

CH



交流電源

在以上章節所討論的交流電路中，電壓源提供一個穩定的正弦波交流電壓，是屬於單相系統的電壓源；在這類的交流電源系統中，只存在單一相位。如果電路中的電壓源可以提供多種不同相位的電壓，這類的交流電源系統便稱為多相系統，其中三相系統的功率大、穩定性高，在大型發電系統中有相當廣泛的應用，是一種十分實用的交流電源系統，這也是本章研究的重點。

學習目標

- ▶ 分析單相交流電源系統
- ▶ 分析單相三線式交流電源系統
- ▶ 分析三相交流電源系統



本章目錄

12-1	單相電源	254
12-2	單相三線式	256
12-3	三相電源	261



12-1 單相電源

單相（single-phase）電源常用在家庭用電或是一般低電壓的小負載電路中，電壓源只提供某一頻率的單一交流電壓，常用的電壓大小有 110V 與 220V 兩種。單相電源是在日常生活中最常見的電源系統。

單相電源的特性

單相電壓如果輸出一個正弦波交流電壓，不論電路中的電流是否與電壓同相，提供給負載的功率也將是脈動的正弦波，所以不穩定與效率較低是其缺點。因此，在需要穩定電源功率供應的電力系統中，單相電源的交流電路產生的脈動功率，並不能適用。

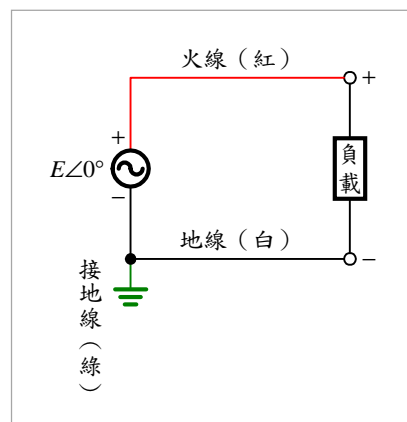
單相電源大都用在家庭用電與低壓的小負載中，由於單相電源提供的功率具有脈動的特性，容易造成負載不必要的機械震動，因此，需要穩定功率供應的大型工廠，大都採用多相的供電系統。

單相電源的種類

單相電源依傳輸導線的數目不同，可以區分為以下兩種：

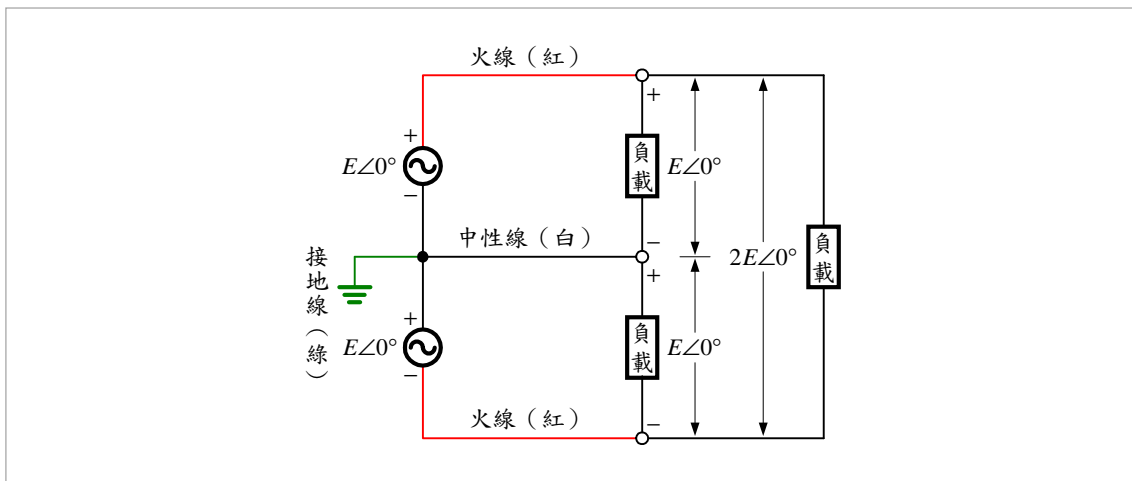
1. 單相二線式（single-phase two-wire system，簡稱 1 ϕ 2W）：

電路中只有一個單一頻率與相位的交流電壓源，電壓經由二條導線輸入負載，如圖 12-1 所示。其中一條導線連接至大地，使電壓保持在零電位，稱為地線（ground wire），在用戶的配電系統中一般是採用白色導線（連接至接地極的導線為綠色）；另一條導線稱為火線（live wire），使用的顏色則以紅色或黑色來表示。



▲ 圖 12-1 單相二線式

2. 單相三線式（single-phase three-wire system，簡稱 $1\phi 3W$ ）：電路中有兩個等效的交流電壓源，且輸出相同頻率與相位的交流電壓，經由三條導線至負載，如圖 12-2 所示。其中有兩條導線是火線，一條是由兩組電壓源共用的導線稱為地線或中性線（neutral wire）。我們將在下一節中，詳細探討單相三線系統的特性。



▲ 圖 12-2 單相三線式

對於這兩種電源供應方式的比較，單相二線式雖然在結構上較為簡單，但其在線路的壓降及電能的損耗都比較大（下節有較詳細的說明），因此在較大的電力系統中不適宜使用。



單元評量

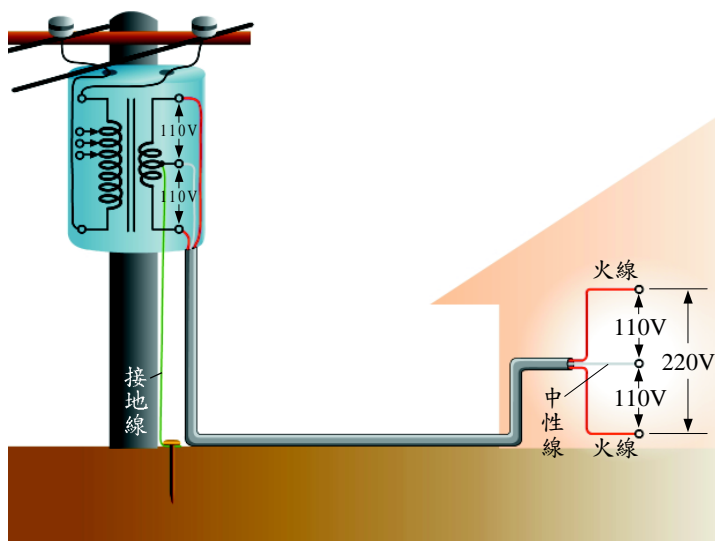


1. 電壓源若只提供單一頻率的交流電壓，稱為 _____ 電壓。
2. 單相電源依傳輸導線之不同，可區分為 _____、_____ 兩種。
3. 在台灣地區，目前電力公司所提供常用的電壓有 _____ V 及 _____ V 兩種。
4. 單相二線式交流電源在結構上較為簡單，但因線路的壓降 _____ 及電能的損耗 _____，故在較大的電力系統中不適宜使用。

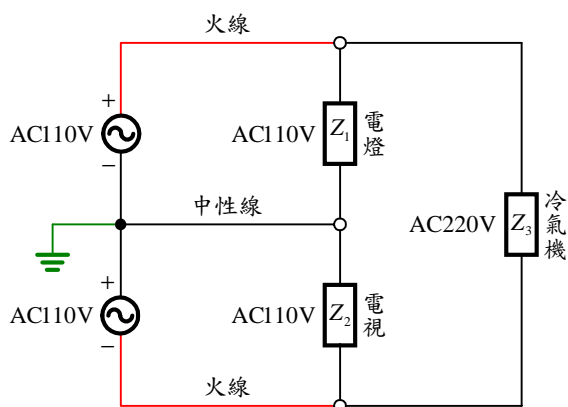


12-2 單相三線式

圖 12-3 所示為單相三線式電源系統，其中電路有兩組頻率及相位相同的交流電壓源，以三條導線連接至負載，可以提供兩種不同的電壓，分別供給不同額定電壓的電器使用。在圖中，火線與中性線之間提供的電壓為 110V，一般供應電燈、電視等小型家電的用電；而兩火線之間提供的電壓為 220V，一般供應冷氣機、電熱器等大功率電器的用電。



(a) 電源系統



(b) 電路圖

▲ 圖 12-3 單相三線式電源系統 一般家庭用電的電源系統。

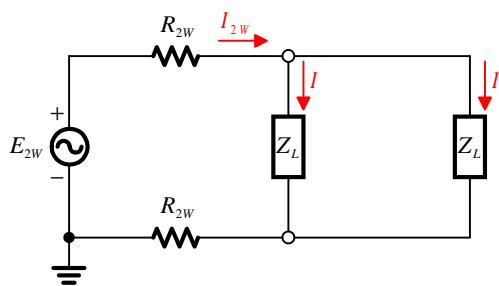
在單相三線式的電源系統中，兩組電壓源共用的導線稱為**中性線**，電壓源便藉由兩條火線與中性線，將產生的電能輸送至負載。如果電路在兩火線與中性線間所連接的負載有相同的阻抗時（ $\overline{Z_1} = \overline{Z_2}$ ），我們稱這樣的系統為**平衡負載**（balance load）電路。當單相三線系統為平衡負載時，由於兩組分路上有相同的阻抗，流經負載上的電流相同，因此中性線上沒有電流通過。

拿單相三線式系統與單相二線式系統來比較，單相三線式除了可以提供兩種電壓外，在相同距離內傳送相同電壓、功率時，系統線路中的電流較小，即表示線路的電能損耗小，且可以使用較小線徑的導線來傳輸，以減少銅的使用量而降低成本。因此，目前一般的家庭用電大多採用此種配電方式。

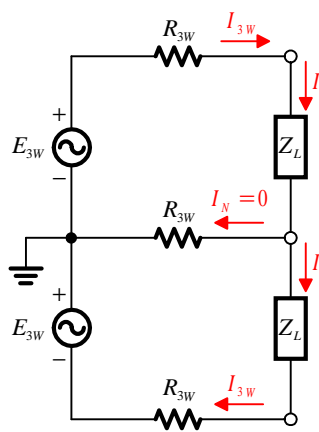


範例 12-1

如下圖(a)(b)所示之 $1\phi 2W$ 與 $1\phi 3W$ 電路，當所接的負載相同時，若線路使用的導線相同（即導線的內阻 $R_{2W} = R_{3W}$ ），且在相同的距離內傳送相同的負載功率，試求兩種線路的電壓降比為多少？



(a) $1\phi 2W$



(b) $1\phi 3W$



【解】因傳送相同的功率，則流過負載的電流相等，由圖中可看出：

$$1\phi 2W \text{ 的導線電流 } I_{2W} = I + I = 2I$$

$$1\phi 3W \text{ 的導線電流 } I_{3W} = I$$

線路的電壓降比為：

$$\frac{V_{3W}}{V_{2W}} = \frac{I_{3W} R_{3W}}{I_{2W} R_{2W}} = \frac{(I) R_{3W}}{(2I) R_{3W}} = \frac{1}{2}$$

註：1 ϕ 2W 的電源 E_{2W} 要略大於 1 ϕ 3W 的電源 E_{3W} 才能使傳送到負載的功率相同。

說明：以電阻性負載為例，負載兩端的電壓為

$$1\phi 2W : V_L = E_{2W} - 2(I_{2W} R_{2W}) = E_{2W} - 4IR_{3W}$$

$$1\phi 3W : V_L = E_{3W} - I_{3W} R_{3W} = E_{3W} - IR_{3W} \quad (\text{中性線 } I_N = 0)$$

$$\text{整理後得：} E_{2W} = V_L + 4IR_{3W} > V_L + IR_{3W} = E_{3W}$$

馬上練習 承上題，試求 1 ϕ 2W 與 1 ϕ 3W 兩種線路的電功率損耗比為多少？

【答】 $\frac{P_{3W(I)}}{P_{2W(I)}} = \frac{1}{4}$ 。



範例 12-2

承範例 12-1，若 1 ϕ 2W 與 1 ϕ 3W 電路使用不同粗細的導線 ($R_{2W} \neq R_{3W}$)，但兩者損耗的電能相同時（即 $P_{2W(I)} = P_{3W(I)}$ ），試求兩種線路的用銅量比為多少？

