第二章 基本原理

- 2.1 序　言
- 2.2 單相交流電路中的功率
- 2.3 複功率
- 2.4 複功率平衡
- 2.5 功率因數校正
- 2.6 複功率潮流
- 2.7 平衡三相電路
- 2.8 Y接負載
- 2.9 Δ接負載
- 2.10 Δ-Y轉換

第二章 基本原理

- 2.11 單相分析
- 2.12 平衡三相功率

2.1 序 言

- 功率(power)的概念在電力系統中極為重要，也是本章的主要論題。
- 在本章中，將探討在交流電路中能量(energy)的流動。利用各種三角學等式，瞬時功率(instantaneous power) 可被分解成兩個成分。
  容後說明
- 利用 *MATLAB* 所描繪出來的這兩個成分的圖形，可用以觀察出交流網路不但會以一平均的速率消耗能量，也會自電源借入與歸還能。這也導引出平均功率(average power) *P* 與虛功率 (reactive power) *Q* 的基本定義來。
- 伏安(volt-ampere) *S* ——一種以電壓與電流之相量(phasor)型式為基礎之數學陳述。

2.1 序 言

- 低功率因數(power factor) 負載會造成電力傳輸的無效率。
- 考慮兩個電壓源間的複功率傳輸，以及確立實功率對電壓相角的相依性與虛功率對電壓大小的相依性。
- 平衡三相系統的一個重要的性質是輸送定功率。也就是說，它所輸送的功率不會如同單相系統(single-phase system) 般隨時間波動。
- 為了分析與模組化 (模式化) (modeling)，在平衡條件下，單相等效電路 (per-phase equivalent circuit) 已被開發出來供三相系統使用。

2.2 單相交流電路中的功率

- 圖 2.1 顯示一單相正弦電壓 (single-phase sinusoidal voltage) 供應一負載。令瞬時電壓為：

$$v(t) = V_m \cos(\omega t + \theta_v)$$

瞬時電流為：

$$i(t) = I_m \cos(\omega t + \theta_i)$$

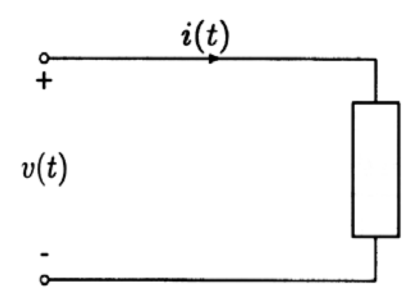


圖 2.1　正弦電源供應一負載

2.2 單相交流電路中的功率

- 輸送至負載的瞬時功率為電壓與電流的乘積：

$$p(t)=v(t)i(t)=V_m I_m \cos(\omega t+\theta_v)\cos(\omega t+\theta_i)$$

- 利用下列三角學等式可將上式寫成另一種型式：

$$\begin{aligned}p(t)&=\frac{1}{2}V_m I_m[\cos(\theta_v-\theta_i)+\cos(2\omega t+\theta_v+\theta_i)]\\&=\frac{1}{2}V_m I_m\{\cos(\theta_v-\theta_i)+\cos[2(\omega t+\theta_v)-(\theta_v-\theta_i)]\}\\&=\frac{1}{2}V_m I_m[\cos(\theta_v-\theta_i)+\cos 2(\omega t+\theta_v)\cos(\theta_v-\theta_i)\\&\quad+\sin 2(\omega t+\theta_v)\sin(\theta_v-\theta_i)]\end{aligned}$$

2.2 單相交流電路中的功率

- 瞬時功率已被分解成兩個成分，第一個成分是：

$$p_R(t) = |V||I|\cos\theta + |V||I|\cos\theta\cos 2(\omega t + \theta_v)$$

第二個成分是：

$$p_X(t) = |V||I|\sin\theta\sin 2(\omega t + \theta_v)$$

2.2　單相交流電路中的功率

- 瞬時功率有下列特徵：

1. 對純電阻而言，阻抗角為零且功率因數為1 (UPF)，以至視在功率與實功率相等，電能被轉換為熱能。
2. 如果電路是純電感性的，電流落後電壓，且平均功率為零。因此，在純電感性電路中並沒有由電能轉為其他非電能型態的能的情況。在純電感性電路端點上的瞬時功率係在電路與電源間來回振盪。當　為$p(t)$正時，能量被儲存在與電感性元件相關聯的磁場中，而當　為$p(t)$負時，能量從電感性元件的磁場中被取回。
3. 如果電路是純電容性的，電流超前電壓，且平均功率為零。因此，也沒有由電能轉為其他非電能型態的能的情況。在純電容性電路端點上的功率係在電源及與電容性元件相關聯的電場間來回振盪。

2.2 單相交流電路中的功率

- 例題 2.1 (chp2ex1, chp2ex1gui)

  圖2.1中的供電電壓為 $v(t)=100\cos\omega t$，且負載為電感性的，其阻抗為 $Z=1.25\angle 60^\circ\ \Omega$。試決定瞬時電流 $i(t)$及瞬時功率$p(t)$的表示式。

