

Ch7 感應電動機

7-1 感應電動機結構

一、定子結構

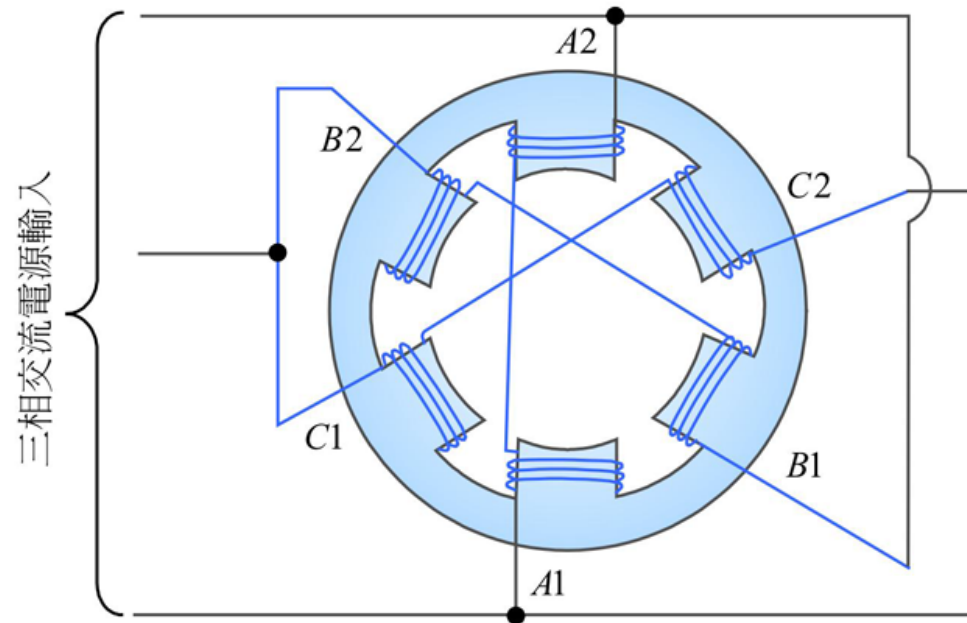


圖 7-1 三相感應機之定子結構與繞線示意圖

7-1 感應電動機結構

一、定子結構 (續)

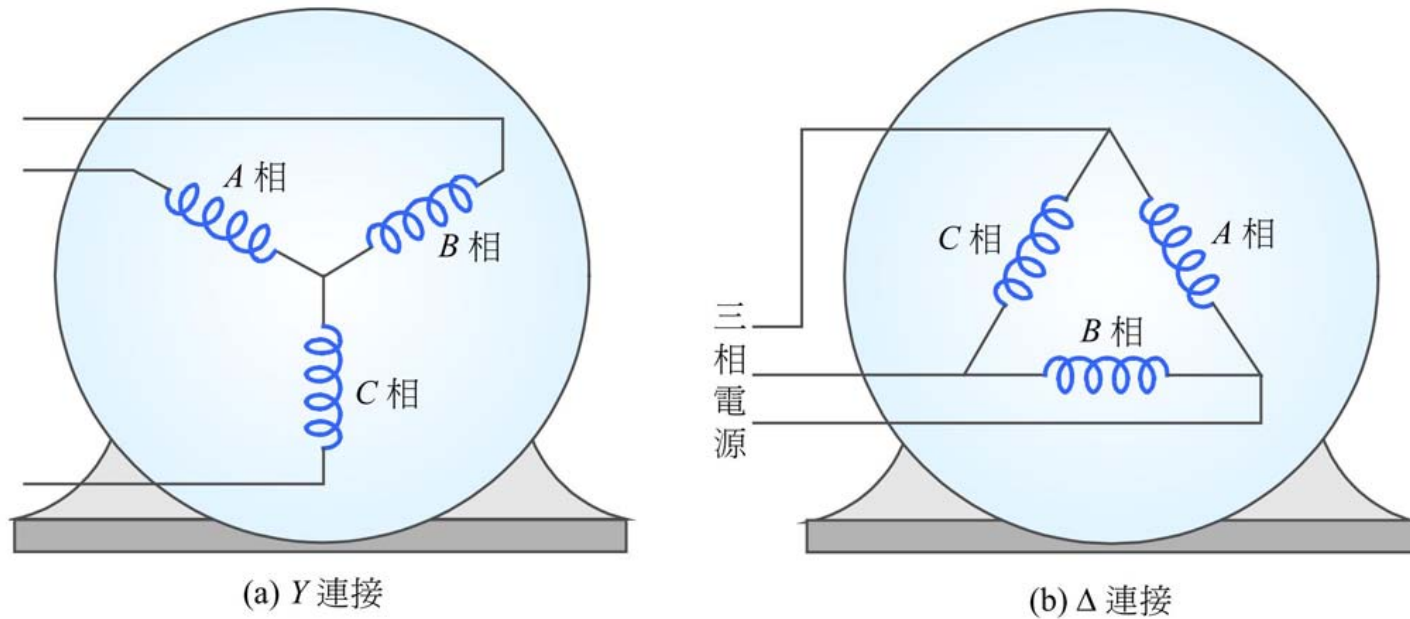


圖 7-2 三相感應電動機定子繞組接線

7-1 感應電動機結構

二、轉子結構

- ▶ 典型的三相感應機的轉子結構可分為鼠籠式 (squirrel cage) 和繞線式 (wound rotor) 兩種。

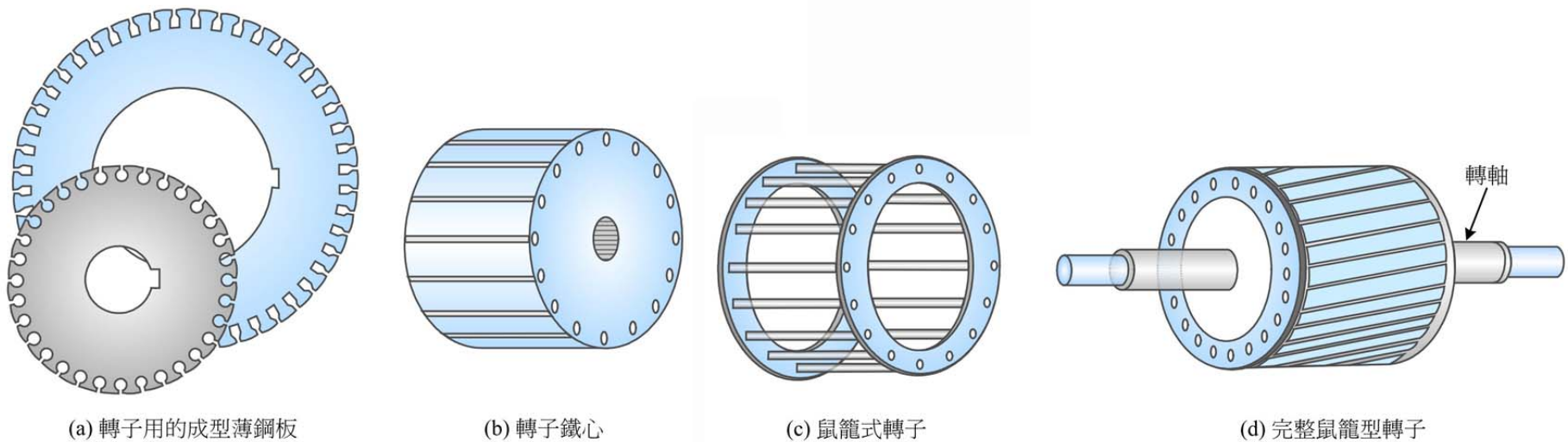


圖 7-3 感應電動機之轉子結構

7-1 感應電動機結構

二、轉子結構 (續)

