

電 路 學

(下冊)

施 建 文

編 著

電路學

(下冊)

施 建 文

編 著

版權所有・翻印必究
中華民國六十九年五月一版

電 路 學

基價五元

編著者：**施 建 文**

本公司經行政院新聞局核准登記發給
出版登記證局版台業字第〇四一〇號

發行者：勝文書局（原中華出版社）

台 南 市 育 樂 街 16 號

總經銷：興業圖書股份有限公司

台 南 市 勝 利 路 一 一 八 號

印刷者：興 業 印 刷 廠

台 南 市 勝 利 路 一 一 八 號

電話：(062) 373253 號

第八章 對稱平衡多相電路

8-1 引言

多相系統 (polyphase system) 係由二個或兩個以上保持固定相位差之相等電壓源連接於線路組成，在二相系統相等之兩相電壓相差 90° ，而在三相系統各相等電壓間之相位差則各為 120° ，某些特殊設施有使用 6 相或 12 相制者，其各相電壓則相隔 60° 或 30° 。雖然目前世界各地所產生之電能尚有部份以直流及單相交流方式加以利用，然而幾乎所有商用之電能均係使用三相發電機產生，若將單相制與三相制所囊括，茲簡述如下：

1 就功率言，單相電路之功率，每週有四次為零值，若負載功因小於 1 時，則有兩次為負載，故單相電路供給之功率並不穩定，對需要穩定功率供應之用途頗有妨碍。而在平衡三相系統所供給之功率，三相功率之和恒為定值。

2 就同量製造材料言：若用同樣之材料，將三相發電機改為單相發電機，則單相發電機最大之電壓為三相發電機每相之 2 倍，設 E 為三相發電機之每相電壓， I 為其相電流，則三相發電機之容量為 $3EI$ ，而改為單相發電機後，其容量僅得 $2EI$ ，故使用同樣材料，三相發電機之容量約較單相發電機之容量大百分之五十，故三相發電機之單位成本較低。

3 就輸配電方面言：若用相同之線電壓 E_L ，輸送相等之功率至相同距離，設限定銅損失相等，則平衡三相制所需導線之重量，約為單相所需之 75%，亦即可節省 25% 之導線用銅量（理由參閱 8-8 節

目 錄

第八章 對稱平衡多相電路	272
8-1 引言	272
8-2 單相電路	273
8-3 二相系統及四相系統	276
8-4 三相電勢之產生	281
8-5 Y型連接三相電路	283
8-6 Δ 型連接三相電路	288
8-7 Δ -Y及Y- Δ 三相系統	292
8-8 三相電路之電功率	294
8-9 三相電路之功率量度	298
8-10 並聯負載	308
8-11 功因改善	312
第九章 不平衡三相電路	317
9-1 引言	317
9-2 不平衡負載	317
9-3 不平衡三相電路之網目解法	327
9-4 對稱分量	330
9-5 對稱分量之應用	337
第十章 網網路函數與四端網路	349
10-1 引言	349

10-2	矩陣	350
10-3	網路函數	356
10-4	網路函數之零點和極點	360
10-5	網路函數與弦波穩態響應	362
10-6	四端網路	367
10-7	四端網路之參數換算	379
10-8	四端網路參數與網路函數	383
10-9	T型與 π 型網路	388
10-10	四端網路之互聯	395

第十一章 相量軌跡與圓線圈 405

11-1	引言	405
11-2	實部固定之相量軌跡	405
11-3	虛部固定之相量軌跡	409
11-4	直線對原點之倒轉	411
11-5	圓對原點之倒轉	415
11-6	四端網路之軌跡	420
11-7	轉移函數軌跡	423

第十二章 電路之暫態 427

12-1	引言	427
12-2	電阻—電感電路之暫態現象	428
12-3	電阻—電容電路之暫態現象	433
12-4	電阻—電感—電容電路之暫態現象	440
12-5	一般二階系統之完全響應	444
12-6	網路函數與完全響應	448

第十三章 非正弦波之分析 454

），支撐高壓輸送線之鐵塔數目亦可減少。

此外，在輸電線之端站，所需之昇壓及降壓變壓器，就相同之總容量而言，三相變壓器所費較少。

4 就動力利用言：相同功率之三相電動機較單相電動機使用較少之材料（例如銅量、鐵量及絕緣材料等），故體積較小且較價廉，此外三相電動機可自行起動，而若干單相電動機則另需起動設備，同時，三相電動機之功率穩定，運轉平穩，單相電動機之功率則成脈動變化。

在需要較大直流功率之處，三相整流之漣波（ripple）較單相為小。利用變壓器之適當連接，可從三相電源獲得各種多相系統，易言之，若有三相電源存在，即可獲得直流（使用整流或電動機—發電機系統）、單相、二相、三相、四相、六相、十二相或其他三相倍數之更高相。

