壓器的一次側繞組，目的為產生磁場；至於轉子導體如同變壓器二次側繞組，都是因為磁場變動產生感應電勢，並驅使電流開始流動。不同點在於感應電動機的磁通必須穿過空氣隙，因此磁路損失較變壓器大；另一點則是電動機的輸出是轉軸上的機械負載，而變壓器是接在二次側繞組的電氣負載。



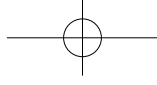
(a) 三相感應電動機



(b) 變壓器

圖 3-1 感應電勢的產生

由於兩者在特性上非常相近，因此**感應電動機可以視為二次側會轉動的變壓器**。變壓器的公式、等效電路等都可以運用在感應電動機，而且對於一部運轉在平衡狀態下的三相感應電動機而言，可以針對任何一相進行特性分析後，再將所得結果乘以 3 倍即可。除非特別註明，下列分析均針對其中一相進行說明：



二、感應電勢的形成與轉子頻率

三相感應電動機定子繞組外加三相電源瞬間，旋轉磁場立刻以同步轉速旋轉，並切割定子繞組與轉子繞組，由於繞組輪流受到旋轉磁場的 N 極與 S 極切割，因此**感應電勢與電流都是交流性質**，此現象與變壓器一、二次側繞組產生的感應電勢情形相似，其大小分別為：

$$E_1 = 4.44K_{w1}f_1N_1\phi_m \quad (3-1)$$

$$E_2 = 4.44K_{w2}f_2N_2\phi_m \quad (3-2)$$

E_1 ：每相定子繞組感應電勢 (V) E_2 ：靜止時每相轉子繞組感應電勢 (V)

K_{w1} ：定子繞組之繞組因數

K_{w2} ：轉子繞組之繞組因數

f_1 ：電源頻率 (Hz)

f_2 ：轉子頻率 (Hz)

N_1 ：定子每相繞組匝數 (匝)

N_2 ：轉子每相繞組匝數 (匝)

ϕ_m ：每極磁通量 (wb)

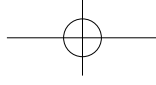
電動機起動瞬間，轉子轉速 $n_r = 0$ ，轉差率 $S = 1$ ，轉子繞組與定子磁場之間沒有相對運動，轉子感應電勢的頻率等於電源頻率 ($f_2 = f_1$)。

隨著轉子逐漸加速，轉子繞組受旋轉磁場的切割次數減少，使得轉子頻率 f_2 降低，轉子感應電勢 E_2 亦隨之減少。由於導體每經過一對磁極切割，就會產生一個正弦波形。當感應電動機轉子轉速為 n_r (rpm) 時，與定子旋轉磁場間每分鐘的轉差速率為 $n_s - n_r$ ，因此**轉子感應電勢的頻率，就等於旋轉磁場之磁極對數乘以每秒鐘的轉差速率**，即：

$$f_2 = \frac{P}{2} \times \frac{(n_s - n_r)}{60} = \frac{P}{2} \times \frac{S \times n_s}{60} = S \times \frac{P \times n_s}{120} = S \times f_1 \quad (3-3)$$

f_2 ：轉子頻率 (Hz)

f_1 ：電源頻率 (Hz)



由公式 3-3 可得感應電動機轉子頻率與轉差率成正比，因此必須將公式 3-2 旋轉時每相轉子繞組感應電勢公式調整為：

$$E_{2r} = SE_2 \quad (3-4)$$

E_{2r} ：旋轉時每相轉子繞組感應電勢 (V)

E_2 ：靜止時每相轉子繞組感應電勢 (V)

範例

01

有一部三相感應電動機，其銘牌標示摘錄如下：0.25 hp、450 VAC、60 Hz、6 P。若其滿載轉速為 1140 rpm，請問 (1) 旋轉磁場每分鐘轉速、(2) 起動瞬間轉子頻率、(3) 滿載時轉差率、(4) 滿載時轉子頻率分別為多少？

解 (1) $n_s = \frac{120f}{P} = \frac{120 \times 60}{6} = 1200 \text{ rpm}$

(2) 起動瞬間轉子轉速 $n_r = 0$ ，轉差率 $S = 1$ ，

$$\text{轉子頻率 } f_2 = S \times f_1 = 1 \times 60 = 60 \text{ Hz}$$

(3) 滿載時轉子轉速 $n_r = 1140 \text{ rpm}$ ，轉差率 $S = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{1200 - 1140}{1200} = 0.05$

(4) 滿載時轉子頻率 $f_2 = Sf_1 = 0.05 \times 60 = 3 \text{ Hz}$

範例

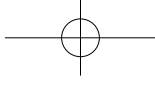
02

有一部三相、6 極、50 Hz 感應電動機，起動瞬間測得轉子感應電勢為 200 V，已知滿載時轉速為 970 rpm，請問滿載時 (1) 轉差率、(2) 轉子頻率、(3) 轉子感應電勢分別為多少？

解 (1) $n_s = \frac{120 \times 50}{6} = 1000 \text{ rpm}$ 、 $S = \frac{1000 - 970}{1000} = 0.03$

(2) 滿載時轉子頻率 $f_2 = Sf_1 = 0.03 \times 50 = 1.5 \text{ Hz}$

(3) 滿載時轉子感應電勢 $E_{2r} = SE_2 = 0.03 \times 200 = 6 \text{ V}$

**隨堂練習**

- () 1. 食品工廠中有一台三相感應電動機，銘牌上標示為 6 極、，同步轉速為 1200 rpm，滿載轉差率 5 %，則電動機滿載運轉時，轉子繞組中電流之頻率，何者正確？
(A) 1 Hz (B) 2 Hz (C) 3 Hz (D) 4 Hz。
- () 2. 三相感應電動機轉子感應電動勢 (A) 隨轉子轉速增加而增加 (B) 隨轉子轉速增加而降低 (C) 與電源電壓成固定比例 (D) 與轉子轉速無關。

三、定子與轉子的阻抗

感應電動機的定子繞組使用銅線繞製完成後，放入定子鐵心線槽內。定子繞組外加交流電的主要目的是產生交鏈磁通 ϕ ，以切割定子繞組與轉子繞組產生感應電勢。但是會有**少部分的磁通僅與繞組本身相交鏈，稱為漏磁通**。由圖 3-2 可以看出 ϕ_1 僅與定子繞組交鏈，稱為定子漏磁通； ϕ_2 僅與轉子繞組交鏈，稱為轉子漏磁通。

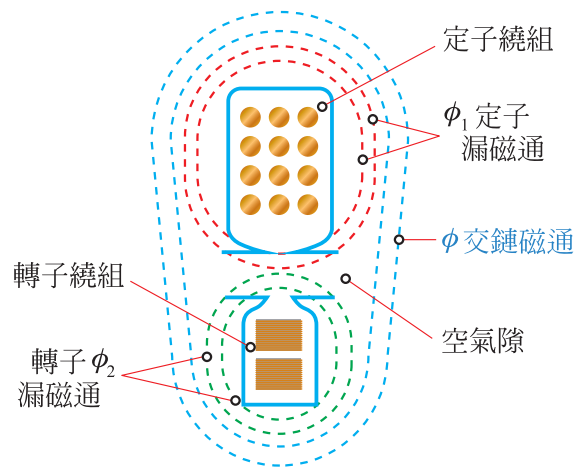
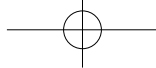


圖 3-2 定子與轉子的磁交鏈



漏磁通 ϕ_1 與 ϕ_2 對於定子繞組與轉子繞組產生的影響，以漏磁電抗代表：

$$X_1 = 2\pi f_1 L_1 \quad (3-5)$$

$$X_2 = 2\pi f_2 L_2 \quad (3-6)$$

X_1 ：每相定子繞組漏磁電抗 (Ω) L_1 ：每相定子繞組電感量 (H)

X_2 ：靜止時每相轉子繞組漏磁電抗 (Ω) L_2 ：每相轉子繞組電感量 (H)

由公式 3-3 已知轉子頻率與轉差率成正比，因此旋轉時每相轉子繞組漏磁電抗公式必須調整為：

$$X_{2r} = SX_2 \quad (3-7)$$

X_{2r} ：旋轉時每相轉子繞組漏磁電抗 (Ω)

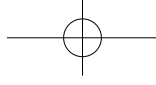
感應電動機的定子繞組與轉子繞組，大多使用銅或鋁等金屬材料製作而成，因此以 R_1 與 R_2 代表每相定子繞組與轉子繞組的電阻值，再與公式 3-5、3-6 合併後，可得每相定子繞組與轉子繞組的等值阻抗分別為：

$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_1^2} \quad (3-8)$$

$$Z_2 = \sqrt{R_2^2 + (SX_2)^2} \quad (3-9)$$

Z_1 ：每相定子繞組阻抗 (Ω) Z_2 ：每相轉子繞組阻抗 (Ω)

R_1 ：每相定子繞組電阻 (Ω) R_2 ：每相轉子繞組電阻 (Ω)



範例

03

有一台三相 4 極，60 Hz 感應電動機，靜止時測得每相轉子繞組電壓 130 V，轉子每相電阻 $5\ \Omega$ ，電抗 $12\ \Omega$ ，倘若本機滿載時轉速為 1620 rpm，求：

- (1) 起動瞬間轉子頻率、轉子電壓以及每相轉子繞組的阻抗值？
- (2) 滿載運轉時轉子頻率、轉子電壓、轉子電抗以及每相轉子繞組的阻抗值？

解 同步轉速 $n_s = \frac{120 \times 60}{4} = 1800\ \text{rpm}$ 。

- (1) 起動瞬間轉子轉速 $n_r = 0$ ，轉差率 $S = 1$

(A) 轉子頻率 $f_2 = Sf_1 = 1 \times 60 = 60\ \text{Hz}$

(B) 轉子電壓 $E_2 = 130\ \text{V}$

(C) 轉子阻抗 $Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_2^2} = \sqrt{5^2 + 12^2} = 13\ \Omega$

- (2) 滿載時轉子轉速 $n_r = 1620\ \text{rpm}$ ，轉差率 $S = \frac{1800 - 1620}{1800} = 0.1$

(A) 轉子頻率 $f_2 = Sf_1 = 0.1 \times 60 = 6\ \text{Hz}$

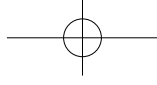
(B) 轉子電壓 $E_{2r} = SE_2 = 0.1 \times 130\ \text{V} = 13\ \text{V}$

(C) 轉子電抗 $X_{2r} = SX_2 = 0.1 \times 12 = 1.2\ \Omega$

(D) 轉子阻抗 $Z_{2r} = \sqrt{R_2^2 + X_{2r}^2} = \sqrt{5^2 + 1.2^2} = 5.14\ \Omega$

隨堂練習

- () 1. 某三相 6 極 60 Hz，240 V 繞線式感應電動機，轉子之相數，繞型及匝數均與定子相同，當轉子轉速為 1100 rpm 時，轉子每相感應電動勢約為多少？
(A) 20 V (B) 60 V (C) 120 V (D) 240 V。
- () 2. 有關感應電動機轉子之感應電勢與轉差率 (S) 的關係，下列敘述何者錯誤？
(A) $S = 1$ ，轉子之感應電勢最大 (B) $S = 0$ ，轉子之感應電勢為零 (C) 感應電動機之轉速愈高，轉子之感應電勢愈大 (D) 感應電動機之轉速愈低，轉子電抗愈大。



3-2 感應電動機的等效電路

一、定子等效電路

三相感應電動機之定子相當於變壓器之一次繞組，其目的是產生交鏈磁通 ϕ 切割定子繞組與轉子繞組以產生感應電勢，圖 3-3 為其中一相定子繞組的等效電路。 V_1 為外加相電壓， I_1 為輸入相電流、 R_1 為定子繞組電阻、 X_1 為定子漏磁電抗代表發生在定子繞組的漏磁通 ϕ_1 、 G_e 為激磁電導代表鐵心損失、 B_m 為激磁電納代表發生在定子與轉子間的交鏈磁通 ϕ 、 I_e 稱為鐵損電流、 I_m 稱為磁化電流、 I_0 稱為激磁電流、 I_1' 為定子負載電流、 E_1 為定子繞組反電勢。

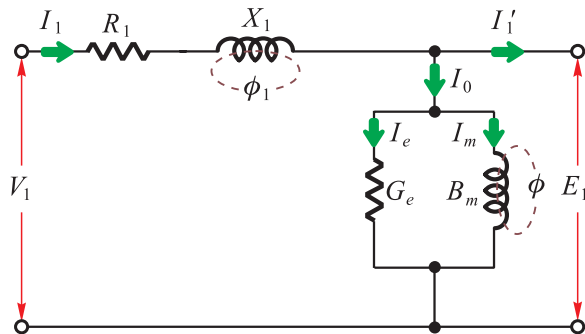


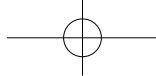
圖 3-3 感應電動機每相定子等效電路圖

圖 3-3 中，感應電動機的定子輸入電流 I_1 可以分解成激磁電流 I_0 與定子負載電流 I_1' ，其相量關係為：

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_0 + \bar{I}_1' \text{，即 } I_1 = \sqrt{I_0^2 + I_1'^2} \quad (3-10)$$

公式 3-10 中，**感應電動機無載（軸端沒有接負載）時，負載電流 I_1' 很低可以忽略，此時輸入電流 I_1 等於激磁電流 I_0 ，因此激磁電流 I_0 也稱為無載電流。**至於激磁電流 I_0 可以分成產生交鏈磁通 ϕ 的磁化電流 I_m ，以及造成鐵心發熱現象的鐵損電流 I_e ，其相量關係為：

$$\bar{I}_0 = \bar{I}_e + \bar{I}_m' \text{，即 } I_0 = \sqrt{I_e^2 + I_m'^2} \quad (3-11)$$



對於變壓器而言，磁通均在鐵心中流動，所以激磁電流僅為額定電流的 2 % ~ 5 %。而感應電動機的旋轉磁場必須穿過定子與轉子間的空氣隙，故所需的磁化電流 I_m 很大，使得**激磁 (無載) 電流約為額定 (滿載) 電流的 25 % ~ 40 %**，分析時不可以忽略。

範例**04**

三相 50 Hz 感應電動機，4 極，10 kW，220 V，若接上 60 Hz，220 V 電源使用，試問旋轉磁場磁通變為原來之幾倍？

解 電動機外加電壓 $V_1 \div E_1 = 4.44 K_w f_1 N_1 \phi_m$ ，倘若電源電壓 V 不變時，頻率 f_1 由 50 Hz 上升至 60 Hz，則旋轉磁場之磁通 ϕ_m 為原來的 $\frac{5}{6} = 0.833$ 倍。

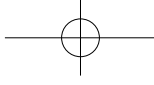
隨堂練習

- () 1. 在感應電動機的等效電路中，下列何者代表電動機的鐵損？ (A) 定子繞組電阻 (B) 定子繞組電抗 (C) 激磁電導 (D) 激磁電納。
- () 2. 將一部三相感應電動機運轉於無載狀態下，所測量到的定子電流大約為滿載電流的 (A) 80 % (B) 40 % (C) 5 % (D) 1 %。

二、轉子等效電路

觀察範例 03 可以發現，感應電動機起動瞬間與運轉時的轉子阻抗差異很大，為了方便分析可以利用等效電路圖表示，其中圖 3-4(a) 為起動瞬間轉子狀態，依據歐姆定律可得起動瞬間 ($S = 1$) 每相轉子電流：

$$I_{2s} = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}} \quad (3-12)$$



感應電動機開始轉動後，當轉子轉速為 n_r ，轉差率為 S ，等效電路變成圖 3-4(b) 所示，其中轉子應電勢 (E_{2r}) 及轉子漏磁電抗 (X_{2r}) 會與轉差率成正比，轉子電阻維持不變，因此運轉時每相轉子電流為：

$$I_{2r} = \frac{SE_2}{\sqrt{R_2^2 + (SX_2)^2}} \quad (3-13)$$

由於起動瞬間轉差率 $S=1$ ，將其代入公式 3-13 後計算所得之結果與公式 3-12 完全相同，因此，後續有關轉子電流 (I_2) 的分析與計算利用公式 3-13 來進行會比較方便。

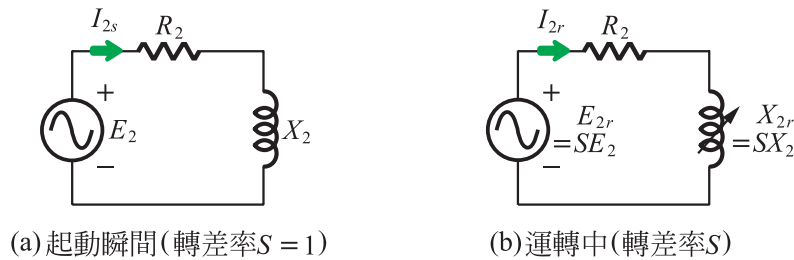


圖 3-4 感應電動機每相轉子等效電路圖

範例

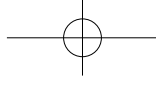
05

有一部三相 6 極，50 Hz 的感應電動機，滿載轉速為 900 rpm，倘若起動瞬間轉子每相應電勢為 100 V，轉子電阻為 3 Ω，轉子電抗為 4 Ω，試求本機 (1) 起動瞬間轉子電流、(2) 滿載時轉子電流分別為多少？

解 同步轉速 $n_s = \frac{120 \times 50}{6} = 1000 \text{ rpm}$

(1) 起動瞬間 $n_r = 0$ ， $S=1$ ，轉子等效電路如下圖 (a) 所示，因此

$$\text{起動瞬間轉子電流 } I_{2s} = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}} = \frac{100}{\sqrt{3^2 + 4^2}} = 20 \text{ A}$$



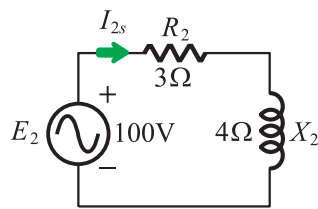
(2) 滿載時轉子轉速 $n_r = 900 \text{ rpm}$ ，轉差率 $S = \frac{1000 - 900}{1000} = 0.1$

其中轉子電壓 $E_{2r} = SE_2 = 0.1 \times 100 \text{ V} = 10 \text{ V}$

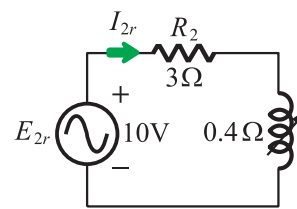
轉子電抗 $X_{2r} = SX_2 = 0.1 \times 4 = 0.4 \Omega$

轉子等效電路如下圖 (b) 所示，因此

$$\text{滿載時轉子電流 } I_{2r} = \frac{SE_2}{\sqrt{R_2^2 + (SX_2)^2}} = \frac{10}{\sqrt{3^2 + 0.4^2}} = 3.3 \text{ A}$$



(a) 起動瞬間(轉差率 $S=1$)



(b) 運轉中(轉差率 $S=0.1$)

由於感應電動機的轉子特性會隨著轉速而變，爲了方便計算電動機的運轉特性，會將圖 3-4(b) 的轉子等效電路再進行圖 3-5 所示演變。

爲了方便計算，先將圖 3-5(a) 中的數值同除以轉差率 S 後，可得等值轉子電路如圖 3-5(b) 所示，且其每相轉子電流 (I_2) 並未改變，即：

$$I_2 = \frac{SE_2}{\sqrt{R_2^2 + (SX_2)^2}} = \frac{E_2}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{S}\right)^2 + X_2^2}} \quad (3-14)$$

接下來將圖 3-5(b) 中的電阻 $\frac{R_2}{S}$ 分解如下：

$$\frac{R_2}{S} = R_2 + \frac{1-S}{S} R_2 \quad (3-15)$$

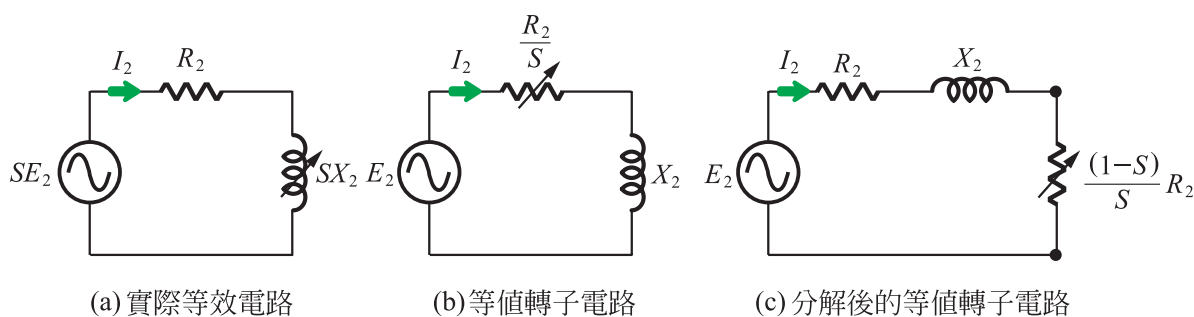
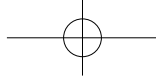


圖 3-5 轉子等效電路圖的演變

之所以將 $\frac{R_2}{S}$ 拆解成兩個部分，是爲了方便分析轉子的狀態。其中 R_2 與轉差率無關，用來表示轉子繞組的等效電阻值（轉子本身的構造）。而剩下的電阻 $\frac{1-S}{S}R_2$ 與轉差率有關，用來表示轉子外接機械負載狀態（轉軸承擔的負載量）。

三、轉子的功率分析

當轉子電流 I_2 通過轉子等效電路的各項電阻時，產生之功率 ($P = I^2R$) 如下所示：

$$I_2^2 \left(\frac{R_2}{S} \right) = I_2^2 (R_2) + I_2^2 \left(\frac{1-S}{S} R_2 \right) \quad (3-16)$$

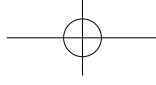
$I_2^2 \frac{R_2}{S}$ ：轉子每相輸入功率 (W)，也稱爲同步瓦特或氣隙功率 (P_g)，以 P_{i2} 表示。

$I_2^2 R_2$ ：轉子每相繞組銅損 (W)，以 P_{c2} 表示。

$I_2^2 \times \frac{1-S}{S} R_2$ ：轉子每相輸出之機械功率 (W)，也稱爲轉子內生機械功率 (P_m)，以 P_{o2} 表示。

而公式 3-16 也可以表示爲：

$$P_{i2} = P_{c2} + P_{o2} \quad (3-17)$$



將公式 3-16 簡化後可得轉子輸入功率 (P_{i2})：轉子銅損 (P_{c2})：轉子輸出功率 (P_{o2})，與轉差率 (S) 之關係為：

$$P_{i2} : P_{c2} : P_{o2} = 1 : S : 1 - S \quad (3-18)$$

綜合上述，將轉子功率的關係整理成圖 3-6，其中轉子輸入功率 (P_{i2}) 減去轉子銅損 (P_{c2}) 等於轉子輸出功率 (P_{o2})，而轉子效率可表示為：

$$\eta_2 = \frac{P_{o2}}{P_{i2}} \times 100\% = \frac{1-S}{1} \times 100\% = (1-S) \times 100\% \quad (3-19)$$

η_2 ：轉子效率

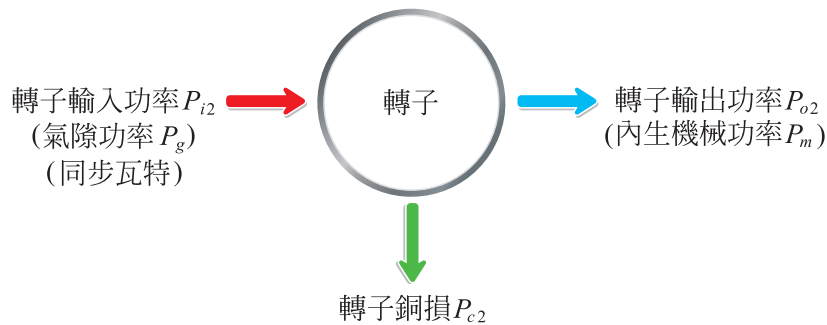


圖 3-6 轉子功率轉移狀態圖

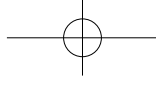
範例

06

有一部三相 4 極、220 VAC、50 Hz 感應電動機，已知滿載時轉子轉速為 1440 rpm，而轉子銅損為 400 W，則此機滿載時 (1) 轉差率、(2) 轉子輸入功率、(3) 轉子輸出功率、(4) 轉子效率分別為何？

解 (1) 同步轉速 $n_s = \frac{120f}{P} = \frac{120 \times 50}{4} = 1500 \text{ rpm}$

$$\text{滿載時轉差率 } S = \frac{1500 - 1440}{1500} = 0.04$$



(2) 由於

$$\begin{array}{l} P_{i2} : P_{c2} : P_{o2} \\ = 1 : S : 1-S \end{array}$$

公式



$$\begin{array}{l} P_{i2} : 400 \text{ W} : P_{o2} \\ = 1 : 0.04 : 0.96 \end{array}$$

代入已知數據

將已知數據交叉相乘可得 $P_{i2} \times 0.04 = 400 \text{ W} \times 1$

$$\text{轉子輸入功率 } P_{i2} = \frac{400}{0.04} = 10000 \text{ W}$$

(3) 由於 $P_{i2} \times 0.96 = P_{o2} \times 1$ ，因此轉子輸出功率 $P_{o2} = 10000 \times 0.96 = 9600 \text{ W}$

$$\text{或 } P_{o2} = P_{i2} - P_{c2} = 10000 - 400 = 9600 \text{ W}$$

$$(4) \text{ 轉子效率 } \eta_2 = \frac{P_{o2}}{P_{i2}} \times 100\% = \frac{9600}{10000} \times 100\% = 96\%$$

範例

07

有一部三相 10 極，60 Hz，5 hp 感應電動機，滿載時測得轉子轉速為 648 rpm，倘若忽略機械損失，則此機滿載時 (1) 轉子輸出功率、(2) 轉子輸入功率、(3) 轉子銅損、(4) 轉子效率分別為何？

解 同步轉速 $n_s = \frac{120 \times 60}{10} = 720 \text{ rpm}$ ，滿載時轉差率 $S = \frac{720 - 648}{720} = 0.1$

(1) 輸出功率 $P_o = 5 \text{ hp} = 3730 \text{ W}$ ，忽略機械損失，

$$\text{則轉子輸出功率 } P_{o2} = P_o = 3730 \text{ W}$$

(2)

$$\begin{array}{l} P_{i2} : P_{c2} : P_{o2} \\ = 1 : S : 1-S \end{array}$$

公式



$$\begin{array}{l} P_{i2} : P_{c2} : 3730 \text{ W} \\ = 1 : 0.1 : 0.9 \end{array}$$

代入已知數據

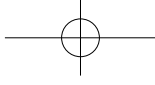
$$\text{交叉相乘後可得 } P_{i2} \times 0.9 = 3730 \text{ W} \times 1$$

$$\text{因此轉子輸入功率 } P_{i2} = \frac{3730 \text{ W}}{0.9} = 4144.4 \text{ W}$$

(3) 由於 $P_{i2} \times 0.1 = P_{c2} \times 1$ ，因此轉子銅損 $P_{c2} = 0.1 \times 4144.4 = 414.4 \text{ W}$

$$\text{或 } P_{c2} = P_{i2} - P_{o2} = 4144.4 - 3730 = 414.4 \text{ W}$$

$$(4) \text{ 轉子效率 } \eta_2 = \frac{P_{o2}}{P_{i2}} \times 100\% = \frac{3730}{4144.4} \times 100\% = 90\%$$



隨堂練習

- () 1. 設感應電動機之轉差率為 S ，轉子之電流及電阻各為 I_2 及 R_2 ，則 $\frac{I_2^2 R_2}{S}$ 稱為
(A) 轉子輸入功率 (B) 轉子輸出功率 (C) 消耗於轉子之熱功率 (D) 摩擦損失功率。
- () 2. 有一台三相感應電動機，在轉差率為 1 % 時，轉子銅損為 100 W，則此電動機之轉子輸出功率為何？ (A) 10000 W (B) 9900 W (C) 900 W (D) 100 W。

四、感應電動機每相等效電路

為了完整瞭解感應電動機的運轉特性，可以將圖 3-3 定子等效電路圖與圖 3-5(c) 轉子等效電路合併，轉換方式時如同變壓器二次側轉換至一次側之方法。

假設定子與轉子之有效匝數比為 a ，則轉子電壓需要乘以匝數比 a ，而電流除以 a ，並將電阻及電抗分別乘以 a^2 。折算後的數值在右上方加『 ' 』表示。圖 3-7 為感應電動機轉換至定子側之等效電路圖。

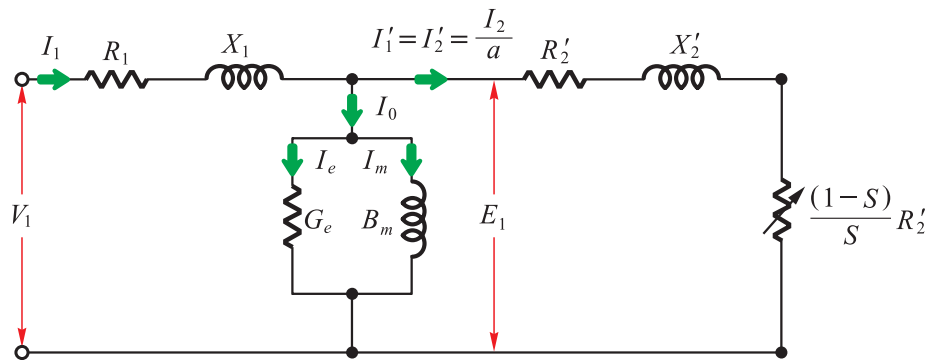


圖 3-7 感應電動機每相等效電路 (轉換至定子側)

依據圖 3-7 的等效電路，可將三相感應電動機之功率轉移情形分析成圖 3-8 以方便計算。

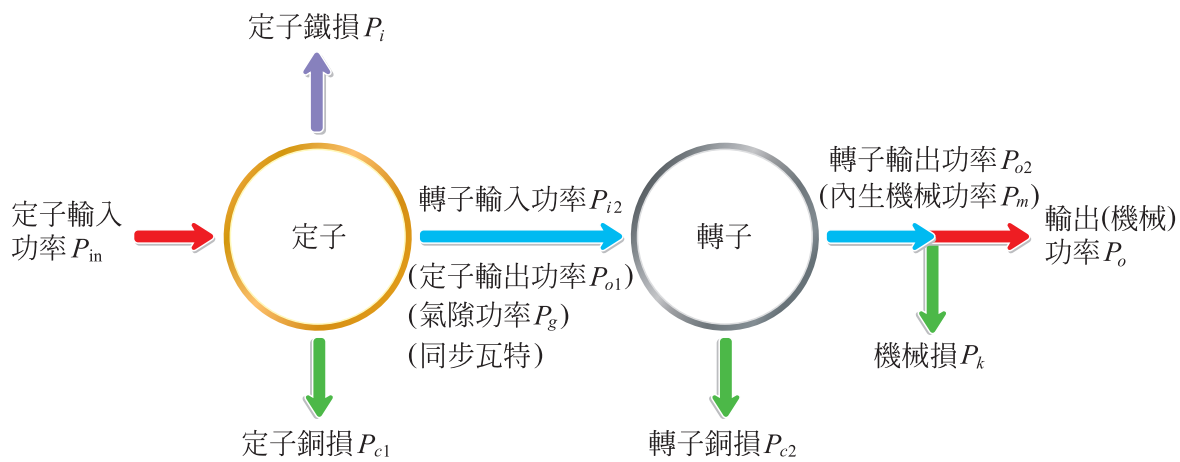
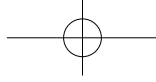


圖 3-8 感應電動機功率轉移圖

依據圖 3-7 與圖 3-8 可得，感應電動機功率的計算式如下：

1. 定子輸入功率 $P_{in} = V_1 I_1 \cos \theta$
2. 定子銅損 $P_{c1} = I_1^2 R_1$
3. 定子鐵損 $P_i = E_1 I_e = E_1^2 G_e$
4. 定子輸出功率 P_{o1} ：也稱為轉子輸入功率 (P_{i2})、氣隙功率 (P_g) 或是同步瓦特，

$$\text{其值為 } P_{o1} = P_{in} - P_{c1} - P_i = I_2' \frac{R_2'}{S}$$

5. 轉子銅損 $P_{c2} = I_2'^2 R_2'$
6. 轉子輸出功率 P_{o2} ：也稱為內生機械功率 (P_m)，其值為

$$P_{o2} = P_{i2} - P_{c2} = I_2' \left(\frac{1-S}{S} \right) R_2'$$

7. 輸出機械功率 $P_o = P_{o2} - P_k$

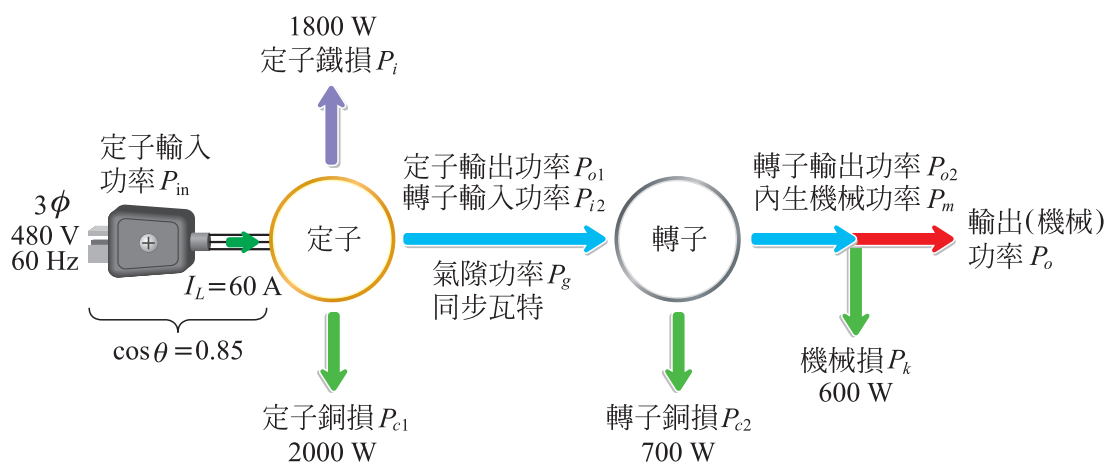
其中機械損 (P_k) 包含摩擦損、風阻損以及雜散負載損等；若忽略機械損，則輸出機械功率 (P_o) 等於轉子輸出功率 (P_{o2})。

範例

08

有一部三相、12 極、480 V、60 Hz 感應電動機，在功因為 0.85 落後的情況下，測得輸入電流 60 A，倘若定子銅損 2000 W，轉子銅損 700 W，鐵損 1800 W，機械損失 600 W，試求本機 (1) 定子輸入功率、(2) 轉子輸入功率、(3) 內生機械功率、(4) 輸出功率、(5) 效率、(6) 轉子轉速分別為何？

解 依據題意畫出本題功率轉移情形如下圖所示



(1) 本題為三相機種，因此定子輸入總功率

$$P_{in} = 3V_p I_p \cos \theta = \sqrt{3} V_L I_L \cos \theta = \sqrt{3} \times 480 \times 60 \times 0.85 = 42400 \text{ W}$$

(2) 轉子輸入功率 $P_{i2} = P_{in} - P_{c1} - P_i = 42400 - 2000 - 1800 = 38600 \text{ W}$

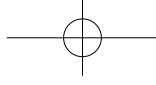
(3) 內生機械功率 $P_m = P_{i2} - P_{c2} = 38600 - 700 = 37900 \text{ W}$

(4) 輸出功率 $P_o = P_m - P_k = 37900 - 600 = 37300 \text{ W}$

(5) 效率 $\eta = \frac{P_o}{P_{in}} \times 100\% = \frac{37300}{42400} \times 100\% = 88\%$

(6) 轉差率 $S = \frac{P_{c2}}{P_{i2}} = \frac{700}{38600} = 0.018$ ， $n_s = \frac{120 \times 60}{12} = 600 \text{ rpm}$

因此轉子轉速 $n_r = (1 - S)n_s = (1 - 0.018) \times 600 = 589.2 \text{ rpm}$



隨堂練習

- () 1. 有一台冷氣主機採用三相、200 V、60 Hz、2 極、10 hp 感應電動機，滿載運轉時測得線電流為 30 A，功率因數為 0.8，則這台電動機滿載效率大約為多少？
(A)79.7 % (B)84.7 % (C)89.7 % (D)94.7 %。
- () 2. 有一部三相、4 極、220 V、60 Hz、6 hp 感應電動機，滿載時測得輸入電流為 18 A，倘若轉子銅損為 200 W，機械損為 324 W，定子鐵損為 450 W，定子銅損 350 W，則滿載時功率因數為 (A)0.928 (B)0.848 (C)0.785 (D)0.654。

3-3 感應電動機的轉矩

一、轉矩與功率及轉速的關係

轉矩 (T) 的定義是將功率 (P_o) 除以角速率 (ω)，對於感應電動機而言，常討論的轉矩包含輸出轉矩 (T_o) 與電磁轉矩 (T_m) 兩項，其關係為：

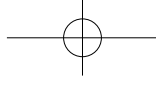
(一) 輸出轉矩

感應電動機軸端的轉矩稱為輸出轉矩 (T_o)。若電動機銘牌上標示額定輸出功率 (P_o) 及轉子轉速 (n_r)，由於轉軸角速率 $\omega_r = 2\pi \times \frac{n_r}{60}$ ，因此輸出轉矩為：

$$T_o = \frac{P_o}{\omega_r} = \frac{P_o}{2\pi \times \frac{n_r}{60}} = \frac{60P_o}{2\pi n_r} \quad (3-20)$$

T_o ：輸出轉矩 (N-m)

P_o ：輸出功率 (W)



(二) 電磁轉矩

電磁轉矩 (T_m) 是將內生機械功率 (P_m) 除以轉軸端角速率 (ω_r)，即：

$$T_m = \frac{P_m}{\omega_r} = \frac{P_m}{2\pi \times \frac{n_r}{60}} = \frac{60P_m}{2\pi n_r} \quad (3-21)$$

T_m ：電磁轉矩 (N-m) P_m ：內生機械功率 (W)