1. 鼠籠式感應電動機
2. 繞線式感應電動機

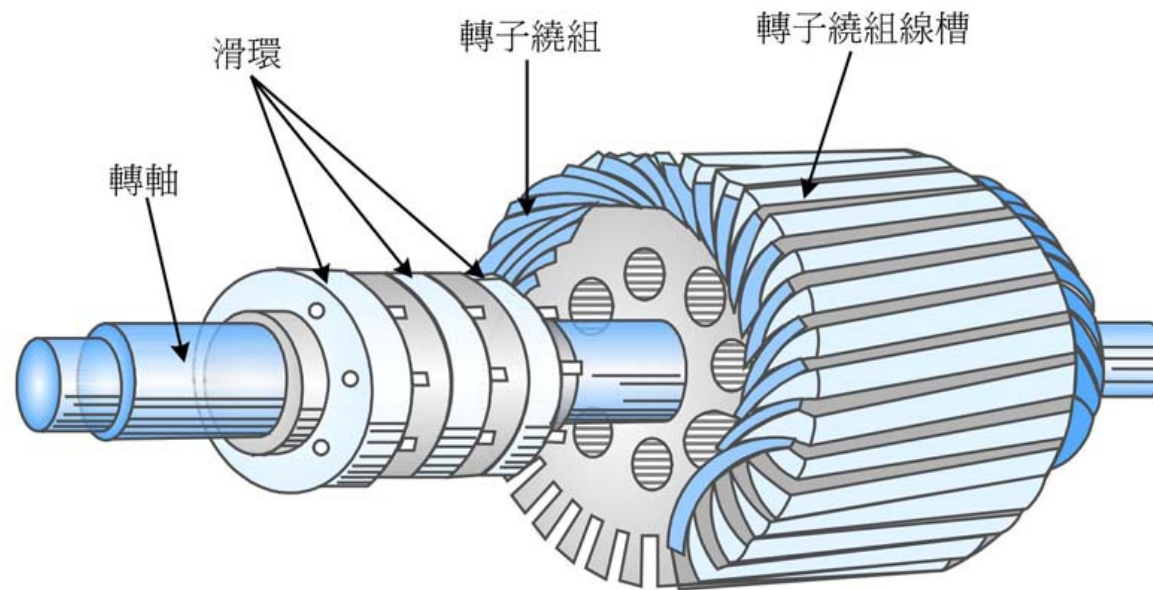


圖 7-4 繞線式感應電動機轉子結構

7-1 感應電動機結構

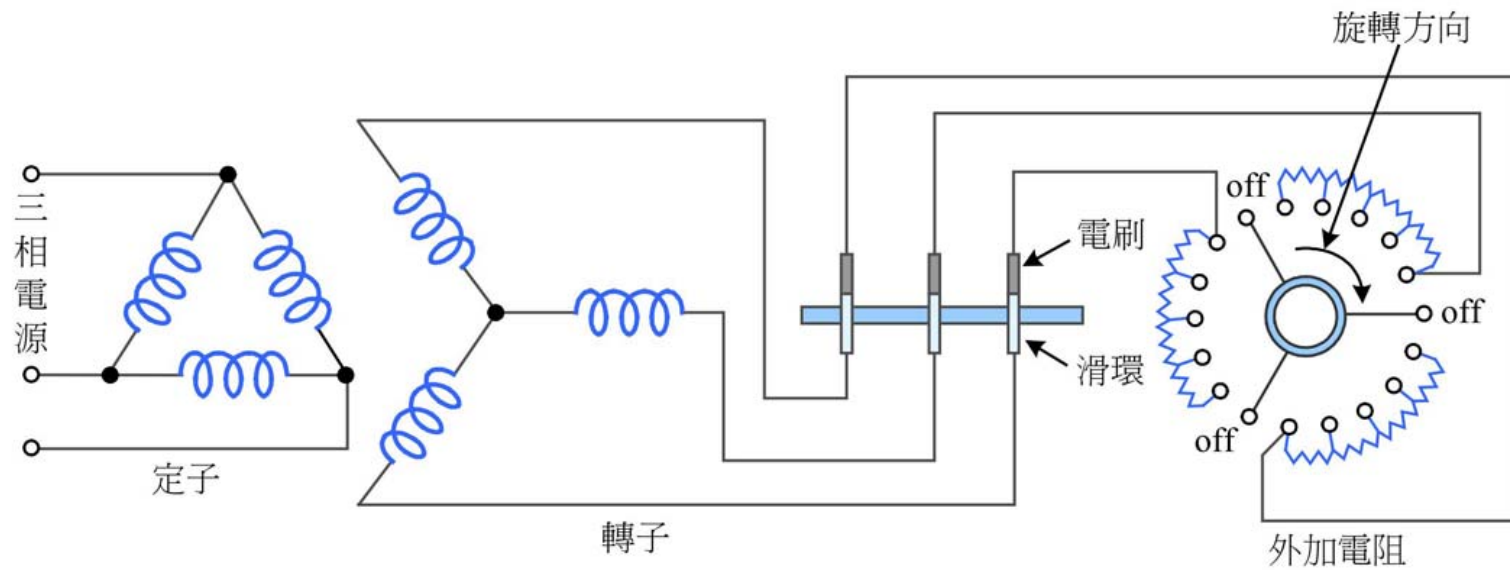


圖 7-5 繞線式感應電動機線路圖

7-2 感應電動機的基本原理

一、場繞組

$$n_s = \frac{120f_s}{P} \quad (7-1)$$

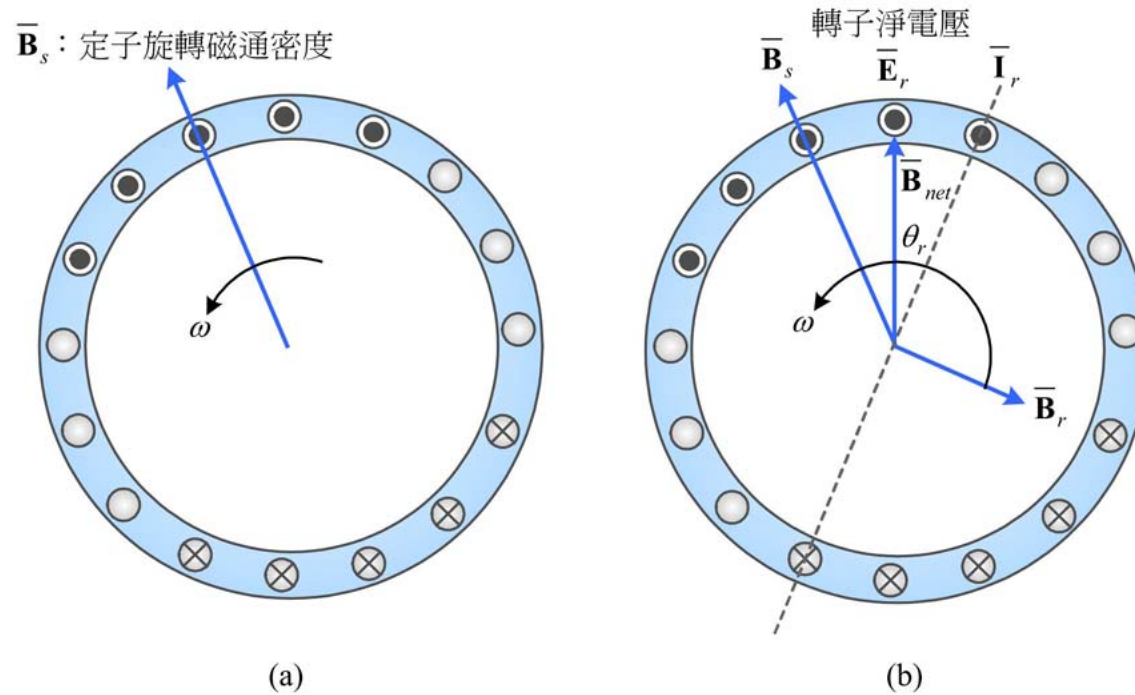


圖 7-6 感應電動機感應轉矩建立過程

7-2 感應電動機的基本原理

二、電樞繞組

- ▶ 如圖7-6(a)所示，圖面上層的轉子導體棒於旋轉磁場 $\bar{\mathbf{B}}_s$ 的相對速度是向右，所以根據勞侖茲力 (Lorentz force) 公式，運動於電磁場的帶電粒子 q 所感受到的作用力為

$$\bar{\mathbf{F}} = q\bar{\mathbf{v}} \times \bar{\mathbf{B}} \quad (7-2)$$

- ▶ 這樣的轉子電流依右手定則將產生轉子磁場 $\bar{\mathbf{B}}_r$ ，再與定子磁場 $\bar{\mathbf{B}}_s$ 相互作用而產生感應轉矩 T_{ind}

$$T_{ind} = k\bar{\mathbf{B}}_r \times \bar{\mathbf{B}}_s \quad (7-3)$$

7-2 感應電動機的基本原理

三、轉差率

- ▶ 感應電動機轉子隨定子旋轉磁場方向轉動，但轉子轉速 n 無法達到定子旋轉磁場的同步轉速 n_s ，否則轉子導體將無法受到旋轉磁場割切而產生電壓，更不能產生轉矩。因此定子旋轉磁場的同步轉速與轉子轉速之差，稱為轉差。而轉差與同步轉速的比值稱為轉差率 (fractional slip)，即

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} \quad (7-4)$$

$$n = (1 - s)n_s \quad (7-5)$$

$$\omega = (1 - s)\omega_s \quad (7-6)$$

7-2 感應電動機的基本原理

四、轉子感應電勢頻率

- ▶ 因轉子繞組極數與定子繞組極數相同，以 P 表之。則轉子電頻率 f_r 正比於磁場轉速 n_s 和轉子轉速 n_r 之差，亦即正比於轉差率 s

$$f_r = \frac{P}{2} \cdot \frac{n_s - n_r}{60} = \frac{P \cdot s \cdot n_s}{120} = s \cdot \frac{P n_s}{120} = s \cdot f_s \quad (7-7)$$

- ▶ 式中 f_s 為定子電源頻率。
- ▶ 轉子磁場對轉子本身的轉速 n' 為

$$n' = \frac{120 f_r}{P} = \frac{120}{P} (s \cdot f_s) = s \cdot n_s \quad (7-8)$$

- ▶ 不論在任何轉速下，轉子磁場與定子磁場恆以同步速率轉動，因此兩磁勢在氣隙中合成磁場亦以同步速率旋轉，故能產生穩定的轉矩。

7-2 感應電動機的基本原理

例 7-1

一部 208 V，10 HP，4 極，60 Hz，Y 連接感應電動機，滿載轉差率為 0.05，試求：

- (1) 此電動機的同步轉速為多少？
- (2) 此電動機在額定負載時的轉子轉速為多少？
- (3) 此電動機在額定負載時的轉子頻率是多少？
- (4) 此電動機在額定負載時的軸轉矩是多少？

7-2 感應電動機的基本原理

解 (1) 電動機的同步轉速為

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

(2) 電動機的轉子轉速為

$$n_r = (1 - s)n_s = (1 - 0.05) \times 1800 = 1710 \text{ rpm}$$

(3) 電動機的轉子頻率為

$$f_r = s \cdot f_s = 0.05 \times 60 = 3 \text{ Hz}$$

(4) 電動機轉軸負載轉矩為

$$\begin{aligned} T_{load} &= \frac{P_{out}}{\omega_m} = \frac{P_{out}}{2\pi \times \frac{n_r}{60}} = \frac{30P_{out}}{\pi n_r} = \frac{30 \times 10 \times 746}{\pi \times 1710} \\ &= 41.66 \text{ N} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

End

7-2 感應電動機的基本原理

例 7-2

一部感應電動機，定子旋轉磁場速率為 1800 rpm，滿載時轉子轉速為 1710 rpm，而定子電流頻率為 60 Hz，試求：

- (1) 電動機的極數？
- (2) 滿載時的轉差率？
- (3) 轉子感應電勢頻率？
- (4) 轉子磁場對轉子轉速？
- (5) 轉子磁場對定子轉速？
- (6) 轉子磁場對定子磁場轉速？

7-2 感應電動機的基本原理

解 (1) $P = \frac{120f_s}{n_s} = \frac{120 \times 60}{1800} = 4$ 極

(2) $s = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{1800 - 1710}{1800} = 0.05$