【解】1 ϕ 2W 的損耗： $P_{2W(I)} = 2(I_{2W}^2 R_{2W}) = 2(2I)^2 R_{2W} = 8I^2 R_{2W}$

1 ϕ 3W 的損耗： $P_{3W(I)} = 2(I_{3W}^2 R_{3W}) = 2(I)^2 R_{3W} = 2I^2 R_{3W}$

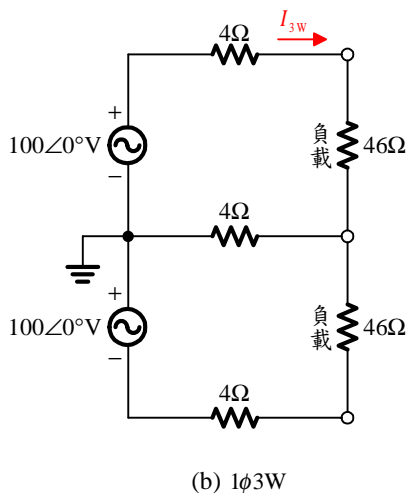
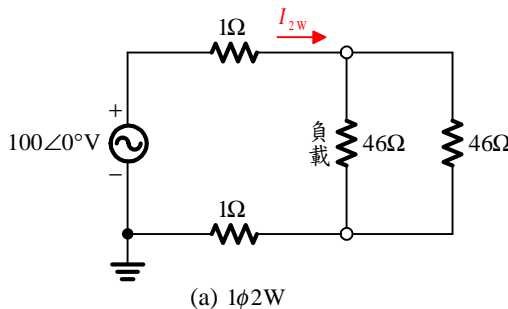
$$\because P_{2W(I)} = P_{3W(I)} \quad \text{可得} \quad \frac{R_{3W}}{R_{2W}} = \frac{8I^2}{2I^2} = 4$$

$$\text{又 } R = \rho \frac{\ell}{A}, \text{ 且 } \ell_{2W} = \ell_{3W} \text{ (傳送距離相同)}, \text{ 可得 } \frac{A_{3W}}{A_{2W}} = \frac{R_{2W}}{R_{3W}} = \frac{1}{4}$$

$$\text{用銅量比：} \frac{3W \text{ 總體積}}{2W \text{ 總體積}} = \frac{3(\ell_{3W} A_{3W})}{2(\ell_{2W} A_{2W})} = \frac{3 \times 1}{2 \times 4} = \frac{3}{8} = 37.5\%$$

(即 1 ϕ 3W 式線路可節省 62.5% 的用銅量)

馬上練習 如下圖(a)(b)所示電路，試求兩種電路各損耗的電功率 $P_{2W(I)}$ 、 $P_{3W(I)}$ 為多少？

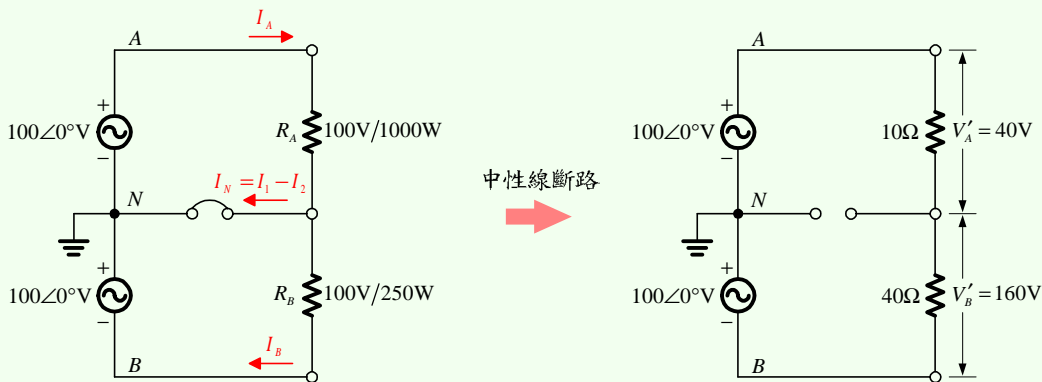


【答】 $P_{2W(I)} = 32 \text{ W}$ ， $P_{3W(I)} = 32 \text{ W}$ 。



※知識充電

在單相三線式（1φ3W）的系統中，不可在中性線上設置過載保護裝置（保險絲），否則在負載不平衡時（負載 $Z_1 \neq Z_2$ ，在中性線上有電流），若是保險絲燒斷，則將導致額定功率較小（額定電流小、阻抗大）之設備的端電壓上升，進而可能超出設備的額定電壓造成燒毀。我們以下面圖例來作解釋。



$$R_A = \frac{100^2}{1000} = 10 \Omega \quad R_B = \frac{100^2}{250} = 40 \Omega$$

$$\text{其中 } I_A = \frac{E}{R_A} = \frac{100}{10} = 10 \text{ A}$$

$$I_B = \frac{E}{R_B} = \frac{100}{40} = 2.5 \text{ A}$$

$$I_N = I_A - I_B = 7.5 \text{ A}$$

$$V'_A = 200 \times \frac{10}{10 + 40} = 40 \text{ V}$$

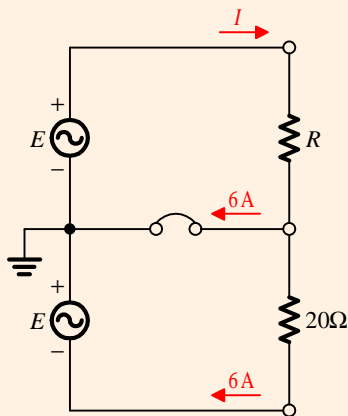
$$V'_B = 200 \times \frac{40}{10 + 40} = 160 \text{ V}$$

由上圖可知額定功率較小之負載 R_B 兩端的電壓上升至 160V，有過載燒毀之虞。



單元評量

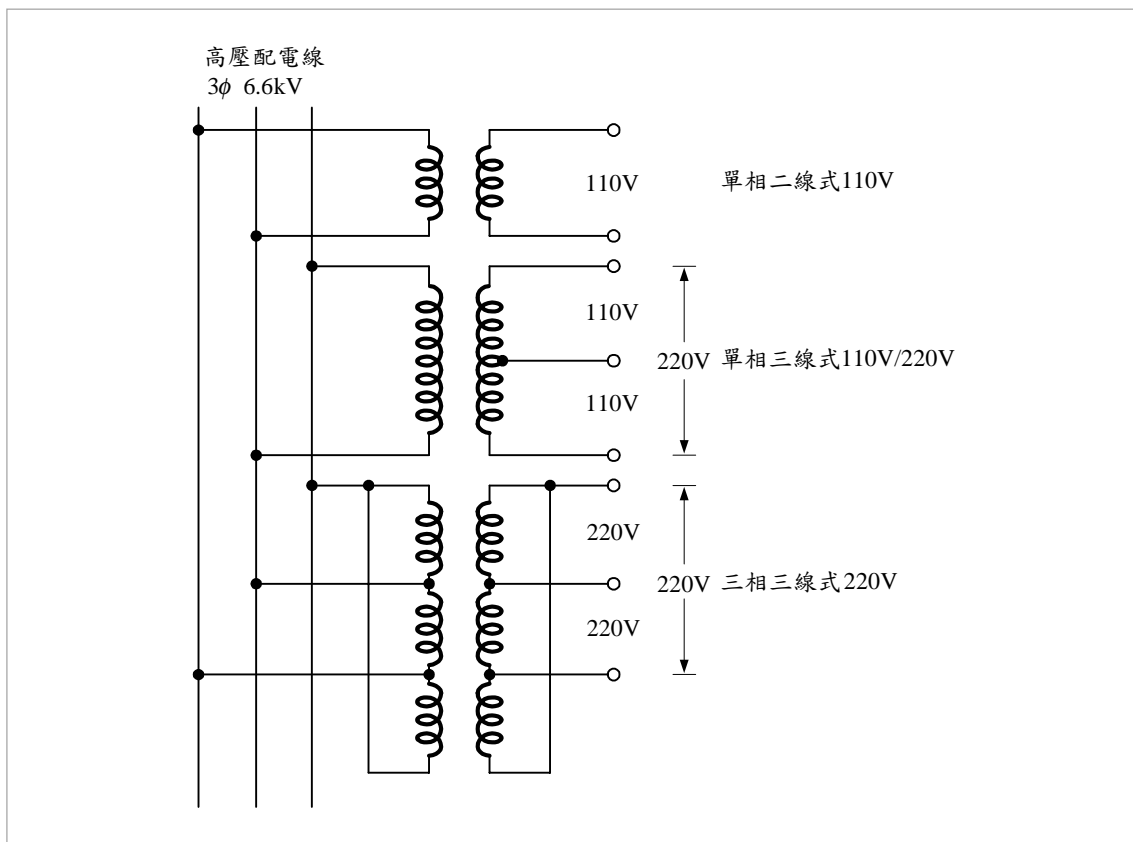
1. 目前我國家庭用電大都屬於單相 _____ 線式電源系統，其電壓有 _____ 伏特及 _____ 伏特兩種。
2. 在 $1\phi 3W$ 電源系統中，如果電路在火線與中性線間所連接的負載有相同的阻抗大小與相角，則此電路稱為 _____，且中性線的電流 $I_N =$ _____。
3. 當 $1\phi 2W$ 與 $1\phi 3W$ 電源系統所接的負載相同時，且在相同的距離內傳送相同的負載功率，若線路使用的導線相同，則單相二線式的電能損耗為單相三線式的 _____ 倍。
4. 當 $1\phi 2W$ 與 $1\phi 3W$ 電源系統所接的負載相同，且兩者損耗的電能相同時，若兩種電路使用不同粗細的導線，且 $1\phi 3W$ 的導線長度為 $1\phi 2W$ 的 2 倍，則
導線的電阻比 $\frac{R_{3W}}{R_{2W}} =$ _____，
導線的截面積比 $\frac{A_{3W}}{A_{2W}} =$ _____，
導線的用銅量比 $\frac{3W \text{ 總體積}}{2W \text{ 總體積}} =$ _____。
5. 如圖(1)所示電路，試求電流 $I =$ _____ A，電阻 $R =$ _____ Ω ；若電路的中性線發生斷路，則電阻 R 兩端電壓 $V_R =$ _____ V， 20Ω 電阻兩端電壓 $V_{20\Omega} =$ _____ V。



圖(1)

12-3 三相電源

交流電源除了單相系統外，還可以由多個同一頻率但是不同相位的交流電壓組成多相系統（polyphase system）電路，如二相、三相、四相、六相等。一般大型的電力系統如大功率電動馬達的運轉，通常需要功率較穩定的電源供應，單相系統所產生的脈動交流功率，就比較不適合於大型電力系統的需求。如果改用多相系統的電源，則可以改善功率不穩的情形；而且，一般大型的發電系統多採用三相方式輸出，再依個別需要，經變壓器轉換成為單相二線、三線式與三相電源，然後分別接至家庭與工廠，如圖 12-4 所示。

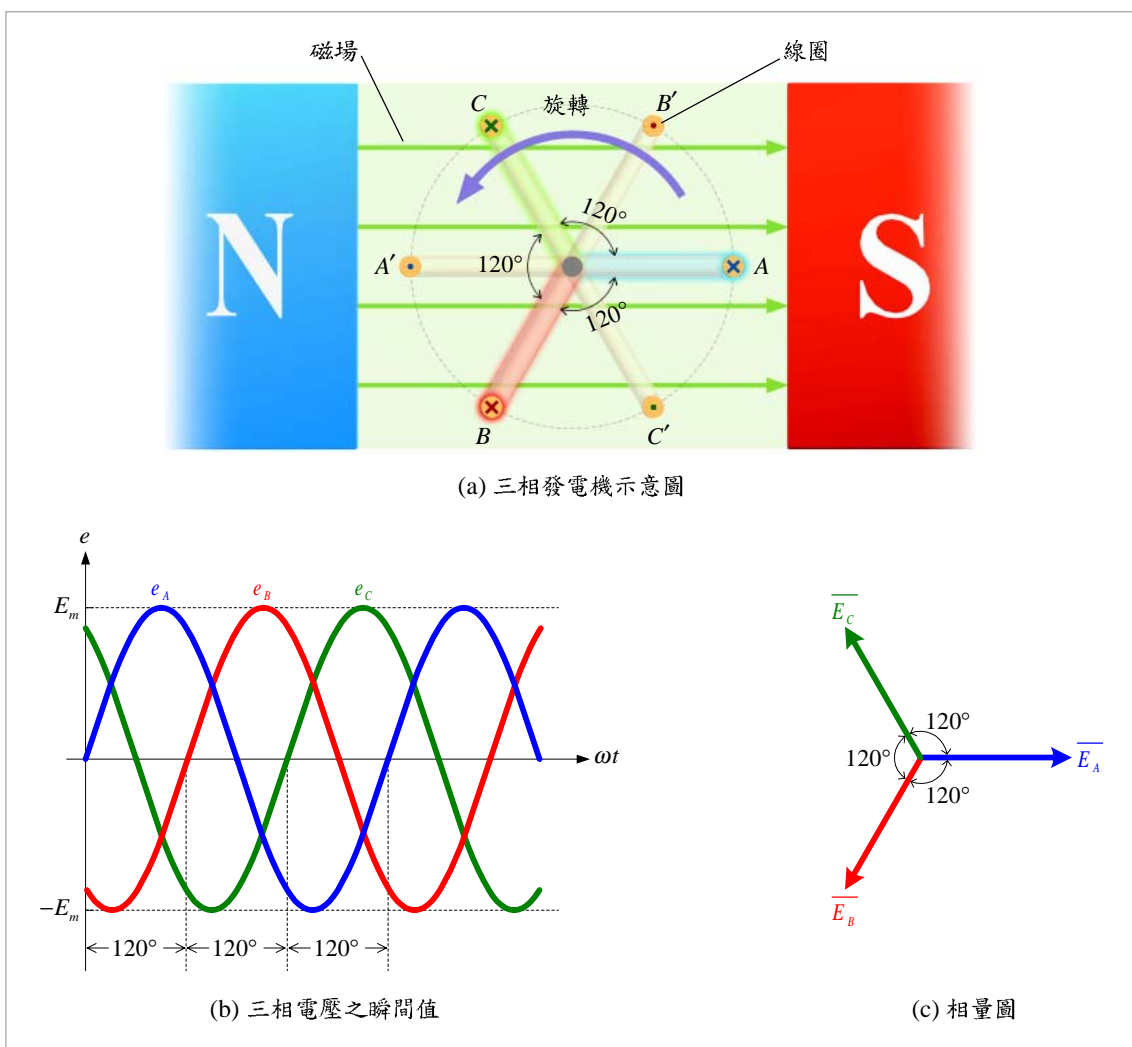


▲ 圖 12-4 三相交流與單相交流電源系統



12-3.1 三相系統的基本概念

在 8-1 節中我們曾簡單說明過單相交流發電機的原理：當一線圈在磁場中旋轉時，可感應生成一正弦波形的電壓。而三相電源系統的發電機，也是利用同樣的工作原理，只不過在發電機內是放置三組相同的線圈，且各線圈相互間隔 120° 的角度，如圖 12-5(a)所示。當這三組線圈在磁場中以相同轉速旋轉時，便可使發電機輸出三組正弦波電壓，而三組電壓間各有 120° 的相位差，各相位電壓的波形如圖 12-5(b)、(c)所示。另有三相發電機是將三組線圈固定不動，而利用磁鐵當作轉子讓磁場旋轉，這樣也可以造成相同的發電效果。