由於感應電動機的轉子轉速 $n_r = (1-S)n_s$ ，而內生機械功率 $P_m = P_{o2} = (1-S)P_{i2}$ ，因此公式 3-21 可以改寫成：

$$T_m = \frac{60P_m}{2\pi n_r} = \frac{60(1-S)P_{i2}}{2\pi(1-S)n_s} = \frac{60P_{i2}}{2\pi n_s} = \frac{P_{i2}}{\omega_s} \quad (3-22)$$

依據上述，可將感應電動機功率、轉速與轉矩的公式整理成圖 3-9 所示。

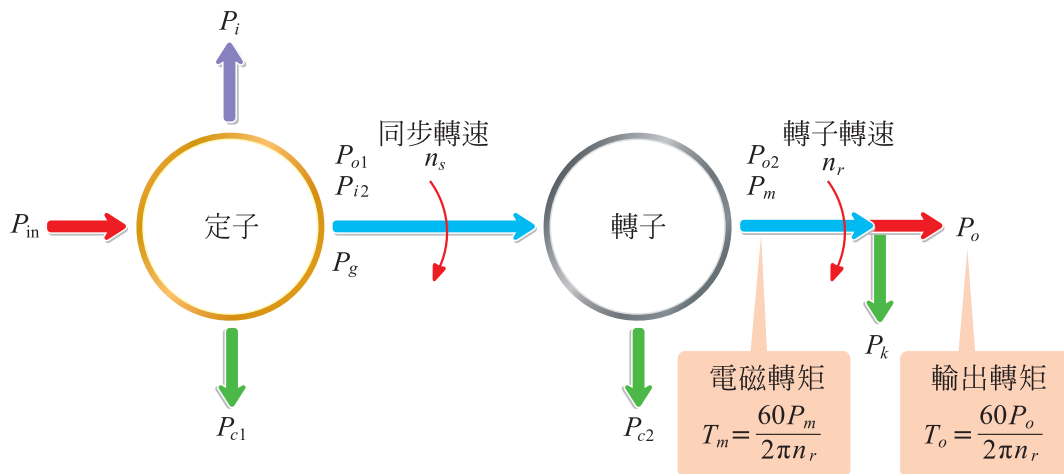


圖 3-9 感應電動機功率與轉矩關係圖

使用者通常關心軸端的輸出轉矩與轉子轉速的關係。對製造商或是設計者而言，也會關心電磁轉矩的變化。其中一個原因是可以透過不同轉子導體的設計，使電動機呈現出不同的特性。

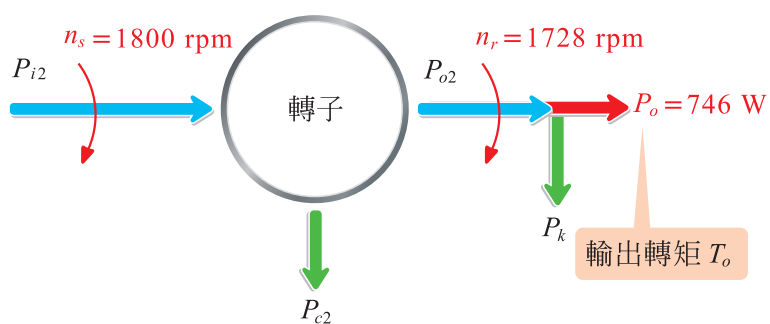
範例

09

一部 220 V、60 Hz、1 hp、4 極的三相感應電動機，已知額定運轉時轉差率為 4 %，則其額定輸出轉矩約為多少牛頓 - 米？

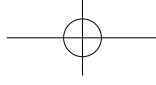
解 $n_s = \frac{120 \times 60}{4} = 1800 \text{ rpm}$ ， $n_r = (1 - S)n_s = (1 - 0.04) \times 1800 = 1728 \text{ rpm}$

$P_o = 1 \text{ hp} = 746 \text{ W}$ ，本題功率轉速與轉矩的關係如下圖所示：



$$\text{額定輸出轉矩 } T_o = \frac{60 P_o}{2 n_r} = \frac{60 \times 746}{2 \times 3.14 \times 1728} \div 4.12 \text{ N-m}$$





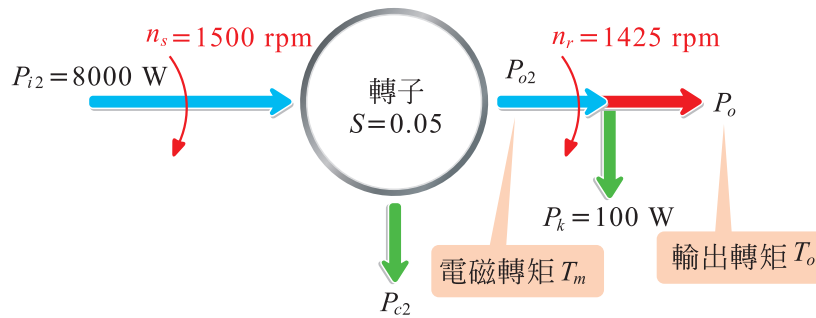
範例

10

有一部三相、4 極、50 Hz 的感應電動機，以 1425 rpm 旋轉，倘若轉子輸入功率為 8 kW，機械損為 100 W，則此電動機額定運轉時的 (1) 電磁轉矩、(2) 輸出轉矩分別為多少牛頓 - 米？

解 (1) $n_s = \frac{120 \times 50}{4} = 1500 \text{ rpm}$, $S = \frac{1500 - 1425}{1500} = 0.05$

將已知數據代入後，可得本題功率轉速與轉矩的關係如下圖所示



由於 $P_{i2} : P_{c2} : P_{o2}$
 $= 1 : S : 1 - S$ 公式

$\Rightarrow$ $8000 : P_{c2} : P_{o2}$
 $= 1 : 0.05 : 0.95$ 代入已知數據

轉子銅損 $P_{c2} = P_{i2} \times S = 8000 \times 0.05 = 400 \text{ W}$

轉子輸出功率 $P_{o2} = P_{i2} - P_{c2} = 8000 - 400 = 7600 \text{ W}$

電磁轉矩 $T_m = \frac{60 P_{o2}}{2\pi n_r} = \frac{60 \times 7600}{2 \times 3.14 \times 1425} \doteq 50.96 \text{ N-m}$

或是 $T_m = \frac{60 P_{i2}}{2\pi n_s} = \frac{60 \times 8000}{2 \times 3.14 \times 1500} \doteq 50.96 \text{ N-m}$

(2) 輸出功率 $P_o = P_{o2} - P_k = 7600 - 100 = 7500 \text{ W}$

輸出轉矩 $T_o = \frac{60 P_o}{2\pi n_r} = \frac{60 \times 7500}{2 \times 3.14 \times 1425} \doteq 50.28 \text{ N-m}$

隨堂練習

- () 1. 實習工場中有一台三相感應電動機，銘牌上標示 220 V，60 Hz，2 hp，4 P，1728 rpm，當這台電動機滿載運轉時，可以產生的轉矩大約多少？
(A)0.84 (B)4.12 (C)8.24 (D)80.75 kg-m。
- () 2. 有一台 6 極、60 Hz 三相感應電動機，當轉差率為 4 % 時，轉子銅損為 80 W，則此時電動機的電磁轉矩為多少？
(A)15.9 N-m (B)18.7 N-m (C)21.4 N-m (D)22.6 N-m。

二、轉矩與等效電路的關係

爲了分析感應電動機的轉矩特性，可將圖 3-7 的等效電路簡化成圖 3-10，若忽略激磁電流 I_o ，則每相定子輸入電流 (I_1) 等於轉子電流 (I_2')，即

$$I_1 = I_2' = \frac{V_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{S}\right)^2 + (X_1 + X_2')^2}} \quad (3-23)$$

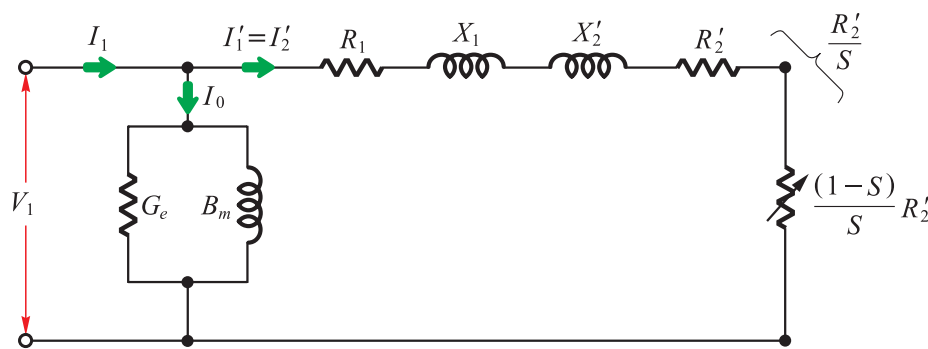
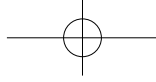


圖 3-10 感應電動機每相近似等效電路

由公式 3-16 可得轉子每相輸入功率 $P_{12} = I_2'^2 \frac{R_2'}{S}$ ，將公式 3-23 的電流代入後，再乘以 3 倍，可得三相感應電動機轉子輸入功率：



$$P_{i2} = 3 \times \frac{V_1^2}{\left(R_1 + \frac{R_2'}{S}\right)^2 + (X_1 + X_2')^2} \times \frac{R_2'}{S} \quad (3-24)$$

再將公式 3-24 代入公式 3-22，可得三相感應電動機電磁轉矩：

$$T_m = \frac{P_{i2}}{\omega_s} = \frac{3}{\omega_s} \times \frac{V_1^2 \times \frac{R_2'}{S}}{\left(R_1 + \frac{R_2'}{S}\right)^2 + (X_1 + X_2')^2} \quad (3-25)$$

由於電動機的運轉是個動態過程，針對不同狀態下的轉矩分析如下：

(一) 起動轉矩

感應電動機起動瞬間，轉子轉速為零，將轉差率 $S = 1$ 代入公式 3-25，可得起動轉矩：

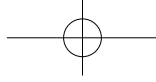
$$T_{\text{start}} = \frac{3}{\omega_s} \times \frac{V_1^2 \times R_2'}{(R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_2')^2} \quad (3-26)$$

T_{start} ：起動轉矩 (N·m)。

公式 3-26 中**感應電動機起動轉矩與電源電壓平方 (V_1^2) 成正比，與轉子電阻 (R_2') 成正比**；適當增加轉子電阻值 (轉子導體改用鋁棒取代銅棒)，可增加起動轉矩。

(二) 運轉轉矩

正常運轉時，轉差率約在 1 % ~ 5 % 之間，由於轉差率極低，因此公式 3-25 裡面的分母 $\frac{R_2'}{S} \gg R_1$ ，而且 $\frac{R_2'}{S} \gg (X_1 + X_2')$ ，因此感應電動機正常運轉時的轉矩可以簡化為：



$$T_{\text{run}} \doteq \frac{3}{\omega_s} \times \frac{V_1^2 \times \frac{R'_2}{S}}{\left(\frac{R'_2}{S}\right)^2} \doteq \frac{3}{\omega_s} \times \frac{V_1^2 \times S}{R'_2} \quad (3-27)$$

T_{run} ：運轉轉矩 (N·m)。

公式 3-27 中，感應電動機運轉時轉矩與電源電壓平方 (V_1^2) 成正比外，與轉子電阻 (R'_2) 成反比，與轉差率 S 成正比。因此，當電動機軸端機械負載增加時，轉子轉速減慢，使得轉差率增加，此時電動機產生較大的轉矩因應負載所需。但是若負載持續增加，超過電動機所能產生的最大轉矩時，電動機會迅速減速直至停轉，最大轉矩也稱為崩潰轉矩、停頓轉矩或脫出轉矩。

(三) 最大轉矩

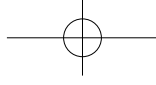
依據公式 3-22 已知電動機的電磁轉矩 $T_m = \frac{P_{i2}}{\omega_s}$ ，即轉矩與轉子輸入功率成正比。由圖 3-10 感應電動機近似等效電路圖中，依據最大功率轉移定理可知，若轉子等效電阻 $\frac{R'_2}{S}$ 等於電動機內部等效阻抗時，即 $\frac{R'_2}{S} = \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2}$ 時，轉子等效電阻可得到最大功率因而產生最大轉矩。換言之，感應電動機最大轉矩發生時的轉差率為：

$$S_{T_{\text{max}}} = \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2}} \doteq \frac{R'_2}{X'_2} \quad (3-28)$$

將公式 3-28 代入公式 3-25 中，可得到感應電動機最大轉矩為：

$$T_{\text{max}} = \frac{3}{\omega_s} \times \frac{0.5V_1^2}{R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2}} \quad (3-29)$$

T_{max} ：最大轉矩 (N·m)。



由公式 3-29 可得，感應電動機最大轉矩具有下列特點：

1. 最大轉矩與電源電壓 (V_1^2) 平方成正比。
2. 最大轉矩與定子電阻 (R_1)、定子電抗 (X_1) 及轉子電抗 (X_2) 成反比，但與轉子電阻 (R_2') 無關。
3. 最大轉矩發生時的轉差率 $S_{T_{\max}} \div \frac{R_2'}{X_2'}$ ，當轉子電阻 R_2' 增加， $S_{T_{\max}}$ 變大，也就是電動機會在比較低的速度下產生最大轉矩。

綜合上述，可將感應電動機的轉矩與轉差率之特性以圖 3-11 表示：

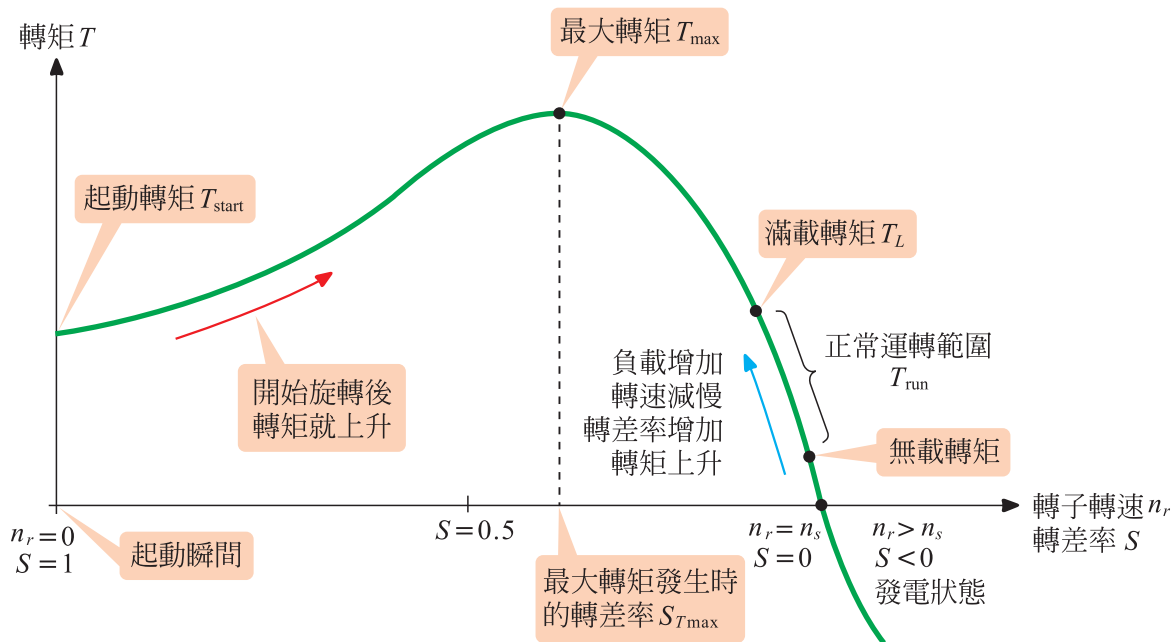
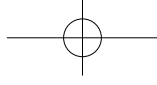


圖 3-11 感應電動機的轉矩與轉差率特性曲線

1. 起動瞬間轉子轉速為 0，轉差率為 1，只要軸端的機械負載低於起動轉矩 (T_{start})，電動機就會開始旋轉。
2. 隨著轉速上升 (轉差率變小) 後，轉矩也加大，當轉矩超過最大轉矩 (T_{max}) 後，轉矩將會急速下滑，直到機械負載與電動機轉矩取得平衡，電動機才以穩定的轉速持續旋轉。



3. 電動機在正常運轉範圍下，倘若軸端的機械負載突然增加（例如：手扶梯的乘客變多），電動機轉速會略微下降，轉差率上升，電動機產生較大的轉矩，以因應負載所需。
4. 倘若負載持續增加，超過電動機所能產生的最大轉矩時，電動機會迅速減速直至停轉，此時必須將電源切斷，以免電動機電流太大而燒毀。
5. 倘若電動機因外力等因素導致轉子轉速大於同步轉速時，轉差率 S 為負值，轉矩 T 為負值，此時電動機產生發電現象，可提供電能給電源，電動車下坡時的電力回收及早期風力發電機，就是使用在這個狀態。

一般鼠籠式轉子，靜止時之轉子電抗 (X'_2) 約為轉子電阻 (R'_2) 之 4 倍～5 倍，因此最大轉矩發生時的轉差率 ($S_{T_{\max}}$) 約在 0.2 ～ 0.25 間。而感應電動機所能產生的最大轉矩 ($T_{\max}$) 約為滿載轉矩 (T_L) 的 225 % ～ 300 %。

範例

11

有一部三相 4 極 220 V、60 Hz 感應電動機，靜止時轉子每相電阻為 0.2Ω ，電抗為 0.6Ω ，則該機產生最大轉矩時之 (1) 轉差率、(2) 轉速分別為多少？

解
$$n_s = \frac{120f}{P} = \frac{120 \times 60}{4} = 1800 \text{ rpm}$$

$$\text{最大轉矩發生時之轉差率 } S_{T_{\max}} \div \frac{R'_2}{X'_2} = \frac{0.2}{0.6} = \frac{1}{3}$$

$$\text{轉子轉速 } n_r = (1 - S)n_s = \left(1 - \frac{1}{3}\right) \times 1800 = 1200 \text{ rpm}$$

範例

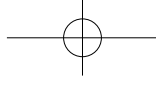
12

同範例 11，倘若此機滿載時測得轉速為 1700 rpm，則半載轉速約為多少？

解
$$\text{滿載時轉差率 } S = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{1800 - 1700}{1800} = \frac{1}{18}$$

感應電動機正常運轉時，轉矩與轉差率 S 成正比，當負載減半，轉差率也

$$\text{減半為 } \frac{1}{36}, \text{ 半載時轉子轉速 } n_r = (1 - S)n_s = \left(1 - \frac{1}{36}\right) \times 1800 = 1750 \text{ rpm}。$$



隨堂練習

- () 1. 使用三相感應電動機帶動貨品輸送帶，當輸送帶上的貨品重量發生變化時，下列有關感應電動機的轉差率變化，何者正確？
- (A) 貨品重量增加，轉差率變大 (B) 貨品重量增加，轉差率變小
(C) 貨品重量減少，轉差率變大 (D) 貨品重量的變化不會影響轉差率。
- () 2. 關於感應電動機的最大轉矩，下列敘述何者正確？
- (A) 最大轉矩與電源電壓成正比 (B) 最大轉矩與同步角速度成正比
(C) 最大轉矩與轉子電阻值無關 (D) 最大轉矩與定子電阻值成正比。

三、轉矩的比例推移

由公式 3-27 已知感應電動機的運轉轉矩 $T_{\text{run}} \propto \frac{3}{\omega_s} \times \frac{V_1^2 \times S}{R'_2}$ ，在電壓與頻率固定下，只要 $\frac{S}{R'_2}$ 值不變，轉矩也不變。圖 3-12 為一部採用繞線式轉子的感應電動機，倘若轉子繞組原有電阻值為 R'_2 ，透過滑環與電刷與外部的電阻器 R 連接後，整個轉子合成後的電阻變成 $R'_2 + R$ 。

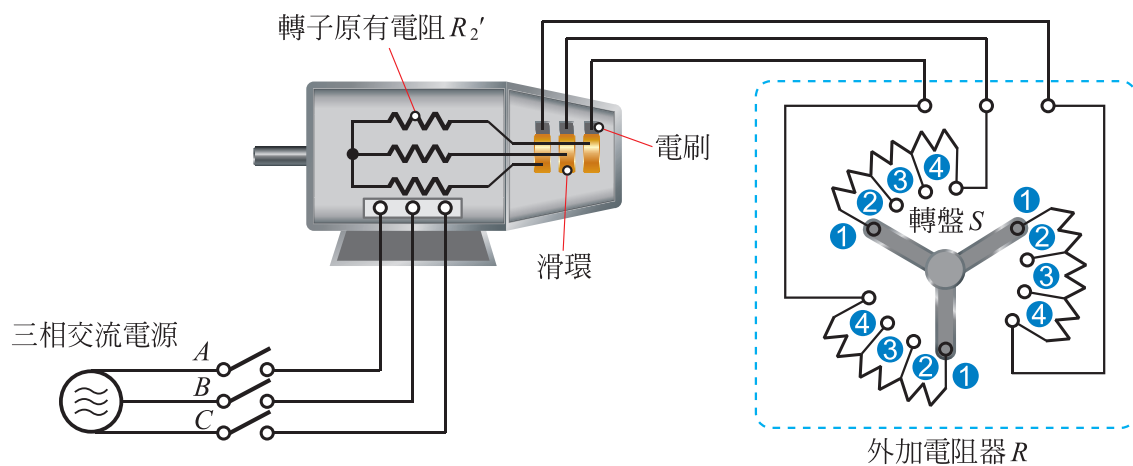
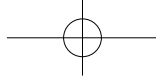


圖 3-12 繞線式感應電動機與外加電阻之接線圖

負載固定下所需的轉矩 $\left(T_{\text{run}} \propto \frac{S}{R'_2} \right)$ 不變，透過轉子外加電阻使得轉子電阻變為原來的 m 倍時，轉差率 S' 也會變成原來的 m 倍，因此：



$$\frac{R'_2}{S} = \frac{R'_2 + R}{S'} \quad (3-30)$$

R'_2 : 轉子原有電阻值 (Ω)

R : 轉子外加電阻 (Ω)

S : 原本的轉差率

S' : 改變後的轉差率

將圖 3-12 中外加電阻器轉盤 S 切換至 ④ 時，由於外加電阻 $R = 0$ ，電動機在原有電阻 R'_2 下運轉，轉矩特性曲線如圖 3-13 中的 T_1 所示，此時的轉差率為 S_1 。

負載不變下，將轉子外加電阻 R 增加 (轉盤 $S \rightarrow$ ③)，依據公式 3-30 可得轉差率會變大，特性曲線如圖 3-13 中的 T_2 所示，轉差率由 S_1 變大到 S_2 。轉子轉速也隨之降低。這種轉矩 - 轉差率特性曲線隨轉子電阻值之變化而移動的現象，稱為比例推移。需要特別注意的是，在調整轉子外加電阻時，感應電動機的最大轉矩 ($T_{\max}$) 因為與轉子電阻無關會維持不變，但是最大轉矩發生時的轉差率 ($S_{T_{\max}}$) 則會隨之增加，亦即轉子外加電阻值愈大，在轉速愈低的時候就會產生最大轉矩。

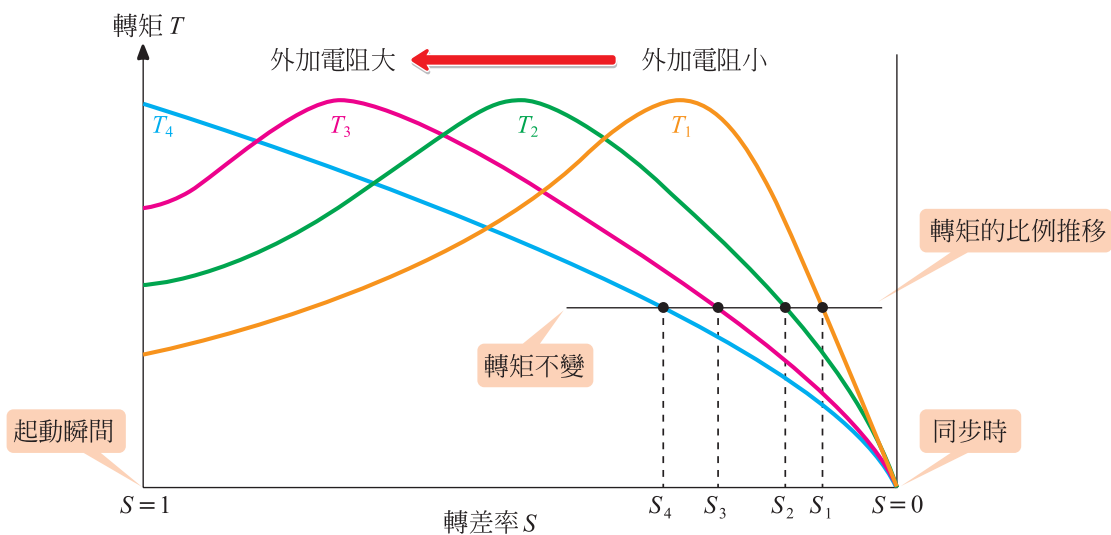
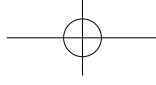


圖 3-13 繞線式感應電動機轉矩與轉差率曲線之比例推移



範例

13

三相 4 極，60 Hz 繞線式感應電動機，已知轉子等效電阻 $R'_2 = 0.5 \Omega$ ，滿載轉速 1650 rpm，在轉矩不變情況下，要將轉速下降為 1500 rpm，則外加電阻應為多少？

解 同步轉速 $n_s = \frac{120 \times 60}{4} = 1800 \text{ rpm}$

$$\text{轉速 } 1650 \text{ rpm 的轉差率 } S = \frac{1800 - 1650}{1800} = \frac{1}{12}$$

$$\text{轉速 } 1500 \text{ rpm 的轉差率 } S' = \frac{1800 - 1500}{1800} = \frac{1}{6}$$

$$\frac{R'_2}{S} = \frac{R'_2 + R}{S'} \Rightarrow \frac{0.5}{\frac{1}{12}} = \frac{0.5 + R}{\frac{1}{6}}, \text{ 可得外加電阻 } R = 0.5 \Omega$$

範例

14

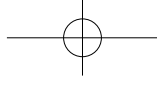
有一部三相、10 極、50 Hz、220 V 繞線式感應電動機，當轉子轉速為 450 rpm 時產生最大轉矩，已知轉子電阻 $R'_2 = 0.4 \Omega$ ，欲使此機以最大轉矩起動，則應外加電阻為多少？

解 同步轉速 $n_s = \frac{120 \times 50}{10} = 600 \text{ rpm}$

$$\text{原本最大轉矩發生時轉差率 } S = \frac{600 - 450}{600} = \frac{1}{4}$$

欲在起動時 ($S' = 1$) 產生最大轉矩，則

$$\frac{R'_2}{S} = \frac{R'_2 + R}{S'} \Rightarrow \frac{0.4}{\frac{1}{4}} = \frac{0.4 + R}{1}, \text{ 可得外加電阻 } R = 1.2 \Omega$$



隨堂練習

- () 1. 有一部升降機採用三相繞線式感應電動機作為動力來源，並且利用轉子外加電阻來控制轉速。正常運轉中若是將外加電阻值增加，則升降機的轉速變化為何？
(A) 轉速降低 (B) 轉速升高 (C) 轉速不變 (D) 停止不動。
- () 2. 同上題，這台電動機使用手冊上註明，在未使用外加電阻下，最大轉矩發生於轉差率 25 % 時，最大轉矩值為滿載轉矩的 300 %。倘若操作者透過外加電阻使轉子電阻值變成原本的兩倍，則最大轉矩會變成滿載轉矩的比例為何？
(A) 600 % (B) 300 % (C) 50 % (D) 25 %。
- () 3. 同上題，最大轉矩發生時的轉差率，何者正確？
(A) 600 % (B) 300 % (C) 50 % (D) 25 %。

3-4 鼠籠式感應電動機的運轉特性

鼠籠式轉子雖然無法透過轉子外加電阻來控制轉速，但是其構造簡單、耐用，加上近年來變頻設備日益普遍，因此採用鼠籠式轉子的感應電動機可說是目前最普遍的動力來源之一，其重要運轉特性包含：

一、轉速與轉矩特性

圖 3-14 為使用三相鼠籠式感應電動機帶動手扶梯，**無載時 (電動機轉軸未與手扶梯連接)**，此時轉子轉速 n_r 非常接近同步轉速，使得轉差率 S 很低，電動機向電源取用的電流 I 較低，產生的轉矩 T 很小，因此輸出的機械功率 P_o 也很低。

當電動機負載增加 (轉軸與手扶梯連接、乘客變多)，轉子轉速 n_r 開始降低、轉差率 S 上升，轉子電壓上升、轉子電流增加，因此電動機向電源取用的電流 I 上升，而軸端產生的轉矩 T 也增加以應付負載所需，輸出功率 P_o 也隨之增加。負載增加過程中的特性變化情形如圖 3-14 所示。

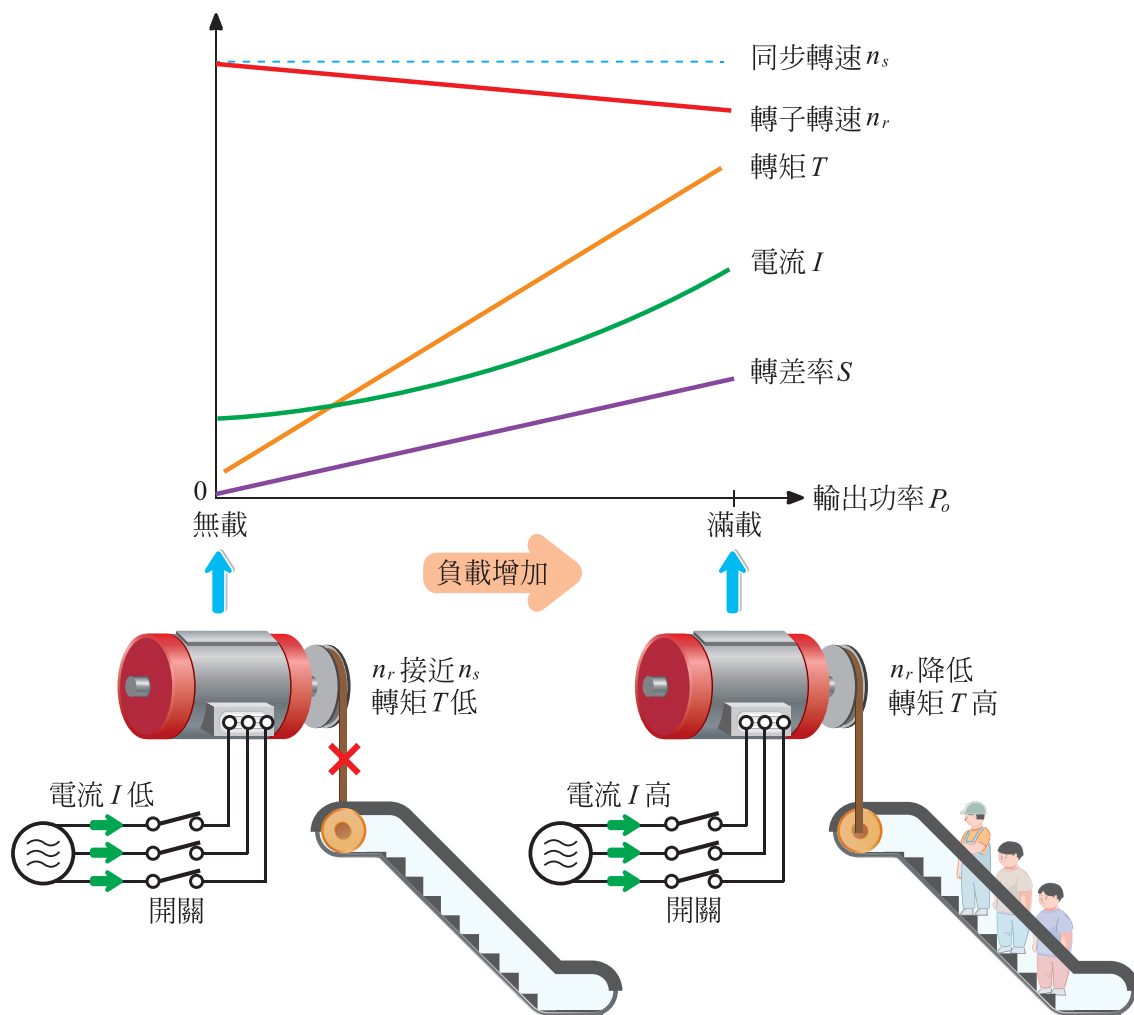
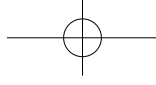
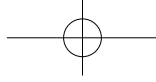


圖 3-14 感應電動機運轉特性曲線圖

二、功率因數特性

感應電動機由於定子與轉子間有空氣隙存在，造成磁阻頗高，因此無載時的電流很大，約為滿載電流的 40 % ~ 50 % 左右。而無載電流中的絕大部分為激磁電流，其中激磁電流 I_0 中的磁化電流 I_m 落後電壓 90° ，使得**電動機無載時的功率因數很低**。



當感應電動機軸端機械負載增加，轉子電流開始上升，而激磁電流幾乎維持不變，此時功率因數隨之提高，在**滿載附近時感應電動機的功率因數最高**，大約可達到 80 % 以上。

三、效率特性

感應電動機的效率是指轉軸的輸出機械功率 P_o 與輸入電功率 P_{in} 之比值，即：

$$\eta = \frac{P_o}{P_{in}} \times 100 \% \quad (3-31)$$

要了解感應電動機的效率，可以進行如圖 3-15 的負載特性實驗，其中電力分析儀可以直接觀測輸入的電壓、電流、電功率及功率因數等數據，也可以透過公式 $P_{in} = \sqrt{3}V_L I_L \cos\theta$ 得到電動機輸入功率。

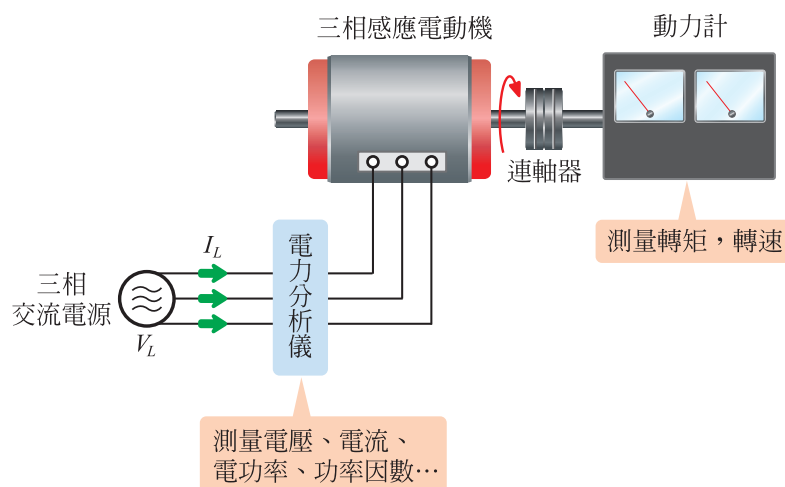
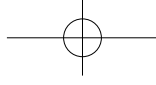


圖 3-15 感應電動機負載特性實際接線圖

電動機常以動力計來模擬機械負載，動力計內的儀表指示電動機的輸出轉矩 T_o 及轉子轉速 n_r ，再依據公式 3-20 計算電動機的輸出功率：



$$P_o = \frac{2\pi \times n_r \times T_o}{60} \quad (3-32)$$

除了利用公式 3-31 計算效率以外，實際運用時也常提及視在效率，也就是將電動機的輸出功率 P_o 除以輸入的視在功率 S_{in} ；即：

$$\eta_a = \frac{P_o}{S_{in}} = \frac{P_o}{\sqrt{3}V_L \times I_L} = \eta \times \cos \theta \quad (3-33)$$

視在效率 (η_a) 主要用來決定感應電動機所需的電源容量，假設某台感應電動機的視在效率為 0.75，則每馬力所需之電源容量為 $\frac{746 \text{ W}}{0.75} \div 1 \text{ kVA}$ ，即 $x(\text{hp})$ 的電動機至少就需要 $x(\text{kVA})$ 容量的變壓器或是發電機供電。

感應電動機的損失包括固定損失 (主要是鐵損)、變動損失 (主要是銅損)、機械摩擦損失和雜散損失等。**無載時由於輸出功率 P_o 幾乎為 0，但還是有固定損失存在，因此效率為零。**

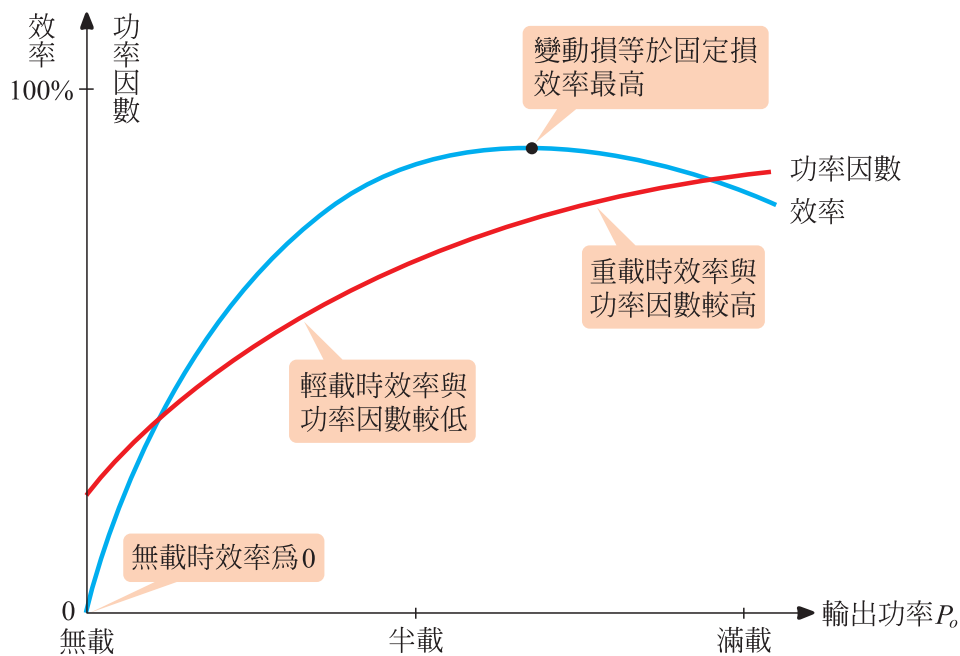
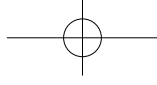


