



單元

6

同步電機

» 單元重點

同步電機依據功能分為同步發電機與同步電動機，兩者可以互換使用。同步發電機普遍裝設於發電廠內，將各種機械能（火力、水力、核能）轉換成交流電能。

同步電動機與感應電動機都屬於交流電動機，差別在於感應電動機可以自行起動，但是轉速會低於同步轉速。至於同步電動機雖然無法自行起動，但是起動完成後能以同步轉速穩定旋轉，兩者各有其優點。

» 單元綱要

- 第七章 同步發電機之原理
- 第八章 同步發電機之分類與構造
- 第九章 同步發電機之特性
- 第十章 同步發電機之並聯運用
- 第十一章 同步電動機

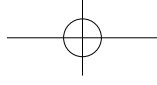
單元六 生活知識家 明潭發電廠 - 電機與自然力量的完美合作

日月潭位於南投縣魚池鄉，除了是全台灣最大的天然湖泊、知名觀光景點以外；它也擁有台灣最複雜的水力發電系統。日治時期在濁水溪上游興建水壩，並將溪水引入日月潭，同時興建「門牌潭發電所」，為日月潭水力發電奠定基礎。

1993 年完成的明潭發電廠以日月潭為上池，明潭水庫作為下池，位能差達 380 公尺，共裝置 6 部「豎軸法蘭西斯可逆式」水輪機及 26 萬 7 千瓩發電機 (267 MW)。白天用電高峰期間，庫水經隧道通過水輪機帶動同步發電機，產生電能提供用戶使用。夜間用電離峰時間，改將同步發電機通電作為同步電動機使用，帶動水輪機將下池的庫水抽回至上池蓄存，對於電力調度有很大幫助。



圖片來源：台灣電力公司



CHAPTER 7

同步發電機之原理

» 本章重點

依據弗萊明右手定則，導體在磁場中運動會產生應電勢。直流發電機與同步發電機都是利用相同原理，差別在於直流發電機必須透過換向器將電樞感應產生的交流電轉換成直流電；同步發電機則是將電樞感應產生的交流電直接輸出使用，因此沒有換向器，構造更為簡單。

7-1 頻率、極數及轉速之關係

圖 7-1 為交流發電機的基本構造，定子內裝有三組互隔 120° 電機角的線圈，轉子採用兩極永久磁鐵由外力帶動。圖 7-1(b) 為線圈 $(A - A')$ 應電勢波形的變化情形，當線圈每經過一對磁極 $(P = 2)$ 割切，即產生一週之正弦變化，所須的時間稱為週期 T ，每秒產生的波形數稱為頻率 f ，目前商用頻率主要有 50、60 Hz 兩種，我國電力系統採用 60 Hz。

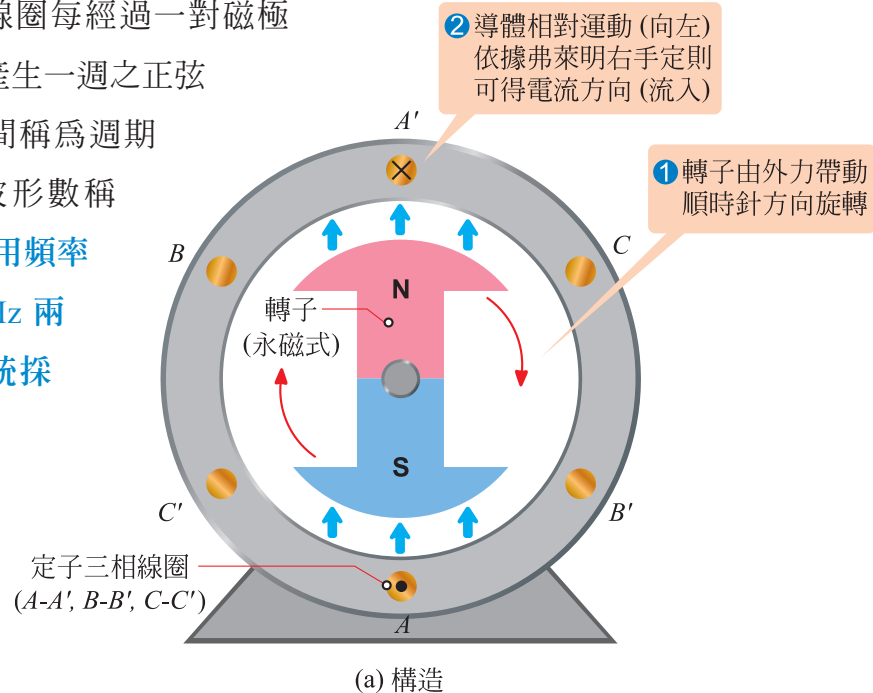
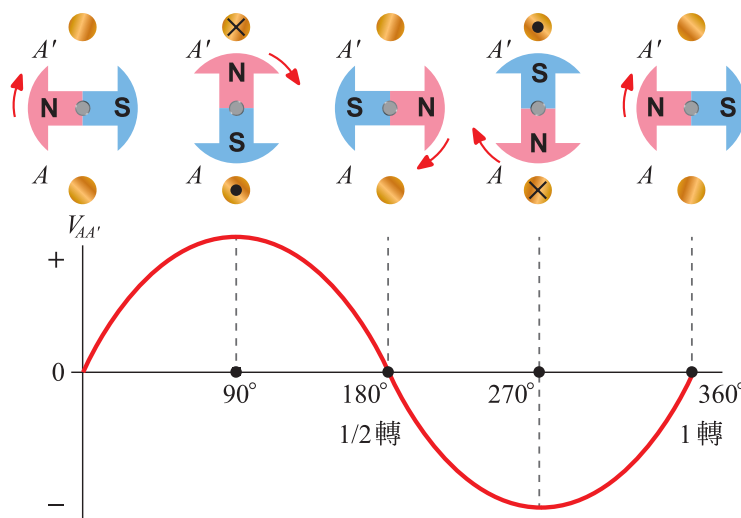


圖 7-1 交流發電機的構造與基本原理



(b) 磁場旋轉與 A 相繞組應電勢

圖 7-1 交流發電機的構造與基本原理 (續)

依據上述說明，倘若轉子有 P 個磁極 ($\frac{P}{2}$ 對極)，轉子每秒轉速為 s ，則應電勢之頻率為 $f = \frac{P}{2} \times s (\text{Hz})$ 。

若轉子每分鐘轉速為 $n(\text{rpm})$ 時，應電勢之頻率為：

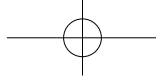
$$f = \frac{P}{2} \times \frac{n}{60} = \frac{P \times n}{120} \quad (7-1)$$

f ：頻率 (Hz) P ：磁極數 (極) n ：每分鐘轉速 (轉 / 分鐘；rpm)

依據公式 7-1，發電機感應電勢的頻率 f 與磁極數 P 與轉速 n 成正比。為了輸出相同頻率的電源，發電機的轉速必須配合磁極數以穩定的速度持續運轉，此轉速稱為同步轉速 (n_s)，以同步轉速持續運轉的交流發電機就稱為同步發電機。其公式由 7-1 轉換可得：

$$n_s = \frac{120f}{P} (\text{rpm}) \quad (7-2)$$

n_s ：同步轉速 (轉 / 分鐘；rpm)



公式 7-2 與感應電動機同步轉速公式完全相同，但需注意**同步發電機**的**同步轉速**是由**原動機 (火力、水力)** 等外力提供。而**感應電動機**則是電樞繞組外加**三相電源**後所產生，兩者產生的方式不同。

範例

01

有一部 6 極交流同步發電機，若要產生 (1)60 Hz 的電源頻率，每分鐘轉速需為多少？(2)50 Hz 的電源頻率，每分鐘轉速需為多少？

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

(2) $f = 50 \text{ Hz}$ 時：
$$n_s = \frac{120f}{P} = \frac{120 \times 50}{6} = 1000 \text{ rpm}$$

7-2 感應電勢及同步轉速

一、感應電勢的計算

圖 7-2 為兩極同步發電機剖面圖，線圈兩邊相隔 180° 電機角 (全節距)，當轉子磁極以相同角速度割切定子線圈時，磁通量為 $\phi(t) = \phi_m \sin \omega t$ ，依據法拉第 - 冷次定律得知， N 匝線圈產生的感應電勢：

$$E_{eff} = 4.44 f N \phi_m \quad (7-3)$$

E_{eff} ：感應電勢 (V)

f ：頻率 (Hz)

N ：線圈匝數 (匝)

ϕ_m ：每極磁通量 (Wb)

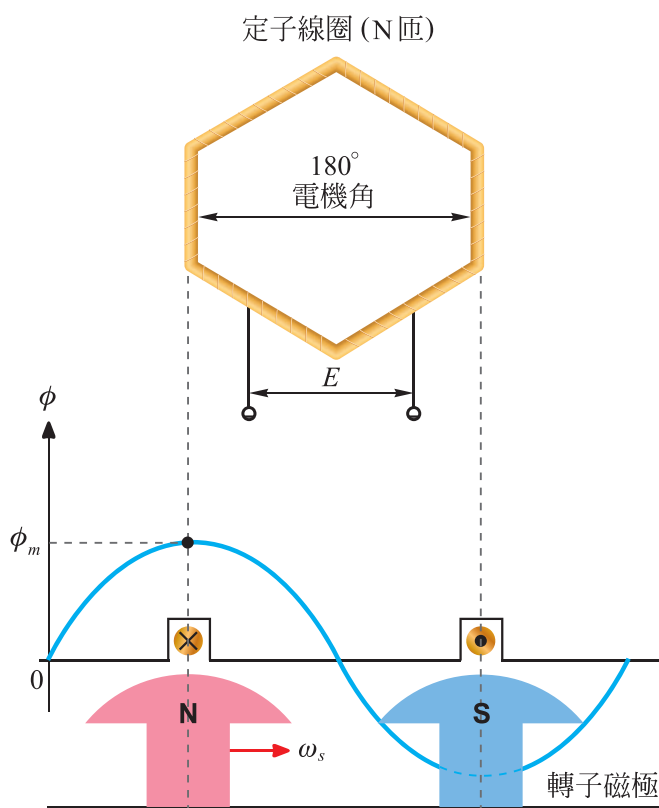
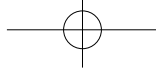


圖 7-2 發電機的感應電勢

二、感應電勢與同步轉速的關係

公式 7-3 ($E_{eff} = 4.44 f N \phi_m$) 中，應電勢 (E) 與同步轉速 (n_s) 似乎沒有關係，但是由公式 7-2 ($n_s = \frac{120f}{P}$)，發電機產生的電源頻率 (f) 會與同步轉速 (n_s) 成正比改變，因此**同步發電機必須先依據頻率 (f) 與極數 (P) 的關係決定同步轉速 (n_s)**，此轉速在運轉過程必須保持不變；而感應電勢 (E) 的高低再透過磁通量 (ϕ) 來做調整。



範例

02

有一部 4 極同步發電機，電樞繞組每相匝數為 50 匝，每極磁通量為 0.02 韋伯，原動機轉速為 1500 rpm，若感應電勢為正弦波，則 (1) 頻率、(2) 電壓有效值分別為何？

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

$$(2) E = 4.44 f N \phi_m = 4.44 \times 50 \times 50 \times 0.02 = 222 \text{ V}$$

隨堂練習

同範例 02，若將原動機轉速調整至 1800 rpm，磁通量維持不變，則 (1) 頻率 (2) 電壓有效值分別為何？

7-3 電樞及電樞繞組

一、電樞

爲了將感應產生的交流電源直接輸出，大部分的同步發電機會採用圖 7-3 的設計方式，將感應產生交流電的電樞繞組安裝於定子，負責提供磁通的磁場繞組安裝於轉子並由外力帶動，此種設計稱為旋轉磁場式。

以旋轉磁場式同步發電機為例，電樞是指其定子部分，主要由定子鐵心、電樞繞組、外殼、軸承及附屬機件組成。整體而言，旋轉磁場式同步發電機的定子構造與三相感應電動機的定子構造非常相似。

定子鐵心是由厚度 0.35 mm 左右的矽鋼片疊成的中空圓筒。鐵心每隔 50 mm ~ 60 mm 留有通風槽以便散熱。鐵心內設有縱向的線槽，一般爲開口槽或半閉口槽，準備安置電樞繞組。

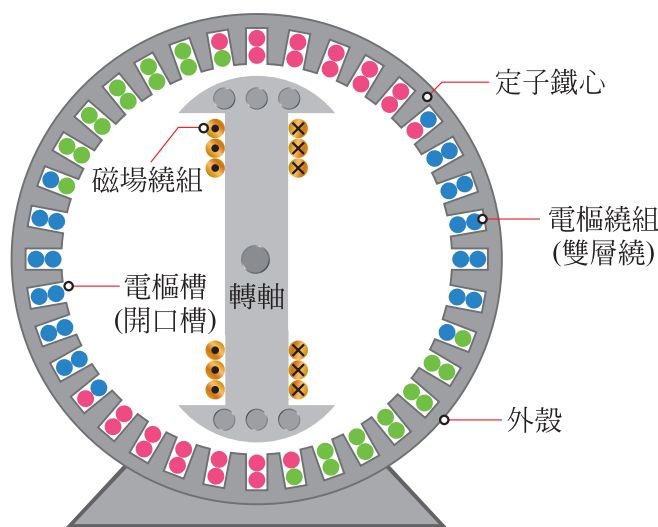


圖 7-3 旋轉磁場式同步發電機

二、電樞繞組

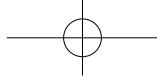
同步發電機大多為三相機種，因此電樞鐵心內裝有三組電樞繞組，彼此互隔 120° 電機角，再以 Y 接或是 Δ 接方式連接。當轉子磁極以同步轉速切割電樞繞組時，三組繞組感應產生相同頻率、相位互隔 120° 電機角的三相感應電勢。

為了妥善利用空間，並使應電勢波形更趨近於正弦波，同步發電機的電樞繞組大多採用雙層、短節距、分佈繞組，其說明如下：

1. 單層繞與雙層繞

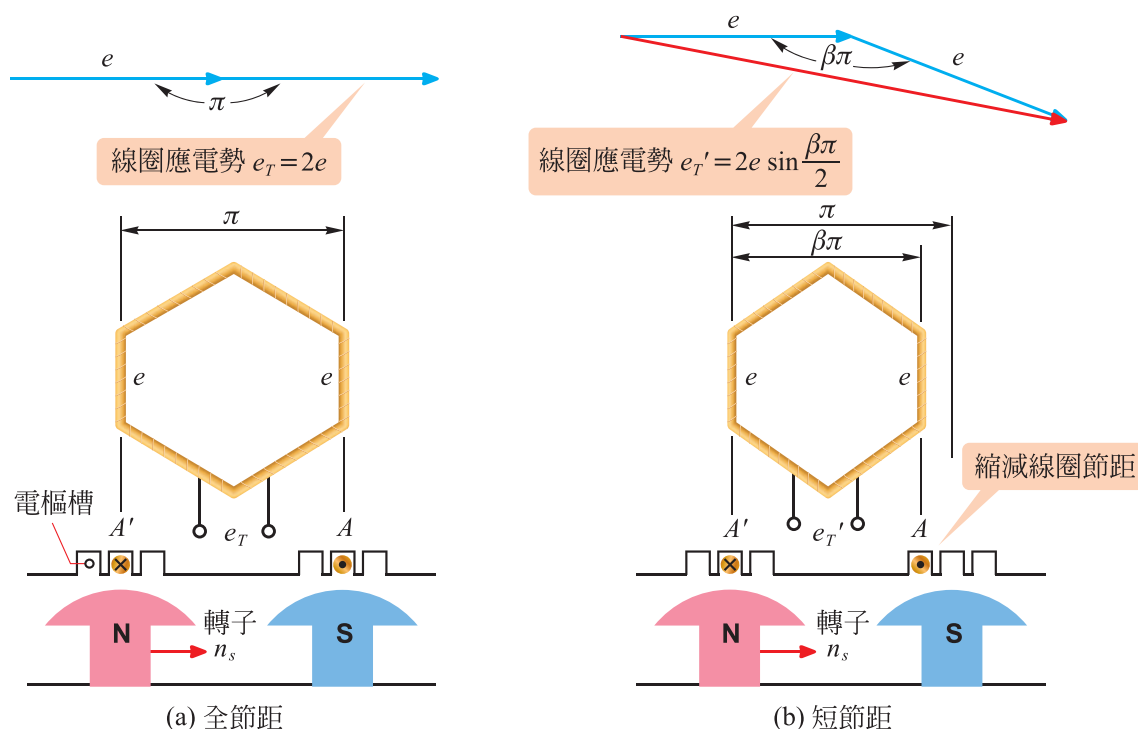
- (1) 單層繞：每個線槽內只有放置一只線圈邊，因此線圈總數為槽數的一半。
- (2) 雙層繞：如圖 7-3，定子每個線槽內放有分屬不同線圈的兩個線圈邊，因此線圈總數等於槽數。

同步發電機較常採用雙層繞，除了有效利用空間外、其感應電勢的波形較接近正弦波。



2. 全節距與短節距

- (1) **全節距**：由圖 7-4(a) 可以看出，**線圈節距等於一個極距** ($\pi = 180^\circ$ 電機角)。線圈兩邊應電勢大小相同，相位相差 180° ，因此**線圈應電勢為兩邊的代數和**。
- (2) **短節距**：由圖 7-4(b) 可以看出，**線圈節距小於一個極距** ($\beta\pi < 180^\circ$ 電機角)。由於線圈兩邊應電勢有相位差，因此**線圈應電勢為兩邊的相量和**。



同步發電機較常採用短節距繞組，除了可以節省電樞線圈末端的連接線，降低用銅量及電感量外，也可以使波形更接近正弦波；缺點則是短節距繞組之應電勢較全節距低，兩者比例稱為節距因數 (pitch factor) 以 K_p 表示。以圖 7-4 為例：

$$K_p = \frac{\text{實際線圈應電勢}}{\text{全極距線圈應電勢}} = \frac{2e \sin \frac{\beta\pi}{2}}{2e} = \sin \frac{\beta\pi}{2} \quad (7-4)$$

K_p ：節距因數 β ：線圈節距與極距之比值 $\beta\pi$ ：線圈節距之電機角 (度)

表 7-1 為常用的節距因數 K_p ：

表 7-1 常用的節距因數

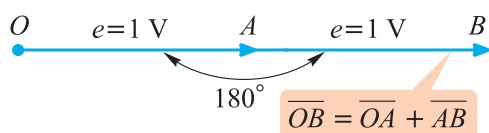
節距與極距比 β	1	8/9	5/6	4/5	2/3
電機角 $\beta\pi$	180°	160°	150°	144°	120°
節距因數 K_p	1	0.985	0.966	0.951	0.866

範例

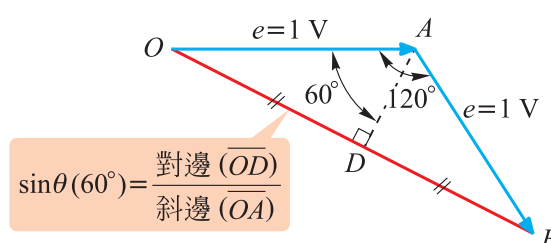
03

有一部同步發電機，若每根電樞導體之感應電勢為 1 V，則 (1) 採用全節距時，每匝線圈應電勢、(2) 採用 2/3 節距時，每匝線圈應電勢、(3) 節距因數為何？

解 (1) 全節距 ($\beta=1$)，即線圈節距 $=180^\circ$ 電機角。如圖 (a)，每匝線圈應電勢 ($\overline{OB}$) 為兩根導體之和 ($\overline{OA} + \overline{AB}$)，故 $\overline{OB} = 2\text{ V}$



(a) 全節距



(b) 短節距

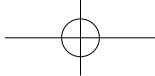
(2) 短節距 $\left(\beta = \frac{2}{3}\right)$ ，即線圈節距為 $180^\circ \times \frac{2}{3} = 120^\circ$ 電機角。如圖 (b)，

其中 $\overline{OD} = \overline{OA} \times \sin 60^\circ = 1 \times 0.866 = 0.866\text{ V}$

每匝線圈應電勢 $\overline{OB} = 2\overline{OD} = 2 \times 0.866 = 1.732\text{ V}$

(3) 節距因數 $K_p = \frac{\text{實際線圈應電勢}}{\text{全極距線圈應電勢}} = \frac{1.732\text{ V}}{2\text{ V}} = 0.866$

$$\text{或 } K_p = \sin \frac{\beta\pi}{2} = \sin \frac{\frac{2}{3} \times 180^\circ}{2} = \sin 60^\circ = 0.866$$



隨堂練習

- () 1. 交流電機為了改善電壓波形及節省線圈導線，可以採用
(A) 短節距線圈 (B) 全節距線圈 (C) 長節距線圈 (D) 任意節距線圈。
- () 2. 某同步發電機的線圈節距為 150 度電機角，其節距因數為何？
(A) 0.5 (B) 0.866 (C) 0.966 (D) 1。

3. 集中繞與分佈繞

- (1) 集中繞：如圖 7-5(a) 將每相每極的線圈集中放在同一線槽內。應電勢為所有線圈之代數和。
- (2) 分佈繞：如圖 7-5(b) 將每相每極的線圈分散放在相鄰線槽中。由於各線圈之應電勢有相位差，因此應電勢為每只線圈之相量和。

分佈繞組的線圈分散在相鄰的線槽內，除了散熱方便外，還可以減少漏磁電抗，得到較佳的正弦波形，因此同步發電機較常採用分佈繞組，但缺點在於分佈繞組之感應電勢會比集中繞組低，兩者比例稱為分佈因數 (distribution factor) 以 K_d 表示。

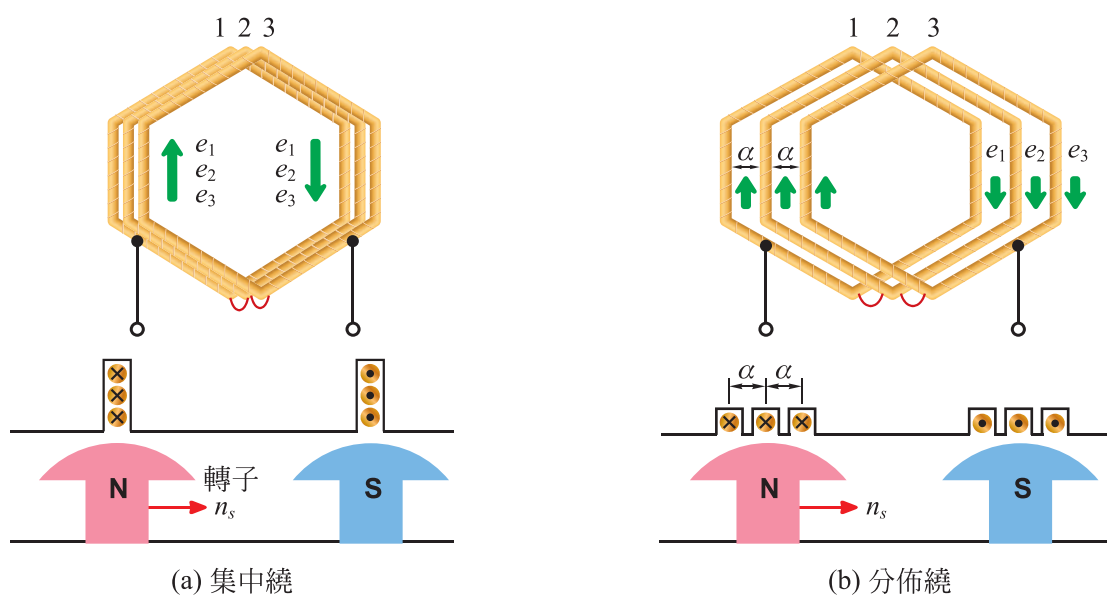


圖 7-5 繞組分佈方式與應電勢的關係

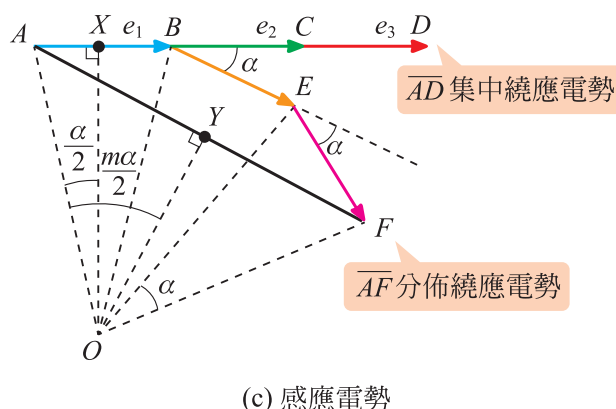


圖 7-5 繞組分佈方式與應電勢的關係 (續)

以圖 7-5(b) 為例，倘若 q 相同步發電機，定子有 S 個線槽採用雙層繞，轉子有 P 個磁極，電樞繞組每相每極的線圈數：

$$m = \frac{S \text{ 槽}}{q \text{ 相} \times P \text{ 極}} \quad (7-5)$$



雙層繞時，總線圈數等於槽數

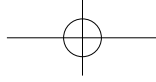
而電樞每槽間隔之電機角 (槽距) 為：

$$\alpha = \frac{P \text{ 極} \times 180^\circ}{S \text{ 槽}} \quad (7-6)$$

由圖 7-5(c) 之相量關係可得分佈因數為：

$$\begin{aligned} K_d &= \frac{\text{分佈繞應電勢}}{\text{集中繞應電勢}} = \frac{\overline{AF}}{\overline{AD}} = \frac{\overline{AF}}{m \times \overline{AB}} = \frac{2 \times \overline{AY}}{m \times (2 \times \overline{AX})} \\ &= \frac{\sin \frac{m\alpha}{2}}{m \sin \frac{\alpha}{2}} \end{aligned} \quad (7-7)$$

K_d ：分佈因數 m ：每相每極的線圈數 (個) α ：槽距 (度)



範例

04

有一部三相、4 極、36 槽、雙層繞之同步發電機，已知線圈節距為 8/9，且採用雙層分佈繞組，求 (1) 槽距、(2) 每相每極之線圈數、(3) 分佈因數、(4) 節距因數分別為何？

解 (1) 4 極電機總電機角 $\theta_{\text{eT}} = 4 \times 180^\circ = 720^\circ$ ，槽距 $\alpha = \frac{720^\circ}{36} = 20^\circ / \text{槽}$

(2) 每相每極線圈數 $m = \frac{36 \text{ 個}}{3 \text{ 相} \times 4 \text{ 極}} = 3$

(3) 分佈因數 $K_d = \frac{\sin \frac{m\alpha}{2}}{m \sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{\sin \frac{3 \times 20^\circ}{2}}{3 \sin \frac{20^\circ}{2}} = \frac{\sin 30^\circ}{3 \sin 10^\circ} = \frac{1}{6 \sin 10^\circ} = 0.96$

(4) 節距因數 $K_p = \sin \frac{\beta\pi}{2} = \sin \frac{\frac{8}{9} \times 180^\circ}{2} = \sin \frac{160^\circ}{2} = \sin 80^\circ = 0.985$

4. 繞組因數

同步發電機大多採用可改善波形之短節距、分佈繞組，因此公式 7-3 感應電勢的有效值就必須修正為：

$$E_{\text{eff}} = 4.44 f N \phi_m K_p K_d \quad (7-8)$$

公式 7-8 中，**節距因數與分佈因數兩者相乘稱為繞組因數**，即：

$$K_w = K_p \times K_d \quad (7-9)$$

K_w ：繞組因數 K_p ：節距因數 K_d ：分佈因數

電樞繞組若採用 Y 連接，依公式 7-8 所得每相繞組感應電勢後，乘以 $\sqrt{3}$ 倍即可得到無載時的線電壓；若是採用 Δ 連接，無載時線電壓等於每相應電勢。

隨堂練習

- () 1. 一部三相、4 極、48 槽之同步發電機，採用分佈繞時，每相每極的線圈數為
(A)16 (B)12 (C)4 (D)2。
- () 2. 同上題，槽距為 (A) 15° (B) 30° (C) 45° (D) 60° 電機角。
- () 3. 同步發電機電樞繞組的繞製採用分佈繞組的主要優點為何？
(A) 改善波形、增加容量、絕緣容易 (B) 增高電壓、散熱好、省材料
(C) 改善波形、散熱好、效率高 (D) 改變波形、散熱好、增高電壓。

7-4 磁極及磁場繞組

1. 磁極

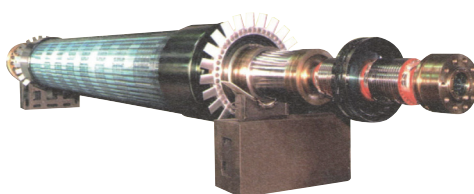
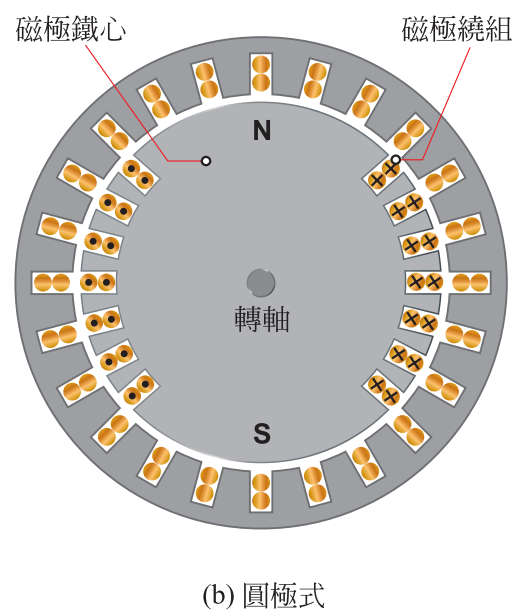
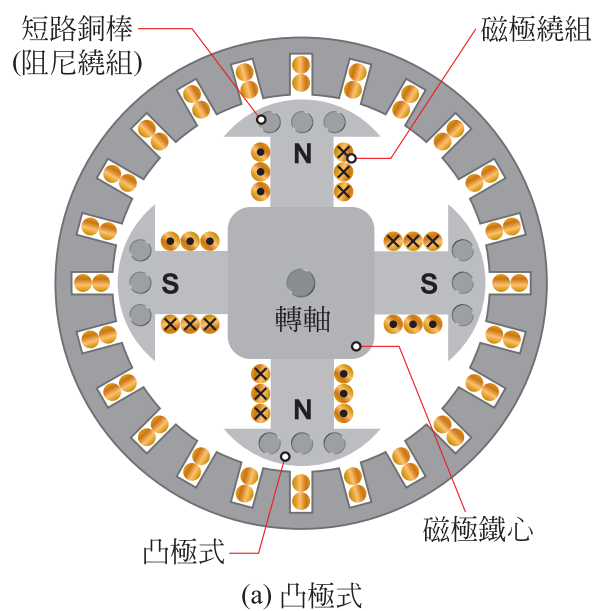
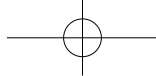
同步發電機大多為旋轉磁場式，因此轉子係由軸及磁極構成，磁極鐵心採用矽鋼薄片疊製而成，轉子依據形狀分為：

- (1) **凸極式轉子**：圖 7-6(a) 為其外觀，轉子直徑大、轉軸短，風阻較大，適合用在磁極數較多，以低速運轉的水力發電機。
- (2) **圓極式轉子**：圖 7-6(b) 為其外觀，轉子直徑小、轉軸長，風阻較小，適合用在磁極數較少，以高速運轉的火力發電機。其實體圖如圖 7-6(c) 所示。

2. 磁場繞組

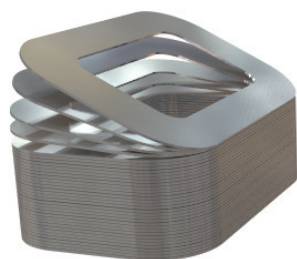
磁場繞組繞製於磁極鐵心內，當外加直流電時產生磁通以切割定子上的電樞繞組。中、小型發電機磁場繞組常使用紗包線、漆包線或平角銅線繞製而成，大型發電機則用圖 7-7(a) 的扁平的銅帶彎曲而成。