▲ 圖 12-5 三相電源系統與電壓波形 三相電源提供三組頻率、振幅一樣，但相位各差 120° 的電壓波形。

三相系統的電壓

由圖 12-5(b)可知，在三相發電機所產生的電壓波形中，電壓 e_B 滯後電壓 e_A 相角 120° ，電壓 e_C 滯後電壓 e_B 相角 120° ，電壓 e_A 滯後電壓 e_C 相角 120° 。因三組線圈的匝數及轉速相同，使得三個相位的電壓最大值同為 E_m ；若以電壓 e_A 的相位為基準，則 A 、 B 、 C 三個相位的瞬間電壓值可表示為：

Σ 重要公式

$$e_A(t) = E_m \sin \omega t = \sqrt{2}E \sin \omega t \quad (12-3-1a)$$

$$e_B(t) = E_m \sin(\omega t - 120^\circ) = \sqrt{2}E \sin(\omega t - 120^\circ) \quad (12-3-1b)$$

$$\begin{aligned} e_C(t) &= E_m \sin(\omega t - 240^\circ) \quad (12-3-1c) \\ &= E_m \sin(\omega t + 120^\circ) = \sqrt{2}E \sin(\omega t + 120^\circ) \end{aligned}$$

以相量式表示為：

Σ 重要公式

$$\overline{E_A} = E \angle 0^\circ \quad (12-3-2a)$$

$$\overline{E_B} = E \angle -120^\circ \quad (12-3-2b)$$

$$\overline{E_C} = E \angle -240^\circ = E \angle 120^\circ \quad (12-3-2c)$$

歸納上述三相系統的描述，三相電源具有下列特性：

- 三相電源的三組輸出電壓大小相等。
- 三相電源之三組電壓間的相位差各為 120° 。
- 三相電源之三組電壓在任何瞬間的電壓和為零。



※知識充電

三組電壓在任何瞬間的電壓和為：

$$\begin{aligned} \overline{E_A} + \overline{E_B} + \overline{E_C} &= E \angle 0^\circ + E \angle -120^\circ + E \angle 120^\circ \\ &= E + E\left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) + E\left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) = 0 \end{aligned}$$



三相系統的負載

在三相系統電路中，當三相電壓連接至三個完全相同的阻抗負載（阻抗大小與相位完全相同）時，流過每一個負載上的分路電流相等，為三相電路的**平衡負載**情況，各相電流間有 120° 的相位差。若線路接有中性線時，則**中性線電流為三個負載電流的相量和，在平衡負載的情況下，通過中性線的電流為零**。（註：有關三相系統的內容請參見 12-3.3 節與 12-3.4 節）

相反地，如果三相電壓連接至三個不同的阻抗負載時，流經中性線的電流為各相電流的和，此時中性線電流不為零，為三相電路的不平衡負載情況。如果各相電壓間的相位不同時，也可能造成不平衡負載。

三相系統的優點

三相電源系統具有下列優點，已成為多相系統中運用最廣泛的電源供應方式：

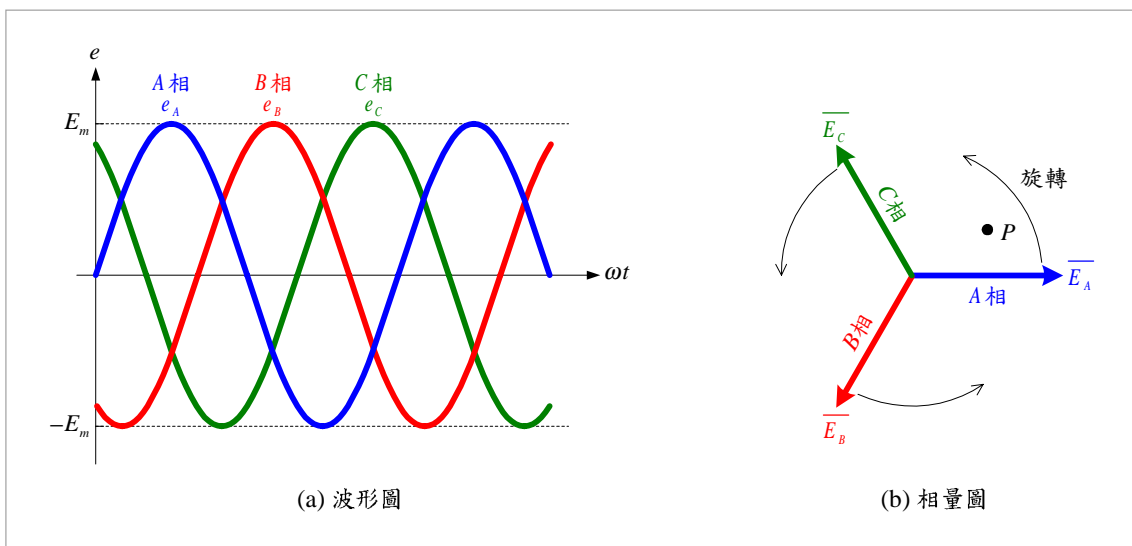
1. 三相系統可以供給平衡負載所需的穩定功率，且效率也較其它多相系統高。
2. 三相系統的結構較其它多相系統簡單，且較單相與二相系統的輸出功率大。
3. 相同負載功率的電力系統，採用三相系統的能量耗損比單相系統少，可以節省較多的電力成本。
4. 三相電源較不易發熱，可以避免機械因使用太久而過熱。由於單相電源系統中的單匝線圈在旋轉時，容易在磁極周圍產生磁渦流，如果使用過久便會產生高熱；而如果是一個平衡的三相電源系統，則產生的磁渦流效應將有互相抵銷的情形，致使相同的效應小到可以忽略不計。
5. 三相電源有多種不同的接法，可依不同負載需求而採用不同的連接方式（後續將有相關的說明）。
6. 三相電源容易在電動機上建立穩定的旋轉磁場，使三相電動機能自行啓動且運轉穩定；而單相電源只能建立單相的交變磁場，故單相電動機無法自行啓動而必須仰賴其他的輔助方法（詳細內容請參見電工機械之相關課程）。

12-3.2 相序

在使用三相電源時，輸出的電壓大小相同，且電壓與電壓間存在 120° 的相位差，但輸出電壓相位超前或滯後的情況卻無法得知。大型的電力系統常須清楚相位超前或滯後的資訊，例如：對於三相的電動機而言，不同的電壓順序將會導致電動機正轉與反轉的不同。因此我們定義相序（**phase sequence**）為各相電壓之交流波形到達正峰值時的順序，並以相序來判斷各相電壓超前或滯後的情形。

正相序

圖 12-6(a) 所示為三相電壓源的波形圖，由時間軸看出，電壓 e_A 首先達到正峰值，然後是電壓 e_B ，而電壓 e_C 最後到達正峰值，所以這個三相電源的相序便是 ABC（或 BCA、CAB），稱為正相序（**positive-phase sequence**）。若以相量圖來看，我們可以在相量圖中任選一點 P ，然後逆時針方向旋轉相量 $\overline{E_A}$ 、 $\overline{E_B}$ 、 $\overline{E_C}$ ，以通過定點 P 的順序來定義三相電壓的相序，如圖 12-6(b) 所示，即為正相序 ABC。

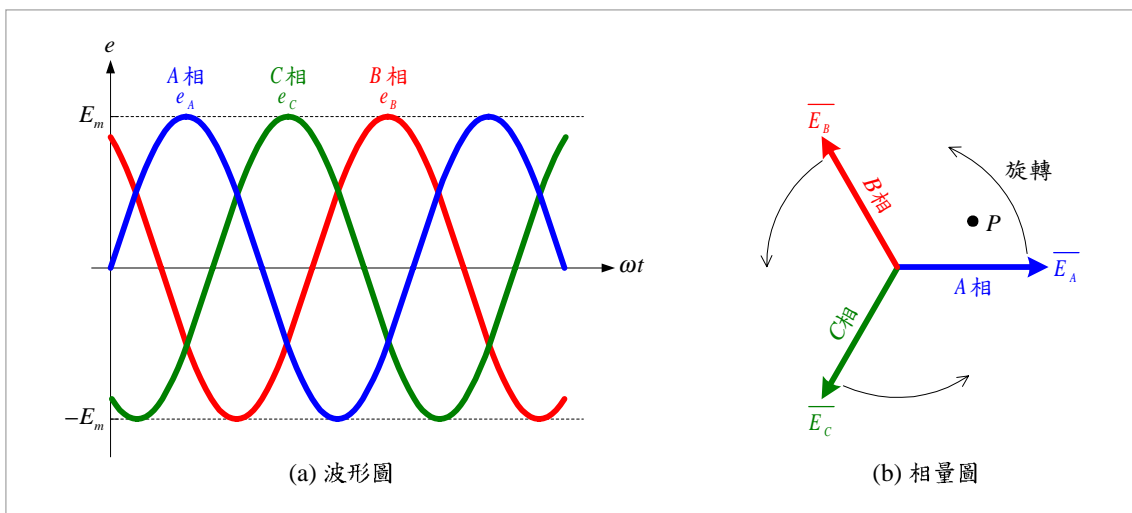


▲ 圖 12-6 正相序的三相波形 電壓到達峰值的順序依次是 $e_A \rightarrow e_B \rightarrow e_C$ ；相量逆時針旋轉通過定點 P 的順序依次是 $\overline{E_A} \rightarrow \overline{E_B} \rightarrow \overline{E_C}$ 。



負相序

圖 12-7(a)所示為三相電壓源的波形圖，由時間軸看出，電壓 e_A 首先達到正峰值，然後是電壓 e_C ，最後是電壓 e_B ，所以這個三相電源的相序便是 ACB（或 CBA、BAC），稱為負相序（negative-phase sequence）或逆相序。若以相量圖來看，則在相量圖中任選一點 P ，然後逆時針方向旋轉相量 $\overline{E_A}$ 、 $\overline{E_B}$ 、 $\overline{E_C}$ ，如圖 12-7(b)所示，圖中的相序即為負相序 ACB。



▲ 圖 12-7 負相序的三相波形 電壓到達峰值的順序依次是 $e_A \rightarrow e_C \rightarrow e_B$ ；相量逆時針旋轉通過定點 P 的順序依次是 $\overline{E_A} \rightarrow \overline{E_C} \rightarrow \overline{E_B}$ 。

註：在應用時若沒有特別註明，則一般是採用正相序。



範例 12-3

某三相發電機之每相電壓為 100V，頻率為 60Hz，且為正相序 ABC，若以 A 相為基準，試求三相電壓之正弦波方程式為何？

【解】 $\because E_m = \sqrt{2}E = \sqrt{2} \times 100 = 100\sqrt{2} \text{ V} \quad \omega = 2\pi f = 2\pi \times 60 \cong 377 \text{ rad/s}$

$$\therefore e_A(t) = E_m \sin \omega t = 100\sqrt{2} \sin 377t \text{ V}$$

$$e_B(t) = E_m \sin(\omega t - 120^\circ) = 100\sqrt{2} \sin(377t - 120^\circ) \text{ V}$$

$$e_C(t) = E_m \sin(\omega t + 120^\circ) = 100\sqrt{2} \sin(377t + 120^\circ) \text{ V}$$