圖 3-16 感應電動機運轉特性曲線圖



由圖 3-16 可以看出，隨著負載增加，輸出功率增加，雖然變動損失會增加，但是相對而言幅度較小，因此效率會上升；**當負載增加到變動損失等於固定損失時效率最高**，一般而言大多在 80 % 左右；倘若負載再增加，由於變動損失持續變大，效率反而降低。故必須**依據負載大小，選擇適當容量的感應電動機，並使其盡量在接近滿載狀態下運轉，避免讓電動機在無載或是輕載下運轉，效率差，功率因數也低。**

範例

15

有一部 4 極、220 V、60 Hz 的三相感應電動機利用磁粉式動力計作負載試驗，在額定電壓時，倘若電流表指示為 13 A，三相瓦特表指示為 4250 W，轉速表指示為 1740 rpm，轉矩表指示為 20 N-m，試問此機之 (1) 轉差率、(2) 功率因數、(3) 輸出功率、(4) 效率、(5) 視在效率分別為多少？

解 (1) 同步轉速 $n_s = \frac{120 \times 60}{4} = 1800 \text{ rpm}$ ，轉差率 $S = \frac{1800 - 1740}{1800} = 0.033$

(2) 輸入功率 $P_{in} = \sqrt{3} V_L I_L \cos \theta$ ， $\cos \theta = \frac{P_{in}}{\sqrt{3} V_L I_L} = \frac{4250}{\sqrt{3} \times 220 \times 13} = 0.858$

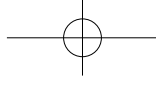
(3) 輸出功率 $P_o = \frac{2\pi \times n_r \times T_o}{60} = \frac{2\pi \times 1740 \times 20}{60} \div 3642 \text{ W}$

(4) 效率 $\eta = \frac{P_o}{P_{in}} \times 100\% = \frac{3642}{4250} \times 100\% \div 85.7\%$

(5) 視在效率 $\eta_a = \eta \times \cos \theta \div 73.5\%$

隨堂練習

- () 1. 正常運轉中的三相感應電動機，當軸端負載增加時，下列何者正確？
(A) 轉矩減小 (B) 電流減少 (C) 轉差率增大 (D) 轉速增加。
- () 2. 有一台三相 200 V，10 hp 感應電動機，銘牌上標示滿載效率 74.6 %，功率因數為 0.8，則滿載時的線電流大約為何？ (A) 28.8 A (B) 36.1 A (C) 46.6 A (D) 62.5 A。



3-5 各種感應電動機之特性及用途

三相感應電動機依據轉子構造分成繞線式與鼠籠式兩大類，其特性與用途分別如下所述。

一、繞線式轉子

1. 構造：如圖 3-17 轉子表面開有線槽並繞有三相線圈，透過滑環與電刷和外部電阻器連接。
2. 特性：起動時可以於轉子電路串聯外加電阻，藉以減少起動電流，增加起動轉矩，得到最完美的起動特性。隨著轉速增加，逐漸降低轉子外加電阻值可以降低轉子損失，提升效率與功率因數。在正常運轉中也可以透過調整轉子外加電阻，在轉矩不變的狀態下，控制轉子轉速。
3. 優點：起動電流小，起動轉矩大，轉速控制容易。
4. 缺點：構造複雜，成本昂貴。
5. 用途：早期用於需要大起動轉矩及可變轉速之處。如起重機、升降機、電車等。但因構造複雜且昂貴，目前已很少使用。

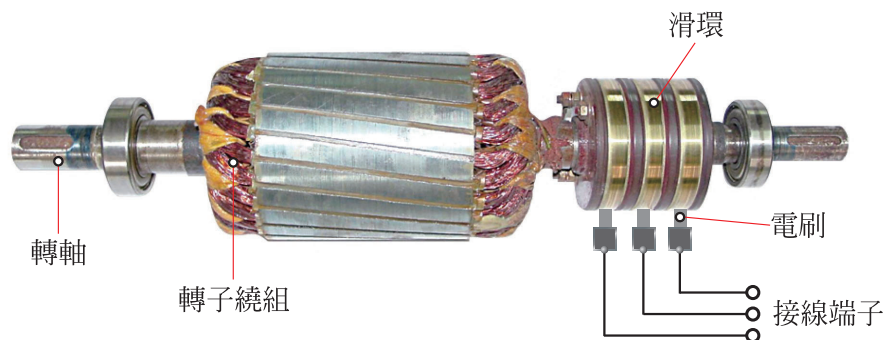
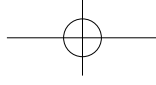


圖 3-17 繞線式轉子外觀圖
(圖片來源：開富公司)



二、鼠籠式轉子

鼠籠式轉子電阻無法像繞線式轉子透過外加電阻進行調整，因此爲了符合負載需要，轉子導體會有不同的設計與配置方式，其分類情形如圖 3-18 所示。

(一) 普通鼠籠式 (squirrel-cage)

1. 構造：轉子導體如圖 3-18(a)，用截面積較大的金屬導體，置於轉子表面的淺型線槽中，因此導體具有低電阻 (R_2 較小) 與低漏磁電抗 (X_2 較小) 的特性。
2. 特性：起動轉矩較小、起動電流較大，無法使用於重載之起動；運轉時轉差率小，轉速穩定，有很好的運轉特性。但是在輕載時，功率因數很低，效率也不高。
3. 優點：構造簡單、堅固耐用、價廉、使用保養容易，具恆速特性。
4. 缺點：起動電流大、起動轉矩小，調速不易，轉速會隨負載改變稍微變動。
5. 用途：離心泵、風扇、鼓風機、輸送帶、印刷機、木工機械、工作母機等需要恆速、小起動轉矩之處。

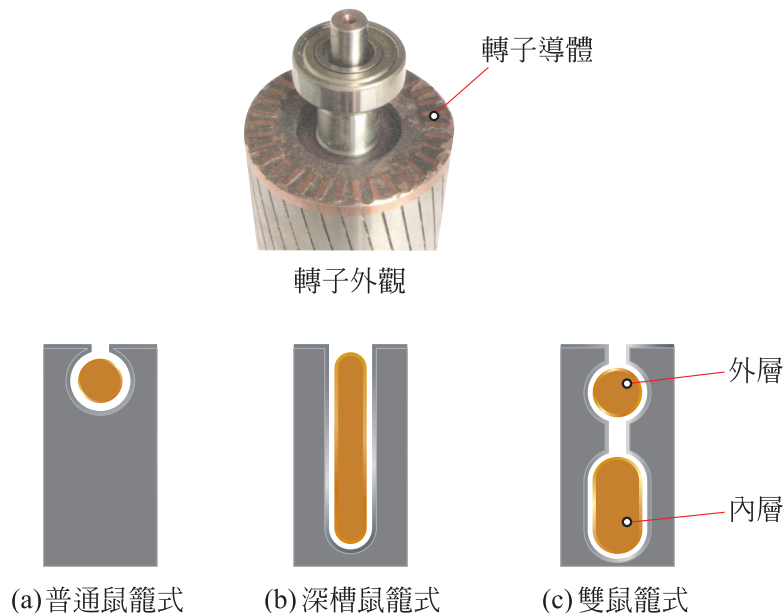
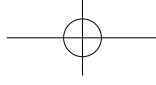


圖 3-18 鼠籠式轉子導體比較圖



(二) 深槽鼠籠式 (deep-slot squirrel-cage)

1. 構造：又稱為 1 號特種鼠籠式 (K_1)。如圖 3-18(b)，使用截面積較大的金屬導體，置於轉子表面的窄深型線槽，由於線槽底部漏磁通較大，因此內層導體的電抗值大於外層導體。
2. 原理：由圖 3-19(a) 可知，起動時，由於內層導體的電抗值大，電流集中在外層導體，由於通道狹窄，效果如同高轉子電阻，因此起動電流較小、起動轉矩較大。由圖 3-19(b) 可知，隨著轉速上升，電抗值降低，電流均勻通過轉子導體，效果如同低轉子電阻，可減少損失，提升運轉效率。
3. 特性與應用：深槽鼠籠式轉子的起動轉矩較普通鼠籠式稍高，起動電流較普通鼠籠式稍低，一般用在送風機、紡織機、空壓機、工作母機等。

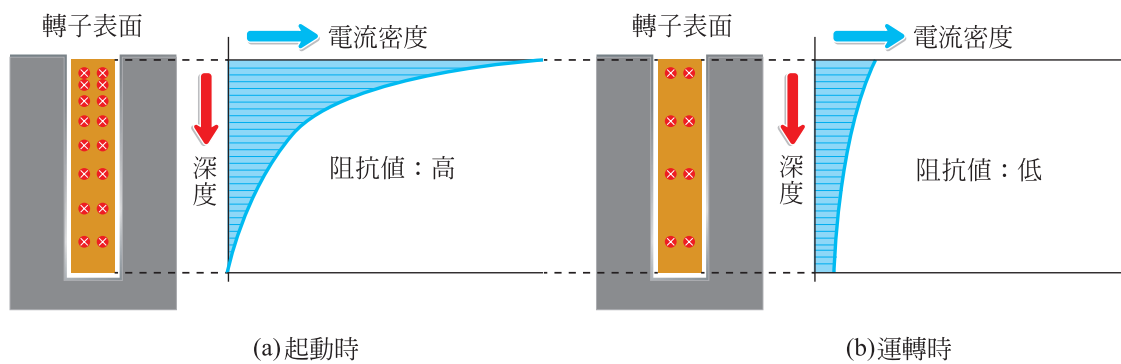
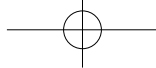


圖 3-19 深槽鼠籠式導體電流密度分佈圖

(三) 雙鼠籠式轉子 (boucherot squirrel-cage)

1. 構造：又稱為 2 號特種鼠籠式 (K_2)。由圖 3-18(c) 可以看出，轉子之鐵心具有內、外兩層線槽，裝有兩組鼠籠式繞組，其中：
 - (1) 外層導體 (top bar)：截面積小，使用高電阻的材料製成，且外層靠近空氣隙，磁阻大，使得漏磁通較少，因此電感抗小。
 - (2) 內層導體 (bottom bar)：截面積較大，使用低電阻的材料製成，且鐵心內部漏磁通較多，因此電感抗大。



2. 原理：由圖 3-20(a) 可知，起動時，由於內層導體的電抗值大，電流大部分經由低電感、高電阻的外層導體通過，可以降低起動電流、增加起動轉矩。隨著轉速上升，電抗值降低，此時大部分的電流如圖 3-20(b) 所示，改由低電阻的內層導體通過，可以減少損失，得到良好的運轉特性。

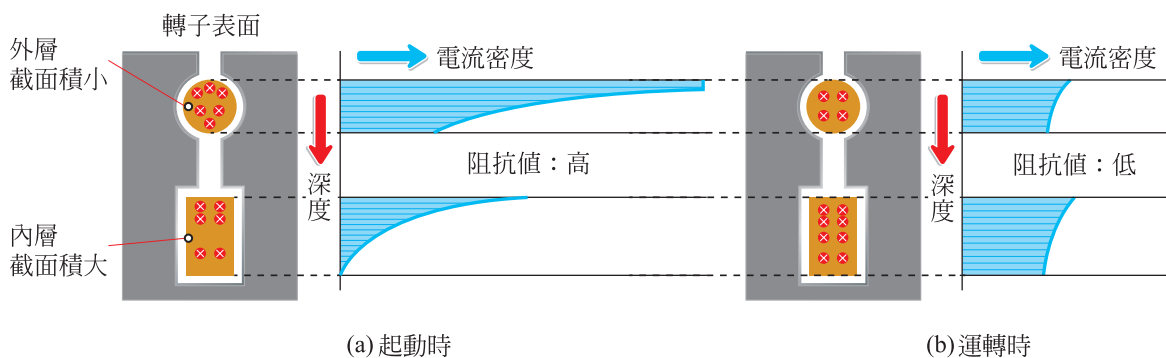


圖 3-20 雙鼠籠式轉子導體電流密度分佈圖

3. 特性與應用：雙鼠籠式是三種鼠籠式轉子中起動轉矩最大者，其起動電流也較低，因此具備良好的起動性能，但是最大轉矩稍低，構造也較為複雜。一般用在捲揚機、輸送帶、空壓機、工作母機等。

隨堂練習

- () 1. 三相繞線式感應電動機起動時，在轉子繞組中串加額外的電阻，目的為何？
- (A) 提高起動電流及降低起動轉矩
 - (B) 提高起動電流及降低起動輸入功率
 - (C) 提高起動轉矩及提高起動電流
 - (D) 提高起動轉矩及降低起動電流。
- () 2. 下列有關三相雙鼠籠式感應電動機轉子的敘述，何者正確？
- (A) 起動時，轉子電流大部分流過高電阻低電感的上層繞組
 - (B) 起動時，轉子電流大部分流過低電阻高電感的下層繞組
 - (C) 運轉時，轉子電流大部分流過高電阻低電感的下層繞組
 - (D) 運轉時，轉子電流大部分流過低電阻高電感的上層繞組。

一、選擇題

3-1 () 1. 一部三相 4 極，50 Hz 感應電動機，於額定電流與頻率下，若轉子感應電勢之頻率為 1.8 Hz，則此電動機之轉差速率為多少？

(A) 36 rpm (B) 54 rpm (C) 64 rpm (D) 72 rpm。

() 2. 關於三相感應電動機的敘述，下列何者正確？

(A) 轉速愈快，轉子電阻愈大 (B) 轉速愈慢，轉子頻率愈小
(C) 轉速愈快，轉子電壓愈小 (D) 轉速愈慢，轉子電流愈小。

3-2 () 3. 設三相感應電動機之轉子電阻 R_2 變換到一次側之等效電阻為 R'_2 ，則該機在轉差率為 S 時，其等效機械負載可表示為

(A) SR'_2 (B) $\frac{R'_2}{S}$ (C) $\left(\frac{S}{1-S}\right)R'_2$ (D) $\left(\frac{1-S}{S}\right)R'_2$ 。

() 4. 設感應電動機之轉子輸入功率為 P_{i2} ，轉子輸出功率為 P_{o2} ，轉子銅損為 P_{c2} ，則 $P_{i2} : P_{o2} : P_{c2}$ 為

(A) $1 : S : 1-S$ (B) $1 : 1-S : S$ (C) $S : 1 : 1-S$ (D) $1-S : 1 : S$ 。

() 5. 有一部三相 4 極、220 VAC、50 Hz、10 hp 的感應電動機，其滿載之轉子銅損為 310 W，請問此感應電動機之滿載轉速為何？

(A) 1728 rpm (B) 1680 rpm (C) 1440 rpm (D) 1152 rpm。

() 6. 一部 4 極、220 V、60 Hz 的三相感應電動機，滿載時轉子頻率為 2.4 Hz，則氣隙功率與輸出功率的比值為何？

(A) 0.96 (B) 1.04 (C) 1.12 (D) 1.20。

3-3 () 7. 有一部三相感應電動機，其標示為 20 P、4 hp、220 VAC、50 Hz，滿載時轉差率 $S = 0.02$ 。請問其額定輸出轉矩為多少？

(A) 31 N-m (B) 97 N-m (C) 252 N-m (D) 284 N-m。

() 8. 一部 6 極、200 V、50 Hz 的三相感應電動機，滿載時轉差率為 0.04、轉矩為 35 N-m，電動機滿載時輸出功率約為多少？

(A) 3.5 kW (B) 4.2 kW (C) 7.0 kW (D) 8.4 kW。

自我評量

() 9. 關於感應電動機的最大轉矩，下列敘述何者錯誤？

- (A) 最大轉矩與電源電壓成正比
- (B) 最大轉矩與同步角速度成反比
- (C) 最大轉矩與轉子電阻值無關
- (D) 最大轉矩與定子電阻值成反比。

() 10. 三相感應電動機若忽略激磁電抗及鐵損的影響，其換算至定子側之每相近似等效電路，如圖 (1) 所示。圖中 R_1 及 R_2 分別為定子側及轉子側的等效電阻， X_1 及 X_2 分別為定子側及轉子側的等效漏電抗， S 為滑差率 (轉差率)， V_1 為相電壓。若此電動機在最大功率輸出時，則其滑差率 S 為何？

- (A) $S = \frac{R_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2)^2}}$
- (B) $S = \frac{R_2}{\sqrt{R_1^2 - (X_1 + X_2)^2}}$
- (C) $S = \frac{R_1}{\sqrt{R_2^2 + (X_1 + X_2)^2}}$
- (D) $S = \frac{R_1}{\sqrt{R_2^2 - (X_1 + X_2)^2}}$ 。

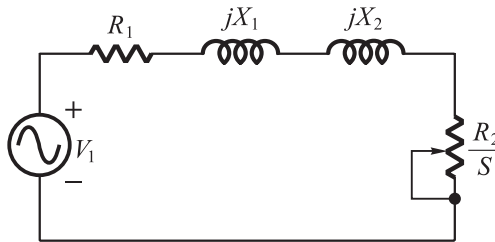


圖 (1)

() 11. 某三相 6 極 220 V、60 Hz 感應電動機，靜止時轉子每相電阻為 0.2Ω ，電抗為 0.8Ω ，則該機產生最大轉矩時之轉速為多少？

- (A) 1200 rpm (B) 1000 rpm (C) 900 rpm (D) 600 rpm。

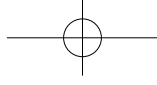
() 12. 有一台 6 極、繞線式三相感應電動機，滿載時轉差率為 5 %；今在轉子之每相電路上串接 2.5Ω 之電阻，轉差率變為 7.5 %。試求原本轉子每相電阻應為何？

- (A) 1Ω (B) 5Ω (C) 45Ω (D) 50Ω 。

- () 13.一部三相 4 極，60 Hz 繞線式轉子感應電動機，轉子每相電阻為 $0.5\ \Omega$ ，運轉於 1200 rpm 時產生最大轉矩，若此電動機要以最大轉矩起動，則轉子每相電路需外加多少電阻？
(A) $1\ \Omega$ (B) $2\ \Omega$ (C) $3\ \Omega$ (D) $4\ \Omega$ 。
- () 14.60 Hz，8 極繞線轉子感應電動機，起動時轉子外加轉子每相電阻 4 倍之電阻而起動，其起動轉矩等於停頓轉矩 (最大轉矩)，如未外加電阻，則此電動機發生停頓轉矩之轉速為何？
(A) 600 rpm (B) 660 rpm (C) 720 rpm (D) 900 rpm。
- () 15.有一部三相繞線式感應電動機，轉子使用外加電阻控制轉速。當外加電阻變大時，最大轉矩的變化為何？
(A) 降低 (B) 升高 (C) 不變 (D) 降為 0。
- 3-4** () 16.三相、220 V、1 hp 感應電動機，功率因數 0.8，效率 0.8，額定電流約為 (A) 2.4 A (B) 3 A (C) 3.75 A (D) 5.3 A。
- () 17.感應電動機由輕載漸增為重負載，其效率之演變是
(A) 增高 (B) 降低 (C) 先增高而後降低 (D) 先降低而後增高。
- () 18.三相感應電動機使用動力計作負載實驗時，若電動機之電源保持在定電壓及定頻率下，當所加負載愈大時，其轉差率 S
(A) 增高 (B) 降低 (C) 先增高而後降低 (D) 先降低而後增高。
- 3-5** () 19.雙鼠籠式感應電動機的轉子繞組分為上、下兩層，其中
(A) 上層繞組電阻較小，電感較大
(B) 上層繞組電阻較大，電感較小
(C) 上、下層繞組電阻一樣大
(D) 上、下層繞組電感一樣大。
- () 20.繞線轉子感應電動機最大優點為
(A) 轉子電路可插入電阻，增加起動轉矩，減少起動電流
(B) 效率高，耐用
(C) 減少成本，節省銅線
(D) 散熱佳，堅固。

二、問答與計算題

1. 感應電動機之最大轉矩具有哪些特點？
2. 畫出感應電動機的轉矩與轉差率特性曲線，並簡單說明之。
3. 畫出感應電動機運轉特性曲線圖，並說明負載增加時 (1) 轉子轉速、(2) 轉差率、(3) 電流、(4) 轉矩 T 、(5) 輸出功率 P_o 、(6) 效率、(7) 功率因數之變化情形分別為何？
4. 說明繞線式轉子的構造、特性與用途。
5. 說明各種鼠籠式轉子的構造、特性與用途。
6. 有一部三相 6 極，60 Hz 的感應電動機，滿載轉速 1150 rpm 時，已知轉子每相應電勢為 5 V，轉子電阻為 $5\ \Omega$ ，轉子電抗為 $0.5\ \Omega$ ，試求本機 (1) 滿載運轉時每相轉子繞組的電流、(2) 起動瞬間每相轉子繞組的電流分別為何？
7. 有一部三相感應電動機，其標示為 4 P、5 hp、200 VAC、60 Hz。若已知半載轉速為 1746 rpm，機械損失為 269 W，請問半載時 (1) 轉差率、(2) 輸出功率、(3) 轉子輸出功率、(4) 轉子輸入功率、(5) 轉子效率分別為何？
8. 有一台 6 極、220 V、60 Hz 三相感應電動機，滿載時轉差率為 5%，產生之轉矩為 30 N-m，機械損為 218.6 W。試求滿載時 (1) 轉子轉速、(2) 輸出功率、(3) 轉子輸出功率、(4) 轉子輸入功率、(5) 轉子效率分別為何？



CHAPTER 4

三相感應電動機之起動及速率控制

» 本章重點

三相感應電動機起動瞬間電流很大，常造成線路壓降干擾其他用電設備，因此會透過各種方式或設備來降低起動電流，並維持足夠的起動轉矩。當電動機正常運轉中，為了符合用戶需要，也會透過各種方式改變轉速或是轉向。本章將依序介紹感應電動機常用的起動、轉速及轉向等各種控制方法。

4-1 三相感應電動機之起動控制

一、起動控制考慮因素

感應電動機起動瞬間轉差率為 1，由圖 3-7 等效電路得知此時轉子繞組如同短路的變壓器，造成起動電流很大。由圖 4-1 可以看出，**起動瞬間的最大電流約為滿載（額定）電流的 5 倍～8 倍**，當轉速開始上升，電流就會迅速降低。

過大的起動電流除了造成電動機本身的衝擊外，所造成的瞬間線路壓降也可能干擾其他用電設備，例如

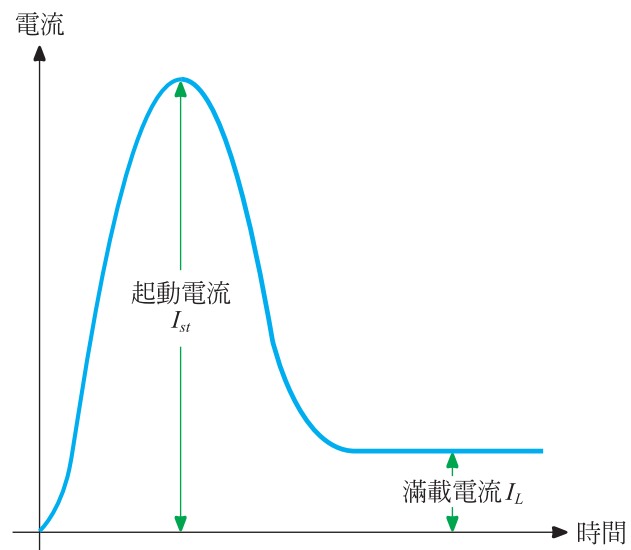
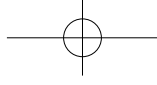


圖 4-1 起動電流的變化



冷氣主機起動瞬間，周遭的燈具會有短暫閃爍，因此中、大型感應電動機起動時，必須設法降低起動電流。依據屋內線路裝置規則 162 條規定：



三相感應電動機起動電流應不超過下列之限制，否則應使用降壓型操作器。

1. 220 V 供電，每台容量不超過 15 馬力者，不加限制。
 2. 380 V 供電，每台容量不超過 50 馬力者，不加限制。
- 每台容量超過上列之限制者，應不超過電動機額定電流之 3.5 倍。

對於電動機而言，最佳的起動特性為起動電流小、起動轉矩大。為達到此目的，三相感應電動機起動時，需要考慮的因素包括：

(一) 降低起動電流

由公式 3-23 已知電動機起動瞬間 ($S = 1$)，每相起動電流：

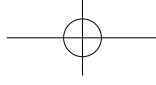
$$I_{1(\text{start})} = \frac{V_1}{\sqrt{(R_1 + R'_2)^2 + (X_1 + X'_2)^2}} \quad (4-1)$$

由公式 4-1 可知，起動電流與電源電壓 (V_1) 成正比，而與機械負載大小無關，也就是無論轉軸端是無載或是滿載，起動瞬間電流大小相同；差別在於滿載時所需的起動時間較長，大電流持續的時間較久。因此為了降低起動電流，可以考慮的方式包括降低電源電壓或是增加定子電阻、定子電抗、轉子電阻或轉子電抗等。

(二) 增加起動轉矩

依據公式 3-26 已知感應電動機起動轉矩為：

$$T_{\text{start}} = \frac{3}{\omega_s} \times \frac{V_1^2 \times R'_2}{(R_1 + R'_2)^2 + (X_1 + X'_2)^2} \quad (4-2)$$



由公式 4-2 可知，感應電動機之起動轉矩與電源電壓平方 (V_1^2) 成正比，與轉子電阻 (R'_2) 成正比。爲了增加起動轉矩，可以考慮的方式包括增加電源電壓或是轉子電阻；也可以考慮降低定子電阻、定子電抗與轉子電抗。

(三) 結論

依據上述說明可知，起動時增加轉子電阻 (R'_2)，感應電動機就能以小起動電流、大起動轉矩的完美方式開始起動，隨著轉速逐漸上升，再將轉子電阻逐漸降低，就可以減少損失。繞線式轉子就是依據此特性設計出來的機種。

至於鼠籠式轉子受限於轉子導體已經安置妥當無法改變，因此只能採用降低電源電壓 (V_1) 方式降低起動電流，但連帶的也會導致起動轉矩下降，兩者之間必須取得平衡點。

二、繞線式轉子感應電動機的起動控制

圖 4-2(a) 爲繞線式轉子感應電動機採用轉子外加電阻的方式起動，不僅可降低起動電流，還可以增加起動轉矩。

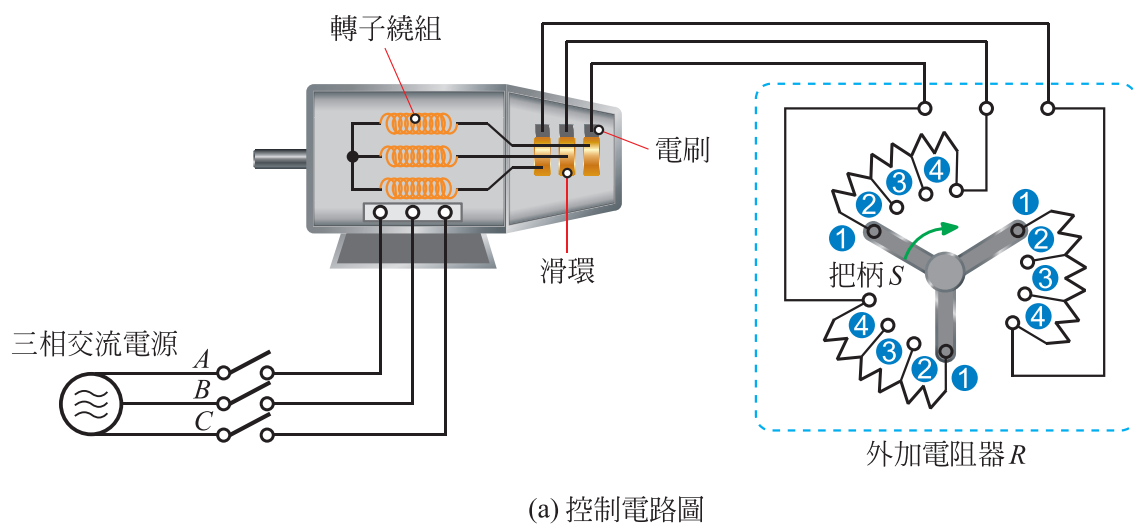
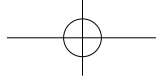
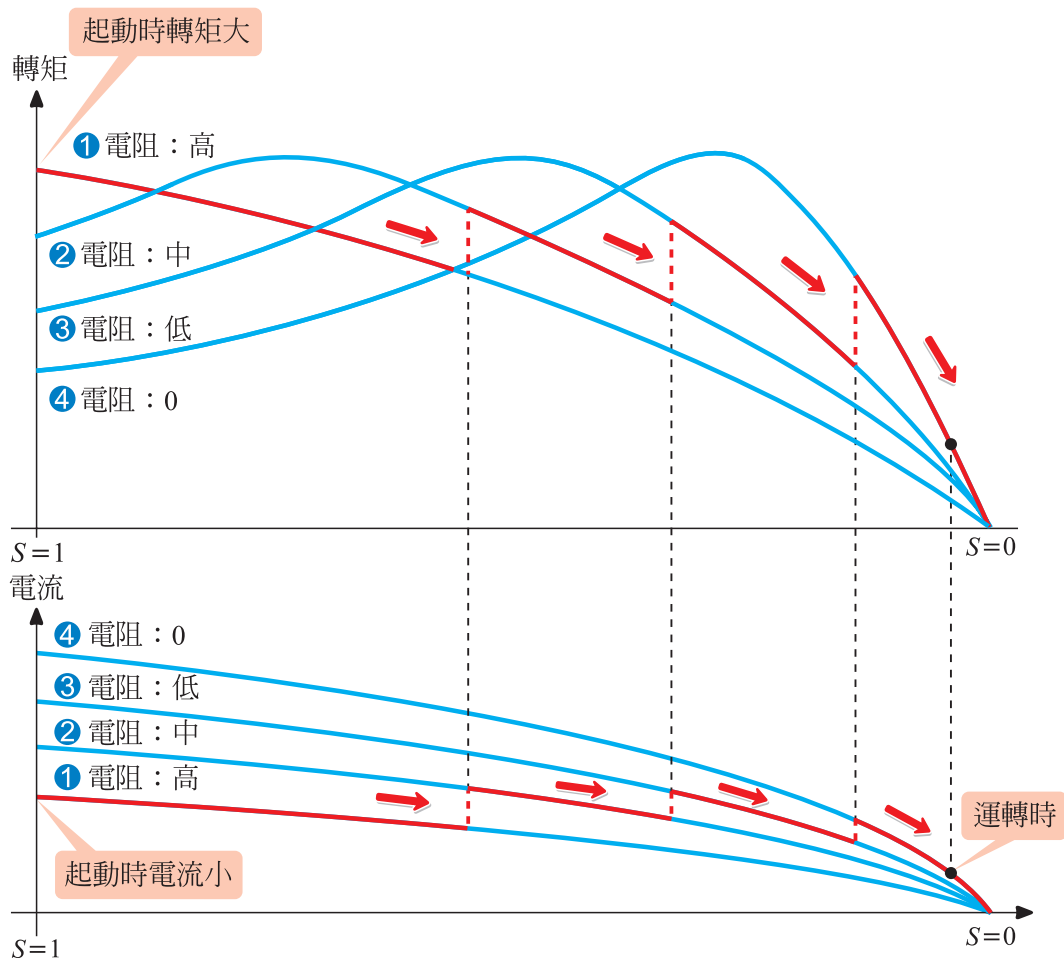


圖 4-2 繞線式轉子感應電動機的起動控制圖

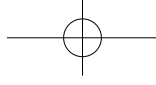


起動前，先將起動器把柄切換到 ❶ 號位置後才加入三相電源，此時所有外加電阻都與轉子繞組連接，由於電阻值大，因此如圖 4-2(b) 所示，起動轉矩大、起動電流小。隨著轉子逐漸加速，轉差率逐漸下降，必須適時地將起動器把柄逐段切換，讓電動機能夠持續以大轉矩、低電流的方式繼續加速，其間的變化情形以圖 4-2(b) 的紅色線條所示。直到起動器把柄切換到 ❷ 號位置，電動機達到額定轉速完成起動。



(b) 起動轉矩與起動電流的變化

圖 4-2 繞線式轉子感應電動機的起動控制圖 (續)



隨堂練習

- () 1. 有一部三相 220 V，5 hp 感應電動機，已知滿載電流為 14 A，則起動瞬間電流值何者最有可能？ (A)7.5A (B)14 A (C)28 A (D)84 A。
- () 2. 有一部升降機採用三相繞線轉子型感應電動機作為動力來源，起動時為了產生高的起動轉矩與低的起動電流，正確的起動操作方式為何？
- (A) 定子電路串接適當的電阻
- (B) 定子電路串接適當的電抗
- (C) 轉子電路串接適當的電阻
- (D) 轉子電路以粗銅線加以短路。

三、鼠籠式轉子感應電動機的起動控制

採用鼠籠式轉子的感應電動機，由於轉子導體已經被端絡環短路，無法利用外加電阻來降低起動電流，因此只能透過降低電壓的方式限制起動電流，但是缺點是起動轉矩也會連帶降低。目前鼠籠式轉子感應電動機所採用之起動方法整理成圖 4-3。

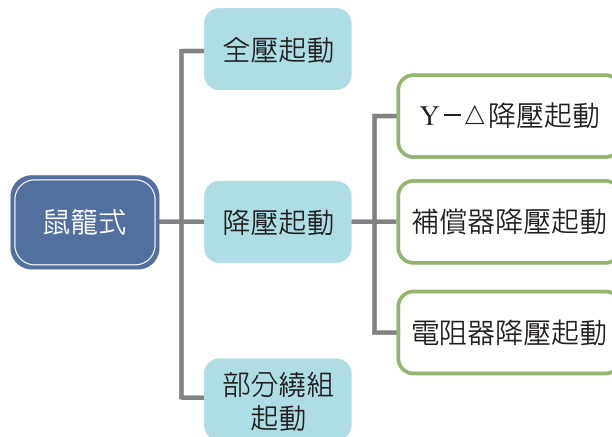
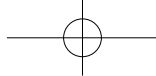


圖 4-3 鼠籠式轉子感應電動機的起動方式



(一) 全壓起動法

對於小型 (5 hp 以下) 鼠籠式感應電動機而言，由於轉動慣量小、速率上升快、起動時大電流的持續時間很短，因此不需要起動控制，可以直接通入額定電壓進行起動。但是考量起動瞬間電流高達 6 ~ 8 倍的額定電流，因此如圖 4-4，起動時將三極雙投開關 (triple pole double throw, TPDT) 向右投至起動 (START) 位置，使大起動電流經過高容量熔絲來保護，待轉速上升後，將開關投至運轉 (RUN) 位置，以低容量熔絲來做過載保護。

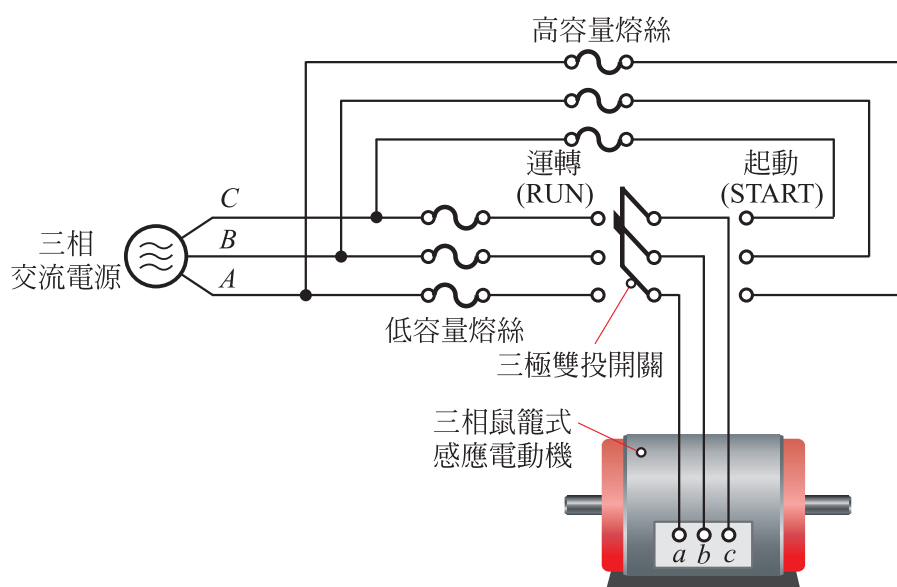
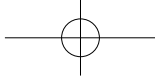


圖 4-4 全壓起動接線圖

(二) 降壓起動法

中、大型鼠籠式感應電動機由於轉動慣性大，起動時間長而且起動電流大，必須依據屋內線路裝置規則所提及的規定使用降壓起動器，將**起動電流限制在額定電流的 3.5 倍以下**，常用的方法包括：



1. Y- Δ 降壓起動法

一般鼠籠式感應電動機的三組定子繞組如圖 4-5(a)，共有 6 條出線頭，起動時將開關 S_1 與 S_2 閉合，此時定子三相繞組如圖 4-5(b) 以 Y 接方式起動。當轉速上升後先將開關 S_2 打開、再將 S_3 閉合，此時定子三相繞組如圖 3-4(c)，變成 Δ 接線持續運轉，產生足夠轉矩。