$$I_{\max}=\frac{100\angle 0^\circ}{1.25\angle 60^\circ}=80\angle -60^\circ$$

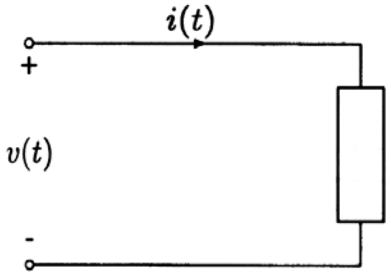


圖 2.1　正弦電源供應一負載

$$i(t)=80\cos(\omega t-60^\circ)$$

$$p(t)=v(t)\,i(t)=8000\cos\omega t\cos(\omega t-60^\circ)$$

2.2 單相交流電路中的功率

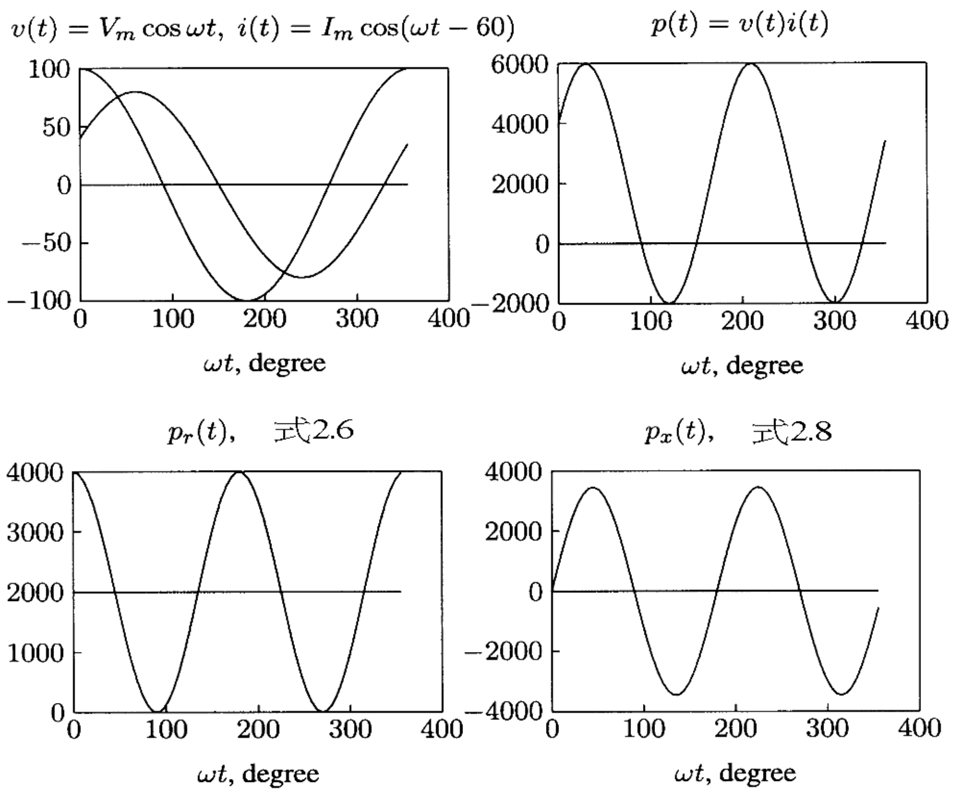


圖2.2 以MATLAB 繪製瞬時電流、電壓、功率圖

2.3 複功率

- 式 (2.1) 的均方根電壓相量與式 (2.2) 的均方根電流相量，如圖 2.3 所示，為：$V = |V| \angle \theta_v$ 及 $I = |I| \angle \theta_i$

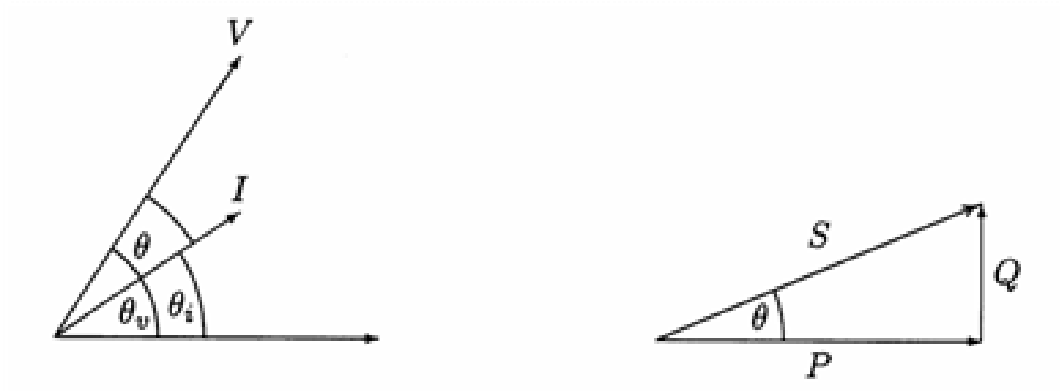


圖2.3 電感性負載 (落後PF) 的相量圖及功率三角形

2.3 複功率

$$VI^* = |V||I|\angle\theta_v - \theta_i = |V||I|\angle\theta$$
$$= |V||I|\cos\theta + j|V||I|\sin\theta$$

上式定義出一個複數量，其實數部分為平均 (實) 功率 P，虛數部分為虛功率 Q。因此，複功率S 為

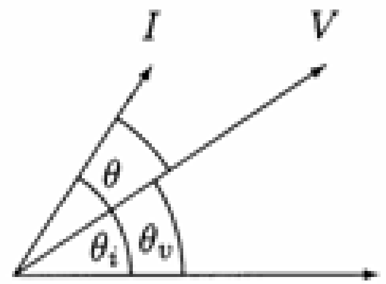
$$S = VI^* = P + jQ$$

S 的大小 $|S| = \sqrt{P^2 + Q^2}$ ，是視在功率；它的單位是伏安，其較大的單位為 kVA 或 MVA。

對電力公司而言，視在功率有實質上的重要性，因為電力公司必須供應平均功率與視在功率兩者給用戶。

2.3 複功率

- 當電壓、電流間的阻抗角為正時(即負載阻抗是電感性的，電流落後電壓)，虛功率 Q 為正。當阻抗角為負時(即負載阻抗是電容性的，電流超前電壓)，虛功率 Q 為負，如圖 2.4 所示。



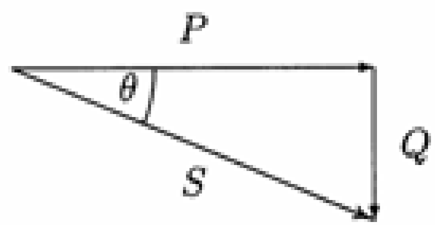
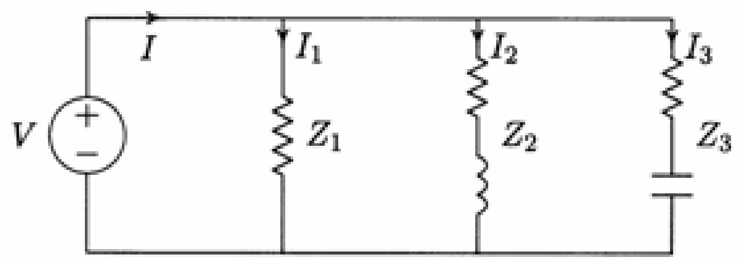