(3) $f_r = s \cdot f_s = 0.05 \times 60 = 3$ Hz

(4) 轉子磁場對轉子轉速 = $s \cdot n_s = 0.05 \times 1800 = 90$ rpm

(5) 轉子磁場對定子轉速 = $n_s = 1800$ rpm

(6) 轉子磁場對定子磁場轉速 = $n_s - n_s = 1800 - 1800 = 0$ rpm

End

7-3 感應電動機的等效電路

- ▶ 感應電動機亦被稱為旋轉變壓器 (rotating transformer)，其等效電路可藉圖7-7的雙繞組旋轉變壓器來探討。

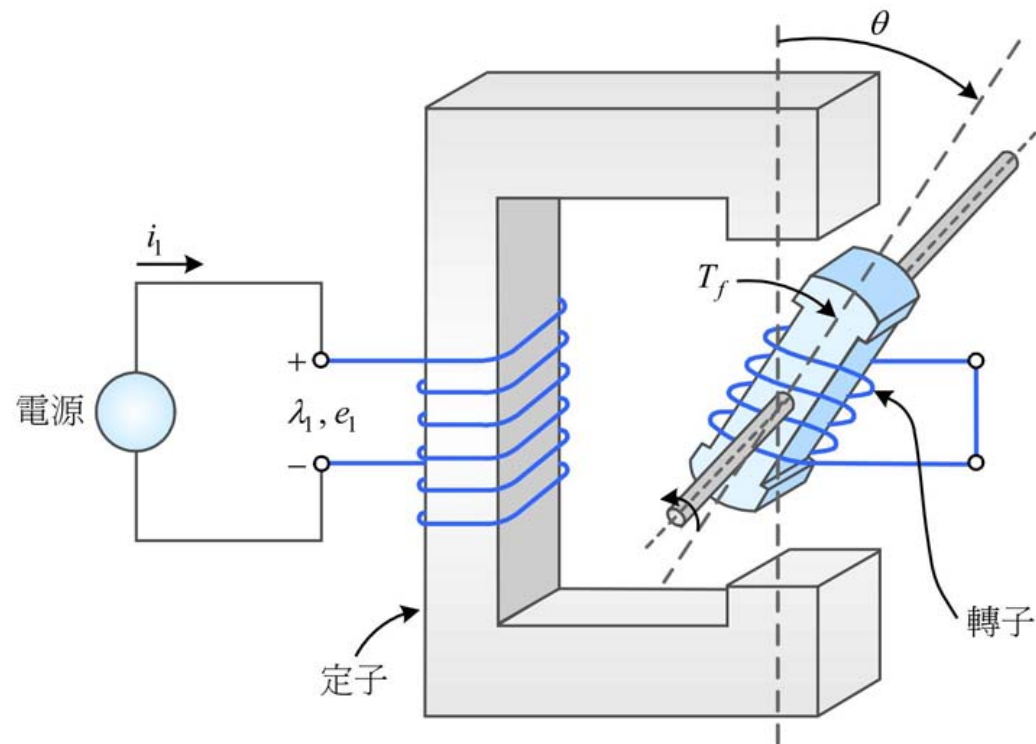


圖 7-7 感應電動機的結構簡圖

7-3 感應電動機的等效電路

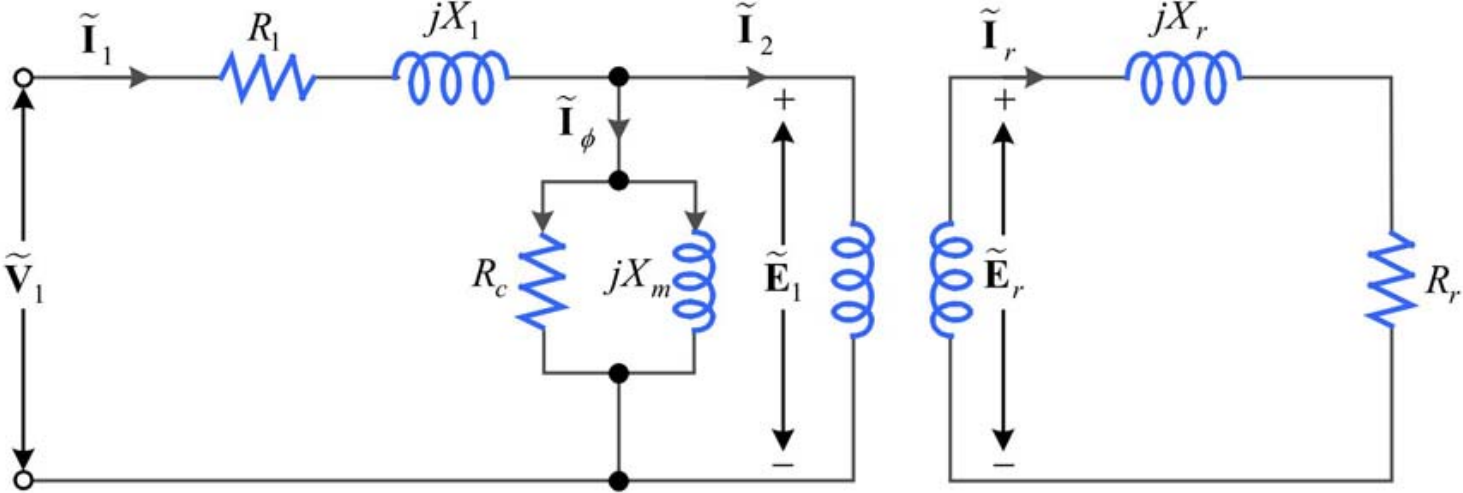


圖 7-8 感應電動機的變壓器概念模型

7-3 感應電動機的等效電路

一、定子繞組等效電路

$$\tilde{V}_1 = \tilde{E}_1 + (R_1 + jX_1) \tilde{I}_1 \quad (7-11)$$

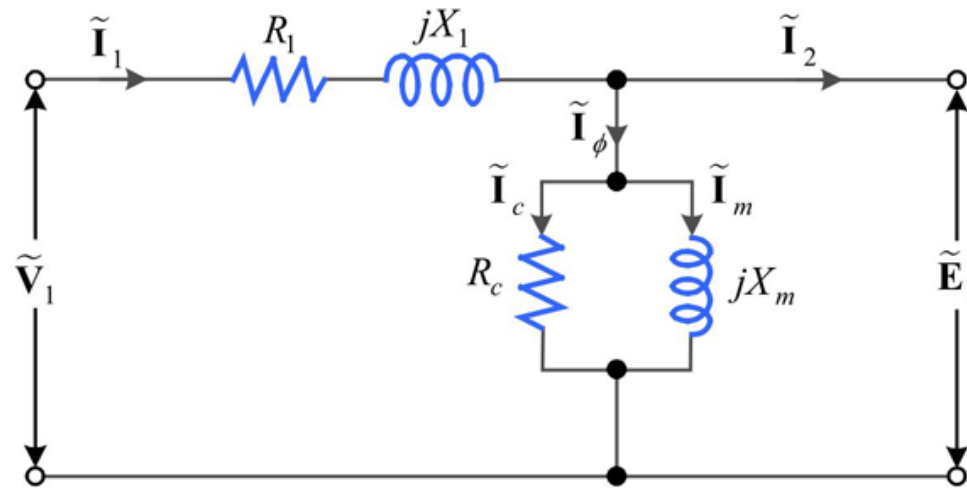


圖 7-9 三相感應電動機定子每相等效電路

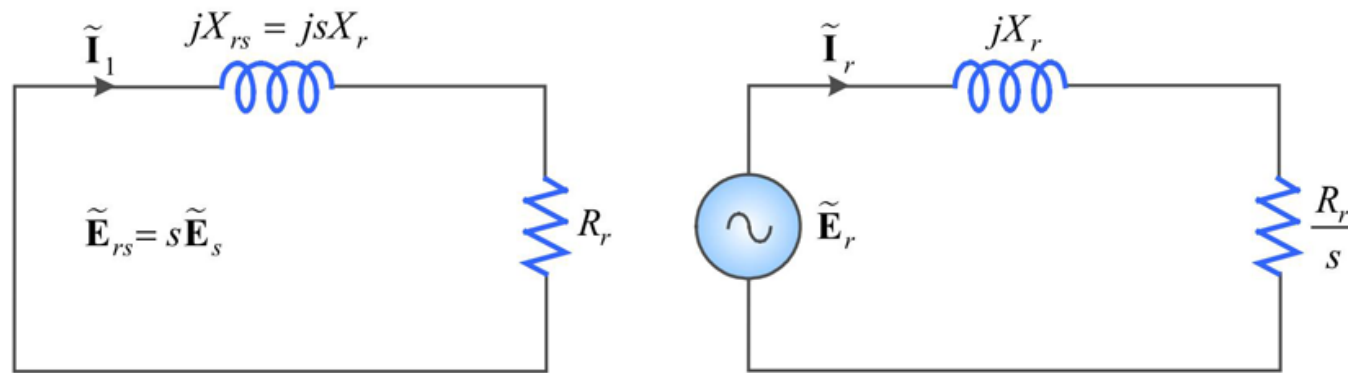
7-3 感應電動機的等效電路

二、轉子等效電路

$$\tilde{\mathbf{Z}}_{rs} = R_r + jsX_r \quad (7-12)$$

$$s\tilde{\mathbf{E}}_r = (R_r + jsX_r) \tilde{\mathbf{I}}_r \quad (7-13)$$

$$\tilde{\mathbf{E}}_r = \left(\frac{R_r}{s} + jX_r \right) \tilde{\mathbf{I}}_r \quad (7-14)$$



(a) 感應電動機轉子電路模型

(b) 將頻率效應歸於 R_r 的轉子等效電路

圖 7-10 轉子等效電路

7-3 感應電動機的等效電路

三、實際運轉的三相感應電動機等效電路

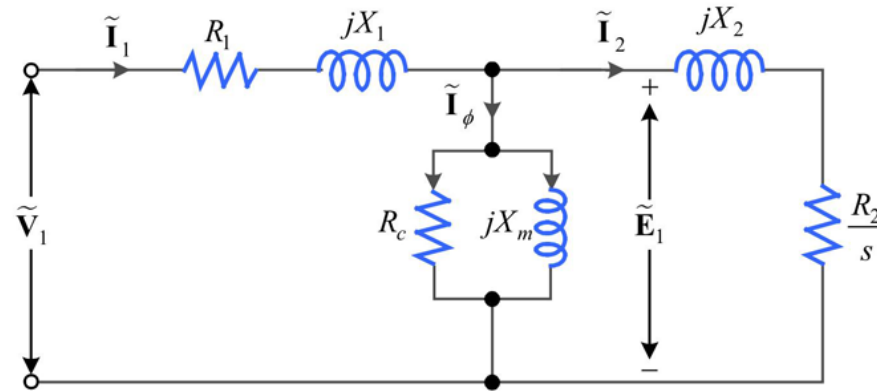


圖 7-11 感應電動機等效電路

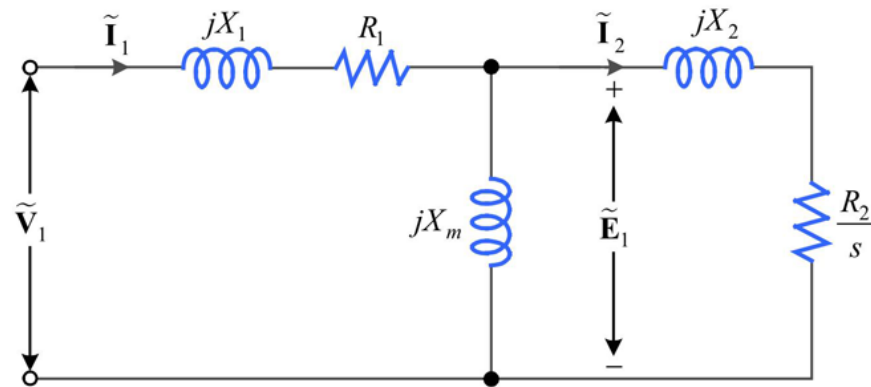


圖 7-12 忽略鐵心等效電阻之感應電動機單相等效電路

7-4 等效電路的功率與轉矩特性分析

一、功率流程圖

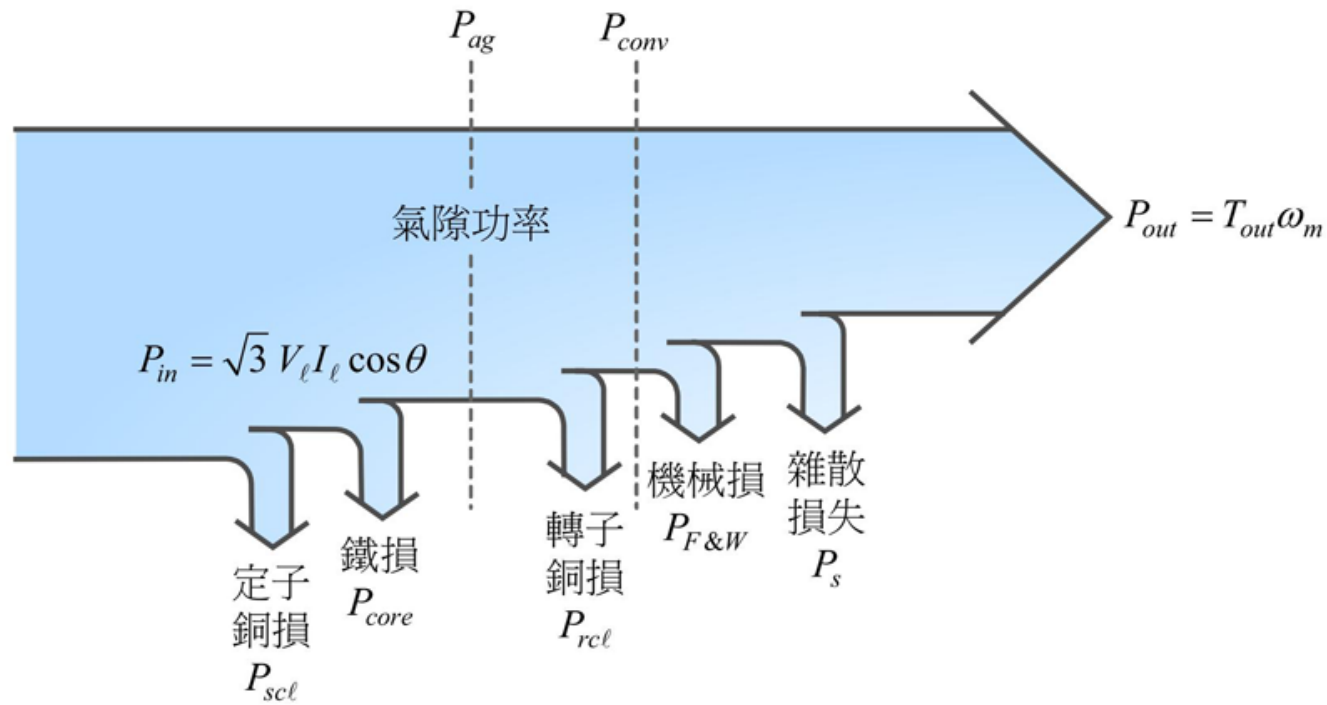


圖 7-13 感應電動機功率流程圖

7-4 等效電路的功率與轉矩特性分析

一、功率流程圖 (續)