馬上練習 承上題，三相發電機為負相序 ACB，試求其電壓相量式為何？

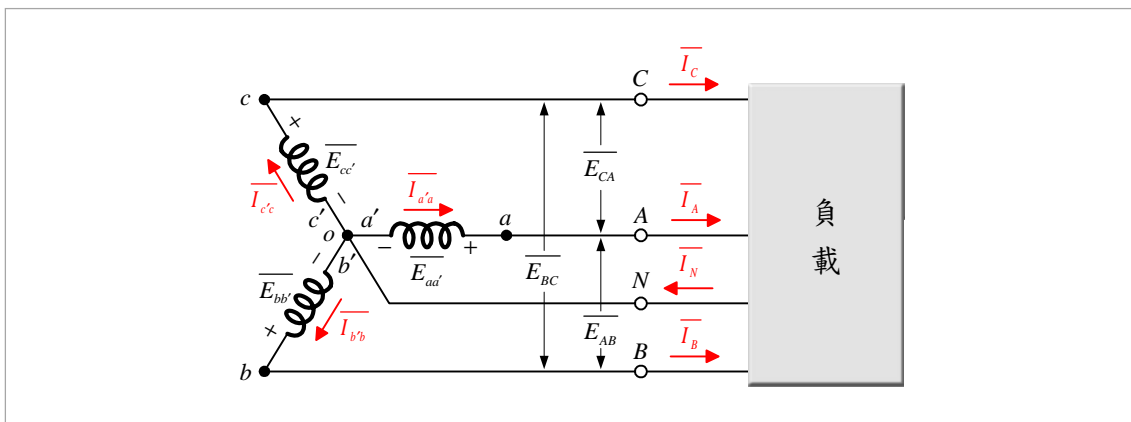
【答】 $\overline{E_A} = 100 \angle 0^\circ \text{ V}$ ， $\overline{E_B} = 100 \angle 120^\circ \text{ V}$ ， $\overline{E_C} = 100 \angle -120^\circ \text{ V}$ 。

12-3.3 三相發電機的連接

三相接線（three-phase connection）是三相電源系統中的連接方式，依接線連結的形狀，可以區分為三相 Y 接線與三相 Δ 接線。

三相 Y 接線

圖 12-8 所示為 Y 型連接的三相發電機，其構造是將三組線圈（繞組）的負極共同連接在一起，而三相電壓分別由三組線圈的正極輸出至負載。其中的共同接點稱為中性點（neutral point），若將此點也連接至負載，則成為三相四線式發電機。



▲ 圖 12-8 三相 Y 型連接

● 三相 Y 型連接的電壓特性：

1. 相電壓（phase voltage，簡記為 E_p ）：三相發電機各相繞組兩端產生的電壓，如圖 12-8 所示之 $\overline{E_{aa'}}$ 、 $\overline{E_{bb'}}$ 及 $\overline{E_{cc'}}$ 等。
2. 線電壓（line voltage，簡記為 E_ℓ ）：三相發電機所引出三線中之任二線的電壓，如圖 12-8 所示之 $\overline{E_{AB}}$ 、 $\overline{E_{BC}}$ 及 $\overline{E_{CA}}$ 等。
3. 相電壓與線電壓的關係：假設相電壓 $\overline{E_{aa'}} = E_p \angle 0^\circ$ ，則由(12-3-2)式可知另兩組相電壓為 $\overline{E_{bb'}} = E_p \angle -120^\circ$ 、 $\overline{E_{cc'}} = E_p \angle 120^\circ$ 。所以線電壓 $\overline{E_{AB}}$ 可表示為：



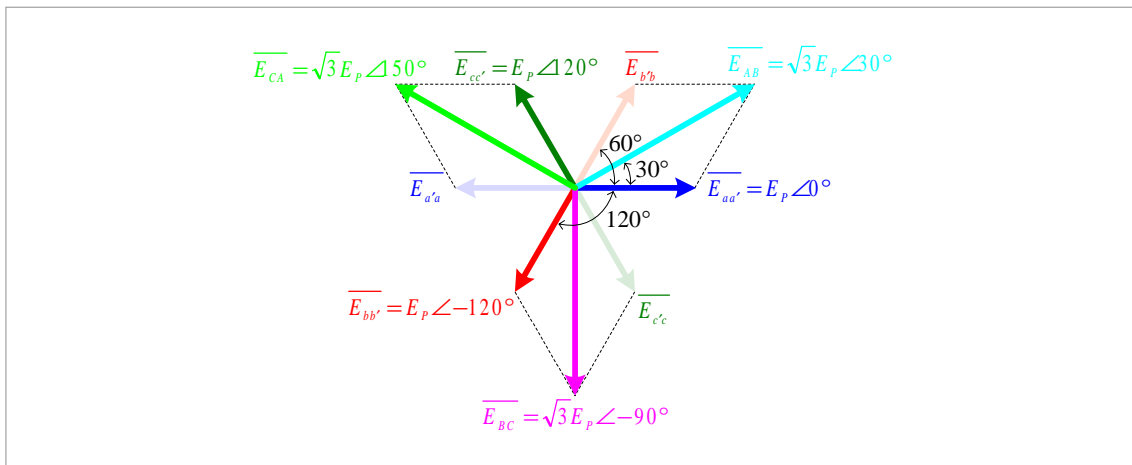
$$\begin{aligned}
 \overline{E_{AB}} &= \overline{E_{aa'}} + \overline{E_{b'b}} = \overline{E_{aa'}} + (-\overline{E_{bb'}}) = E_p \angle 0^\circ - E_p \angle -120^\circ \\
 &= E_p - E_p \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) = E_p \left(\frac{3}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) = \sqrt{3}E_p \left(\frac{\sqrt{3}}{2} + j\frac{1}{2} \right) \\
 &= \sqrt{3}E_p \angle 30^\circ = E_\ell \angle 30^\circ = \sqrt{3}\overline{E_{aa'}} \angle 30^\circ \quad (\because \overline{E_{aa'}} = E_p \angle 0^\circ) \\
 &\text{(線電壓 } \overline{E_{AB}} \text{ 超前相電壓 } \overline{E_{aa'}} \text{ } 30^\circ \text{)}
 \end{aligned}$$

同理可證：

$$\begin{aligned}
 \overline{E_{BC}} &= \overline{E_{bb'}} + \overline{E_{c'c}} = \overline{E_{bb'}} + (-\overline{E_{cc'}}) = \sqrt{3}E_p \angle -90^\circ = E_\ell \angle -90^\circ \\
 &= \sqrt{3}\overline{E_{bb'}} \angle 30^\circ = \sqrt{3}\overline{E_{aa'}} \angle -90^\circ \quad (\because \overline{E_{bb'}} = E_p \angle -120^\circ) \\
 &\text{(線電壓 } \overline{E_{BC}} \text{ 超前相電壓 } \overline{E_{bb'}} \text{ } 30^\circ \text{)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \overline{E_{CA}} &= \overline{E_{cc'}} + \overline{E_{a'a}} = \overline{E_{cc'}} + (-\overline{E_{aa'}}) = \sqrt{3}E_p \angle 150^\circ = E_\ell \angle 150^\circ \\
 &= \sqrt{3}\overline{E_{cc'}} \angle 30^\circ = \sqrt{3}\overline{E_{aa'}} \angle 150^\circ \quad (\because \overline{E_{cc'}} = E_p \angle 120^\circ) \\
 &\text{(線電壓 } \overline{E_{CA}} \text{ 超前相電壓 } \overline{E_{cc'}} \text{ } 30^\circ \text{)}
 \end{aligned}$$

圖 12-9 所示即為三相 Y 型連接的電壓相量圖。由上述討論可知線電壓為相電壓的 $\sqrt{3}$ 倍，即 $E_\ell = \sqrt{3}E_p$ ；且線電壓的相位超前所對應相電壓的相位 30° 。



▲ 圖 12-9 三相 Y 型連接的電壓相量圖

● 三相 Y 型連接的電流特性：

1. 相電流（phase current，簡記為 I_p ）：流經發電機各相繞組的電流，如圖 12-8 所示 $\overline{I_{a'a}}$ 、 $\overline{I_{b'b}}$ 及 $\overline{I_{c'c}}$ 等。
2. 線電流（line current，簡記為 I_ℓ ）：流經發電機各相繞組之外接線路的電流，如圖 12-8 所示之 $\overline{I_A}$ 、 $\overline{I_B}$ 及 $\overline{I_C}$ 等。
3. 相電流與線電流的關係：由圖 12-8 可看出，三相 Y 型連接之各繞組與外接線路係串聯關係，所以線電流等於相電流，即：

$$\overline{I_{a'a}} = \overline{I_A} \quad \overline{I_{b'b}} = \overline{I_B} \quad \overline{I_{c'c}} = \overline{I_C}$$

綜合上述，我們整理三相 Y 型連接的電壓與電流關係為：

Σ 重要公式

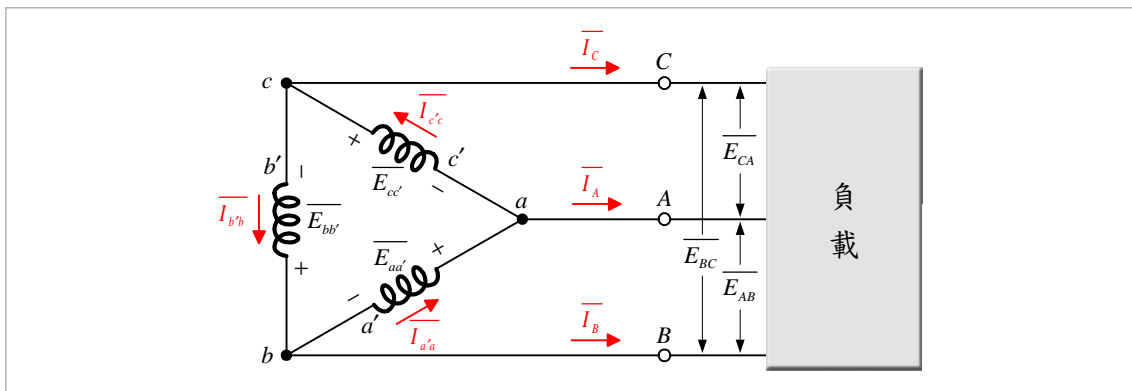
$$E_\ell = \sqrt{3}E_p \quad (\text{線電壓超前對應之相電壓 } 30^\circ) \quad (12-3-3a)$$

$$I_\ell = I_p \quad (\text{線電流等於相電流}) \quad (12-3-3b)$$

註：由克希荷夫電流定律可知，三相 Y 型連接的線電流和為 $\overline{I_A} + \overline{I_B} + \overline{I_C} = \overline{I_N}$ ，若是在平衡負載的情況下，中性線電流為零（ $\overline{I_N} = 0$ ），即 $\overline{I_A} + \overline{I_B} + \overline{I_C} = 0$ 。

三相 Δ 接線

圖 12-10 所示為 Δ 型連接的三相發電機，其構造是將三組線圈（繞組）的首尾相連（正極接負極），而三相電壓分別由線圈的三個連接點輸出至負載。由於三相 Δ 接線電源沒有一個共同的接點，所以在三相 Δ 接線電路中並不存在中性線，供電的方式也只有三相三線一種系統。



▲ 圖 12-10 三相 Δ 型連接



● 三相△型連接的電壓特性：

1. 相電壓（ E_p ）：如圖 12-10 所示之 $\overline{E_{aa'}}$ 、 $\overline{E_{bb'}}$ 及 $\overline{E_{cc'}}$ 等。
2. 線電壓（ E_ℓ ）：如圖 12-10 所示之 $\overline{E_{AB}}$ 、 $\overline{E_{BC}}$ 及 $\overline{E_{CA}}$ 等。
3. 相電壓與線電壓的關係：由圖 12-10 可看出，三相△型連接之各繞組的線電壓等於相電壓，即：

$$\overline{E_{aa'}} = \overline{E_{AB}} \quad \overline{E_{bb'}} = \overline{E_{BC}} \quad \overline{E_{cc'}} = \overline{E_{CA}}$$

● 三相△型連接的電流特性：

1. 相電流（ I_p ）：如圖 12-10 所示之 $\overline{I_{a'a}}$ 、 $\overline{I_{b'b}}$ 及 $\overline{I_{c'c}}$ 等。
2. 線電流（ I_ℓ ）：如圖 12-10 所示之 $\overline{I_A}$ 、 $\overline{I_B}$ 及 $\overline{I_C}$ 等。
3. 相電流與線電流的關係：三相發電機中各線圈提供的相電壓大小相等，但存在 120° 的相位差；若是在平衡負載的情況下，則各相電流間亦會大小相等，且存在 120° 的相位差。假設相電流 $\overline{I_{a'a}} = I_p \angle 0^\circ$ ，則 $\overline{I_{b'b}} = I_p \angle -120^\circ$ 、 $\overline{I_{c'c}} = I_p \angle 120^\circ$ 。所以線電流 $\overline{I_A}$ 可表示為：

$$\begin{aligned} \overline{I_A} &= \overline{I_{a'a}} + \overline{I_{cc'}} = \overline{I_{a'a}} + (-\overline{I_{c'c}}) = I_p \angle 0^\circ - I_p \angle 120^\circ \\ &= I_p - I_p \left(-\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) = I_p \left(\frac{3}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) = \sqrt{3} I_p \left(\frac{\sqrt{3}}{2} - j \frac{1}{2} \right) \\ &= \sqrt{3} I_p \angle -30^\circ = I_\ell \angle -30^\circ = \sqrt{3} \overline{I_{a'a}} \angle -30^\circ \quad (\because \overline{I_{a'a}} = I_p \angle 0^\circ) \end{aligned}$$