同步發電機若負載突然變動時，因轉子的慣性作用，會有一段忽快忽慢的不穩定狀況，稱為追逐現象 (hunting)。解決方式是如圖 7-7(b) 所示，在磁極表面上放置銅棒，兩端由短路環短路，稱之為阻尼繞組 (damper winding)。

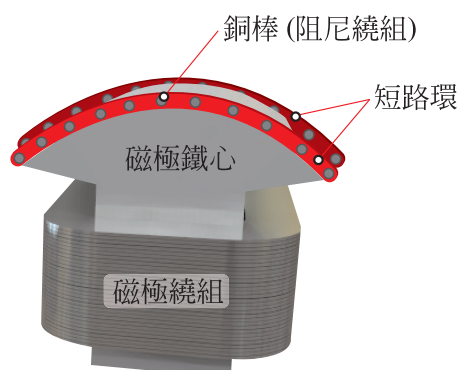


(c) 圓極式轉子實體圖

圖 7-6 同步發電機的磁極形狀
(圖片來源：東芝電機)



(a) 由銅帶製成的磁場繞組

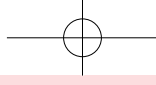


(b) 阻尼繞組

圖 7-7 同步發電機的磁場繞組

一、選擇題

- 7-1** () 1. 同步發電機所生交流電之頻率，可由轉速與下列何者決定？
(A) 激磁電流 (B) 負載電流 (C) 功率因數 (D) 極數。
- () 2. 一部 12 極同步發電機，若感應電壓的頻率為 60 Hz，則轉速為多少？ (A) 720 rps (B) 600 rps (C) 12 rps (D) 10 rps。
- () 3. 同上題，其同步轉速之角速度 ω 為
(A) 600 rad/sec (B) 314 rad/sec (C) 62.8 rad/sec (D) 31.4 rad/sec。
- () 4. 某 720 rpm、60 Hz 之交流同步發電機。若將速率調為 600 rpm，則其發生電勢之頻率將變為
(A) 10 Hz (B) 12 Hz (C) 50 Hz (D) 72 Hz。
- () 5. 有一部三相 Y 接、50 kVA、380 V、375 rpm、50 Hz 同步發電機，其極數與滿載電流分別為
(A) 16 極，75.9 A (B) 16 極，131.6 A
(C) 8 極，75.9 A (D) 8 極，131.6 A。
- 7-2** () 6. 有一台三相、4 極、Y 接的同步發電機，電樞繞組每相匝數為 50 匝，每極磁通量為 0.02 韋伯，轉速為 1500 rpm，若感應電勢為正弦波，則輸出線電壓有效值為何？
(A) 200 V (B) 222 V (C) 240 V (D) 384 V。
- 7-3** () 7. 三相 4 極同步發電機，其定子繞組節距 $5/6$ ，意即其線圈的兩邊相隔 (A) 180° (B) 150° (C) 120° (D) 60° 電機角。
- () 8. 有一部多相交流發電機，其線圈繞成 $8/9$ 的線圈節距，則其節距因數為 (A) $\sin 80^\circ$ (B) $\cos 160^\circ$ (C) $\sin 160^\circ$ (D) $\cos 160^\circ$ 。
- () 9. 同步發電機的電樞繞組原為短節距繞組，若不改變線圈匝數，而改採全節距繞組方式，則其特點為何？
(A) 可以改善感應電勢的波形 (B) 感應電勢較高
(C) 可節省末端連接線 (D) 導體間互感較小。

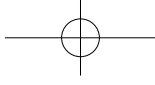


自我評量

- () 10. 假設某交流電機之定子有 48 槽，每槽有兩線圈邊，如將定子設計為三相 4 極繞組，則相鄰兩槽間之相角差應為多少？
(A) 12° (B) 15° (C) 30° (D) 60° 。
- () 11. 某三相交流發電機有 6 極，電樞上有 180 槽，則分佈因數為
(A) $\frac{\sin 30^\circ}{3 \sin 3^\circ}$ (B) $\frac{\sin 60^\circ}{5 \sin 3^\circ}$ (C) $\frac{1}{10 \sin 3^\circ}$ (D) $\frac{1}{20 \sin 3^\circ}$ 。
- () 12. 繞組因數就是
(A) 分佈因數除以節距因數 (B) 節距因數除以分佈因數
(C) 分佈因數加上節距因數 (D) 分佈因數乘上節距因數。
- () 13. 交流發電機，電樞繞組一般都是
(A) 雙層、集中式、全節距 (B) 雙層、分佈式、短節距
(C) 雙層、分佈式、全節距 (D) 單層、分佈式、短節距。
- () 14. 交流同步發電機裝設阻尼繞組的目的是
(A) 防止轉軸之追逐現象 (B) 防止過大的衝擊電流
(C) 防止過大起動電流 (D) 預防雷電之衝擊。
- () 15. 供電中的交流同步發電機，其追逐現象發生於
(A) 輕載時 (B) 重載時 (C) 負載急劇變化 (D) 負載功因低時。
- () 16. 關於同步發電機的敘述，下列何者錯誤？
(A) 凸極式通常用於低速或中速，圓極式通常用於較高速
(B) 水輪交流發電機適用於圓筒式
(C) 凸極式轉子需要較多磁極
(D) 係在一定頻率下有一定轉速的交流電機。

二、問答與計算題

1. 說明單層繞與雙層繞的差別。
2. 說明全節距繞組與短節距的特性與優缺點。
3. 說明集中繞與分佈繞的特性與優缺點。
4. 同步發電機依據磁極形狀分成兩種，其特性與用途分別為何？
5. 有一部三相、6 極、72 槽、Y 接同步發電機，電樞採用雙層繞，每槽有 80 根導體，線圈節距為 120° 電機角，每極磁通為 0.0025 韋伯，原動機轉速為 1200 rpm，則
 - (1) 應電勢頻率、(2) 節距因數、(3) 分佈因數、(4) 每相之應電勢、(5) 端電壓分別為何？



CHAPTER 8

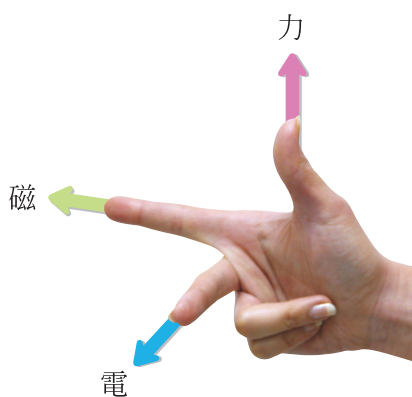
同步發電機之分類與構造

» 本章重點

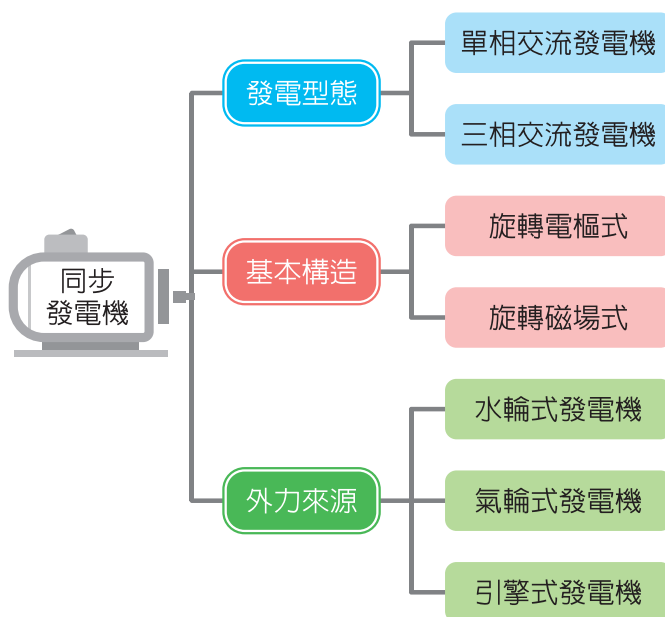
同步發電機是將各種型態 (水力、火力、引擎) 所產生的機械能轉變成交流 (單相、三相) 電能的旋轉電機，為了符合需要會有不同的設計與構造。參考弗萊明右手定則來思考其相互關係，對於觀念釐清與學習將有很大幫助。

8-1 同步發電機的分類

參考圖 8-1(a) 所示弗萊明右手定則，為了獲得電能，必須利用外力使電樞繞組與磁場間產生相對運動，如此電樞繞組才能將外力的機械能轉變成交流電能。因此同步發電機的分類方式可以整理成圖 8-1(b)。

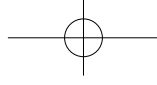


(a) 弗萊明右手定則



(b) 分類方式

圖 8-1 同步發電機的原理與分類



一、依據發電型態

同步發電機的目的是產生交流電能，依據產生交流電源的型態分爲：

1. 單相發電機 (single-phase generator)

如圖 8-2(a)，發電機內只有一組電樞繞組，當繞組受到旋轉中的永久磁鐵 (或電磁鐵) 切割時，繞組感應產生如圖 8-2(b) 所示的單相交流電壓。此種發電機大多爲小容量機種，如攤販所使用的攜帶式發電機。

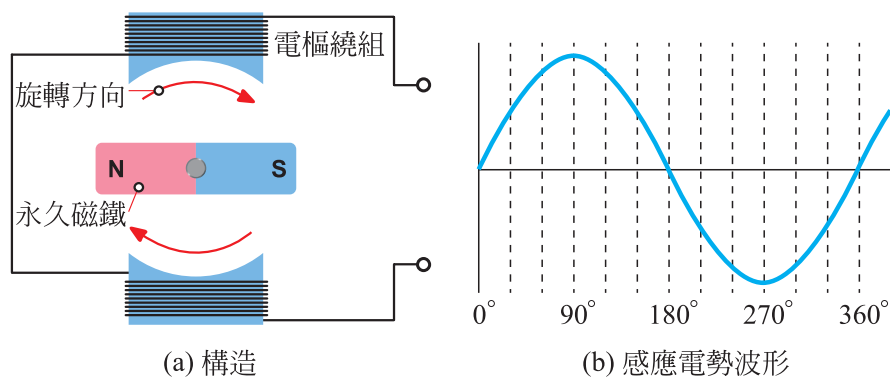


圖 8-2 單相交流發電機

2. 三相發電機 (three-phase generator)

如圖 8-3(a)，發電機內部有三組線徑與匝數相同的電樞繞組，彼此互隔 120° 電機角，以 Y 接 (或 Δ 接) 方式連接。三組繞組受到旋轉中的永久磁場 (或電磁鐵) 切割，產生如圖 8-3(b)，電壓大小相同、相位互隔 120° 電機角的三相電源，是發電機最常見的型式，也是本章介紹的重點。

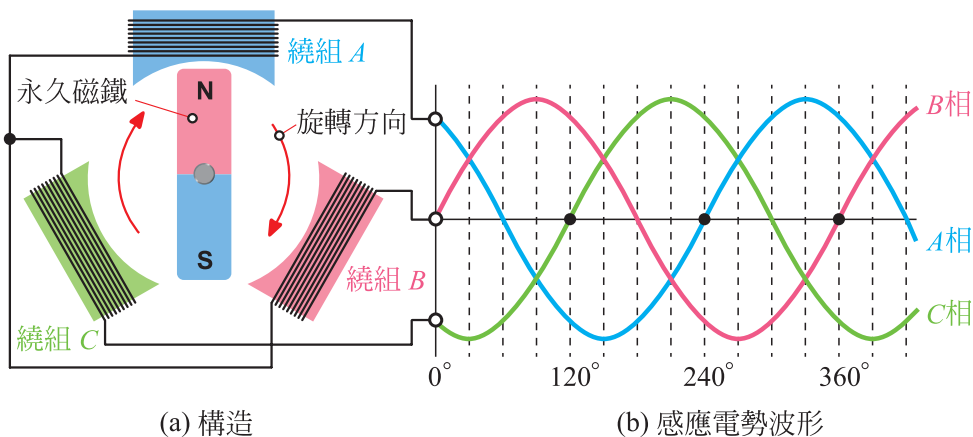


圖 8-3 三相交流發電機

二、依據基本構造

依據法拉第定律，當導體與磁場間有相對運動，導體就能產生感應電勢。因此同步發電機依據轉子構造分成：

1. 旋轉電樞式 (revolving-armature type)

簡稱為轉電式。架構如圖 8-4(a)，將負責發電的電樞繞組放在轉子由外力旋轉，負責提供磁通的磁場繞組 (F_1 、 F_2) 置於定子。電樞繞組感應產生的三相交流電 (A 、 B 、 C)，再透過圖 8-4(b) 的三個滑環與三個電刷輸送到外部。受限於轉子空間、離心力、機械平衡以及滑環對於高壓絕緣處理不易等限制，轉電式發電機只能運用於低壓小容量的小型機種。

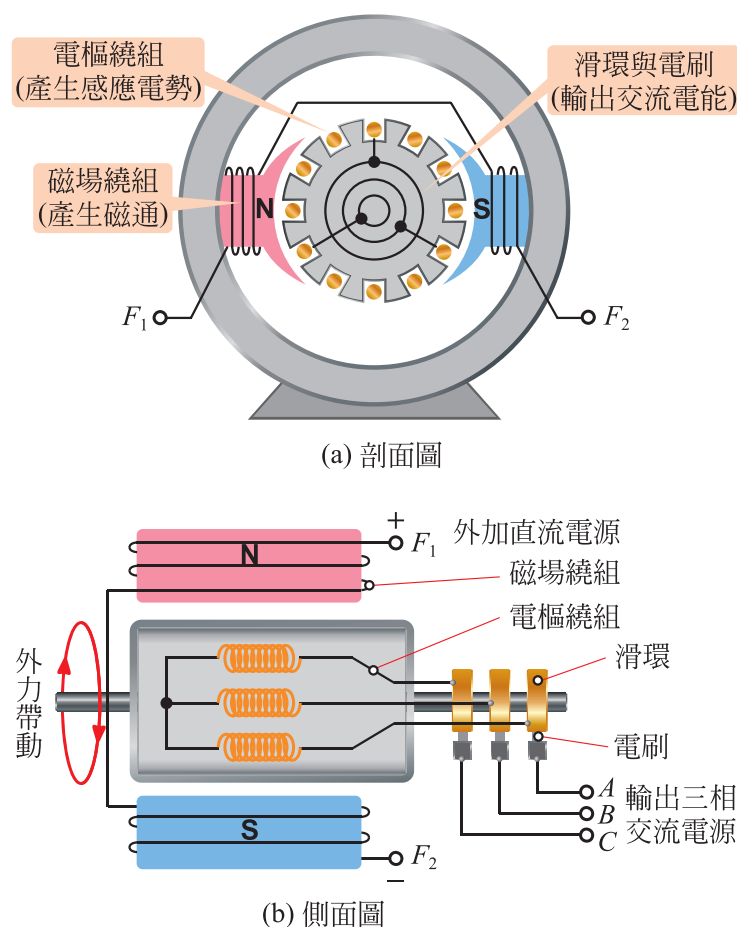
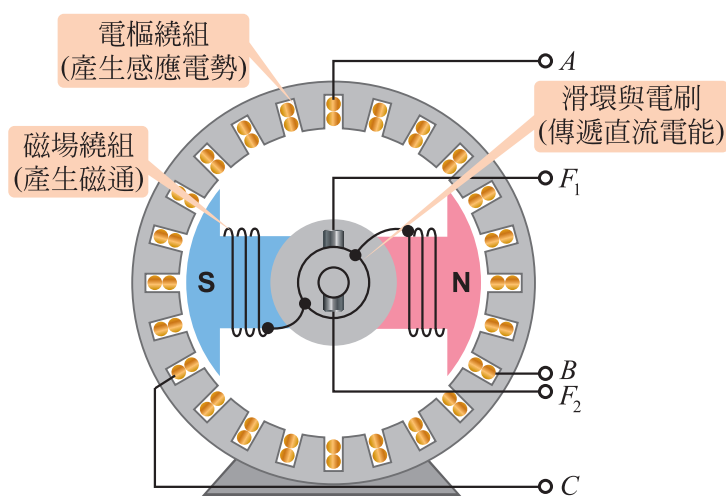


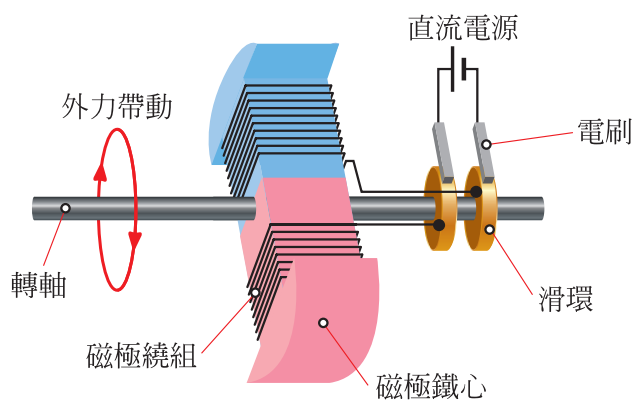
圖 8-4 旋轉電樞式同步發電機

2. 旋轉磁場式 (revolving-field type)

簡稱為轉磁式。架構如圖 8-5(a)，將負責提供磁通的磁場繞組 (F_1 、 F_2) 置於轉子由外力旋轉，負責發電的電樞繞組置於定子。由於電樞繞組感應產生的交流電 (A 、 B 、 C) 可以直接輸出。磁場繞組所需要的低壓直流電，如圖 8-5(b)，只需要兩個滑環與兩個電刷即可，絕緣處理較為容易。轉磁式發電機解決了轉電式發電機絕緣處理不易等缺點，適用於高壓大容量的機種，普遍用於各發電廠內。

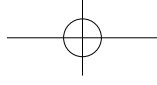


(a) 剖面圖



(b) 轉子側面圖

圖 8-5 旋轉磁場式同步發電機



近年來常使用的無刷式三相同步發電機構造如圖 8-6，轉軸由外力帶動後，左側小容量交流發電機的電樞繞組割切磁場感應產生交流電，經由內部的固態整流器整流、穩壓後，提供直流電給發電機的磁場繞組產生磁通，定子三組電樞繞組受到旋轉磁場切割，感應產生三相交流電輸出給負載。自動穩壓器 (AVR) 則依據輸出電壓狀態，調節激磁機的磁場繞組進而穩定輸出電壓。由於不需要滑環與電刷，保養與維護容易，常用於大樓或是學校等緊急發電機。

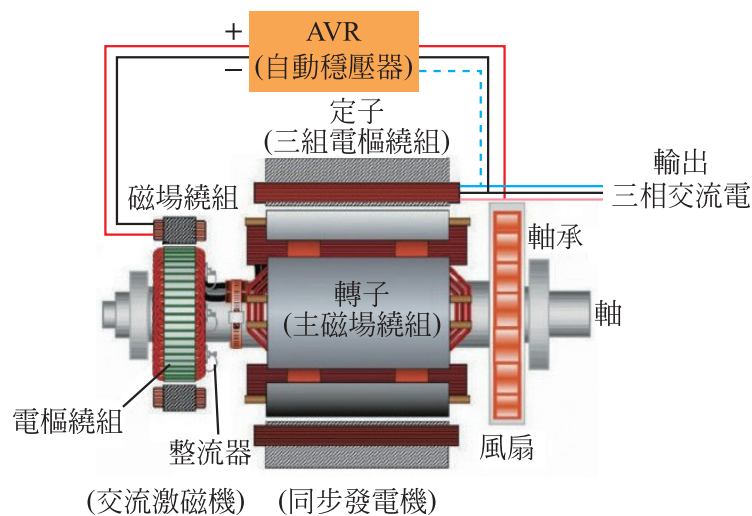


圖 8-6 無刷式同步發電機的轉子

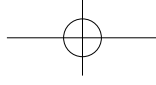
三、依據外力來源

為了配合原動機的特性，發電機在設計與構造上也有差異，可分為：

■ 1. 水輪式發電機 (water wheel generator)

適合水力發電廠使用，其轉速視水輪機的容量與水的流速而定，通常在 100 rpm ~ 1000 rpm 之間，由於轉速 (n) 低，為了產生額定頻率 (f)，發電機需要安裝的磁極數 (P) 多，因此轉軸設計為短軸、直徑大，轉子磁極採用凸極式，發電機的電壓在 3 kV ~ 16.5 kV 之間。

水輪式發電機的安裝方式如圖 8-7(a)，多以垂直 (又稱直軸式) 裝置。水輪機放在最下層，將發電機、激磁機依次往上裝置，如此不但可以節省佔地面積，並可有效利用落差及減少電機淹水、受潮的機會。



2. 汽輪式發電機 (turbo generator)

安裝方式如圖 8-7(b)，以**水平 (又稱橫軸式)**裝置。適用火力與核能發電廠，主要利用煤、油、天然氣或核能將水加熱後，產生的水蒸氣推動汽輪機再帶動發電機，轉速通常在 1500 rpm ~ 3600 rpm 間，由於轉速 (n) 高，因此發電機需要安裝的磁極數 (P) 少，爲了減少離心力與風阻，轉軸爲細長型、直徑小，轉子磁極採用圓極式，發電機的電壓在 5 kV ~ 36 kV 之間。

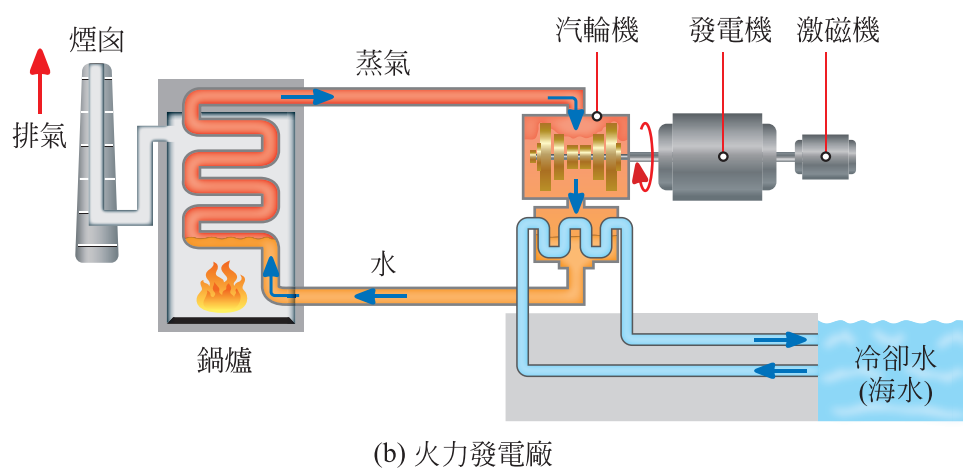
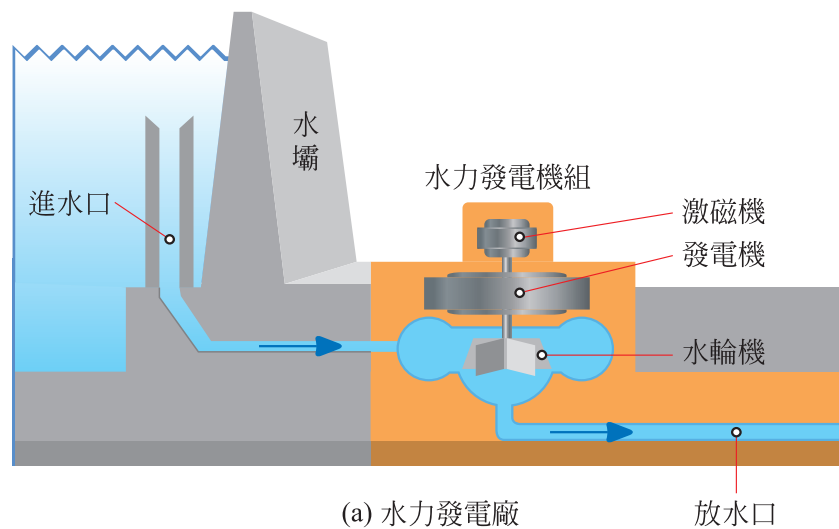
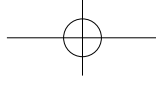


圖 8-7 發電廠示意圖



■ 3. 引擎式發電機 (engine generator)

大多以柴油引擎為原動機。轉速在 300 rpm ~ 600 rpm 之間，通常採用凸極式轉子，操作簡單、起動快速，用於離島供電或是小型、緊急發電機。由於引擎的活塞在往復運動過程中會產生脈動現象，因此**轉軸裝有大型飛輪 (flywheel) 以減少轉速波動，維持穩定的供電電壓與頻率。**

■ 4. 風力發電機 (fan-driven generator)

風力發電機主要是藉由空氣流動轉動葉片。目前主流風力機是採用水平軸、三葉式翼型風力發電機，其中葉片鎖定於輪轂 (hub) 後稱為葉輪 (rotor)，受風吹之空氣動力作用，將風能變為機械能。再利用增速齒輪箱提升轉速以帶動發電機產生電能。目前商業化風力機皆使用微電腦遠端監控，可隨風速、風向的大小變化而自動啟動、關機、迎風轉向及葉片旋角控制，並具遠距監控及異狀保護功能，因此也稱為「無人電廠」，如圖 8-8 所示。

風力發電屬於可再生能源，對於能源有限、四面環海且地狹人稠的台灣而言，陸域風力發電已漸趨飽和，政府目前正以離岸式風力發電為發展重點。

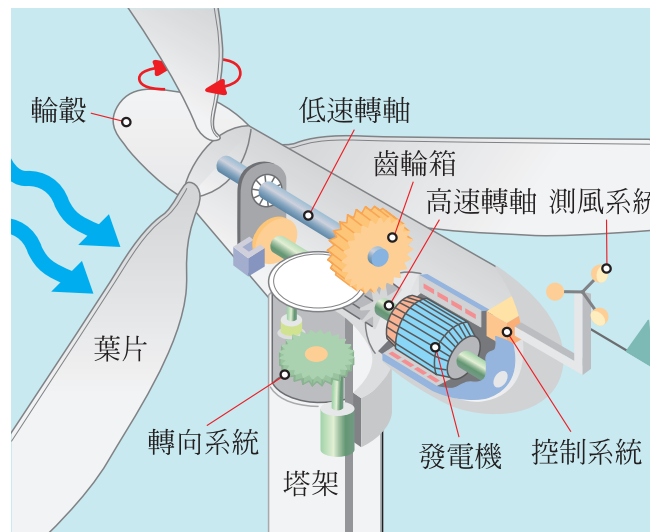


圖 8-8 風力發電機

隨堂練習

- () 1. 有關旋轉電樞式同步發電機的敘述，下列何者錯誤？
 (A) 轉子為電樞繞組 (B) 定子為磁場繞組 (C) 適用於小容量 (D) 絕緣處理容易。
- () 2. 前往水力發電廠參觀時，工作人員介紹一部低速、大容量、水輪式發電機組，為了有效利用位能，發電機的裝設方式與磁極形狀最有可能是何種方式？
 (A) 直立式、圓極 (B) 直立式、凸極 (C) 水平式、圓極 (D) 水平式、凸極。

8-2 同步發電機的構造

目前發電廠內的同步發電機多為轉磁式的三相機種，圖 8-9 是一座火力發電廠的基本架構，包括下列幾個部份：

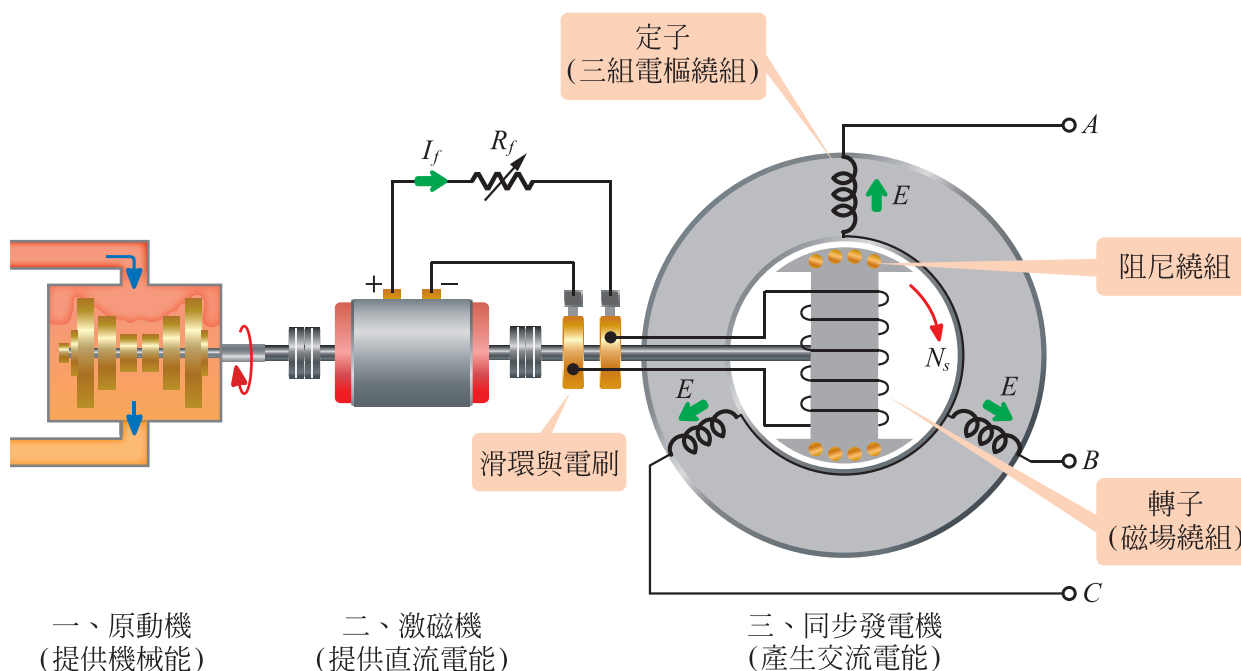
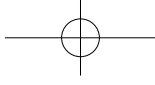


圖 8-9 三相同步發電機基本架構圖



一、原動機

提供機械能的機器，如水輪機、汽輪機或是內燃機等。原動機轉速 (n) 必須依據磁極數 (P) 與電源頻率 (f) 持續穩定運轉。原動機提供的機械能越大，則發電機的供電容量也越大。

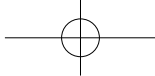
二、激磁機

提供直流電能的機器，磁場繞組才能產生穩定且足夠的磁通量。一般使用小型直流發電機或是小型交流發電機經整流後而成，也可以利用直流電源供應器供應。

三、同步發電機

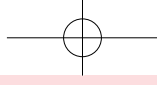
負責產生交流電能的機器。大型發電機通常採用旋轉磁場式，因此：

1. 定子部分：裝有三組相隔 120° 電機角的電樞繞組。為了產生較佳的正弦波形，電樞繞組大多採用雙層、分佈、短節距的方式繞置而成。再將三組繞組以 Y 接方式連接，以提高端電壓。
2. 轉子：裝有磁場繞組並由原動機以同步轉速持續帶動，使定子的三組電樞繞組產生應電勢。磁場繞組透過滑環及電刷與外部激磁機連接，透過磁場可變電阻 (R_f) 控制激磁電流 (I_f) 以改變磁通量，進而控制發電機的感應電勢 (E)。
3. 滑環及電刷：滑環以鑄鋼、鍛鋼或青銅製成，絕緣裝置於轉軸上，與轉子之磁場繞組連接，電刷是轉子與外部線路間的橋樑。多採用含銅量較多，電阻低且耐磨的金屬石墨電刷。
4. 阻尼繞組：裝置在轉子磁極面上，目的為防止同步發電機因負載變動所產生的追逐現象。
5. 散熱裝置：同步發電機大多為大容量大電流，發熱量很大，需有充分之冷卻。其冷卻方式可分為空氣冷卻式、氬氣冷卻式、水冷式、油冷式等。