- ▶ 將三相電源經由定子繞組投入感應電動機後，其輸入功率為

$$P_{in} = 3V_{\phi}I_{\phi} \cos \theta \quad (7-15)$$

- ▶ 若是從電源輸入的觀點來看，則不論該感應電動機內部之三相定子繞組為 Δ 接或是 Y 接，其輸入功率皆可以電源線電壓 V_{ℓ} 與線電流 I_{ℓ} 表示，並將 (7-15) 式改寫為

$$P_{in} = \sqrt{3} V_{\ell} I_{\ell} \cos \theta \quad (7-16)$$

- ▶ 電動機氣隙功率 (air gap power) P_{ag} ，

$$P_{ag} = P_{in} - P_{scl} - P_{core} \quad (7-17)$$

$$P_{rot} = P_{core} + P_{F\&W} + P_s \quad (7-18)$$

7-4 等效電路的功率與轉矩特性分析

例 7-3

一部 440 V，60 Hz，45 HP 三相感應電動機，在功率因數 0.85 滯後時吸入 60 A 電流。定子銅損 2 kW，轉子銅損 0.7 kW，摩擦與風損 0.6 kW，鐵心損失 1.8 kW，忽略雜散損失，試求：(1) 氣隙功率 P_{ag} ；(2) 轉換功率 P_{conv} ；(3) 輸出功率 P_{out} ；(4) 電動機效率 η 。

解 (1) 輸入功率

$$\begin{aligned} P_{in} &= \sqrt{3} V_{\ell} I_{\ell} \cos \theta = \sqrt{3} \times 440 \times 60 \times 0.85 \\ &= 38867 \text{ W} = 38.867 \text{ kW} \end{aligned}$$

氣隙功率

$$\begin{aligned} P_{ag} &= P_{in} - P_{scl} - P_{core} = 38.867 - 2 - 1.8 \\ &= 35.067 \text{ kW} \end{aligned}$$

7-4 等效電路的功率與轉矩特性分析

(2) 轉換功率

$$P_{conv} = P_{ag} - P_{rcl} = 35.067 - 0.7 = 34.367 \text{ kW}$$

(3) 輸出功率

$$\begin{aligned} P_{out} &= P_{conv} - P_{F\&W} - P_s = 34.367 - 0.6 - 0 \\ &= 33.767 \text{ kW} \end{aligned}$$

(4) 電動機的效率

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% = \frac{33.767}{38.867} \times 100\% = 86.88\%$$

End

7-4 等效電路的功率與轉矩特性分析

二、電動機功率與轉矩計算

- ▶ 圖7-11所示為三相感應電動機單相等效電路，由電源端所視的等效阻抗 $\tilde{\mathbf{Z}}_s$ 為

$$\tilde{\mathbf{Z}}_s = R_1 + jX_1 + \frac{(R_c \times jX_m) \left(\frac{R_2}{s} + jX_2 \right)}{R_c \times jX_m + \left(\frac{R_2}{s} + jX_2 \right) (R_c \times jX_m)} \quad (7-19)$$

- ▶ 故定子繞組之每相電流 $\tilde{\mathbf{I}}_1$ 為

$$\tilde{\mathbf{I}}_1 = \frac{\tilde{\mathbf{V}}_1}{\tilde{\mathbf{Z}}_s} \quad (7-20)$$

7-4 等效電路的功率與轉矩特性分析

二、電動機功率與轉矩計算 (續)

- ▶ 由等效電路知，在轉子電路中唯一消耗氣隙功率的元件是電阻 R_2 / s ，因此，氣隙功率又可表示為

$$P_{ag} = 3I_2^2 \frac{R_2}{s} \quad (7-23)$$

- ▶ 在轉子電路中，轉子銅損 P_{rcl} 為

$$P_{rcl} = 3I_2^2 R_2 = sP_{ag} \quad (7-24)$$

- ▶ 最後由氣隙功率減去轉子銅損後，剩餘的功率可由電功率轉換為機械功率，這個轉換功率稱為內生機械功率 P_{conv} ，其值為

$$\begin{aligned} P_{conv} &= P_{ag} - P_{rcl} = 3I_2^2 \frac{R_2}{s} - 3I_2^2 R_2 \\ &= 3I_2^2 R_2 \left(\frac{1-s}{s} \right) = (1-s)P_{ag} \end{aligned} \quad (7-25)$$

7-4 等效電路的功率與轉矩特性分析

二、電動機功率與轉矩計算 (續)

- ▶ 最後如果摩擦損失、風損以及雜散損失已知，可以求得輸出功率為

$$P_{out} = P_{conv} - P_{F\&W} - P_s \quad (7-26)$$

- ▶ 電動機的感應轉矩 (induced torque) T_{ind} 為內生機械功率 P_{conv} 除以轉子之機械角速度 ω_m 所產生的轉矩，即

$$T_{ind} = \frac{P_{conv}}{\omega_m} \quad (7-27)$$

$$T_{ind} = \frac{P_{conv}}{\omega_m} = \frac{(1-s) P_{ag}}{(1-s) \omega_s} = \frac{P_{ag}}{\omega_s} \quad (7-28)$$

$$T_{out} = \frac{P_{out}}{\omega_m} = T_{ind} - T_{F\&W} - T_s \quad (7-31)$$

7-4 等效電路的功率與轉矩特性分析

三、轉子等效負載電阻

- ▶ 感應電動機由定子經氣隙傳輸至轉子的功率 P_{ag} ，其中一部分為轉子銅損所消耗，其餘則轉換成機械功率以推動電動機轉軸。利用 (7-23) 式至 (7-25) 式可將 R_2 / s 分解成轉子銅損的等值電阻 R_2 與內生機械功率 P_{conv} 之等值電阻

$[(1-s)/s]R_2$ ，即 $\frac{R_2}{s} = R_2 + \frac{1-s}{s}R_2$ 。如此可進一步將圖7-11

的每相等效電路修改如圖7-14：

7-4 等效電路的功率與轉矩特性分析

三、轉子等效負載電阻(續)

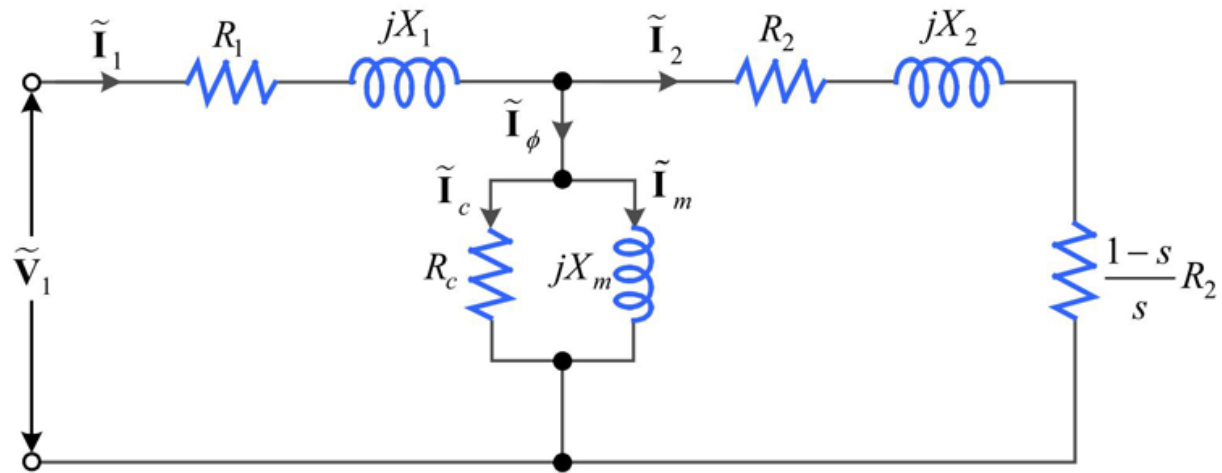


圖 7-14 轉子銅損與內生機械功率分開的等效電路

7-4 等效電路的功率與轉矩特性分析

例 7-4

一部 440 V，25 HP，60 Hz，4 極，Y 接感應電動機，轉換到定子電路的單相阻抗如下列所示：

$$R_1 = 0.641\Omega, R_2 = 0.332\Omega$$

$$X_1 = 1.106\Omega, X_2 = 0.464\Omega, X_m = 26.3\Omega$$

總旋轉損失 1100 W，假設損失是常數且鐵損包括在旋轉損失內，若轉子轉差率在額定電壓與頻率時為 0.022，試求電動機的：(1) 轉速；(2) 定子電流；(3) 功率因數；(4) P_{conv} 和 P_{out} ；(5) T_{ind} 和 T_{load} ；(6) 效率。

7-4 等效電路的功率與轉矩特性分析

解 (1) 同步轉速 n_s 為

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

或

$$\omega_s = 2\pi \times \frac{n_s}{60} = 2\pi \times \frac{1800}{60} = 188.5 \text{ rad/s}$$

轉子機械轉軸速度為

$$n_r = (1-s)n_s = (1-0.022) \times 1800 = 1760$$

或

$$\omega_r = (1-s)\omega_s = (1-0.022) \times 188.5 = 184.4 \text{ rad/s}$$

(2) 轉子等效阻抗為

$$\begin{aligned}\tilde{\mathbf{Z}}_2 &= \frac{R_2}{s} + jX_2 = \frac{0.332}{0.022} + j0.464 \\ &= 15.09 + j0.464 = 15.1 \angle 1.76^\circ \Omega\end{aligned}$$

7-4 等效電路的功率與轉矩特性分析

轉子阻抗與激磁電路並聯後的等效阻抗為

$$\begin{aligned}\tilde{\mathbf{Z}}_f &= \frac{jX_m \times \tilde{\mathbf{Z}}_2}{jX_m + \tilde{\mathbf{Z}}_2} = \frac{j26.3 \times 15.1 \angle 1.76^\circ}{j26.3 + 15.1 \angle 1.76^\circ} = \frac{397.13 \angle 91.76^\circ}{30.72 \angle 60.58^\circ} \\ &= 12.94 \angle 31.1^\circ \Omega\end{aligned}$$

電源側總阻抗為

$$\begin{aligned}\tilde{\mathbf{Z}}_{tot} &= \tilde{\mathbf{Z}}_1 + \tilde{\mathbf{Z}}_f = 0.641 + j1.106 + 12.94 \angle 31.1^\circ \\ &= 11.72 + j7.79 = 14.07 \angle 33.6^\circ \Omega\end{aligned}$$

定子電流為

$$\tilde{\mathbf{I}}_1 = \frac{\tilde{\mathbf{V}}_1}{\tilde{\mathbf{Z}}_{tot}} = \frac{\tilde{\mathbf{V}}_\ell}{\tilde{\mathbf{Z}}_{tot}} = \frac{440 \angle 0^\circ}{14.07 \angle 33.6^\circ} = 18.06 \angle -33.6^\circ \text{ A}$$

(3) 電動機的功率因數為

$$\cos \theta = \cos 33.6^\circ = 0.833 \text{ 滯後}$$

7-4 等效電路的功率與轉矩特性分析

(4) 電動機的輸入功率為

$$\begin{aligned}P_{in} &= \sqrt{3} V_{\ell} I_{\ell} \cos \theta \\ &= \sqrt{3} \times 440 \times 18.06 \times 0.833 = 11464.7 \text{ W}\end{aligned}$$

電動機定子銅損為

$$P_{scl} = 3I_1^2 R_1 = 3 \times 18.06^2 \times 0.641 = 627.2 \text{ W}$$

氣隙功率為

$$P_{ag} = P_{in} - P_{scl} = 11464.7 - 627.2 = 10837.5 \text{ W}$$

內生機械功率為

$$P_{conv} = (1 - s)P_{ag} = (1 - 0.022) \times 10837.5 = 10599 \text{ W}$$

7-4 等效電路的功率與轉矩特性分析

輸出功率為

$$\begin{aligned} P_{out} &= P_{conv} - P_{rot} = 10599 - 1100 = 9499 \text{ W} \\ &= 9499 \text{ W} \times \frac{1 \text{ HP}}{746 \text{ W}} = 12.73 \text{ HP} \end{aligned}$$