圖2.4 電容性負載(超前PF) 的相量圖及功率三角形。

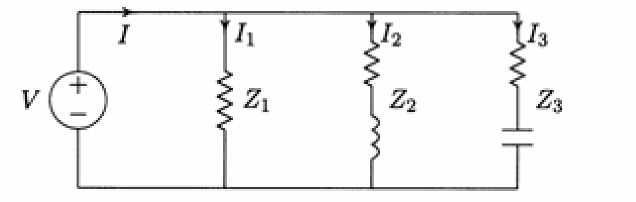
2.4 複功率平衡

- 由能量不滅定律可以清楚得知，由電源供應的實功率與各負載所吸收的實功率總和應相等。在此同時，虛功率間亦必須維持平衡。因此輸送到並聯負載的總複功率為輸送到個別負載之複功率的總合。
- 證明如下：對下圖中的三個負載而言，總複功率為

$$S = VI^* = V[I_1 + I_2 + I_3]^* = VI_1^* + VI_2^* + VI_3^*$$



2.4 複功率平衡



- 例題2.2 (chp2ex2)

在上一電路中，$V = 1200\angle 0°$V，$Z_1 = 60 + j0\,\Omega$，及 $Z_3 = 30 - j30\ \Omega$。試求各負載所吸收的功率及總複功率。

解：

$$I_1 = \frac{1200\angle 0°}{60\angle 0°} = 20 + j0$$

$$I_2 = \frac{1200\angle 0°}{6 + j12} = 40 - j80$$

$$I_3 = \frac{1200\angle 0°}{30 - j30} = 20 + j20$$

$$S_1 = VI_1^* = 1200\angle 0°(20 - j0) = 24{,}000\text{W} + j0\ \text{VAr}$$

$$S_2 = VI_2^* = 1200\angle 0°(40 + j80) = 48{,}000\ \text{W} + j96{,}000\ \text{VAr}$$

$$S_3 = VI_3^* = 1200\angle 0°(20 - j20) = 24{,}000\ \text{W} - j24{,}000\ \text{VAr}$$

$$S = S_1 + S_2 + S_3 = 96{,}000 + j72{,}000\ \text{VA}$$

2.5　功率因數校正

- 如果功率因數小於 1，則視在功率將大於 P。因此，即使在各事例中所供應的平均功率 P 一樣，在 PF < 1 時所供應的電流將大於在 PF = 1 時者。
- 因此，為了電力公司 (以及其用戶) 的最佳利益，在系統中的主要負載之功率因數需儘可能接近 1。
- 為了維持功率因數接近 1，電力公司在系統各必要處裝設電容器組。他們也對運轉在低功率因數的用戶加收額外的費用。
- 因為工業負載是電感性的，有低落後功因，裝置電容器以改善功率因數是有利益的。然而，此一考量對住宅用戶及小型商業用戶而言並不重要，因為他們的功率因數接近 1。

2.5 功率因數校正

- **例題2.3** (chp2ex3)

  兩負載$Z_1 = 100 + j0\ \Omega$及$Z_2 = 10 + j20\ \Omega$被連接在一起，兩端跨以200-V rms，60-Hz 電源，如圖 2.7 所示。

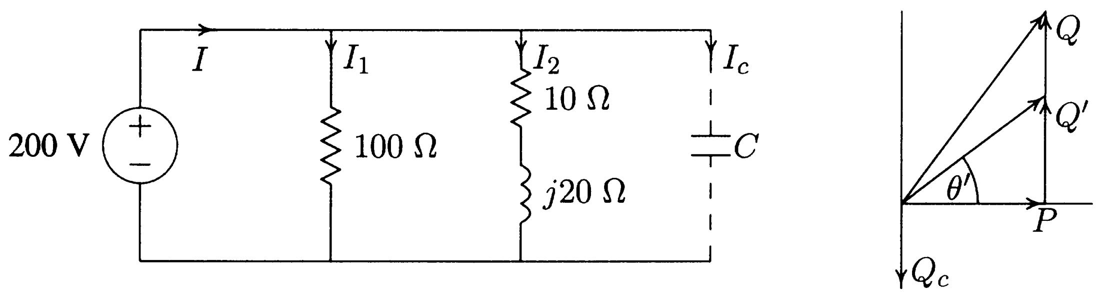
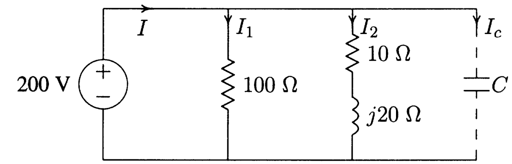
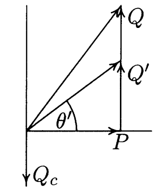


圖 2.7 例題 2.3 用電路及功率三角形

2.5 功率因數校正





(a)求電源處之總實功率、虛功率、功率因數及總電流。

$$I_1 = \frac{200\angle 0^*}{100} = 2\angle 0°\text{A}$$

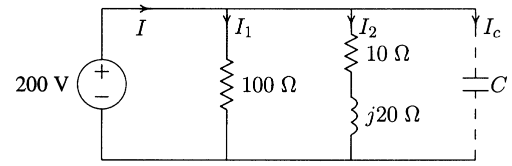
$$I_2 = \frac{200\angle 0°}{10 + j20} = 4 - j8\text{A}$$