隨堂練習

- () 1. 關於同步發電機的敘述，下列何者錯誤？
- (A) 凸極式通常適用於低速或中速，圓柱型通常適用於較高速
 - (B) 水輪同步發電機適用圓柱型
 - (C) 凸極式轉子需較多磁極
 - (D) 係在一定轉速下有一定頻率的交流發電機。
- () 2. 交流發電機裝設阻尼繞組的目的是
- (A) 防止轉軸之追逐現象
 - (B) 防止過大的衝擊電流
 - (C) 防止過大起動電流
 - (D) 預防雷電之衝擊。



自我評量

一、選擇題

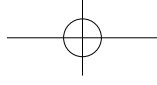
- 8-1** () 1. 火力發電廠的發電機組，主要是採用下列何種電機？
(A) 感應機 (B) 同步機 (C) 直流機 (D) 步進電機。
- () 2. 三相交流同步發電機，各相電源相角差為
(A) 60° (B) 90° (C) 120° (D) 180° 電機角。
- () 3. 三相轉磁式同步發電機，轉子激磁採用
(A) 直流電源 (B) 交流電源 (C) 直流與交流 (D) 無需激磁。
- () 4. 交流發電機採用旋轉磁場式的主要原因為
(A) 絕緣容易，可提高電壓 (B) 可改善波形
(C) 消除電樞反應 (D) 減少換向火花。
- () 5. 交流發電機若為低轉速者，其轉子通常是
(A) 直徑較大，長度頗短 (B) 直徑較大，長度頗長
(C) 直徑較小，長度頗短 (D) 直徑較小，長度頗長。
- () 6. 同步發電機若為高轉速者，其轉子通常是
(A) 直徑較大，長度頗短 (B) 直徑較大，長度頗長
(C) 直徑較小，長度頗短 (D) 直徑較小，長度頗長。
- () 7. 水力發電廠之同步發電機轉子構造大多為 (A) 兩極凸極式
(B) 兩極非凸極式 (C) 多極凸極式 (D) 多極非凸極式。
- () 8. 同步發電機所生交流電之頻率，與下列何者無關？
(A) 激磁機的激磁電流 (B) 原動機的轉速
(C) 發電機的極數 (D) 發電機的轉速。
- () 9. 下列何種同步發電機，需有飛輪裝置？ (A) 汽輪式發電機
(B) 水輪式發電機 (C) 引擎驅動發電機 (D) 渦輪式發電機。
- () 10. 爲了改善同步發電機電壓波形更接近正弦波，下列敘述何者錯誤？
(A) 調整磁極面與電樞間之氣隙長度 (B) 使用短節距線圈
(C) 採用分佈式繞組 (D) 加裝阻尼繞組。

() 11. 對同步發電機的構造之敘述，下列何者錯誤？

- (A) 一般大容量高壓同步發電機，皆為旋轉電樞式
- (B) 水輪發電機因轉速低，採多極數之凸極型轉子
- (C) 汽輪發電機轉速快，採少極數之圓柱型轉子
- (D) 引擎驅動式發電機，採凸型磁極，並裝有飛輪防止擺動。

二、問答題

1. 同步發電機主要的分類方式與機種有哪些？
2. 說明旋轉電樞式發電機的原理與特點。
3. 說明旋轉磁場式發電機的原理與特點。
4. 畫圖並說明原動機、激磁機與同步發電機之間的關係。
5. 同步發電機的轉子依據外型分為哪兩種，其特性分別為何？



CHAPTER 9

同步發電機之特性

» 本章重點

電樞反應是指電機運轉時，電樞繞組產生的磁通對主磁通所造成的干擾現象。直流電機與同步電機皆會受電樞反應的影響。其中同步發電機的電樞反應現象更會隨著負載大小與類型，造成運轉特性、電壓調整率、自激磁以及短路電流的各種變化，影響程度更為廣泛。

9-1 電樞反應

同步發電機定子三組電樞繞組受到旋轉磁場切割產生感應電勢 (E)。圖 9-1 當無載時 (開關 S 打開)，電樞電流 $I_a = 0$ ，電樞磁通沒有產生，此時無電樞反應。

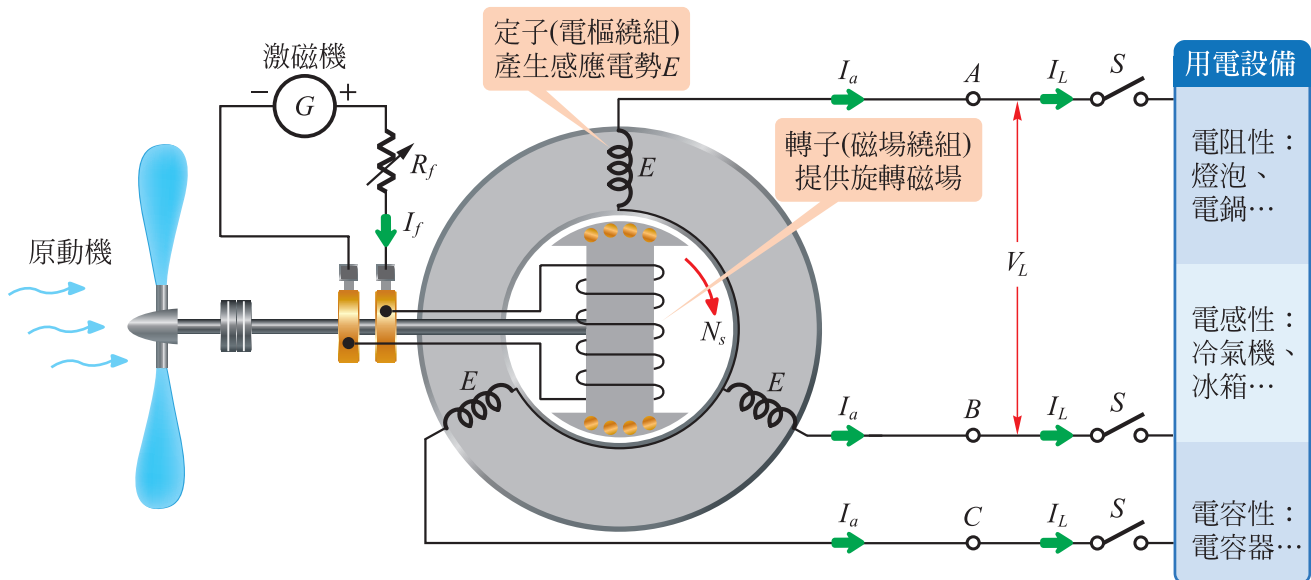


圖 9-1 同步發電機的運用

(一) 純電阻性負載 ($\cos\theta = 1$)

當負載為純電阻性 (例如燈泡或是電鍋) 時, 電樞電流 (I_a) 與應電勢 (E) 同相, 圖 9-2(a) 為例, 電樞導體 A 產生順時針之電樞磁通 (ϕ_a), 造成主磁極 (N 極) 的前端磁場減弱、後端磁場增強, 磁通分佈發生偏移, 相量關係如圖 9-2(b) 所示。

由於電樞磁通 (ϕ_a) 與主磁通 (ϕ_f) 兩者相隔 90° 電機角, 因此稱為橫軸反應 (quadrature-axis reaction) 或正交磁化 (cross magnetization) 作用。

交磁作用會造成主磁通變形, 導致發電機電壓波形畸變, 成為含有諧波的非正弦波形。若後半部磁極鐵心飽和, 還會有間接的去 (減) 磁作用, 造成應電勢降低。

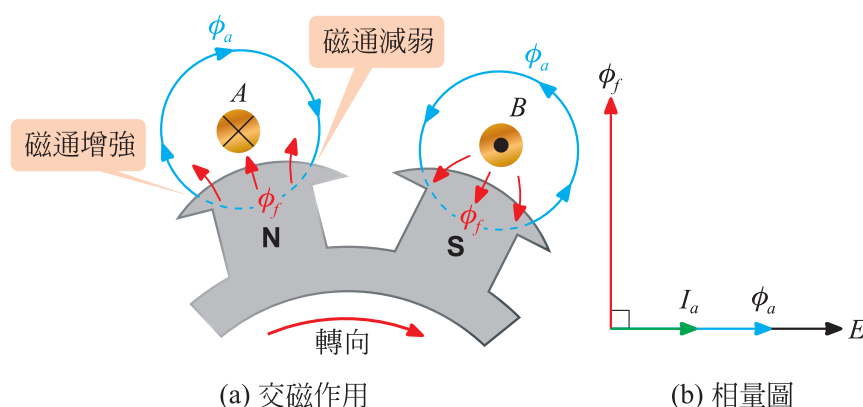


圖 9-2 純電阻性負載 ($\cos\theta = 1$) 電樞反應

(二) 純電感性負載 ($\cos\theta = 0$ 落後)

若負載為純電感性, 電樞電流 (I_a) 落後應電勢 (E) 90° 電機角。參閱圖 9-3(a) 電樞磁場發生在主磁極 (N 極) 後方 90° 電機角之位置, 電樞磁通造成相鄰兩磁極的磁通減弱, 相量關係如圖 9-3(b) 所示。

由於電樞磁通 (ϕ_a) 與主磁通 (ϕ_f) 兩者相量位置平行、方向相反, 因此稱為直軸反應 (direct-axis reaction) 或去磁 (demagnetizing) 作用。去磁作用會造成磁通減弱, 發電機應電勢減少。

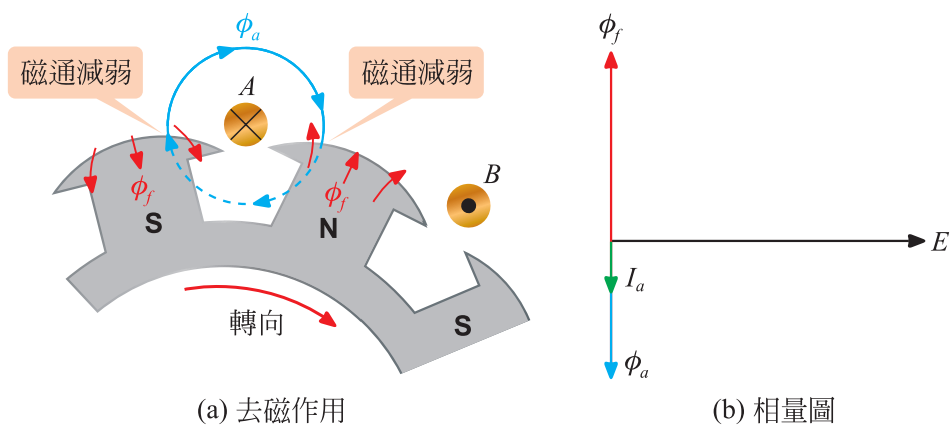
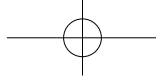


圖 9-3 純電感性負載 ($\cos\theta = 0$ 落後) 電樞反應

(三) 純電容性負載 ($\cos\theta = 0$ 超前)

若負載為純電容性時，由於電樞電流 (I_a) 超前應電勢 (E) 90° 電機角。參閱圖 9-4(a)，電樞磁場發生在主磁極 (N 極) 前方 90° 電機角之位置，電樞磁通造成相鄰兩磁極的磁通增強，稱為直軸反應或加磁作用。加磁作用使得主磁通增加，造成發電機應電勢增加。

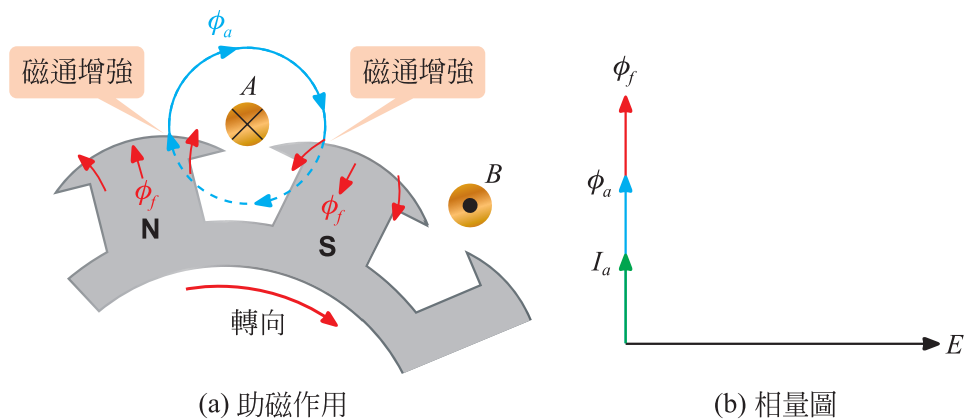


圖 9-4 純電容性負載 ($\cos\theta = 0$ 超前) 電樞反應

(四) 電感性負載 ($\cos\theta < 1$ 落後)

日常生活中絕大部分的用電設備 (冷氣、日光燈、電動機) 都屬於電感性負載，其電樞電流 (I_a) 落後應電勢 (E) 為 θ° 電機角 ($\theta < 90^\circ$)，如圖 9-5(a) 將電樞電流 (I_a) 分成兩個分量。其中 $I_a \cos\theta$ 產生的電樞磁場 (ϕ'_a) 與主磁通 (ϕ_f) 垂直，產生交磁作用；而 $I_a \sin\theta$ 產生的電樞磁場 (ϕ''_a) 與主磁通 (ϕ_f) 相反，產生去磁作用。

倘若同步發電機在無載狀態時端電壓已經調整至額定值，一旦電感性負載增加，電樞反應影響加劇，其中交磁作用造成波形畸變；去磁作用則會造成應電勢降低，造成負載端電壓低於額定值，需要注意加以調整。

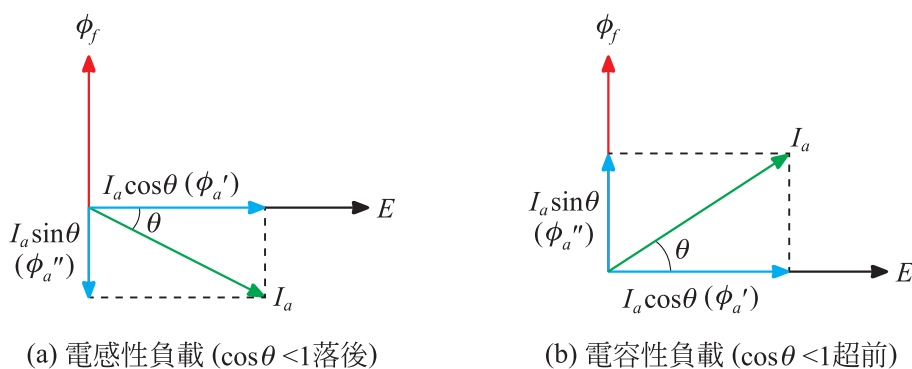
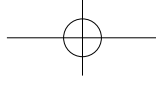


圖 9-5 不同負載時的電樞反應

(五) 電容性負載 ($\cos\theta < 1$ 超前)

除了電容器外，實務上長距離的地下配電線路也如同電容性負載。電容性負載的電樞電流 (I_a) 超前應電勢 (E) 為 θ° 電機角 ($\theta < 90^\circ$)。如圖 9-5(b) 同樣將電樞電流 (I_a) 分成兩個分量。其中 $I_a \cos\theta$ 產生的電樞磁場 (ϕ'_a) 與主磁通 (ϕ_f) 垂直，產生交磁作用，造成電壓波形畸變；而 $I_a \sin\theta$ 產生的電樞磁場 (ϕ''_a) 與主磁通 (ϕ_f) 相同，產生加磁作用，造成負載端電壓高於額定值，同樣需要注意加以調整。



隨堂練習

- () 1. 同步電機的電樞反應現象與下列何者有關？
- (A) 負載之大小而定 (B) 負載之性質而定
- (C) 負載之大小及性質而定 (D) 與負載無關。
- () 2. 三相同步發電機的負載為電感性時，下列關於電樞反應的敘述何者正確？
- (A) 會有直軸反應產生正交磁效應 (B) 會有交軸反應產生去磁效應
- (C) 會有正交磁與加磁效應 (D) 會有正交磁與去磁效應。

9-2 同步電抗

為了精確分析，會將同步發電機運轉中的狀態與特質以等效電路方式表示，其中比較重要的數據包含：

(一) 電樞反應電抗 (X_a)

依據前節所述，同步發電機之電樞磁通 (ϕ_a) 隨著負載大小與性質不同，對主磁通 (ϕ_f) 造成不同程度的影響，導致端電壓發生變動，此現象就如同電流經過電感時造成的壓降。因此在等效電路上以電感器代表電樞反應的影響，所形成之電感抗稱為電樞反應電抗 (X_a)。

(二) 電樞漏磁電抗 (X_ℓ)

同步發電機大部分之電樞磁通 (ϕ_a) 與主磁通作用造成電樞反應。但有一小部份磁通僅與電樞導體本身交鏈稱為電樞漏磁通 (ϕ_ℓ)，所形成之電感抗就稱為電樞漏磁電抗 (X_ℓ)。

同步發電機的漏磁電抗發生於電樞鐵心之槽內、齒面間及線圈端，所以半閉口槽或是狹而深槽之漏磁電抗較大。高壓發電機也因為絕緣材料多，間隔大，因此漏磁電抗較低壓發電機大。

(三) 同步電抗 (X_s)

將電樞反應電抗 (X_a) 與電樞漏磁電抗 (X_ℓ) 兩者合併後，稱為同步電抗 (synchronous reactance)，以 X_s 代表，即：

$$X_s = X_a + X_\ell \quad (9-1)$$

X_s ：同步電抗 (Ω) X_a ：電樞反應電抗 (Ω) X_ℓ ：電樞漏磁電抗 (Ω)

9-3 同步阻抗

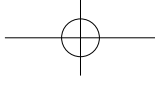
同步發電機的電樞繞組是由銅線等導體繞製而成，電樞繞組本身電阻值以 R_a 表示。

將電樞繞組電阻 (R_a) 與同步電抗 (X_s) 合併後，稱為同步阻抗 (synchronous impedance)，以 Z_s 代表，即：

$$Z_s = \sqrt{R_a^2 + X_s^2} \quad (9-2)$$

Z_s ：同步阻抗 (Ω) R_a ：電樞繞組電阻 (Ω) X_s ：同步電抗 (Ω)

對於高壓大容量的同步發電機而言，電樞繞組數量多且線徑粗，因此電樞繞組電阻值遠低於同步電抗值 ($R_a \ll X_s$)，為了方便分析，有時會將電阻忽略，此時同步阻抗可以由同步電抗取代，即 $Z_s \doteq X_s$ 。



隨堂練習

- () 1. 交流同步發電機之同步阻抗 Z_s 與電樞電阻 R_a 、電樞反應電抗 X_a 以及電樞漏磁電抗 X_ℓ 的大小關係，何者正確？
- (A) $Z_s = R_a + X_a + X_\ell$ (B) $Z_s = \sqrt{R_a + X_a + X_\ell}$
- (C) $Z_s = \sqrt{R_a^2 + X_a^2 + X_\ell^2}$ (D) $Z_s = \sqrt{R_a^2 + (X_a + X_\ell)^2}$ 。
- () 2. 有一部三相同步發電機，銘牌上標示每相電樞電阻為 0.5Ω ，每相漏磁電抗為 2.2Ω ，電樞反應電抗為 2.8Ω ，則此機之同步阻抗與同步電抗分別為何？
- (A) 5Ω 、 5.02Ω (B) 5Ω 、 5.5Ω (C) 5.02Ω 、 5Ω (D) 5.5Ω 、 5Ω 。

9-4 等效電路及相量圖

(一) 等效電路

圖 9-6 為同步發電機每相的等效電路，轉子的磁場繞組由原動機帶動、激磁機提供直流電，藉由磁場可變電阻器 R_f 控制激磁電流 I_f 以改變主磁通量 ϕ_f 。

定子內的電樞繞組受到轉子磁通切割產生感應電勢 E_p ，同步阻抗 (Z_s) 如同繞組的內部阻抗。無載時 (S 打開) 電樞電流 $I_a = 0$ ，此時負載端電壓等於應電勢 ($V_p = E_p$)。當外部負載增加時，電樞電流 I_a 變大，造成同步阻抗壓降增加，負載端電壓產生變化。因此，欲使發電機輸出穩定電壓，同步阻抗應該愈小愈好。

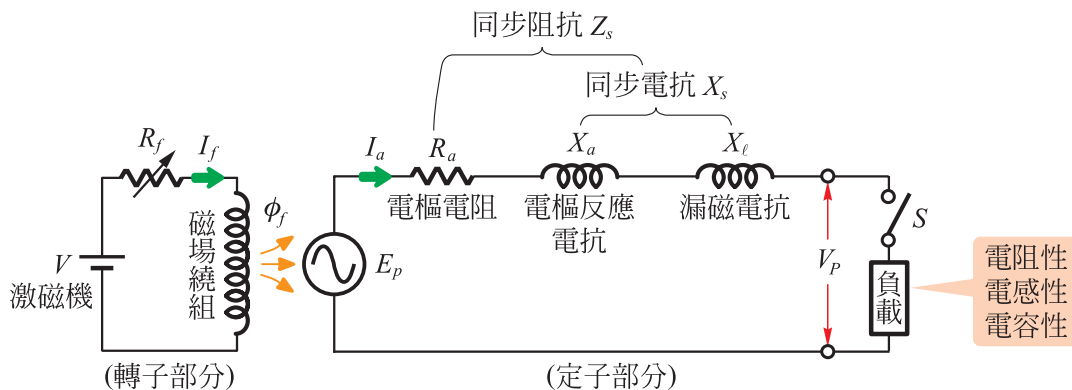


圖 9-6 同步發電機每相等效電路

(二) 相量圖

爲了解同步發電機遇到不同類型的負載時，端電壓與應電勢之關係，可以用相量圖表示之：

1. 純電阻性負載 ($\cos\theta = 1$)

電樞電流 (I_a) 與端電壓 (V_p) 同相，相量關係如圖 9-7(a) 所示。將負載端電壓 V_p 分別加上電阻壓降與電抗壓降後就可以求得應電勢 E_p ，由圖 9-7(a) 可知端電壓小於應電勢 ($V_p < E_p$)。

2. 電感性負載 ($\cos\theta < 1$ 落後)

由於電樞電流 (I_a) 落後端電壓 (V_p) 達 θ 度。相量關係如圖 9-7(b)。電感性負載除了壓降外還有電樞反應的去磁現象，因此端電壓低於應電勢 ($V_p < E_p$) 的程度較純電阻負載時更大。

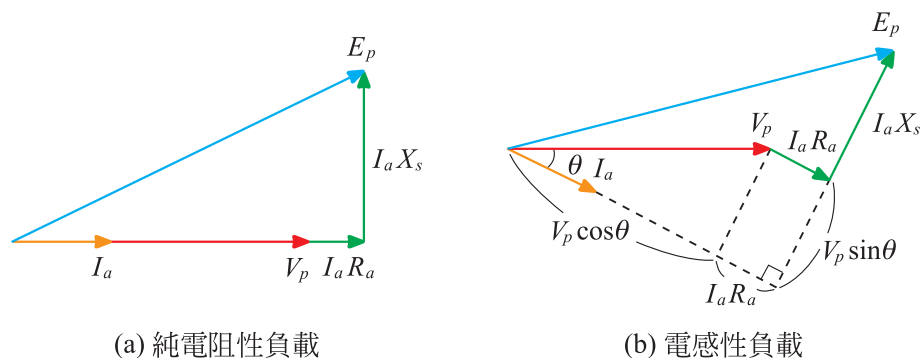


圖 9-7 不同負載類型的相量圖

3. 電容性負載 ($\cos\theta < 1$ 超前)

由於電樞電流 (I_a) 超前端電壓 (V_p) 達 θ 度。由圖 9-8 相量圖可以看出，受到電抗壓降的相位 ($I_a X_s$) 以及電樞反應的助磁現象影響，因此端電壓可能高於應電勢 ($V_p > E_p$)。

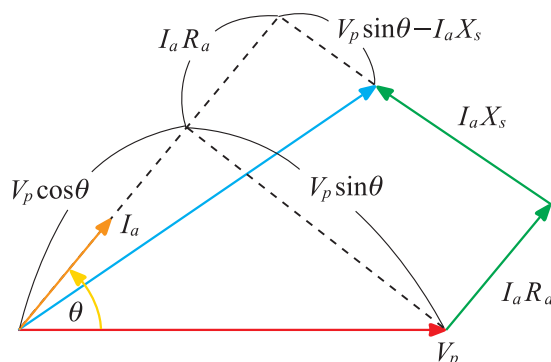
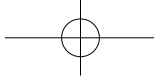


圖 9-8 電容性負載的相量圖

將相量圖 9-7 及 9-8，依據畢氏定理計算後，可得同步發電機每相應電勢：

$$E_p = \sqrt{(V_p \cos \theta + I_a R_a)^2 + (V_p \sin \theta \pm I_a X_s)^2} \begin{cases} + : \text{電感性 } (\cos \theta \text{ 落後}) \\ - : \text{電容性 } (\cos \theta \text{ 超前}) \end{cases} \quad (9-3)$$

E_p ：每相應電勢 (V)

V_p ：每相端電壓 (V)

$\cos \theta$ ：負載功率因數

I_a ：每相電樞電流 (A)

R_a ：每相電樞電阻 (Ω)

X_s ：每相同步電抗 (Ω)

範例

01

有一部三相 5 kVA、220 V、60 Hz 同步發電機，同步電抗為 3.2 Ω ，電樞電阻 0.6 Ω 。供電給功率因數 0.8 落後的額定負載時，求發電機每相應電勢為何？

解 三相 Y 接線，每相端電壓 $V_p = \frac{V_L}{\sqrt{3}} = \frac{220 \text{ V}}{\sqrt{3}} = 127 \text{ V}$

$$\text{額定電流 } I_L = \frac{S}{\sqrt{3}V_L} = \frac{5 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \times 220 \text{ V}} = 13.1 \text{ A} \quad (\because \text{Y 接}, I_a = I_L = 13.1 \text{ A})$$

功率因數 $\cos \theta = 0.8$ 時， $\sin \theta = 0.6$

$$\begin{aligned} \text{每相應電勢 } E_p &= \sqrt{(V_p \cos \theta + I_a R_a)^2 + (V_p \sin \theta + I_a X_s)^2} \\ &= \sqrt{(127 \times 0.8 + 13.1 \times 0.6)^2 + (127 \times 0.6 + 13.1 \times 3.2)^2} \\ &\doteq 161 \text{ V} \end{aligned}$$

9-5 電壓調整率

同步發電機無載時 ($I_a = 0$) 端電壓等於應電勢 ($V_{p(NL)} = E_p$)，但隨著負載增加，電樞電流 I_a 變大，受到阻抗壓降與不同負載時的電樞反應影響，造成滿載時端電壓與應電勢的值有所差距 ($V_{p(FL)} \neq E_p$)。其變化的程度可用電壓調整率或電壓變動率 ($V.R.$) 來描述，其定義為：

$$V.R. \% = \frac{V_{p(NL)} - V_{p(FL)}}{V_{p(FL)}} \times 100 \% \quad (9-4)$$

$V.R.$ ：電壓調整率或電壓變動率

$V_{p(FL)}$ ：滿載時相電壓

$V_{p(NL)}$ ：無載時相電壓

範例

02

有一部 50 kVA、60 Hz、Y 接三相同步發電機，每相同步電抗為 0.5Ω ，電樞電阻忽略不計。發電機供電給功率因數 0.8 超前的額定負載時，端電壓為 380 V，則 (1) 發電機每相感應電勢為何？(2) 發電機的電壓調整率約為多少？

解 (1) 三相 Y 接線，每相端電壓 $V_p = \frac{V_L}{\sqrt{3}} = \frac{380 \text{ V}}{\sqrt{3}} = 220 \text{ V}$

容量 $S = \sqrt{3} V_L I_L$

額定電流 $I_L = \frac{S}{\sqrt{3} V_L} = \frac{50 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \times 380 \text{ V}} = 75.9 \text{ A}$ ($\because$ Y 接, $I_a = I_L = 75.9 \text{ A}$)

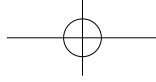
每相應電勢 $E_p = \sqrt{(V_p \cos \theta + I_a R_a)^2 + (V_p \sin \theta - I_a X_s)^2}$

$= \sqrt{(220 \times 0.8)^2 + (220 \times 0.6 - 75.9 \times 0.5)^2} = \sqrt{176^2 + 94^2} = 200 \text{ V}$

(2) $V.R. = \frac{V_{p(NL)} - V_{p(FL)}}{V_{p(FL)}} \times 100 \% = \frac{200 \text{ V} - 220 \text{ V}}{220 \text{ V}} \times 100 \% = -9.1 \%$

隨堂練習

- () 1. 有一部三相發電機滿載運轉時，電壓表指示值為 3300 V，銘牌上標示電壓調整率為 3%，當負載切離時，電壓表的指示值最有可能為何？
(A) 3400 V (B) 3300 V (C) 3200 V (D) 3000 V。



9-6 同步發電機之特性曲線

爲了瞭解性能是否合乎規範，同步發電機出廠前必須進行各項試驗。首先參考圖 9-9 先將各項設備與儀表連接完畢後，起動原動機讓發電機在同步轉速下穩定運轉，之後進行下列試驗：

一、開路特性試驗

又稱爲無載特性試驗。將圖 9-9 中的選擇開關 S 切至 1 號位置，使輸出端爲開路狀態。將磁場可變電阻器 R_f 由最大值逐漸降低，此時激磁電流 I_f 上升使得磁通增強，發電機應電勢 E_p 上升（本機爲 Y 接，電壓表測得的端電壓 $V_L = \sqrt{3}E_p$ ）。

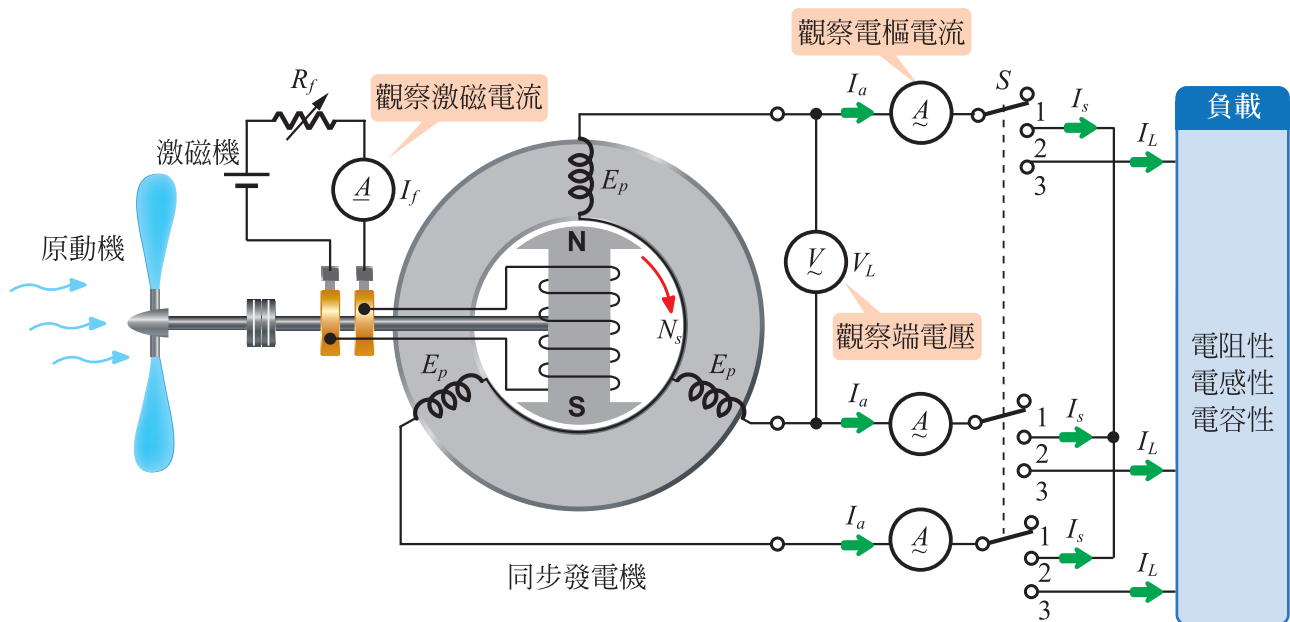


圖 9-9 同步發電機特性試驗接線圖

將激磁電流 (I_f) 與開路時端電壓 (V_o) 的結果記錄後繪製成圖，稱為開路特性曲線 (open circuit characteristic curve, OCC)，也稱為無載特性曲線。其結果如圖 9-10，起初感應電勢與激磁電流成正比上升，當激磁電流增加到磁通逐漸飽和時，應電勢增加趨緩變為曲線。