（線電流 $\overline{I_A}$ 滯後相電流 $\overline{I_{a'a}}$ 30° ）

同理可證：

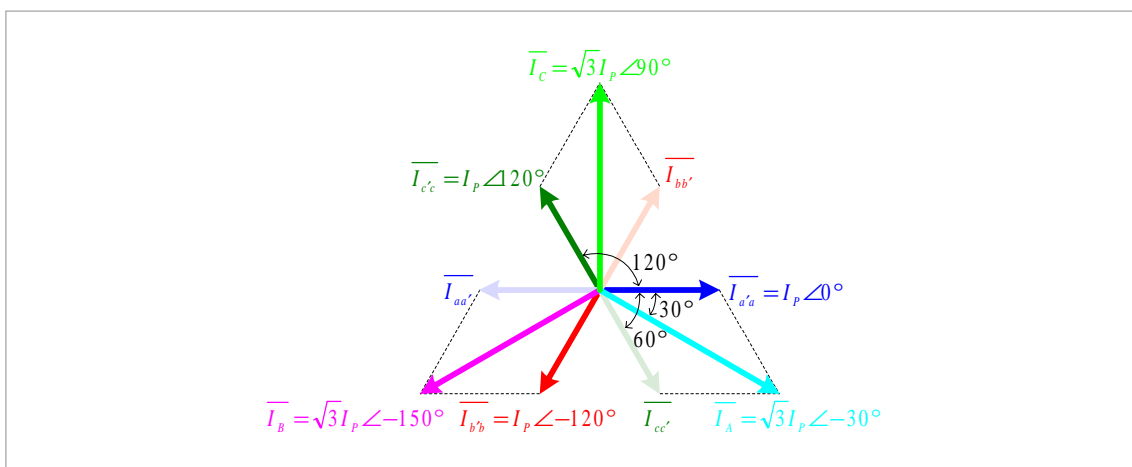
$$\begin{aligned} \overline{I_B} &= \overline{I_{b'b}} + \overline{I_{aa'}} = \overline{I_{b'b}} + (-\overline{I_{a'a}}) = \sqrt{3} I_p \angle -150^\circ = I_\ell \angle -150^\circ \\ &= \sqrt{3} \overline{I_{b'b}} \angle -30^\circ = \sqrt{3} \overline{I_{a'a}} \angle -150^\circ \quad (\because \overline{I_{b'b}} = I_p \angle -120^\circ) \end{aligned}$$

（線電流 $\overline{I_B}$ 滯後相電流 $\overline{I_{b'b}}$ 30° ）

$$\begin{aligned}\overline{I_C} &= \overline{I_{c'c}} + \overline{I_{bb'}} = \overline{I_{c'c}} + (-\overline{I_{b'b}}) = \sqrt{3}I_P \angle 90^\circ = I_\ell \angle 90^\circ \\ &= \sqrt{3}\overline{I_{c'c}} \angle -30^\circ = \sqrt{3}\overline{I_{a'a}} \angle 90^\circ \quad (\because \overline{I_{c'c}} = I_P \angle 120^\circ)\end{aligned}$$

(線電流 $\overline{I_C}$ 滯後相電流 $\overline{I_{c'c}}$ 30°)

圖 12-11 所示即為三相 Δ 型連接的電流相量圖。由上述討論可知線電流為相電流的 $\sqrt{3}$ 倍，即 $I_\ell = \sqrt{3}I_P$ ；且線電流的相位滯後所對應相電流的相位 30° 。



▲ 圖 12-11 三相 Δ 型連接的電流相量圖

綜合上述，我們整理三相 Δ 型連接的電壓與電流關係為：

Σ 重要公式

$$E_\ell = E_P \quad (\text{線電壓等於相電壓}) \quad (12-3-4a)$$

$$I_\ell = \sqrt{3}I_P \quad (\text{線電流滯後對應之相電流 } 30^\circ) \quad (12-3-4b)$$

註：由克希荷夫電流定律可知，三相 Δ 型連接的線電流和為 $\overline{I_A} + \overline{I_B} + \overline{I_C} = 0$ ，因此即使電路為不平衡負載，其三個線電流的總和也會為零。

**範例 12-4**

某交流三相發電機，電源為正相序 Y 型連接，若 A 相電壓 $\overline{E_{aa'}} = 220\angle 30^\circ \text{ V}$ ，試求線電壓 $\overline{E_{AB}}$ 、 $\overline{E_{BC}}$ 及 $\overline{E_{CA}}$ 為多少？

【解】三相電源為正相序，則 B 相滯後 A 相 120° 、C 相超前 A 相 120° ，即

$$\overline{E_{aa'}} = 220\angle 30^\circ \text{ V}$$

$$\overline{E_{bb'}} = 220\angle (30^\circ - 120^\circ) = 220\angle -90^\circ \text{ V}$$

$$\overline{E_{cc'}} = 220\angle (30^\circ + 120^\circ) = 220\angle 150^\circ \text{ V}$$

由於 Y 型連接之線電壓為對應相電壓的 $\sqrt{3}$ 倍，且相位超前 30° ，則

$$\overline{E_{AB}} = (\sqrt{3} \times 220)\angle (30^\circ + 30^\circ) = 220\sqrt{3}\angle 60^\circ \text{ V}$$

$$\overline{E_{BC}} = (\sqrt{3} \times 220)\angle (-90^\circ + 30^\circ) = 220\sqrt{3}\angle -60^\circ \text{ V}$$

$$\overline{E_{CA}} = (\sqrt{3} \times 220)\angle (150^\circ + 30^\circ) = 220\sqrt{3}\angle 180^\circ \text{ V}$$

馬上練習 承上題，若電源改為負相序 Y 型連接，試求線電壓 $\overline{E_{AB}}$ 、 $\overline{E_{BC}}$ 及 $\overline{E_{CA}}$ 為多少？

【答】 $\overline{E_{AB}} = 220\sqrt{3}\angle 0^\circ \text{ V}$ ， $\overline{E_{BC}} = 220\sqrt{3}\angle 120^\circ \text{ V}$ ，

$$\overline{E_{CA}} = 220\sqrt{3}\angle -120^\circ \text{ V}。$$

註：負相序 Y 型連接的三相發電機，其線電壓亦為對應相電壓的 $\sqrt{3}$ 倍，但相角滯後 30° 。

**範例 12-5**

某交流三相發電機，電源為正相序 Δ 型連接，若 A 相電流 $\overline{I_{a'a}} = 5\angle 0^\circ \text{ A}$ ，試求線電流 $\overline{I_A}$ 、 $\overline{I_B}$ 及 $\overline{I_C}$ 為多少？

【解】三相電源為正相序，則 B 相滯後 A 相 120° 、C 相超前 A 相 120° ，即

$$\overline{I_{a'a}} = 5\angle 0^\circ \text{ A}$$

$$\overline{I_{b'b}} = 5\angle (0^\circ - 120^\circ) = 5\angle -120^\circ \text{ A}$$

$$\overline{I_{c'c}} = 5\angle (0^\circ + 120^\circ) = 5\angle 120^\circ \text{ A}$$

由於 Δ 型連接之線電流為對應相電流的 $\sqrt{3}$ 倍，且相位超前 30° ，則

$$\overline{I_A} = (\sqrt{3} \times 5)\angle (0^\circ - 30^\circ) = 5\sqrt{3}\angle -30^\circ \text{ A}$$

$$\overline{I_B} = (\sqrt{3} \times 5)\angle (-120^\circ - 30^\circ) = 5\sqrt{3}\angle -150^\circ \text{ A}$$

$$\overline{I_C} = (\sqrt{3} \times 5)\angle (120^\circ - 30^\circ) = 5\sqrt{3}\angle 90^\circ \text{ A}$$

馬上練習 承上題，若電源改為負相序 Δ 型連接，試求線電流 \overline{I}_A 、 \overline{I}_B 及 \overline{I}_C 為多少？

【答】 $\overline{I}_A = 5\sqrt{3}\angle 30^\circ \text{ A}$ ， $\overline{I}_B = 5\sqrt{3}\angle 150^\circ \text{ A}$ ， $\overline{I}_C = 5\sqrt{3}\angle -90^\circ \text{ A}$ 。

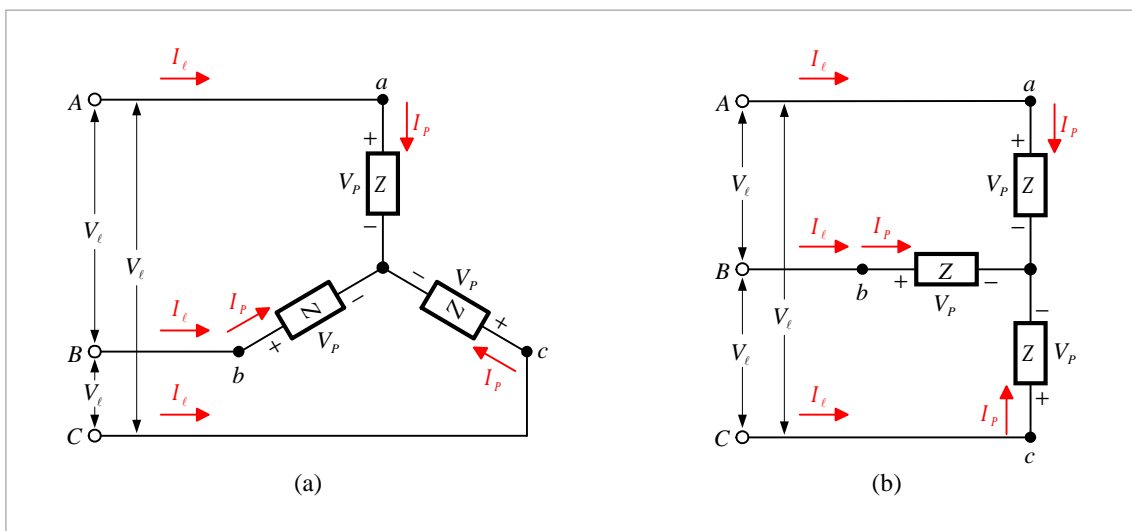
註：負相序 Δ 型連接的三相發電機，其線電流亦為對應相電流的 $\sqrt{3}$ 倍，但相角超前 30° 。

12-3.4 交流三相平衡負載

三相發電機在連接負載時，也如同前述有 Y 型及 Δ 型兩種接法；若連接的三個負載的阻抗完全等值，則系統成為三相平衡負載，流經各負載的電流大小相等、功率相同。

平衡 Y 型連接負載

圖 12-12 為平衡 Y 型連接負載的圖示，其線電壓與相電壓、線電流與相電流的關係，和前面討論的 Y 型連接發電機相同。因此我們可以將相關的特性整理如下：



▲ 圖 12-12 平衡 Y 型連接負載



1. 線電壓爲相電壓的 $\sqrt{3}$ 倍，即 $V_\ell = \sqrt{3}V_p$ （線電壓相位超前相電壓 30° ）。
2. 線電流等於相電流，即 $I_\ell = I_p$ ；其中 $I_p = \frac{V_p}{Z}$ 。
3. 在平衡三相系統中，通過各負載的電流與電壓都相同，所以總視在功率爲各相視在功率的 3 倍。即：

$$\begin{aligned} S_T &= 3S_p = 3V_p I_p = 3I_p^2 Z \\ &= \sqrt{3}V_\ell I_\ell = 3I_\ell^2 Z \end{aligned} \quad (12-3-5)$$

4. 在平衡三相系統中，總平均功率爲各相平均功率的 3 倍。即：

$$\begin{aligned} P_T &= 3P_p = 3V_p I_p \cos \theta_p = 3I_p^2 R \\ &= \sqrt{3}V_\ell I_\ell \cos \theta_p = 3I_\ell^2 R \end{aligned} \quad (12-3-6)$$

其中，若各相負載的阻抗爲 $\bar{Z} = R + jX$ （ $X > 0$ ，阻抗爲電感性； $X < 0$ ，阻抗爲電容性），則功率因數角 $\theta_p = -\tan^{-1} \frac{X}{R}$ （ $X > 0$ 時， $\theta_p < 0$ ，電流滯後電壓； $X < 0$ 時， $\theta_p > 0$ ，電流超前電壓）。

5. 在平衡三相系統中，總虛功率爲各相虛功率的 3 倍。即：

$$\begin{aligned} Q_T &= 3Q_p = 3V_p I_p \sin \theta_p = 3I_p^2 (-X) \\ &= \sqrt{3}V_\ell I_\ell \sin \theta_p = 3I_\ell^2 (-X) \end{aligned} \quad (12-3-7)$$