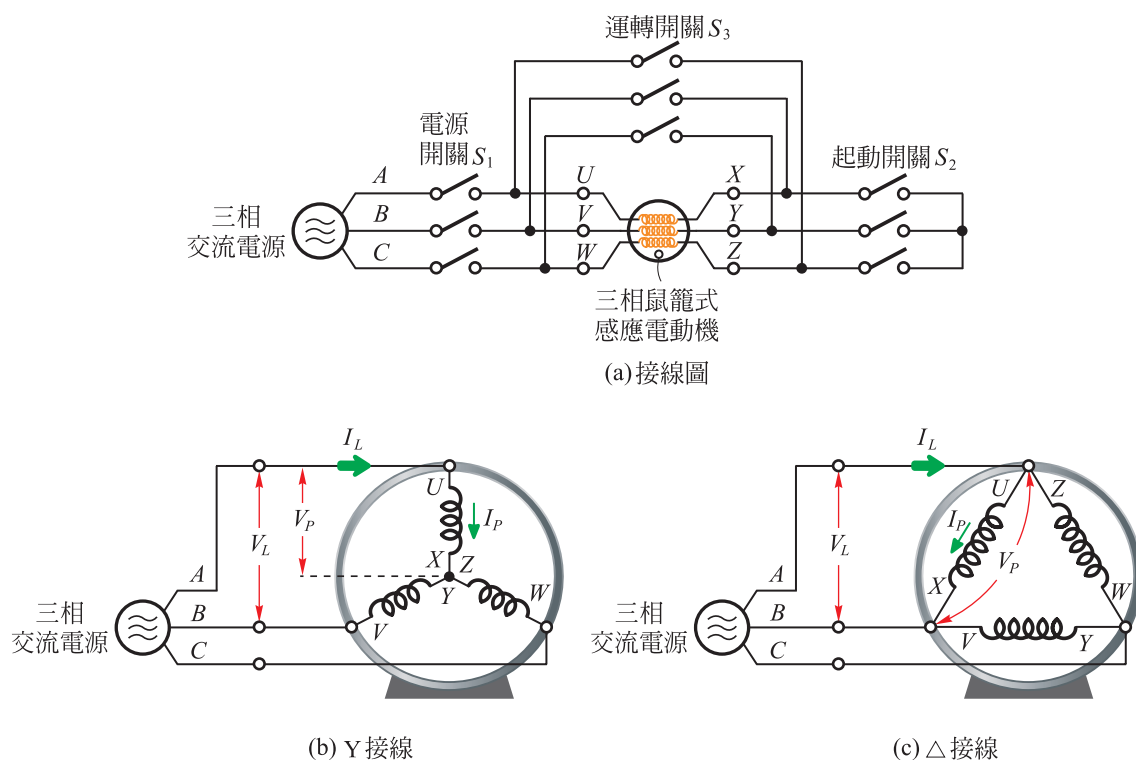


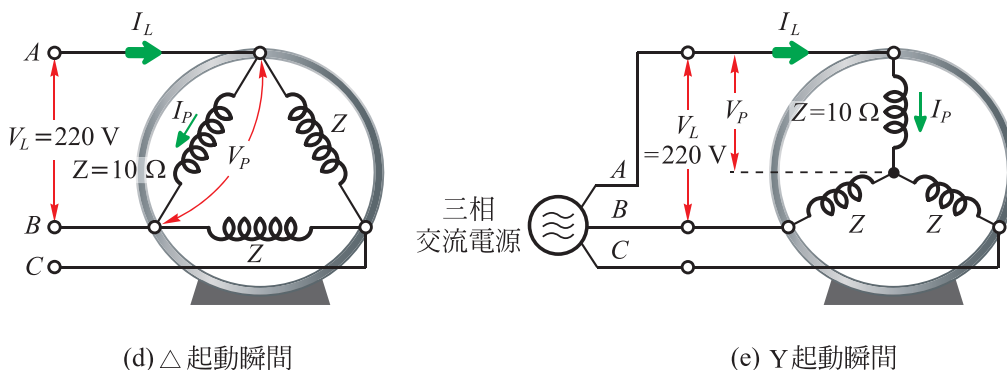
圖 4-5 Y- Δ 降壓起動

範例

01

有一部三相感應電動機，不考慮暫態影響的情況下，倘若靜止時測得每相繞組阻抗均為 $10\ \Omega$ ，當外加三相 220 V 電源時，若電動機以 (1) Δ 接起動時，起動瞬間相電壓、相電流、線電流分別為何？(2) Y 接起動時，起動瞬間相電壓、相電流、線電流分別為何？

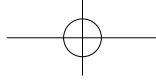
解 依據題意，畫出電動機等效電路圖如下：



比較項目	Δ 起動瞬間	Y 起動瞬間
線電壓 V_L	$V_L = 220 \text{ V}$	$V_L = 220 \text{ V}$
相電壓 V_p	$V_p = V_L = 220 \text{ V}$	$V_p = \frac{V_L}{\sqrt{3}} = \frac{220}{\sqrt{3}} \text{ V}$
相電流 I_p	$I_p = \frac{V_p}{Z} = \frac{220 \text{ V}}{10 \Omega} = 22 \text{ A}$	$I_p = \frac{V_p}{Z} = \frac{220 \text{ V} / \sqrt{3}}{10 \Omega} = \frac{22}{\sqrt{3}} \text{ A}$
線電流 I_L	$I_L = \sqrt{3} I_p = 22\sqrt{3} \text{ A}$	$I_L = I_p = \frac{22}{\sqrt{3}} \text{ A}$

依據範例 01 結果可得，相同電源電壓下，感應電動機採用 Y 接起動時相電壓 (V_p) 與相電流 (I_p) 均為 Δ 接起動時的 $\frac{1}{\sqrt{3}}$ 倍，Y 接起動時的線電流 (I_L) 降為 Δ 接起動時的 $\frac{1}{3}$ 倍。

起動轉矩與每相繞組電壓 (V_p) 成平方正比，因此 Y 接起動時的轉矩為 Δ 接起動時的 $\frac{1}{3}$ 倍。



範例

02

有一部 6 極 25 hp、60 Hz、220 V、三相感應電動機在全壓起動時，測得線路電流為 210 A，起動轉矩 150 牛頓－米，倘若改用 Y-Δ 起動法，則起動電流及起動轉矩分別為多少？

解 Y 接起動時的線電流與轉矩均為 Δ 起動的 $\frac{1}{3}$ 倍，因此

$$I_{L(Y)} = \frac{1}{3} I_{L(\Delta)} = \frac{1}{3} \times 210 \text{ A} = 70 \text{ A}$$

$$T_{s(Y)} = \frac{1}{3} T_{s(\Delta)} = \frac{1}{3} \times 150 = 50 \text{ N-m}$$

Y-Δ 降壓起動法是降壓起動方式中最經濟、常用之方法，只需要利用閘刀開關或是電磁接觸器變換電動機定子繞組的接線即可。一般用在 7.5 馬力以上之中容量電動機，但由於起動轉矩下降幅度較大，因此不適用重負載之起動。

圖 4-6 為利用電磁開關的 Y-Δ 降壓起動電路，其操作過程如下：

- (1) 按下 ON 開關，限時電驛 TR 及電磁接觸器 MCS 線圈激磁，TR 之瞬時 (instant) 接點閉合形成自保持電路。MCS 所屬主接點閉合，將感應電動機定子三相繞組的 X、Y、Z 三點接在一起，將感應電動機定子繞組以 Y 連接方式起動。
- (2) TR 設定時間到 (通常為 5 秒～12 秒)，TR/b 接點跳開，TR/a 接點閉合，電磁接觸器 MCS 線圈失磁，改由電磁接觸器 MCD 激磁。MCD 所屬主接點閉合，將感應電動機定子繞組改以 Δ 接線正常運轉。
- (3) 按下 OFF 開關，限時電驛 TR 線圈失磁，TR 瞬時 (inst) 接點跳脫，電磁接觸器 MCD 線圈失磁，主接點跳脫，電動機停止運轉。



圖 4-6 中，MCS 線圈前方串聯 MCD/b 接點以及 MCD 線圈前方串聯 MCS/b 接點，稱為電氣互鎖，其功能在於避免電磁接觸器 MCS 及 MCD 線圈同時激磁，造成主電路電源短路。而計時電驛 TR 應選用 Y- Δ 起動專用型，其 b 接點跳脫到 a 接點閉合間會有 0.01 秒～0.3 秒的延遲時間，以防止 MCS 尚未完全跳脫，MCD 就已經閉合而導致電源短路。

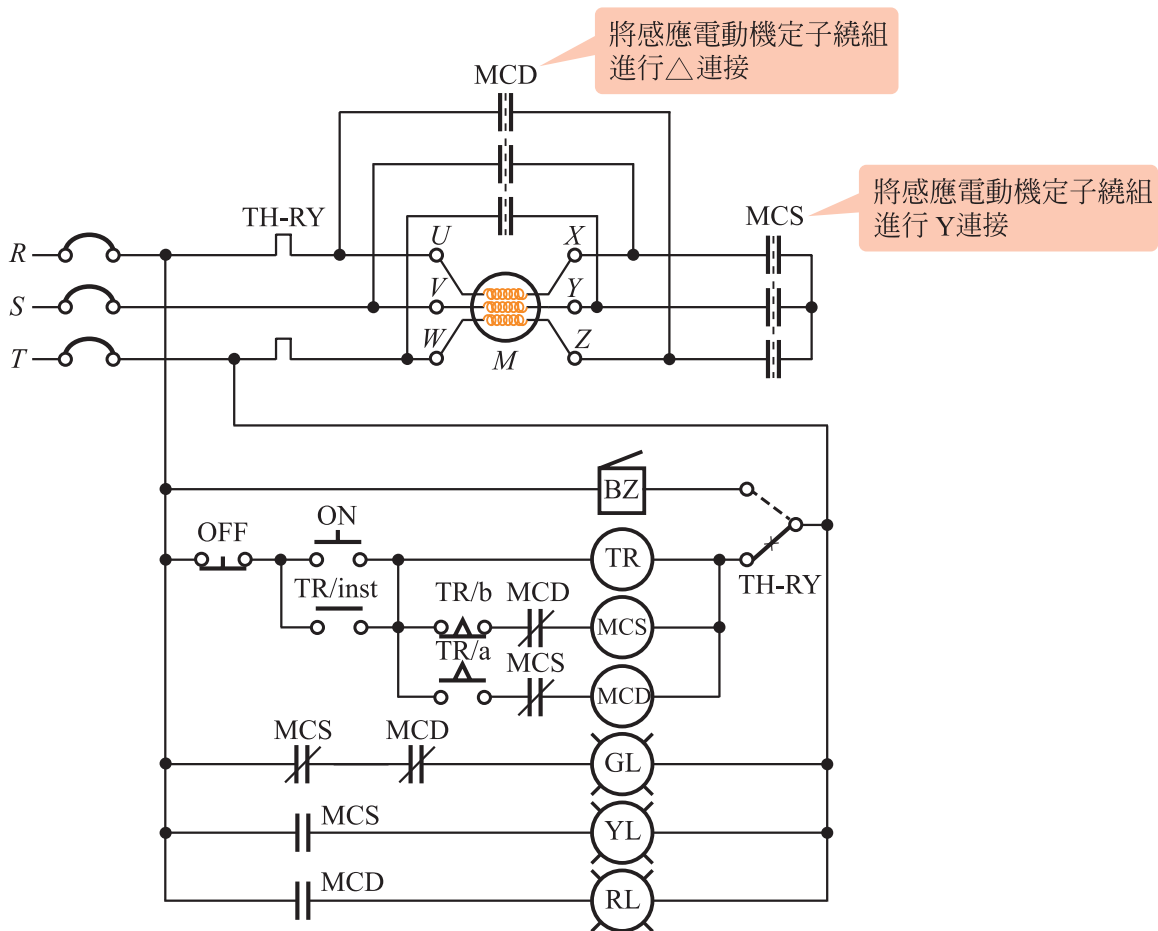
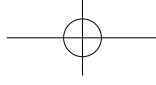


圖 4-6 利用電磁開關作 Y- Δ 降壓起動



2. 補償器降壓起動法

補償器降壓起動法又稱為**自耦變壓器降壓起動法**，如圖 4-7 利用自耦變壓器可以將電源電壓調整至額定值的 40 % ~ 80 %。使用者依據負載轉矩需要，將自耦變壓器調整至適當位置後，將電源開關 S_1 與起動開關 S_2 閉合，電動機透過自耦變壓器以降壓方式起動，當轉速上升後將起動開關 S_2 打開、改將運轉開關 S_3 閉合，電動機以全電壓持續運轉，產生足夠轉矩。

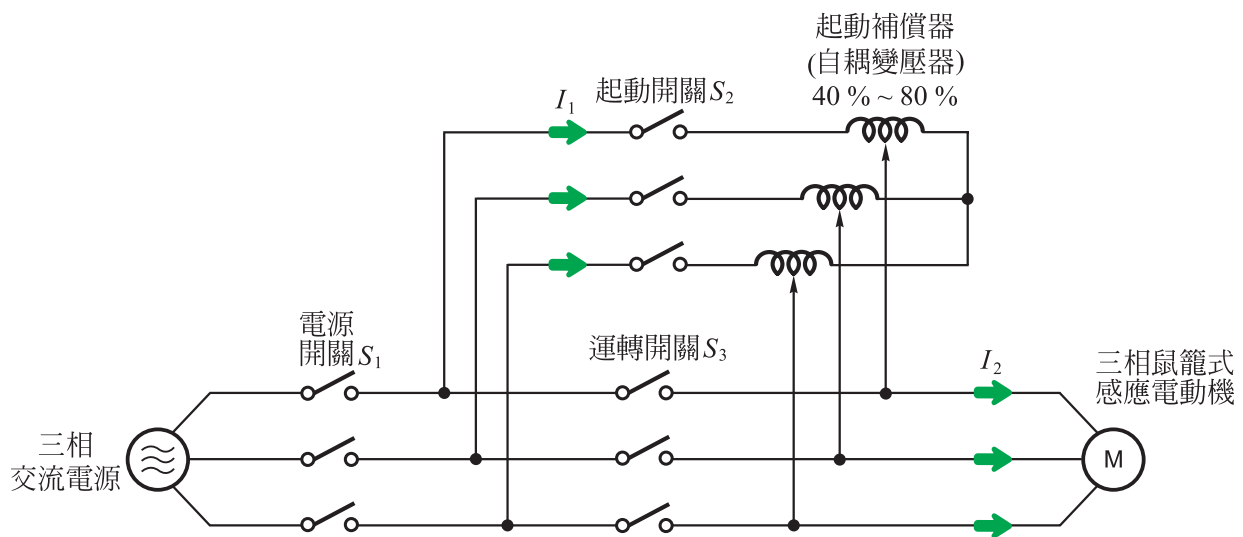
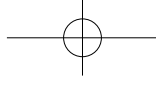


圖 4-7 利用起動補償器降壓起動

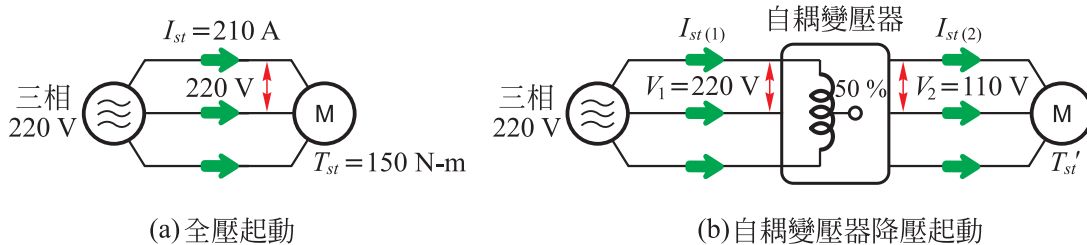


範例

03

有一部 6 極、25 hp、60 Hz、220 V 三相感應電動機以全壓起動時測得線路電流為 210 A，起動轉矩 150 牛頓·米。倘若採用補償器起動法，起動時電動機所加之電壓為線路電壓的 50%，則 (1) 電動機側起動電流、(2) 電動機起動轉矩、(3) 電源側的起動電流分別為多少？

解 圖 (a) 所示為電動機全壓起動瞬間狀態，圖 (b) 為透過自耦變壓器將 220 V 電源電壓降低 50% 變成 110 V，即 $V_1 = 220\text{ V}$ ， $V_2 = 110\text{ V}$ ，匝數比 $a = 2$ 。



- (1) 圖 (b) 自耦變壓器將電動機的電壓降為 $1/2$ ($V_2 = 110\text{ V}$)。依據歐姆定律，電動機側的起動瞬間電流 $I_{st(2)}$ 降為圖 (a) 全壓起動時的 $1/2$ ，即

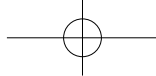
$$I_{st(2)} = \frac{1}{2} \times 210\text{ A} = 105\text{ A}。$$

- (2) 起動轉矩與電壓平方成正比，當電動機的電壓降為 $1/2$ ，起動轉矩降為 $1/4$ ，即 $T'_{st} = \left(\frac{1}{2}\right)^2 \times 150 = 37.5\text{ N-m}。$

- (3) 變壓器匝數比 $a = \frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1} \Rightarrow 2 = \frac{I_{st(2)}}{I_{st(1)}}$ ，因此電源側起動電流

$$I_{st(1)} = \frac{I_{st(2)}}{2} = 52.5\text{ A}。$$

由範例 03 結果可知，利用補償器起動法將電動機的電壓降為全壓起動時的 $1/2$ 倍 (K 倍)，電動機側的電流 (I_2) 降為全壓起動時的 $1/2$ 倍 (K 倍)，電源側的電流 (I_1) 降為全壓起動時的 $1/4$ 倍 (K^2 倍)。起動轉矩降為全壓起動轉矩的 $1/4$ 倍 (K^2 倍)。



3. 電阻器或電抗器降壓起動法

圖 4-8 是在電源與電動機間串聯電阻或電抗。起動時先將電源開關 S_1 閉合，受到串聯電阻的壓降影響，電動機以降壓方式起動，當轉速上升後再將運轉開關 S_2 閉合，將電阻器短路，電動機以全電壓持續運轉，產生足夠轉矩。起動用電抗器一般備有 80 %、65 %、50 % 等分接頭可供選擇（若從 80 % 分接頭接線，則表示電源電壓為額定值的 80 %），常用於紡織機械等之起動。至於串接電阻器由於會發熱且功率損失較大，且成本較電抗器高，因此較少使用。

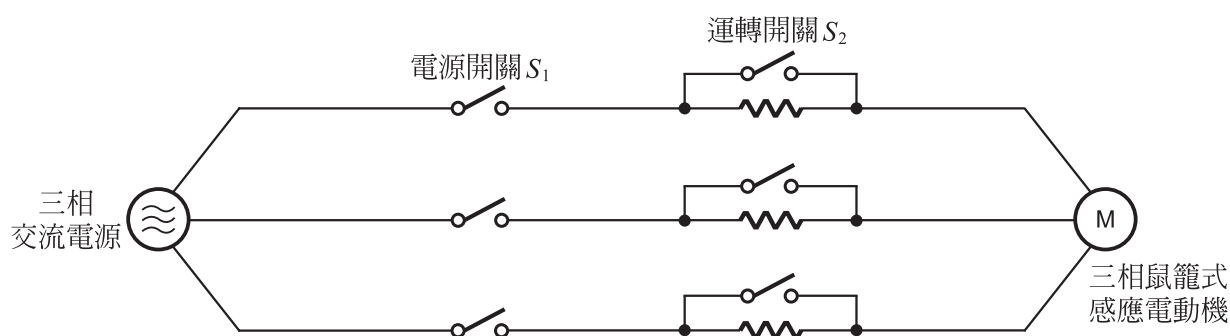


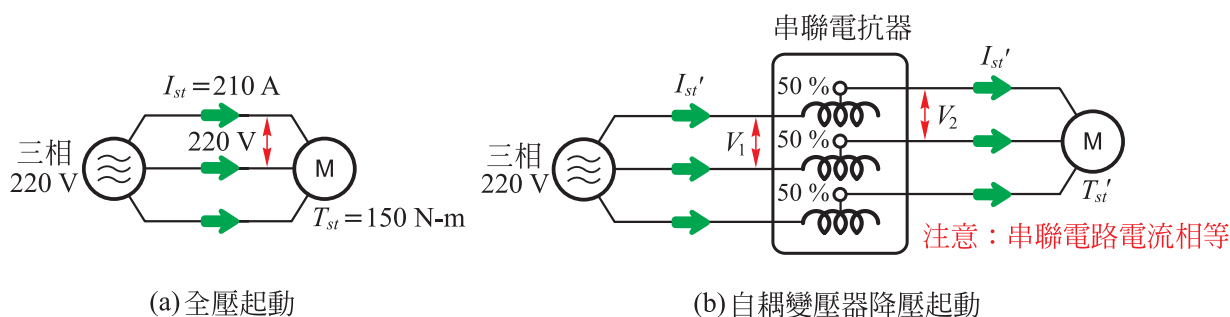
圖 4-8 利用電阻器降壓起動

範例

04

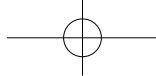
有一部 6 極 25 hp、60 Hz、220 V、三相感應電動機以全壓起動時測得線路電流為 210 A，起動轉矩 150 N·m。倘若採用串聯電抗器起動法，起動時置於 50 % 分接頭位置，則 (1) 起動電流、(2) 起動轉矩分別為多少？

解 下圖 (a) 所示為電動機全壓起動瞬間狀態，圖 (b) 為透過串聯電抗器將 220 V 電源電壓降為 50 % 變成 110 V 後，再提供電動機使用，即 $V_1 = 220 \text{ V}$ ， $V_2 = 110 \text{ V}$ 。



- (1) 圖 (b) 的電動機電壓降為圖 (a) 全壓起動時的 1/2，依據歐姆定律，起動瞬間電流也降低為全壓起動時的 1/2，即 $I_{st}' = \frac{1}{2} \times 210 \text{ A} = 105 \text{ A}$ 。
- (2) 起動轉矩與電壓平方成正比，圖 (b) 電動機電壓降為 1/2，起動轉矩降為全壓起動時的 1/4，即 $T_{st}' = \left(\frac{1}{2}\right)^2 \times 150 = 37.5 \text{ N·m}$ 。

由範例 04 結果可知，利用串聯電抗器將電動機的電壓降為全壓起動時的 1/2 倍 (K 倍)，起動電流則會降為全壓起動時的 1/2 倍 (K 倍)。起動轉矩降為全壓起動轉矩的 1/4 倍 (K^2 倍)。



(三) 部分繞組起動法

將感應電動機定子繞組設計成相等的二部份，起動時先將其中一組接電源，等電動機起動後再將另一組繞組並聯接於電源使其正常運轉，因為只有一半繞組起動，故僅產生一半之功率而已，起動電流也隨之減半。

隨堂練習

- () 1. 工廠採購一部新的三相鼠籠式感應電動機，可以採用的起動控制方法，下列何者錯誤？
- (A) Y- Δ 降壓起動法 (B) 一次電抗降壓起動法
(C) 轉子加入電阻法 (D) 補償器降壓起動法。
- () 2. 大型三相感應電動機採用 Y- Δ 起動法，主要的理由為何？
- (A) 降低起動電流 (B) 增加起動轉矩
(C) 改善功率因素 (D) 避免轉速過高，產生飛脫。
- () 3. 三相鼠籠式感應電動機，用相同的線電壓，分別以 Y 連接起動與 Δ 連接起動，請問 Y、 Δ 連接起動電流之比與 Y、 Δ 連接起動轉矩之比，分別為何？
- (A) $\frac{1}{\sqrt{3}}$ ， $\frac{1}{\sqrt{3}}$ (B) $\frac{1}{3}$ ， $\frac{1}{3}$
(C) $\frac{1}{3}$ ， $\frac{1}{\sqrt{3}}$ (D) $\frac{1}{\sqrt{3}}$ ， $\frac{1}{3}$ 。
- () 4. 三相感應電動機起動時，利用補償器予以降壓，當電壓降至全壓之 80 % 時，其電源側的起動電流、起動轉矩分別為全壓起動之多少？
- (A) 80 %、80 % (B) 80 %、64 % (C) 64 %、80 % (D) 64 %、64 %。
- () 5. 三相感應電動機採用串聯電抗器起動法，若中間抽頭調整於 80 % 位置，則起動電流與起動轉矩會是全壓起動時之多少？
- (A) 80 %、80 % (B) 80 %、64 % (C) 64 %、80 % (D) 64 %、64 %。

4-2 三相感應電動機之速率控制

感應電動機正常運轉時，無論軸端的機械負載是無載或是滿載，轉速變化幅度都不大，可視為定速電動機。若是需要控制運轉中電動機的旋轉速率（加速或減速），依據公式 1-5，轉子轉速為：

$$n_r = (1 - S)n_s = (1 - S)\frac{120f}{P} \quad (4-3)$$

可以透過改變轉差率 S 、電源頻率 f 或是定子磁極數目 P 等方式進行。

圖 4-9 列出感應電動機速率控制的各項方法，受限於轉子構造，鼠籠式轉子僅能利用定子進行速率控制，而繞線式轉子大都採用轉子進行速率控制。

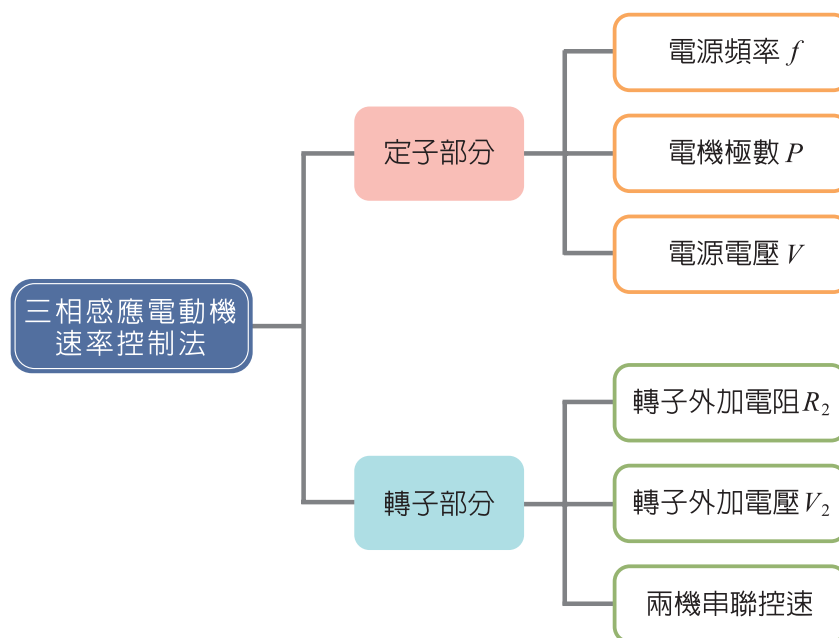
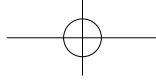


圖 4-9 感應電動機速率控制方法



一、定子部分之速率控制

鼠籠式轉子的感應電動機，常用的控制方法包含：

(一) 改變電源頻率 (f) 控制轉速

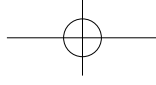
感應電動機的轉子轉速 (n_r) 與頻率 (f) 成正比，受惠於近年來電子技術快速發展，變頻設備陸續問世後，透過改變頻率，使得鼠籠式感應電動機可以進行寬廣的速率控制。



圖 4-10 變頻器
(圖片來源：台達電子)

圖 4-10 為變頻器 (variable-frequency drive, VFD) 的外觀，圖 4-11 為三相變頻器基本方塊圖，變頻器由主電路和控制電路構成，其中主電路負責為電動機供應電能，基本構造包括：

- (1) 整流器：將交流電全波整流為直流電。
- (2) 濾波電路：電容器具有儲能和平穩直流電壓的作用。



- (3) 制動電路：當電動機的轉子轉速超過同步轉速時，電動機進入發電狀態，此時制動電路會動作，讓電動機的發電電能經過制動電阻 R_B 快速耗散，讓電動機能快速刹車。
- (4) 換流電路：利用 IGBT 或 SCR、GTO 等開關元件組合而成的三相橋式換(變)流器 (inverter)，利用脈波寬度調變技術 (pulse-width modulation, PWM) 原理，將直流電轉變成可變電壓與可變頻率 (variable voltage variable frequency, VVVF) 之三相交流電源，藉此改變交流電動機之轉速。

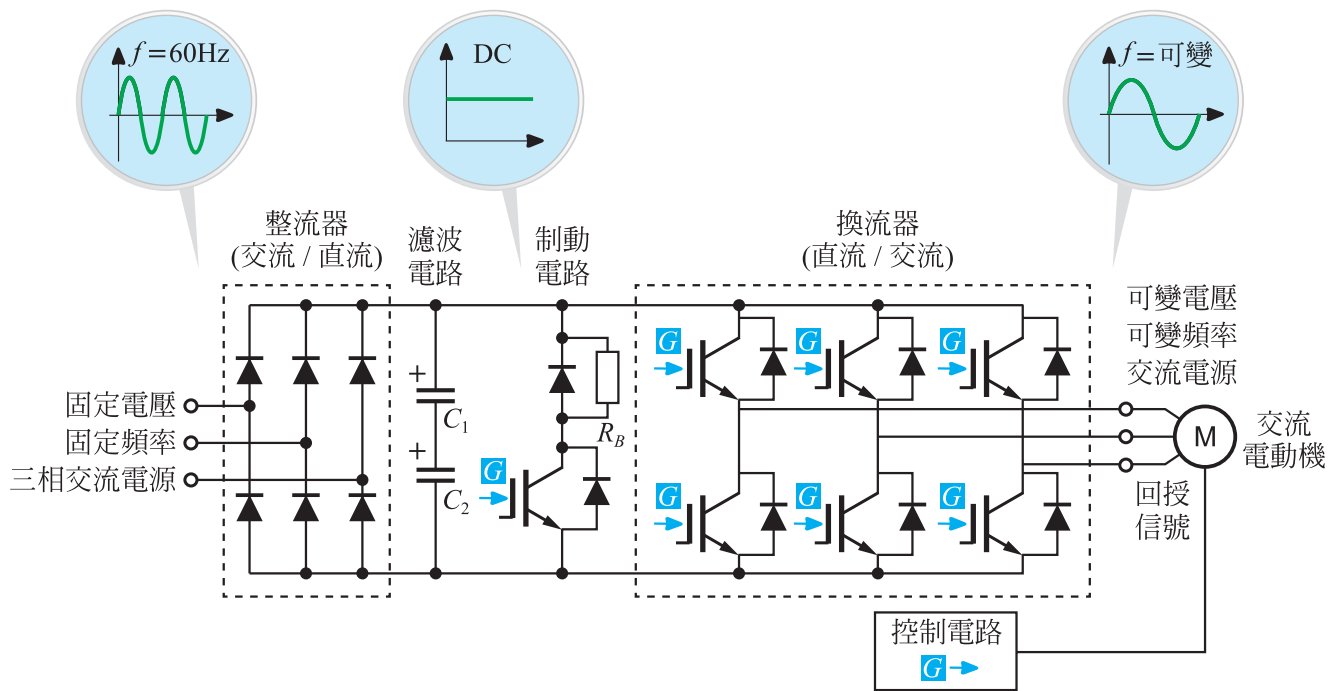
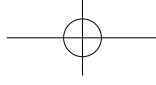


圖 4-11 三相變頻器方塊圖



依據公式 3-1 可知感應電動機定子繞組的應電勢 ($E_1 = 4.44K_{w1}f_1N_1\phi_m$)，在電源電壓固定下，頻率降低會使得磁通 (ϕ_m) 增加，鐵損增加；且電感抗隨頻率下降而減少，導致電流增加，銅損增加、電動機溫度上升甚至燒毀。

因此利用變頻器進行轉速控制時，輸出電壓會隨著頻率變動而成正比改變，使電壓頻率比 $\frac{V}{f}$ 大致維持不變，此種變壓變頻 (VVVF) 方式可使定子磁場維持一定，確保電動機在任何轉速下維持足夠轉矩。但在輸出高頻率提升轉速時，必須先行確認電動機繞組絕緣耐壓及機械結構足以承受，以免損壞電機。

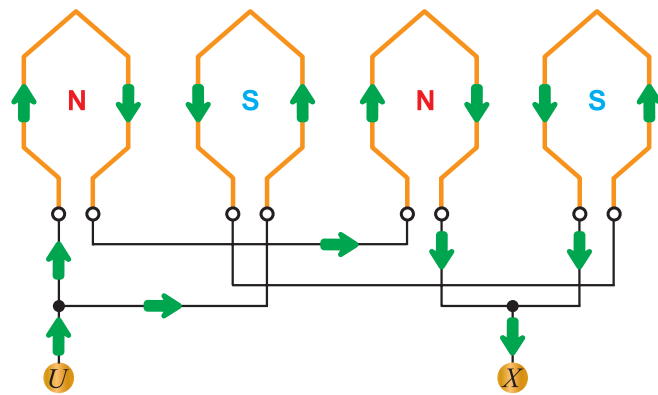
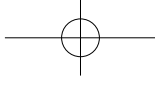
變頻器是目前交流感應電動機最主要的控制方式，除了有大範圍且圓滑的速率控制外、還可以進行起動控制、轉向控制以及線性制動等，由於穩定性好、效率高、功率因數高、操作方便等優點，目前台灣高鐵及台鐵列車的轉速控制，或是生活周遭的電梯、冷氣等用電設備也都普遍使用變頻設備。

(二) 改變電機極數 (P) 控制轉速

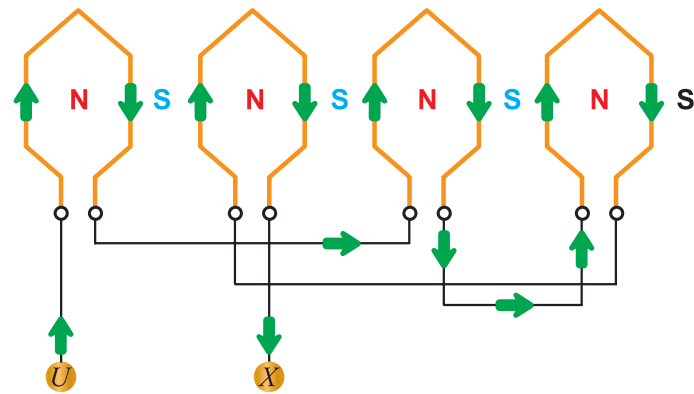
感應電動機的轉子轉速 (n_r) 與極數 (P) 成反比，極數少時為高速運轉，極數多時為低速運轉，受限於繞組接線方式，變極調速為有段調速，只能產生 2 或 3 種轉速，無法進行無段調速。

圖 4-12(a) 是將感應電動機其中一相定子繞組的四個線圈兩組串聯後再並聯，當電流通過時形成 4 極接線。圖 4-12(b) 則將電源引接線 (X 端) 的位置改變，四個線圈就改為串聯接法，各組線圈均產生 N 極，而在兩極間會感應產生 S 極而形成 8 極，此種方式稱為庶極 (consequent pole)，由於極數加倍，因此同步轉速減半。

極數控速法的優點是效率高，但是僅可用於鼠籠式轉子，因為其轉子導體可視為任何偶數之極數。繞線式轉子由於轉子極數已經繞製妥當不易改變，因此不適用此法。



(a) 4極接法(高速)



(b) 8極接法(低速)

圖 4-12 定子極數變換法

(三) 改變電源電壓 (V) 控制轉速

感應電動機的轉速公式 $n_r = (1-S) \frac{120f}{P}$ ，式中轉速似乎與電壓 (V) 無關，但由於感應電動機的轉矩 (T) 與電壓平方 (V^2) 成正比，電壓變化時，轉矩與轉差率隨之變化，其結果如圖 4-13 所示。

由於電動機的轉速會穩定在其輸出轉矩等於負載轉矩時，圖 4-13 中當負載所需轉矩不變，則電源電壓降低時 ($V_1 \rightarrow V_2 \rightarrow V_3$)，電動機轉差率加大 ($S_1 \rightarrow S_2 \rightarrow S_3$)，轉子轉速則會略為下降。

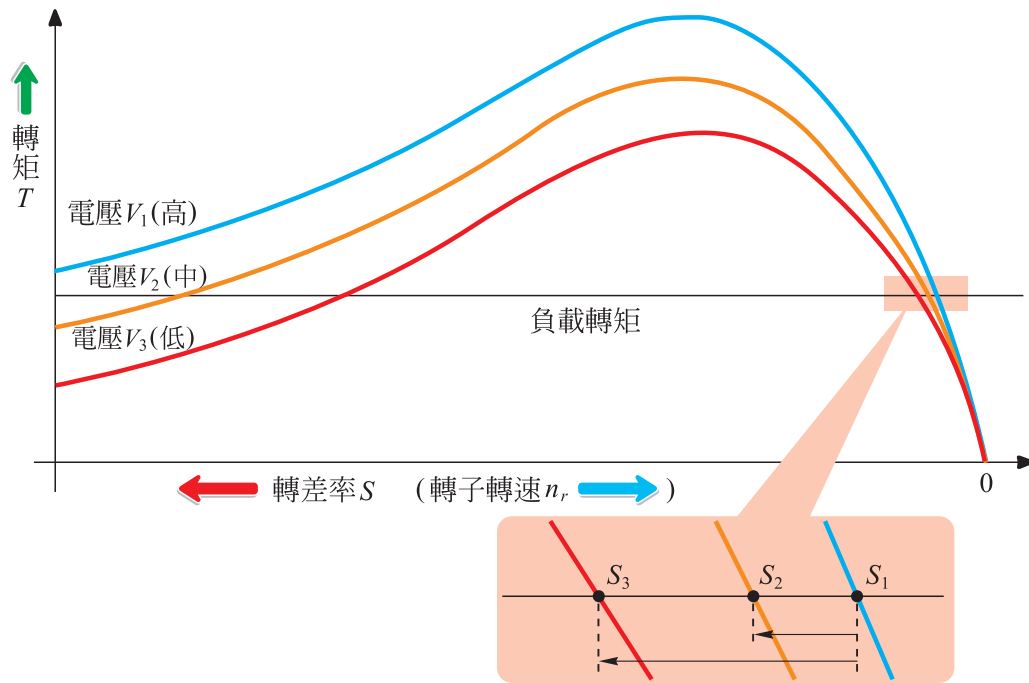
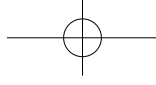
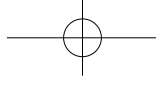


圖 4-13 鼠籠式轉子外加電壓與轉矩、轉差率的關係

改變電源電壓控速法最常利用具抽頭的電抗、電阻與定子繞組串聯來降壓，但是此種方式的**速率控制範圍很小**，而且電流很容易因為電壓降低而超過額定值，因此只適用於高轉子電阻鼠籠式，如風扇這種處於高速運轉，負載不大的控制場所。

二、轉子部分之速率控制

繞線式的轉子繞組可以透過滑環及電刷與外部電阻連接，除了以小起動電流、大起動轉矩進行完美起動；運轉過程中也可以透過改變轉子電阻、轉子電壓或是兩機串聯等方式進行轉速控制。但是當變頻器問世後，鼠籠式轉子也能擁有良好的起動與控速性能。反觀繞線式轉子卻由於構造複雜、需要定期保養，因此使用場合逐漸減少，有關轉子外加電阻改變速率的基本原理介紹可參考第三章的內容。