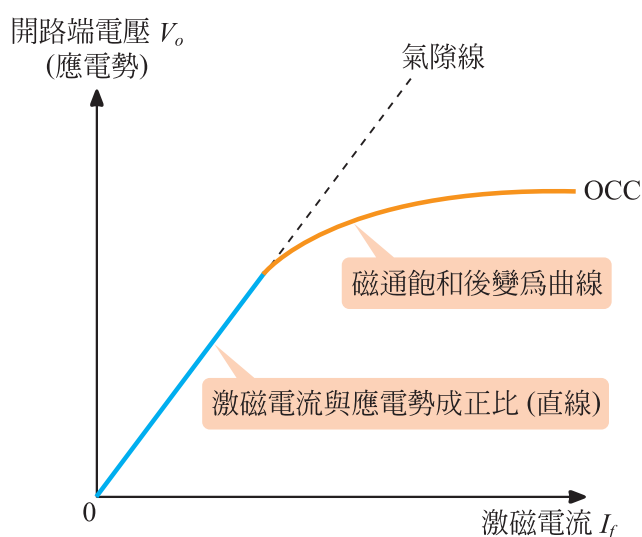


圖 9-10 同步發電機無載特性曲線

二、短路特性試驗

將圖 9-9 中的選擇開關 S 切至 2 號位置，此時發電機輸出端經電流表短路 ($V_L = 0$)。將磁場可變電阻器 R_f 由最大值逐漸降低，激磁電流 I_f 增加使得應電勢 E_p 上升，但礙於輸出端被短路，電樞電流 I_a 只能在繞組內部流動 (又稱為短路時電樞電流 I_s)。將激磁電流 (I_f) 與短路時電樞電流 (I_s) 的關係繪製成圖 9-11(a)，稱為短路特性曲線 (short circuit characteristic curve, SCC)。

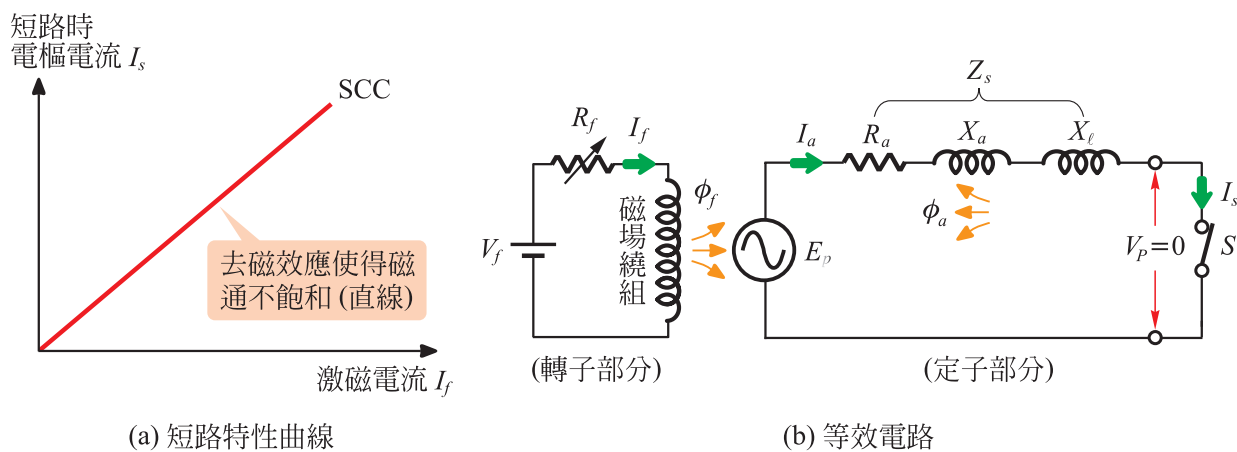


圖 9-11 短路特性曲線與等效電路

同步發電機短路時等效電路如圖 9-11(b)，電樞電流只能在電樞繞組內部流通 ($I_a = I_s$)，繞組本身的同步阻抗 Z_s 如同負載限制短路電流。由於**同步電抗** ($X_s = X_a + X_\ell$) 遠大於**電樞繞組** (R_a)，此特性如同**電感性負載**，使得電樞反應 (ϕ_a) 產生極大的去磁現象，造成主磁通 (ϕ_f) 不致於飽和，因此短路特性曲線幾乎為一直線。

隨堂練習

- () 1. 同步發電機的開路試驗，其目的為何？
 - (A) 量測磁場電流與發電機短路電流的關係
 - (B) 量測磁場電流與發電機輸出電流的關係
 - (C) 量測磁場電流與發電機輸出電壓的關係
 - (D) 量測發電機的負載特性。
- () 2. 同步發電機之短路電流曲線為一直線的原因為何？
 - (A) 激磁電流增加使磁場發生飽和
 - (B) 電樞反應的去磁現象，使磁通未飽和
 - (C) 電樞反應的交磁現象，使磁通發生偏移
 - (D) 電樞反應的助磁現象，使磁通發生飽和。

三、負載特性試驗

參考圖 9-9 之接線，無載時先調整激磁電流使發電機端電壓等於額定值，再將開關 S 切至 3 號位置與外部負載連接，並開始逐步增加負載，將負載電流 (I_L) 與端電壓 (V_L) 的關係繪製後，可得圖 9-12(a) 所示的負載特性曲線。倘若負載類型為：

1. 電阻性負載 ($\cos\theta = 1$)

受到阻抗壓降及電樞反應的交磁作用，端電壓隨負載之增加而略為降低，電壓調整率為正值。

2. 電感性負載 ($\cos\theta < 1$ 落後)

受到阻抗壓降以及電樞反應去磁作用，端電壓隨負載增加顯著下降，電壓調整率較電阻性負載大。

3. 電容性負載 ($\cos\theta < 1$ 超前)

受到阻抗電壓以及電樞反應助磁作用，端電壓反而隨負載增加而上升，電壓調整率為負值。

圖 9-12(b) 則是讓發電機滿載時端電壓等於額定值，再將負載逐漸減輕所得之結果，是負載特性曲線的另一種表示方法。

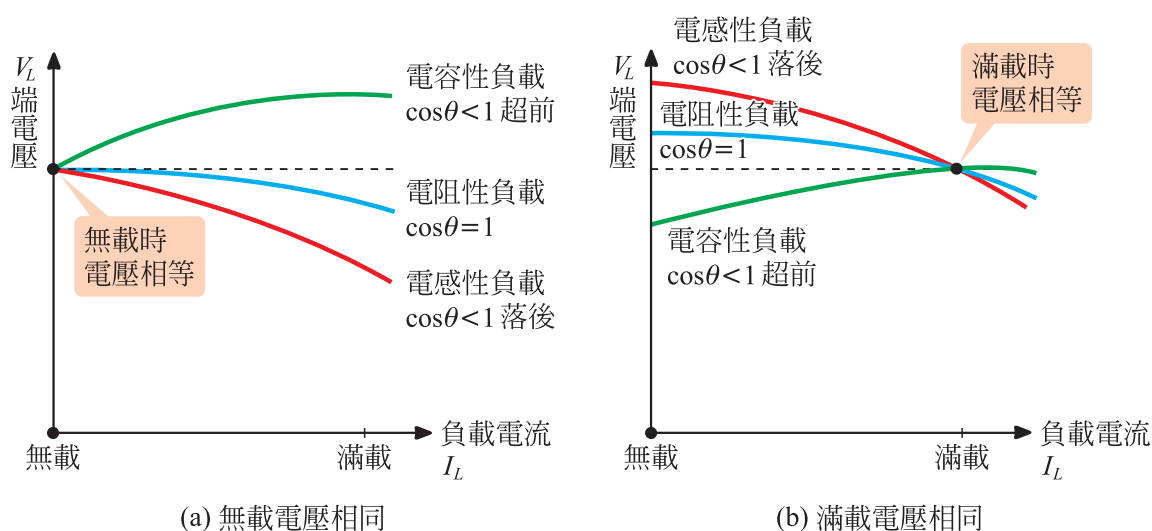
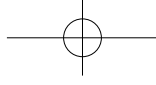


圖 9-12 同步發電機的外部特性曲線



隨堂練習

- () 1. 同步發電機在一定的轉速及激磁電流下，外部特性曲線為何者的關係？
- (A) 端電壓對負載電流 (B) 應電勢對負載電流
(C) 端電壓對激磁電流 (D) 應電勢對激磁電流。
- () 2. 同步發電機連接不同特性負載時，電壓調整率會隨負載而產生變化，當同步發電機之電壓調整率為負值時，同步發電機所連接負載為何？
- (A) 純電阻性負載 (B) 電容性負載
(C) 純電感性負載 (D) 電感性負載。

四、激磁特性曲線

由圖 9-12 外部特性曲線可知，同步發電機端電壓會受到負載大小與類型而變動。爲了維持較佳的供電品質，可透過磁場電阻器 R_f 來控制激磁電流以適度改變應電勢，讓端電壓 (V_L) 維持額定值不變。因此將**負載電流 (I_L) 與維持端電壓不變所需的激磁電流 (I_f) 關係**稱爲**激磁特性曲線**，結果如圖 9-13 所示，倘若負載類型爲：

■ 1. 電阻性負載 ($\cos\theta = 1$)

受到阻抗壓降及電樞反應的交磁作用，端電壓會隨負載之增加而略爲降低。爲維持端電壓不變，激磁電流必須隨著負載增加而增加 ($I_{f1} \Rightarrow I_{f2}$)。

■ 2. 電感性負載 ($\cos\theta < 1$ 落後)

受到阻抗壓降以及電樞反應去磁作用，端電壓會隨負載增加顯著下降。爲維持端電壓不變，激磁電流隨著負載增加必須大幅增加 ($I_{f1} \Rightarrow I_{f3}$)。

3. 電容性負載 ($\cos\theta < 1$ 超前)

受到電樞反應助磁作用，端電壓會隨負載增加反而上升。為維持端電壓不變，激磁電流隨著負載增加而降低 ($I_{f1} \Rightarrow I_{f4}$)。

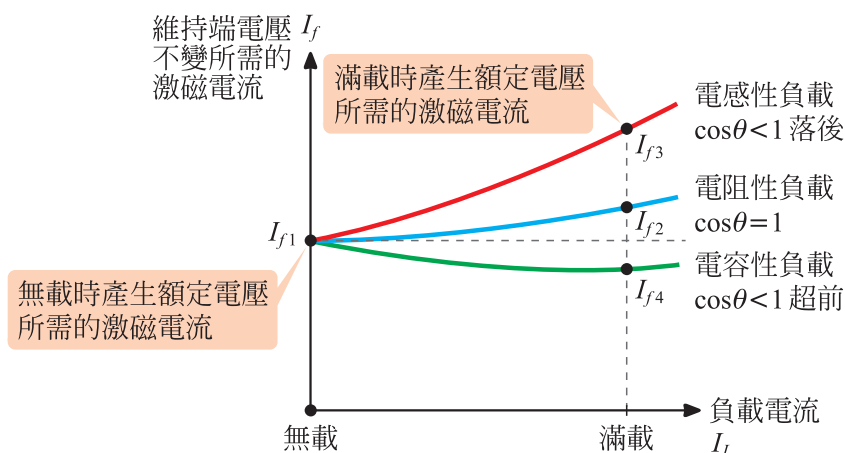


圖 9-13 不同負載類型的激磁特性曲線

隨堂練習

- () 1. 關於三相同步發電機的特性曲線，下列敘述何者正確？
 - (A) 負載特性曲線橫座標為激磁電流，縱座標為電樞電流
 - (B) 負載特性曲線橫座標為發電機端電壓，縱座標為激磁電流
 - (C) 激磁特性曲線橫座標為發電機端電壓，縱座標為激磁電流
 - (D) 激磁特性曲線橫座標為電樞電流，縱座標為激磁電流。
- () 2. 機械加工廠停電期間採用自備交流發電機提供電能，當馬達類等落後功因之負載用電量變大時，發電機應該如何控制，才能讓供電頻率與電壓維持穩定？
 - (A) 提高原動機轉速
 - (B) 降低激磁電流
 - (C) 增加激磁電流
 - (D) 並聯電容器。

9-7 同步阻抗的量測與短路比

受到同步阻抗的影響，發電機的輸出端電壓會產生變動。爲了確實掌握同步發電機實際運轉時同步阻抗的變化，會進行下列試驗：

一、同步阻抗的量測

將圖 9-6 與圖 9-9 合併後，可得每相等效電路如圖 9-14，在激磁電流 I_f 固定下，開路時 (S 切至 1) 所測得之端電壓等於應電勢 ($V_{ab} = E_p$)，此時若將負載端短路 (S 切至 2)，由於端電壓 $V_{ab} = 0$ ，發電機產生的應電勢由本身同步阻抗 Z_s 承擔，可得短路時每相電樞電流 $I_a = \frac{E_p}{Z_s}$ 。

換言之，同步發電機在激磁電流不變下 ($I_f = k$)，將開路時的相電壓 (V_{op}) 除以短路時的相電流 (I_{sp})，即可求出每相繞組之同步阻抗值，即：

$$Z_s = \frac{V_{op}}{I_{sp}} \Big|_{I_f=k} \quad (9-5)$$

Z_s ：每相同步阻抗 (Ω)

V_{op} ：開路時相電壓 (V)

I_{sp} ：短路時相電流 (A)

I_f ：激磁電流 (A)

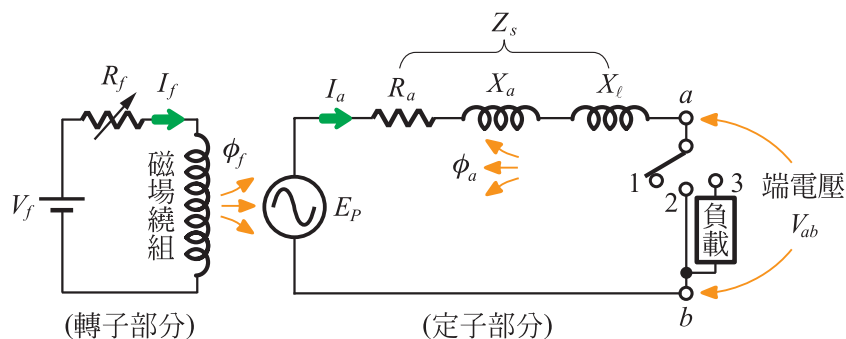


圖 9-14 等效電路圖

依據開路特性曲線與短路特性曲線，也可以求出同步阻抗。以圖 9-15 為例，只要針對某一激磁電流 (I_{f1}) 分別找出開路電壓 (V_o) 以及短路時電樞電流 (I_s) 的數值，之後**依據接線方式換算成每相的數據後**，再利用公式 9-5 就可求出每相同步阻抗值 (Z_s)。

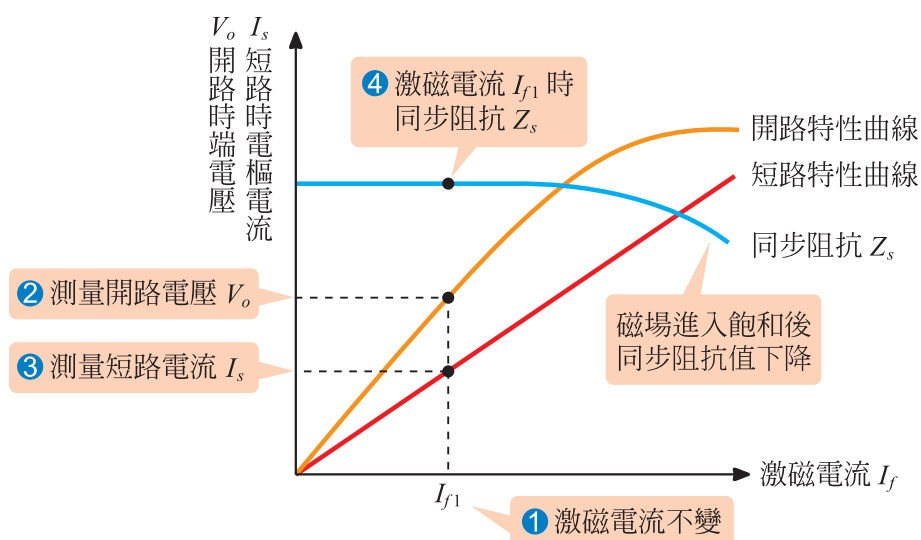


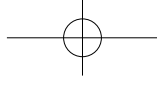
圖 9-15 同步阻抗與特性曲線的關係

將不同激磁電流時的同步阻抗值劃成圖形後，可以發現隨著開路電壓因磁場飽和呈現曲線後，同步阻抗值 Z_s 值也會略為下降，因此**同步阻抗值並非固定不變**。為了方便說明與計算，一般而言，**同步阻抗是以無載時端電壓等於額定電壓時之值為代表**。

範例

03

有一部三相 Y 接同步發電機，開路試驗時，當激磁電流 $I_f = 0.92 \text{ A}$ 測得端電壓為 220 V 。短路試驗時，當激磁電流 $I_f = 0.92 \text{ A}$ 測得電樞電流 $I_a = 10.5 \text{ A}$ ，則此發電機每相的同步阻抗為何？



● 解 本機採 Y 接線，因此開路時相電壓 $V_{op} = \frac{220}{\sqrt{3}} = 127 \text{ V}$

短路時每相電樞電流 $I_{sp} = 10.5 \text{ A}$ 。

$$\text{每相同步阻抗 } Z_s = \left. \frac{V_{op}}{I_{sp}} \right|_{I_f=k} = \left. \frac{127 \text{ V}}{10.5 \text{ A}} \right|_{I_f=0.92 \text{ A}} = 12.1 \Omega$$

隨堂練習

- () 1. 同步發電機之同步阻抗可由下列何種實驗求得？
(A) 無載實驗及短路實驗 (B) 無載實驗及堵住實驗
(C) 負載實驗及短路實驗 (D) 負載實驗及堵住實驗。
- () 2. 一部三相 4 極、22 kVA、220 V、60 Hz、Y 接之同步發電機，若忽略電樞繞組之電阻，於不同激磁電流 (I_f) 下作測試，所得數據如下：短路測試： $I_f = 2 \text{ A}$ 時，電樞電流為 30 A、 $I_f = 3 \text{ A}$ 時，電樞電流為 80 A。開路測試： $I_f = 3 \text{ A}$ 時，端電壓為 220 V。則每相同步電抗 X_s 約為何？
(A) $X_s = 1.6 \Omega$ (B) $X_s = 2.75 \Omega$ (C) $X_s = 4.23 \Omega$ (D) $X_s = 7.3 \Omega$ 。

二、百分比同步阻抗

參考圖 9-14，將同步發電機外接額定負載後 (S 切至 3)，每相額定電流 (I_p) 通過同步阻抗 (Z_s) 時所產生的壓降，與每相額定電壓 (V_p) 的比值稱為百分比同步阻抗 ($\% Z_s$)，即：

$$\% Z_s = \frac{I_p \times Z_s}{V_p} \times 100 \% \quad (9-6)$$

$\% Z_s$ ：百分比同步阻抗

I_p ：每相額定電流 (A)

Z_s ：每相同步阻抗 (Ω)

V_p ：每相額定電壓 (V)

範例

04

有一台 40 kVA、220 V、60 Hz、Y 接三相同步發電機，當場電流為 2.75 A 時，測得開路時線電壓為 220 V、短路時電樞電流為 147 A。則此機之 (1) 每相同步阻抗值、(2) 百分比同步阻抗值分別為何？

解 (1) Y 接線：每相開路電壓 $V_{op} = \frac{220 \text{ V}}{\sqrt{3}} = 127 \text{ V}$ ，每相短路電流 $I_{sp} = 147 \text{ A}$ ，

$$\text{每相同步阻抗 } Z_{sp} = \frac{V_{op}}{I_{sp}} \bigg|_{I_f=k} = \frac{127 \text{ V}}{147 \text{ A}} \bigg|_{I_f=2.75 \text{ A}} = 0.864 \Omega$$

(2) 容量 $S = \sqrt{3} V_L I_L$

$$\text{額定線電流 } I_L = \frac{S}{\sqrt{3} V_L} = \frac{40 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \times 220 \text{ V}} = 105 \text{ A} \quad (\because \text{Y 接}, I_p = I_L = 105 \text{ A})$$

$$\text{百分比同步阻抗 } \% Z_s = \frac{I_p \times Z_s}{V_p} \times 100 \% = \frac{105 \times 0.864}{127} \times 100 \% = 71.4 \%$$

三、短路比

參考圖 9-14，當同步發電機無載運轉時 (S 切至 1)，調整激磁電流使端電壓等於額定電壓 (V_p) 後，改將發電機輸出端短路 (S 切至 2)，再將每相短路電流 (I_{sp}) 與每相額定電流 (I_p) 相除，可得短路比 (short circuit ratio, K_s) 為：

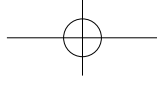
$$K_s = \frac{\text{短路時相電流 } I_{sp}}{\text{額定相電流 } I_p} \quad (9-7)$$

由公式 9-5 可得短路時相電流 $I_{sp} = \frac{V_p}{Z_s}$ ，依據公式 9-6 可得額定相電流

$$I_p = \frac{V_p \times \% Z_s}{Z_s} \quad \text{將其帶入公式 9-7 後，可得短路比為：}$$

$$K_s = \frac{I_{sp}}{I_p} = \frac{\frac{V_p}{Z_s}}{\frac{V_p \times \% Z_s}{Z_s}} = \frac{1}{\% Z_s} \quad (9-8)$$

即**短路比與百分比同步阻抗兩者互為倒數**。



由於短路特性曲線為直線，依據圖 9-16 特性曲線，短路比可以表示為：

$$K_s = \frac{\text{短路時相電流 } (I_{sp})}{\text{額定相電流 } (I_p)} = \frac{\text{開路時產生額定電壓所需的場電流 } (I_{fo})}{\text{短路時產生額定電流所需的場電流 } (I_{fs})} \quad (9-9)$$

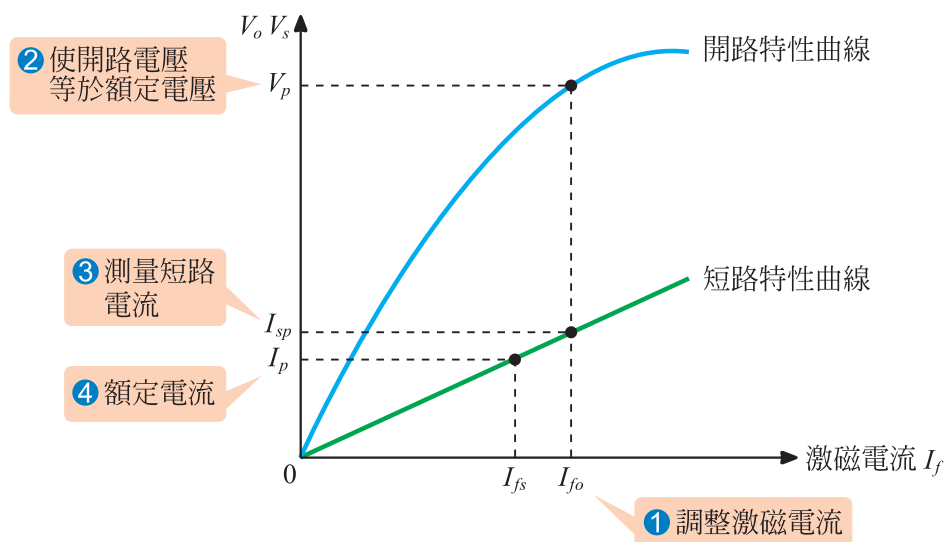


圖 9-16 短路比與特性曲線的關係

範例

05

有一部三相 250 kVA，2000 V，Y 接同步發電機，以額定轉速運轉，激磁電流為 10 A 時產生無載端電壓為 2000 V，將輸出端之端子短路時，其短路電流為 90 A，求此機之 (1) 短路比、(2) 百分比同步阻抗、(3) 同步阻抗值分別為何？

解 (1) 額定線電流 $I_L = \frac{S}{\sqrt{3}V_L} = \frac{250 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \times 2000 \text{ V}} = 72.2 \text{ A}$ (∵ Y 接， $I_p = I_L$)

額定電壓下所測得的短路線電流 $I_{sL} = 90 \text{ A}$ (∵ Y 接， $I_{sp} = I_{sL}$)

因此短路比 $K_s = \frac{I_{sp}}{I_p} = \frac{90 \text{ A}}{72.2 \text{ A}} = 1.25$

(2) 百分比同步阻抗 $\%Z_s = \frac{1}{K_s} = \frac{1}{1.25} = 80 \%$

(3) $\%Z_s = \frac{I_p \times Z_s}{V_p} \times 100 \%$ ，同步阻抗 $Z_s = \frac{V_p}{I_p} \times \%Z_s = \frac{2000 \text{ V}}{72.2 \text{ A}} \times 80 \% = 12.8 \Omega$

範例

06

有一部三相 6 極、10 kVA、220 V、60 Hz、Y 接線之同步發電機，若忽略電樞繞組之電阻，於不同激磁電流 (I_f) 下作測試，所得數據如下：開路測試： $I_f = 2$ A 時，端電壓為 220 V。短路測試： $I_f = 1.5$ A 時，電樞電流等於 26.24 A，則此發電機之 (1) 短路比、(2) 激磁電流為 2 A 時的短路電流、(3) 百分比同步阻抗、(4) 同步阻抗值分別為何？

解 (1) 額定電流 $I_L = \frac{S}{\sqrt{3}V_L} = \frac{10 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \times 220 \text{ V}} = 26.24 \text{ A}$

$$\text{短路比 } K_s = \frac{\text{開路時產生額定電壓所須之場電流 } I_{fo}}{\text{短路時產生額定電流所須之場電流 } I_{fs}} = \frac{2 \text{ A}}{1.5 \text{ A}} = 1.33$$

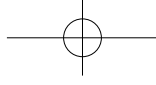
(2) 短路比 $K_s = \frac{\text{短路電流}}{\text{額定電流}}$ ，因此短路電流 $I_s = 26.24 \times 1.33 = 34.9 \text{ A}$

(3) 百分比同步阻抗 $\%Z_s = \frac{1}{K_s} = \frac{1}{1.33} = 75.2 \%$

(4) 同步阻抗 $Z_s = \frac{V_p}{I_p} \times \%Z_s = \frac{\frac{220 \text{ V}}{\sqrt{3}}}{26.24 \text{ A}} \times 75.2 \% = 3.64 \Omega$

隨堂練習

- () 1. 有一台 40 kVA、220 V、60 Hz、Y 接三相同步發電機，開路試驗之數據為：線電壓 220 V 時，場電流為 2.75 A；線電壓 195 V 時，場電流為 2.2 A。短路試驗之數據為：電樞電流 118 A 時，場電流為 2.2 A；電樞電流 105 A 時，場電流為 1.96 A。則發電機之短路比為何？ (A)71 % (B)80 % (C)125 % (D)140 %。
- () 2. 同上題，百分比同步阻抗值為何？ (A)71 % (B)80 % (C)125 % (D)140 %。



9-8 自激磁

由圖 9-12 同步發電機外部特性曲線中可知，外接電容性負載時由於電樞反應的助磁作用，會使得端電壓大於應電勢。實際運作時也發現，將同步發電機直接與長距離輸電線路連接時，由於輸電線相互平行，性質類似電容器，因此同步發電機雖然沒有激磁，但由剩磁所產生之剩磁電壓，會因為電樞反應的助磁作用，造成感應電勢上升。輸電線的電容量越大，所建立的電壓越高，地下輸電線路電壓上升現象尤其明顯。此種沒有外加激磁電流，端電壓卻自行昇高的現象，稱為同步發電機的自激磁 (self excitation)，這種現象與直流自激式發電機的電壓建立過程相似。

自激現象可能導致端電壓高於額定電壓，危害線路安全及絕緣。減少自激現象的方法有：使用電樞反應小、剩磁低的發電機，或是受電端加裝變壓器或同步調相機等電感性負載以減低線路電容。

隨堂練習

- () 1. 都會地區常採用地下電纜進行配電，結果發現滿載時的電壓比無載時更高，主要原因在於電纜線呈現何種特性？
- (A) 電阻性 (B) 電容性 (C) 電感性 (D) 負電阻特性。

9-9 短路電流

運轉中的同步發電機萬一輸出端被短路，短路電流的變化如圖 9-17(a) 所示，在剛短路之最初幾個週期，受到磁滯以及冷次作用影響，電樞反應還沒發生，此時只有漏磁電抗抑制短路電流，造成大量的暫態電流出現。但是幾週後，由於電樞繞組本身的同步電抗遠大於電樞電阻，使得短路電流落後電壓約 90° ，電樞反應產生大量的去磁效應，造成磁通減少，應電勢大幅降低，因此短路電流會快速下降至穩定值。

一般而言同步發電機的短路比約在 $0.6 \sim 1.8$ 之間，也就是穩態下的短路電流約為額定電流 0.6 倍 ~ 1.8 倍，其值非但不大，甚至還比額定電流低。

短路比愈大的發電機，短路時的電流大，但是其同步阻抗小、電樞反應小、電壓調整率小。

為了限制短路電流，同步發電機會如圖 9-17(b) 在中性線與大地間串接電抗器。此外電抗器也可以抵消輸電線所含的靜電容量，減少自激現象。

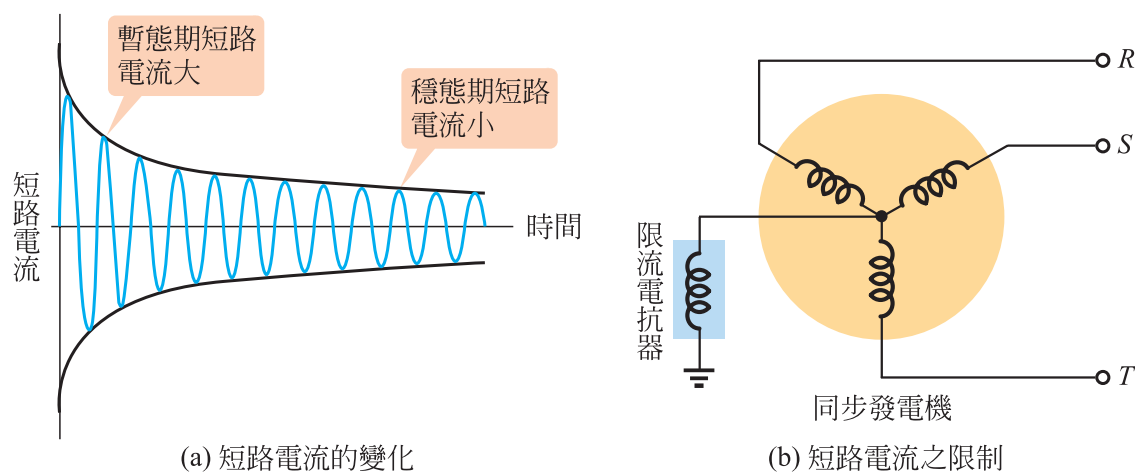
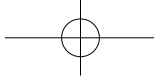


圖 9-17 同步發電機的短路現象與對策



範例

07

以額定電壓及轉速運轉之同步發電機，若突然將三相輸出端短路，測得瞬間暫態短路電流為額定電流的 10 倍，而穩態期間短路電流為額定電流的 1.5 倍，若忽略電樞電阻，則此發電機之 (1) 百分比電樞漏磁電抗、(2) 百分比同步電抗為多少？