(5) 電動機的內生轉矩為

$$T_{ind} = \frac{P_{ag}}{\omega_s} = \frac{10837.5}{188.5} = 57.5 \text{ N} \cdot \text{m}$$

電動機轉軸輸出轉矩為

$$T_{out} = \frac{P_{out}}{\omega_r} = \frac{9499}{184.4} = 51.5 \text{ N} \cdot \text{m}$$

(6) 電動機效率為

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% = \frac{9499}{11464.7} \times 100\% = 82.9\%$$

7-4 等效電路的功率與轉矩特性分析

Matlab

```
Vline=440;    %感應機之線電壓
fs=60;       %交流電源頻率 (Hz)
P=4;        %四極電機
R1=0.641;
R2=0.332;
X1=1.106;
X2=0.464;
Xm=26.3;
s=0.022;

% (1)
ns=(2/P)*fs*60; %同步轉速 (rpm)
ws=2*pi*ns/60; %同步轉速 (角頻率 rad/sec)
nr=(1-s)*ns;    %轉速 (rpm)
wr=2*pi*nr/60; %轉速 (角頻率 rad/sec)

% (2)
V1=Vline/sqrt(3); %將線電壓轉為相電壓
Z2=R2/s+j*X2;
Zf=(j*Xm*Z2)/(j*Xm+Z2); %Zf=轉子阻抗並聯激磁電抗
```

7-4 等效電路的功率與轉矩特性分析

```
Z1=R1+j*X1;  
Ztot=Z1+Zf; %感應機之總等效阻抗  
  
I1=V1/Ztot; %定子電流大小：abs(I1)  
  
%(3)  
theta=angle(I1);  
pf=cos(theta); %功率因數  
  
%(4)  
Prot=1100; %電動機之旋轉損失  
Pin=sqrt(3)*Vline*abs(I1)*pf; %電動機之輸入功率]  
Psc1=3*abs(I1)^2*R1; %定子銅損  
Pag=Pin-Psc1; %氣隙功率  
Pconv=(1-s)*Pag; %s 轉換之內生機械功率  
Pout=Pconv-Prot; %輸出之機械功率  
  
%(5)  
Tind=Pag/ws; %電動機之內生轉矩  
Tout=Pout/wr; %輸出轉矩]  
  
%(6)  
eta=Pout/Pin; %電動機效率
```

End

7-4 等效電路的功率與轉矩特性分析

例 7-5

一部三相感應電動機，轉差率為 0.02，轉子銅損 100 W，試求此電動機的內生機械功率為若干？

解 轉子銅損 P_{rcl} 為

$$P_{rcl} = sP_{ag}$$

$$\therefore P_{ag} = \frac{P_{rcl}}{s} = \frac{100}{0.02} = 5000 \text{ W}$$

\therefore 電動機的內生機械功率 P_{conv} 為

$$\begin{aligned} P_{conv} &= (1 - s)P_{ag} = (1 - 0.02) \times 5000 \\ &= 4900 \text{ W} = 6.69 \text{ HP} \end{aligned}$$

End

7-4 等效電路的功率與轉矩特性分析

例 7-6

一部 4 極，60 Hz，5 HP 三相感應電動機，已知其滿載轉子銅損 70 W，試求此電動機滿載時的轉速為多少？

解 乘隙功率 P_{ag} 為

$$P_{ag} = P_{rcl} + P_{out} = 70 + 5 \times 746 = 3800 \text{ W}$$

轉差率 s 為

$$s = \frac{P_{rcl}}{P_{ag}} = \frac{70}{3800} = 0.01842$$

∴ 電動機滿載時的轉速為

$$\begin{aligned} n_r &= (1 - s)n_s = (1 - s) \frac{120f_s}{P} \\ &= (1 - 0.01842) \times \frac{120 \times 60}{4} = 1766.8 \text{ rpm} \end{aligned}$$

End

7-5 應用戴維寧定理求功率與轉矩

一、戴維寧等效電路 (Thevenin's Equivalence)

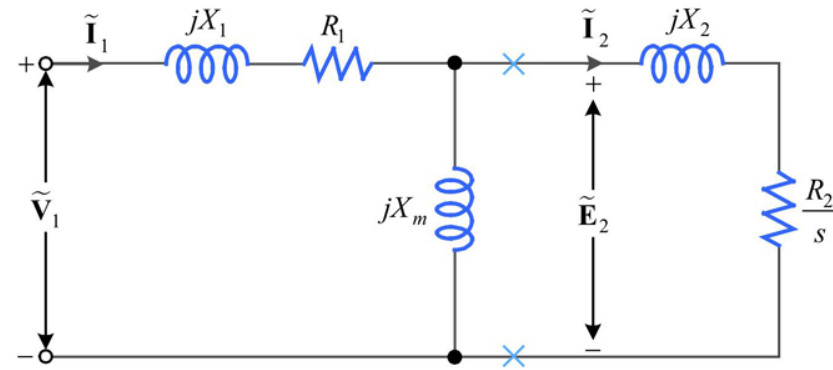
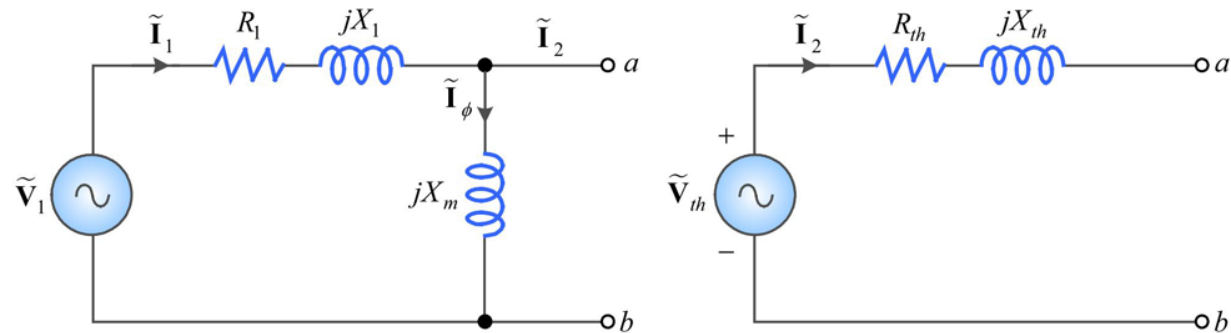


圖 7-15 感應電動機單相等效電路



(a) 化簡前之等效電路

(b) 化簡後之等效電路

圖 7-16 定子側化簡前和化簡後之等效電路

7-5 應用戴維寧定理求功率與轉矩

一、戴維寧等效電路 (Thevenin's Equivalence) (續)

- ▶ 如圖7-16所示，其 a 、 b 兩端的戴維寧等效電壓為

$$\tilde{V}_{th} = \frac{\tilde{Z}_m}{\tilde{Z}_1 + \tilde{Z}_m} \tilde{V}_1 = \frac{jX_m}{R_1 + jX_1 + jX_m} \tilde{V}_1 \quad (7-32)$$

- ▶ 故戴維寧等效電壓 V_{th} 之大小為

$$V_{th} = \frac{X_m}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_m)^2}} V_1 \quad (7-33)$$

- ▶ 又從 a 、 b 兩端點向電源看的等值阻抗如圖7-17所示，兩阻抗並聯的戴維寧等效阻抗為

$$\tilde{Z}_{th} = R_{th} + jX_{th} = \frac{\tilde{Z}_1 \tilde{Z}_m}{\tilde{Z}_1 + \tilde{Z}_m} = \frac{(R_1 + jX_1) \times jX_m}{R_1 + jX_1 + jX_m} \quad (7-34)$$

7-5 應用戴維寧定理求功率與轉矩

一、戴維寧等效電路 (Thevenin's Equivalence) (續)

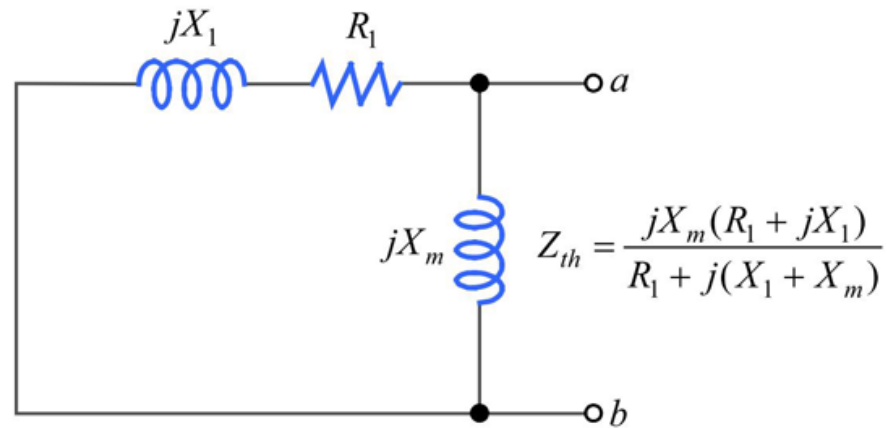


圖 7-17 電動機定子電路戴維寧等效阻抗

7-5 應用戴維寧定理求功率與轉矩

一、戴維寧等效電路 (Thevenin's Equivalence) (續)

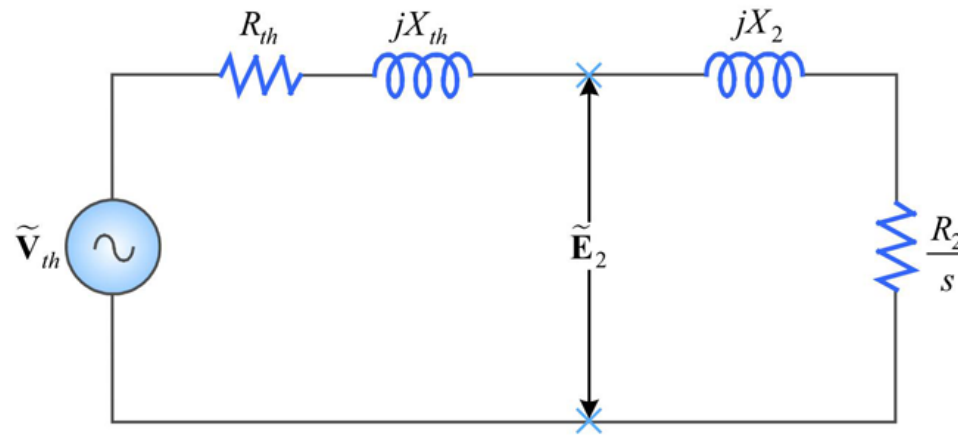


圖 7-18 電動機簡化等效電路

7-5 應用戴維寧定理求功率與轉矩

一、戴維寧等效電路 (Thevenin's Equivalence) (續)

- ▶ 由此等效電路可直接求得轉子電流 $\tilde{\mathbf{I}}_2$ 為

$$\tilde{\mathbf{I}}_2 = \frac{\tilde{\mathbf{V}}_{th}}{\tilde{\mathbf{Z}}_{th} + \tilde{\mathbf{Z}}_2} = \frac{\tilde{\mathbf{V}}_{th}}{R_{th} + jX_{th} + \frac{R_2}{s} + jX_2} \quad (7-37)$$

- ▶ 轉子電流大小值為

$$I_2 = \frac{V_{th}}{\sqrt{\left(R_{th} + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_{th} + X_2)^2}} \quad (7-38)$$

7-5 應用戴維寧定理求功率與轉矩

一、戴維寧等效電路 (Thevenin's Equivalence) (續)