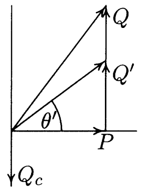
$$S_1 = VI_1^* = 200\angle 0°(2 - j0) = 400\text{W} + j0VAr$$

$$S_2 = VI_2^* = 200\angle 0°(4 + j8) = 800\text{W} + \text{j}1600\text{VAr}$$

$$S = P + jQ = 1200 + j1600 = 2000\angle 53.13°\text{VA}$$

$$PF = \cos(53.13°) = 0.6\text{落後}$$





2.5 功率因數校正

(b)求跨接於負載以改善整體功率因數至 0.8 落後的電容器 的電容

在新功率因數為 0.8 落後時，總實功率 P = 1200 W。因此

$$\theta' = \cos^{-1}(0.8) = 36.87°$$

$$Q' = P\tan\theta' = 1200\tan(36.87°) = 900\ \text{VA}r$$

$$Q_c = 1600 - 900 = 700\ \text{VAr}$$

$$Z_c = \frac{|V|^2}{S_c^*} = \frac{(200)^2}{j700} = -j57.14\Omega$$

$$C = \frac{10^6}{2\pi(60)(57.14)} = 46.42\ \mu\text{F}$$

2.6 複功率潮流

- 考慮兩理想電源被以一阻抗為 $Z = R + jX\ \Omega$ 的導線連接在一起，如圖 2.9 所示。

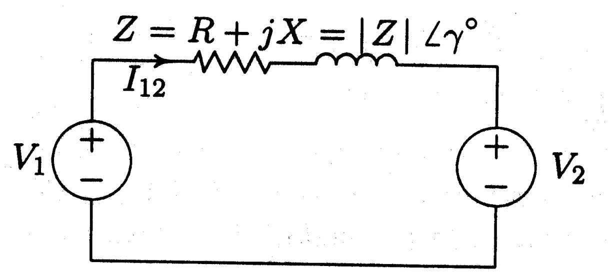


圖 2.9 兩個相連的電壓源

- 令相量電壓為 $V_1 = |V_1|\angle\delta_1$ 及 $V_2 = |V_2|\angle\delta_2$。對已假設好方向的電流而言：

$$I_{12} = \frac{|V_1|\angle\delta_1 - |V_2|\angle\delta_2}{|Z|\angle\gamma} = \frac{|V_1|}{|Z|}\angle\delta_1 - \gamma - \frac{|V_2|}{|Z|}\angle\delta_2 - \gamma$$

2.6 複功率潮流

- 複功率 S_{12} 為：

$$S_{12} = V_1 I_{12}^* = |V_1|\angle\delta_1 \left[\frac{|V_1|}{|Z|}\angle\gamma-\delta_1 - \frac{|V_2|}{|Z|}\angle\gamma-\delta_2 \right]$$

$$= \frac{|V_1|^2}{|Z|}\angle\gamma - \frac{|V_1||V_2|}{|Z|}\angle\gamma+\delta_1-\delta_2$$

- 因此，在送電端的實、虛功率為：

$$P_{12} = \frac{|V_1|^2}{|Z|}\cos\gamma - \frac{|V_1||V_2|}{|Z|}\cos(\gamma+\delta_1-\delta_2)$$

$$Q_{12} = \frac{|V_1|^2}{|Z|}\sin\gamma - \frac{|V_1||V_2|}{|Z|}\sin(\gamma+\delta_1-\delta_2)$$

2.6 複功率潮流

- 相對於電抗而言，電力系統輸電線有較小的電阻。假設 $R=0$ (即 Z = X∠90°)，則P_{12}及Q_{12}將變成以下二式：

$$P_{12} = \frac{|V_1||V_2|}{X}\sin(\delta_1 - \delta_2)$$

$$Q_{12} = \frac{|V_1|}{X}\left[|V_1| - |V_2|\cos(\delta_1 - \delta_2)\right]$$

- 因為$R=0$，所以沒有輸電線損失，且送出去的實功率與接收到的實功率相等。

2.6 複功率潮流

- 從以上的結果可知，對一R/X比甚小的典型電力系統而言，可做出下列重要觀察結論：

1. 式 (2.18) 顯示在δ_1 或δ_2 上的小改變會對實功率潮流有很顯著的影響，而在電壓大小上的小改變則察覺不出對實功率潮流有甚麼影響。
2. 假設$R=0$，則理論上最大功率 (靜態輸電容量) 發生在 $\delta=90^\circ$時，且最大功率轉移量為：

非常重要，背起來

$$\boxed{P_{\max} = \frac{|V_1||V_2|}{X}}$$

3. 為維持暫態穩定度，通常電力系統係運轉在較小的負載角下。此外，虛功率潮流係由兩端電壓的大小差來決定。

2.6 複功率潮流

- 例題2.5 **(chp2ex5)**

  兩電壓源 $V_1 = 120\angle -5^\circ$ V 及 $V_2 = 100\angle 0^\circ$ V 被一阻抗為 $Z = 1 + j7\,\Omega$ 的短導線連接在一起，如圖 2.9 所示。試決定各電源所供應與接收的實、虛功率及導線的功率損失。

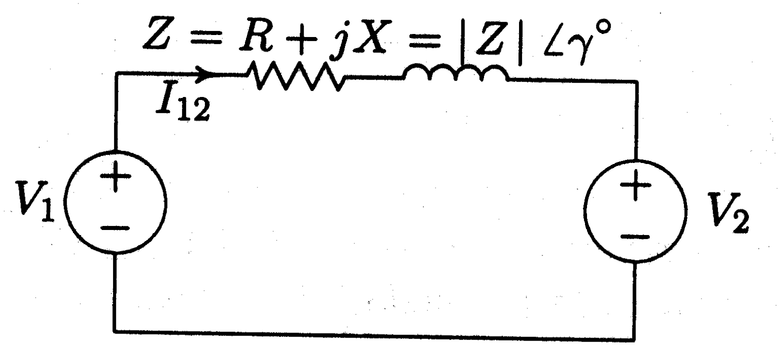


圖 2.9 兩個相連的電壓源

2.6 複功率潮流

解：

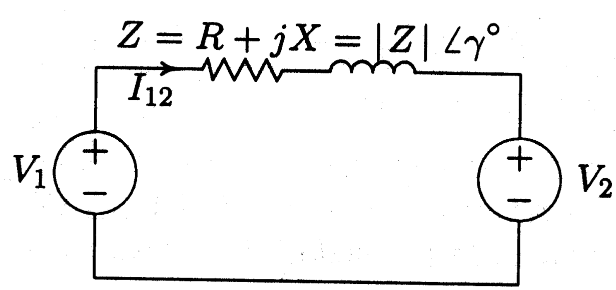
$$I_{12} = \frac{120\angle-5° - 100\angle 0°}{1+j7} = 3.135\angle-110.02° \text{ A}$$

$$I_{21} = \frac{100\angle 0° - 120\angle-5°}{1+j7} = 3.135\angle 69.98° \text{ A}$$

$$S_{12} = V_1 I_{12}^* = 376.2\angle 105.02° = -97.5\text{W} + \text{j}363.3\text{VAr}$$

$$S_{21} = V_2 I_{21}^* = 313.5\angle-69.98° = 107.3\text{W - j}294.5\text{VAr}$$