解 (1) 短路瞬間電流為額定電流的 10 倍，可得短路比為 10，電樞電阻忽略不計，因此百分比同步電抗 $\% X_s = \frac{1}{K_s} = \frac{1}{10} = 10\%$ ，由於短路瞬間電樞反應尚未發生 ($X_a = 0$)，因此 $\% X_s = \% X_\ell = 10\%$ 。

(2) 穩態期間短路電流為額定電流的 1.5 倍，可得短路比為 1.5，電樞電阻忽略不計，因此百分比同步電抗 $\% X_s = \frac{1}{K_s} = \frac{1}{1.5} = 66.7\%$ 。

隨堂練習

- () 1. 下列對同步發電機之短路比，電壓調整率與同步電抗的敘述，何者錯誤？
- (A) 短路比愈大，短路電流愈大 (B) 短路比愈大，電壓調整率愈小
- (C) 短路比愈小，同步阻抗愈小 (D) 同步電抗愈小，電壓越穩定。

9-10 效率、耗損及額定輸出

一、效率

以圖 9-18 海邊常見的風力發電機為例，發電機將原動機的機械能轉變成電能過程中，礙於材料特性，部分能量轉變成熱能稱之為損失。對於發電機而言，輸出的電功率 (P_o) 越大，表示所需要的輸入機械功率 (P_{in}) 越高。但由於機械能的測量不易，因此效率的計算可以用公定效率表示為：

$$\eta = \frac{P_o}{P_{in}} = \frac{P_o}{P_o + P_{loss}} \quad (9-10)$$

η ：效率

P_o ：輸出功率 (W)

P_i ：輸入功率 (W)

P_{loss} ：耗損功率 (W)

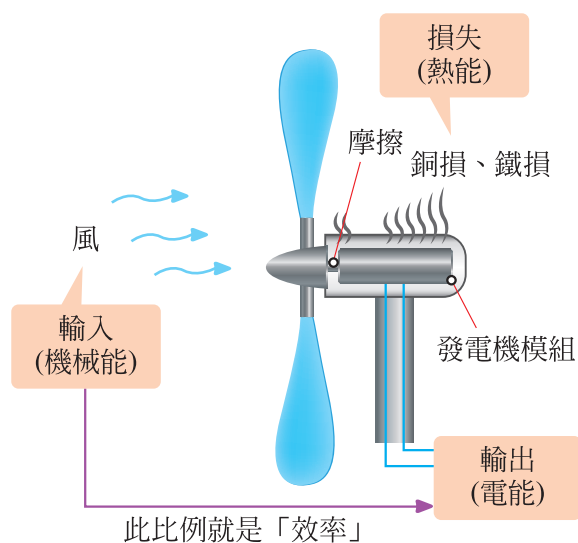
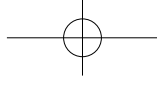


圖 9-18 發電機輸出、耗損及效率的關係



二、耗損

同步發電機的耗損情形與直流發電機相同，以圖 9-18 為例，可以分為：

1. 銅損 (P_c)：電流通過繞組時，由於繞組本身電阻所產生的發熱耗損，其值為 $P_c = I^2 R$ 。銅損與電流平方成正比，屬於變動損。
2. 鐵損 (P_i)：電機鐵心割切磁通或是遇到磁通變動時，鐵心本身因為功率損失而發熱。鐵損分為磁滯損 (P_h) 及渦流損 (P_e)，屬於固定損。
3. 機械損失：電樞在旋轉過程因為軸承摩擦、風阻等所造成的損失，電機的轉速越快，機械損失越大，但與負載無關，因此歸類為固定損。
4. 雜散損失：除了上述以外，還有少部分難以估計的損失稱為雜散損。由於難以測定，一般以輸出容量的 1 % 來估計。

三、額定輸出

電機的額定值就是指滿載值，也就是可以正常使用的最大值，對於同步發電機而言，其額定容量是以視在功率 $S(\text{VA})$ 標示，而輸出的有效功率 $P(\text{W})$ 則必須視負載大小與功率因數而定，因此單相發電機輸出功率為：

$$P_o = VI_a \cos \theta \quad (9-11)$$

P_o ：輸出功率 (W) V ：端電壓 (V) I_a ：電樞電流 (A)

$\cos \theta$ ：負載功率因數

對於三相發電機而言，由於三組繞組特性相同，因此輸出功率表示為：

$$P_o = 3V_p I_a \cos \theta = \sqrt{3} V_L I_L \cos \theta \quad (9-12)$$

P_o ：輸出功率 (W) V_p ：每相端電壓 (V) I_a ：每相電樞電流 (A)

$\cos \theta$ ：負載功率因數 V_L ：線電壓 (V) I_L ：線電流 (A)

大容量同步發電機由於電樞繞組電抗值遠大於電阻值 ($X_s \gg R_a$)，將電樞繞組電阻值忽略後，每相應電勢 $\bar{E}_p = \bar{V}_p + j\bar{I}_a X_s$ ，簡化後每相的相量關係如圖 9-19，圖中 θ 稱為功率因數角為每相端電壓 V_p 與每相電樞電流 I_a 的夾角。至於 δ (Delta) 稱為負載角為每相感應電勢 E_p 與每相端電壓 V_p 的夾角。

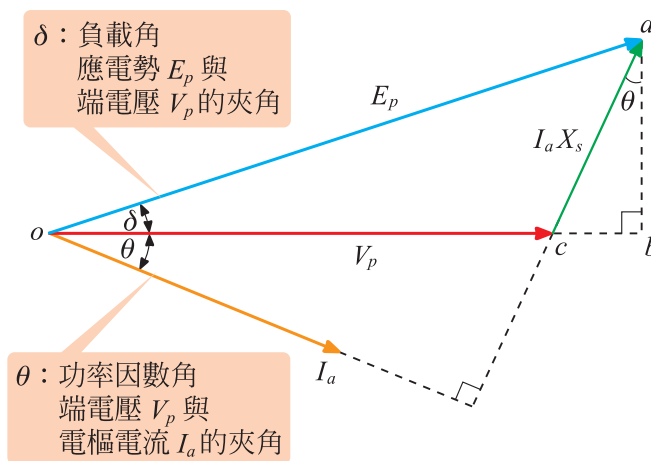


圖 9-19 同步發電機相量圖 (忽略繞組電阻值)

由圖 9-19 中， $\triangle abo$ 可得 $\overline{ab} = E_p \sin \delta$ ， $\triangle abc$ 可得 $\overline{ab} = I_a X_s \cos \theta$ ，因此 $I_a \cos \theta = \frac{E_p}{X_s} \sin \delta$ ，將其代入公式 9-11 可得同步發電機每相輸出功率的另一種表示方式：

$$P_o = q \times \frac{V_p \times E_p}{X_s} \sin \delta \quad (9-13)$$

P_o : 輸出功率 (W)

q : 相數 (三相 $q = 3$)

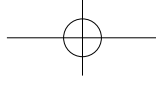
V_p : 相電壓 (V)

E_p : 每相應電勢 (V)

X_s : 每相同步電抗 (Ω)

δ : 負載角

依據公式 9-13 可知，若是 E_p 、 V_p 、 X_s 固定不變時，**發電機的輸出功率與負載角的正弦函數成正比** ($P_o \propto \sin \delta$)。也就是說當負載增加時，端電壓落後應電勢的角度 δ 變大，發電機輸出更大的功率以因應負載所需。當負載增加到**負載角 $\delta = 90^\circ$ 時稱為最大輸出功率**。一般運轉時同步發電機的負載角約在 30° 左右。



範例

08

有一台 6 極、380 V、60 Hz、Y 接三相圓柱型同步發電機，每相同步電抗為 $10\ \Omega$ ，電樞電阻忽略，滿載時每相應電勢 250 V，負載角為 30° ，求 (1) 滿載輸出功率、(2) 此機最大輸出功率為多少？

解 (1) 本機為 Y 接線，每相端電壓 $V_p = \frac{380\text{ V}}{\sqrt{3}} \doteq 220\text{ V}$

$$\text{輸出功率 } P_o = q \times \frac{V_p \times E_p}{X_s} \sin \delta = 3 \times \frac{220 \times 250}{10} \times \sin 30^\circ = 8250\text{ W}$$

(2) 最大輸出功率發生在負載角 $\delta = 90^\circ$ 時，即：

$$P_{o(\max)} = 3 \times \frac{220 \times 250}{10} \times \sin 90^\circ = 16500\text{ W}$$

範例

09

有一台 6 極、220 V、20 kVA 三相柴油發電機，負載功率因數為 0.8，額定效率為 64%，求發電機之 (1) 額定電流、(2) 額定輸出功率、(3) 輸入功率、(4) 損失、(5) 柴油引擎輸出功率為多少馬力？

解 (1) 容量 $S = \sqrt{3}V_L I_L$ ，額定電流 $I_L = \frac{S}{\sqrt{3}V_L} = \frac{20\text{ kVA}}{\sqrt{3} \times 220\text{ V}} \doteq 52.5\text{ A}$

(2) 額定輸出功率 $P_o = \sqrt{3}V_L I_L \cos \theta = \sqrt{3} \times 220 \times 52.5 \times 0.8 = 16\text{ kW}$

(3) $\eta = \frac{P_o}{P_{in}} \Rightarrow P_{in} = \frac{16\text{ kW}}{0.64} \Rightarrow P_{in} = 25\text{ kW}$ ； (4) $P_{\text{loss}} = P_{in} - P_o = 25 - 16 = 9\text{ kW}$

(5) 柴油引擎輸出功率等於發電機輸入功率，引擎輸出功率

$$P_o = \frac{25000}{746} \doteq 33.5\text{ hp}$$

隨堂練習

- () 1. Y 接三相同步發電機，每相應電勢為 $220\angle 0^\circ$ ，省略電樞電阻，外加負載時，測得負載端相電壓為 $220\angle -30^\circ$ 。已知發電機輸出之三相實功率為 6 kW，則其每相之同步電抗值應為多少？ (A) $10\ \Omega$ (B) $11\ \Omega$ (C) $12\ \Omega$ (D) $13\ \Omega$ 。
- () 2. 同上題，發電機最大輸出功率為多少？ (A) 6 kW (B) 8 kW (C) 12 kW (D) 18 kW。

一、選擇題

- 9-1** () 1. 同步機之電樞反應和電樞電流
- (A) 大小有關 (B) 相位有關
(C) 大小及相位有關 (D) 大小及相位無關。
- () 2. 同步發電機之負載若為電感性，則其電樞反應為
- (A) 去磁效應 (B) 加磁效應
(C) 去磁與交磁效應 (D) 加磁與交磁效應。
- 9-3** () 3. 已知某同步發電機每相之同步阻抗為 1.3Ω ，同步電抗為 1.2Ω ，則其電樞電阻為多少？
- (A) 0.1Ω (B) 0.3Ω (C) 0.5Ω (D) 2.5Ω 。
- 9-6** () 4. 繪製同步發電機之開路特性曲線時，通常其橫座標為激磁電流，則縱座標為
- (A) 轉速 (B) 電樞電流 (C) 電功率 (D) 感應電勢。
- () 5. 同步發電機之開路特性曲線與下列何種特性曲線十分類似？
- (A) 他激式直流發電機之磁化特性曲線
(B) 平複激式直流發電機之外部特性曲線
(C) 串激式直流發電機之外部特性曲線
(D) 同步發電機之短路特性曲線。
- () 6. 功率因數為 0.8 落後時，若負載電流增加，為維持一定端電壓，交流同步發電機之激磁電流將如何改變？
- (A) 增加 (B) 減少 (C) 不變 (D) 視情形而定。
- () 7. 三相 Y 接交流發電機，無載電壓為 2000 V，而滿載電壓為 2400 V，其電壓調整率為多少？
- (A) +20 % (B) +16.7 % (C) -16.7 % (D) -20 %。
- 9-7** () 8. 某同步發電機容量為 20 kVA，200 V，短路時產生額定電流所需之場電流為 4.8 A，開路時產生額定電壓所需之場電流為 6 A，則此電機之同步阻抗的標么值為
- (A) 1.25 (B) 0.8 (C) 0.21 (D) 0.167。

自我評量

- () 9. 額定輸出 1000 kVA，3 kV 之三相 Y 接同步發電機，已知每相同步阻抗為 5.4Ω ，試求百分比同步阻抗？
(A) 80 % (B) 60 % (C) 50 % (D) 40 %。
- () 10. 交流同步發電機的短路比可以用來表示激磁與電樞反應的相對強度，若短路比越大則
(A) 同步阻抗越大，電壓調整率越大
(B) 同步阻抗越小，電壓調整率越小
(C) 短路電流大，電樞反應大
(D) 短路電流小，電樞反應小。
- () 11. 圖 (1) 為一部三相同步發電機接不同性質負載下的外部特性曲線，則發電機接何種負載時電壓調整率最好？
(A) 電阻性，即功因為 1 時 (B) 電感性，即功因落後時
(C) 電容性，即功因超前時 (D) 三者電壓調整率皆相同。

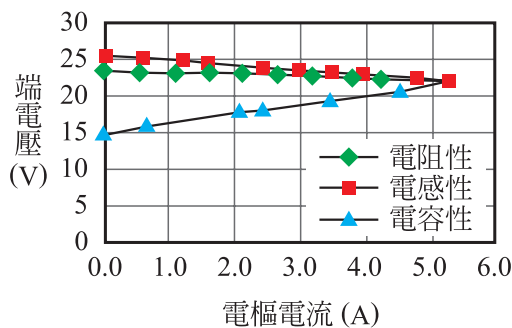


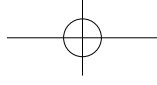
圖 (1)

- () 12. 交流同步發電機之感應電勢與電樞電流和端電壓之關係，下列敘述何者有誤？
(A) $\cos\theta < 1$ 落後，電樞電流產生去磁效應，感應電勢大於端電壓
(B) $\cos\theta < 1$ 超前，電樞電流產生加磁效應，感應電勢小於端電壓
(C) 電阻性負載增加時，電壓調整率為正值
(D) 電感性負載增加時，電壓調整率為負值。

- 9-8** () 13. 同步發電機之自激現象，產生的條件是
- (A) 電阻性負載 (B) 電容性負載
(C) 電感性負載 (D) 以上皆有可能。
- 9-10** () 14. 有一台 6 極、380 V、60 Hz、Y 接三相非凸極式同步發電機，每相同步電抗為 $10\ \Omega$ ，電樞電阻忽略，當每相應電勢 250 V 時，求發電機最大功率輸出為多少？
- (A) 5.5 kW (B) 16.5 kW (C) 23.5 kW (D) 28.5 kW。
- () 15. 一台三相 Y 連結的交流發電機，其額定容量為 120 kVA、400 V、1800 rpm、P.F. = 0.9，其滿載電流值約為多少？
- (A) 300 A (B) 236 A (C) 200 A (D) 173 A。
- () 16. 承上題，其滿載輸出功率約為多少？
- (A) 116 kW (B) 114 kW (C) 108 kW (D) 102 kW。

二、問答與計算題

- 有一台 40 kVA、220 V、60 Hz、Y 接三相同步發電機，開路試驗之數據為：線電壓 220 V 時，場電流為 2.75 A；線電壓 195 V 時，場電流為 2.2 A。短路試驗之數據為：電樞電流 118 A 時，場電流為 2.2 A；電樞電流 105 A 時，場電流為 1.96 A。則發電機之 (1) 短路比、(2) 百分率同步阻抗值、(3) 每相同步阻抗值分別為何？
- 某 240 kVA、60 Hz、Y 接三相同步發電機，每相端電壓為 400 V，每相繞組之同步電抗為 $0.5\ \Omega$ ，電樞電阻忽略不計。(1) 發電機額定電流為何？(2) 功率因數為 1 的額定負載時，電壓調整率為多少？(3) 功率因數為 0.8 落後的額定負載時，發電機的電壓調整率約為多少？(4) 功率因數為 0.8 超前的額定負載時，發電機的電壓調整率約為多少？



CHAPTER 10

同步發電機之並聯運用

» 本章重點

電力系統中會將多部發電機的出線端連接在共同母線 (匯流排) 上，以滿足龐大的用電需求，此種作法稱為並聯運用。本章首先介紹並聯運用的優點以及需要具備的條件，之後說明並聯運用的操作過程以及負載分配原則，最後介紹同步電機特有的追逐現象以及因應做法。

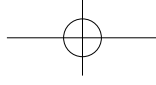
10-1 並聯運用的進行

一、並聯運用的目的

隨著用電需求日益成長，電力公司必須不斷擴充發電機組，當夏季到來天氣炎熱用電量增加時將發電機組依序起動，再與電力系統連接；而當秋冬季節用電需求降低時，再將發電機組輪流停機、檢修。因此將**同步發電機並聯運用的優點**包含：**增加供電容量、提高運轉效率、提高供電可靠度、降低備用容量、延長壽命等。**

二、並聯運用的條件

由於發電機的容量、製造廠商、出廠年份不同，各機的特性很難完全一致。因此要將同步發電機並聯前，必須確認各機至少符合下列條件：



(一) 電壓大小相同

並聯電路的重要特性就是電壓大小相等。圖 10-1 為兩部同步發電機並聯時，其中一相的等效電路圖；倘若一號機的激磁電流較強使得應電勢較高 ($E_{p1} > E_{p2}$)，此時即便沒有負載，兩機之間仍會有環流 (I_c) 發生。大型電機的同步電抗遠大於電樞電阻 ($X_s > R_a$)，依據歐姆定律，每相繞組間的循環電流為：

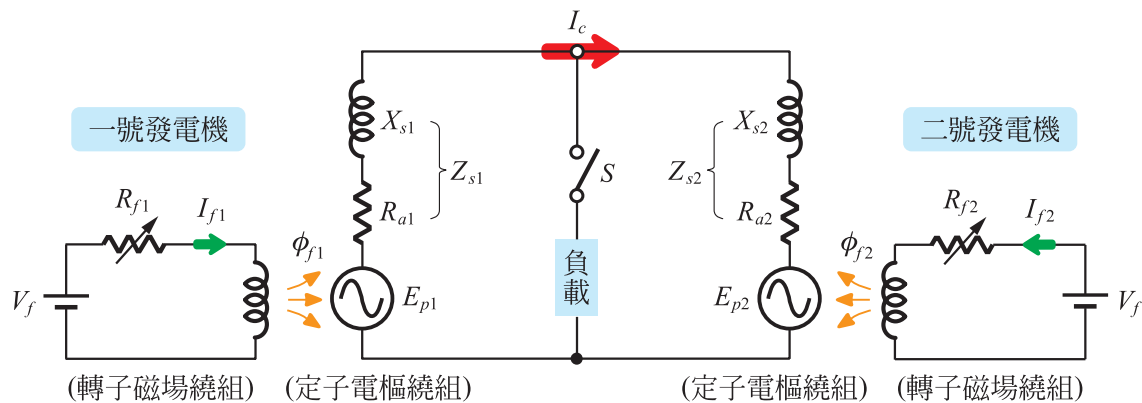
$$I_c = \frac{E_{p1} - E_{p2}}{Z_{s1} + Z_{s2}} \div \frac{E_{p1} - E_{p2}}{X_{s1} + X_{s2}} \quad (10-1)$$

I_c ：每相循環電流 (A)

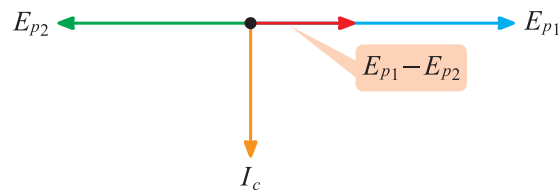
E_p ：每相應電勢 (V)

Z_s ：每相同步阻抗 (Ω)

X_s ：每相同步電抗 (Ω)

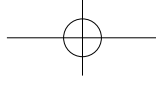


(a) 接線圖與循環電流



(b) 循環電流相量圖 ($E_{p1} > E_{p2}$)

圖 10-1 電壓不同時的循環電流



循環電流 I_c 對於兩部發電機的影響如圖 10-1(b)：

- (1) 對感應電勢較高的一號機而言，循環電流 I_c 落後應電勢 E_{p1} 約 90° 電機角，所造成的電樞反應為去磁效應，磁通減弱使得應電勢 E_{p1} 降低。
- (2) 對感應電勢較低的二號機而言，循環電流 I_c 超前應電勢 E_{p2} 約 90° 電機角，所造成的電樞反應為助磁效應，磁通增強使得應電勢 E_{p2} 上升。

依據上述，**循環電流會將兩機感應電勢大小調整趨於一致，但是循環電流與兩部發電機的感應電勢都相差 90° ，屬於 $\cos\theta = 0$ 的無功電流 (reactive current)**，還會造成銅損增加，溫度上升、效率降低，因此並聯前必須確認電壓大小相同。

(二) 相序相同

對於三相發電機而言，定子三組電樞繞組受到轉子磁場切割而產生感應電勢，以圖 10-2 為例，當原動機以順時針方向帶動轉子旋轉時，定子的三組電樞繞組感應電勢的順序為 $(A \rightarrow B \rightarrow C)$ 稱為正相序 (positive phase sequence)；反之若是將原動機改以逆時針方向旋轉，應電勢順序變成 $(A \rightarrow C \rightarrow B)$ 就稱為負相序 (negative phase sequence)。

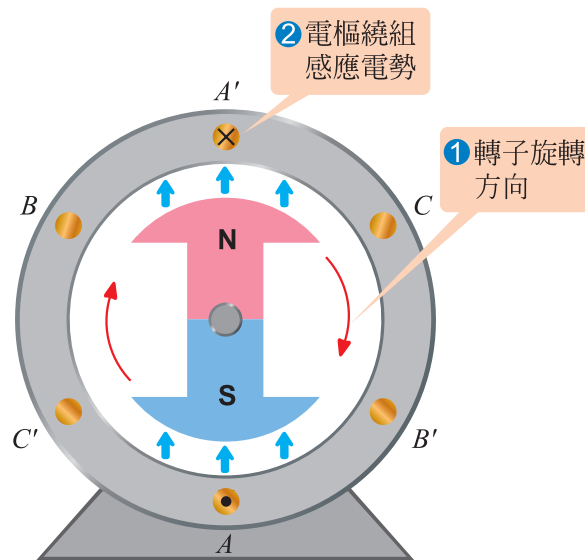
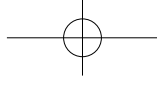


圖 10-2 相序與並聯運用的關係



同步發電機並聯運轉時，首要條件就是確認兩機相序是否相同，倘若發電機 G_1 為正相序 ($A-B-C$)，發電機 G_2 為負相序 ($A'-C'-B'$)，三相中僅有 A 相屬於同相 (in phase)，其餘兩相互隔 120° 電機角稱為異相 (out of phase)。若將兩機並聯，異相繞組間會發生嚴重的過電流，可能導致發電機燒毀，因此三相發電機的相序不同，一定無法並聯，至於單相發電機只有一相電源，並聯運用時不需要考慮相序問題。

(三) 頻率相同

同步發電機的頻率 $f = \frac{P \times n_s}{120}$ ，因此只要原動機配合發電機極數 (P) 以穩定的同步速度 (n_s) 持續旋轉，發電機就可以輸出固定頻率 (f) 的電壓。實務上受到原動機特性及負載影響，發電機產生的電源頻率還是會有些微差距。以圖 10-3 為例，倘若 G_1 產生的應電勢頻率高於 G_2 ，則兩機在任意時間的電壓值都不同，而在某瞬間兩機電壓會相差兩倍，造成極大的循環電流。

實務運用上，如果頻率相差不多 ($\pm 1\%$)，兩機有可能互相追逐後以同步轉速穩定運轉；但若是頻率相差太大，會引起全面停機的嚴重事故，應該加以避免。

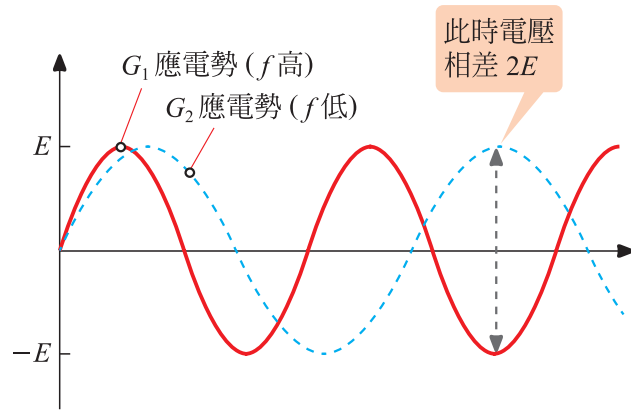
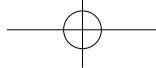


圖 10-3 頻率與並聯運用的關係

(四) 相位相同

若兩台並聯同步發電機的電壓、相序、頻率都相同，但只有相位不同，以圖 10-4 為例，若應電勢 $\bar{E}_1$ 超前應電勢 $\bar{E}_2$ 為 δ 角，此時應電勢間產生電壓差 $\bar{E}_r$ 。



，使得兩發電機的電樞繞組間產生環流 $\bar{I}_c$ 。由於同步機之電抗遠大於電阻，因此循環電流 $\bar{I}_c$ 會落後 $\bar{E}_r$ 90° 。換言之，循環電流 $\bar{I}_c$ 落後應電勢 $\bar{E}_1$ 為 $\frac{\delta}{2}$ 角，但是 $\bar{I}_c$ 超前應電勢 $\bar{E}_2$ 為 $\frac{\delta}{2}$ 角。

相位不同所產生的環流 $\bar{I}_c$ 與兩機應電勢夾角都小於 90° 電機角，將造成兩機間的有效功率移轉：相位

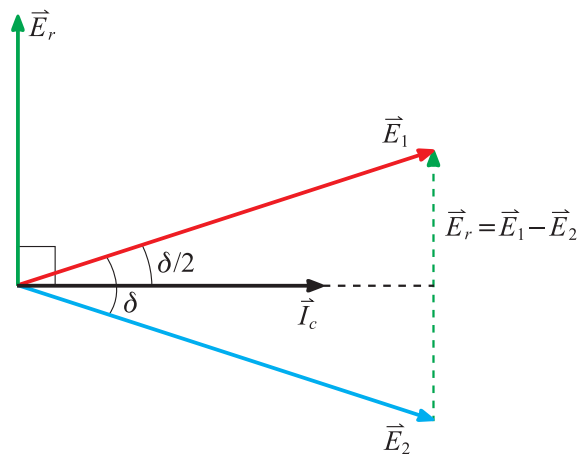


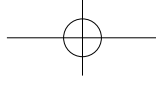
圖 10-4 頻率與並聯運用的關係

超前之 G_1 發電機增加 $E \times I_c \times \cos \frac{\delta}{2}$ 之電功率負擔 (稱為同步功率或整步功率；synchronizing power)，造成轉速瞬間稍慢；相位落後之發電機減少 $E \times I_c \times \cos \frac{\delta}{2}$ 的負擔，造成轉速瞬間稍快，兩機逐漸趨於穩定運轉。因此兩機相位略有不同，是可以並聯運轉，但若相位差超過 90° 電機角時，整步功率反而減小，無法並聯運轉。

相位不同所造成的環流會造成了有效功率移轉，因此稱為同步電流或整步電流 (synchronizing current)，與圖 10-1 所示因為電壓不同所造成的無功電流，兩者性質不同，需加以區別。

(五) 波形相同

發電機若是設計不當或是材料瑕疵，造成輸出波形並非正弦波，使得兩機間隨時存有電壓差，導致高次諧波的無效環流在二機間流動，銅損因而增加。但是發電廠內的發電機都經過妥善規劃與設計，輸出均為正弦波，實際並聯時並不需要調整。



(六) 原動機角速度必須穩定，且具有適當的速率—負載特性

發電機所產生的電能乃是透過磁場將原動機的機械能轉換而來，因此原動機除了轉速不變外，角速度（角度隨時間的變化量）也必須穩定，避免發生瞬間的震動造成應電勢相位或電壓發生變動。

另外**原動機的速率 - 負載特性曲線必須為適度下垂的特性**，因應負載突然加大時，輸出增加較快的發電機，因為轉速降低較多，應電勢相位稍微落後，而減少輸出；輸出增加較慢的發電機，因為轉速降低較少，使得應電勢相位領先，而增加輸出，以達到穩定的負載分配。

範例

01

兩部三相 Y 接同步發電機做並聯運轉時，一號機無載線電壓大 $230\sqrt{3}$ V，每相同步電抗 $3\ \Omega$ ，二號機無載線電壓 $220\sqrt{3}$ V，每相同步電抗 $2\ \Omega$ ，若兩發電機內電阻忽略不計，則內部環流為多少安培？

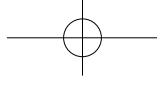
解 兩機均為 Y 接線，一號機無載相電壓 $E_{p1} = \frac{230\sqrt{3}}{\sqrt{3}} = 230$ V

二號機無載相電壓 $E_{p2} = \frac{220\sqrt{3}}{\sqrt{3}} = 220$ V

兩機並聯後內部環流 $I_c = \frac{E_{p1} - E_{p2}}{X_{s1} + X_{s2}} = \frac{230 - 220}{3 + 2} = 2$ A

隨堂練習

- () 1. 下列何者不是同步發電機之並聯運轉條件？
(A) 頻率相同 (B) 相位角相同 (C) 極數相同 (D) 相序相同。
- () 2. 發電機並聯運轉之情況中，整步電流之功用為調整感應電動勢之
(A) 波形 (B) 相位 (C) 相序 (D) 頻率。



10-2 並聯運用之方法

新的同步發電機首次併入系統前，需先確認相序一致，之後再依序調整頻率、電壓以及相位與系統完全一致，這個過程稱為整步 (synchronize)。實際並聯時除了相序必須相同外，頻率、電壓及相位會允許些微差異，容量越大的系統條件越為嚴苛。

一、相序判斷

相序判斷最簡單的方式可以透過圖 10-5 的相序計 (phase-sequence meter) 直接判斷，或是利用一部小型三相感應電動機，分兩次跟發電機以及準備併入的系統相應端連接，確認兩次的旋轉方向是否相同。

二、頻率與電壓判斷

同步發電機的頻率可以透過頻率計監控，電壓則透過電壓表監看。並聯前，新機頻率盡量與系統相同 ($\pm 1\%$)。電壓則略高於系統電壓 ($+5\%$) 較佳。

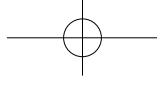


圖 10-5 相序計
(圖片來源：泰菱公司)

三、相位判斷

對於大型發電機組而言，當新加入的機組與系統間的電壓相位趨近零度時，將斷路器投入，是機組整步並聯最佳的操作狀態，實務上允許相位相差 $\pm 15^\circ$ 。

要獲知發電機的相位除了透過電力示波器外，一般常用的還有同步檢定器以及同步燈兩種方式：



(一) 同步檢定器

同步檢定器也稱為同步儀 (synchronous scope)，構造如圖 10-6，原理與功率因數表相同。使用同步檢定器前應先確定相序，再將同相之電壓分別接至同步檢定器；其中系統電源加在定子線圈作為參考磁場。新機電源則經過檢定器內的電阻與電感變為兩相電流，再與轉子內兩組互隔 90° 的線圈連接而形成旋轉磁場。