▶ 氣隙功率 P_{ag} 可得

$$P_{ag} = 3I_2^2 \frac{R_2}{s} = \frac{3V_{th}^2}{\left(R_{th} + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_{th} + X_2)^2} \times \frac{R_2}{s} \quad (7-39)$$

▶ 轉子內生感應轉矩 T_{ind} 為

$$T_{ind} = \frac{P_{ag}}{\omega_s} = \frac{3V_{th}^2}{\omega_s \left[\left(R_{th} + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_{th} + X_2)^2 \right]} \times \frac{R_2}{s} \quad (7-40)$$

7-5 應用戴維寧定理求功率與轉矩

二、轉矩 - 轉速特性

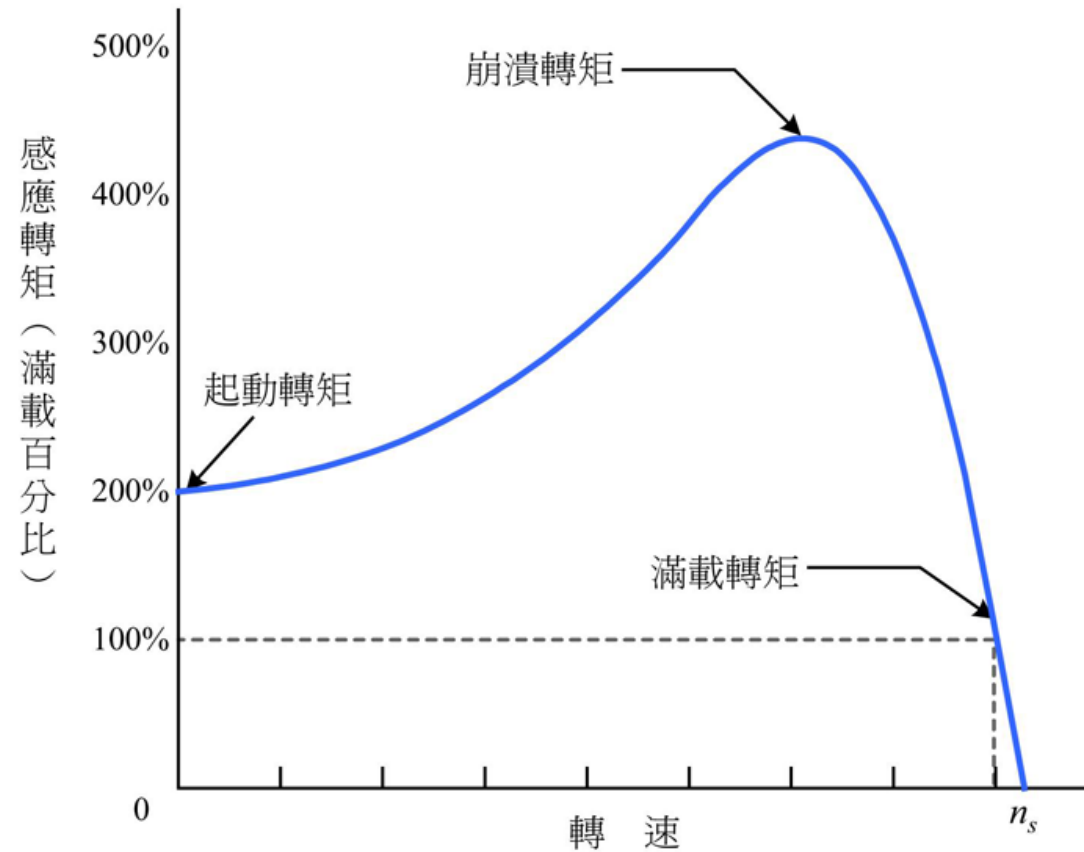


圖 7-19 感應電動機轉矩 - 轉速特性曲線圖

7-5 應用戴維寧定理求功率與轉矩

二、轉矩 - 轉速特性 (續)

1. 電動機在同步轉速 ($s = 0$) 時的感應轉矩為零。
2. 轉矩 - 轉速曲線在無載與滿載之間幾乎是線性的，在此區域內，轉子電阻遠大於轉子電抗 ($\because s \approx 0, \therefore X_r = 0$)，所以轉子電流，轉子磁場與感應轉矩會隨著轉差率增加而呈線性增加。
3. 電動機所能產生的最大轉矩 (maximum torque) T_{\max} ，或稱為崩潰轉矩的值，一般是滿載轉矩的二到三倍值。
4. 電動機的起動轉矩 ($s = 1$) 稍大於滿載轉矩，因此感應電動機可以在任何負載，包括滿載狀態下起動。

7-5 應用戴維寧定理求功率與轉矩

二、轉矩 - 轉速特性 (續)

5. 在給定轉差率時，由 (7-40) 式知，電動機轉矩隨著外加電壓平方變化，利用改變外加電壓法可用來作為感應電動機速率控制。
6. 如果感應電動機轉子轉速超越同步轉速，則電動機感應轉矩方向會相反，且感應電動機會變為感應發電機，將機械功率轉換為電功率。
7. 若欲使電動機反轉，只要簡單的調換定子三相電源任兩相，使磁場旋轉方向反轉即可。

7-5 應用戴維寧定理求功率與轉矩

三、感應電動機的最大（崩潰）轉矩

$$s_{T_{\max}} = \frac{R_2}{\sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X_2)^2}} \quad (7-43)$$

$$\begin{aligned} T_{\max} &= \frac{3V_{th}^2}{\omega_s} \cdot \frac{\sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X_2)^2}}{(R_{th} + \sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X_2)^2})^2 + (X_{th} + X_2)^2} \\ &= \frac{3V_{th}^2}{\omega_s} \cdot \frac{1}{\frac{2[R_{th} \cdot \sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X_2)^2} + R_{th}^2 + (X_{th} + X_2)^2]}{\sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X_2)^2}}} \\ &= \frac{3V_{th}^2}{\omega_s} \cdot \frac{1}{2(R_{th} + \sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X_2)^2})} \\ &= \frac{1}{\omega_s} \cdot \frac{1.5V_{th}^2}{R_{th} + \sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X_2)^2}} \end{aligned} \quad (7-44)$$

7-5 應用戴維寧定理求功率與轉矩

三、感應電動機的最大（崩潰）轉矩（續）

▶ 由上式結果，感應電動機可得下列三個結論：

1. 最大感應轉矩與轉子電阻無關。
2. 最大感應轉矩與電源電壓平方成正比。
3. 增加定子電阻、電抗和轉子電抗，皆可降低最大轉矩。

7-5 應用戴維寧定理求功率與轉矩

三、感應電動機的最大(崩潰)轉矩(續)

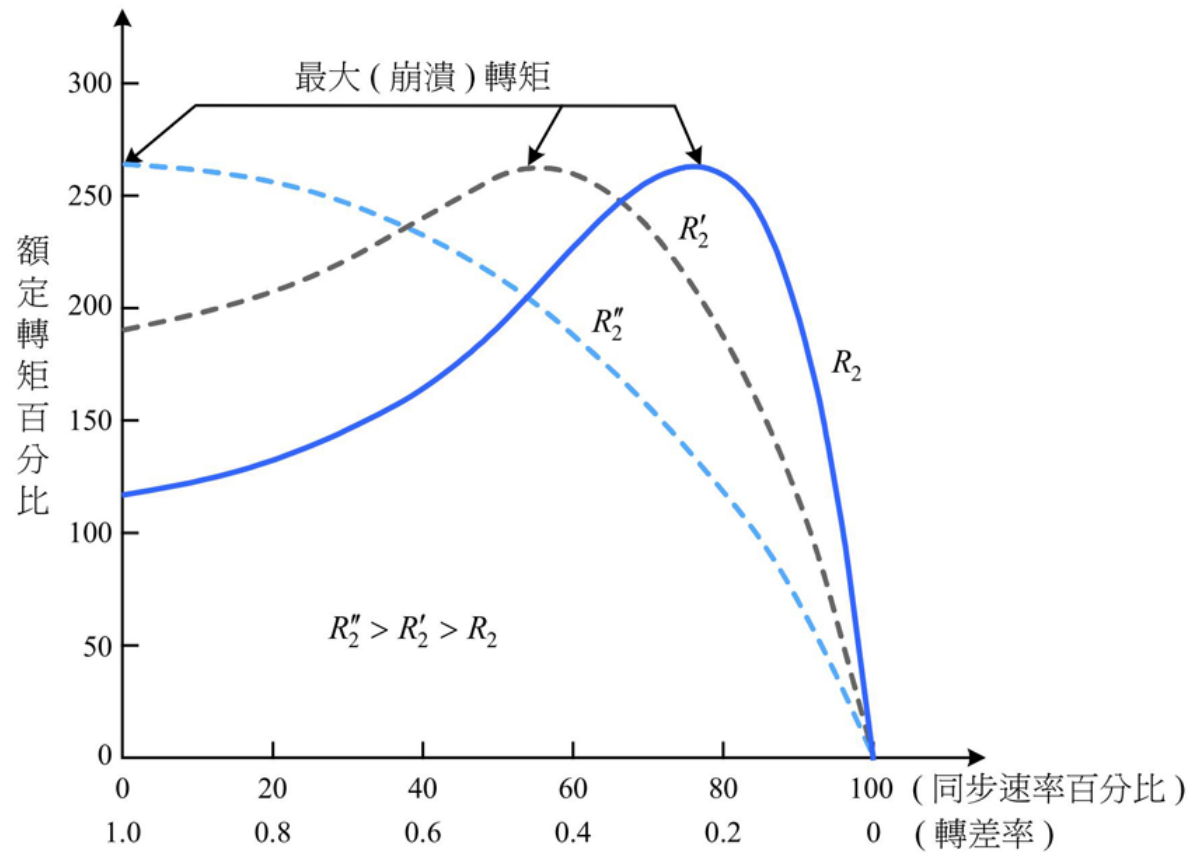


圖 7-20 感應電動機不同轉子電阻轉矩特性曲線

7-5 應用戴維寧定理求功率與轉矩

例 7-7

一部三相，Y 連接，220 V，10 HP，60 Hz，6 極感應電動機，以定子作基準的每相阻抗值為：

$$R_1 = 0.294\Omega, R_2 = 0.144\Omega$$

$$X_1 = 0.503\Omega, X_2 = 0.209\Omega, X_m = 13.25\Omega$$

若該電動機的摩擦損、風阻損、鐵損及無載旋轉損失共計 403 W，且與負載變動無關。又電動機在額定電壓及頻率下運轉，試求：

- (1) 當轉差率 $s = 0.03$ 時，轉子負載電流分量 I_2 ，內生機械轉換功率 P_{conv} 及內生感應轉矩 T_{ind} 各多少？
- (2) 最大轉矩與所對應的轉速各多少？
- (3) 起動時的內生感應轉矩 T_{ind} 及轉子負載電流 $I_{2,start}$ 各多少？

7-5 應用戴維寧定理求功率與轉矩

解 戴維寧等效電壓

$$\begin{aligned} V_{th} &= \frac{X_m}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_m)^2}} V_1 \\ &= \frac{13.25}{\sqrt{(0.294)^2 + (0.503 + 13.25)^2}} \times \frac{220}{\sqrt{3}} = 122.3 \text{ V} \end{aligned}$$

戴維寧等效阻抗

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{Z}}_{th} &= R_{th} + jX_{th} = \frac{(R_1 + jX_1)jX_m}{R_1 + jX_1 + jX_m} \\ &= \frac{(0.294 + j0.503) \times j13.25}{0.294 + j0.503 + j13.25} = 0.273 + j0.49\Omega \end{aligned}$$

(1) 當 $s = 0.03$ 時

$$\frac{R_2}{s} = \frac{0.144}{0.03} = 4.8\Omega$$

7-5 應用戴維寧定理求功率與轉矩

轉子負載電流 I_2 為

$$\begin{aligned} I_2 &= \frac{V_{th}}{\sqrt{\left(R_{th} + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_{th} + X_2)^2}} \\ &= \frac{122.3}{\sqrt{(0.273 + 4.8)^2 + (0.49 + 0.209)^2}} = 23.9 \text{ A} \end{aligned}$$