導線損失為： $S_L = S_1 + S_2 = 9.8\text{W} + \text{j}68.8\text{VAr}$



2.7 平衡三相電路

- 絕大部分電力的產生、輸送與分配係用三相電路來達成。
- 在發電廠，三個大小相同、相角互差 120°的正弦電壓被產生，被稱為平衡電源 (balanced source)。
- 假如所產生的電壓依 ABC 的順序達到峰值，則此發電機稱為有一正相序 (positive phase sequence)，如圖2.11(a) 所示。假如相的順序為 ACB，則此發電機稱為有一負相序 (negative phase sequence)，如圖2.11(b) 所示。

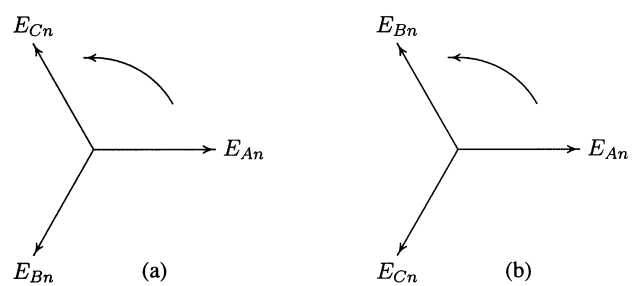


圖2.11 (a) 正 (或ABC) 相序。(b) 負 (或ACB) 相序

2.7 平衡三相電路

- 在一個三相系統中輸送到外接負載的瞬時功率為一定值，而非如單相電路般呈脈動狀態。
- 三相電動機有定轉矩，其起動與運轉均遠較單相電動機為佳。三相電力的此一特性再配合先天上輸送電力較單相有效率(輸送相同的電力所需的導線較少)，因此廣被採用。
- 一電力系統有許多 Y 接發電機，且通常會有Δ接與 Y 接兩種負載。發電機很少採Δ接，因為，如果電壓沒有完全平衡，則在Δ內會有一淨電壓，因而會造成一環流。此外，Y 接發電機的相電壓較低，因此對絕緣的要求也較低。
- 圖2.12 顯示一部 Y 接發電機透過一條三相線路供應一個平衡 Y 接負載。

2.7 平衡三相電路

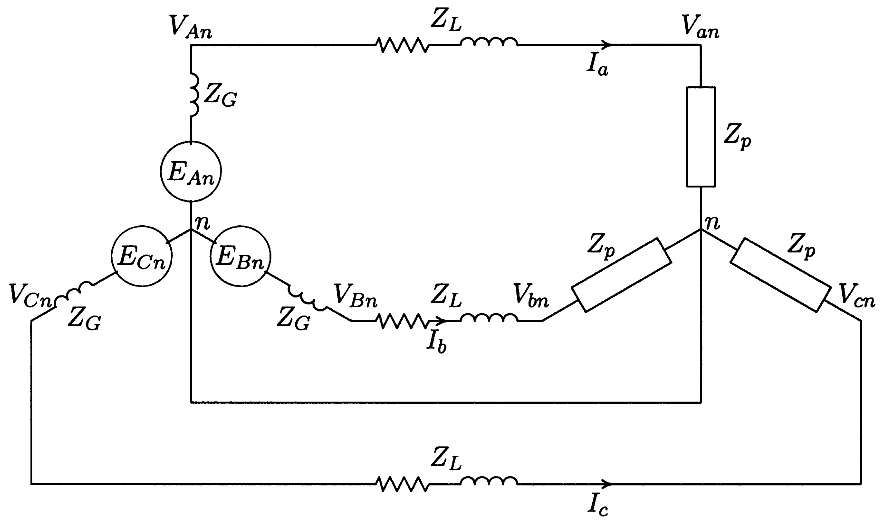


圖2.12 一部 Y 接發電機供應一個Y 接負載

- 假設此發電機為正相序 (相序為 ABC)，則所產生的電壓為：

$$E_{An} = \left|E_p\right| \angle 0^\circ \qquad E_{Bn} = \left|E_p\right| \angle -120^\circ \qquad E_{Cn} = \left|E_p\right| \angle -240^\circ$$

2.7 平衡三相電路

- 在電力系統中，需特別顧及輸電線負載的平衡。對 “A相” 而言，電壓為：

$$V_{An} = E_{An} - Z_G I_a \qquad V_{an} = V_{An} - Z_L I_a$$

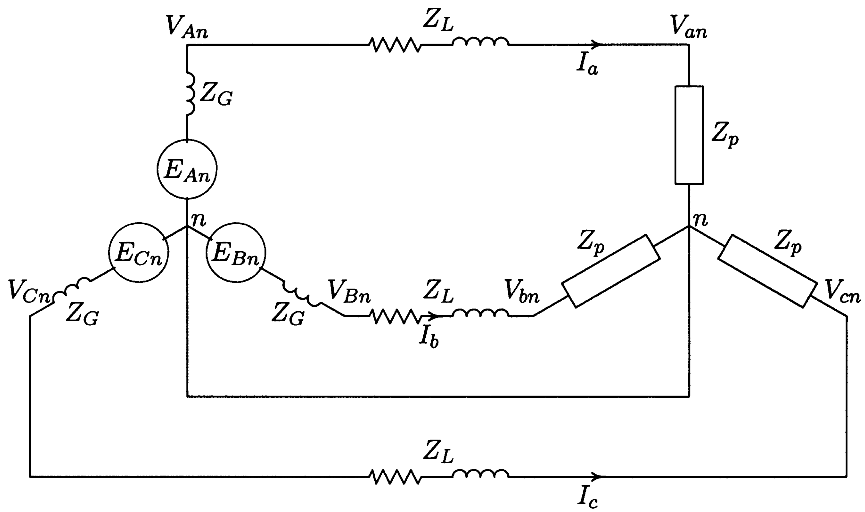


圖2.12 一部 Y 接發電機供應一個 Y 接負載

2.8 Y接負載

- 本節為了找出線電壓 (線對線電壓) 和相電壓 (線對中性線電壓) 間的關係。
- 假設我們採用正 (或 ABC) 相序，且任選 a 相的線對中性線電壓為參考，因此：