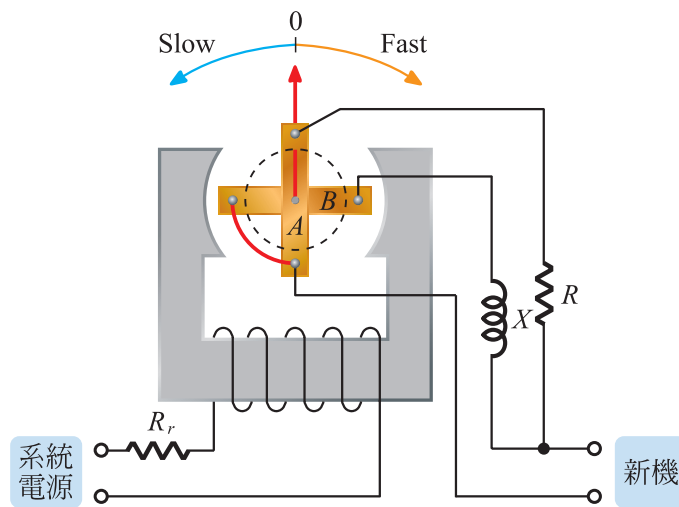
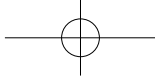


圖 10-6 同步檢定器

若新機與系統電源之相位與頻率相同，定子磁場與轉子磁場作用力使得指針固定於圖示之中央位置。若相位不同，則指針偏轉指示出其相位差。若頻率不同時，磁場作用力使得指針不停旋轉，新機頻率高則順時針旋轉，反之新機頻率低則逆時針旋轉，頻率相差愈大，指針轉速愈快。



(二) 同步燈檢驗法

將三個電燈泡接在準備並聯的二部發電機間，利用燈泡的明滅變化來檢查兩機是否同步。圖 10-7 為常用的二明一滅法，其中一個燈泡 (L_2) 接在同相，另外兩個燈泡 (L_1 與 L_3) 刻意接在異相。

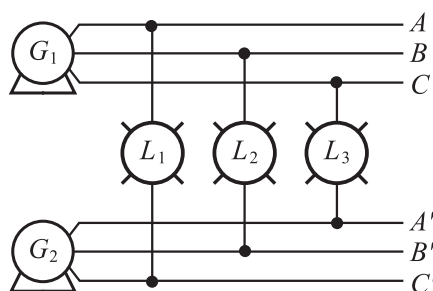


圖 10-7 二明一滅法

當兩機完全同步時，燈泡 L_2 兩端接在同相端 (B 與 B') 沒有電位差因此會熄滅；至於燈泡 L_1 及 L_3 接在異相會承擔線電壓而全亮。

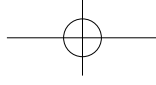
當兩機不同步時，三顆燈泡的變化情形也會不同，其結果整理如表 10-1。此種檢驗方法簡便但是精準度較差，只用於小型機組的並聯。

表 10-1 二明一滅法之同步狀況

情況	三燈現象	相序	頻率	相位	電壓
1	二明一滅 (同步)	相同	一致	一致	相等
2	二明一暗	相同	一致	稍異	稍異
3	三燈皆滅	相反	一致	一致	相等
4	三燈皆暗	相反	一致	稍異	稍異
5	三燈輪流明滅	相同	稍異	不定	相等
6	三燈輪流明暗	相同	稍異	不定	稍異



頻率不同時，相位會不斷改變



四、並聯操作步驟

參考圖 10-8，倘若一號發電機 G_1 已經在系統中運轉供電，當電力需求增加時，準備將二號發電機 G_2 與系統進行並聯，操作步驟如下：

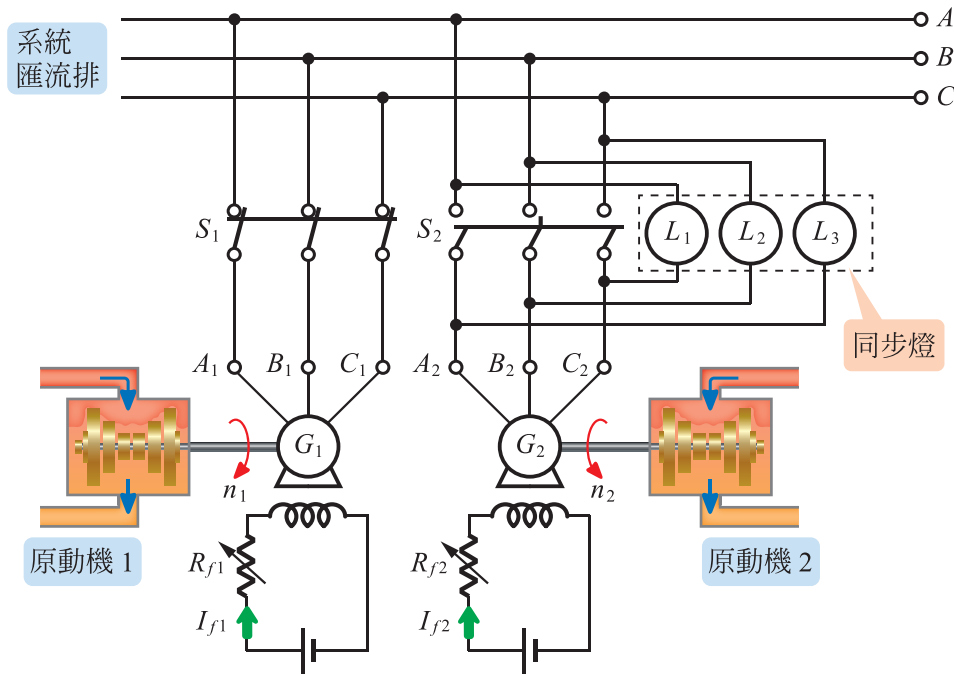
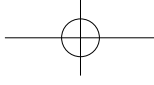


圖 10-8 同步發電機並聯運轉

1. 起動二號發電機 G_2 的原動機 (水輪機、汽輪機等)，使發電機 G_2 以額定轉速運轉。
2. 將磁場繞組 R_{f2} 逐漸降低，隨著激磁電流增加，二號機應電勢上升，**直到應電勢略高於系統電壓為止**，以方便並聯後可以立刻供電。
3. 依據同步燈 (或同步檢定器) 指示情形，進行整步工作，過程中若是發現：
 - (1) 相序不同：將二號機的原動機停機後反轉，或是調換二號機的任二接線端。
 - (2) 頻率不同：調整二號原動機轉速，轉速越高，頻率越高。
 - (3) 電壓不同：調整二號機的磁場繞組，可變電阻 R_{f2} 越低，電壓越高。
4. 當同步燈 (或同步檢定器) 指示兩機同步時，將開關 S_2 閉合，完成新機與系統之並聯。



隨堂練習

- () 1. 利用同步儀檢查發電機是否與系統同步，若是發生指針順時針不斷旋轉，代表準備並聯發電機之 (A) 相位超前 (B) 相位落後 (C) 頻率太高 (D) 頻率太低。
- () 2. 同步發電機並聯運用實習過程中，使用二明一滅同步燈檢查發電機是否同步，有關三個燈泡顯示的意義，下列何者錯誤？
- (A) 二明一暗，表示電壓或相位稍異 (B) 三燈輪流明滅，表示頻率稍異
- (C) 三燈皆滅，表示兩機同步 (D) 三燈輪流明暗，表示頻率及電壓稍異。

10-3 負載分配

依據上節所述，當二號機與系統並聯後，接下來必須將部分負載轉移給二號發電機承擔，以降低原本一號發電機的負擔。以交流系統而言，負載轉移牽涉到有效功率 P 以及無效功率 Q 的分配；而在轉移的過程中又必須讓系統電壓與頻率維持穩定，因此負載分配原則包括：

一、有效功率的分配

以圖 10-9(a) 為例，假設原本兩部發電機 G_1 、 G_2 負擔分別為 P_1 、 P_2 ，頻率皆為 f ，在負載不變下，若只有增加二號原動機輸出功率 (速率 - 負載曲線由 $B \rightarrow B'$)，兩機負載分配分別變成 P'_1 、 P'_2 ，但是輸出頻率也隨之增加 ($f \rightarrow f'$)。

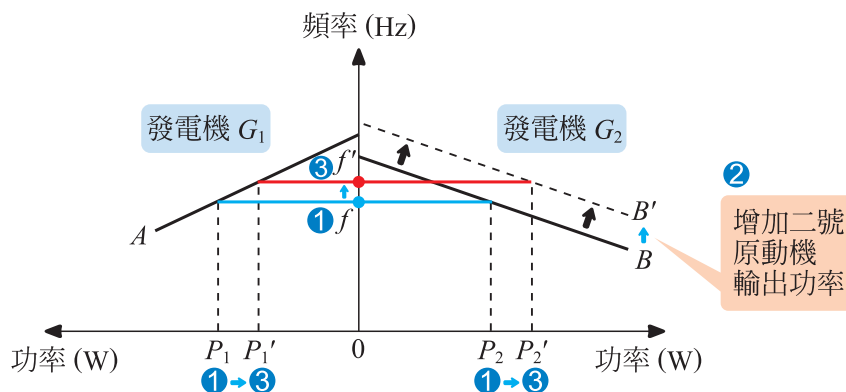
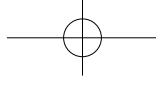


圖 10-9(a) 僅增加二號原動機輸出功率



爲了讓頻率維持穩定，如圖 10-9(b)，必須同步降低 G_1 原動機輸出功率（速率 - 負載曲線由 $A \rightarrow A'$ ），此時 G_2 的輸出功率會由 P_2' 再上升到 P_2'' ， G_1 的輸出功率會由 P_1' 再下降到 P_1'' ，此時頻率才能回到額定值 f 。

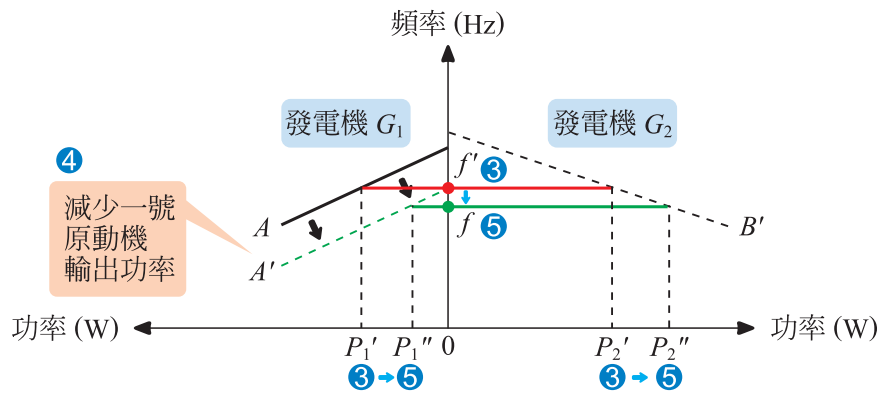


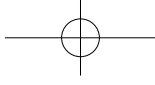
圖 10-9(b) 降低一號機原動機輸出功率

因此在調整有效功率時必須注意，在增加一部發電機的輸入功率時，必須同時減少另一部發電機的輸入功率，才能使頻率維持不變。

二、無效功率的分配

要改變同步發電機之無效功率，必須調整發電機之激磁電流。以圖 10-8 爲例，並聯過程中，若是將二號發電機磁場繞組 R_2 降低， G_2 應電勢增加，此時產生如圖 10-1 所述的無功電流，使得 G_2 電樞電流增加，輸出之無效功率增加；而 G_1 之應電勢降低，電樞電流減少，輸出之無效功率降低。

在調整無效功率時也必須注意，在增加一部發電機的激磁電流時，也必須同時減少另一部發電機的激磁電流，才能使電壓維持不變。



隨堂練習

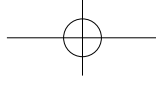
- () 1. 同步發電機並聯運用時，有效功率與無效功率之分配敘述，何者正確？
- (A) 變更原動機之速率 - 負載曲線，可變更無效功率之分配，改變磁場電流即可變更有效功率之分配
 - (B) 變更原動機之速率 - 負載曲線，可變更有效功率之分配，改變磁場電流即可變更無效功率之分配
 - (C) 變更原動機之速率 - 負載曲線或改變磁場電流，對於有效功率及無效功率之分配，並沒有產生任何影響
 - (D) 變更原動機之速率 - 負載曲線會同時改變有效功率及無效功率之分配。
- () 2. 下列有關同步發電機之敘述，何者正確？
- (A) 要改變輸出有效功率，需調整激磁電流
 - (B) 要改變輸出無效功率，需調整原動機轉速
 - (C) 發電機輸出功率增加時，其負載角會變大
 - (D) 激磁電流增加時，發電機輸出電壓會降低。

10-4 追逐現象

一、追逐現象的發生

依據公式 9-13，同步發電機每相輸出功率 ($P_o = q \times \frac{V_p \times E_p}{X_s} \sin \delta$)，式中可知輸出功率與負載角 δ 正比 ($P_o \propto \sin \delta$)。

同步發電機運轉供電時，由原動機所提供的驅動轉矩與用電負載所產生的反轉矩處於平衡狀態，轉子視負載大小維持在某一特定負載角下運轉。假設負載突然變化，轉矩失去平衡造成轉速瞬間變動，此時整步電流立即產生，調整轉子磁極以新的負載角位置維持同步運轉，但是受到慣性作用影響，轉速會有一段時間在同步轉速附近忽快忽慢的不安現象，稱為追逐現象。



二、追逐現象的抑制

追逐現象會造成發電機發生異常聲響、電樞應電勢的振幅與波形發生變動、配電盤的儀表指針會猛烈搖擺，嚴重時甚至造成脫步而無法運轉。

爲了抑制追逐現象，大部分的同步機會在轉子磁極面上裝阻尼繞組，構造可參考圖 7-7，阻尼繞組的構造與原理跟鼠籠式轉子的短路銅棒相似，其特性爲：

1. 轉子同步旋轉時，阻尼繞組與電樞磁場沒有相對運動，轉差率爲 0，阻尼繞組沒有作用。
2. 負載增加瞬間，轉子轉速瞬間下降，轉差率爲正，阻尼繞組與磁場電樞割切產生應電勢，使轉子加速。
3. 負載減少瞬間，轉子轉速瞬間上升，轉差率爲負，阻尼繞組與磁場電樞割切產生反向的應電勢，產生制動作用，使轉子減速。

隨堂練習

- () 1. 為了抑制追逐現象，三相同步電機應該加設何種裝置？
(A) 中間極 (B) 補償繞組 (C) 蔽極繞組 (D) 阻尼繞組。
- () 2. 並聯運用中的發電機，其追逐現象發生在何種情形下？
(A) 輕載時 (B) 負載功率因數甚低時 (C) 負載有急速的變化時 (D) 無載時。

自我評量

一、選擇題

- 10-1** () 1. 下列何者不是同步發電機並聯運轉之條件？
(A) 電壓相同 (B) 電流相同 (C) 頻率相同 (D) 相序相同。
- () 2. 下列何者為同步發電機並聯運轉的首要條件？
(A) 頻率相同 (B) 相位角相同 (C) 極數相同 (D) 相序相同。
- () 3. 二台單相發電機並聯運用，與下列何者無關？
(A) 相序 (B) 頻率 (C) 相位 (D) 電壓。
- () 4. 有關同步發電機並聯運轉時整步電流的敘述，下列何者錯誤？
(A) 因為相位不同而產生
(B) 因為電壓不同而產生
(C) 造成有效功率轉移
(D) 幫助兩機穩定運轉。
- () 5. 發電機並聯運轉之情況中，無效環流之出現，是因為調整感應電動勢之 (A) 大小 (B) 相位 (C) 波形 (D) 頻率。
- () 6. 有 A 、 B 兩部三相 Y 接同步發電機做並聯運轉，若 A 機無載線電壓為 382 V ，每相同步電抗 $1.2\ \Omega$ ， B 機無載線電壓為 372 V ，每相同步電抗 $0.8\ \Omega$ ，若兩發電機內電阻忽略不計，則其內部環流為 (A) 2 A (B) 2.89 A (C) 5 A (D) 10 A 。
- 10-2** () 7. 兩部同步發電機並聯運用時，若沒有相序檢定器，可用下列何者來檢測相序？
(A) 頻率計 (B) 轉速計 (C) 動力計 (D) 三相感應電動機。
- () 8. 兩部三相同步發電機並聯運轉時檢查順序為
(A) 電壓，頻率，相序，相位 (B) 頻率，相序，相位，電壓
(C) 相序，相位，電壓，頻率 (D) 相序，頻率，電壓，相位。
- () 9. 同步發電機欲作並聯運轉時，利用兩明一滅法以檢查同步，若出現三燈輪流明滅時，下列條件何者錯誤？
(A) 相序相同 (B) 頻率一致
(C) 電壓一致 (D) 相位不同。

- () 10. 兩部同步發電機並聯運轉時，利用兩明一滅法檢查同步，若出現三燈皆滅，應該如何處理？
(A) 進行並聯運轉
(B) 將其中一台原動機反轉
(C) 將其中一機的三相接線均相互換位
(D) 增加原動機轉速。
- () 11. 利用林肯同步儀檢查發電機是否與系統同步，若是發生指針停在 11 點鐘方向不動，代表準備並聯發電機之
(A) 相位超前 (B) 相位落後 (C) 頻率太高 (D) 頻率太低。
- 10-3** () 12. 下列有關同步發電機之敘述，何者正確？
(A) 要改變輸出有效功率需調整激磁電流
(B) 要改變輸出無效功率需調整原動機轉速
(C) 發電機輸出功率增加時，其負載角會變大
(D) 激磁電流增加時，發電機輸出電壓會降低。
- () 13. 對一部與無窮母線並聯運轉之交流同步發電機，若只調整激磁電流大小，下列敘述何者正確？
(A) 可以改變發電機轉速 (B) 可以改變有效功率分配
(C) 可以維持恆定發電機轉速 (D) 可以改變無效功率分配。
- () 14. A 、 B 兩同步發電機並聯後，調高 A 機激磁，則下列敘述何者錯誤？
(A) A 機供應無效功率提高 (B) A 機供應電樞電流增加
(C) A 機功率因數減少 (D) A 機負載角變大。
- 10-4** () 15. 供電中的交流同步發電機，追逐現象發生於
(A) 滿載時 (B) 無載時 (C) 負載急劇變化時 (D) 起動瞬間。
- () 16. 交流同步發電機裝設阻尼繞組的目的是
(A) 幫助起動 (B) 防止追逐現象
(C) 抵消電樞反應 (D) 避免自激現象。

自我評量

二、問答與計算題

1. 說明同步發電機並聯運用的條件。
2. 說明整步電流發生的原因與特性為何？
3. 說明同步發電機負載分配的做法。
4. 有兩台容量均為 300 kVA 交流同步發電機並聯供應負載，1 號機之輸出功率 - 速率曲線由無載增至滿載 300 kW，頻率由 60.5 Hz 降至 59.5 Hz，2 號機之輸出功率 - 速率曲線由無載增至滿載 300 kW，頻率由 60.5 Hz 降至 59 Hz，則 (1) 負載為 450 kW 時，則各機分擔之負載及頻率為何？ (2) 當功率因數為 1 時，兩機所能提供的最大負載為何？

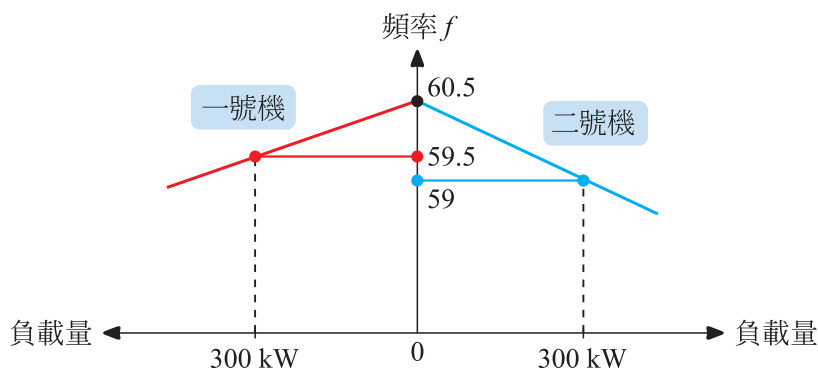
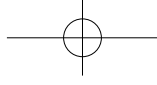


圖 (1)

5. 兩部同步發電機的數據如表 (1) 所示，且兩機之轉速 - 負載特性曲線為直線，試求當系統頻率為 50 Hz 時，兩機分擔的總負載為多少？

表 (1)

發電機	A	B
容量 (kW)	1500	4000
電壓 (V)	6600	6600
極數	2	16
無載轉速 (rpm)	3200	380
滿載轉速 (rpm)	2900	370



CHAPTER 11

同步電動機

» 本章重點

同步電動機與同步發電機的構造相同，可以互換使用，差別在於能量轉換不同而已，因此特性與等效電路性很類似。相較於感應電動機而言，同步電動機的起動過程雖然較為繁瑣，但是起動完成後，就能以同步轉速穩定旋轉，而且可以控制功率因數，是同步電動機的最大優勢。

11-1 同步電動機之原理及構造

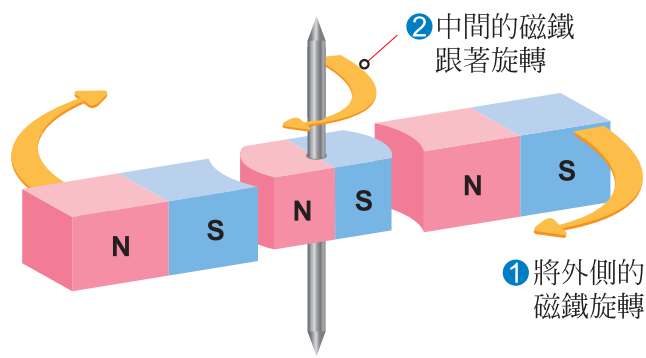
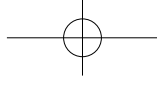
一、同步電動機之原理

同步電動機的基本動作原理如圖 11-1(a)，將一個永久磁鐵穿入轉軸後作為轉子，再將其兩側分別擺放磁鐵，並且處理成相互吸引的狀態。一旦外側磁鐵開始旋轉後，作為轉子的中央磁鐵受到吸引也會朝著相同方向以同樣速度旋轉。圖 11-1(b) 為其剖面圖，外殼上貼有異極性的磁鐵，將整個外殼旋轉時，中央的轉子也會被吸引著邊追隨、邊旋轉。

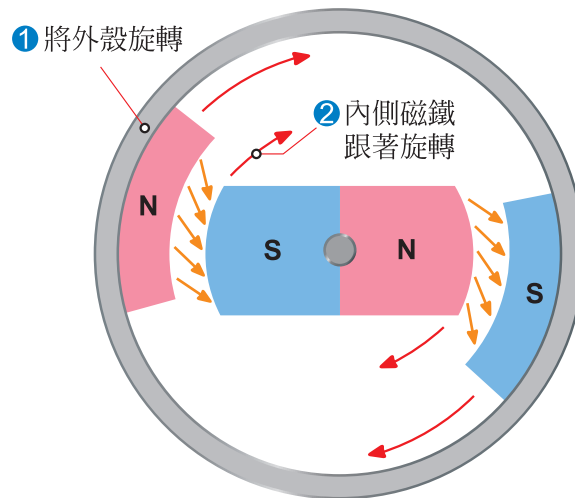
為了讓外側磁場產生旋轉現象，**三相同步電動機的定子設計與三相感應電動機完全相同**，如圖 11-1(c) 在定子鐵心槽內裝有三組相隔 120° 電機角的電樞繞組，將三組電樞繞組加入三相交流電源，定子立刻產生旋轉磁場並牽引轉子以同步轉速持續旋轉，即：

$$n_s = \frac{120f}{P} \text{ (rpm)} \quad (11-1)$$

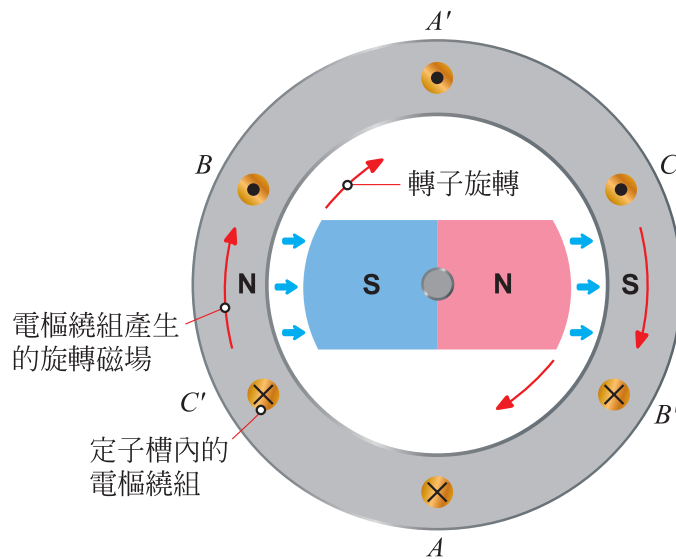
n_s ：同步轉速 (rpm) f ：頻率 (Hz) P ：磁極數 (極)



(a) 基本原理



(b) 剖面圖



(c) 定子繞組通電產生旋轉磁場
圖 11-1 同步電動機的动作原理

將電樞繞組通電後雖然可以產生旋轉磁場，但是當圖 11-2 的定子繞組外加 60 Hz 的三相電源時，繞組所產生的兩極磁場將立刻以 3600 rpm 的速度沿著鐵心旋轉，對於靜止中的轉子磁鐵而言，前方的定子磁場每秒變化 60 次，變化速度太快使得轉子無法跟上而在原地抖動。

因此同步電動機無法自行起動，必須依靠外力或是其他方法先幫助轉子開始旋轉，一旦轉子速度接近同步轉速時，轉子磁場才有機會與定子磁場相互吸引，讓轉子以同步轉速持續旋轉。

同步電動機起動完成後，才可以在轉軸端接上機械負載（如幫浦、送風機等），在額定負載下，同步電動機就能以同步轉速持續運轉；相較而言，三相感應電動機雖然可以自行起動，但是轉速會隨著負載增加而略微降低，是兩者間的重要區別。

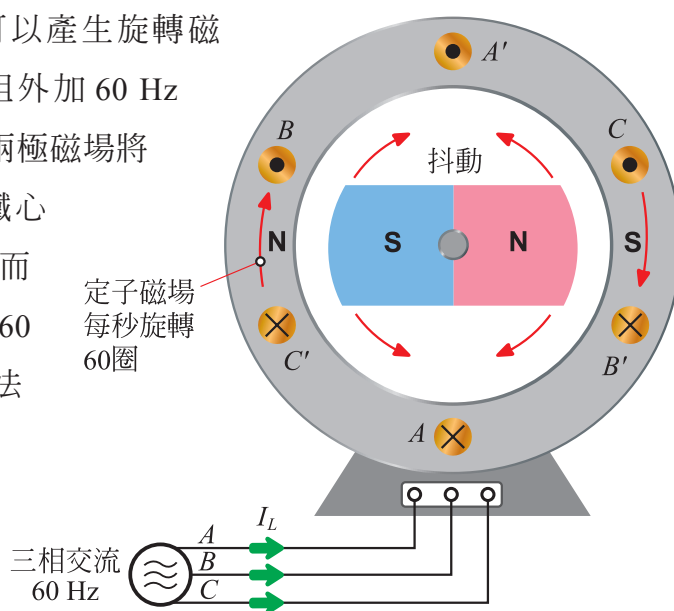


圖 11-2 起動時的轉子抖動

隨堂練習

- () 1. 有一部三相、2 極、60 Hz 同步電動機，有關轉速的敘述，何者正確？
- (A) 滿載轉速 < 無載轉速 < 3600 rpm (B) 滿載轉速 = 無載轉速 = 3600 rpm
- (C) 滿載轉速 < 無載轉速 < 1800 rpm (D) 滿載轉速 = 無載轉速 = 1800 rpm。
- () 2. 有一部三相、4 極、60 Hz 的感應電動機，有關轉速的敘述，何者正確？
- (A) 滿載轉速 < 無載轉速 < 3600 rpm (B) 滿載轉速 = 無載轉速 = 3600 rpm
- (C) 滿載轉速 < 無載轉速 < 1800 rpm (D) 滿載轉速 = 無載轉速 = 1800 rpm。

二、同步電動機之構造

同步電動機與同步發電機構造完全相同，圖 11-3 為其基本架構，包括：

1. 定子部分

裝有三組相隔 120° 電機角的電樞繞組，並以 Y 或 Δ 方式連接。當電樞繞組加入三相交流電源後，立刻產生旋轉磁場以同步轉速旋轉。

2. 轉子

除了極小型機使用永久磁鐵外。一般同步電動機的轉子會安裝磁場繞組，並透過滑環及電刷與外部直流電源連接。轉子依據外觀分為：

- (1) 圓極式轉子：只能產生電磁轉矩 (electro magnetic torque)，特殊高速型採用。
- (2) 凸極式轉子：除了電磁轉矩外，還有磁阻轉矩 (reluctance torque)，因此較為常用。同步電動機會在主磁極極面槽內裝置阻尼繞組，可以幫助起動與防止因負載變動所產生的追逐現象。

3. 滑環及電刷

將外部直流電引導至轉子磁場繞組。

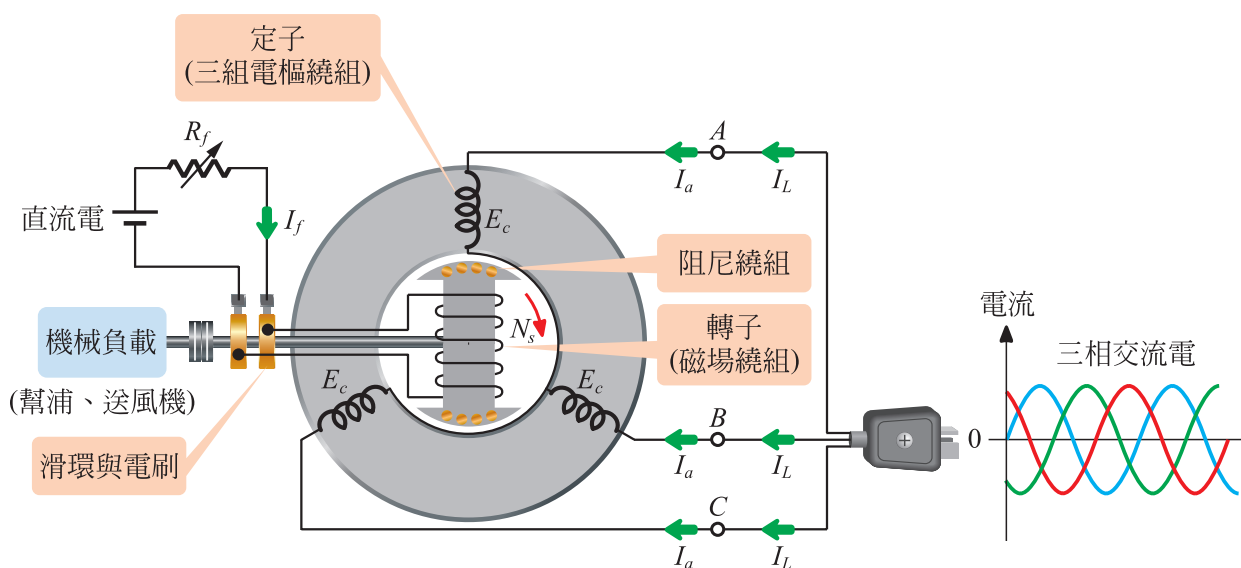


圖 11-3 三相同步電動機構造圖

隨堂練習

- () 1. 三相同步電動機與三相感應電動機相互比較，則下列敘述何者為正確？
- (A) 二者之構造完全一樣
- (B) 同步機之定子有旋轉磁場發生，而感應機則無
- (C) 同步機轉子必需用直流激磁，感應機無需直流激磁
- (D) 二者轉子速率均為同步速率。
- () 2. 三相同步電動機接於 25 Hz 之交流電源時，若以 250 rpm 轉速旋轉，試問該電動機的極數為多少？ (A)6 極 (B)8 極 (C)10 極 (D)12 極。

11-2 同步電動機之特性及等效電路

一、等效電路及相量圖

(一) 等效電路

同步電動機與同步發電機構造相同，因此等效電路也很接近，圖 11-4 為同步電動機其中一相的等效電路圖，電樞反應電抗 X_a 與漏磁電抗 X_ℓ 合稱為同步電抗 X_s ，即：

$$X_s = X_a + X_\ell \quad (11-2)$$

X_s ：同步電抗 (Ω)