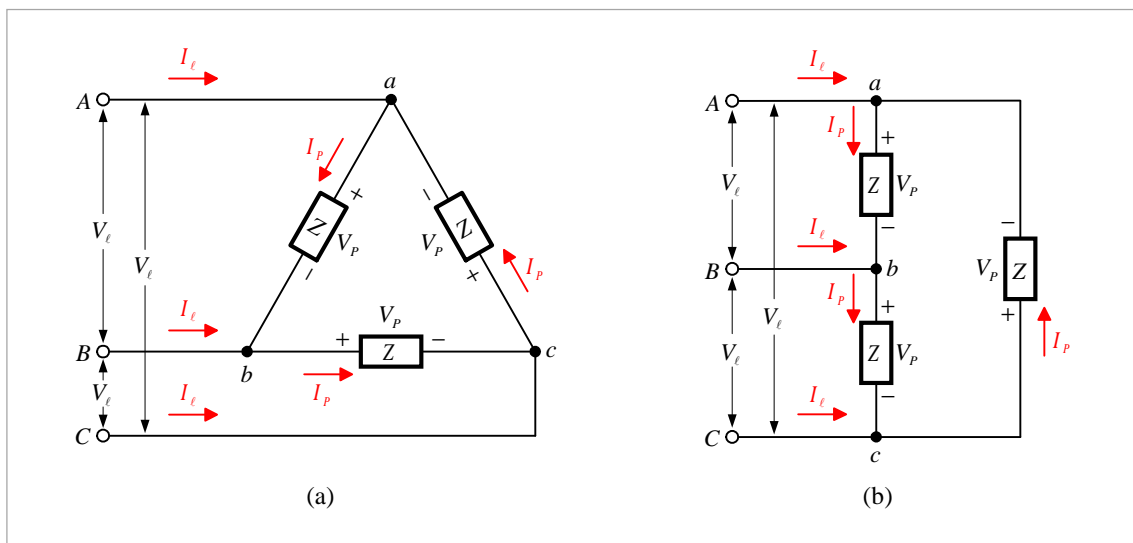
其中， $X > 0$ 時， $Q_T < 0$ ，爲電感性電抗功率； $X < 0$ 時， $Q_T > 0$ ，爲電容性電抗功率。

6. 功率因數爲：

$$PF = \cos\theta_p = \frac{P_T}{S_T} = \frac{R}{Z} \quad (12-3-8)$$

平衡△型連接負載

圖 12-13 爲平衡△型連接負載的圖示，其線電壓與相電壓、線電流與相電流的關係，和前面討論的△型連接發電機相同。因此我們可以將相關的特性整理如下：



▲ 圖 12-13 平衡△型連接負載

1. 線電壓等於相電壓，即 $V_l = V_p$ 。
2. 線電流爲相電流的 $\sqrt{3}$ 倍，即 $I_l = \sqrt{3}I_p$ （線電流相位滯後相電流 30° ）；其中 $I_p = \frac{V_p}{Z}$ 。



3. 在平衡三相系統中，總視在功率為各相視在功率的 3 倍。即：

$$\begin{aligned} S_T &= 3S_p = 3V_p I_p = 3I_p^2 Z \\ &= \sqrt{3}V_\ell I_\ell = I_\ell^2 Z \end{aligned} \quad (12-3-9)$$

4. 在平衡三相系統中，總平均功率為各相平均功率的 3 倍。即：

$$\begin{aligned} P_T &= 3P_p = 3V_p I_p \cos\theta_p = 3I_p^2 R \\ &= \sqrt{3}V_\ell I_\ell \cos\theta_p = I_\ell^2 R \end{aligned} \quad (12-3-10)$$

其中，功率因數角 $\theta_p = -\tan^{-1} \frac{X}{R}$ 。

5. 在平衡三相系統中，總虛功率為各相虛功率的 3 倍。即：

$$\begin{aligned} Q_T &= 3Q_p = 3V_p I_p \sin\theta_p = 3I_p^2 (-X) \\ &= \sqrt{3}V_\ell I_\ell \sin\theta_p = I_\ell^2 (-X) \end{aligned} \quad (12-3-11)$$

6. 功率因數為：

$$PF = \cos\theta_p = \frac{P_T}{S_T} = \frac{R}{Z} \quad (12-3-12)$$

三相平衡電路

綜合上述，我們可以分別結合三相發電機與負載的 Y 型、 Δ 型接法，則三相平衡電路將有 Y-Y、Y- Δ 、 Δ -Y、 Δ - Δ 等四種型式，整理如表 12-1 所示。

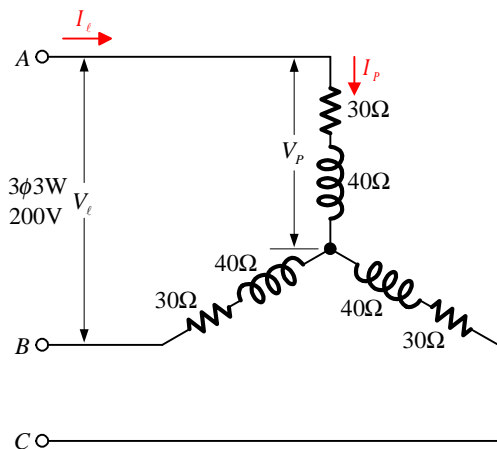
表 12-1 三相平衡電路

Y-Y 連接	電壓與電流特性
	$E_\ell = \sqrt{3}E_p = V_\ell = \sqrt{3}V_z$ $I_\ell = I_p = I_z$ $I_N = 0$
Y-Δ 連接	電壓與電流特性
	$E_\ell = \sqrt{3}E_p = V_\ell = V_z$ $I_\ell = I_p = \sqrt{3}I_z$
Δ-Y 連接	電壓與電流特性
	$E_\ell = E_p = V_\ell = \sqrt{3}V_z$ $I_\ell = \sqrt{3}I_p = I_z$
Δ-Δ 連接	電壓與電流特性
	$E_\ell = E_p = V_\ell = V_z$ $I_\ell = \sqrt{3}I_p = \sqrt{3}I_z$



範例 12-6

如下圖所示之平衡 Y 型連接負載，試求 (1) 線電壓 V_ℓ 與相電壓 V_p (2) 線電流 I_ℓ 與相電流 I_p (3) 總視在功率 S_T (4) 總平均功率 P_T (5) 總虛功率 Q_T (6) 功率因數角 θ_p 與功率因數 PF 為多少？



【解】電源提供的電壓為 200V，且 $\bar{Z} = R + jX = 30 + j40 \Omega$ ，所以：

$$(1) V_\ell = 200 \text{ V} \quad V_p = \frac{V_\ell}{\sqrt{3}} = \frac{200}{\sqrt{3}} = \frac{200\sqrt{3}}{3} \text{ V}$$

$$(2) I_\ell = I_p = \frac{V_p}{Z} = \frac{\frac{200\sqrt{3}}{3}}{\sqrt{30^2 + 40^2}} = \frac{4\sqrt{3}}{3} \text{ A}$$

$$(3) S_T = 3V_p I_p = 3 \times \frac{200\sqrt{3}}{3} \times \frac{4\sqrt{3}}{3} = 800 \text{ VA}$$

$$(4) P_T = 3I_p^2 R = 3 \times \left(\frac{4\sqrt{3}}{3}\right)^2 \times 30 = 480 \text{ W}$$

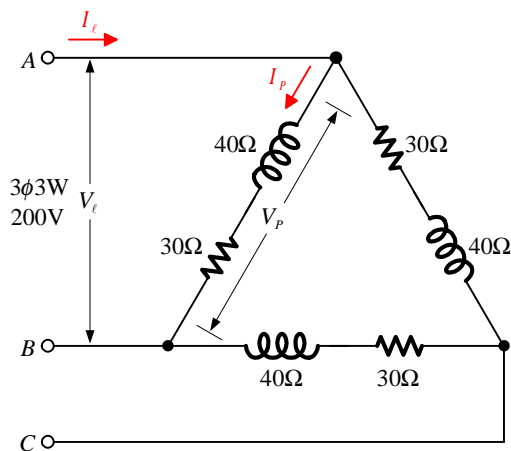
$$(5) Q_T = 3I_p^2 (-X) = 3 \times \left(\frac{4\sqrt{3}}{3}\right)^2 \times (-40) = -640 \text{ VAR (負號表示為電感性電抗功率)}$$

$$(6) \theta_p = -\tan^{-1} \frac{X}{R} = -\tan^{-1} \frac{40}{30} = -53^\circ$$

$$PF = \cos \theta_p = \cos(-53^\circ) = 0.6 \text{ (功率因數為滯後)}$$

馬上練習

如下圖所示之平衡 Δ 型連接負載，試求 (1) 線電壓 V_ℓ 與相電壓 V_p (2) 線電流 I_ℓ 與相電流 I_p (3) 總視在功率 S_T (4) 總平均功率 P_T (5) 總虛功率 Q_T (6) 功率因數角 θ_p 與功率因數 PF 為多少？

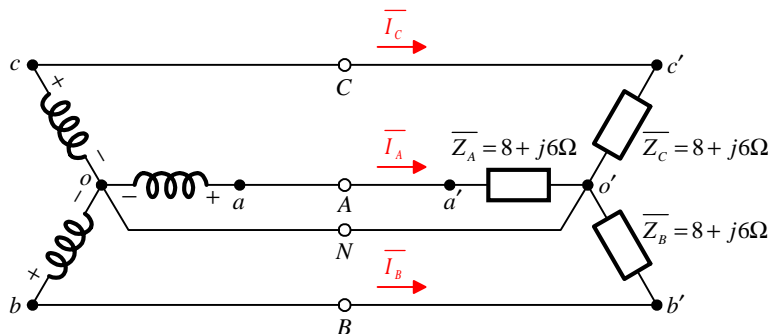


- 【答】(1) $V_\ell = V_p = 200 \text{ V}$ (4) $P_T = 1440 \text{ W}$
 (2) $I_p = 4 \text{ A}$, $I_\ell = 4\sqrt{3} \text{ A}$ (5) $Q_T = -1920 \text{ VAR}$
 (3) $S_T = 2400 \text{ VA}$ (6) $\theta_p = -53^\circ$, $PF = 0.6$
 (功率因數滯後)



範例 12-7

如下圖所示之 Y-Y 型三相電路，若發電機相序為 ABC， $\overline{E_{ao}} = 100\angle 0^\circ \text{ V}$ ，試求負載側之 (1) 線電壓 $\overline{V_{AB}}$ 、 $\overline{V_{BC}}$ 、 $\overline{V_{CA}}$ (2) 相電壓 $\overline{V_{a'o'}}$ 、 $\overline{V_{b'o'}}$ 、 $\overline{V_{c'o'}}$ (3) 相電流 $\overline{I_{a'o'}}$ 、 $\overline{I_{b'o'}}$ 、 $\overline{I_{c'o'}}$ (4) 線電流 $\overline{I_A}$ 、 $\overline{I_B}$ 、 $\overline{I_C}$ (5) 總平均功率 P_T (6) 功率因數 PF 為多少？





【解】三相電源為正相序，則 B 相滯後 A 相 120° 、C 相超前 A 相 120° ，即

$$\overline{E_{ao}} = 100\angle 0^\circ \text{ V} \quad \overline{E_{bo}} = 100\angle -120^\circ \text{ V} \quad \overline{E_{co}} = 100\angle 120^\circ \text{ V}$$

(1) Y 型連接之線電壓為對應相電壓的 $\sqrt{3}$ 倍，且相位超前 30° ，即

$$\overline{V_{AB}} = \overline{E_{AB}} = (\sqrt{3} \times 100)\angle(0^\circ + 30^\circ) = 100\sqrt{3}\angle 30^\circ \text{ V}$$

$$\overline{V_{BC}} = \overline{E_{BC}} = (\sqrt{3} \times 100)\angle(-120^\circ + 30^\circ) = 100\sqrt{3}\angle -90^\circ \text{ V}$$

$$\overline{V_{CA}} = \overline{E_{CA}} = (\sqrt{3} \times 100)\angle(120^\circ + 30^\circ) = 100\sqrt{3}\angle 150^\circ \text{ V}$$

(2) Y 型連接之相電壓為對應線電壓的 $\frac{1}{\sqrt{3}}$ 倍，且相位滯後 30° ，即

$$\overline{V_{a'o'}} = \left(\frac{1}{\sqrt{3}} \times 100\sqrt{3}\right)\angle(30^\circ - 30^\circ) = 100\angle 0^\circ \text{ V}$$

$$\overline{V_{b'o'}} = \left(\frac{1}{\sqrt{3}} \times 100\sqrt{3}\right)\angle(-90^\circ - 30^\circ) = 100\angle -120^\circ \text{ V}$$

$$\overline{V_{c'o'}} = \left(\frac{1}{\sqrt{3}} \times 100\sqrt{3}\right)\angle(150^\circ - 30^\circ) = 100\angle 120^\circ \text{ V}$$

(即電源側與負載側之相電壓相等)

$$(3) \overline{I_{a'o'}} = \frac{\overline{V_{a'o'}}}{Z_A} = \frac{100\angle 0^\circ}{8 + j6} = \frac{100\angle 0^\circ}{10\angle 37^\circ} = 10\angle -37^\circ \text{ A}$$

$$\overline{I_{b'o'}} = \frac{\overline{V_{b'o'}}}{Z_B} = \frac{100\angle -120^\circ}{8 + j6} = \frac{100\angle -120^\circ}{10\angle 37^\circ} = 10\angle -157^\circ \text{ A}$$

$$\overline{I_{c'o'}} = \frac{\overline{V_{c'o'}}}{Z_C} = \frac{100\angle 120^\circ}{8 + j6} = \frac{100\angle 120^\circ}{10\angle 37^\circ} = 10\angle 83^\circ \text{ A}$$