$$V_{an} = |V_p| \angle 0^\circ \qquad V_{bn} = |V_p| \angle -120^\circ \qquad V_{cn} = |V_p| \angle -240^\circ$$

其中 $|V_p|$ 表示相電壓 (線對中性線電壓) 的大小。

- 以相電壓表示的負載端線電壓，可應用克希荷夫電壓定律來求得：

$$V_{ab} = V_{an} - V_{bn} = |V_p|(1\angle 0^\circ - 1\angle -120^\circ) = \sqrt{3}|V_p|\angle 30^\circ$$

$$V_{bc} = V_{bn} - V_{cn} = |V_p|(1\angle -120^\circ - 1\angle -240^\circ) = \sqrt{3}|V_p|\angle -90^\circ$$

$$V_{ca} = V_{cn} - V_{an} = |V_p|(1\angle -240^\circ - 1\angle 0^\circ) = \sqrt{3}|V_p|\angle 150^\circ$$

2.8 Y接負載（結論）

- 在 Y 接負載的情況下，線電壓大小為相電壓大小的 $\sqrt{3}$ 倍，且對正相序而言，線電壓組超前相電壓組 $30°$ 。
- 在圖 2.12 中的三相電流也是三相對稱的，線路上的電流也就是相電流 (相阻抗所載電流) ， $I_L = I_p$ 。

2.9 Δ接負載

- 一平衡Δ接負載(有相等相阻抗) 示於圖 2.14 中，檢視此電路圖可清楚得知線電壓與相電壓相等 $V_L = V_p$ 。

L=Line
P=Phase

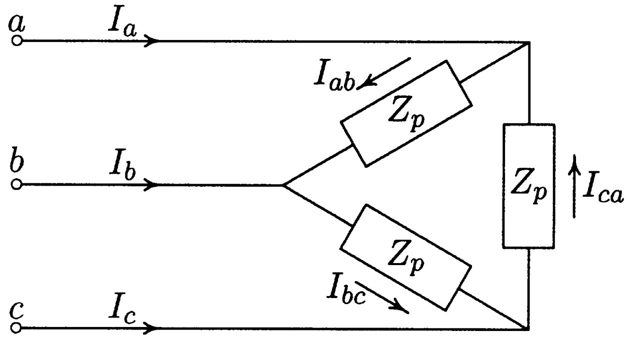


圖 2.14 一 Δ 接負載

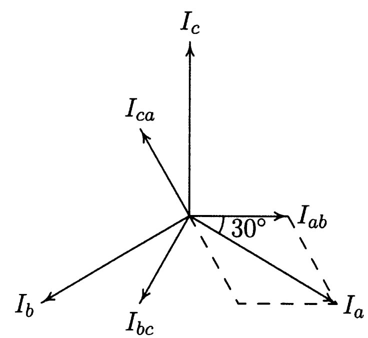


圖 2.15　展示相及線電流的相量圖

- 考慮圖2.15所示相量圖，其中相電流 I_{ab} 是被隨意選擇為參考相量，因此可得：

$$I_{ab} = |I_p|\angle 0° \qquad I_{bc} = |I_p|\angle -120° \qquad I_{ca} = |I_p|\angle -240°$$

2.9 Δ接負載

- 在Δ的各個角上，應用克希荷夫電流定律可得相與線電流的關係：

$$I_a = I_{ab} - I_{ca} = |I_p|(1\angle 0^\circ - 1\angle -240^\circ) = \sqrt{3}|I_p|\angle -30^\circ$$

$$I_b = I_{bc} - I_{ab} = |I_p|(1\angle -120^\circ - 1\angle 0^\circ) = \sqrt{3}|I_p|\angle -150^\circ$$

$$I_c = I_{ca} - I_{bc} = |I_p|(1\angle -240^\circ - 1\angle -120^\circ) = \sqrt{3}|I_p|\angle 90^\circ$$

- 結論：在Δ接負載的情況下，線電流大小為相電流大小的 $\sqrt{3}$ 倍，對正相序而言，線電流組超前相電流組 。

2.10 Δ-Y轉換

- 為分析網路問題，以等效Y接電路取代Δ接電路較為方便。
- 考慮一Z_Y Ω/每相之虛構 Y 接電路，它係等效於 Z_Δ Ω/ 每相之平衡Δ接電路，如圖 2.16 所示。

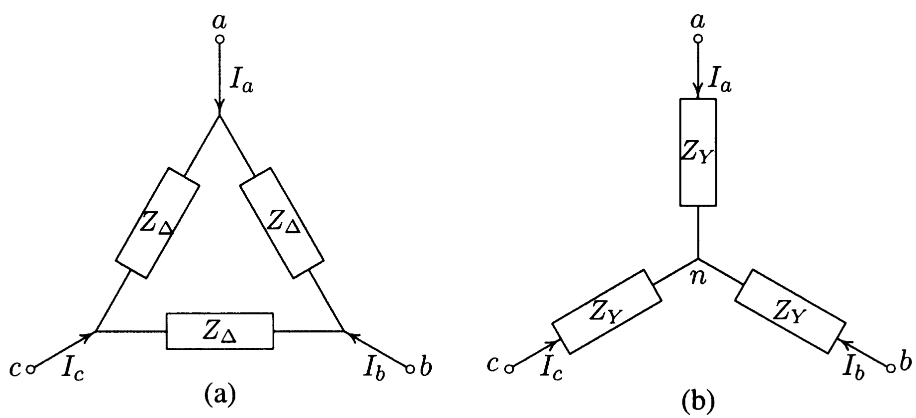


圖 2.16 (a)Δ至 (b) Y 接

- 對Δ接電路而言，相電流 I_a為：

$$I_a = \frac{V_{ab}}{Z_\Delta} + \frac{V_{ac}}{Z_\Delta} = \frac{V_{ab} + V_{ac}}{Z_\Delta}$$