轉子電阻控速法僅適用於繞線式轉子之感應電動機。而且外接電阻造成損失增加，效率降低，加上負載變動時，轉速隨之變動，速率調整率不佳；因此不適用於低速而長時間運轉場合。一般用於吊車、電梯、捲揚機等。

範例

05

有一台三相、4 極、60 Hz 繞線式感應電動機，轉子每相電阻為 $5\ \Omega$ ，滿載時測得轉子轉速為 1710 rpm，在負載不變下，倘若 (1) 在轉子每相電路上串接 $5\ \Omega$ 之電阻，轉子轉速為何？(2) 欲使滿載轉速降為 1350 rpm，則轉子每相外加電阻應為何？

解 同步轉速：
$$n_s = \frac{120f}{P} = \frac{120 \times 60}{4} = 1800\ \text{rpm}$$

原本滿載時轉差率：
$$S = \frac{1800 - 1710}{1800} = 0.05$$

(1) 轉子每相電路上串接 $5\ \Omega$ 後：
$$\frac{R'_2}{S} = \frac{R'_2 + R}{S'} \Rightarrow \frac{5\ \Omega}{0.05} = \frac{5\ \Omega + 5\ \Omega}{S'}$$

可得轉差率 $S' = 0.1$ ，轉子轉速 $n_r = (1 - S')n_s = (1 - 0.1) \times 1800 = 1620\ \text{rpm}$

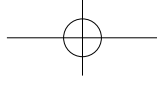
(2) 欲使滿載轉速降為 1350 rpm，即 $S'' = \frac{1800 - 1350}{1800} = 0.25$

則
$$\frac{R'_2}{S} = \frac{R'_2 + R'}{S''} \Rightarrow \frac{5\ \Omega}{0.05} = \frac{5\ \Omega + R'}{0.25}$$

可得轉子每相外加電阻 $R' = 20\ \Omega$

隨堂練習

- () 1. 在三相感應電動機的速率控制中，若改變轉子內阻 R_2 ，則下列敘述何者錯誤？
(A) 此方法僅適用於繞線式轉子的感應電動機 (B) 轉子轉速與轉子電阻成正比
(C) 轉速變化過程中轉矩可以維持不變 (D) 轉子增加造成銅損增加，使得效率降低。
- () 2. 工廠輸送帶採用三相 6 極、60 Hz 繞線式感應電動機作為動力來源，尖峰生產時間電動機滿載轉速設定為 1152 rpm，轉子繞組每相電阻為 $2\ \Omega$ ，而當離峰生產時間要讓電動機滿載轉速降低至 960 rpm，則轉子繞組外加電阻應該調整為何？
(A) $2\ \Omega$ (B) $4\ \Omega$ (C) $6\ \Omega$ (D) $8\ \Omega$ 。



4-3 三相感應電動機之轉向與制動控制

一、轉向控制

要改變三相感應電動機之旋轉方向，僅需將接至電動機之三根電源線中之任二根對調，由於定子旋轉磁場方向立刻改變，使得轉軸之旋轉方向也隨之改變。

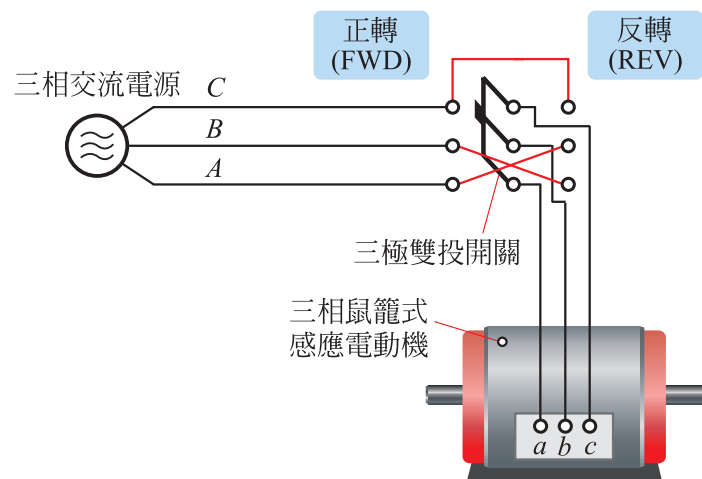


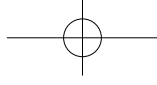
圖 4-14 利用三極雙投開關控制轉向

圖 4-14 若將三極雙投開關向左投入時，倘若電動機為正轉 (forward, FWD)，欲使感應電動機反轉，可將開關切至中央位置等電動機停止後再向右投入，此時由於 A 、 B 兩條電源線接線對調，電動機定子產生的旋轉磁場方向改變，電動機變成反轉 (reverse, REV)。

二、制動控制

為了節省時間或考慮安全，常需要使運轉中的電動機迅速停轉或減速，使其運轉於安全速度內，此時電動機必須具備制動裝置。電動機依制動方式可分為：

1. 機械制動：利用刹車器使電動機停止或限速，但具有高熱容易造成機器損壞。
2. 電氣制動：利用電氣原理，可分為下列四種：



- (1) 逆轉制動 (插塞制動)：以圖 4-14 為例，欲使正轉中的電動機迅速停止，可將開關立刻切入反轉位置產生逆轉矩，並利用插塞開關或定時開關，當正、負轉矩相互抵消時，將電源切離。此法在切換過程中電流變化大，因此僅用於需要急速停止之場合，如軋鋼機。
- (2) 直流制動：又稱為動力制動或是發電制動。圖 4-15 中，開關由運轉位置切離後，改向右投入制動位置，此時直流電源流入定子繞組，定子旋轉磁場變成固定磁場，轉子因慣性作用繼續旋轉而變成發電機，所產生之電能自行消耗在轉子電路中，並形成反轉矩，使轉子減速，達到制動之目的。

動力制動多用於繞線式轉子感應電動機，如電車及大型起重機之制動。鼠籠式轉子之轉子電阻小易有高熱，影響壽命，較不適用。

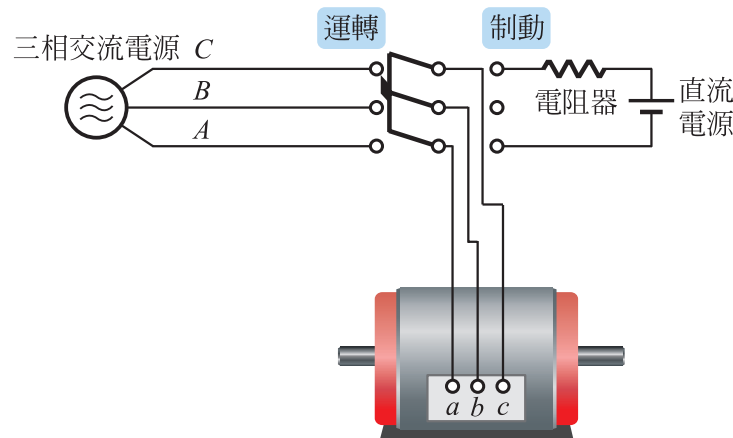


圖 4-15 感應電動機直流制動

- (3) 單相制動：由圖 4-16 可知，開關由運轉位置切離後，改向右投入制動位置，由於電動機的 b 相沒有電流通過，因此三相感應電動機如同單相感應電動機繼續運轉，轉矩下降使得轉速降低，採用此種制動方式無法使機械停止，必須併用其他方法。

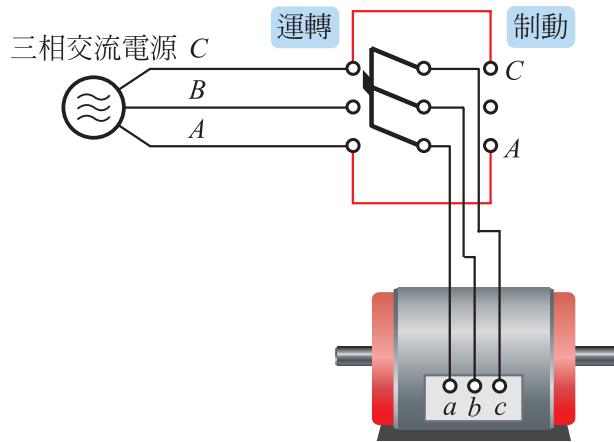
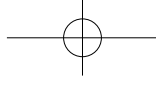


圖 4-16 感應電動機單相制動

- (4) 再生制動：由圖 4-17 可以看出，當感應電動機的旋轉速度超過同步轉速 ($S < 0$) 時，感應電動機就會運轉成發電機狀態，所產生之電力收回於電源，且產生反轉矩。但一旦轉速低於同步轉速 ($S > 0$)，此狀態就消失，故此現象只能避免轉速過高、無法使電動機停止，必須搭配其他制動方法，一般常用於纜車、電梯及起重機等具有重力加速度運轉特性之場所。

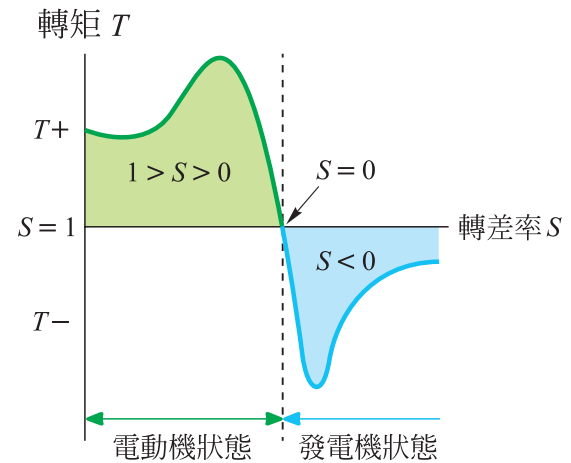


圖 4-17 再生制動時的轉矩特性曲線

隨堂練習

- () 1. 有一個鐵捲門採用三相感應電動機作為動力來源，已知三相電源端分別為 R.S.T，電動機之三相接線端分別為 U.V.W，當電動機的接法為 R - U，S - V，T - W 時，鐵捲門以正轉方式開門，若要讓鐵捲門以反轉方式關門，則下列何種接線方式無法完成？
- (A) R - V，S - U，T - W (B) R - V，S - W，T - U
(C) R - W，S - V，T - U (D) R - U，S - W，T - V。
- () 2. 運轉中的三相感應電動機，將其交流電源切離，並且立即輸入直流電使其停速，此制動方法稱為 (A) 再生制動 (B) 插塞制動 (C) 動力制動 (D) 單相制動。

自我評量

一、選擇題

- 4-1** () 1. 三相感應電動機之無載起動電流與滿載起動電流的關係為
(A) 無載起動電流較大 (B) 滿載起動電流較大
(C) 兩者相同 (D) 視負載類型而定。
- () 2. 三相感應電動機之起動電流與滿載電流的關係為
(A) 起動電流較大 (B) 滿載電流較大
(C) 兩者相同 (D) 視負載類型而定。
- () 3. 感應電動機轉子銅損在何種狀況下會有最大值？ (A) 起動瞬間
(B) 滿載運轉時 (C) 轉子加速時 (D) 轉子減速時。
- () 4. 不考慮暫態影響之情形，三相感應電動機的起動電壓下降 35 % 時，下列敘述何者正確？
(A) 起動電流下降 35 %，起動轉矩下降 35 %
(B) 起動電流下降 35 %，起動轉矩下降 58 %
(C) 起動電流下降 58 %，起動轉矩下降 35 %
(D) 起動電流下降 58 %，起動轉矩下降 58 %。
- () 5. 大型三相感應電動機採用 Y- Δ 起動法，主要的理由為何？
(A) 降低起動電流 (B) 增加起動轉矩
(C) 改善功率因素 (D) 適用於重負載起動。
- () 6. 三相鼠籠式感應電動機，用相同的線電壓，分別以 Y 連接起動與 Δ 連接起動，請問 Y、 Δ 連接起動電流之比與 Y、 Δ 連接起動轉矩之比，分別為何？
(A) $\frac{1}{3}$ ， $\frac{1}{3}$ (B) $\frac{1}{3}$ ， $\frac{1}{\sqrt{3}}$ (C) $\frac{1}{\sqrt{3}}$ ， $\frac{1}{3}$ (D) $\frac{1}{\sqrt{3}}$ ， $\frac{1}{\sqrt{3}}$ 。
- () 7. 有一部三相 4 極、220 VAC、60 Hz、10 hp 的感應電動機，若採用直接起動，則起動電流為 120 A，起動轉矩為 30 N-m。若改為 Y- Δ 降壓起動，請問起動電流 (I_{SY}) 與起動轉矩 (T_{SY}) 分別為何？
(A) $I_{SY} = 40$ A、 $T_{SY} = 10$ N-m (B) $I_{SY} = 40$ A、 $T_{SY} = 30$ N-m
(C) $I_{SY} = 120$ A、 $T_{SY} = 10$ N-m (D) $I_{SY} = 120$ A、 $T_{SY} = 30$ N-m。

自我評量

- () 8. 某三相感應電動機以 Y- Δ 起動時，其起動轉矩為 250 N-m，若全壓起動之起動轉矩為 150 % 額定轉矩，則此電動機之額定轉矩為
(A) 50 N-m (B) 83.3 N-m (C) 500 N-m (D) 750 N-m。
- () 9. 三相感應電動機當全壓起動時起動電流為 200 A，起動轉矩為 50 N-m，若採自耦變壓器做降壓補償器把電源電壓降低 50 %，則一次側起動電流與轉矩分別為
(A) 50 A、12.5 N-m (B) 50 A、25 N-m
(C) 100 A、12.5 N-m (D) 100 A、25 N-m。
- () 10. 三相感應電動機當全壓起動時起動電流為 200 A，起動轉矩為 50 N-m，若採一次電抗降壓起動法把電源電壓降低 50 %，則起動電流與轉矩分別為
(A) 50 A、12.5 N-m (B) 50 A、25 N-m
(C) 100 A、12.5 N-m (D) 100 A、25 N-m。
- () 11. 一部三相感應電動機以全壓起動時，線路電流為 180 A，起動轉矩為滿載轉矩之 2 倍，如果以自耦變壓器來起動，起動時電動機所加之電壓為線路電壓的 60 %，則下列敘述何者為錯誤？
(A) 電源線路之起動電流為 108 A
(B) 起動轉矩為滿載轉矩之 0.72 倍
(C) 原電動機若以 Y- Δ 起動法來起動，則起動時線電流為 60 A
(D) 若以 Y- Δ 法起動，其起動轉矩為滿載轉矩之 0.667 倍。
- () 12. 有一台 5.5 kW 的三相感應電動機，以自耦變壓器做降壓起動，若置於 30 % 之分接頭時起動線路電流為 5 A，則全壓起動時線路電流為多少？ (A) 55.5 A (B) 16.67 A (C) 10.2 A (D) 7.14 A。
- () 13. 下列何種起動方法不適用於三相鼠籠式感應電動機？
(A) Y- Δ 降壓起動法 (B) 一次電抗降壓起動法
(C) 轉子加入電阻法 (D) 補償器降壓起動法。

自我評量

() 14. 三相繞線式感應電動機起動時，在轉子繞組中串加額外的電阻，其目的為何？

- (A) 提高起動電流及降低起動轉矩
- (B) 降低起動電流及降低起動轉矩
- (C) 提高起動電流及提高起動轉矩
- (D) 降低起動電流及提高起動轉矩。

4-2 () 15. 三相繞線式感應電動機，其轉子使用外加電阻控制轉速。當外加電阻愈大時，其轉速的變化為何？

- (A) 降低 (B) 升高 (C) 不變 (D) 立刻停止。

() 16. 下列感應電動機速度控制方法中，速度控制範圍最大者是

- (A) 變換轉子電阻 (B) 變換極數
- (C) 變換電源電壓 (D) 變換電源頻率。

() 17. 三相感應電動機無載運轉時，如欲增加轉速，可選用下列何種方法？

- (A) 減少電源頻率 (B) 增加電源頻率
- (C) 減少電源電壓 (D) 增加電動機極數。

() 18. 有一台 6 極、繞線式三相感應電動機，滿載時之轉差率為 5 %；今在轉子之每相電路上串接 2.5Ω 之電阻，轉差率變為 7.5 %。試求轉子每相電阻應為何？ (A) 1Ω (B) 5Ω (C) 45Ω (D) 50Ω 。

() 19. 如圖 (1)，某三相 4 極感應電動機，如以變極調速法來改變其速率，假設其 A 相之連接如圖 (a) 所示，若將其改接成如圖 (b) 連接，則其極數將改變為 (A) 2 極 (B) 4 極 (C) 6 極 (D) 8 極。

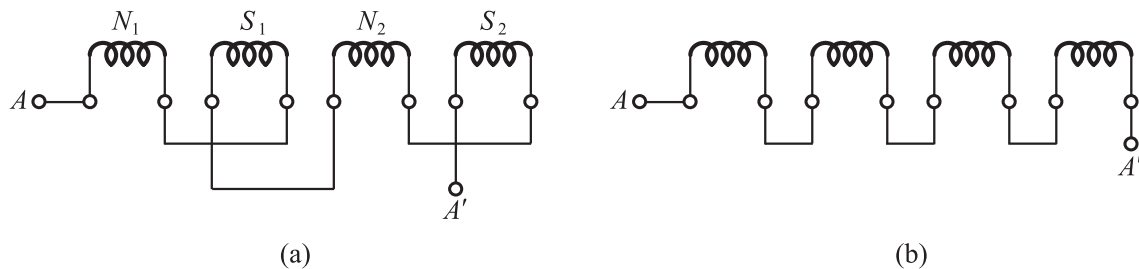
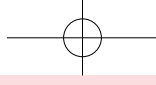


圖 (1)

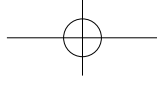
- 4-3** () 20.正在運轉中的三相感應電動機，欲使其反轉，下列何者錯誤？
- (A) 運轉過程中立刻改變任兩條電源線接線方向
 - (B) 將電動機停止後、改變任兩條電源線接線方向，再重新通電
 - (C) 選項 A、B 均可
 - (D) 選項 A、B 均不可。
- () 21.設 A 、 B 、 C 代表三相電源端，而 a 、 b 、 c 代表三相感應電動機接線端，當電動機正轉時，接法為 $A - a$ ， $B - b$ ， $C - c$ ，下列接法何者仍保持該機正轉？
- (A) $A - b$ ， $B - a$ ， $C - c$
 - (B) $A - b$ ， $B - c$ ， $C - a$
 - (C) $A - c$ ， $B - b$ ， $C - a$
 - (D) $A - a$ ， $B - c$ ， $C - b$ 。
- () 22.再生制動之特徵為
- (A) 有效利用電力
 - (B) 停轉時亦有制動力
 - (C) 設備簡單
 - (D) 停電時亦可制動。
- () 23.三相感應電動機的直流制動 (煞車) 原理，係將直流電流加入定子繞組，藉由繞組產生
- (A) 旋轉磁場
 - (B) 固定磁場
 - (C) 漏磁通
 - (D) 電樞反應，讓電動機能夠迅速停止。
- () 24.有關三相感應電動機之敘述，何者正確？
- (A) 三相繞組所建立的磁場大小是單相繞組的 3 倍
 - (B) 當轉差率 $S < 0$ 時，電動機轉向與旋轉磁場相反
 - (C) 發電制動是指將感應機之轉速超過同步轉速時，電動機變成發電機，產生反轉矩來制動
 - (D) 繞線式感應機採用轉子外加電阻控速時，在負載不變下，轉子轉速隨著轉子電阻增加而變慢。



自我評量

二、問答與計算題

1. 說明鼠籠式轉子感應電動機的起動方式。
2. 說明感應電動機 Y- Δ 降壓起動的原理與特性。
3. 變壓變頻 (VVVF) 的內容為何，感應電動機採用此控制法有何優點。
4. 說明三相感應電動機轉向控制的方式。
5. 有一部三相感應電動機以全壓起動時測得線路電流為 300 A，起動轉矩 150 牛頓－米，試問
 - (1) 採用 Y- Δ 降壓起動法，線路電流與起動轉矩各為多少？
 - (2) 採用補償器起動法，如接於 60 % 分接頭位置，電源側起動電流與起動轉矩各為多少？
 - (3) 採用電抗器降壓法，接於 60 % 位置，起動電流與起動轉矩各為多少？
6. 一部三相 4 極，60 Hz 之繞線式轉子感應電動機，轉子每相電阻為 0.5 Ω ，運轉於 1200 rpm 時產生最大轉矩，若
 - (1) 轉子每相電路外加電阻為 0.25 Ω ，則最大轉矩時轉速變為何？
 - (2) 要以最大轉矩起動，則轉子每相電路需外加多少電阻？



CHAPTER 5

單相感應電動機之原理

» 本章重點

前一單元所介紹的三相感應電動機，構造簡單、特性佳、機種齊全。但由於許多處所只有配置單相電源，因此也發展出使用單相電源的電動機，雖然構造簡單且性能稍差，但足以因應住家或是小型用戶動力需要。本章將介紹各種常用的單相感應電動機原理與特性。

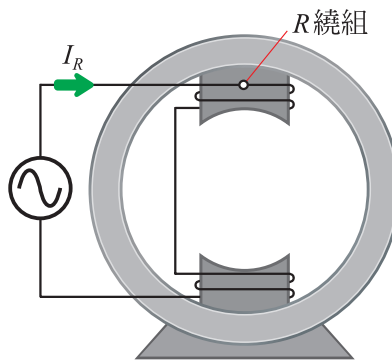
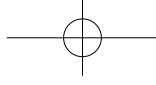
5-1 單相感應電動機之原理

一、雙旋轉磁場論

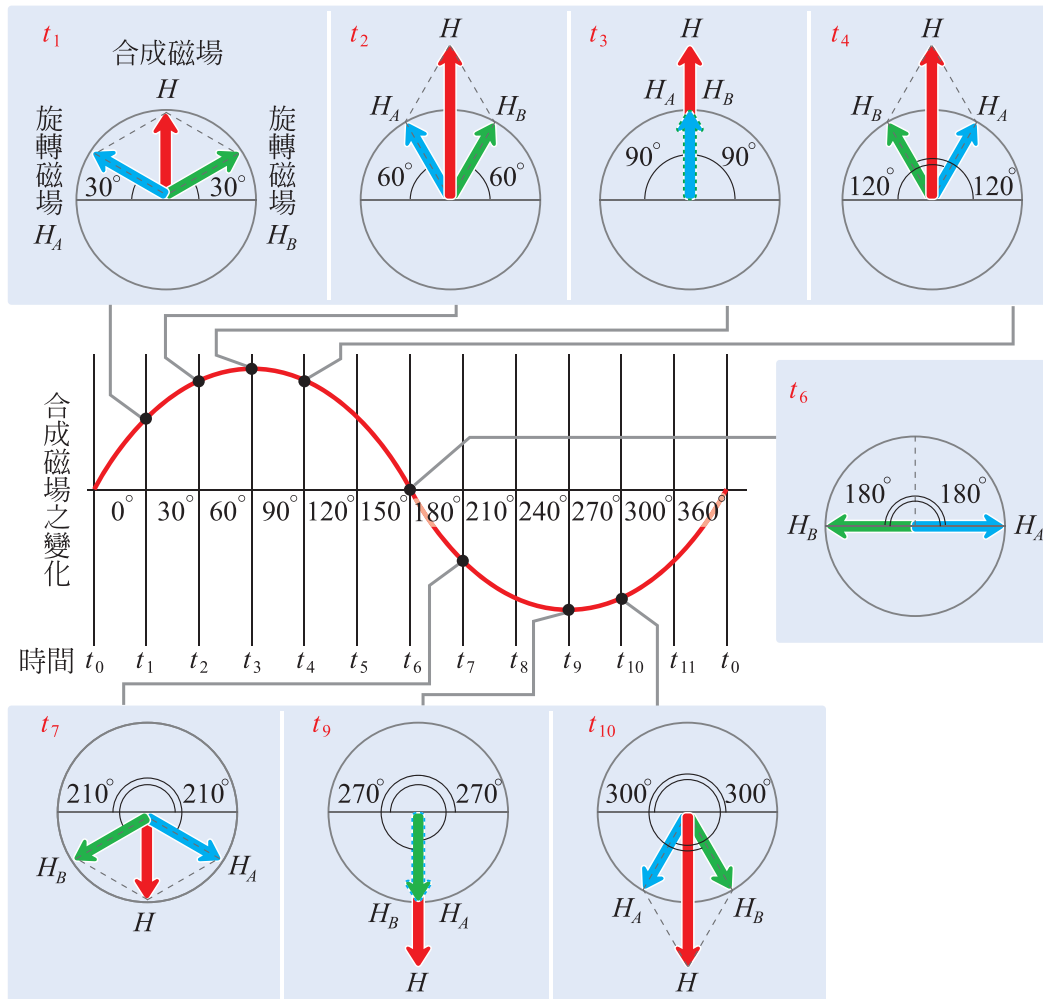
單相感應電動機的基本原理與三相感應電動機相同，配置於定子上的繞組外加交流電後產生磁場，轉子受到磁場切割感應出電流，因而產生轉矩而轉動。但是兩者最大的差異在於**三相感應電動機的三組繞組外加三相電源後，所產生是大小不變而位置隨時間變化的旋轉磁場**，至於**單相繞組外加單相電源後，只能產生位置交替變化而大小隨時間變化的脈動磁場**，因此只有一個繞組的單相感應電動機**無法自行起動**，必須藉由外力或其他繞組輔助，其原理如下所述：

將圖 5-1(a) 定子上的 R 繞組外加單相交流電源後，合成磁場的變化如圖 5-1(b) 所示，其中：

1. t_1 時 ($\omega t = 30^\circ$)：電流 I_R 大小為最大值的 $\frac{1}{2}$ ，因此合成磁場的強度 (H) 為最大值的一半 $\left(H = \frac{1}{2} H_m \right)$ ，依據安培右手定則可知 R 繞組所生磁場方向由下往上，合成磁場 (H) 可以分解成大小相等的磁場 H_A (與 $-x$ 軸夾角 30°) 與 H_B (與 x 軸夾角 30°)。

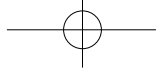


(a) 單繞組感應電動機



(b) 單相脈動磁場分解圖

圖 5-1 雙旋轉磁論



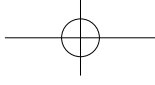
2. t_2 時 ($\omega t = 60^\circ$)：電流 I_R 大小為最大值的 $\frac{\sqrt{3}}{2}$ ，合成磁場強度 (H) 為最大值的 $\frac{\sqrt{3}}{2}$ 倍 $\left(H = \frac{\sqrt{3}}{2} H_m \right)$ ， R 磁場方向維持由下往上，此合成磁場 (H) 同樣分解成大小相等的磁場 H_A (與 $-x$ 軸夾角 60°) 與 H_B (與 x 軸夾角 60°)。與 t_1 時間比較， H_A 與 H_B 磁場強度不變，但是 H_A 朝順時針前進至 60° 位置、而 H_B 則朝逆時針前進至 60° 位置。
3. t_3 時 ($\omega t = 90^\circ$)：電流 I_R 大小為最大值，合成磁場強度 (H) 也為最大值 ($H = H_m$)， R 磁場方向維持由下往上；將合成磁場分解後可以得到 H_A 與 H_B 磁場大小不變，但 H_A 朝順時針前進到 y 軸、而 H_B 則朝逆時針前進到 y 軸，由於兩者位置重疊，合成磁場為單一個旋轉磁場的 2 倍。

依據上述結果推導，單相感應電動機內之磁場變化可以分解為兩個大小相等 $\left(H_A = H_B = \frac{H_m}{2} \right)$ 、速度相同 $\left(n_s = \frac{120f}{P} \right)$ ，但旋轉方向相反的磁場所合成，此現象稱為雙旋轉磁場論。

兩旋轉磁場分別使得轉子感應電流而產生轉矩 T_A 與 T_B ，其轉矩 - 轉差率曲線及合成結果如圖 5-2。起動瞬間由於轉子轉速為 0，因此轉差率 $S = 1$ ，兩旋轉磁場所產生的轉矩 T_A 與 T_B 大小相等但方向相反，造成電動機無法自行起動。此時若用手以順時針撥動轉軸，造成轉矩值 T_A 瞬間超過 T_B ，轉子會沿著轉矩 T_A 作用之順時針方向加速，兩轉差率差距變大，轉矩 T_A 愈大且 T_B 愈小，轉子很快上升到接近同步轉速。相對的若起動時用手改以逆時針撥動轉軸，則單相感應電動機循逆時針方向轉動，而加速至同步轉速附近。因此單繞組的單相感應電動機無法自行起動，但透過外力起動後恆依被起動方向持續旋轉。

當單相感應電動機的轉子以順時針方向旋轉時，倘若其轉速為 n_r 、相對於順時針轉向之旋轉磁場而言，正轉轉差率

$$S_A = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (5-1)$$



相對於逆時針轉向之旋轉磁場而言，反轉轉差率

$$S_B = \frac{n_s - (-n_r)}{n_s} = 2 - S_A \quad (5-2)$$

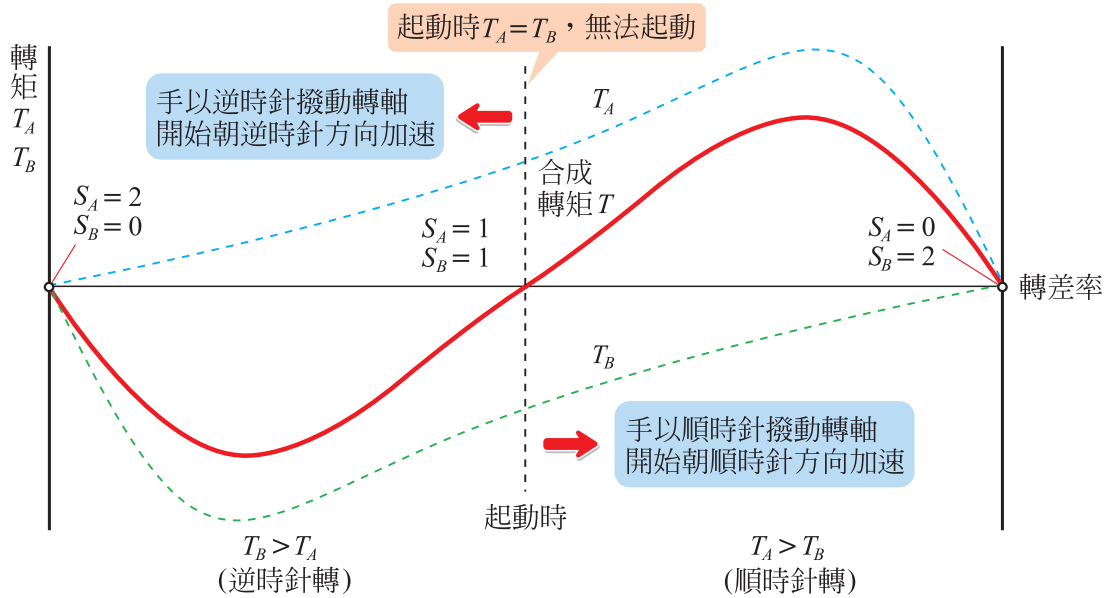


圖 5-2 轉矩與轉差率的關係

範例

01

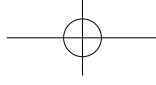
有一部 110 V、50 Hz、1/4 hp、6 極單相感應電動機，滿載時測得轉子轉速 900 rpm，則正轉旋轉磁場與反轉旋轉磁場的轉差率分別為何？

解 旋轉磁場轉速： $n_s = \frac{120f}{P} = \frac{120 \times 50}{6} = 1000 \text{ rpm}$

正轉旋轉磁場之轉差率： $S_1 = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{1000 - 900}{1000} = 0.1$

反轉旋轉磁場之轉差率： $S_2 = \frac{n_s - (-n_r)}{n_s} = \frac{1000 - (-900)}{1000} = 1.9$

或 $S_2 = 2 - S_1 = 2 - 0.1 = 1.9$



隨堂練習

- () 1. 單相感應電動機之定子繞組接入單相交流電時，在氣隙所形成之磁場可視為下列何者？ (A) 單旋轉磁場 (B) 單固定磁場 (C) 雙旋轉磁場 (D) 雙固定磁場。
- () 2. 單相感應電動機其定子線圈中，若通以正弦電流時，將產生大小相等，方向相反之兩旋轉磁場，設轉子對於正轉旋轉磁場之轉差率為 S ，則其對於反轉旋轉磁場之轉差率為 (A) S (B) $1-S$ (C) $1+S$ (D) $2-S$ 。

二、兩相電源產生旋轉磁場

將圖 5-1 所示的合成磁場 (H) 變換情形簡化成圖 5-3 後，可以發現合成磁場方向只在 $+Y$ 軸與 $-Y$ 軸交替變換，而大小隨時間變化，此現象被稱為單相脈動磁場。每次正負半週交換瞬間，磁場 N、S 立刻交換位置，此種脈動磁場造成轉子無法自行起動。

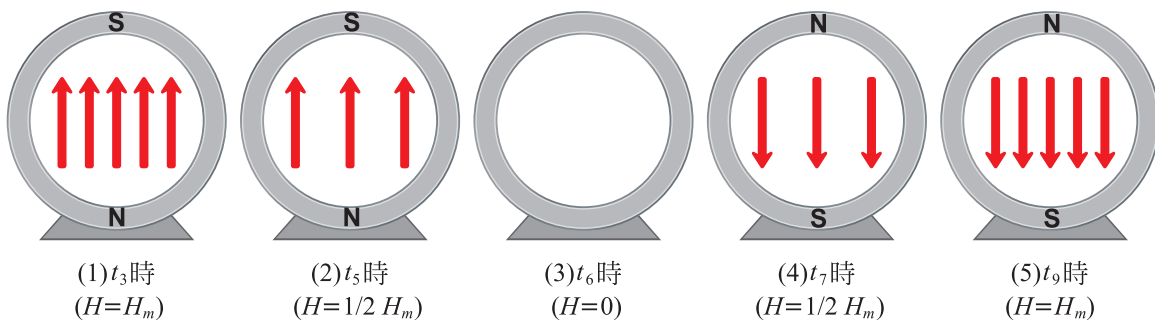
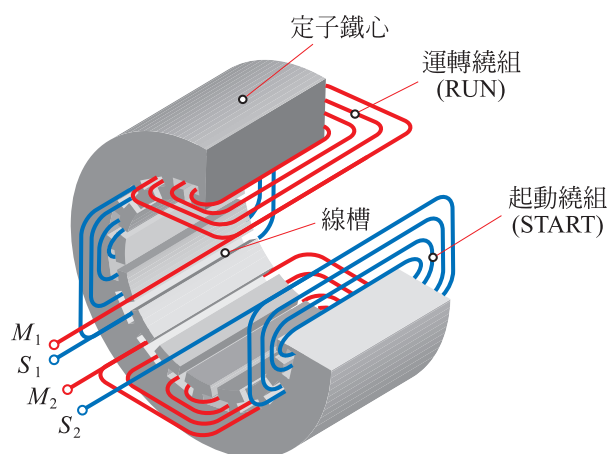
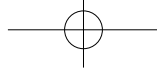
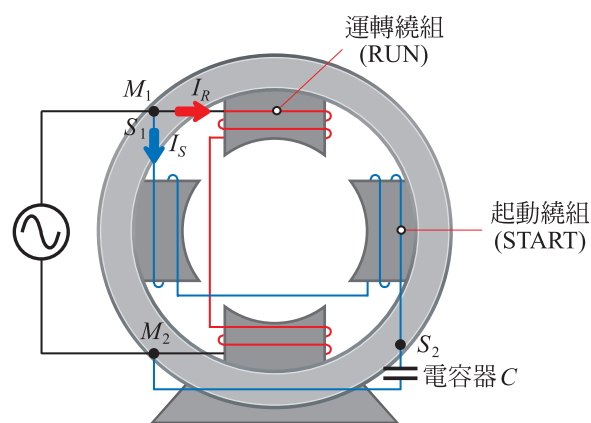


圖 5-3 單相脈動磁場的交變情形

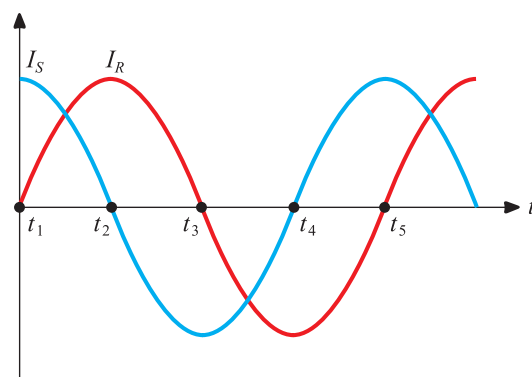
為了使單相感應電動機能夠自行起動，常用的做法是如圖 5-4(a)，在定子鐵心槽內分別繞製運轉繞組 (run winding) 或稱為主繞組 (main winding) 以及起動繞組 (start winding) 或稱為輔助繞組 (auxiliary winding)，兩繞組空間上相差 90° 電機角，再以圖 5-4(b) 方式連接，並透過電容器將單相電源分相，電路上產生如圖 5-4(c) 所示互隔 90° 電機角的兩相電流。



(a) 繞組外觀圖



(b) 繞組接線圖



(c) 兩相電流互隔 90° 電機角

圖 5-4 起動繞組與運轉繞組配置

當兩相電流分別進入二組繞組後，依據右螺旋定則可得磁場變換結果如圖 5-5，定子形成一個逆時針旋轉的磁場，轉子受磁場牽引朝逆時針開始旋轉。

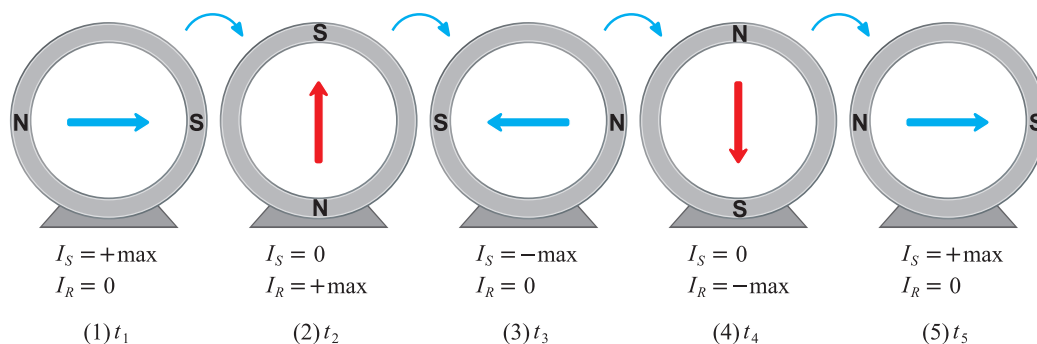


圖 5-5 兩組繞組產生的旋轉磁場 (逆時針)