同步角速度 ω_s 為

$$\begin{aligned} \omega_s &= 2\pi \times \frac{n_s}{60} = 2\pi \times \frac{120f_s}{60P} \\ &= 2\pi \times \frac{120 \times 60}{60 \times 6} = 125.6 \text{ rad/s} \end{aligned}$$

內生機械轉換功率 P_{conv} 為

$$\begin{aligned} P_{conv} &= (1-s)P_{ag} = (1-s) \times 3I_2^2 \frac{R_2}{s} \\ &= (1-0.03) \times 3 \times 23.9^2 \times 4.8 = 7970 \text{ W} \end{aligned}$$

7-5 應用戴維寧定理求功率與轉矩

內生感應轉矩 T_{ind} 為

$$\begin{aligned} T_{ind} &= \frac{P_{ag}}{\omega_s} = \frac{1}{\omega_s} \times 3I_2^2 \frac{R_2}{s} \\ &= \frac{1}{125.6} \times 3 \times 23.9^2 \times 4.8 = 65.5 \text{ N} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

(2) 最大轉矩 T_{max} 為

$$\begin{aligned} T_{max} &= \frac{1}{\omega_s} \times \frac{1.5V_{th}^2}{R_{th} + \sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X_2)^2}} \\ &= \frac{1}{125.6} \times \frac{1.5 \times 122.3^2}{0.273 + \sqrt{0.273^2 + (0.49 + 0.209)^2}} \\ &= 175 \text{ N} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

最大轉矩時的轉差率 $s_{T_{max}}$ 為

$$\begin{aligned} s_{T_{max}} &= \frac{R_2}{\sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X_2)^2}} \\ &= \frac{0.144}{\sqrt{(0.273)^2 + (0.49 + 0.209)^2}} = 0.192 \end{aligned}$$

7-5 應用戴維寧定理求功率與轉矩

最大轉矩時的轉速 n_r 為

$$\begin{aligned}n_r &= (1 - s_{T_{\max}})n_s = (1 - s_{T_{\max}}) \times \frac{120f_s}{P} \\ &= (1 - 0.192) \times \frac{120 \times 60}{6} = 970 \text{ rpm}\end{aligned}$$

(3) 起動時轉差率 $s = 1$ ，但轉子電阻 R_2 不變，因此起動轉子負載電流 $I_{2,start}$ 為

$$\begin{aligned}I_{2,start} &= \frac{V_{th}}{\sqrt{(R_{th} + R_2)^2 + (X_{th} + X_2)^2}} \\ &= \frac{122.3}{\sqrt{(0.273 + 0.144)^2 + (0.49 + 0.209)^2}} = 150.5 \text{ A}\end{aligned}$$

起動內生感應轉矩 T_{start} 為

$$\begin{aligned}T_{start} &= \frac{1}{\omega_s} \times 3I_{2,start}^2 R_2 \\ &= \frac{1}{125.6} \times 3 \times 150.5^2 \times 0.144 = 78 \text{ N-m}\end{aligned}$$

7-5 應用戴維寧定理求功率與轉矩

Matlab

```
Vline=220; %感應機之線電壓
fs=60; %交流電源頻率(Hz)
P=6; %六極電機
R1=0.294;
R2=0.144;
X1=0.503;
X2=0.209;
Xm=13.25;

V1=Vline/sqrt(3); %將線電壓轉為相電壓
Vth=Xm/sqrt(R1^2+(X1+Xm)^2)*V1; %戴維寧等效電壓
Zth=(R1+j*X1)*j*Xm/(R1+j*X1+j*Xm); %戴維寧等效阻抗
Rth=real(Zth);
Xth=imag(Zth);

%(1)
s=0.03;
ns=(2/P)*fs*60; %同步轉速(rpm)
ws=2*pi*ns/60; %同步轉速(角頻率 rad/sec)
```

7-5 應用戴維寧定理求功率與轉矩

```
I2=Vth/sqrt((Rth+R2/s)^2+(Xth+X2)^2); %轉子電流
Pag=3*I2^2*R2/s; %氣隙功率
Pconv=(1-s)*Pag; %s 轉換之內生機械功率
Tind=Pag/ws; %電動機之內生轉矩

%(2)
Tmax=1.5*Vth^2/(Rth+sqrt(Rth^2+(Xth+X2)^2))/ws; %最大轉矩
s_Tmax=R2/sqrt(Rth^2+(Xth+X2)^2); %最大轉矩時之轉差率
nr=(1-s_Tmax)*ns; %最大轉矩時之轉速(rpm)

%(3)
s=1; %起動時之轉差率
I2_start=Vth/sqrt((Rth+R2)^2+(Xth+X2)^2); %起動時之轉子電流
T_start=3*I2_start^2*R2/ws; %起動時之內生感應轉矩
```

End

7-5 應用戴維寧定理求功率與轉矩

例 7-8

一部三相，4 極，60 Hz， Δ 接線，2 HP 感應電動機，其最大轉矩為 40 N-m，此時電動機的轉差率為 0.25，若電動機定部阻抗忽略不計，試求：

- (1) 滿載轉差率 $s = 0.02$ 時的滿載轉矩為多少？
- (2) 起動時 ($s = 1$) 的起動轉矩為多少？

7-5 應用戴維寧定理求功率與轉矩

解 (1)
$$\frac{T}{T_{\max}} = \frac{2}{\frac{s}{s_{T_{\max}}} + \frac{s_{T_{\max}}}{s}}$$

∴ 滿載轉矩 T_f 為

$$T_f = 40 \times \frac{2}{\frac{0.02}{0.25} + \frac{0.25}{0.02}} = 6.36 \text{ N} \cdot \text{m}$$

(2) 起動轉矩 T_s 為

$$T_s = 40 \times \frac{2}{\frac{1}{0.25} + \frac{0.25}{1}} = 18.82 \text{ N} \cdot \text{m}$$

End

7-5 應用戴維寧定理求功率與轉矩

例 7-9

一部三相 220 V，60 Hz，4 極， Δ 接線感應電動機，滿載時轉速 1710rpm。此時電動機產生 2HP 輸出，並且吸入 4.5A 電流，假如電源電壓變動 $\pm 10\%$ ，試求：

- (1) 輸出轉矩的變化範圍為多少？
- (2) 輸入電流的變化範圍為多少？

解

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

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{1800 - 1710}{1800} = 0.05$$

$$\omega_r = 2\pi \times \frac{n_r}{60} = 2\pi \times \frac{1710}{60} = 179.07 \text{ rad/s}$$

7-5 應用戴維寧定理求功率與轉矩

(1) 電源電壓在額定 220 V 的輸出轉矩 T_o 為

$$T_o = \frac{P_o}{\omega_r} = \frac{2 \times 746}{179.07} = 8.33 \text{ N} \cdot \text{m}$$

當電源電壓降低 10% 時，電動機的輸出轉矩 T_{oL} 為

$$\begin{aligned} T_{oL} &= T_o \left(\frac{0.9V_o}{V_o} \right)^2 = 8.33 \times \left(\frac{0.9 \times 220}{220} \right)^2 \\ &= 6.75 \text{ N} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

當電源電壓上升 10% 時，電動機的輸出轉矩 T_{oH} 為

$$\begin{aligned} T_{oH} &= T_o \left(\frac{1.1V_o}{V_o} \right)^2 = 8.33 \times (1.1)^2 \\ &= 10.08 \text{ N} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

電動機輸出轉矩在 6.75 N·m 到 10.08 N·m 之間變動。

7-5 應用戴維寧定理求功率與轉矩

(2) 電源電壓降低 10% 時，電動機吸入的電流 I_L 為

$$\begin{aligned} I_L &= I_o \left(\frac{0.9V_o}{V_o} \right) = 4.5 \times \left(\frac{0.9 \times 220}{220} \right) \\ &= 4.05 \text{ A} \end{aligned}$$

電源電壓上升 10% 時，電動機吸入的電流 I_H 為

$$I_H = I_o \left(\frac{1.1V_o}{V_o} \right) = 4.5 \times 1.1 = 4.95 \text{ A}$$

電動機吸入電流在 4.05 A 到 4.95 A 之間變動。

End

7-5 應用戴維寧定理求功率與轉矩

例 7-10

一部 460 V，25 HP，4 極，60 Hz，Y 接線轉子感應電動機，每相阻抗參考於定子電路如下：

$$R_1 = 0.641\Omega, R_2 = 0.332\Omega$$

$$X_1 = 1.106\Omega, X_2 = 0.464\Omega, X_m = 26.3\Omega$$

- (1) 試求此電動機的最大轉矩？會發生於多少轉速與轉差率下？
- (2) 試求此電動機的起動轉矩？
- (3) 當轉子電阻加倍時，試求多少轉速下會產生最大的轉矩？此電動機新的起動轉矩為何？
- (4) 畫出電動機在固有轉子電阻與轉子電阻加倍時的轉矩 - 轉速特性曲線。

7-5 應用戴維寧定理求功率與轉矩

解 此電動機的戴維寧等效電壓為

$$\begin{aligned} V_{th} &= \frac{X_m}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_m)^2}} V_1 \\ &= \frac{26.3}{\sqrt{0.641^2 + (1.106 + 26.3)^2}} \times \frac{460}{\sqrt{3}} = 255.2 \text{ V} \end{aligned}$$

戴維寧等效電阻為

$$\begin{aligned} R_{th} &\approx R_1 \left(\frac{X_m}{X_1 + X_m} \right)^2 \approx 0.641 \left(\frac{26.3}{1.106 + 26.3} \right)^2 \\ &= 0.59 \Omega \end{aligned}$$

戴維寧等效電抗為

$$X_{th} \approx X_1 = 1.106 \Omega$$

7-5 應用戴維寧定理求功率與轉矩

(1) 產生最大轉矩的轉差率 $s_{T_{\max}}$ 為

$$\begin{aligned} s_{T_{\max}} &= \frac{R_2}{\sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X_2)^2}} \\ &= \frac{0.332}{\sqrt{0.59^2 + (1.106 + 0.464)^2}} = 0.198 \end{aligned}$$

此轉差率對應的轉速 n_r 為

$$\begin{aligned} n_r &= (1 - s_{T_{\max}}) n_s = (1 - s_{T_{\max}}) \times \frac{120f_s}{P} \\ &= (1 - 0.198) \times \frac{120 \times 60}{4} = 1444 \text{ rpm} \end{aligned}$$

在此轉速下的最大轉矩 T_{\max} 為

$$\begin{aligned} T_{\max} &= \frac{1}{\omega_s} \times \frac{1.5V_{th}^2}{R_{th} + \sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X_2)^2}} \\ &= \frac{1}{188.5} \times \frac{1.5 \times 255.2^2}{0.59 + \sqrt{0.59^2 + (1.106 + 0.464)^2}} \\ &= 229 \text{ N} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

7-5 應用戴維寧定理求功率與轉矩

(2) 電動機的起動轉矩 T_s 為

$$\begin{aligned} T_s &= \frac{1}{\omega_s} \times \frac{3V_{th}^2 R_2}{(R_{th} + R_2)^2 + (X_{th} + X_2)^2} \\ &= \frac{1}{188.5} \times \frac{3 \times 255.2^2 \times 0.332}{(0.59 + 0.332)^2 + (1.106 + 0.464)^2} \\ &= 104 \text{ N} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