(4) Y 型連接之線電流等於相電流，即

$$\overline{I_A} = \overline{I_{a'o'}} = 10\angle -37^\circ \text{ A}$$

$$\overline{I_B} = \overline{I_{b'o'}} = 10\angle -157^\circ \text{ A}$$

$$\overline{I_C} = \overline{I_{c'o'}} = 10\angle 83^\circ \text{ A}$$

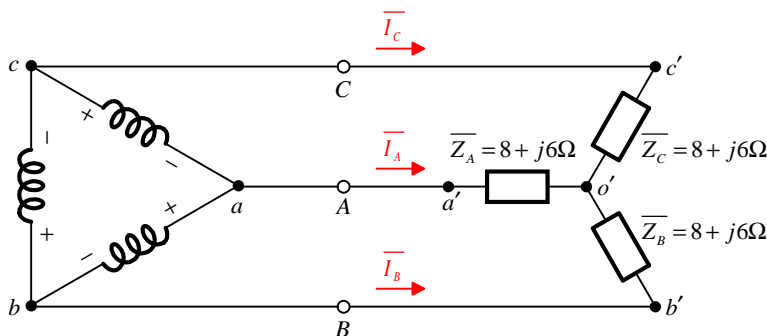
$$(5) P_T = 3I_p^2 R = 3 \times 10^2 \times 8 = 2400 \text{ W}$$

$$(6) PF = \cos \theta_p = \frac{R}{Z} = \frac{8}{\sqrt{8^2 + 6^2}} = 0.8 \text{ (功率因數為滯後)}$$

馬上練習

如下圖所示之 Δ - Y 型三相電路，若發電機相序為 ABC，
 $\overline{E_{ab}} = 100\angle 0^\circ \text{ V}$ ，試求負載側之

- (1) 線電壓 $\overline{V_{AB}}$ 、 $\overline{V_{BC}}$ 、 $\overline{V_{CA}}$
- (2) 相電壓 $\overline{V_{a'o'}}$ 、 $\overline{V_{b'o'}}$ 、 $\overline{V_{c'o'}}$
- (3) 相電流 $\overline{I_{a'o'}}$ 、 $\overline{I_{b'o'}}$ 、 $\overline{I_{c'o'}}$
- (4) 線電流 $\overline{I_A}$ 、 $\overline{I_B}$ 、 $\overline{I_C}$
- (5) 總平均功率 P_T
- (6) 功率因數 PF 為多少？



【答】(1) $\overline{V_{AB}} = 100\angle 0^\circ \text{ V}$ ， $\overline{V_{BC}} = 100\angle -120^\circ \text{ V}$ ， $\overline{V_{CA}} = 100\angle 120^\circ \text{ V}$

$$(2) \overline{V_{a'o'}} = \frac{100}{\sqrt{3}}\angle -30^\circ \text{ V}, \overline{V_{b'o'}} = \frac{100}{\sqrt{3}}\angle -150^\circ \text{ V},$$

$$\overline{V_{c'o'}} = \frac{100}{\sqrt{3}}\angle 90^\circ \text{ V}$$

$$(3) \overline{I_{a'o'}} = \frac{10}{\sqrt{3}}\angle -67^\circ \text{ A}, \overline{I_{b'o'}} = \frac{10}{\sqrt{3}}\angle -187^\circ \text{ A},$$

$$\overline{I_{c'o'}} = \frac{10}{\sqrt{3}}\angle 53^\circ \text{ A}$$

$$(4) \overline{I_A} = \frac{10}{\sqrt{3}}\angle -67^\circ \text{ A}, \overline{I_B} = \frac{10}{\sqrt{3}}\angle -187^\circ \text{ A}, \overline{I_C} = \frac{10}{\sqrt{3}}\angle 53^\circ \text{ A}$$

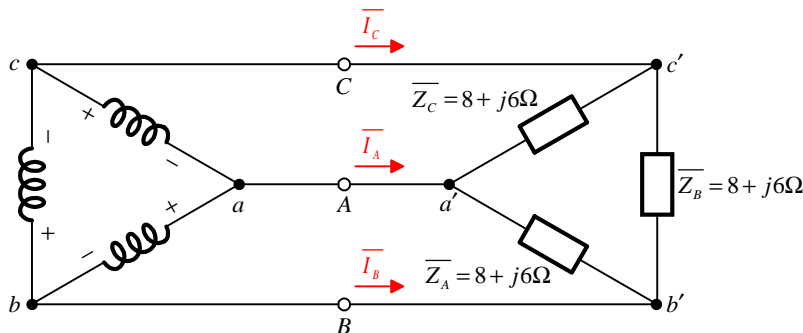
$$(5) P_T = 800 \text{ W}$$

$$(6) PF = 0.8 \text{ (功率因數滯後)}$$



範例 12-8

如下圖所示之 $\Delta - \Delta$ 型三相電路，若發電機相序為 ABC， $\overline{E_{ab}} = 100\angle 0^\circ \text{ V}$ ，試求負載側之 (1) 線電壓 $\overline{V_{AB}}$ 、 $\overline{V_{BC}}$ 、 $\overline{V_{CA}}$ (2) 相電壓 $\overline{V_{a'b'}}$ 、 $\overline{V_{b'c'}}$ 、 $\overline{V_{c'a'}}$ (3) 相電流 $\overline{I_{a'b'}}$ 、 $\overline{I_{b'c'}}$ 、 $\overline{I_{c'a'}}$ (4) 線電流 $\overline{I_A}$ 、 $\overline{I_B}$ 、 $\overline{I_C}$ (5) 總平均功率 P_T (6) 功率因數 PF 為多少？



【解】三相電源為正相序，則 B 相滯後 A 相 120° 、C 相超前 A 相 120° ，即

$$\overline{E_{ab}} = 100\angle 0^\circ \text{ V} \quad \overline{E_{bc}} = 100\angle -120^\circ \text{ V} \quad \overline{E_{ca}} = 100\angle 120^\circ \text{ V}$$

(1)、(2) Δ 型連接之線電壓等於相電壓，即

$$\overline{V_{AB}} = \overline{V_{a'b'}} = \overline{E_{AB}} = \overline{E_{ab}} = 100\angle 0^\circ \text{ V}$$

$$\overline{V_{BC}} = \overline{V_{b'c'}} = \overline{E_{BC}} = \overline{E_{bc}} = 100\angle -120^\circ \text{ V}$$

$$\overline{V_{CA}} = \overline{V_{c'a'}} = \overline{E_{CA}} = \overline{E_{ca}} = 100\angle 120^\circ \text{ V}$$

$$(3) \quad \overline{I_{a'b'}} = \frac{\overline{V_{a'b'}}}{\overline{Z_A}} = \frac{100\angle 0^\circ}{8 + j6} = \frac{100\angle 0^\circ}{10\angle 37^\circ} = 10\angle -37^\circ \text{ A}$$

$$\overline{I_{b'c'}} = \frac{\overline{V_{b'c'}}}{\overline{Z_B}} = \frac{100\angle -120^\circ}{8 + j6} = \frac{100\angle -120^\circ}{10\angle 37^\circ} = 10\angle -157^\circ \text{ A}$$

$$\overline{I_{c'a'}} = \frac{\overline{V_{c'a'}}}{\overline{Z_C}} = \frac{100\angle 120^\circ}{8 + j6} = \frac{100\angle 120^\circ}{10\angle 37^\circ} = 10\angle 83^\circ \text{ A}$$

(4) Δ 型連接之線電流為對應相電流的 $\sqrt{3}$ 倍，且相位滯後 30° ，即

$$\overline{I_A} = (\sqrt{3} \times 10)\angle (-37^\circ - 30^\circ) = 10\sqrt{3}\angle -67^\circ \text{ A}$$

$$\overline{I_B} = (\sqrt{3} \times 10)\angle (-157^\circ - 30^\circ) = 10\sqrt{3}\angle -187^\circ \text{ A}$$

$$\overline{I_C} = (\sqrt{3} \times 10)\angle (83^\circ - 30^\circ) = 10\sqrt{3}\angle 53^\circ \text{ A}$$

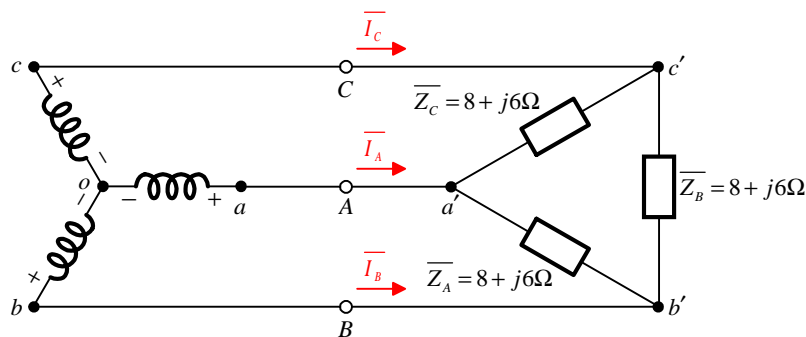
$$(5) P_T = 3I_p^2 R = 3 \times 10^2 \times 8 = 2400 \text{ W}$$

$$(6) PF = \cos \theta_p = \frac{R}{Z} = \frac{8}{\sqrt{8^2 + 6^2}} = 0.8 \text{ (功率因數為滯後)}$$

馬上練習 如下圖所示之 Y- Δ 型三相電路，若發電機相序為 ABC，

$\overline{E_{ao}} = 100 \angle 0^\circ \text{ V}$ ，試求負載側之

- | | |
|-------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| (1) 線電壓 $\overline{V_{AB}}$ 、 $\overline{V_{BC}}$ 、 $\overline{V_{CA}}$ | (2) 相電壓 $\overline{V_{a'b'}}$ 、 $\overline{V_{b'c'}}$ 、 $\overline{V_{c'a'}}$ |
| (3) 相電流 $\overline{I_{a'b'}}$ 、 $\overline{I_{b'c'}}$ 、 $\overline{I_{c'a'}}$ | (4) 線電流 $\overline{I_A}$ 、 $\overline{I_B}$ 、 $\overline{I_C}$ |
| (5) 總平均功率 P_T | (6) 功率因數 PF 為多少？ |



- 【答】(1) $\overline{V_{AB}} = 100\sqrt{3} \angle 30^\circ \text{ V}$ ， $\overline{V_{BC}} = 100\sqrt{3} \angle -90^\circ \text{ V}$ ， $\overline{V_{CA}} = 100\sqrt{3} \angle 150^\circ \text{ V}$
- (2) $\overline{V_{a'b'}} = 100\sqrt{3} \angle 30^\circ \text{ V}$ ， $\overline{V_{b'c'}} = 100\sqrt{3} \angle -90^\circ \text{ V}$ ， $\overline{V_{c'a'}} = 100\sqrt{3} \angle 150^\circ \text{ V}$
- (3) $\overline{I_{a'b'}} = 10\sqrt{3} \angle -7^\circ \text{ A}$ ， $\overline{I_{b'c'}} = 10\sqrt{3} \angle -127^\circ \text{ A}$ ， $\overline{I_{c'a'}} = 10\sqrt{3} \angle 113^\circ \text{ A}$
- (4) $\overline{I_A} = 30 \angle -37^\circ \text{ A}$ ， $\overline{I_B} = 30 \angle -157^\circ \text{ A}$ ， $\overline{I_C} = 30 \angle 83^\circ \text{ A}$
- (5) $P_T = 7200 \text{ W}$
- (6) $PF = 0.8$ (功率因數滯後)



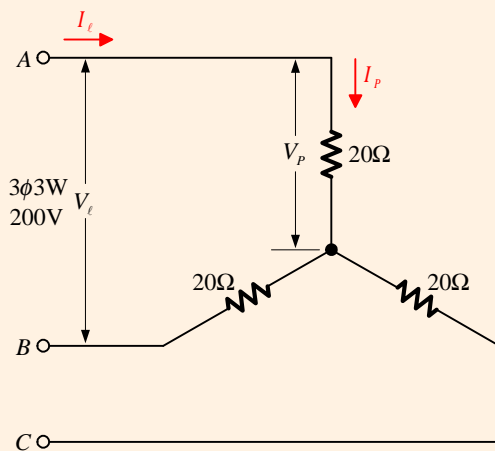
單元評量

1. 在三相 Y 型的接線中，電壓與電流的特性為：線 _____ 等於相 _____ ；
線 _____ 為相 _____ 的 _____ 倍，且相位 _____ 30° 。
2. 在三相 Δ 型的接線中，電壓與電流的特性為：線 _____ 等於相 _____ ；
線 _____ 為相 _____ 的 _____ 倍，且相位 _____ 30° 。
3. 某交流三相發電機，電源為正相序 Y 型連接，若 A 相電壓 $\overline{E_{ao}} = 100 \angle 60^\circ \text{ V}$ ，則
線電壓 $\overline{E_{AB}} =$ _____ V， $\overline{E_{BC}} =$ _____ V， $\overline{E_{CA}} =$ _____ V。
4. 某交流三相發電機，電源為正相序 Δ 型連接，若 B 相電壓 $\overline{E_{bo}} = 100 \angle 60^\circ \text{ V}$ ，則
線電壓 $\overline{E_{AB}} =$ _____ V， $\overline{E_{BC}} =$ _____ V， $\overline{E_{CA}} =$ _____ V。