2.10 Δ-Y轉換

- 由相量圖中我們可以找到：

$$V_{ab} + V_{ac} = \sqrt{3}\left|V_{an}\right|\angle 30^\circ + \sqrt{3}\left|V_{an}\right|\angle -30^\circ = 3V_{an}$$

- 所以

$$I_a = \frac{3V_{an}}{Z_\Delta}$$

- 此時，對 Y 接電路而言，我們有

$$V_{an} = Z_Y I_a$$

- 因此，我們可找到：

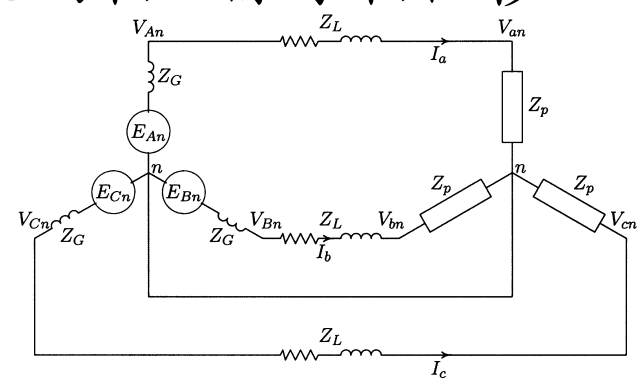
$$Z_Y = \frac{Z_\Delta}{3}$$

2.11 單相分析

- 圖 2.12 所示平衡 Y 接負載之中性線電流為：

$$I_n = I_a + I_b + I_c = 0$$

- 由於中性線沒有承載電流，因此具任一阻抗的中性線均可置換成另一具任一其他阻抗之中性線，包括短路及開路在內。此一回流線也可以不實際存在，但不管如何，在兩中性點間一條阻抗為零的導線被納入，平衡電力系統問題便因之可以“單相 (per-phase)”為基礎求解。而其他兩相，除了相位移外，將承載相同的電流是可以理解的。



2.11 單相分析

- 於是，我們可以只看一相，譬如說“A相”，它包括一與 Z_L 及 Z_p 串聯的電源 V_{An}，如圖2.18所示。
- 中性線被當作參考點 (datum)，且相電壓通常採用單下註標標示。
- 假如三相電路中的負載被接成Δ型，則利用Δ-Y 轉換可將它轉換成 Y 型。當負載為平衡時，Y 型每支腳的阻抗為Δ型每支腳阻抗的三分之一，且此電路可以被塑型成單相等效電路 (single-phase equivalent circuit)。

2.12 平衡三相功率

- 考慮一平衡三相電源以如下所示之瞬時電壓供應一平衡 Y 或Δ接負載：

$$v_{an} = \sqrt{2}\left|V_p\right|\cos(\omega t + \theta_v)$$

$$v_{bn} = \sqrt{2}\left|V_p\right|\cos(\omega t + \theta_v - 120^\circ)$$

$$v_{cn} = \sqrt{2}\left|V_p\right|\cos(\omega t + \theta_v - 240^\circ)$$

- 對平衡負載而言，相電流為：

$$i_a = \sqrt{2}\left|I_p\right|\cos(\omega t + \theta_i)$$

$$i_b = \sqrt{2}\left|I_p\right|\cos(\omega t + \theta_i - 120^\circ)$$

$$i_c = \sqrt{2}\left|I_p\right|\cos(\omega t + \theta_i - 240^\circ)$$

2.12 平衡三相功率

- 總瞬時功率為各相瞬時功率之和，如下式：

$$p_{3\phi} = v_{an}i_a + v_{bn}i_b + v_{cn}i_c$$

$$\begin{aligned} p_{3\phi} &= 2|V_p||I_p|\cos(\omega t + \theta_v)\cos(\omega t + \theta_i) \\ &\quad + 2|V_p||I_p|\cos(\omega t + \theta_v - 120^\circ)\cos(\omega t + \theta_i - 120^\circ) \\ &\quad + 2|V_p||I_p|\cos(\omega t + \theta_v - 240^\circ)\cos(\omega t + \theta_i - 240^\circ) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p_{3\phi} &= |V_p||I_p|[\cos(\theta_v - \theta_i) + \cos(2\omega t + \theta_v + \theta_i)] \\ &\quad + |V_p||I_p|[\cos(\theta_v - \theta_i) + \cos(2\omega t + \theta_v + \theta_i - 240^\circ)] \\ &\quad + |V_p||I_p|[\cos(\theta_v - \theta_i) + \cos(2\omega t + \theta_v + \theta_i - 480^\circ)] \end{aligned}$$

- 上式中的三個倍頻餘弦項之相位均不相同、互差 120°，其和為零，則三相瞬時功率變為：

$P_{3\phi} = 3|V_p||I_p|\cos\theta$ $\quad\theta = \theta_v - \theta_i$ 為相電壓與相電流間的相角或阻抗角。