X_a ：電樞反應電抗 (Ω)

X_ℓ ：漏磁電抗 (Ω)

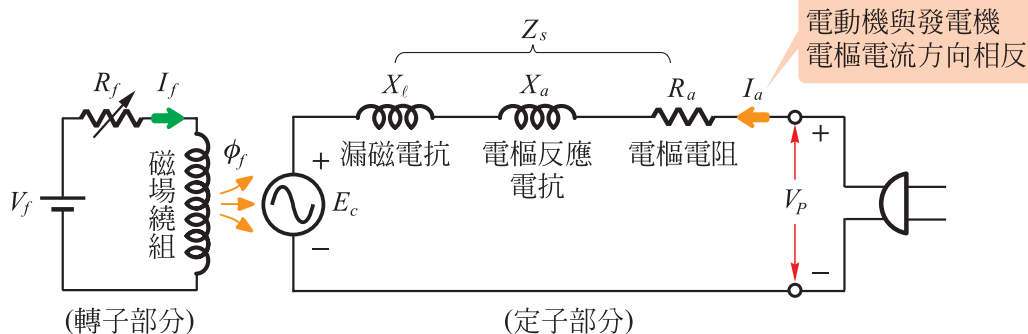
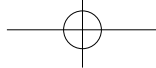


圖 11-4 同步電動機等效電路



將同步電抗 X_s 與電樞電阻 R_a 合計後，可得每相同步阻抗值 Z_s 為：

$$Z_s = \sqrt{R_a^2 + X_s^2} \quad (11-3)$$

Z_s ：同步阻抗 (Ω) R_a ：電樞繞組電阻 (Ω) X_s ：同步電抗 (Ω)

運轉中的同步電動機定子繞組受到磁場切割產生應電勢，由於應電勢與外加電壓方向相反，因此稱為反電勢 E_c ，其值等於端電壓減去同步阻抗壓降，即 $\bar{E}_c = \bar{V}_p - \bar{I}_a \bar{Z}_s$ 。

至於同步發電機的等效電路可參考圖 9-6，定子繞組受到轉子磁場切割產生應電勢 E_p 後，減去同步阻抗壓降才是端電壓 V_p ，即 $\bar{V}_p = \bar{E}_p - \bar{I}_a \bar{Z}_s$ ，兩者電樞電流方向不同，所造成的相量關係與特性也會有所不同。

(二) 相量圖

同步電動機的相量圖與同步發電機一樣，可以分為下列三種狀況說明：

1. 純電阻性負載 ($\cos\theta = 1$)

透過調整激磁電流，使得電樞電流 (I_a) 與端電壓 (V_p) 同相，此時的激磁電流稱為正常激磁 (normal excitation) 電流。依據圖 11-4 等效電路可得 $\bar{V}_p = \bar{E}_c + \bar{I}_a \bar{R}_a + \bar{I}_a \bar{X}_s$ ，相量關係如圖 11-5(a)，此時反電勢小於端電壓 ($E_c < V_p$)。

2. 電感性負載 ($\cos\theta < 1$ 落後)

當激磁電流低於正常激磁時稱為欠激磁 (under excitation)，此時電樞電流 (I_a) 落後端電壓 (V_p) 為 θ 度，相量關係如圖 11-5(b)。反電勢小於端電壓 ($E_c < V_p$)。

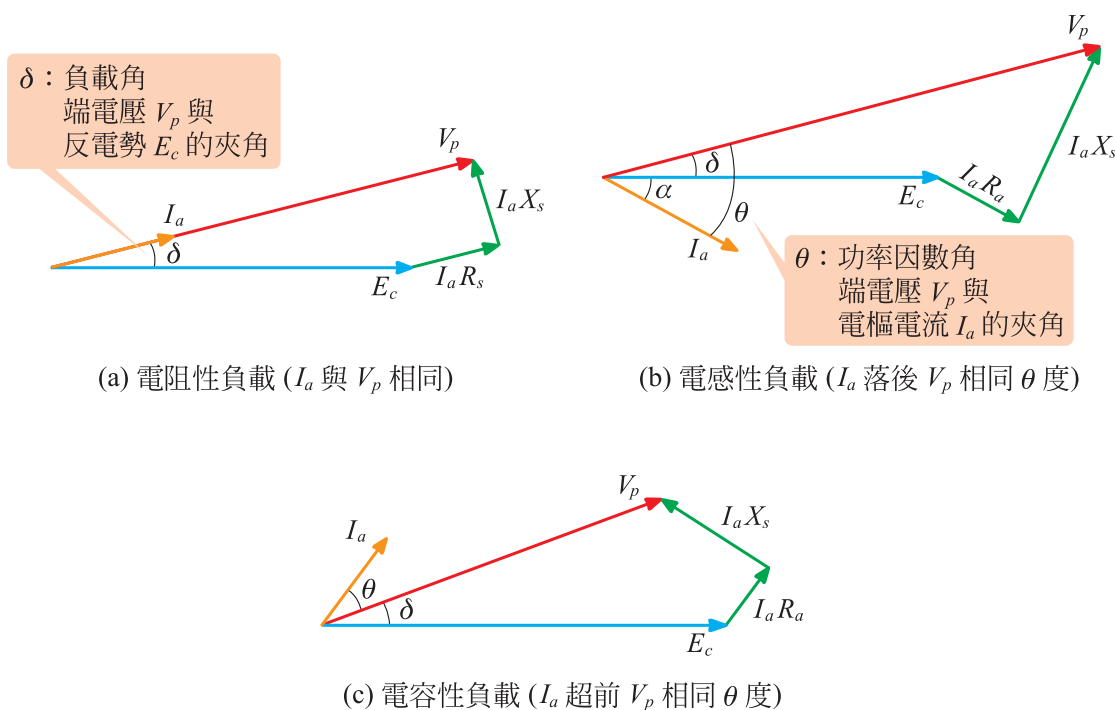


圖 11-5 不同負載類型的相量圖

3. 電容性負載 ($\cos\theta < 1$ 超前)

當激磁電流高於正常激磁時稱為過激磁 (over excitation)，此時電樞電流 (I_a) 超前端電壓 (V_p) 為 θ 度，相量關係如同圖 11-5(c)。反電勢可能大於端電壓 ($E_c > V_p$)。

將圖 11-5 的不同負載類型的相量圖依據畢氏定理計算後，可以求得同步電動機每相反電勢：

$$E_c = \sqrt{(V_p \cos\theta - I_a R_a)^2 + (V_p \sin\theta \mp I_a X_s)^2} \begin{cases} - : \text{電感性 } (\cos\theta \text{ 落後}) \\ + : \text{電容性 } (\cos\theta \text{ 超前}) \end{cases} \quad (11-4)$$

E_c : 每相反電勢 (V)

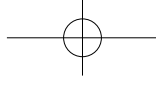
V_p : 每相端電壓 (V)

$\cos\theta$: 功率因數

I_a : 每相電樞電流 (A)

R_a : 每相電樞電阻 (Ω)

X_s : 每相同步電抗 (Ω)



範例

01

有一部三相 220 V，Y 接同步電動機，每相電樞電阻為 $0.3\ \Omega$ ，同步電抗為 $2.4\ \Omega$ ，當外加額定電壓時，測得電源電流為 10 A，功率因數為 0.8 落後時，求 (1) 每相端電壓、(2) 每相反電勢分別為何？

解 (1) 三相 Y 接線，每相端電壓 $V_p = \frac{V_L}{\sqrt{3}} = \frac{220\text{ V}}{\sqrt{3}} \doteq 127\text{ V}$

(2) 功率因數 $\cos\theta = 0.8$ 時， $\sin\theta = 0.6$

$$\begin{aligned} \text{每相反電勢 } E_c &= \sqrt{(V_p \cos\theta - I_a R_a)^2 + (V_p \sin\theta - I_a X_s)^2} \\ &= \sqrt{(127 \times 0.8 - 10 \times 0.3)^2 + (127 \times 0.6 - 10 \times 2.4)^2} \\ &= \sqrt{98.6^2 + 52.2^2} \doteq 111.6\text{ V} \end{aligned}$$

二、同步電動機之電樞反應

同步電動機起動完成後，當軸端機械負載增加，所需要的輸出功率變大，因此定子取用的電樞電流 I_a 變大，此時由電樞電流產生的電樞磁場 (ϕ_a) 會對轉子磁場 (ϕ_f) 造成干擾現象，稱為電樞反應。

同步電動機的電樞反應跟同步發電機一樣，會跟電樞電流的大小與相位有關。依據前一節所述，當調整同步電動機轉子激磁電流，會造成定子電樞電流 (I_a) 與端電壓 (V_p) 的相位發生變化，除了造成應電勢改變外，不同的功率因數也會造成產生不同的電樞反應：

1. 將激磁電流調至正常激磁時，同步電動機的電樞電流 (I_a) 與端電壓 (V_p) 同相，如圖 11-6(a) 電樞導體 A 產生逆時針之電樞磁通 (ϕ_a)，造成轉子磁極 (N) 的前端磁場增強、後端磁場減弱，磁通分佈發生偏移，稱為橫軸反應或交磁作用。
2. 激磁電流低於正常激磁 (欠激磁) 時，電樞電流 (I_a) 落後端電壓 (V_p)，當相位落後 90° 電機角時，如圖 11-6(b) 電樞反應為助磁現象；若是相位落後 $< 90^\circ$ 電機角，則電樞反應包含交磁與助磁現象。

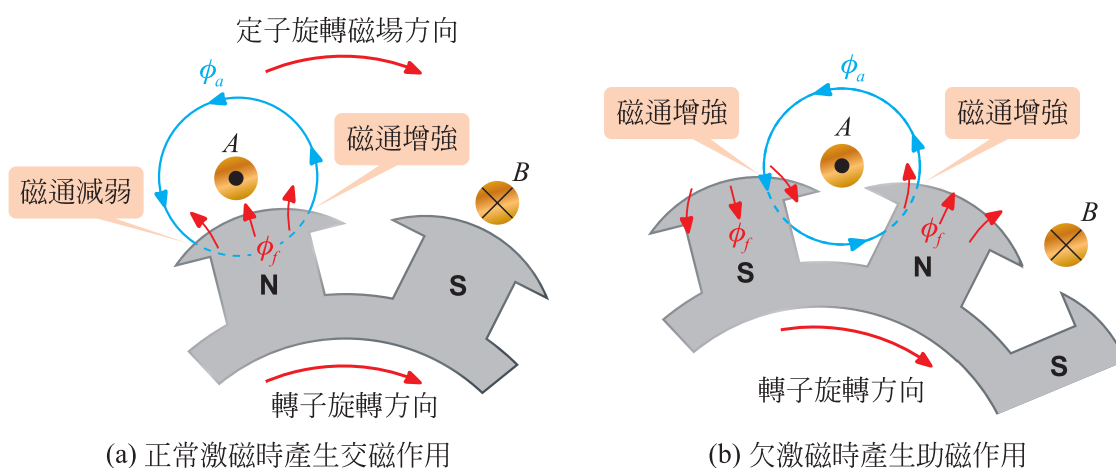


圖 11-6 同步電動機的電樞反應

3. 激磁電流高於正常激磁 (過激磁) 時，電樞電流 (I_a) 超前端電壓 (V_p)，當相位超前 90° 電機角時，如圖 11-6(c) 電樞反應為去磁現象；若是相位超前 $< 90^\circ$ 電機角，則電樞反應包含交磁與去磁現象。

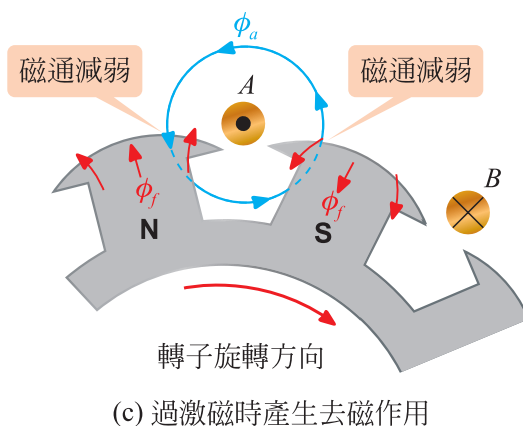


圖 11-6 同步電動機的電樞反應 (續)

隨堂練習

- () 1. 同步電動機，當過激磁時，該機對線路產生之現象是
(A) 取入超前電流 (B) 取入落後電流 (C) 取入同相電流 (D) 不取入電流。
- () 2. 一部三相同步電動機在正常激磁下工作，負載不變下，將電動機激磁電流調小，下列敘述何者錯誤？ (A) 稱為欠激磁 (B) 電流相位落後電壓 (C) 電樞反應產生交磁與助磁現象 (D) 功率因數變大。

三、同步電動機的激磁特性

爲了瞭解同步電動機轉子激磁電流變動時，所造成電樞電流及功率因數的變化，可如圖 11-7 接線後，進行激磁特性試驗。同步電動機先以無載方式起動完成後，將磁場電阻值 R_f 由最大值逐步降低，觀察轉子激磁電流 (I_f) 的變化對定子電樞電流 (I_a) 與功率因數 (P.F.) 造成的影響，將結果記錄後，再把機械負載適度增加，重複觀察儀表變化情形。

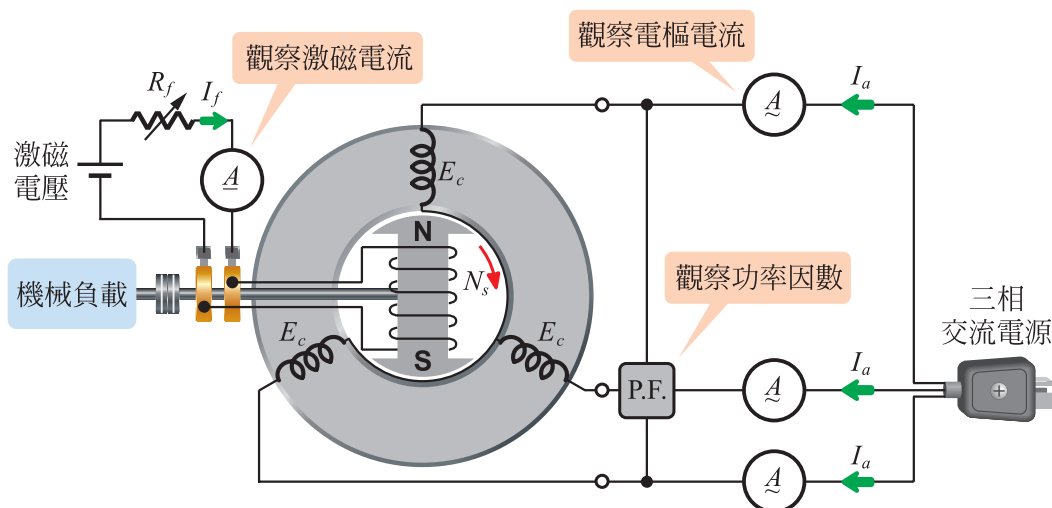


圖 11-7 同步電動機的激磁特性試驗

以直流激磁電流 (I_f) 為橫座標，交流電樞電流 (I_a) 為縱座標，將不同負載下的試驗結果分別畫出曲線後，其結果如圖 11-8 稱為**同步電動機的相位特性曲線**，由於形狀類似「V」字，因此又稱為**V 型特性曲線**。圖中不同的 V 字曲線代表不同的機械負載；**負載越重，電動機取用的電樞電流越大，因此曲線位置越高。**

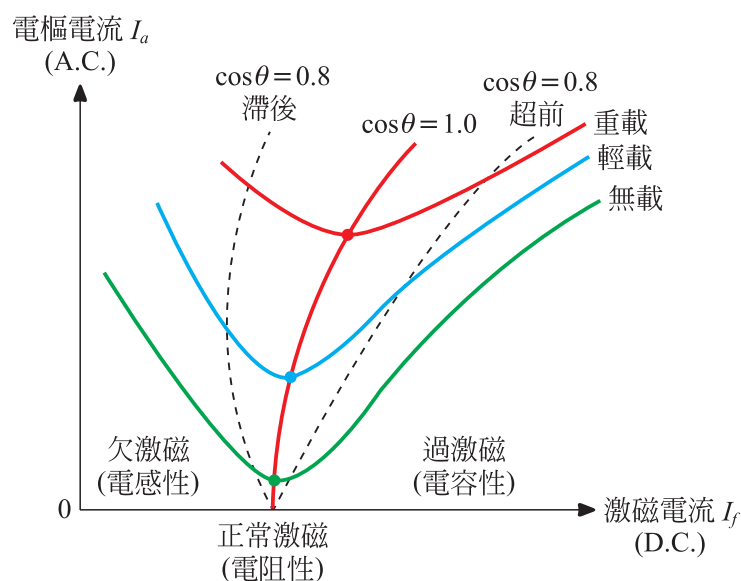
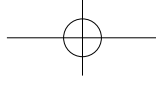


圖 11-8 同步電動機的 V 型特性曲線

由圖 11-8 的 V 型特性曲線可知，同步電動機在負載固定時，**當激磁電流很小時，電樞電流很大，功率因數很低，電流相位落後電壓。**將激磁電流逐漸增加，電樞電流逐漸減少，功率因數隨之增加。當激磁電流增加至某數值時，電樞電流減到最小，此時功率因數為 1。若將激磁電流繼續增加，電樞電流開始變大，功率因數變低，電流相位超前電壓。

激磁電流調整到電樞電流與端電壓同相時稱為正常激磁，此時電動機如同電阻性負載。若是激磁電流降低到欠激磁時，電樞電流落後端電壓，電動機如同電感性負載。反之若是將激磁電流增加到過激磁時，電樞電流超前端電壓，電動機如同電容性負載。換言之，**同步電動機可以藉由調整激磁電流呈現出不同的功率因數，相較於三相感應電動機屬於電感性負載，是兩者間的重要區別。**



對同步電動機而言，隨著負載增加，必須適度的增加激磁電流，以產生足夠的磁力牽引負載，才能維持功率因數不變。**因此當負載增加時，其相對應的 V 型曲線的位置會偏右上方而非垂直向上。**

依據 V 型曲線也可以計算出功率因數。在負載不變下，電動機向電源取用的電功率 $P_{in} = V_p I_a \cos\theta$ 為定值，隨著功率因數上升，電樞電流 (I_a) 成反比降低。因此：

$$\frac{\cos\theta_2}{\cos\theta_1} = \frac{I_{a1}}{I_{a2}} \quad (11-5)$$

$\cos\theta_1$ ：改變前功率因數

$\cos\theta_2$ ：改變後功率因數

I_{a1} ：改變前電樞電流

I_{a2} ：改變後電樞電流

隨堂練習

- () 1. 同步電動機當負載固定，激磁在欠激的情況之下，增加激磁電流，則電樞電流會
(A) 先降低後增加 (B) 先增加後降低 (C) 持續增加 (D) 不變。
- () 2. 對於同步電動機 V 型曲線之敘述，下列何者錯誤？
(A) 描述激磁電流和電樞電流之關係 (B) 負載越大，曲線位置愈高
(C) 負載不變時，電樞電流越小，功率因數越高 (D) 激磁電流越大，功率因數越高。
- () 3. 同步電動機若外加電壓及功率保持一定，在功率因數為 0.8 落後時之電樞電流為 8 A，當增加激磁電流，使得功率因數為 1，則此時的電樞電流應該為
(A) 4.8 A (B) 6.4 A (C) 8 A (D) 10 A。

四、同步電動機之功率與轉矩

電動機是將電能轉換成機械能的旋轉電機，如圖 11-9 為三相同步電動機的功率轉換情形：

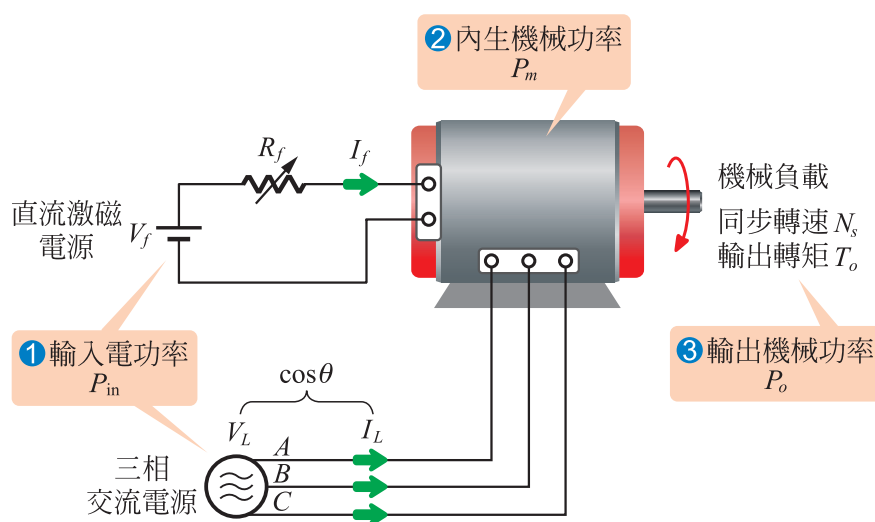


圖 11-9 同步電動機的功率分析

(一) 輸入功率

將圖 11-9 的三相同步電動機分別在定子加入三相交流電源，轉子加入直流電源，因此輸入電功率為兩者之和，但由於直流激磁所需功率比例很低，因此輸入功率可以簡化為：

$$P_{in} = \sqrt{3}V_L I_L \cos\theta = 3V_p I_a \cos\theta \quad (11-6)$$

P_{in} ：輸入功率 (W)

V_L ：線電壓 (V)

I_L ：線電流 (A)

$\cos\theta$ ：功率因數

V_p ：相電壓 (V)

I_a ：每相電樞電流 (A)

(二) 内生機械功率

圖 11-10(a) 為同步電動機每相等效電路圖，將每相輸入功率 (P_{in}) 減去每相電樞繞組銅損 ($I_a^2 R_a$) 後稱為每相内生機械功率 (P_m)，即：

$$P_m = V_p I_a \cos \theta - I_a^2 R_a = I_a (V_p \cos \theta - I_a R_a) \quad (11-7)$$

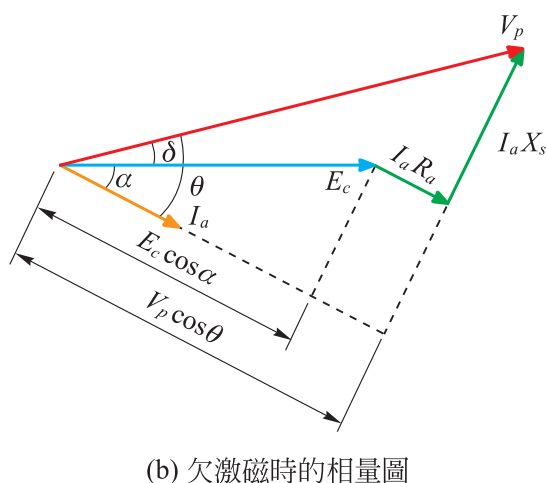
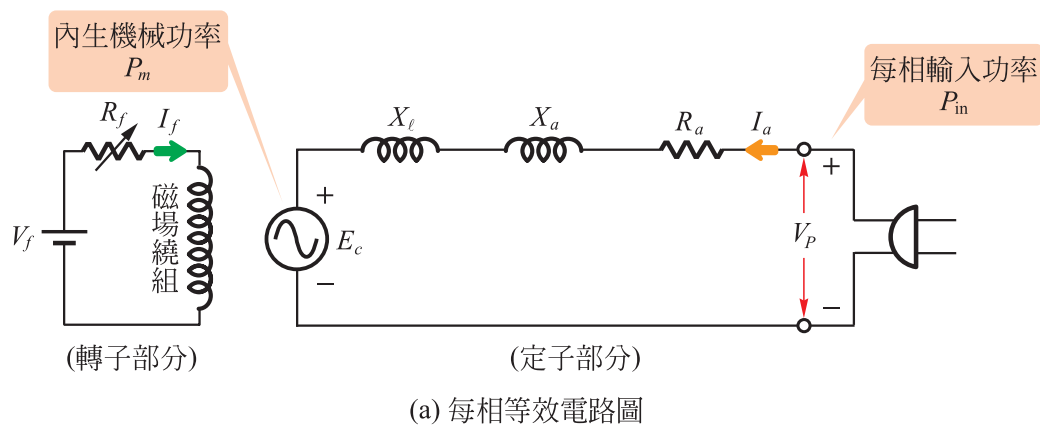


圖 11-10 等效電路圖與内生機械功率的關係

由圖 11-10(b) 可得 $V_p \cos \theta - I_a R_a = E_c \cos \alpha$ ，因此每相內生機械功率：

$$P_m = E_c I_a \cos \alpha \quad (11-8)$$

P_m ：內生機械功率 (W)

E_c ：每相反電勢 (V)

I_a ：每相電樞電流 (A)

α ：內相角 (E_c 與 I_a 的夾角)

對於同步電動機而言，同步電抗值遠大於電樞繞組電阻 ($X_s \gg R_a$)，忽略電樞電阻壓降後，圖 11-10(b) 的相量圖會簡化成如圖 11-11 所示。

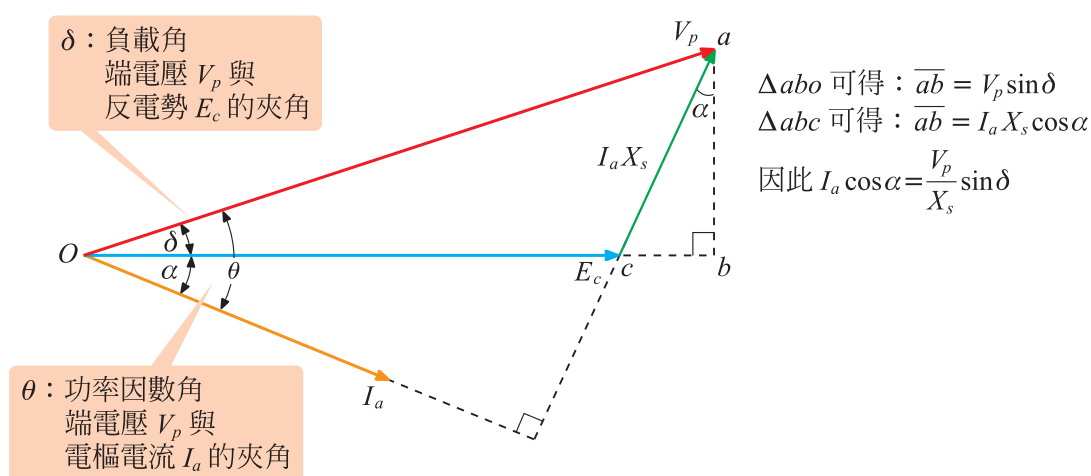
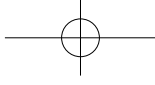


圖 11-11 忽略電樞電阻的相量圖

由圖 11-11 可得 $I_a \cos \alpha = \frac{V_p}{X_s} \sin \delta$ ，將其代入公式 11-8 可得同步電動機內生機械功率的另一種表示式為：

$$P_m = q \times \frac{V_p \times E_c}{X_s} \sin \delta \quad (11-9)$$



P_m ：內生機械功率 (W)

q ：相數 (三相 $q = 3$)

V_p ：相電壓 (V)

E_c ：每相反電勢 (V)

X_s ：每相同步電抗 (Ω)

δ ：負載角或轉矩角 (V_p 與 E_c 的夾角)

公式 11-9 中，同步電動機內生機械功率會與負載角 (δ) 的正弦函數成正比 ($P_m \propto \sin \delta$)，也就是說當負載增加時，反電勢落後相電壓的角度 δ 變大，電動機產生更大的機械功率因應負載所需，滿載時負載角 δ 約在 20° 左右，當負載角 $\delta = 90^\circ$ 時為最大內生機械功率。

範例

02

有一部三相 6 極 380 V、60 Hz、Y 接同步電動機，在額定電壓和額定頻率下運轉時，測得該電動機輸入線電流為 12 A，功率因數為 0.9 落後，已知每相同步電抗為 10Ω ，每相反電勢為 200 V 時，負載角為 30° ，求 (1) 轉子轉速、(2) 輸入功率、(3) 內生機械功率、(4) 最大內生機械功率分別為多少？

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

(2) 輸入功率 $P_{in} = \sqrt{3}V_L I_L \cos \theta = \sqrt{3} \times 380 \times 12 \times 0.9 = 7108 \text{ W}$

(3) Y 接，每相端電壓 $V_p = \frac{380 \text{ V}}{\sqrt{3}} = 220 \text{ V}$

$$\text{內生機械功率 } P_m = q \times \frac{V_p \times E_c}{X_s} \sin \delta = 3 \times \frac{220 \times 200}{10} \times \sin 30^\circ = 6600 \text{ W}$$

(4) $\delta = 90^\circ$ 時為最大內生機械功率，

$$\text{即 } P_{m(\max)} = 3 \times \frac{220 \times 200}{10} \times \sin 90^\circ = 13200 \text{ W}$$

(三) 輸出功率與轉矩

將同步電動機的內生機械功率 (P_m) 扣除鐵損與旋轉損後，就可以得到軸端輸出功率 (P_o)，倘若忽略相關損失，輸出功率近似於內生機械功率 ($P_o \div P_m$)。

因此同步電動機輸出轉矩為：

$$T_o = \frac{P_o}{\omega_s} = \frac{P_m}{\omega_s} = \frac{P_m}{\frac{2\pi \times n_s}{60}} = \frac{60P_m}{2\pi n_s} \quad (11-10)$$

T_o ：輸出轉矩 (N-m)

P_o ：輸出機械功率 (W)

P_m ：內生機械功率 (W)

ω_s ：同步角速度 (rad/sec)

n_s ：同步轉速 (rpm)

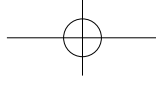
將公式 11-9 與公式 11-10 合併後，可得輸出轉矩：

$$T_o = \frac{60}{2\pi n_s} \times q \times \frac{V_p \times E_c}{X_s} \sin \delta \quad (11-11)$$

上式中，同步電動機的輸出轉矩與負載角 δ 的正弦函數成正比，即 $T_o \propto \sin \delta$ ，故 δ 也被稱為轉矩角。

以圖 11-12(a) 所示，同步電動機軸端沒有負載時，所需的轉矩很小，轉子磁極與定子旋轉磁場幾乎重疊在一直線 ($\delta = 0^\circ$) 以同步轉速旋轉。當軸端機械負載增加時，轉子轉速瞬間減慢，圖 11-12(b) 的轉子磁極落後定子旋轉磁場一些角度 (負載角 δ_1) 仍以同步轉速持續旋轉。隨著軸端負載增加，負載角也持續增加 (δ_2)。倘若軸端機械負載增加到超過電動機所能產生的最大轉矩 ($\delta = 90^\circ$) 時，轉矩反而減少，電動機無法運轉而停下來，稱之為脫調 (out-synchronous)，此時的轉矩就稱為脫出轉矩。實際運用時由於損失的影響，脫出轉矩大約發生在負載角為 $50^\circ \sim 70^\circ$ 之間。