圖 5-6(a) 是將單相感應電動機的起動繞組接線位置對調後，同樣加入圖 5-4(c) 的兩相電流，由於起動繞組電流方向相反，使得定子形成如圖 5-6(b) 所示的順時針旋轉磁場，轉子改朝順時針方向旋轉。

若是起動繞組不動改將運轉繞組兩線端對調，同樣也能夠使得轉子反轉。但若將兩組繞組接線同時對調或是電源兩端對調，轉向則會維持不變。

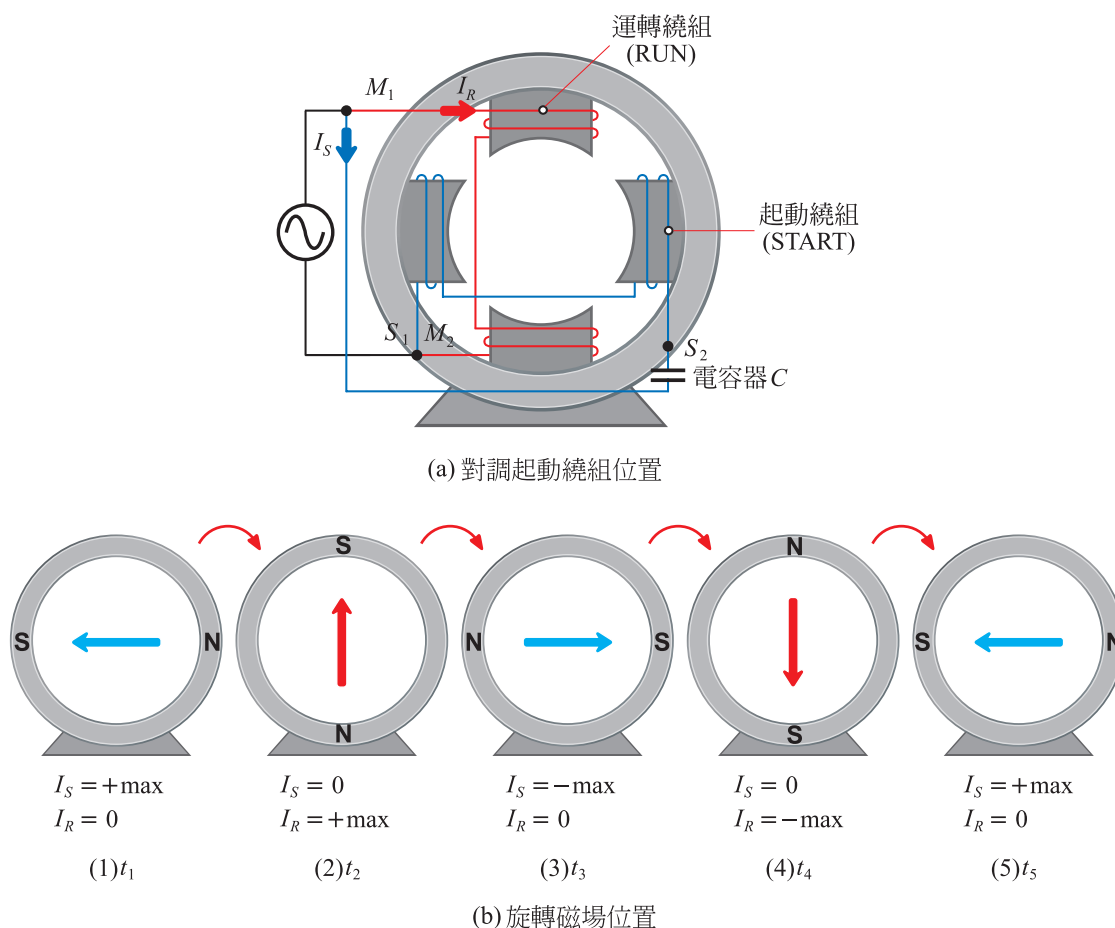
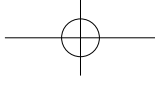


圖 5-6 兩組繞組產生的旋轉磁場 (順時針)

依據前一節雙旋轉磁場理論所述，單相感應電動機一旦以任意方向起動後，即便將起動繞組切離，轉子仍會依循起動方向持續旋轉至接近同步轉速，因此單相感應電動機常以離心開關 (centrifugal switch) 或各式起動器，在起動完畢後將起動繞組切離，以減少損失並可穩定運轉。



隨堂練習

- () 1. 實習過程中拆解一部單相感應電動機，觀察定子上的起動繞組與運轉繞組的裝置位置，發現彼此間隔 45 度機械角，則該機定子磁極數為何？
(A)2 極 (B)4 極 (C)6 極 (D)8 極。
- () 2. 下列有關單相感應電動機之敘述，何者正確？ (A) 只有運轉繞組時也能起動，但轉矩較小 (B) 將電源之兩線對調，即可逆轉 (C) 將起動繞組與運轉繞組之兩接線端同時對調，即可逆轉 (D) 將起動繞組或運轉繞組之接線端對調，即可逆轉。

5-2 單相感應電動機之構造及分類

一、單相感應電動機之構造

單相感應電動機之構造與三相感應電動機大致相同，主要包括下列部分：

(一) 定子

圖 5-7(a) 為單相感應電動機的定子，包括外殼、鐵心、起動繞組與運轉繞組。

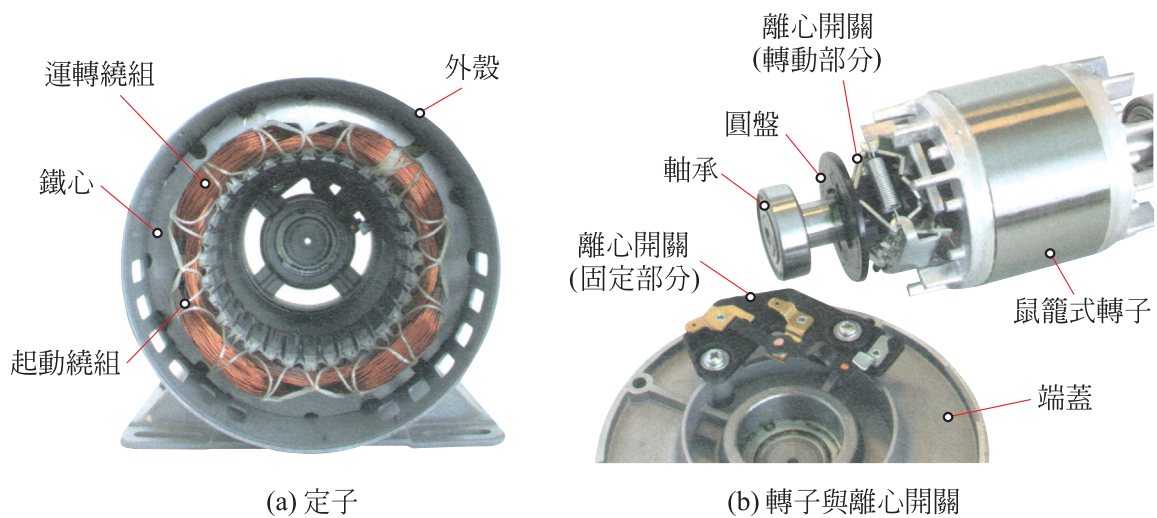
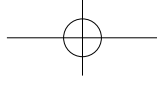


圖 5-7 單相感應電動機之構造 (分相式)
(圖片來源：日立電機)



(二) 轉子

單相感應電動機多為小容量，因此大多採用鼠籠式轉子。

(三) 離心開關

離心開關構造如圖 5-7(b) 分成固定及轉動兩部份，固定部份安裝於端蓋，內部有一個彈簧銀接點；轉動部份固定於轉軸上，內部為一個離心機件。電動機停止時，離心機件前方圓盤頂住固定部份，使銀接點閉合 (ON)。當**電動機轉速上升到額定轉速的 75 % 左右時**，因離心力作用，轉軸上的離心機件動作將圓盤向後位移，造成固定部分的銀接點打開 (OFF)，以便將起動繞組切離電路。

為可以順利旋轉，單相感應電動機必須加裝起動繞組與離心開關，造成體積大、價格高、效率低、功因也低。因此大型用戶或是有三相電源的場合，應該優先選用三相感應電動機。對於僅有單相電源的住家或是小型工廠，就只能使用單相感應電動機。依據臺電營業規則第 35 條規定：



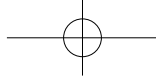
110 V 單相感應電動機以 1 hp 為限、220 V 電動機以 3 hp 為限。但無三相電源或其他特殊原因 (如窗型冷氣機)，110 V 單相感應電動機得放寬至 2 hp、220 V 電動機得放寬至 5 hp。

二、單相感應電動機之分類

為了符合不同的運轉需要，單相感應電動機會有不同的設計，依據其起動方法可分為：

(一) 分相式電動機 (split-phase motor)

定子鐵心內分別繞有起動繞組與運轉繞組，兩繞組使用的導線線徑與匝數都不同。由於兩者阻抗值不同，單相電源經兩繞組後即分裂為不平衡之兩相電流，產生不平衡旋轉磁場，使轉子感應電流產生轉矩而開始旋轉。



(二) 電容器式電動機 (capacitor motor)

爲了提升分相式電動機的性能，圖 5-8 的電容器式電動機除了定子內有起動繞組與運轉繞組，還會加裝 1 到 2 個交流電容器或搭配離心開關，因此又分成下列三種型式：

1. 電容器起動式電動機 (capacitor-start motor)。
2. 電容器運轉式電動機 (capacitor-run motor)，或稱爲永久電容器式電動機。
3. 雙值電容器式電動機 (capacitor-start capacitor-runmotor)。

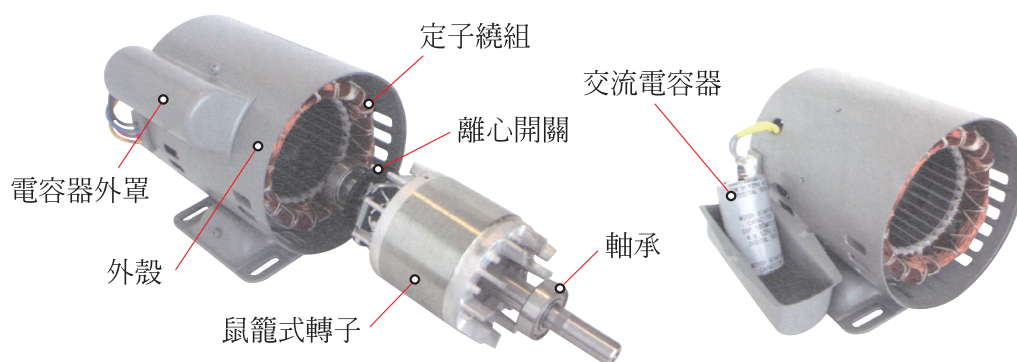


圖 5-8 單相感應電動機之構造 (電容器式)
(圖片來源：日立電機)

(三) 蔽極式電動機 (shaded-pole motor)

圖 5-9 爲蔽極式電動機的構造，定子鐵心內只安裝一組線圈，但在鐵心兩側分別套上蔽極線圈 (shading coil) 或是銅環，藉以產生移動磁場，幫助轉子起動。

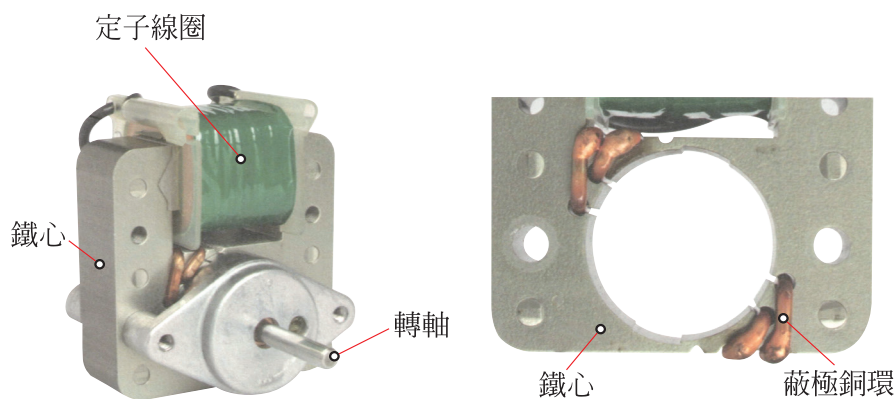
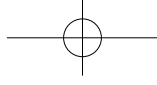


圖 5-9 蔽極式電動機
(圖片來源：米子株式會社)

**隨堂練習**

- () 1. 下列何者電機，必須藉由輔助電路幫忙，才能起動運轉？ (A) 直流分激電動機 (B) 三相感應電動機 (C) 單相感應電動機 (D) 直流永磁式電動機。
- () 2. 單相感應電動機之離心開關，大約於同步轉速的多少百分比時動作將起動繞組切離？ (A) 95 % (B) 75 % (C) 60 % (D) 50 %。
- () 3. 單相蔽極式電動機的蔽極線圈其作用是 (A) 減少起動電流 (B) 幫助起動 (C) 提高效率 (D) 提高功率因數。

5-3 單相感應電動機之起動、特性及用途

單相感應電動機的分類如圖 5-10，本節將依序介紹各機種的原理與特性。

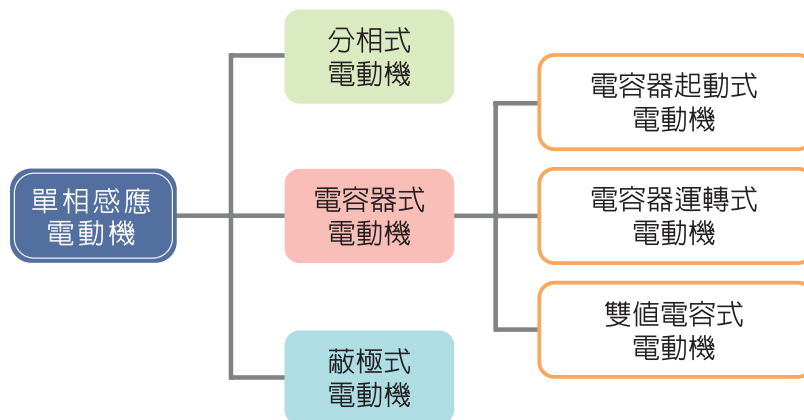
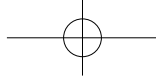


圖 5-10 單相感應電動機的分類

一、分相式電動機

分相式電動機的定子線槽內裝有兩組繞組，彼此互隔 90° 電機角，其中：

1. 運轉繞組：或稱為行駛繞組或主繞組。繞組用較粗的導線、較多的匝數，裝置在槽的底層，因此電阻較低而電感抗較高。
2. 起動繞組：或稱為輔助繞組。繞組用較細的導線、較少的匝數，裝置在槽的上層靠近空氣隙，因此電阻較高而電感抗較低。



分相式電動機之接線如圖 5-11(a)，起動繞組 (S_1-S_2) 串聯離心開關後，與運轉繞組 (M_1-M_2) 並聯接於單相電源。由於起動繞組電感值較運轉繞組小，由圖 5-11(b) 可知，**起動繞組電流落後電壓的相位 (θ_s) 較運轉繞組電流 (θ_m) 小**，兩繞組在不同時間分別產生磁場，此現象如同自起動繞組朝向運轉繞組方向之旋轉磁場。磁場切割鼠籠式轉子產生轉矩，使轉子依循旋轉磁場方向開始轉動。

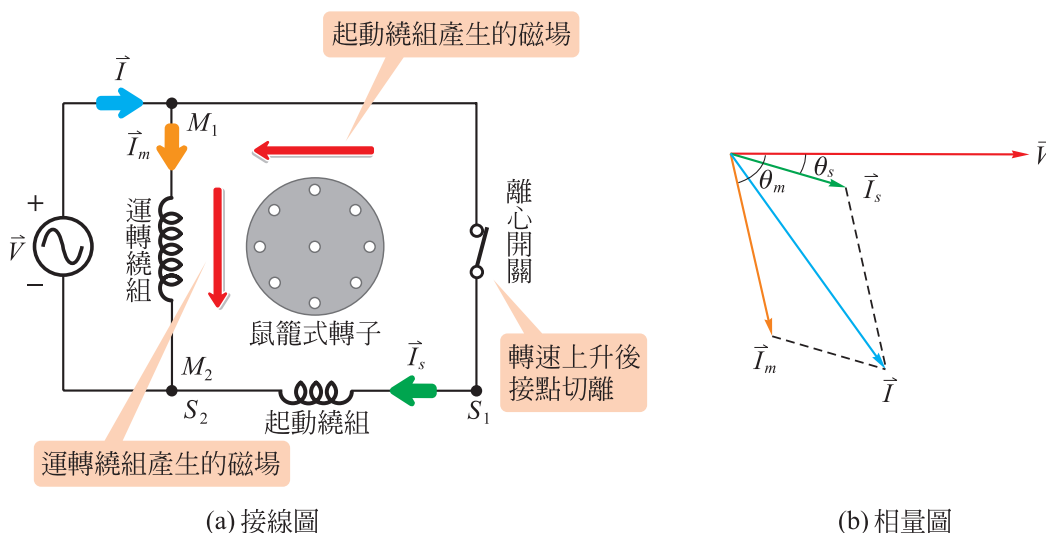


圖 5-11 分相式感應電動機

分相式電動機起動後，當轉速升至約額定轉速的 75 % 左右時，**離心開關藉離心作用動作 (ON 變成 OFF)**，將**起動繞組切離線路**，由運轉繞組單獨作用就能維持電動機繼續運轉，藉以減少損失，提升效率。當電源切離後，隨著轉子轉速下降，離心力消失使得離心開關回到閉合 (ON) 狀態，為下次起動預作準備，其轉矩特性可參考圖 5-12。

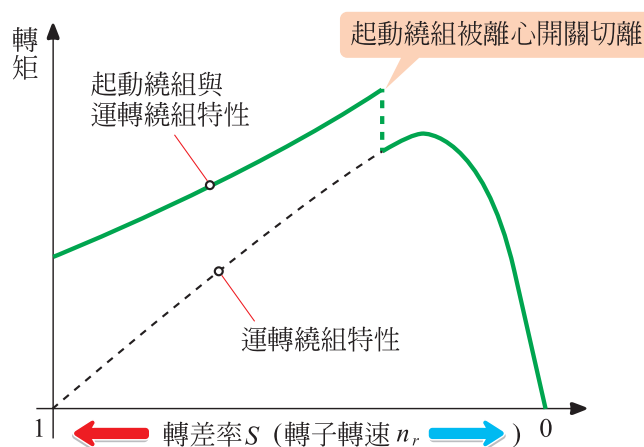
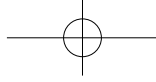


圖 5-12 分相式感應電動機轉矩特性曲線

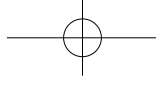


若是起動繞組沒有隨著轉速上升而切離，其磁場除了干擾運轉繞組的雙旋轉磁場，致使轉子運轉不順，轉速無法上升外，由於起動繞組線徑細、匝數少，長時間通電下容易發熱燒毀，造成下次無法起動，此為單相感應電動機常見的故障原因。

由圖 5-11(b) 相量圖可以看出，分相式電動機之運轉繞組電流 ($\bar{I}_m$) 與起動繞組電流 ($\bar{I}_s$) 相位差並非理想的 90° 電機角，而且兩者磁場大小不同，因此分相式電動機起動轉矩小 (約為滿載轉矩之 1.5 倍~2 倍)，起動電流大 (滿載電流之 5 倍~7 倍)；一般使用在小型工具機，抽水機及送風機等較易起動之負載。欲改變分相式電動機之旋轉方向，可先將電源切離後，將運轉繞組或起動繞組之兩接線端對調再重新通電即可。

隨堂練習

- () 1. 為了讓單相分相式感應電動機能夠順利起動，有關主繞組 (運轉繞組) 的電路設計特性，下列何者正確？
- (A) 低電阻、低電感 (B) 低電阻、高電感
(C) 高電阻、低電感 (D) 高電阻、高電感。
- () 2. 下列有關單相分相式感應電動機之敘述，何者錯誤？
- (A) 起動繞組與運轉繞組在空間上互成 90° 度電機角
(B) 起動繞組電流相位較運轉繞組落後
(C) 起動完畢，離心開關將起動繞組切離電路
(D) 將起動繞組或運轉繞組之接線對調，即可逆轉。



二、電容器式電動機

爲了提升分相式電動機的性能，另外會在電路上串接電容器就稱爲電容器式電動機，常用的交流電容器有兩種類型：

1. 乾式電解電容器：體積小、容量大、價格低，適合間歇使用之場所。
2. 油浸式電容器：體積大、容量小、價格較高，適合長時間使用之場所。

電容器式電動機依其構造與接線方式分爲電容器起動式、電容器運轉式及雙值電容器式等三種類型。

(一) 電容起動式

電容器起動式電動機的接線如圖 5-13(a)，**起動繞組串聯乾式電解電容器與離心開關後，再與運轉繞組並聯接於單相電源。**

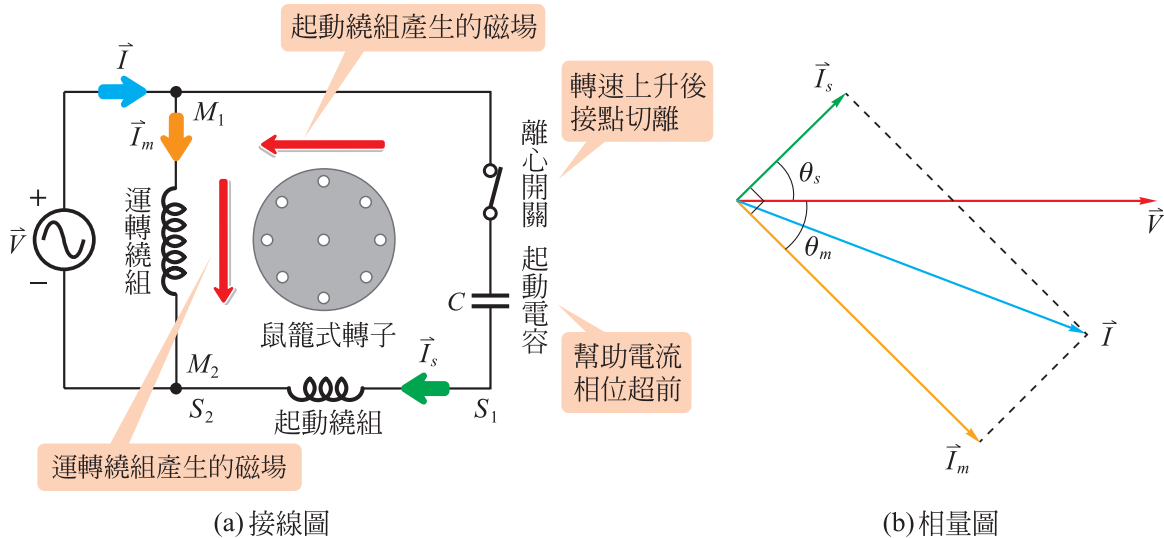
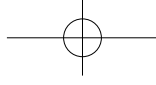


圖 5-13 電容起動式感應電動機



依據繞組阻抗值選擇適當容量的電容器，相量關係如圖 5-13(b)，可以使起動繞組電流的相位 (θ_s) 超前運轉繞組電流 (θ_m) 達 90° 電機角，由於兩繞組產生的磁場交互作用，使轉子產生大起動轉矩而開始轉動，當轉速升至約額定轉速的 75% 左右時，離心開關動作將起動繞組切離線路，由運轉繞組產生的旋轉磁場牽引轉子持續旋轉。

電容器起動式電動機轉矩特性如圖 5-14 所示，起動轉矩可高達滿載轉矩的 3.5 倍～4 倍，但是運轉時的功率因數與效率較差；適用於需要高起動轉矩之場合，如壓縮機、冷凍、空調設備及不易起動之負載。其轉向之變換方式與分相式電動機相同，電源切離後將運轉繞組或起動繞組之兩接線端對調，再重新通電即可。

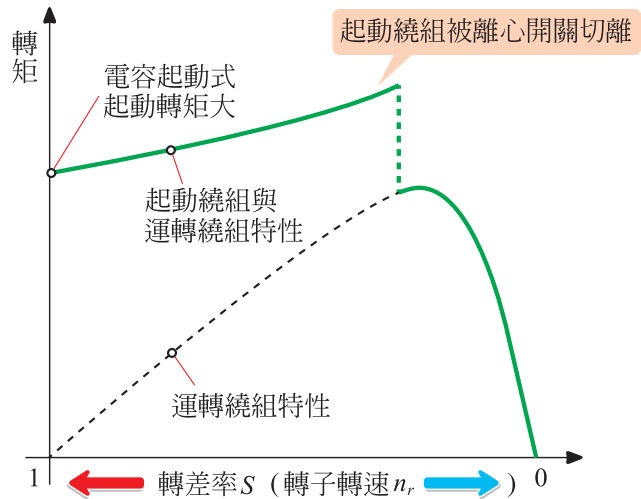


圖 5-14 電容起動式感應電動機轉矩特性曲線

圖 5-13 中假設運轉繞組的阻抗值 ($Z_m = R_m + jX_m$)，起動繞組的阻抗值 ($Z_s = R_s + jX_s$)，為使起動繞組電流 ($\bar{I}_s$) 超前運轉電流 ($\bar{I}_m$) 達 90° 電機角，所需串聯之電容抗為：

$$X_c = X_s + \frac{R_s \times R_m}{X_m} \quad (5-3)$$

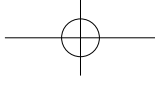
R_s ：起動繞組電阻值 (Ω)

X_s ：起動繞組電抗值 (Ω)

R_m ：運轉繞組電阻值 (Ω)

X_m ：運轉繞組電抗值 (Ω)

X_c ：電容器電抗值 (Ω)



電容器的電容量為：

$$C = \frac{1}{2\pi f X_c} \quad (5-4)$$

C ：電容量 (F)

f ：電源頻率 (Hz)

範例

02

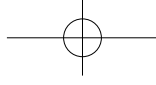
有一台 1/3 hp、110 V、60 Hz 單相電容起動式電動機，已知運轉繞組之阻抗值 $Z_m = 4.5 + j3.7 \Omega$ ，起動繞組之阻抗值 $Z_s = 9.5 + j3.5 \Omega$ ，起動瞬間欲使起動繞組電流超前運轉繞組 90° 電機角，則起動繞組應該串聯多少容量的電容器？

解 (1) 起動繞組需串聯之電容抗為： $X_c = X_s + \frac{R_s \times R_m}{X_m} = 3.5 + \frac{9.5 \times 4.5}{3.7} \doteq 15 \Omega$

(2) 電容器容量： $C = \frac{1}{2\pi f X_c} = \frac{1}{2 \times 3.14 \times 60 \times 15} \doteq 177 \mu\text{F}$

隨堂練習

- () 1. 實習課程中，要裝配單相電容器起動式感應電動機，有關電容器的接線方式，下列何者正確？
- (A) 電容器與運轉繞組串聯 (B) 電容器與起動繞組串聯
(C) 電容器與運轉繞組並聯 (D) 將電容器與電源兩端並聯。
- () 2. 如要使單相電容器式感應電動機之旋轉方向逆轉，可選用何種方法？
- (A) 運轉繞組兩端的接線維持不變，起動繞組兩端的接線相互對調
(B) 運轉繞組兩端的接線相互對調，而且起動組兩端的接線也要相互對調
(C) 運轉繞組與起動繞組的接線不變，由電源線兩端接線相互對調反接
(D) 僅調換電容器兩端的接線即可。



(二) 電容器運轉式

電容器運轉式又稱為永久電容式，接線方式如圖 5-15(a)，由於沒有離心開關，因此起動繞組會與電路持續連接，所以起動繞組也可稱為輔助繞組。

輔助繞組的線徑與匝數常會設計成跟運轉繞組相同，兩者產生之磁勢相同，再透過輔助繞組上所串聯的油浸式電容器，使得輔助繞組之電流相位超前運轉繞組。運轉過程中兩繞組持續產生旋轉磁場，可視為兩相感應電動機，以提升運轉時的轉矩、功率因數與效率。

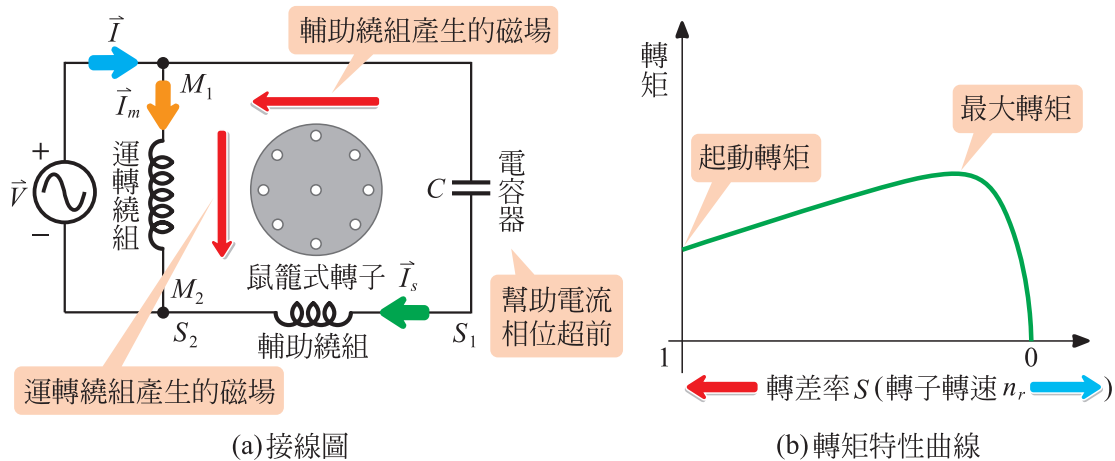


圖 5-15 電容器運轉式感應電動機

電容器運轉式感應電動機的轉矩特性如圖 5-15(b)，轉矩變化較平滑。由於所串聯之電容器是針對運轉時能夠產生額定轉矩所選用，對於起動而言其電容值太小，因此電容器運轉式電動機起動轉矩較小（約為滿載轉矩的 0.5 倍～1 倍）。

電容器運轉式電動機沒有離心開關，構造簡單，轉速與轉向控制比較簡單，因此適合於不需要高起動轉矩的場合，其轉向之變換方式除了可以將運轉繞組或輔助繞組之兩接線端對調外，也可以利用切換開關搭配電容器方式即可。

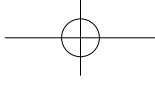


圖 5-16 為坊間常見的吸排兩用電扇電路圖，定子鐵心內裝有互隔 90° 電機角的 A 、 B 兩繞組，兩者線徑與匝數完全相同，利用電容器與切換開關可進行正反轉控制。

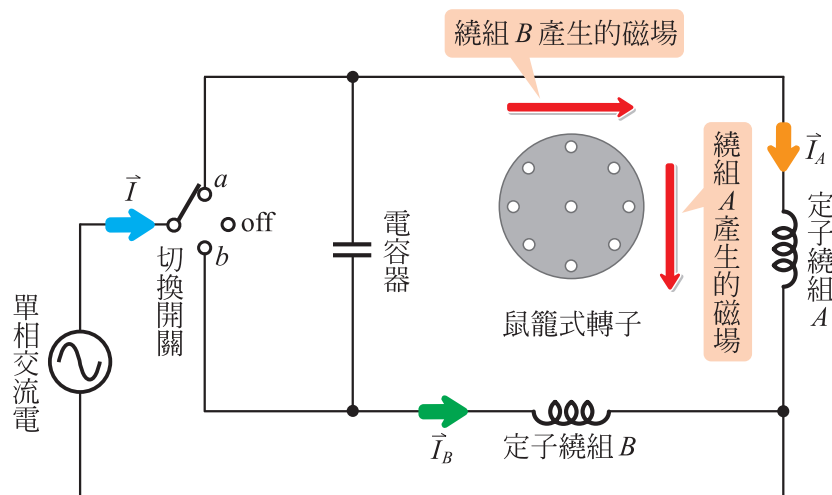


圖 5-16 永久電容器式電動機轉向控制

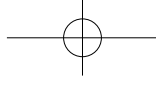
當切換開關切於「 a 」位置時，電容器與繞組 B 串聯，因此電流 $\vec{I}_B$ 相位超前 $\vec{I}_A$ ，此時繞組 B 稱為輔助繞組，繞組 A 稱為運轉繞組，假設此時旋轉磁場方向使得轉子朝順時針方向旋轉。若將開關改切於「 b 」位置時，電容器改與繞組 A 串聯，因此電流 $\vec{I}_A$ 相位超前 $\vec{I}_B$ ，繞組 A 變成輔助繞組，繞組 B 為運轉繞組，由於所產生的旋轉磁場方向相反，因此轉子將隨之改以逆時針方向旋轉。

隨堂練習

- () 1. 單相永久電容器式電動機，其電容器和電動機之接線為
 - (A) 與運轉繞組串聯且起動後仍接通
 - (B) 與運轉繞組串聯但起動後切斷
 - (C) 與輔助繞組串聯且起動後仍接通
 - (D) 與輔助繞組串聯但起動後切斷。
- () 2. 如圖所示是工場常使用的吸排兩用通風扇，其正反轉之切換原理是利用？
 - (A) 將電源兩端反接
 - (B) 變換齒輪組合
 - (C) 將起動繞組兩端對調
 - (D) 切換電容器之接線位置。



圖片來源：太星電工



(三) 雙值電容器式

雙值電容器式電動機係採用兩個電容器，其中運轉電容器 C_R 採用低容量的油浸式電容器，起動電容器 C_S 採用高容量的電解電容器。

雙值電容器式電動機之接線如圖 5-17(a)，起動時離心開關閉合，兩只電容器並聯後串接於輔助繞組，目的是讓輔助繞組電流超前運轉繞組 90° 電機角，以獲得大的起動轉矩（約為滿載轉矩的 1.5 倍～2.5 倍）。當轉速上升後，離心開關將起動電容器切離，低容量的運轉電容器仍留在電路中，以電容器運轉式的狀態持續運轉，以獲得較佳的運轉效率與功率因數，圖 5-17(b) 則為其轉矩特性曲線。

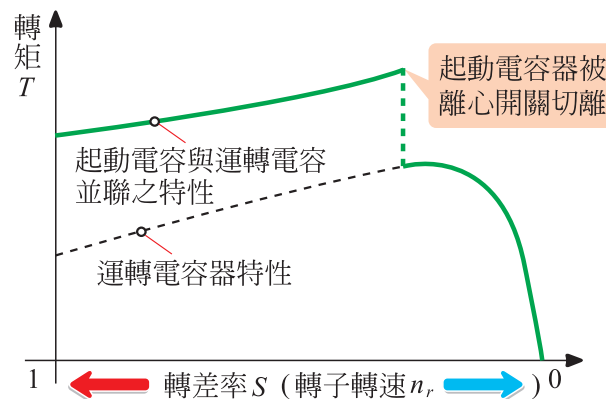
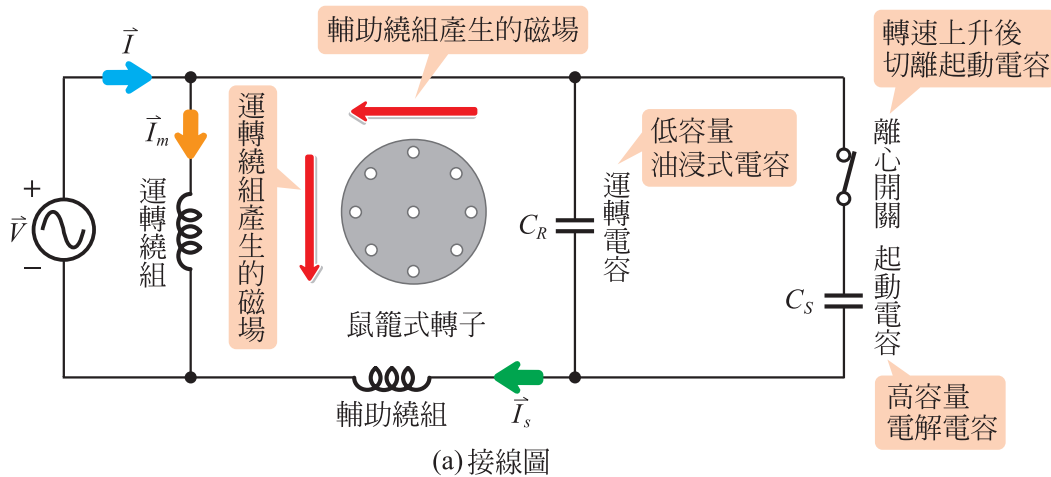
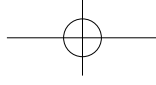


圖 5-17 雙值電容器式電動機



雙值電容器式構造較為複雜、價格較高，但是具有不錯之起動及運轉特性，因此用於需要大起動轉矩且長時間運轉的場所，例如泵浦、壓縮機、冷凍機、工作機械等。其轉向控制如同分相式電動機，電源切離後將運轉繞組或輔助繞組之兩接線端對調，再重新通電即可。

隨堂練習

- () 1. 要設計一部雙值電容器式感應電動機，所選用的運轉電容器 C_r 及起動電容器 C_s 型式，下列何者正確？
- (A) C_r 採用低容量的交流電解質電容器
 - (B) C_s 採用低容量的交流電解質電容器
 - (C) C_r 採用高容量的交流電解質電容器
 - (D) C_s 採用高容量的交流電解質電容器。

三、蔽極式電動機

蔽極式電動機的外觀如圖 5-18，定子鐵心內僅裝設一組線圈接於單相交流電源，而兩側磁極約 1/3 處開槽，槽內以低電阻的線圈或是銅環自成短路。轉子則是使用鼠籠式。