5. 如圖(1)所示之平衡 Y 型連接負載，

試求：

- (1) 線電壓 $V_\ell =$ _____ V
- (2) 相電壓 $V_p =$ _____ V
- (3) 線電流 $I_\ell =$ _____ A
- (4) 相電流 $I_p =$ _____ A
- (5) 總平均功率 $P_T =$ _____ W
- (6) 總虛功率 $Q_T =$ _____ VAR
- (7) 功率因數 $PF =$ _____

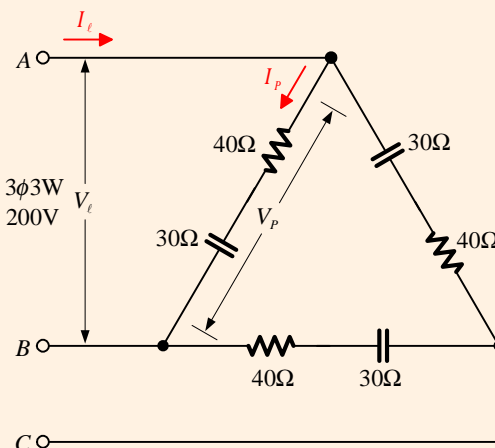


圖(1)

6. 如圖(2)所示之平衡 Δ 型連接負載，

試求：

- (1) 線電壓 $V_\ell =$ _____ V
- (2) 相電壓 $V_p =$ _____ V
- (3) 線電流 $I_\ell =$ _____ A
- (4) 相電流 $I_p =$ _____ A
- (5) 總平均功率 $P_T =$ _____ W
- (6) 總虛功率 $Q_T =$ _____ VAR
- (7) 功率因數 $PF =$ _____



圖(2)



重點摘要

1. 單相二線式（ $1\phi 2W$ ）交流電源利用二條導線連接至負載，一條導線為火線（紅色或黑色），另一條為地線（白色，接地線為綠色）。其在結構上較為簡單，但線路的壓降及電能的損耗都比較大，故在較大的電力系統中不適宜使用。
2. 單相三線式（ $1\phi 3W$ ）交流電源利用三條導線連接至負載，其中有兩條導線是火線（紅色或黑色），一條共用的地線或稱中性線（白色，接地線為綠色）。其可提供兩種不同的電壓（110V 及 220V），且線路有較小的電能損耗，並能減少導線的使用量以降低成本。
3. 在單相三線式（ $1\phi 3W$ ）的系統中，不可在中性線上設置過載保護裝置（保險絲），否則在負載不平衡的情況下，中性線斷路將導致額定功率較小（額定電流小、阻抗大）之設備的端電壓上升而可能造成燒毀。
4. 電路所連接的負載有相同的阻抗大小與相同的相角時稱為平衡負載；當單相三線系統採用平衡負載時，中性線上的電流為零。
5. 三相電源系統輸出三組相等的正弦波電壓，而三組電壓間各有 120° 的相位差，且在任何瞬間的電壓和為零。三組電壓分別為：

$$e_A = E_m \sin \omega t = \sqrt{2}E \sin \omega t \quad [\text{V, 伏特}]$$

$$e_B = E_m \sin(\omega t - 120^\circ) = \sqrt{2}E \sin(\omega t - 120^\circ) \quad [\text{V, 伏特}]$$

$$e_C = E_m \sin(\omega t - 240^\circ) = E_m \sin(\omega t + 120^\circ) = \sqrt{2}E \sin(\omega t + 120^\circ) \quad [\text{V, 伏特}]$$

6. 平衡三相電源的連接：

Y 型連接	Δ 型連接
$E_l = \sqrt{3}E_p$ (線電壓超前對應之相電壓 30°) $I_l = I_p$ (線電流等於相電流)	$E_l = E_p$ (線電壓等於相電壓) $I_l = \sqrt{3}I_p$ (線電流滯後對應之相電流 30°)



7. 平衡三相負載的连接：

Y 型連接	△ 型連接
$V_l = \sqrt{3}V_p$ (線電壓超前對應之相電壓 30°) $I_l = I_p$ (線電流等於相電流) 阻抗： $\bar{Z} = R + jX$ 視在功率： $S_T = 3V_p I_p = 3I_p^2 Z$ $= \sqrt{3}V_l I_l = 3I_l^2 Z$ 平均功率： $P_T = 3V_p I_p \cos\theta_p = 3I_p^2 R$ $= \sqrt{3}V_l I_l \cos\theta_p = 3I_l^2 R$ 虛功率： $Q_T = 3V_p I_p \sin\theta_p = 3I_p^2 (-X)$ $= \sqrt{3}V_l I_l \sin\theta_p = 3I_l^2 (-X)$ 功率因數角： $\theta_p = -\tan^{-1} \frac{X}{R}$ 功率因數： $PF = \cos\theta_p = \frac{P_T}{S_T} = \frac{R}{Z}$	$V_l = V_p$ (線電壓等於相電壓) $I_l = \sqrt{3}I_p$ (線電流滯後對應之相電流 30°) 阻抗： $\bar{Z} = R + jX$ 視在功率： $S_T = 3V_p I_p = 3I_p^2 Z$ $= \sqrt{3}V_l I_l = I_l^2 Z$ 平均功率： $P_T = 3V_p I_p \cos\theta_p = 3I_p^2 R$ $= \sqrt{3}V_l I_l \cos\theta_p = I_l^2 R$ 虛功率： $Q_T = 3V_p I_p \sin\theta_p = 3I_p^2 (-X)$ $= \sqrt{3}V_l I_l \sin\theta_p = I_l^2 (-X)$ 功率因數角： $\theta_p = -\tan^{-1} \frac{X}{R}$ 功率因數： $PF = \cos\theta_p = \frac{P_T}{S_T} = \frac{R}{Z}$



學後評量

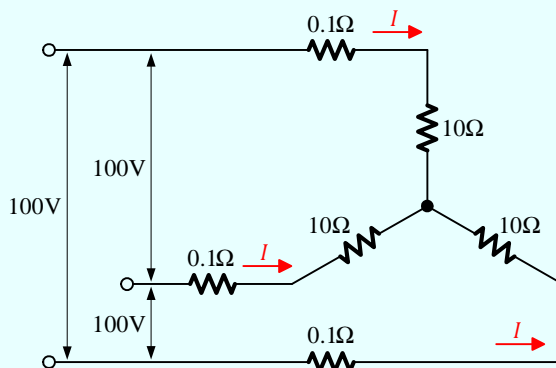
一、選擇題

- () 1. 單相電源系統不適用於大型工廠的原因是 (A)電壓不足 (B)電流不穩定 (C)頻率太高 (D)只有單一相位
- () 2. 採用單相三線系統，如果要使中性線不通過電流，應 (A)採用平衡負載 (B)採用不同電壓的電源 (C)採用不同相位的電源 (D)採用較粗的導線
- () 3. 下列何者不是三相平衡電源所需具備的條件？ (A)電壓大小相同 (B)相位角相同 (C)功率相同 (D)以上皆為三相電源應具備的條件
- () 4. 有一三相發電機接成 Δ 型時，可輸出 220V 的電壓，若將發電機接成 Y 型時，則輸出的電壓為 (A)175V (B)250V (C)380V (D)440V
- () 5. 有一平衡三相電路，若線電壓為 220V，則各線對中性線的電壓為 (A)220V (B)208V (C)190V (D)127V
- () 6. 三條 220V 電熱線以 Δ 接線同時接於三相 220V 電源，其消耗功率應為 3kW；若改接成 Y 接線，其消耗功率應為 (A)1kW (B) $\sqrt{3}$ kW (C)3kW (D) $3\sqrt{3}$ kW
- () 7. 220V 的 Y 接線三相平衡電源，供給一平衡三相負載的功率為 22kW，若線電流為 100A，則負載功率因數為 (A)0 (B)1 (C) $\sqrt{3}$ (D) $\frac{1}{\sqrt{3}}$
- () 8. 在 Y- Δ 型平衡三相電路中，電源側相電壓的大小是負載側線電壓的大小的 (A)1 倍 (B) $\sqrt{2}$ 倍 (C) $\frac{1}{\sqrt{3}}$ 倍 (D) $\sqrt{3}$ 倍
- () 9. 承上題，在正相序的條件下，電源側與負載側相電壓的關係為電源側相電壓 (A)超前 30° (B)滯後 30° (C)超前 60° (D)滯後 60°
- () 10. 平衡三相電源，供電於 Y 型連接負載，每相的負載阻抗為 $8 + j6 \Omega$ ，若三相線電壓為 208V，則總功率為 (A)1152W (B)1996W (C)2498W (D)3456W
- () 11. 有一三相 Δ 平衡負載的相阻抗 $\bar{Z} = 12 \angle 60^\circ \Omega$ ，線電壓為 240V，則該負載消耗總有效功率為 (A)4156.8W (B)7200W (C)14400W (D)2880W
- () 12. 以 Y 型連接的三個平衡負載，其功率為 P ，若將三個負載改接為 Δ 型連接，並接上相同的電源，則功率將為 (A) $\frac{1}{3}P$ (B) P (C) $\sqrt{3}P$ (D) $3P$



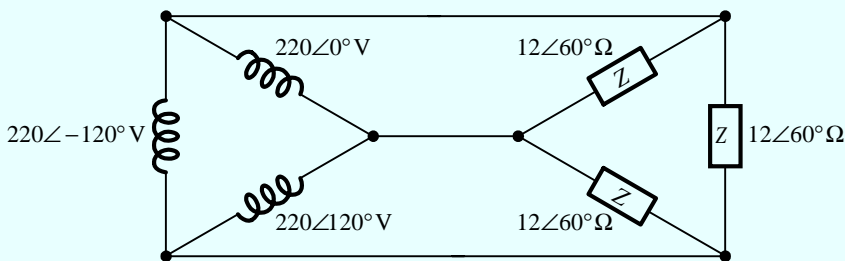


- ()13. 三相平衡電路，電源以 Δ 接線，接於 Y 接線負載。若電源電壓為 $100\sqrt{3}$ V、負載每相阻抗為 $3 + j4 \Omega$ ，則電路的線電流為 (A)20A (B) $20\sqrt{3}$ A (C)60A (D) $60\sqrt{3}$ A
- ()14. 如圖(1)所示的三相電路，試求電流 I 為 (A)5.72A (B)9.90A (C)7.0A (D)4.95A



圖(1)

- ()15. 如圖(2)所示的三相電路，則 Δ 接負載所吸收的三相總功率為多少？ (A) 2016kW (B)3.492kW (C)4.033kW (D)6.05kW

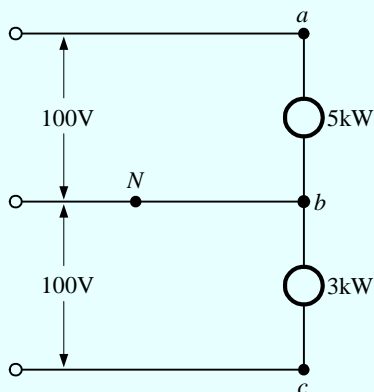


圖(2)



二、計算題

1. 如圖(3)為單相三線式電路，當中性線在 N 處斷線時， a 、 b 間電壓為多少伏特？



圖(3)

- 每相由 $3\ \Omega$ 電阻與 $4\ \Omega$ 感抗串聯的 Y 型三相電路，連接於線電壓為 230V 的三相電源，試求每相的電流為多少？
- 三相平衡負載線至線電壓為 220V，線電流為 10A，每相的功率因數為 0.8，試求負載的總功率為多少？
- 有 3 個 R 歐姆的純電阻電路，連接成 Y 連接後，再接於平衡三相電源，其線電壓為 V 伏特，試求電路的總消耗功率為多少？
- 輸出 5 馬力、功率因數 0.6 滯後之 200 伏特三相電動機，線電流約為多少安培？
- 三相平衡電路之三相實功率為 1000 瓦特，線間電壓為 220 伏特，功率因數為 0.8 落後，其三相視在功率為多少伏安？
- 某平衡三相 Y 型連接負載，其每相阻抗為 $3 - j4\ \Omega$ ，若接於線電壓 220V 的三相電源，試求 (1) 線電壓 V_l 與相電壓 V_p (2) 線電流 I_l 與相電流 I_p (3) 總視在功率 S_T (4) 總平均功率 P_T (5) 總虛功率 Q_T (6) 功率因數角 θ_p 與功率因數 PF 為多少？
- 某平衡三相 Δ 型連接負載，其每相阻抗為 $22\angle 30^\circ\ \Omega$ ，若接於線電壓 220V 的三相電源，試求 (1) 線電壓 V_l 與相電壓 V_p (2) 線電流 I_l 與相電流 I_p (3) 總視在功率 S_T (4) 總平均功率 P_T (5) 總虛功率 Q_T (6) 功率因數角 θ_p 與功率因數 PF 為多少？