2.12 平衡三相功率

- 雖然每相功率是脈動的，但總瞬時功率為一定值，且等於每相實功率的三倍。的確，相較於單相系統，此一定功率特性正是三相系統的主要優點。
- 因為每一相的功率是脈動的，因之，此一功率是由實功率與虛功率所組成的。為了取得實功率與虛功率公式的對稱性，複功率或視在功率 (S) 的概念被以下式所定義的三相虛功率延伸至三相系統：

$$Q_{3\phi} = 3|V_p||I_p|\sin\theta \qquad P_{3\phi} = \sqrt{3}|V_L||I_L|\cos\theta$$

$$S_{3\phi} = P_{3\phi} + jQ_{3\phi}$$

$$Q_{3\phi} = \sqrt{3}|V_L||I_L|\sin\theta$$

$$S_{3\phi} = 3V_p I_p^*$$

2.12 平衡三相功率

- 當利用上式來計算總實功率及虛功率時，要注意 θ 是相電壓與相電流間的相角。
- 在計算單相系統的功率時，將複功率以相參數 (phase quantities) 表示。習慣上，給定的額定功率為三相值，而電壓則為線對線電壓。因此，在利用單相等效電路時必須特別留意，每相電壓為額定電壓除以 $\sqrt{3}$。

2.12 平衡三相功率

- 例題2.7 (chp2ex7)

一阻抗為 $2+j4\ \Omega$ 的三相線路示於圖 2.19 中。

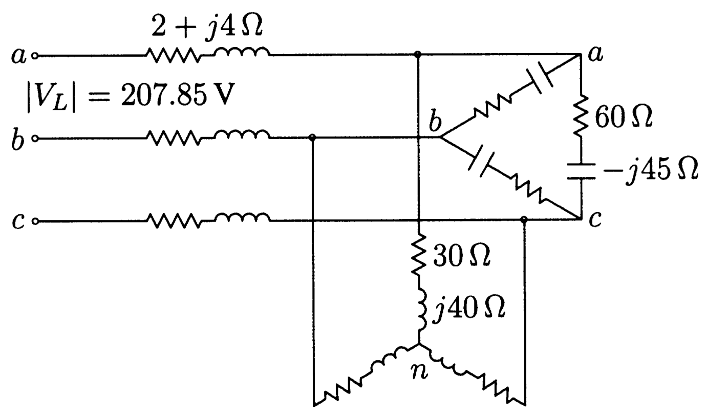


圖 2.19　例題 2.7 用三相電路圖。

此線路饋電給兩個並聯連接之平衡三相負載。第一個負載為Y接，其阻抗為30 + j40 /每相。第二個負載為Δ接，其阻抗為 60 – j45 。在此線路送電端施加一線電壓 207.85 V 的三相平衡電源。取相電壓 V_a為參考，試決定：

2.12 平衡三相功率

(a)從電源吸入的電流、實功率及虛功率。

(b)組合負載處的線電壓。

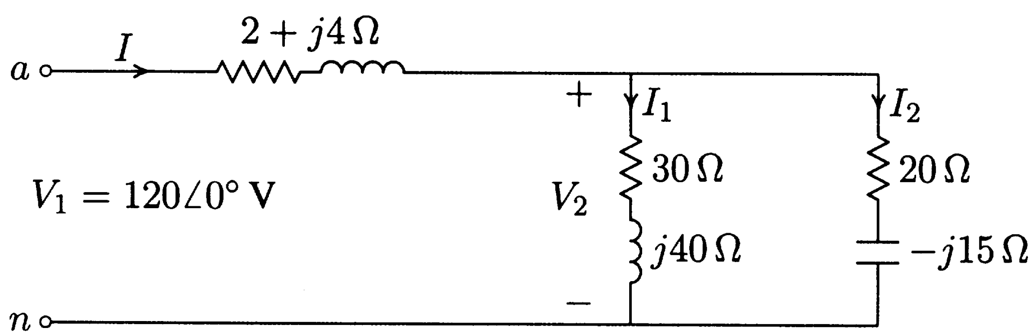
(c)各負載的每相電流。

(d)各負載及線路上的總實功率及虛功率。

解：

(a)將 Δ 接負載轉換為等效 Y。等效 Y 的每相阻抗為：

$$Z_2 = \frac{60 - j45}{3} = 20 - j15\,\Omega$$



2.12 平衡三相功率

相電壓為：

$$V_1 = \frac{207.85}{\sqrt{3}} = 120\ \mathrm{V}$$

總阻抗為：

$$Z = 2 + j4 + \frac{(30 + j40)(20 - j15)}{(30 + j40) + (20 - j15)}$$
$$= 2 + j4 + 22 - j4 = 24\ \Omega$$

以相電壓 V_{an} 為參考，a 相電流為：

$$I = \frac{V_1}{Z} = \frac{120\angle 0^\circ}{24} = 5\ \mathrm{A}$$

所供應的三相功率為：

$$S = 3V_1 I^* = 3(120\angle 0^\circ)(5\angle 0^\circ) = 1800\ \mathrm{W}$$

2.12 平衡三相功率

(b) 負載端的相電壓為：

$$V_2 = 120\angle 0° - (2 + j4)(5\angle 0°) = 110 - j20$$
$$= 111.8\angle -10.3° \text{ V}$$

負載端的線電壓為：

$$V_{2ab} = \sqrt{3}\angle 30° V_2 = \sqrt{3}(111.8)\angle 19.7° = 193.64\angle 19.7° \text{ V}$$

(c) Y 接負載及 Δ接負載的等效 Y 中之每相電流為：

$$I_1 = \frac{V_2}{Z_1} = \frac{110 - j20}{30 + j40} = 1 - j2 = 2.236\angle -63.4° \text{ A}$$

$$I_2 = \frac{V_2}{Z_2} = \frac{110 - j20}{20 - j15} = 4 + j2 = 4.472\angle 26.56° \text{ A}$$

2.12 平衡三相功率

(d)各負載所吸收的三相功率為：

$$S_1 = 3V_2 I_1^* = 3(111.8\angle -10.3°)(2.236\angle 63.4°) = 450\ \mathrm{W} + \mathrm{j}600\mathrm{VAr}$$

線路所吸收的三相功率為：

$$S_L = 3(R_L + jX_L)|I|^2 = 3(2 + j4)(5)^2 = 150\ \mathrm{W} + \mathrm{j}300\mathrm{VAr}$$

很明顯的，各負載功率與線路損失之和等於電源所供應的功率：

$$\begin{aligned} S_1 + S_2 + S_L &= (450 + j600) + (1200 - j900) + (150 + j300) \\ &= 1800\ \mathrm{W} + j0\ \mathrm{var} \end{aligned}$$