8-2 單相電路

單相電路為指電源可化為如圖 8-1(a)及(b)所示之電路，常用之連接有下列三種：

1 電源串聯：數個頻率相同之單相電源可串接如圖 8-1(b)左側所示之電路，在 $a-b$ 端應用克希荷夫電壓定律，可改成如圖 8-1(c)側之電路，若在圖(b)及(c)二電路中流過外接於 ab 端點外在負載之電流為 I_{ab} ，則相量 V_{ab} 均為 $V_1 + V_2 - I_{ab}(Z_{s1} + Z_{s2})$ ，故此二電路在端點 ab 間係為等效者。

2 電源並聯：數個頻率相同之單相電源若並聯連接，則可表示如圖 8-1(d)，在 a 或 b 端應用克希荷夫電流定律，可改成如圖 8-1(e)之電路，設在端點電壓為 V_{ab} ，流過外在導納之電流為 I_{ab} ，則圖(d)及(e)均有 $I_{ab} = I_1 + I_2 - V_{ab}(Y_{s1} + Y_{s2})$ 之關係。

3 單相三線電路：此電路為單相系統所最常用者，但常與三相連接混淆，係使用二單相電源連接如圖 8-2(a)。實用上常採用二相

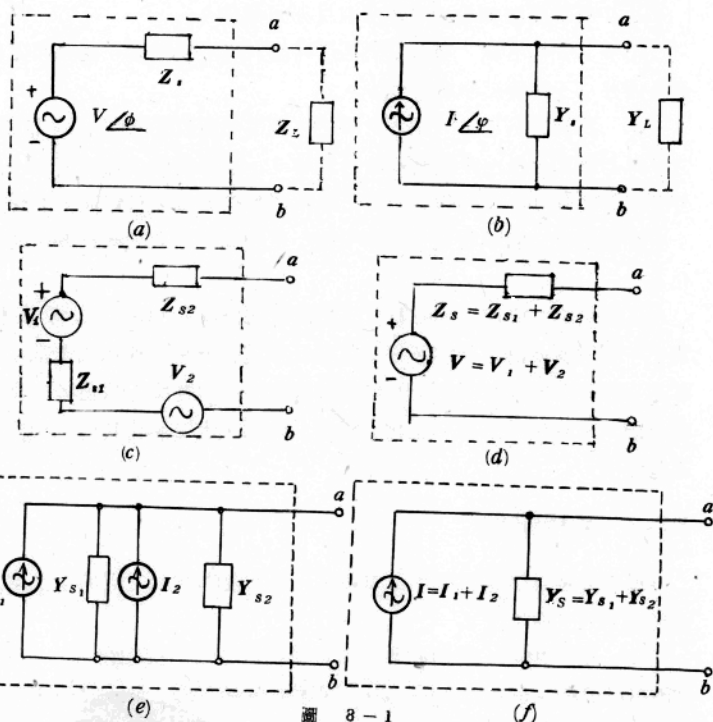


圖 8-1

同之單相電源，如圖 8-2(b) 所示，各電源電壓之大小、相位及內阻抗相同。若所接之單相負載相同，則構成一平衡之單相三線係 (balanced single-phase three-wire system)，如圖 8-2(c) 所示，圖中兩電源之共同接點 n' 稱為電源之中性點 (neutral point)，兩負載 Z_L 之中間點 n 為負載之中性點， n 為 n' 之連接線稱為中性線 (neutral wire)，該線之阻抗以 Z_n 表示。二外線之阻抗則歸併於電源內阻抗 Z_s 中， Z_s 為此系統之高壓負載。