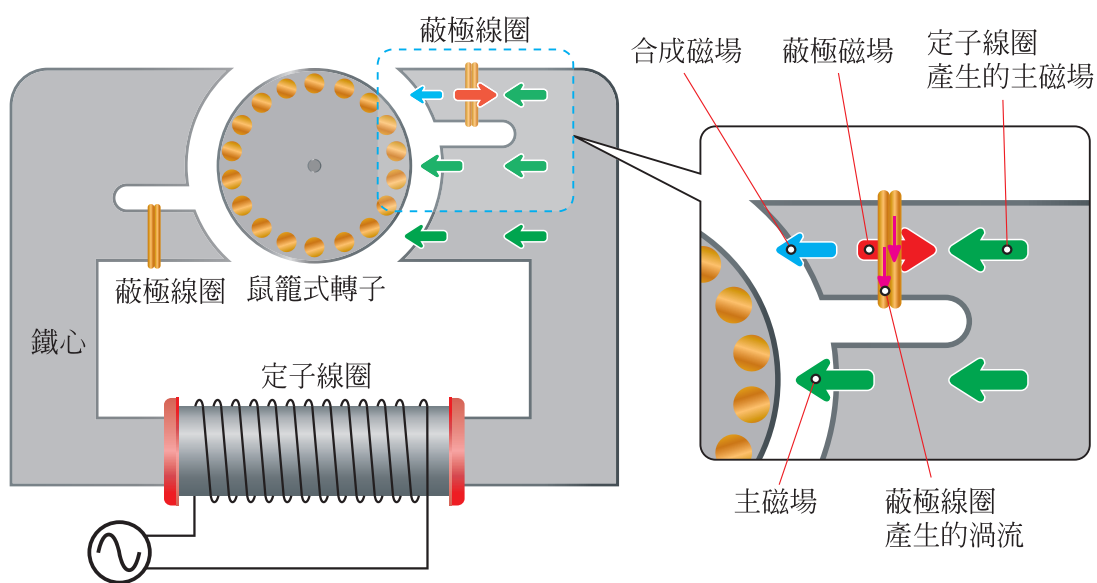
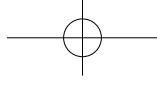


圖 5-18 蔽極式電動機



當定子線圈外加單相電源後，定子線圈產生的主磁場通過磁極準備進入轉子，其中部分磁場穿過蔽極線圈時，造成蔽極線圈產生應電勢而有渦流發生。根據楞次定律，蔽極線圈渦流所形成的蔽極磁場會反抗主磁場之變動，造成**通過蔽極側的合成磁通較主磁極磁通落後，如同磁場由磁極的未蔽極處移動到蔽極處。此移動磁場與鼠籠式轉子作用產生轉矩，使得轉子從未蔽極方向往蔽極方向轉動。**以圖 5-18 為例，右側磁極產生向上的移動磁場、左側磁極產生向下的移動磁場，因此轉子會以逆時針方向開始旋轉。

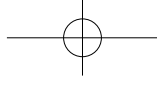
蔽極式電動機的構造簡單耐用，價格便宜，但是起動轉矩很小、效率及功率因數也很差，因此應用於不需要大起動轉矩之小容量場合，如小型吹風機、風扇、放映機等。**若要改變蔽極式電動機轉向，則必須改變蔽極線圈裝置的位置。**

隨堂練習

- () 1. 蔽極式單相感應電動機中，有關蔽極線圈的功能為何？
(A) 減少起動電流 (B) 幫助起動 (C) 提高效率 (D) 提高功率因數。
- () 2. 有關蔽極式電動機旋轉方向之判斷依據，下列何者正確？
(A) 由電源接線方式決定 (B) 由磁極蔽極處至未蔽極處
(C) 由磁極未蔽極處往蔽極處 (D) 由定子線圈繞置方式決定。

5-4 單相感應電動機之速率控制

感應電動機轉子轉速 $n_r = (1-S)n_s = (1-S)\frac{120f}{P}$ ，由於單相感應電動機都採用鼠籠式轉子，無法透過改變轉子電阻來控制轉速，因此只能由定子繞組著手，藉由改變電源頻率 f 、定子磁極數目 P 以及電源電壓等方式進行，控制原理與第四章所學之三相感應電動機的速率控制相同，只是電路設計上有所差異。



一、改變外加電壓控速法

(一) 線圈壓降法

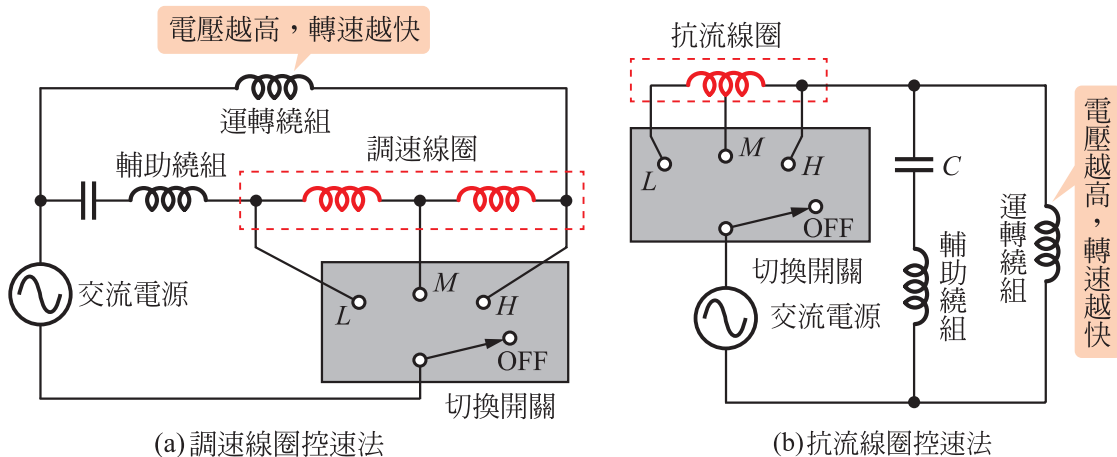


圖 5-19 線圈壓降進行速率控制

如圖 5-19(a) 在運轉繞組與輔助繞組間串聯調速線圈，切換開關切在 H (高速) 位置時，運轉繞組未經調速線圈降壓因此以全速運轉。當開關改切在 M 或 L 位置時，線圈壓降使得運轉繞組兩端電壓降低，轉矩下降因此轉速減慢。圖 5-19(b) 則是將抗流線圈與電動機直接串聯，抗流線圈匝數愈多產生的壓降愈大，電動機端電壓下降造成轉矩降低，轉速減慢。

利用線圈壓降進行速率控制的電路構造簡單，但是線圈所造成損失大、效率降低，因此常用在高速運轉，速率變化不大的場合，例如吹風機、風扇的風速控制。

(二) 半導體控制

隨著半導體的技術發展，透過控制閘流體，如矽控整流器 (SCR) 或交流矽控閘流體 (TRIAC) 等元件的觸發角，就可以改變輸出電壓達到速率控制之目的。

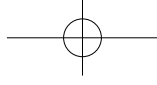
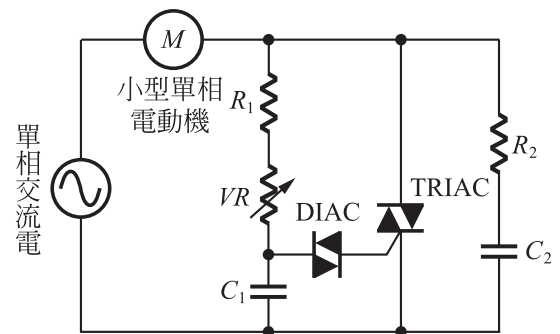


圖 5-20(a) 中，可變電阻值 VR 愈低，電容器 C_1 充電時間愈短，很快就達到雙向觸發二極體 (DIAC) 所需的崩潰電壓，當圖 5-20(b) 中 TRIAC 的觸發脈波愈早出現 (觸發角小)，則 TRIAC 導通時間愈長，輸出電壓值較高，電動機轉速較快。反之若是可變電阻值 VR 愈大，觸發角愈大，輸出電壓值較低，轉速下降。

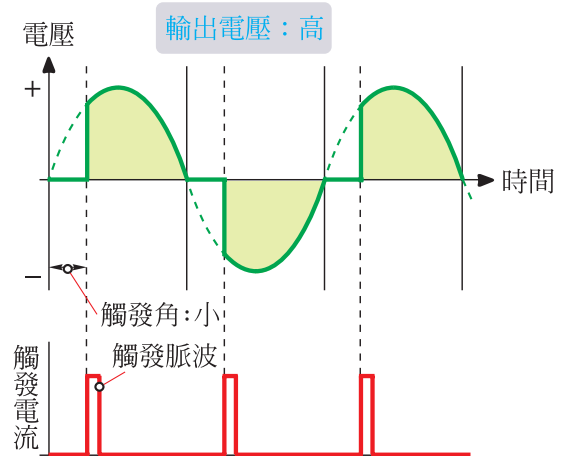
利用閘流體進行速率控制的運轉效率佳，而且可以進行圓滑與較大範圍的速率控制，缺點則是電路較為複雜，而且轉矩會隨電壓減少而降低，因此較不適用於需要大轉矩的場所。

二、改變極數控速法

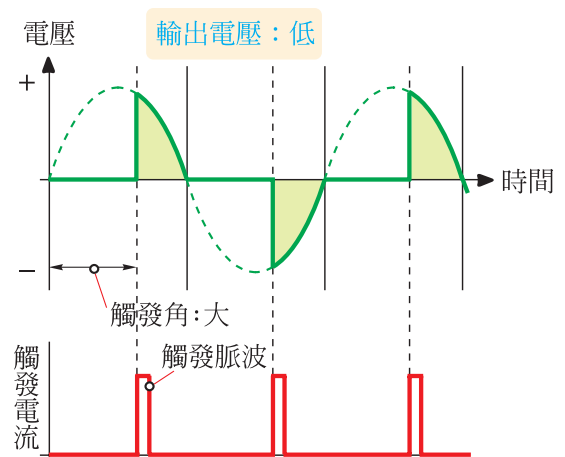
感應電動機的轉速與極數成反比，極數少時為高速運轉，極數多時為低速運轉，大多只能做 2 段～3 段變速。改變極數的方法可以使用兩組不同極數的定子繞組裝置於定子鐵心槽內，切換不同繞組做轉速控制。或是參考 90 頁圖 4-12 介紹利用生成磁極 (庶極) 的方法，使極數加倍，轉速減半的方式，早期洗衣機的高、低速運轉常用此種控制方法。



(a) 控制電路圖

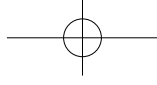


(b) 觸發角小



(c) 觸發角大

圖 5-20 閘流體進行速率控制



三、改變頻率控速法

圖 5-21 是利用四個電晶體組成 H 橋變流器的基本電路，此電路以直流電為電源，透過電晶體輪流切換產生正、負脈衝，以脈波寬度調變 (pulse width modulation, PWM) 的方式模擬出各種頻率的交流電。當輸出頻率愈高，電動機的轉速愈快。這種控制方式的輸出電壓會隨著頻率變動而成正比改變，因此稱為變壓變頻 (VVVF) 控制法，其目的在於確保電動機在任何轉速下，能維持足夠轉矩。圖中在每個電晶體旁並聯二極體稱為飛輪二極體 (flywheel diode)，其目的是避免正負半波切換時，電動機等電感性負載會因為電流變化產生反電勢，而造成電路損害。

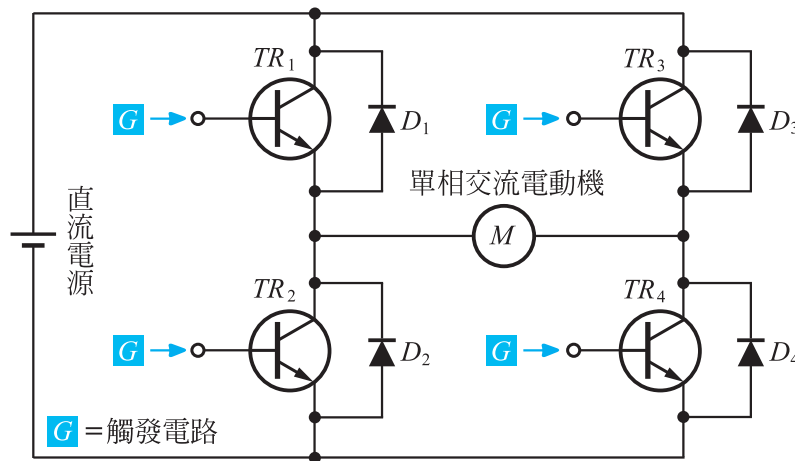


圖 5-21 頻率控速法

交流電動機透過改變電源頻率可以有範圍且圓滑的速率控制、方便進行各項控制，是目前新型洗衣機、冷氣機等家用電器常用的控制方式。

隨堂練習

- () 1. 一般家用風扇，通常係採下列何種方法調整速率？ (A) 改變電源頻率 (B) 行駛繞組串接調速線圈 (C) 使用閘流體無段調速 (D) 改變磁極數。
- () 2. 洗衣機馬達由 4 極變成 8 極其轉速 (A) 加倍 (B) 減半 (C) 不變 (D) 停止。
- () 3. 利用 TRIAC 所控制的電動機調速電路中，觸發角愈小，則電動機 (A) 轉速愈高 (B) 轉速愈低 (C) 轉速不變 (D) 消耗功率愈低。

一、選擇題

- 5-1** () 1. 有一部 110 V、50 Hz、1/4 hp 的 4 極單相感應電動機，滿載時測得轉子轉速 1350 rpm，則正轉旋轉磁場與反轉旋轉磁場的轉差率分別為
(A) 1.9，0.1 (B) 1.9，-0.1 (C) 0.1，1.9 (D) 0.1，-1.9。
- () 2. 下列何者無法自行起動？
(A) 單繞組單相感應電動機 (B) 單相電容器式電動機
(C) 蔽極式感應電動機 (D) 三相感應電動機。
- 5-3** () 3. 分相式單相感應電動機的定子繞組可以分為主繞組與起動繞組，請問下列敘述何者錯誤？
(A) 主繞組線徑粗、匝數多
(B) 起動繞組線徑細、匝數多
(C) 主繞組電阻值低、電感抗值大
(D) 起動繞組電阻值大、電感抗值低。
- () 4. 有關分相式感應電動機的敘述，下列何者錯誤？
(A) 起動繞組使用線徑較細的銅線，置於定子線槽的外層
(B) 運轉繞組使用線徑較粗的銅線，置於定子線槽的內層
(C) 起動繞組與運轉繞組互隔 90°電機角
(D) 離心開關與運轉繞組串聯後再跟起動繞組並聯。
- () 5. 分相式單相感應電動機的運轉繞組電流相量為 $\bar{I}_m$ ，起動繞組電流相量為 $\bar{I}_a$ ，電源電壓相量為 $\bar{V}$ ，則下列敘述何者正確？
(A) $\bar{I}_a$ 超前 $\bar{I}_m$ 約 90° (B) $\bar{I}_a$ 超前 $\bar{V}$
(C) $\bar{I}_a$ 落後 $\bar{V}$ (D) $\bar{I}_m$ 超前 $\bar{I}_a$ 約 90°。
- () 6. 有一單相感應電動機之定子資料為 4 極 24 槽，若繞組採用分佈式，且主繞組由第 3 槽開始繞製，為獲得真正 90°相位差，則起動繞組應由下列何槽開始繞製？
(A) 第 6 槽 (B) 第 7 槽 (C) 第 8 槽 (D) 第 9 槽。

自我評量

- () 7. 單相感應電動機使用之離心開關接點，在起動瞬間與達到同步轉速 75 % 後，接點情形變化為何？
 (A) 打開、閉合 (B) 閉合、打開 (C) 維持打開 (D) 維持閉合。
- () 8. 關於電容器式感應電動機的電容器，下列敘述何者正確？
 (A) 應串聯於電源側 (B) 應串聯於主繞組
 (C) 應並聯於電源側 (D) 應串聯於輔助繞組。
- () 9. 電容器運轉式單相感應電動機之起動轉矩通常較分相式電動機為小，其原因為
 (A) 串聯電容器使電抗增大，相位落後
 (B) 因電容器之損失使轉矩降低
 (C) 就起動之需求而言，串聯電容器之容量偏小
 (D) 就起動之需求而言，串聯電容器之容量偏大。
- () 10. 如要使單相電容器運轉式感應電動機之旋轉方向逆轉，下列何者錯誤？
 (A) 運轉繞組兩端的接線維持不變，輔助繞組兩端的接線相互對調
 (B) 輔助繞組兩端的接線維持不變，運轉繞組兩端的接線相互對調
 (C) 繞組接線維持不變，切換電容器的裝置位置
 (D) 繞組接線維持不變，將兩條電源線位置對調。
- () 11. 如圖 (1) 為永久電容器式單相感應電動機，若 L_1 與 a 點相接且 L_2 與 c 點相連接時，電動機為正轉；若要使其反轉，則下列作法何者正確？

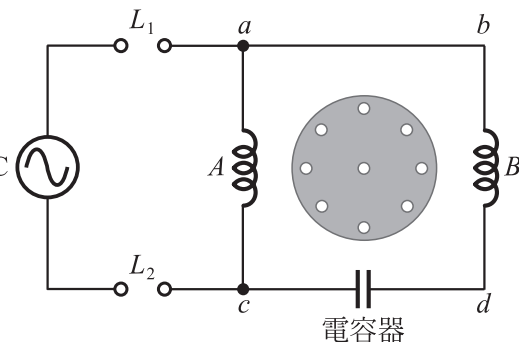


圖 (1)

- () 12. 雙值電容式感應電動機起動完畢後，離心開關將哪個元件切離電路？
(A) 起動電容器 (B) 運轉電容器 (C) 輔助繞組 (D) 運轉繞組。
- () 13. 蔽極式馬達中蔽極部份之磁通較主磁通
(A) 超前 (B) 落後 (C) 同相 (D) 無關。
- () 14. 家庭用電冰箱的壓縮機，通常採用何種電動機？
(A) 蔽極式電動機 (B) 分相式感應電動機
(C) 電容起動式感應電動機 (D) 三相繞線式感應電動機。
- () 15. 下列何種電動機構造簡單、價格低，常被用於小型吹風機等家用電器？
(A) 分相式感應電動機 (B) 電容起動式感應電動機
(C) 雙值電容器式感應電動機 (D) 蔽極式感應電動機。
- 5-4** () 16. 單相感應電動機運轉時，如欲增加轉速，可選用下列何種方法？
(A) 減少電源頻率 (B) 增加電源頻率
(C) 減少電源電壓 (D) 增加電動機極數。
- () 17. 若交流電動機的轉速由變頻器來作控制，則電動機轉速與變頻器輸出頻率的關係為何？
(A) 正比 (B) 反比 (C) 平方反比 (D) 無關。
- () 18. 下列何者能將直流電轉換成可變頻率之交流電？
(A) 變流器 (B) 變壓器 (C) 整流器 (D) 濾波器。
- () 19. 單相分相式感應電動機無法自行起動，但用手轉動轉軸後可使其正常運轉，此現象最可能之故障原因為
(A) 沒有電源 (B) 離心開關接點故障
(C) 行駛繞組斷路 (D) 行駛繞組短路。

自我評量

() 20. 如圖 (2) 為電扇調速電路，下列敘述何者正確？

- (A) 3 為高速，2 為中速，1 為低速
- (B) 1 為高速，2 為中速，3 為低速
- (C) 2 為高速，3 為中速，1 為低速
- (D) 2 為高速，1 為中速，3 為低速。

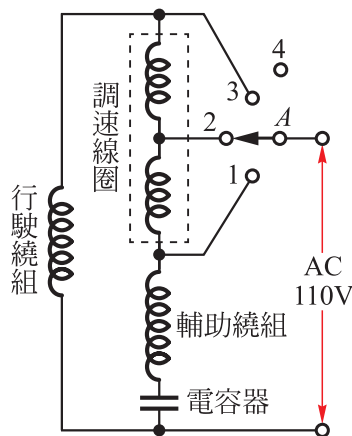


圖 (2)

() 21. 下列有關單相感應電動機之敘述，何者錯誤？

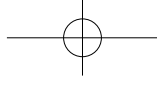
- (A) 電容起動式常用於起動轉矩大之場合
- (B) 永久電容器式電動機適用在低噪音處所
- (C) 雙值電容器式電動機用於高轉矩與高功因之場合
- (D) 蔽極電動機之構造簡單，效率高。

() 22. 相同容量之單相感應電動機與三相感應電動機比較何者正確？

- (A) 單相感應電動機之體積較小且成本較低
- (B) 單相感應電動機之效率與功因較差
- (C) 三相感應電動機起動轉矩為零，無法起動，單相感應電動機則可以自行起動
- (D) 三相感應電動機產生位置不變，大小隨時間改變的旋轉磁場，單相感應電動機產生大小不變，位置隨時間改變的交變磁場。

二、問答與計算題

1. 敘述單相感應電動機之種類與特性。
2. 分相式電動機的定子線槽內裝有兩組繞組，其特性與位置分別為何？
3. 電容器式電動機所使用的交流電容器有哪些類型，其特性分別為何？
4. 敘述單相感應電動機之速率控制方法有哪些？
5. 一部 1/4 hp，110 V、60 Hz 電容起動式單相感應電動機，其主繞組及輔助繞組分別為主繞組 $\bar{Z}_m = 10 + j6 \Omega$ ；輔助繞組 $\bar{Z}_a = 35 + j8 \Omega$ ，起動時主繞組之電流與輔助繞組電流相差為 90 度，試求起動用電容器之電容值。



CHAPTER 6

感應電動機之試驗運用與維護

» 本章重點

電動機製造完成後會進行各種試驗，以了解性能是否合乎規範，並作為後續修改時的參考。本章首先介紹感應電動機重要的試驗流程與目的、其次說明感應電動機在運轉過程中需要注意的事項、最後介紹維護與保養項目，以確保電動機能在最佳的狀態持續運轉。

6-1 感應電動機之試驗

電動機試驗的目的在於獲得等效電路的各個參數，並且了解電動機在起動過程以及各種負載狀態下的性能表現，除了提供使用者選用時的參考外，設計與製造者也可以依據試驗結果進行修改以提升性能，感應電動機常進行的試驗包含：

一、繞組電阻試驗

1. 目的：測量感應電動機每相繞組的電阻值。
2. 測試方法：有數位電表法、直流壓降法，更精確測量則可採用惠斯登電橋法。但測試前必須先確認三相電動機的定子繞組是採用何種接線方式。
3. 結果：依據圖 6-1 先將繞組外加低值直流電壓並測得電流後，再依據接線方式並配合歐姆定律計算出每相電阻值 r_1 ；測量室溫為 t °C 後，最後利用電阻溫度係數公式，換算**實際運轉時 (75 °C) 的電阻值**：

$$r_{75^\circ\text{C}} = r_1 \times \frac{234.5 + 75}{234.5 + t} \quad (6-1)$$

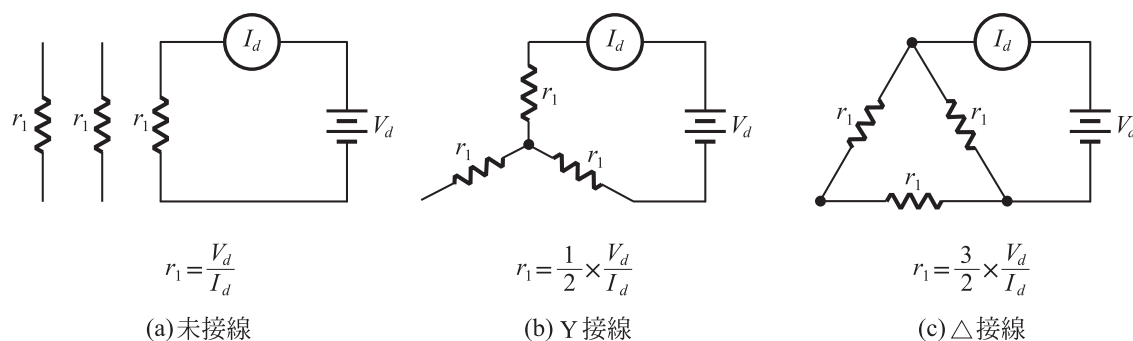


圖 6-1 繞組電阻測試

4. 注意事項：三相感應電動機定子上所繞製的三組繞組由於線徑、匝數相同，因此電阻值相同。而單相感應電動機定子上繞製的起動繞組與運轉繞組，常用不同線徑、匝數繞製而成，因此電阻值差異較大。若是起動繞組有串接電容器者，進行電阻測試時，受到電容器充放電現象影響會造成指針偏轉，可作為判斷繞組時的重要參考。

範例

01

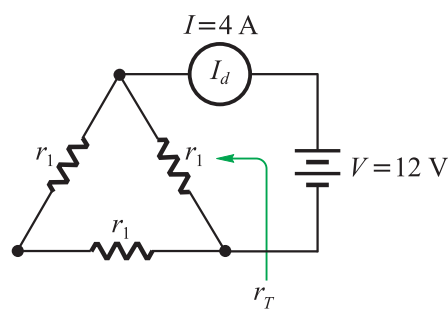
某三相感應電動機，定子繞組為 Δ 接，自任兩引出線外加 12V 直流電壓時，測得輸入之電流為 4 A，則每相繞組之電阻為何？

解 依題意可得等效電路如右圖，其中：

$$\text{任兩引出線間電阻 } r_T = \frac{V}{I} = \frac{12}{4} = 3 \Omega$$

$$\text{由於 } r_T = (r_1 + r_1) // r_1 = \frac{2}{3} r_1$$

$$\text{因此每相繞組電阻 } r_1 = \frac{3}{2} \times 3 = 4.5 \Omega$$



隨堂練習

- () 1. 測量三相感應電動機定子繞組直流電阻時，當電動機接成 Y 接時，在兩線端間測得電阻為 2 Ω ，若改為 Δ 接，則在兩線端間量得之電阻值應為
(A) 1/3 Ω (B) 1/2 Ω (C) 2/3 Ω (D) 3/2 Ω 。

二、無載試驗

1. 目的：求得鐵損、無載電流，並依據結果計算無載狀態下的功率因數以及激磁等效電路，與變壓器的開路試驗類似。
2. 測試方法：依據圖 6-2 接線完畢後，電動機轉軸端不加負載，調整電壓調整器輸出電壓使其達到電動機額定電壓後，將線電壓 V_L 、線電流 I_L 及輸入功率 $P_T (P_T = W_1 + W_2)$ 指示值記錄起來。

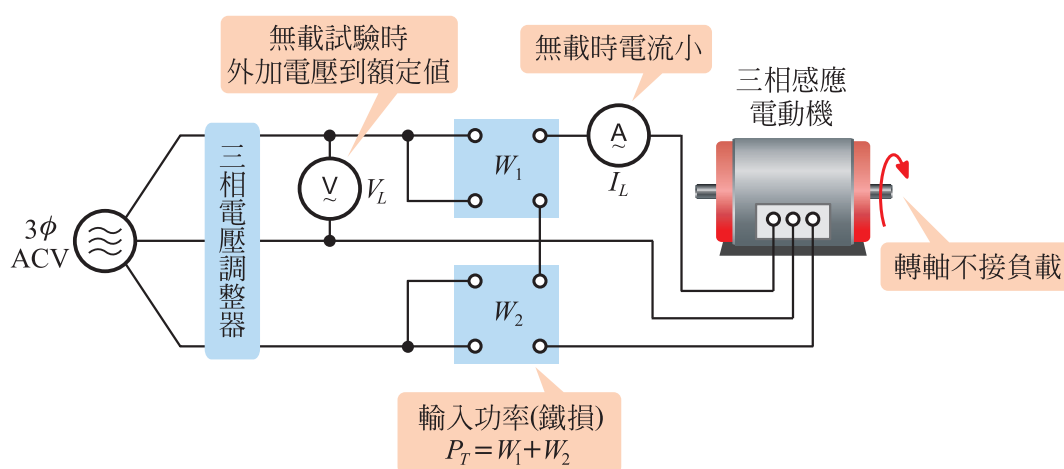


圖 6-2 無載試驗接線圖

3. 結果：無載時由於轉子轉速非常接近同步轉速，轉差率 S 接近 0，等效電路如圖 6-3，轉子側可視為開路，因此轉子等效電流 $I_2' = 0$ ，此時輸入電流 I_1 等於激磁電流 I_0 ，而激磁電流 I_0 可以分為鐵損電流 I_e 與磁化電流 I_m 兩部分。

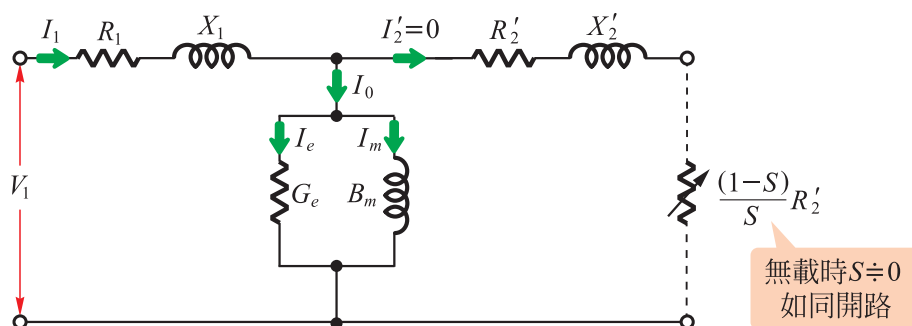
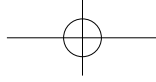


圖 6-3 無載試驗等效電路圖



此時電源輸入功率 P_T 統稱為無載損失，包含鐵損、機械損以及少量的定子繞組銅損（可忽略）。因此將無載損統稱為鐵損，即：

$$\text{鐵損： } P_i = P_T = W_1 + W_2 \quad (6-2)$$

$$\text{無載時功率因數： } \cos \theta_0 = \frac{P_T}{\sqrt{3} V_L I_L} \quad (6-3)$$

依據定子繞組採用 Y 接或是 Δ 接，將圖 6-2 中所得之儀表數據換算成相電壓 (V_{oc})、相電流 (I_{oc}) 以及每相無載損失 ($P_{oc} = P_T / 3$)，再依下列公式（與變壓器開路試驗相同）可以得到三相感應電動機每相等效電路之數據：

$$\text{鐵損電流： } I_e = \frac{P_{oc}}{V_{oc}} = I_{oc} \cos \theta_0 \quad (6-4)$$

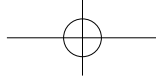
$$\text{磁化電流： } I_m = \sqrt{I_{oc}^2 - I_e^2} = I_{oc} \sin \theta_0 \quad (6-5)$$

$$\text{激磁導納： } Y_0 = \frac{I_{oc}}{V_{oc}} \quad (6-6)$$

$$\text{激磁電導： } G_e = \frac{I_e}{V_{oc}} = Y_0 \times \cos \theta_0 \quad (6-7)$$

$$\text{激磁電納： } B_m = \frac{I_m}{V_{oc}} = Y_0 \times \sin \theta_0 \quad (6-8)$$

4. 注意事項：感應電動機無載運轉時功率因數很低（小於 0.5），利用兩瓦特計測量三相功率時，可能有一具瓦特計會反轉，此時需將該瓦特計之電流線圈反接再重新測量，並將其數據記錄為負值。



範例

02

三相 4 極、60 Hz、220 V、Y 接感應電動機，如圖 6-2 所示進行無載試驗時，電壓表指示值 220 V，電流表指示值 1.5 A，兩個瓦特計指示值分別為 200 W 及 80 W(反轉)，求此機之 (1) 鐵損、(2) 無載功率因數、(3) 每相激磁電流、(4) 每相鐵損電流、(5) 每相激磁導納、(6) 每相激磁電導分別為何？

解 (1) 鐵損： $P_i = P_T = W_1 + W_2 = 200 + (-80) = 120 \text{ W}$

$$(2) \text{ 無載功率因數：} \cos \theta_0 = \frac{P_T}{\sqrt{3} V_L I_L} = \frac{120}{\sqrt{3} \times 220 \times 1.5} \div 0.21$$

$$(3) \text{ 每相激磁電流：} I_{oc} = I_0 = 1.5 \text{ A}$$

$$(4) \text{ 每相鐵損電流：} I_e = I_{oc} \cos \theta_0 = 1.5 \times 0.21 = 0.315 \text{ A}$$

$$(5) \text{ 每相激磁導納：} Y_0 = \frac{I_{oc}}{V_{oc}} = \frac{1.5}{\frac{220}{\sqrt{3}}} \div 11.8 \times 10^{-3} \text{ S (Y 接：} V_p = \frac{V_L}{\sqrt{3}} \text{)}$$

$$(6) \text{ 每相激磁電導：} G_e = Y_0 \times \cos \theta_0 = 11.8 \times 10^{-3} \times 0.21 \div 2.478 \times 10^{-3} \text{ S}$$

三、堵住試驗

1. 目的：求得銅損，並依據結果計算堵住狀態下的功率因數及每相繞組等效電阻、電抗，與變壓器的短路試驗類似。
2. 測試方法：依據圖 6-4 完成接線，其接線方式與無載試驗相同，將電動機軸端利用虎鉗或是動力計使其無法轉動（堵住）後，將電壓調整器輸出電壓由 0 開始逐漸增加，當電流表指示值等於電動機額定電流後，將線電壓 V_L 、線電流 I_L 及輸入功率 $P_T (P_T = W_1 + W_2)$ 指示值記錄起來。

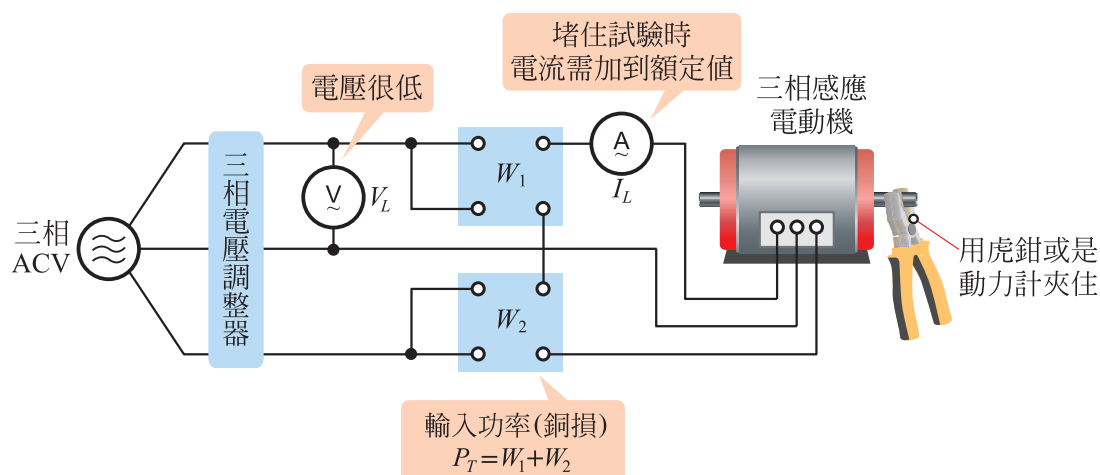


圖 6-4 堵住試驗接線圖

3. 結果：轉子堵住時因為轉子轉速為 0，轉差率 $S = 1$ ，等效電路如圖 6-5，轉子側可視為短路，由於阻抗很低，因此外加電壓只要額定值的 10 % ~ 25 %，電流就會達到額定值，與電源並聯的激磁電路則因為電流很小可以忽略 ($I_0 = 0$)，鐵損也就忽略不計。

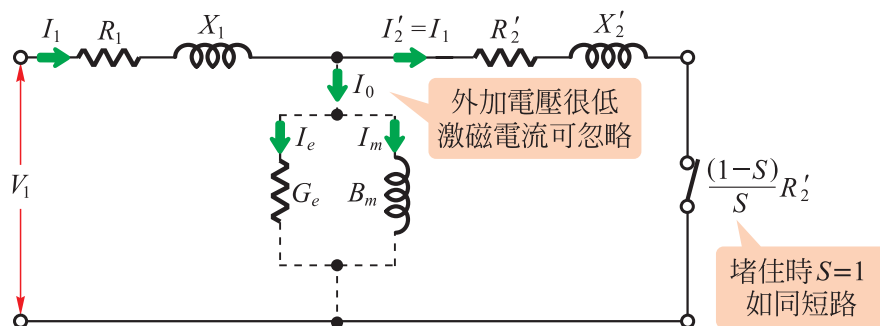
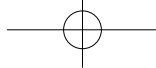


圖 6-5 堵住試驗等效電路圖

堵住時沒有機械損失，加上鐵損很低被忽略，此時圖 6-4 所測得的電源輸入功率 P_T 可視為定子繞組與轉子繞組銅損之和，即：

$$\text{銅損： } P_c = P_T = W_1 + W_2 \quad (6-9)$$

$$\text{堵住時功率因數： } \cos \theta_s = \frac{P_T}{\sqrt{3} V_L I_L} \quad (6-10)$$



依據定子繞組採用 Y 接或 Δ 接，將圖 6-5 中所得之儀表數據換算成堵住時之相電壓 (V_{sc})、相電流 (I_{sc}) 以及每相繞組銅損 $\left(P_{sc} = \frac{P_T}{3}\right)$ ，再依下列公式 (與變壓器短路試驗相同) 可以得到三相感應電動機折算到定子側之每相等效電路之數據：

$$\text{定子側等效阻抗： } Z_{e1} = \frac{V_{sc}}{I_{sc}} \quad (6-11)$$

$$\text{定子側等效電阻： } R_{e1} = \frac{P_{sc}}{I_{sc}^2} = Z_{e1} \times \cos \theta_s \quad (6-12)$$

$$\text{定子側等效電抗： } X_{e1} = \sqrt{Z_{e1}^2 - R_{e1}^2} = Z_{e1} \times \sin \theta_s \quad (6-13)$$

範例

03

三相 4 極、60 Hz、220 V、Y 接感應電動機，如圖 6-4 所示進行堵住試驗時，電壓表指示值 35 V，電流表指示值 15 A，兩個瓦特計指示值分別為 454 W 及 0 W，求此機之 (1) 銅損、(2) 堵住時功率因數、(3) 定子側之每相等效阻抗、(4) 定子側之每相等效電阻、(5) 定子側之每相等效電抗分別為何？