同步電動機負載角隨著機械負載產生的增減變化，就如同利用橡皮筋拖行物體時，當物體變重時，瞬間移動速度變慢使得橡皮筋角度變長些，而後物體



又以同樣速度持續移動；當物體變輕時，瞬間移動速度變快使得橡皮筋角度變短些，而後又以同樣速度移動；但若物體超過橡皮筋負荷發生斷裂時，就無法繼續運作。

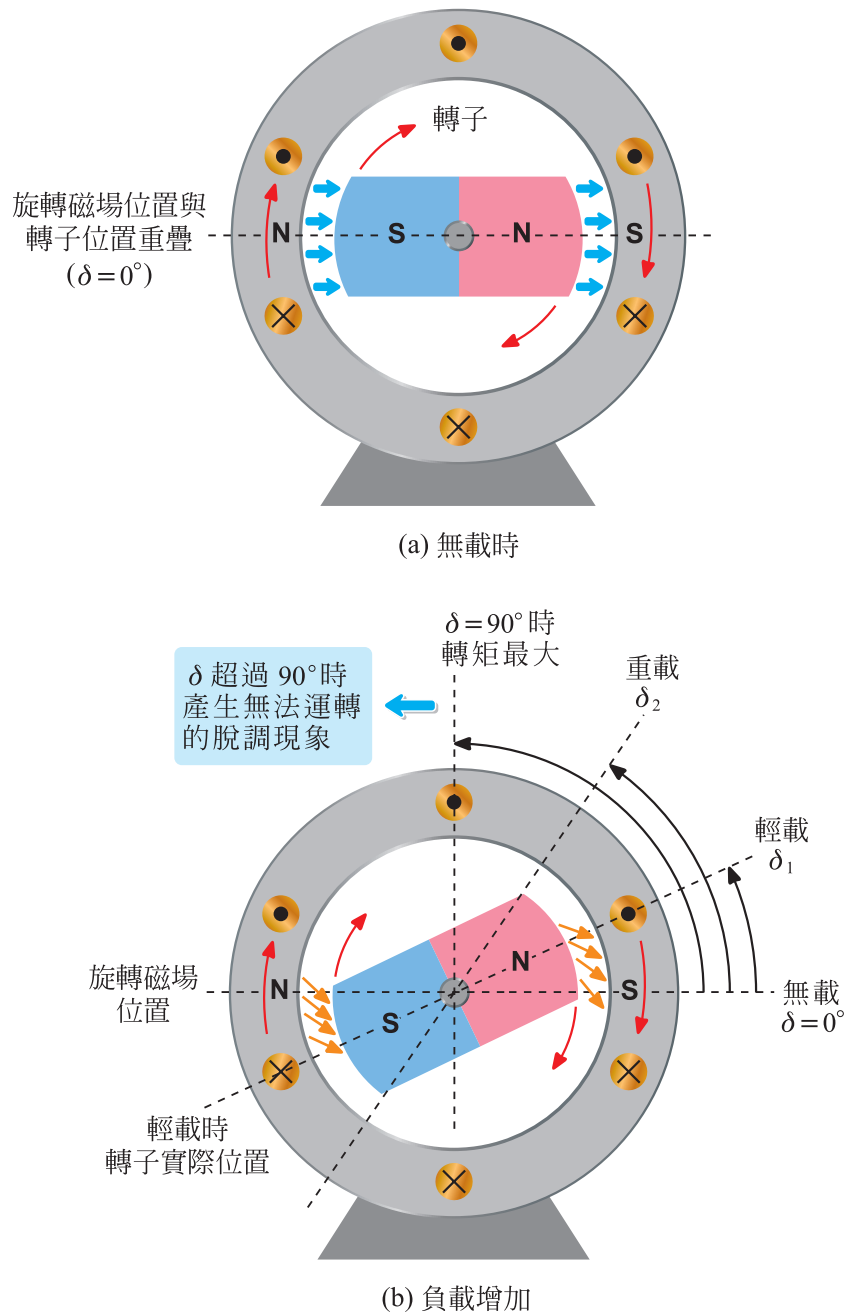


圖 11-12 負載與負載角的關係

範例

03

有一部三相 4 極、220 V、60 Hz、 Δ 接線之同步電動機，每相同步電抗為 $5\ \Omega$ ，電樞電阻忽略不計，已知每相反電勢為 200 V，求此機 (1) 轉子轉速、(2) 最大內生機械功率、(3) 最大轉矩分別為何？

解 (1) 轉子轉速 $n_s = \frac{120f}{P} = \frac{120 \times 60}{4} = 1800\ \text{rpm}$

(2) Δ 接線，每相端電壓 $V_p = V_L = 220\ \text{V}$

最大內生機械功率：

$$P_{m(\max)} = q \times \frac{V_p \times E_c}{X_s} \sin \delta = 3 \times \frac{220 \times 200}{5} \times \sin 90^\circ = 26400\ \text{W}$$

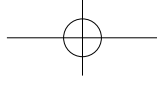
(3) 最大轉矩 $T_{\max} = \frac{60P_{m(\max)}}{2\pi n_s} = \frac{60 \times 26400}{2\pi \times 1800} = 140.1\ \text{N}\cdot\text{m}$

隨堂練習

- () 1. 有關於三相同步電動機的輸出功率，下列敘述何者錯誤？
- (A) 輸出功率與 $\cos \delta$ 成正比 (B) 輸出功率與線電壓成正比
- (C) 輸出功率與應電勢成正比 (D) 輸出功率與同步電抗成反比。
- () 2. 同步電動機於負載試驗時，若增加其負載，則
- (A) 轉速增加 (B) 轉速減小
- (C) 轉速不變但轉矩角增加 (D) 轉速不變但轉矩角減小。

五、同步電動機的追逐現象

圖 11-13 為一部運轉中的同步電動機，轉子磁極與定子旋轉磁場間保持轉矩角 (δ_1) 持續運轉，若軸端機械負載增加或是電源電壓、頻率突然變動時，轉子轉速瞬間改變使得轉矩角調整到新的位置 (δ_2)。但是改變過程中，受到轉子或負載的慣性作用，會以新的轉矩角 (δ_2) 為中心，產生往復振動數次的現象，就稱為追逐 (hunting) 現象。



追逐現象除了造成轉軸在同步轉速附近發生忽快忽慢的震動現象，電樞電流也會發生劇烈變動，一般而言追逐現象很快就能穩定下來，但若是振動過於劇烈而超過脫出轉矩，電動機將無法繼續運轉。

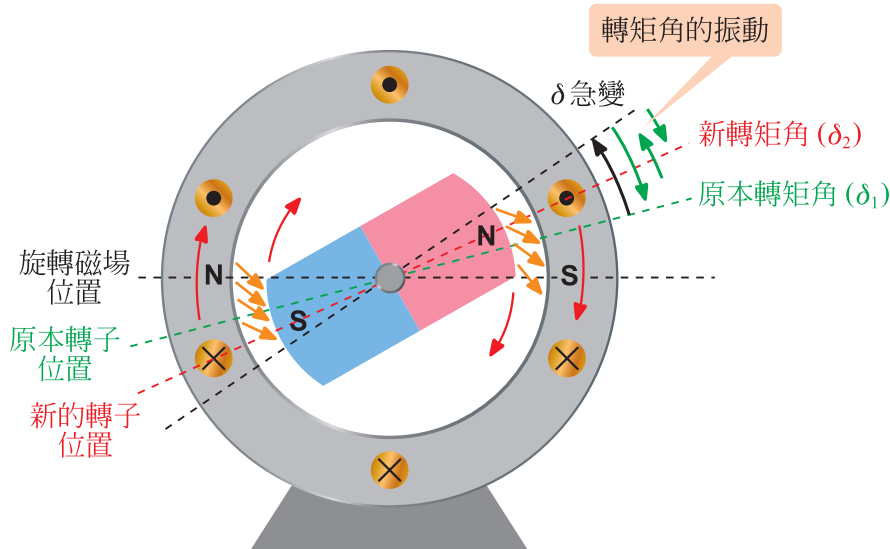


圖 11-13 追逐現象

同步電動機跟同步發電機一樣會在磁極面上裝置阻尼繞組，當負載變動造成轉速不為同步時，阻尼繞組產生適當作用力以抑制追逐現象；此外阻尼繞組還可以幫助同步電動機進行起動。另外在轉軸上加裝大型飛輪，藉由旋轉時產生的慣性作用，也可以抑制追逐現象。

隨堂練習

- () 1. 有關同步電動機裝設阻尼繞組之敘述，下列何者錯誤？
- (A) 同步電動機可藉阻尼繞組之作用而自行起動
 - (B) 阻尼繞組可使轉子因負載變動而快速趨於穩定運轉
 - (C) 負載變大使轉子減速時，阻尼繞組會發揮電動機之作用使同步機加速
 - (D) 阻尼繞組在同步運轉時，可提升功率因數。

11-3 同步電動機之起動法

同步電動機定子電樞繞組通電後產生的旋轉磁場，對於靜止中的轉子而言，前方旋轉磁場速度太快，使得轉子無法自行起動，爲了讓同步電動機順利起動，可以透過下列方式：

一、利用阻尼繞組起動

如圖 11-14 在同步電動機轉子磁極面上安裝阻尼繞組，其構造及原理與鼠籠式轉子相似，藉由感應電動機的原理，使轉子能夠自行起動。

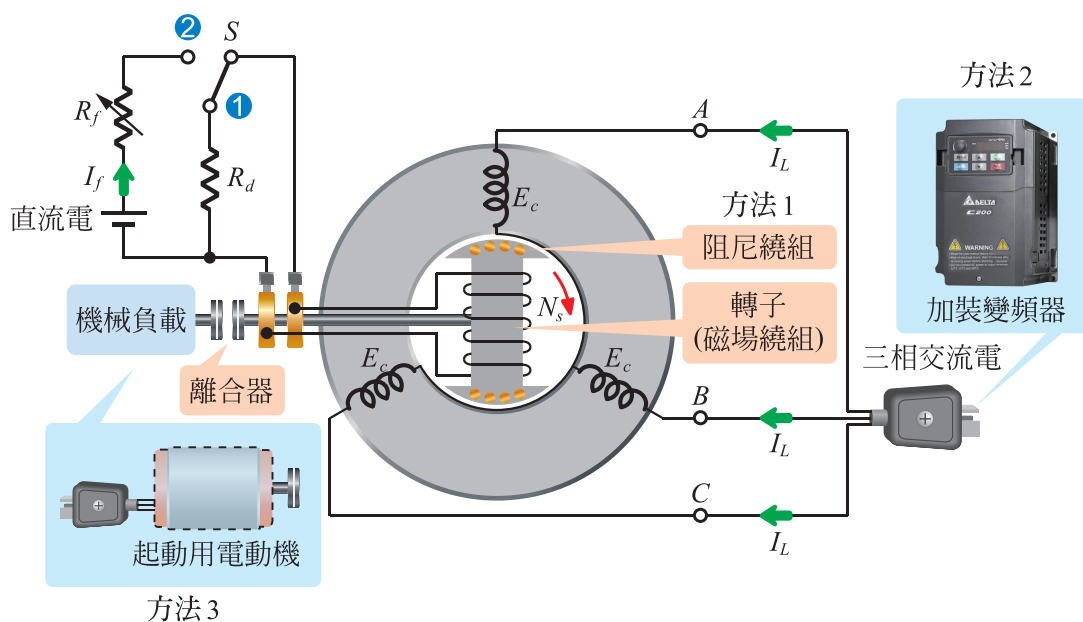
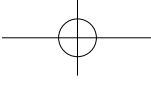


圖 11-14 同步電動機之各式起動法
(變頻器圖片來源：台達電子)



同步電動機利用阻尼繞組起動步驟為：

1. 利用離合器將軸端機械負載切離，讓同步電動機以無載方式準備起動。
2. 切換開關 S 切至 ❶ 號位置，將轉子磁場繞組與外部放電電阻 R_d 連接，讓起動期間磁場繞組受到定子旋轉磁場切割產生的高壓，經由電阻 R_d 放電，以免破壞轉子磁場繞組的絕緣。
3. 定子加入三相交流電後產生旋轉磁場，轉子磁極面的阻尼繞組受到磁場切割感應渦流，產生轉矩帶動轉子開始加速旋轉。
4. 當轉子轉速上升到接近同步轉速時（約 95 % 以上），將切換開關 S 切至 ❷ 號位置，直流激磁電流 (I_f) 進入磁場繞組，使得轉子產生固定磁極，並與定子旋轉磁場相吸，轉子以同步轉速持續運轉。
5. 利用離合器將機械負載與轉軸連接，電動機輸出轉矩提供負載使用。

同步電動機在起動過程中，轉速還未接近同步轉速時，磁場繞組絕對不可以加入直流激磁，否則定子電樞繞組被轉子磁場切割感應產生由低而高的特殊頻率電壓，會使得電源系統陷於混亂；而轉子磁場繞組被定子旋轉磁場切割產生高壓，容易損壞。

二、降低電源頻率起動法

如圖 11-14 在交流電源前加裝變頻器，透過變頻器先將電源頻率調低，使定子產生低速的旋轉磁場，轉子磁場繞組直接以直流激磁，當轉子磁極與定子低速旋轉磁場互相吸引後，再將變頻器的輸出頻率逐步提升至額定頻率，轉子就能跟著以同步轉速旋轉。

三、以他機帶動起動法

如圖 11-14 在離合器處安裝一台起動用電動機，先將這台電動機通電帶動同步電動機的轉子轉速接近同步轉速，之後將起動用電動機移開，再將同步電動機定子所需的三相交流電與轉子所需的直流電依序接上，完成起動過程。

如果利用感應電動機作為起動用電動機，**感應機的極數要比同步電動機少 2 極**，如此才能有足夠的轉速，帶動同步電動機的轉子上升到同步轉速。

隨堂練習

- () 1. 下列有關三相同步電動機起動之敘述，何者正確？
- (A) 串接起動電阻起動 (B) 降低電源電壓起動
- (C) 利用阻尼繞組之感應起動 (D) 直接送入場電流起動。
- () 2. 同步電動機在起動過程中，其轉子磁場繞組應先
- (A) 與阻尼繞組連接 (B) 加直流激磁 (C) 加交流激磁 (D) 經放電電阻短路。

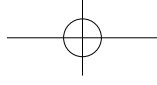
11-4 同步電動機之運用

一、同步電動機與感應電動機的比較

對於三相用戶而言，可以選用三相同步電動機或是三相感應電動機作為動力來源，表 11-1 為兩種電動機的特性比較：

表 11-1 三相同步電動機與三相感應電動機的比較

項目	三相同步電動機	三相感應電動機
定子構造	三相繞組	三相繞組
轉子構造	磁場繞組	鼠籠式或繞線式
使用電源	三相交流電、直流電	三相交流電
起動能力	無法自行起動	可以自行起動
旋轉速率	同步轉速 n_s	轉子轉速 $n_r = (1 - S)n_s$
負載增加	轉速不變、轉矩角改變	轉差率增加、轉速降低
功率因數	可以調整	落後
空氣隙	寬	窄
特點	複雜、價格高	價廉堅固、耐用



二、同步電動機的運用場所

同步電動機起動過程比較繁複、又需要交流與直流電源，因此不適合用起動、停止頻繁的處所。但是同步電動機一旦起動完成後，無論負載輕重都能以同步轉速持續運轉，又可以調整激磁電流來控制功率因數，主要運用場所為：

1. 帶動定速的機械負載

如水泥廠之研磨、粉碎機、紙漿滾壓機、空氣壓縮機、鼓風機等。

2. 提高線路功率因數

將同步電動機的轉子激磁電流 (I_f) 調整到過激磁時，定子的電樞電流 (I_a) 相位會超前端電壓 (V_p)，同步電動機向電源取用進相電流，其功用與電容器相同，可以提升線路功率因數，因此又被稱為同步調相機或旋轉電容器 (rotatory condenser)。

假設負載 P 不變下，要將線路功率因數由改善前的 $\cos\theta_1$ 提升到改善後的 $\cos\theta_2$ ，則同步調相機所需的容量為：

$$Q_c = P \times \left(\frac{\sin\theta_1}{\cos\theta_1} - \frac{\sin\theta_2}{\cos\theta_2} \right) = P \times (\tan\theta_1 - \tan\theta_2) \quad (11-12)$$

Q_c ：同步調相機吸收虛功率 (var)

P ：負載實功率 (W)

$\cos\theta_1$ ：改善前功率因數

$\cos\theta_2$ ：改善後功率因數

3. 調整線路電壓

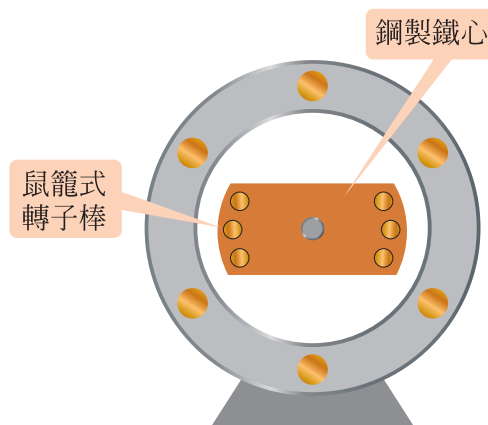
大多數的用電設備屬於電感性負載，因此可以在輸電線路的受電端（例如一次變電所內）安裝同步電動機。當負載增加時，將同步電動機的激磁電流 (I_f) 增加，讓電動機產生電容器作用，以提升功率因數，減少線路電流，使受電端電壓維持穩定；而當負載減少時，再將激磁電流 (I_f) 降低。

4. 計時器、唱盤、磁帶之驅動器

小型同步電動機的定子採用單相交流電源，以蔽極式或單相電容式產生旋轉磁場。依照轉子構造分為：

(1) 磁阻式轉子 (reluctance rotor)：

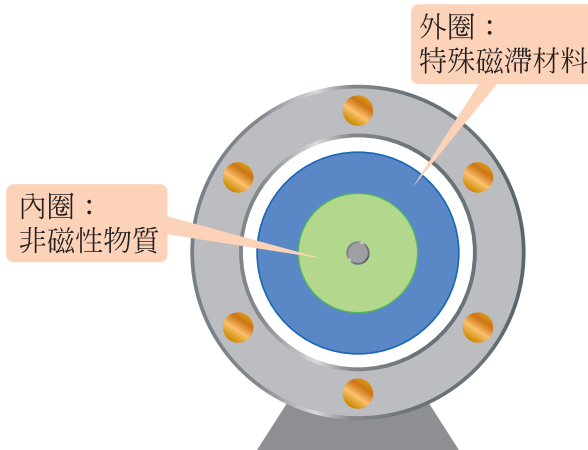
圖 11-15(a) 為其構造，轉子沒有繞線，只在極面上加裝鼠籠式的導體棒。定子通電後產生的旋轉磁場牽引轉子接近同步轉速時，轉子磁極產生的磁阻轉矩與定子旋轉磁場互鎖，而以同步轉速運轉。



(a) 磁阻式轉子

(2) 雙金屬轉子 (bimetallic rotor)：

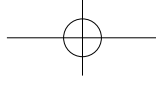
又稱為磁滯式轉子，構造如圖 11-15(b)，轉子內圈為非磁性物質，外圈加上特殊磁性物質（具有高保磁係數鋼）製成。由於鋼片的磁滯特性，使得轉子磁通較定子磁通落後，因而產生磁滯轉矩，使轉子能以同步轉速運轉。



(b) 磁滯式轉子

圖 11-15 小型同步電動機

磁滯式轉子的轉矩雖然較磁阻式轉子低，但是轉矩大小與相位都很穩定，多用於唱盤、計時器等小功率的定速驅動場所。



三、同步電動機的控制

三相同步電動機的轉子轉速等於同步轉速，只要透過變頻器改變電源頻率，就可以控制旋轉速度。至於轉向控制與三相感應電動機相同，在轉子靜止時，將三條電源線中的其中兩條對調，再依起動步驟重新起動即可反轉。

範例

04

某工廠之負載功率為 100 kW，功率因數為 0.6 落後，今擬裝置同步調相機，將功率因數提高至 0.8，且負載功率維持不變，則所需調相機之容量為多少？

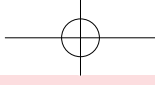
解 $Q = P \times \left(\frac{\sin \theta_1}{\cos \theta_1} - \frac{\sin \theta_2}{\cos \theta_2} \right) = 100 \left(\frac{0.8}{0.6} - \frac{0.6}{0.8} \right) = 58.3 \text{ kVAR}$

隨堂練習

- () 1. 要將同步電動機做為同步調相機使用以改善功率因數，則磁場變阻器電阻值應
- (A) 保持不變
 - (B) 調低到過激狀況
 - (C) 調至正常激磁狀況
 - (D) 調高到欠激狀況。
- () 2. 下列何者為三相同步電動機轉速控制的主要方法？
- (A) 調整電源頻率
 - (B) 調整激磁電流量
 - (C) 轉子繞組外加可變電阻
 - (D) 改變極數。

一、選擇題

- 11-1** () 1. 中、大型同步電動機於正常運轉中
- (A) 定子加交流，轉子加直流 (B) 定子加直流，轉子加交流
- (C) 定子、轉子皆加交流 (D) 定子、轉子皆加直流。
- () 2. 同步電動機起動實驗時，轉子線圈最好如何？
- (A) 經放電電阻短路 (B) 加直流激磁
- (C) 加交流激磁 (D) 降低匝數。
- () 3. 有關三相同步電動機的特性，下列敘述何者正確？
- (A) 機械負載在額定範圍內增加，轉速會降低
- (B) 機械負載在額定範圍內增加，轉速維持不變
- (C) 激磁電流在額定範圍內增加，轉速會升高
- (D) 激磁電流在額定範圍內增加，轉速會降低。
- 11-2** () 4. 同步電動機在不超過額定負載的條件下，當其負載愈大時，而轉速與負載角的變化為何？
- (A) 轉速不變、負載角增加 (B) 轉速不變、負載角降低
- (C) 轉速降低、負載角增加 (D) 轉速降低、負載角降低。
- () 5. 同步電動機在固定負載下，調整直流激磁電流的主要目的為何？
- (A) 調整功率因數 (B) 調整轉矩
- (C) 調整轉差率 (D) 調整頻率。
- () 6. 同步電動機在轉子凸極磁場之磁極面上裝設短路繞組，其功效在
- (A) 僅產生制動作用
- (B) 僅產生起動作用
- (C) 僅產生防止追逐作用
- (D) 起動時有起動作用，同步迴轉時無作用，速度變動時可防止追逐作用。



自我評量

- () 7. 某 12 極、440 V、60 Hz 三相 Y 接同步電動機，若每相輸出功率為 4 kW，則該機總轉矩為多少？
(A) $\frac{200}{\pi}$ N-m (B) $\frac{600}{\pi}$ N-m (C) 200 N-m (D) 600 N-m。
- () 8. 關於同步電動機之功率因數，下列敘述哪一項最正確？
(A) 功率因數恆為超前
(B) 功率因數恆為落後
(C) 功率因數可為超前或落後，視負載之輕重而定
(D) 功率因數可為超前或落後，視場電流及負載之輕重而定。
- () 9. 一部三相同步電動機在正常激磁下工作，負載固定不變，將電動機的激磁電流調小，則下列敘述何者錯誤？
(A) 電樞電流變大 (B) 功率因數變大
(C) 功率因數為落後 (D) 轉速不變。
- () 10. 下列有關同步電動機特性之敘述，何者正確？
(A) 欠激時電樞電流超前端電壓
(B) 過激時電動機相當於一電感性負載
(C) V 型曲線中各曲線最低點時電動機之功率因數為落後
(D) V 型曲線為電樞電流與激磁電流的關係。
- () 11. 由同步電動機之 V 型曲線可知，在同步電動機之外加電壓及負載固定不變下，激磁電流由小變大，此時同步電動機之敘述何者正確？
(A) 功率因數之變化先增後減
(B) 同步電動機之負載特性從電容性、電阻性變化到電感性
(C) 電樞電流之變化先增後減
(D) 同步電動機之激磁特性變化從過激磁狀態、正常激磁狀態到欠激磁狀態。

- () 12. 如圖 (1) 所示為一部三相同步電動機的倒 V 特性曲線，若在功因為 1 時，保持激磁電流不變，此時將電動機負載增加，則下列敘述何者正確？

(A) 功因變超前 (B) 功因變落後
(C) 功因不變 (D) 功因能變超前或落後。

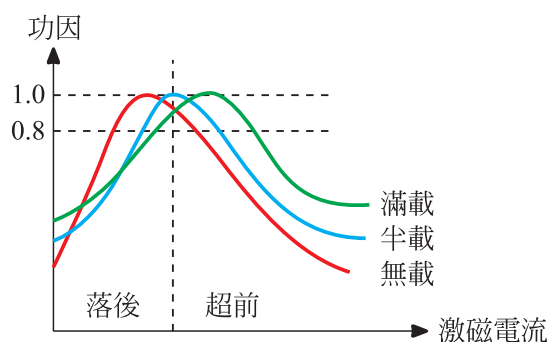


圖 (1)

- () 13. 同步電動機若外加電壓及功率保持一定，在功率因數為 0.8 落後時之電樞電流 8 A，現增加激磁電流，使得電樞電流 12.8 A，此時之功率因數應為

(A) 0.5 超前 (B) 0.625 超前 (C) 0.781 超前 (D) 1。

- 11-4** () 14. 同步電動機可當進相電容用，其作法為

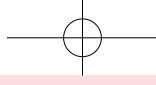
(A) 調整其磁場使之過激磁 (B) 調整其磁場使之正常激磁
(C) 調整其磁場使欠激磁 (D) 將其反轉。

- () 15. 某工廠之負載功率為 400 kW，功率因數為 0.8 落後，今擬裝置同步調相機，將功率因數提高至 1.0，且負載功率維持不變，則所需調相機之容量為多少？

(A) 100 kVAR (B) 200 kVAR (C) 300 kVAR (D) 400 kVAR。

- () 16. 下列哪一種單相電動機，可以在負載下以同步轉速運轉？

(A) 感應電動機 (B) 磁滯電動機
(C) 蔽極電動機 (D) 電容式電動機。



自我評量

二、計算題

1. 有一部三相 Y 接同步電動機，其標示為 20 極、220 VAC、50 Hz、4 hp、滿載時測得線電流 10 A，功率因數為 0.9。請問此時 (1) 轉子轉速、(2) 輸出功率、(3) 輸出轉矩、(4) 輸入功率、(5) 效率分別為多少？
2. 三相 220 V、6 極、60 Hz、Y 接同步電動機，若同步電抗為 $10\ \Omega$ ，電樞電阻忽略不計，滿載時每相反電勢為 120 V，轉子比同步位置落後 20° 機械角，則其 (1) 轉子轉速、(2) 滿載輸出功率、(3) 滿載轉矩、(4) 最大輸出功率、(5) 脫出轉矩分別為？
3. 某工廠每小時平均耗電量為 400 kW-hr，無效電度為 500 kVAR-hr，相同負載下，欲將功率因數提高為 0.8，則應該裝置的同步調相機容量為何？

第七章

1. 以同步轉速持續運轉的交流發電機稱為同步發電機，轉速為

$$n_s = \frac{120f}{P} (\text{rpm})。$$
2. 三相同步發電機電樞鐵心內裝置三組電樞繞組，互隔 120° 電機角。繞組以 Y 或 Δ 方式連接。當轉子磁極以同步轉速切割電樞繞組時，繞組產生相同頻率、相位互隔 120° 電機角的三相感應電勢。
3. 同步發電機常採用短節距繞組，節省用銅量及電感量，也可以改善波形。
4. 短節距繞組之應電勢值較全節距低，兩者比例稱為節距因數，其值為

$$K_p = \frac{\text{實際線圈應電勢}}{\text{全極距線圈應電勢}} = \sin \frac{\beta\pi}{2}$$
5. 分佈繞組之應電勢值會比集中繞組低，兩者比例稱為分佈因數，其值為

$$K_d = \frac{\text{分佈繞應電勢}}{\text{集中繞應電勢}} = \frac{\sin \frac{m\alpha}{2}}{m \sin \frac{\alpha}{2}}。$$
6. 同步發電機大多採用可改善波形之短節距、分佈繞組，因此每相繞組感應電勢有效值為 $E_{eff} = 4.44 fN\phi_m K_p K_d$ 。
7. 同步機發電機的轉子依據形狀分為：

轉子形狀	特 徵	適用場合
凸極式轉子	直徑大、轉軸短，風阻較大	磁極數多，以低速運轉的水力發電機
圓極式轉子	直徑小、轉軸長，風阻較小	磁極數少，以高速運轉的火力發電機

第八章

8. 同步發電機依據轉子構造分成：
 - (1) 旋轉電樞式：負責發電的電樞繞組放在轉子由外力旋轉，負責提供磁通的磁場繞組置於定子，用於低壓、小容量的小型機種。

單元摘要

- (2) 旋轉磁場式：負責提供磁通的磁場繞組置於轉子由外力旋轉，負責發電的電樞繞組置於定子直接輸出，用於高壓、大容量機種。
9. 同步發電機依據外力來源分成：
- (1) 水輪式發電機：以垂直裝置。適用水力發電廠使用，由於轉速低，發電機安裝的磁極數多，因此轉軸設計為長度短、直徑大，磁極採用凸極式
- (2) 汽輪式發電機：以水平裝置。適用力火與核能發電廠，由於轉速高，發電機安裝的磁極數少，轉軸為細長型、直徑小，磁極採用圓極式。

第九章

10. 同步發電機無載時，電樞電流 $I_a = 0$ ，可視為無電樞反應。
11. 同步發電機的同步阻抗等於電樞繞組電阻與同步電抗之向量和，即：
- $$Z_s = \sqrt{R_a^2 + X_s^2}$$
- ，欲使發電機能夠輸出穩定電壓，同步阻抗愈小愈好。
12. 電壓調整率 $V.R. \% = \frac{\text{無載電壓 } V_{p(NL)} - \text{滿載電壓 } V_{p(FL)}}{\text{滿載電壓 } V_{p(FL)}}$
13. 同步發電機每相繞組同步阻抗值 $Z_s = \left. \frac{V_{op}}{I_{sp}} \right|_{I_f=k}$ 。
14. 同步發電機百分比同步阻抗值 $\% Z_s = \frac{I_p \times Z_s}{V_p} \times 100 \%$
15. 發電機效率為： $\eta = \frac{P_o}{P_{in}} = \frac{P_o}{P_o + P_{loss}}$
16. 三相同步發電機輸出功率為： $P_o = 3V_p I_a \cos \theta = \sqrt{3} V_L I_L \cos \theta$
17. 三相同步發電機輸出功率 $P_o = q \times \frac{V_p \times E_p}{X_s} \sin \delta$ ，輸出功率與負載角 δ 的正弦函數成正比。負載角 $\delta = 90^\circ$ 時為最大輸出功率。

第十章

18. 同步發電機並聯運用的優點包含：增加供電容量、提高運轉效率、提高供電可靠度、降低預備容量、延長壽命等。
19. 兩部同步發電機並聯時，若是電壓不同，兩機間會有無功電流 ($\cos\theta = 0$) 產生，可以調整兩機感應電勢趨於一致，但也導致銅損增加，效率降低。
20. 兩部同步發電機並聯時，若是相位不同，兩機間會有循環電流產生，造成有效功率移轉，稱為同步電流或整步電流。
21. 同步發電機並聯時的負載分配方式包括：
 - (1) 有效功率 P ：調整發電機輸入功率。為了維持頻率不變，增加一部發電機的輸入功率時，必須減少另一部發電機的輸入功率。
 - (2) 無效功率 Q ：調整發電機激磁電流。為了維持系統電壓不變，增加一部發電機的激磁電流時，必須減少另一部發電機的激磁電流。

第十一章

22. 同步電動機與同步發電機的構造相同，可以互換使用。
23. 同步電動機無法自行起動，必須靠外力或是其他方法來幫助起動，當轉子速度接近同步轉速時，轉子磁場與定子磁場相互吸引，讓轉子以同步轉速持續旋轉。
24. 同步電動機激磁電流與電樞反應的關係：

激磁電流	作用
正常激磁	電樞電流與端電壓同相，電樞反應造成交磁（橫軸）作用
欠激磁	電樞電流落後端電壓 θ 度 ($\theta < 90^\circ$)，電樞反應產生交磁作用與助磁作用
過激磁	電樞電流超前端電壓 θ 度 ($\theta < 90^\circ$)，電樞反應產生交磁作用與去磁作用

25. 同步電動機的內生機械功率 $P_m = q \times \frac{V_p \times E_c}{X_s} \sin\delta$ 。滿載時負載角 δ 約 20° ，當負載角 $\delta = 90^\circ$ 時為最大功率。

[illegible]