(3) 如果轉子電阻加倍，在最大轉矩時轉差率也會加倍，因此

$$s'_{T_{\max}} = 2s_{T_{\max}} = 2 \times 0.198 = 0.396$$

在最大轉矩的轉速 n'_r 為

$$n'_r = (1 - s'_{T_{\max}})n_s = (1 - 0.396) \times 1800 = 1087 \text{ rpm}$$

最大轉矩相同仍然維持在

$$T'_{\max} = T_{\max} = 229 \text{ N} \cdot \text{m}$$

7-5 應用戴維寧定理求功率與轉矩

而起動轉矩 T'_s 為

$$\begin{aligned} T'_s &= \frac{1}{\omega_s} \times \frac{3V_{th}^2 R'_2}{(R_{th} + R'_2)^2 + (X_{th} + X_2)^2} \\ &= \frac{1}{188.5} \times \frac{3 \times 255.2^2 \times 0.664}{(0.59 + 0.664)^2 + (1.106 + 0.464)^2} \\ &= 170 \text{ N-m} \end{aligned}$$

- (4) 電動機在原轉子電阻與轉子電阻加倍時的轉矩 - 速率特性曲線如圖 7-21 所示。

7-5 應用戴維寧定理求功率與轉矩

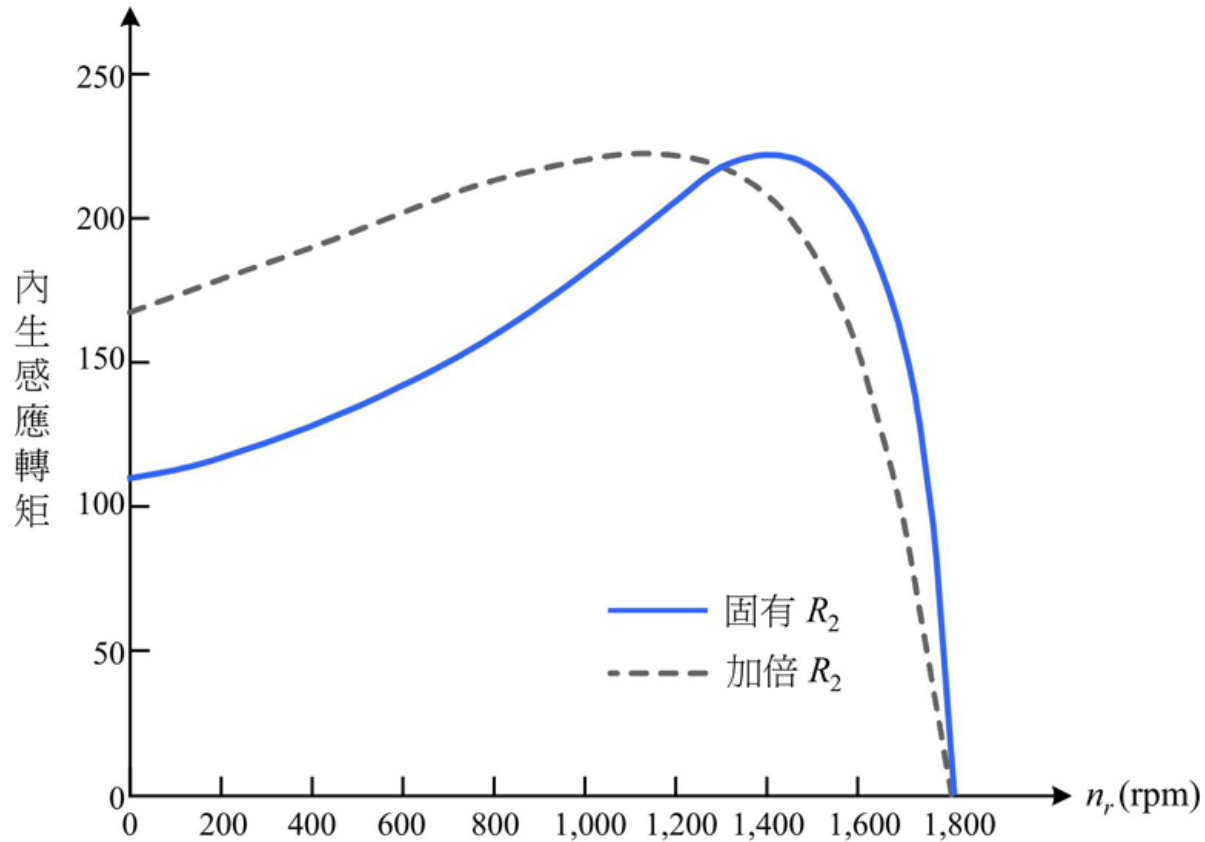


圖 7-21 例 7-10 電動機之轉矩 - 轉速特性曲線

7-5 應用戴維寧定理求功率與轉矩

Matlab

```
clear
Vline=460; %感應機之線電壓
fs=60; %交流電源頻率(Hz)
P=4; %四極電機
R1=0.641;
R2=0.332;
X1=1.106;
X2=0.464;
Xm=26.3;

V1=Vline/sqrt(3); %將線電壓轉為相電壓
Vth=Xm/sqrt(R1^2+(X1+Xm)^2)*V1; %戴維寧等效電壓
Zth=(R1+j*X1)*j*Xm/(R1+j*X1+j*Xm); %戴維寧等效阻抗
Rth=real(Zth);
Xth=imag(Zth);
ns=(2/P)*fs*60; %同步轉速(rpm)
ws=2*pi*ns/60; %同步轉速(角頻率 rad/sec)

%(1)
s_Tmax=R2/sqrt(Rth^2+(Xth+X2)^2); %最大轉矩時之轉差率
nr=(1-s_Tmax)*ns; %最大轉矩時之轉速(rpm)
Tmax=1.5*Vth^2/(Rth+sqrt(Rth^2+(Xth+X2)^2))/ws; %最大轉矩
```

7-5 應用戴維寧定理求功率與轉矩

```
% (2)
I2_start=Vth/sqrt((Rth+R2)^2+(Xth+X2)^2); %起動時之轉子電流
T_start=3*I2_start^2*R2/ws; %起動時之內生感應轉矩

% (3)
s_Tmax_prime=2*s_Tmax; %轉子電阻值加倍，造成 s_Tmax 值亦加倍
nr_prime=(1-s_Tmax_prime)*ns; %最大轉矩時之轉速 (rpm)
I2_start_prime=Vth/sqrt((Rth+2*R2)^2+(Xth+X2)^2); %起動時之轉子電流
T_start_prime=3*I2_start_prime^2*2*R2/ws; %起動時之內生感應轉矩

% (4)
i=0;
for s=1:-0.01:0.001
    i=i+1;
    nr(i)=(1-s)*ns;
    I2=Vth/sqrt((Rth+R2/s)^2+(Xth+X2)^2);
    Pag=3*I2^2*R2/s;
    Tind1(i)=Pag/ws;
    I2=Vth/sqrt((Rth+2*R2/s)^2+(Xth+X2)^2);
    Pag=3*I2^2*2*R2/s;
    Tind2(i)=Pag/ws;
end
plot(nr,Tind1,nr,Tind2,'--')
xlabel('n_r(rpm)');
ylabel('轉矩');
```

End

7-5 應用戴維寧定理求功率與轉矩

例 7-11

一部 5 HP，3 相，4 極，60 Hz，220 V，Y 接繞線型感應電動機，以定子為基準，每相換算的等效電阻和電抗如下：

$$R_{th} = R_2 = 0.1\Omega, \quad X_{th} = X_2 = 0.2\Omega,$$

欲使在轉差率 $s = 1, 1/2, 1/4$ 各點均達最大轉矩，試問在以上各點轉子應串接多少等效電阻？

7-5 應用戴維寧定理求功率與轉矩

解 在不同轉差率時，轉子應串接的等效電阻為

$$\begin{aligned} s_{T_{\max}} = 1 \text{ 時, } R_x(1) &= s_{T_{\max}} \sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X_2)^2} - R_2 \\ &= \sqrt{0.1^2 + 0.4^2} - 0.1 = 0.3123\Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} s_{T_{\max}} = \frac{1}{2} \text{ 時, } R_x\left(\frac{1}{2}\right) &= s_{T_{\max}} \sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X_2)^2} - R_2 \\ &= \frac{1}{2} \sqrt{0.1^2 + 0.4^2} - 0.1 = 0.1062\Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} s_{T_{\max}} = \frac{1}{4} \text{ 時, } R_x\left(\frac{1}{4}\right) &= s_{T_{\max}} \sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X_2)^2} - R_2 \\ &= \frac{1}{4} \sqrt{0.1^2 + 0.4^2} - 0.1 = 0.003\Omega \end{aligned}$$

End

7-5 應用戴維寧定理求功率與轉矩

例 7-12

一部三相感應電動機轉子電阻 R_2 ，產生最大轉矩時轉差率為 0.25，現欲使起動時得到最大轉矩，則轉子應外接多少電阻？

解 起動時得到最大轉矩，則轉子應接的電阻 R_x 為

$$R_x = \left(\frac{s'}{s} - 1 \right) R_2 = \left(\frac{1}{0.25} - 1 \right) R_2 = 3R_2$$

即轉子應外接 3 倍 R_2 等效電阻。

End

7-6 感應電動機的速度控制

- ▶ 三相感應電動機的轉子速率 n 為

$$n = (1 - s)n_s = (1 - s) \frac{120f_s}{P} \quad (7-49)$$

- ▶ 式中 s 為轉差率， f_s 為電源頻率 (Hz)； P 為極數。
- ▶ 三相感應電動機的速度控制可歸納為：

1. 定子方面的控速方法

- (1) 改變外加電壓；
- (2) 改變電源頻率；
- (3) 改變定子極數。

2. 轉子方面的控速方法

- (1) 轉子電路中串接電阻；
- (2) 加一電勢於轉子電路中；
- (3) 二台電動機串接運用。

7-6 感應電動機的速度控制

例 7-13

一部 4 極，60 Hz 繞線式感應電動機，滿載時轉速 1710 rpm，轉子每相電阻為 1Ω ，今欲將滿載轉速改設在 1500 rpm 時，試求所需加入的外部電阻為多少？

7-6 感應電動機的速度控制

解

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

$$s_f = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{1800 - 1710}{1800} = 0.05$$

$$s'_f = \frac{n_s - n'_r}{n_s} = \frac{1800 - 1500}{1800} = 0.1667$$

轉子所需的外加電阻 R_x ，由轉矩比例推移可得其關係式為

$$\frac{R_2 + R_x}{s'_f} = \frac{R_2}{s_f}$$
$$\frac{1 + R_x}{0.1667} = \frac{1}{0.05}$$

$$\therefore R_x = 2.334\Omega \text{。}$$

End

7-6 感應電動機的速度控制

例 7-14

兩部感應電動機極數分別為 12 極及 4 極，今欲接成串聯運用，電源頻率為 60 Hz，試求：

- (1) 只用 12 極單機時的同步速度。
- (2) 只用 4 極單機時的同步速度。
- (3) 兩機定子磁場同相串聯運用時的同步轉速。
- (4) 兩機做相差串聯運用時的同步轉速。

7-6 感應電動機的速度控制

解 (1) 只用 12 極單機時的同步轉速 n_{s1} 為

$$n_{s1} = \frac{120f_1}{P_1} = \frac{120 \times 60}{12} = 600 \text{ rpm}$$

(2) 只用 4 極單機時的同步轉速 n_{s2} 為

$$n_{s2} = \frac{120f_1}{P_2} = \frac{120 \times 60}{4} = 1800 \text{ rpm}$$

(3) 兩機串聯且定子磁場同相，運用時的同步轉速 n_{s3} 為

$$n_{s3} = \frac{120f}{P_1 + P_2} = \frac{120 \times 60}{12 + 4} = 450 \text{ rpm}$$

(4) 兩機串聯且定子磁場反相，運用時的同步轉速 n_{s4} 為

$$n_{s4} = \frac{120f_1}{P_1 - P_2} = \frac{120 \times 60}{12 - 4} = 900 \text{ rpm}$$

End