解 (1) 銅損： $P_c = P_T = W_1 + W_2 = 454 + 0 = 454 \text{ W}$

$$(2) \text{ 堵住時功率因數： } \cos \theta_s = \frac{P_T}{\sqrt{3} V_L I_L} = \frac{454}{\sqrt{3} \times 35 \times 15} \doteq 0.5$$

$$(3) \text{ 定子側之每相阻抗： } Z_{e1} = \frac{V_{sc}}{I_{sc}} = \frac{\frac{35}{\sqrt{3}}}{15} \doteq 1.347 \Omega \text{ (Y 接： } V_p = \frac{V_L}{\sqrt{3}} \text{)}$$

$$(4) \text{ 定子側之每相電阻： } R_{e1} = Z_{e1} \times \cos \theta_s = 1.347 \times 0.5 \doteq 0.6735 \Omega$$

$$(5) \text{ 定子側之每相電抗： } X_{e1} = Z_{e1} \times \sin \theta_s = 1.347 \times \sqrt{1 - 0.5^2} \doteq 1.167 \Omega$$

隨堂練習

- () 1. 三相感應電動機的無載實驗，主要目的為何？ (A) 求等效電路中的激磁導納 (B) 求等效電路中的等效阻抗 (C) 測試轉速特性 (D) 測試轉差率。
- () 2. 有關三相感應電動機堵轉 (堵住) 試驗，敘述何者正確？
 (A) 轉軸轉速為零，定子側繞組之電壓為額定電壓，以量測其電流及功率
 (B) 轉軸轉速為零，定子側繞組之電流為額定電流，以量測其電壓及功率
 (C) 轉軸轉速為額定轉速，定子側繞組之電壓為額定電壓，量測電流及功率
 (D) 轉軸轉速為額定轉速，定子側繞組之電流為額定電流，量測電壓及功率。

四、負載試驗

- 目的：測試電動機在不同負載狀態下之電流、功率、轉速與轉矩的關係，並且依據測試值計算功率因數、輸出功率、轉差率與效率。
- 動力計：為了方便操作與控制，負載試驗時大多透過動力計來模擬外部負載。動力計依據構造分為直流發電機型、磁粉式及渦流型等，其功用為測量各種電動機的機械功率及轉矩，也稱為測力計。
 - 直流發電機型：如圖 6-6，構造與直流外激式發電機相同，差別在於採用雙層軸承，使機殼能在電樞外圍自由轉動，帶動一彈簧秤，以測量定子與轉子間作用力之大小。

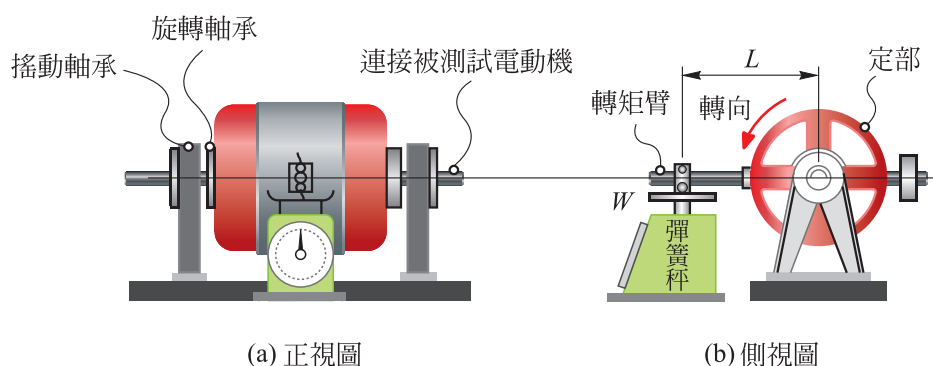
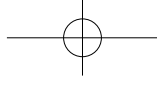


圖 6-6 直流發電機型動力計構造

試驗過程中將彈簧秤的讀值 W 公斤，彈簧秤力臂長 L 公尺記錄下來，則轉子輸出轉矩：



$$T = W \times L(\text{kg-m}) = 9.8 W \times L(\text{N-m})$$

(6-14)

T ：轉矩 (N-m)

W ：彈簧秤讀值 (Kg)

L ：力臂長 (m)

- (2) 磁粉式：圖 6-7(a) 為磁粉式動力計與控制器外觀。控制器沒有輸出電流時，如圖 6-7(b) 動力計內的磁粉可以自由滾動，對接於軸端的電動機而言阻力小，如同無載。當控制器輸出電流增加，圖 6-7(c) 動力計內激磁線圈磁場變強，磁粉被吸到槽中，由磁場束縛產生煞車作用，對接於軸端的電動機而言阻力變大，如同負載增加。

磁粉式動力計可以透過調整激磁電流控制負載量，轉矩與轉速可以由控制器的儀表直接讀取，使用上非常方便。



(a) 控制器與磁粉式動力計

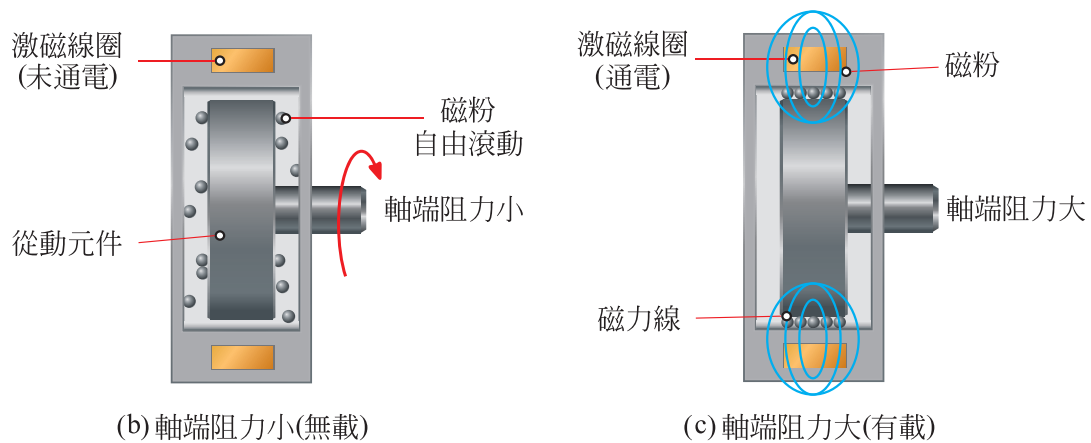


圖 6-7 磁粉式動力計與控制器構造
(圖片來源：開富公司)

3. 測試方法：如圖 6-8 準備相關設備，接線方式與上述試驗相同，但軸端加入機械負載或動力計。電動機加入額定電壓完成起動後，調整動力計使負載由無載開始逐漸增加，將線電壓 V_L 、線電流 I_L 輸入功率 P_T 、軸端的轉子轉速 n_r (rpm) 及輸出轉矩 T_o (N-m) 記錄起來。

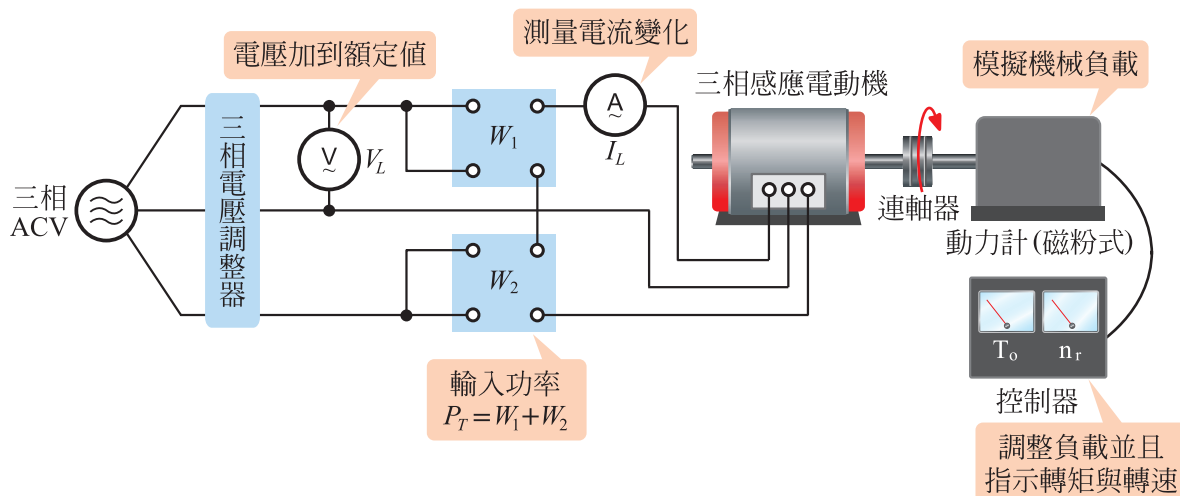


圖 6-8 負載試驗接線圖

4. 結果：將各儀表指示值，依下列公式可以得到電動機在不同負載下的運轉狀態：

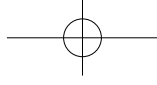
$$\text{輸入功率：} P_{\text{in}} = P_T = W_1 + W_2 \quad (6-15)$$

$$\text{功率因數：} \cos \theta = \frac{P_T}{\sqrt{3} V_L I_L} \quad (6-16)$$

$$\text{輸出功率：} P_o = \frac{2\pi \times n_r \times T_o}{60} \quad (6-17)$$

$$\text{轉差率：} S = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (6-18)$$

$$\text{效率：} \eta = \frac{P_o}{P_{\text{in}}} \times 100 \% \quad (6-19)$$



5. 注意事項：將感應電動機負載特性試驗之結果整理後，可畫成圖 6-9 之運轉特性曲線，圖中可知**電動機在無載與輕載時功率因數與效率都很差，因此必須依據負載選擇適當容量的電動機，以獲得較佳的運轉性能。**

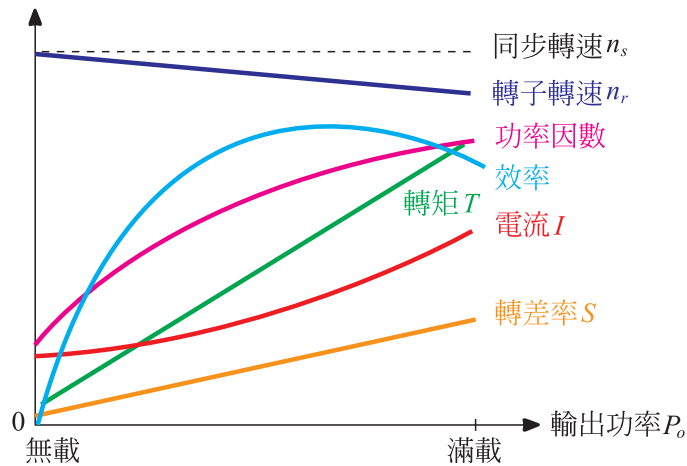


圖 6-9 感應電動機運轉特性曲線

**範例
04**

一部 4 極、220 V、60 Hz 之三相感應電動機利用直流發電機型動力計作負載試驗，在額定電壓時，測得輸入電流為 13 A，輸入功率為 4250 W，轉速為 1737 rpm，磅秤讀數為 5 kg，若磅秤臂長 0.38 m，試問此時電動機之 (1) 功率因數、(2) 轉差率、(3) 轉矩、(4) 輸出功率、(5) 效率分別為何？

解 (1) 輸入功率 $P_{in} = P_T = \sqrt{3}V_L I_L \cos \theta \Rightarrow \cos \theta = \frac{P_T}{\sqrt{3}V_L I_L} = \frac{4250}{\sqrt{3} \times 220 \times 13} \div 0.858$

(2) 同步轉速 $n_s = \frac{120 \times 60}{4} = 1800 \text{ rpm}$ ，轉差率 $S = \frac{1800 - 1737}{1800} = 0.035$

(3) 轉矩 $T = W \times L = 5 \times 0.38 = 1.9 \text{ kg-m} = 18.62 \text{ N-m}$

(4) 輸出功率 $P_o = \frac{2\pi \times n_r \times T_o}{60} = \frac{2\pi \times 1737 \times 18.62}{60} = 3385 \text{ W}$

(5) 效率 $\eta = \frac{P_o}{P_{in}} \times 100\% = \frac{3385}{4250} \times 100\% \div 79.7\%$

隨堂練習

- () 1. 三相感應電動機於負載試驗時，若增加其負載，則下列何者正確？ (A) 轉矩減小
(B) 轉速增加 (C) 轉差率增大 (D) 同步速率減少。

6-2 感應電動機之運用與維護

一、功率因數之改善

(一) 基本觀念

感應電動機為電感性元件，因此運轉過程中如圖 6-10(a)，輸入電流 ($I_L = I_M$) 會落後電源電壓 (V_L) θ 度，此時功率因數 $\cos\theta < 1$ 落後，由圖 6-9 特性曲線可知無載與輕載時功率因數值更低。

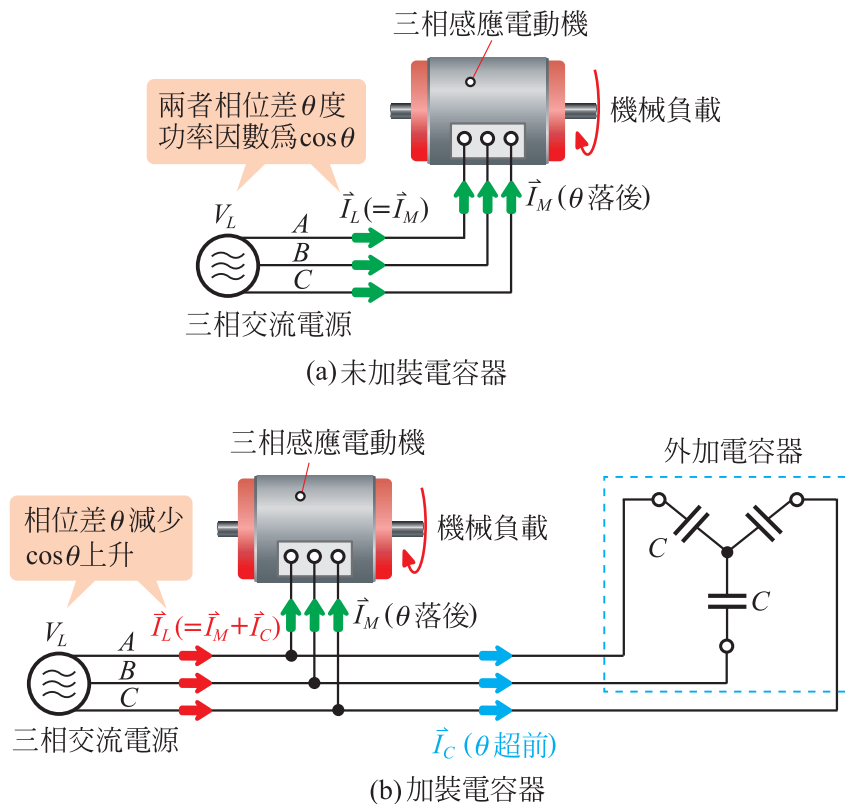
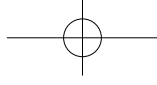


圖 6-10 感應電動機並聯電容器接線圖



依據屋內線路裝置規則(第 181 條)規定，電容器之容量以改善功率因數至 95 % 為原則。台電公司 105 年 4 月實施之新修正電價表中，針對契約容量 20 仟瓦以上用戶，每月用電之平均功率因數不及 80 % 時，每低於 1 %，該月份電費應增加 0.1 %；超過 80 % 時，每超過 1 %，該月份電費應減少 0.1 %。因此大型用戶會如圖 6-10(b) 所示，在電動機旁並聯電容器，**電動機本身的電流 ($\vec{I}_M$) 與功率因數沒有改變，但是電容器吸收的超前電流 ($\vec{I}_C$) 與電動機的落後電流 ($\vec{I}_M$) 互相抵消，使得輸入電流 ($\vec{I}_L = \vec{I}_M + \vec{I}_C$) 與電源電壓 ($\vec{V}_L$) 的相位差減少，整體功率因數上升。**

電動機的輸入功率 $P_{in} = \sqrt{3}V_L I_L \cos\theta$ 不變下，透過電容器將功率因數由 $\cos\theta_1$ 提升到 $\cos\theta_2$ ，則電動機向電源取用的線路電流 (I_L) 下降，其關係為：

$$I_{L2} = I_{L1} \times \frac{\cos\theta_1}{\cos\theta_2} \quad (6-20)$$

I_{L1} ：改善前線路電流 (A)

I_{L2} ：改善後線路電流 (A)

$\cos\theta_1$ ：改善前功率因數

$\cos\theta_2$ ：改善後功率因數

提升功率因數後由於線路電流下降，因此線路壓降減少，線路損失降低，送電效率提高，系統容量增加；此外若是功率因數超過 80 % 者還可以獲得電價優惠，因此大型用戶必須配合負載大小選用適當容量之電容器；至於家庭或是小型用戶由於容量小，加上常用的設備 (冰箱、冷氣、日光燈) 等功率因數已由廠商設計至頗佳狀態，額外加裝電容器之效益不大。

(二) 功率因數之計算

如圖 6-11(a)，倘若原本電動機有效功率為 $P(\text{kW})$ 、無效功率為 $Q_1(\text{kVAR})$ 、功率因數為 $\cos\theta_1$ 。在有效功率 P 不變下，加裝容量為 $Q_c(\text{kVAR})$ 的電容器後，如圖 6-11(b) 所示，整體的無效功率降低為 $Q_2(\text{kVAR})$ ，功率因數提升為 $\cos\theta_2$ ，此時視在功率 S_2 也隨之降低。

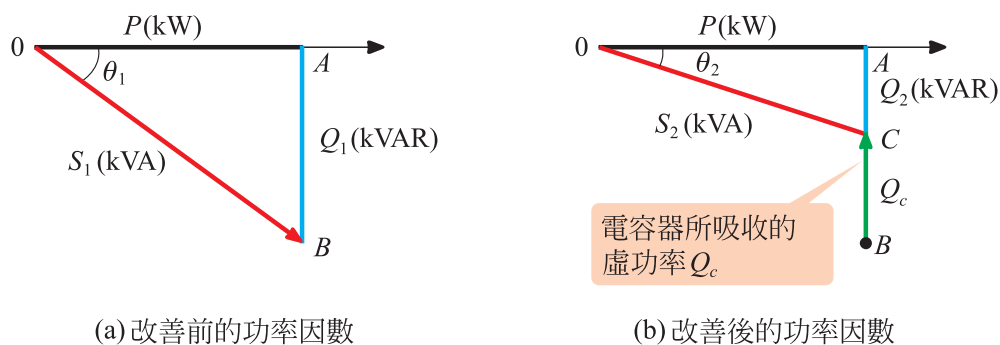


圖 6-11 感應電動機並聯電容器相量圖

依據圖 6-11(a) 可知改善前的無效功率為 $Q_1 = P \tan \theta_1$ ，改善後的無效功率為 $Q_2 = P \tan \theta_2$ ，因此電容器所需要吸收的虛功率：

$$Q_c = Q_1 - Q_2 = P(\tan \theta_1 - \tan \theta_2) \quad (6-21)$$

由於 $Q_c = \frac{V^2}{X_c} = \frac{V^2}{\frac{1}{2\pi f C}} = 2\pi f C V^2$ ，因此電容器的電容量為：

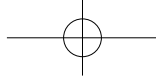
$$C = \frac{Q_c}{2\pi f V^2} \quad (6-22)$$

C ：電容量 (法拉；F)

Q_c ：虛功率 (乏；VAR)

f ：電源頻率 (Hz)

V ：電容器端電壓 (V)



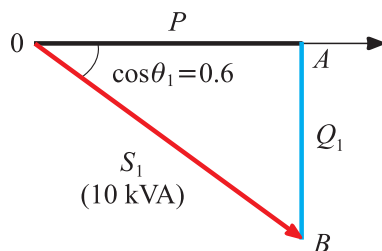
範例

05

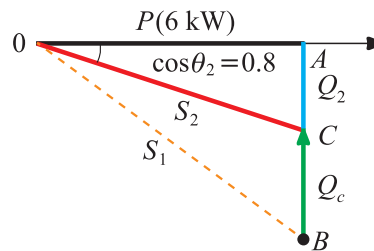
有一台 220 V、50 Hz 單相感應電動機，其視在功率為 10 kVA，功率因數為 0.6 落後，在有效功率不變下，欲將其功率因數提高至 0.8，則應該並聯的電容器容量為何？

解 (1) 改善前功率關係如下圖 (a)，其中：

$$\cos \theta_1 = \frac{P}{S_1} \Rightarrow P = 10 \times 0.6 = 6 \text{ kW}, \quad Q_1 = \sqrt{S_1^2 - P^2} = \sqrt{10^2 - 6^2} = 8 \text{ kVAR}$$



(a) 改善前



(b) 改善後

(2) 改善後功率關係如圖 (b) 所示，由於有效功率 ($P = 6 \text{ kW}$) 不變，因此：

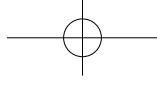
$$\cos \theta_2 = \frac{P}{S_2} \Rightarrow S_2 = \frac{6}{0.8} = 7.5 \text{ kVA}, \quad Q_2 = \sqrt{S_2^2 - P^2} = \sqrt{7.5^2 - 6^2} = 4.5 \text{ kVAR}$$

(3) 電容器所需要吸收的虛功率 $Q_c = Q_1 - Q_2 = 8 - 4.5 = 3.5 \text{ kVAR}$

$$\text{電容量 } C = \frac{Q_c}{2\pi fV^2} = \frac{3500}{2\pi \times 50 \times 220^2} \doteq 230 \mu\text{F}$$

隨堂練習

- () 1. 有一間金屬加工廠有 100 kW 之負載，平均功率因數為 0.7，倘若負載與電壓不變下，利用電容器將功率因數改善為 0.9，則線路損失可以降低為原來的幾倍？
(A) 49/81 (B) 7/9 (C) 81/49 (D) 9/7。
- () 2. 有一台單相 220 V、60 Hz，消耗功率為 12 kW 之冷氣主機，原本平均功率因數為 0.6 落後，如果將功率因數改善到 0.8，應裝多少 kVAR 的電容器？
(A) 6 kVAR (B) 7 kVAR (C) 12 kVAR (D) 16 kVAR。



二、感應電動機運用時注意事項

感應電動機的機種齊全加上構造簡單，堅固耐用，故障率少，廣泛使用於各種場合。爲了預防故障發生，除了依據負載用途與環境選擇合適的機型外，在操作過程必須依循相關規範，另外日常維護與定期保養更是重要工作。

■ 1. 起動時應注意事項

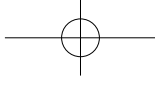
- (1) 配電線路是否有異常狀況發生：如電源是否正常、外物是否碰觸、絕緣是否正常等。
- (2) 直接起動者，應注意軸承狀態，皮帶或鏈條是否卡死或滑脫。
- (3) 使用 Y- Δ 起動器時，應該注意操作順序，不可在 Δ 接線情形下起動。
- (4) 查看與起動有關之電阻、電抗器及起動補償器等，是否**復歸在起動位置**。
- (5) **起動時應儘可能在輕負載下實施**，當起動完畢後，再逐漸增加負載。

■ 2. 運轉中應注意事項

- (1) 電源電壓、頻率是否正常。
- (2) 轉速與電流是否正常。
- (3) 機械的振動、溫升情形是否較平常爲大？是否有噪音、臭味產生。
- (4) 是否因保險絲或引線熔斷一條，而造成單相運轉。
- (5) 單相感應電動機的離心開關，其接點是否於額定速率之 70 % ~ 80 % 時跳脫。

■ 3. 停止時應注意事項

- (1) **停止時，應先除去負載後，再將電源切離。**
- (2) 主開關切斷後，再將與起動有關之控制器，恢復到起動的位置。
- (3) 清除周遭的工作成品與廢料。
- (4) 測量繞組溫度，以做爲日後保養的參考。



三、電動機之維護與保養

電動機日常的清潔工作是最重要的工作項目，每次停機後必須將周遭累積的塵埃、棉絮、油汙等雜物清理乾淨，避免造成散熱不良、絕緣劣化的情形。另外還必須依據工作環境與使用情況進行相關設備的檢查與保養。此外**必須定期測量電動機絕緣電阻，可以早期發現電動機是否發生絕緣劣化等情形。**

四、電動機之故障因素

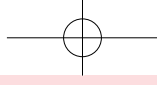
1. 起動困難或無法起動：**三條電源線中有一條脫落 (欠相)**、容量不足，線路電壓太低，定子或轉子線圈斷線等、轉軸卡死。
2. 負載增加，轉速不足或停止：欠相運轉、線圈間局部短路、容量不足、線路壓降太大、繞組引接線碰殼接地、漏電等。
3. 溫度上升太高：超載、通風不良、單相運轉、定子繞組接地或局部短路，電源電壓太高或太低。
4. 絕緣電阻太低：繞組與鐵心間的絕緣物潮濕，因為塵埃或是過熱導致絕緣劣化。
5. 振動劇烈或是噪音大：電動機與負載連接未成一直線、電動機底座固定螺絲鬆脫、欠相運轉。

隨堂練習

- () 1. 三相感應電動機無載運轉中，若其中一條電源線斷路，電動機運轉情況變為
(A) 負載電流變大 (B) 原速繼續運轉 (C) 速度加快 (D) 立即停止。
- () 2. 三相鼠籠式感應電動機當接電源時不能起動，若以外力向右撥動即向右轉，向左轉撥動即向左轉，則其原因是 (A) 轉子沒有電 (B) 一線斷路 (C) 二線斷路 (D) 三線短路
- () 3. 可能造成運轉過程中電動機電流高於正常值的原因，下列何者為非？ (A) 缺少潤滑油 (B) 負載太大 (C) 皮帶緊 (D) 皮帶鬆。

一、選擇題

- 6-1** () 1. 使用直流壓降法測量三相感應電動機繞組之電阻時，若此感應電動機為 Δ 接線，且從任意兩線間測量之電阻為 $4\ \Omega$ ，則此電動機每相繞組之電阻為多少？ (A) $4/3\ \Omega$ (B) $6\ \Omega$ (C) $9\ \Omega$ (D) $12\ \Omega$ 。
- () 2. 欲測量三相感應電動機之鐵損，應進行下列哪一種試驗？
(A) 直流電阻試驗 (B) 無載試驗 (C) 堵住試驗 (D) 負載試驗。
- () 3. 有關三相感應電動機之無載試驗，下列敘述何者正確？
(A) 轉軸之轉速為零，定子側繞組之電流為額定電流，以量測其電壓及功率
(B) 轉軸之轉速為零，定子側繞組之電壓為額定電壓，以量測其電流及功率
(C) 轉軸轉速為額定轉速，定子側繞組電壓為額定電壓，量測其電流及功率
(D) 轉軸轉速為額定轉速，定子側繞組電流為額定電流，量測其電壓及功率。
- () 4. 三相感應電動機之無載試驗中，會造成瓦特表反轉的原因，乃由於何種因素所造成？
(A) 電壓低 (B) 電流小 (C) 功率因數太低 (D) 功率因數太高。
- () 5. 欲測量三相感應電動機之銅損，應進行下列哪一種試驗？
(A) 堵住試驗 (B) 直流電阻試驗 (C) 負載試驗 (D) 無載試驗。
- () 6. 關於三相感應電動機之堵住試驗，下列敘述何者正確？
(A) 將轉子堵住，調整定子電壓為額定值，測量輸入功率及電流
(B) 調整轉速及定子輸入電流為額定值，測量輸入功率及電壓
(C) 可計算相關阻抗
(D) 可測量鐵損並計算激磁導納。
- () 7. 三相感應電動機使用動力計作負載實驗時，若電動機之電源保持在定電壓及定頻率下，由輕載而漸增為滿載時，其效率
(A) 下降 (B) 上升 (C) 維持不變 (D) 先下降後上升。



自我評量

- () 8. 感應電動機負載試驗過程中，由輕載而漸增為滿載，下列敘述何者錯誤？
(A) 轉差率降低 (B) 輸入功率上升
(C) 轉矩上升 (D) 功率因數提高。
- 6-2** () 9. 三只電力電容器接成 Y 接，並聯接於三相感應電動機的電源側，主要目的為何？
(A) 減少電動機輸出轉矩 (B) 降低電動機轉軸轉速
(C) 減少電源側的有效功率 (D) 減少電源側的無效功率。
- () 10. 在臺灣地區，電力公司對於用戶總功率因數之最低要求為
(A) 0.5 (B) 0.75 (C) 0.8 (D) 0.95。
- () 11. 下列何者不是改善功率因數所能得到的利益？
(A) 減少線路電流 (B) 增加電壓調整率
(C) 減少線路損失 (D) 增加線路容量。
- () 12. 某電力用戶某月 kWh 表與 kVARH 表各指示 20,000 kWh 與 10,000 kVARH，則此用戶平均功率因數為
(A) 0.71 (B) 0.80 (C) 0.89 (D) 0.95。
- () 13. 三相，220 V，60 Hz，6 極，10 hp 之電動機，其滿載功率因數為 0.6 落後，今欲將功率因數提高至 0.8 落後時，所須加入電容器之總容量為
(A) 7460 VAR (B) 4352 VAR (C) 2983 VAR (D) 2238 VAR。
- () 14. 三相感應電動機空載運轉中，若一線之保險絲熔斷，則其他兩線之電流將 (A) 增大 (B) 減少 (C) 相等 (D) 立刻降為 0。
- () 15. 一部三相感應電動機在無載運轉時，其電流甚大，且有嗡嗡聲，倘無機械構造毛病，則最可能的故障原因？
(A) 無熔絲開關跳脫 (B) 轉速過高
(C) 線圈短路 (D) 單相運轉。

- () 16. 電容起動式單相電動機故障為「無法起動」但用手轉動轉軸時，便可使其運轉，試問下列何者不是這故障之原因？
- (A) 起動繞組斷線 (B) 行駛繞組斷線
(C) 電容器損壞 (D) 離心開關之接線脫落。

二、問答與計算題

1. 說明感應電動機無載試驗的目的與做法。
2. 說明感應電動機堵住試驗的目的與做法。
3. 畫出感應電動機運轉特性曲線。
4. 利用電容器改善功率因數的優點有哪些？
5. 有一部三相 2 極，10 hp 感應電動機，接三相 200 V，60 Hz 電源，滿載時測得線電流為 30 A，功率因數為 0.8，轉子轉速為 3420 rpm，求滿載時 (1) 輸入功率、(2) 輸出功率、(3) 轉差率、(4) 轉矩、(5) 效率分別為多少？
6. 某工廠為三相、220 V、60 Hz 的電源系統，倘若負載平均每小時耗電度為 15 kWh，無效電度為 20 kVARh，如擬改善功率因數為 0.95，則需加裝的電容器 (1) 吸收的虛功率、(2) 電容量分別為多少？
7. 某工廠有一台 220 V、60 Hz、5 hp 之單相感應電動機，其滿載功率因數為 0.8 落後，並聯 153.4 μ F 電力電容器改善功率因數，則 (1) 電容器之容量為何、(2) 改善後功率因數為多少？

單元摘要

第一章

1. 三相繞組通電後所形成的旋轉磁場磁勢為單一繞組最大值的 1.5 倍。
2. 旋轉磁場的轉速稱為同步轉速，其值為 $n_s = \frac{120f}{P}$ 。
3. 旋轉磁場的方向由電流相序與繞組配置方式決定。將三相電源中的任意二條電源線對調，旋轉磁場的方向就會改變。
4. 感應電動機的轉子轉速 n_r 恆低於同步轉速 n_s ，兩者間的差距稱為轉差速率 $(n_s - n_r)$ 。轉差速率與同步轉速的比例稱為轉差率 $S = \frac{n_s - n_r}{n_s}$ 。
5. 感應電動機正常運轉時，轉子轉速 n_r 不可能到達同步轉速 n_s 。倘若因為外力造成轉子轉速 n_r 等於同步轉速 n_s 時，轉子導體與旋轉磁場間沒有相對運動，轉子導體電流為零，無法產生轉矩。

第二章

6. 感應電動機鐵心採用矽含量 1 % ~ 3 %，厚度 0.35 mm ~ 0.5 mm 之矽鋼薄片疊製，可減少渦流損失。
7. 中、大型感應電動機的定子三相繞組通常採用雙層、分佈、短節距（線圈跨距 $< 180^\circ$ ）繞法，使磁通儘量接近正弦波形分佈，減少噪音。
8. 感應電動機依轉子構造分成鼠籠式與繞線式兩類。

感應電動機分類	特性
鼠籠式轉子	堅固耐用。轉子導體與鐵心採用斜槽，可以減緩磁阻變化，降低噪音及轉矩的脈動。
繞線式轉子	改變外部電阻可以限制起動電流並增加起動轉矩；正常運轉時也可以控制轉速。但是構造複雜、製作成本高。

第三章

9. 感應電動機無載時輸入電流 I_1 幾乎等於激磁電流 I_0 ，而激磁電流 I_0 可以分成產生交鏈磁通 ϕ 的磁化電流 I_m 以及造成鐵心發熱的鐵損電流 I_e ，其相量關係為 $I_0 = \sqrt{I_e^2 + I_m^2}$ 。

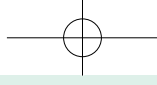
單元摘要

10. 轉子輸入功率 (P_{i2})、轉子銅損 (P_{c2})、轉子輸出功率 (P_{o2}) 三者與轉差率 (S) 之關係為： $P_{i2} : P_{c2} : P_{o2} = 1 : S : 1 - S$
11. 感應電動機輸出轉矩 $T_o = \frac{60P_o}{2\pi n_r}$ 、電磁轉矩 $T_m = \frac{60P_m}{2\pi n_r} = \frac{60P_{i2}}{2\pi n_s}$ 。
12. 感應電動機的起動轉矩與電源電壓平方 (V_1^2) 成正比，與轉子電阻 (R'_2) 成正比。
13. 感應電動機負載不變下，改變轉子外加電阻 (R)，轉差率會隨之正比改變，而轉矩維持不變之現象稱為比例推移，即： $\frac{R'_2}{S} = \frac{R'_2 + R}{S'}$ 。
14. 特殊鼠籠式的設計分為下列二種型式：

鼠籠式轉子設計方式	特性
深槽鼠籠式	起動時，電流集中在外層導體，效果如同高轉子電阻，因此起動電流較小，起動轉矩較大，隨著轉速上升，電流均勻通過轉子導體，如同低轉子電阻，可以減少損失，提升效率。
雙鼠籠式	起動時電流大部分經由低電感、高電阻的外層導體，可以降低起動電流、增加起動轉矩。隨著轉速上升，大部份電流改由低電阻的內層導體通過，可以減少損失，得到良好的運轉特性。

第四章

15. 感應電動機起動瞬間電流約為滿載電流的 5 倍～8 倍，隨著轉速上升，電流會迅速降低。
16. 三相感應電動機採用 Y 接起動時相電壓 (V_p) 與相電流 (I_p) 均為 Δ 接起動時的 $\frac{1}{\sqrt{3}}$ 倍；Y 接起動時的線電流 (I_L) 與轉矩則降為 Δ 接起動時 $\frac{1}{3}$ 倍。
17. 三相感應電動機的補償器起動法又稱為自耦變壓器降壓起動法；若將電源電壓降為全壓起動時的 K 倍 ($K < 1$) 時，電動機側的電流 (I_2) 降為全壓起動時的 K 倍；電源側的電流 (I_1) 以及起動轉矩則會降為全壓起動時的 K^2 倍。



單元摘要

18. 三相感應電動機利用串聯電抗器將電源電壓降為全壓起動的 K 倍 ($K < 1$) 時，起動電流降為全壓起動的 K 倍，起動轉矩降為全壓起動的 K^2 倍。
19. 繞線式轉子運轉過程中可以透過改變轉子電阻、轉子電壓或是兩機串聯等方式進行轉速控制。
20. 將三相感應電動機的任二根電源線對調，由於定子旋轉磁場方向立刻改變，轉軸之旋轉方向隨之改變。
21. 三相感應電動機制動方式分成機械制動與電氣制動；電氣制動又分為逆轉制動、直流制動、單相制動以及再生制動等方式。

第五章

22. 單相分相式感應電動機的定子槽內有兩組繞組，互隔 90° 電機角，其中：
 - (1) 運轉繞組：置於內層、線徑粗、匝數多，電阻較低而電感抗較高。
 - (2) 起動繞組：置於外層，線徑細、匝數少，電阻較高而電感抗較低。
23. 單相分相式感應電動機起動後，當轉速升至額定轉速的 75 % 左右時，離心開關動作將起動繞組切離線路，由行駛繞組單獨維持運轉，以減少損失，提升效率。
24. 單相感應電動機常用的交流電容器有：
 - (1) 乾式電解電容器：體積小、容量大、價格低，適合間歇使用。
 - (2) 油浸式電容器：體積大、容量小、價格較高，適合長時間使用。
25. 雙值電容器式感應電動機的運轉電容器採用低容量的油浸式電容器，起動電容器採用高容量的電解電容器。起動時兩只電容器並聯獲得大起動轉矩。轉速上升後，離心開關將起動電容器切離，改成電容器運轉式狀態運轉，以獲得較佳的運轉效率與功率因數。
26. 單相感應電動機只能由定子繞組著手控制轉速，藉由改變電源頻率 (f)、定子磁極數目 (P) 以及電源電壓 (V) 等方式改變轉速。

第六章

27. 感應電動機繞組電阻試驗時，需依據接線方式並配合歐姆定律計算出每相繞組電阻值。
28. 感應電動機無載試驗時，軸端不加負載任其空轉 ($S \approx 0$)，外加額定電壓，目的為求出鐵損及無載時的激磁特性。
29. 感應電動機堵住試驗時，將軸端鎖住無法轉動 ($S = 1$)，外加額定電流，目的為求出銅損及繞組阻抗值。
30. 感應電動機負載試驗可測試電動機在不同負載時的電流、功率、轉速與轉矩的特性，並依結果計算轉差率與效率。
31. 利用電容器提升功率因數的優點包括：線路電流下降，壓降與損失減少，送電效率提高，系統容量增加以及電價優惠。
32. 功率因數由 $\cos\theta_1$ 提升為 $\cos\theta_2$ ，所加裝電容器吸收的虛功率為：

$$Q_c = P(\tan\theta_1 - \tan\theta_2)，電容器電容量為 $C = \frac{Q_c}{2\pi fV^2}$ 。$$

[illegible]