茲證明平衡三線單相系統中性線上之壓降 $V_{n'n} = 0$ ：

首先將圖 8-2(c) 之平衡電路改換為圖 8-3 之等效電路，將各

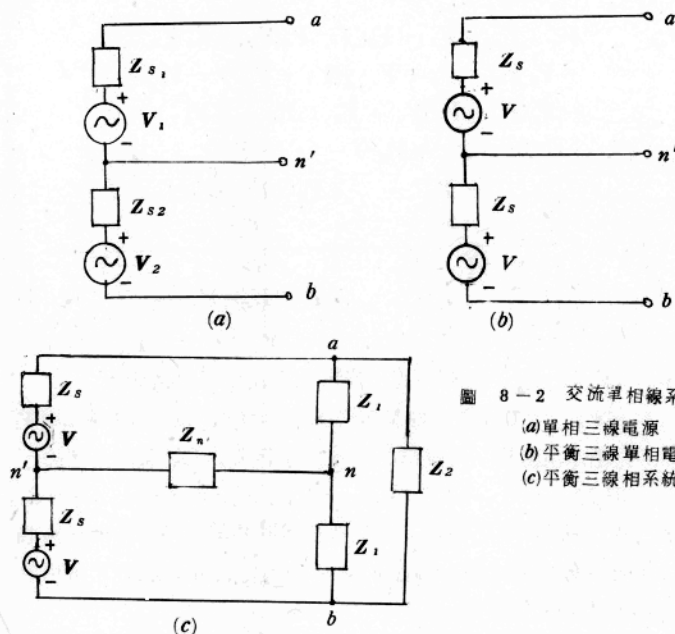


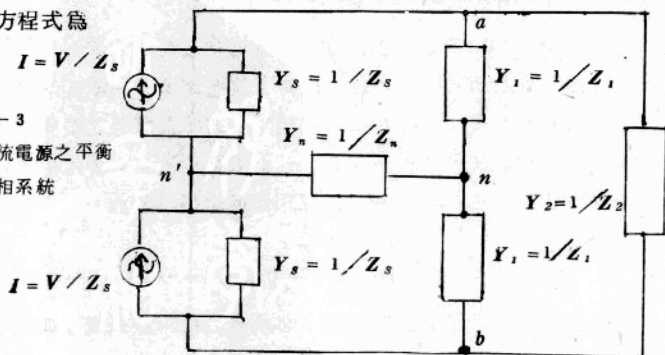
圖 8-2 交流單相系統

- (a) 單相三線電源
(b) 平衡三線單相電源
(c) 平衡三線相系統

電壓源改換為電流源，各阻抗亦均以導納表示，並以 n' 點作為參考點，以 V_a 、 V_b 和 V_n 分別表示節點 a 、 b 和 n 之電壓，則此三節點之節點電壓方程式為

圖 8-3

使用電流電源之平衡
三線單相系統



$$\begin{aligned}
 V_a(Y_1 + Y_2 + Y_3) - V_2 Y_2 - V_n Y_1 &= I \\
 -V_a Y_2 + V_2(Y_1 + Y_2 + Y_3) - V_n Y_1 &= -I \\
 -V_a Y_1 - V_2 Y_1 + V_n(Y_n + 2Y_1) &= 0
 \end{aligned}$$

解 V_n ，得

$$V_n = \frac{\begin{vmatrix} (Y_1 + Y_2 + Y_3) & -Y_2 & I \\ -Y_2 & (Y_1 + Y_2 + Y_3) & -I \\ -Y_1 & -Y_1 & 0 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} (Y_1 + Y_2 + Y_3) & -Y_2 & -Y_1 \\ -Y_2 & (Y_1 + Y_2 + Y_3) & \\ -Y_1 & -Y_1 & (Y_n + 2Y_1) \end{vmatrix}} = 0$$

因此 $V_n = V_{nn'} = 0$ 。故對平衡三線單相電源可得結論如下：

1 因 $V_{nn'} = 0$ ，故中性線電流 $I_{nn'} = 0$ ，亦即中性線之導納 Y_n 與電路之作用無關，只要電路繼續保持平衡，中性線亦可移去。

2 因 $I_{nn'} = 0$ ， $V_{an} = V_{nb}$ ，因此， $V_{ab} = 2V_{an}$ ，亦即 Z_2 之電壓二倍於跨於 Z_1 之電壓，故平衡三線單相電源可同時供應兩種電壓，甚合一般家庭之用，例如 110 V 可用於照明，220 V 可用於冷氣機等電力較大之裝置。

在實際應用，中性線不可去除，因可能有不平衡負載之情況發生

8-3 二相系統及四相系統

將一對互相垂直之線圈在均勻之磁場中旋轉，如圖 8-4(a) 所示，因二線圈依相同之角速率旋轉，故感應電勢之頻率相同，但有 90° 之固定相位差，若二線圈匝數相同，則感應電勢之振幅亦同，二電勢之相量及瞬時關係如圖 8-4(b) 及 (c) 所示。設 A 相電壓超前 B 相 90° ，角速率為 ω ，則二相電壓之瞬時值為

$$e_A = E_m \sin \omega t$$

$$e_B = E_m \sin(\omega t - 90^\circ) \dots\dots\dots (8-1)$$

若二組線圈分別與負載連接，則稱為二相四線系統，如圖 8-5

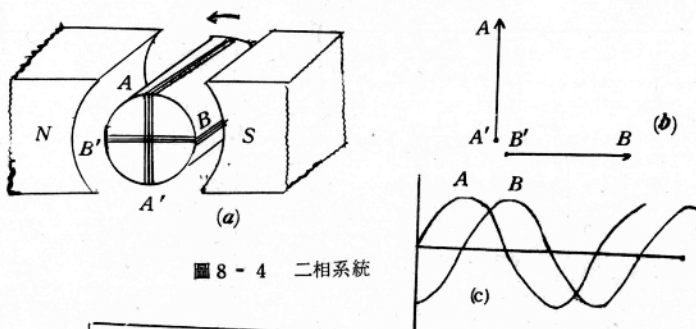


圖 8-4 二相系統

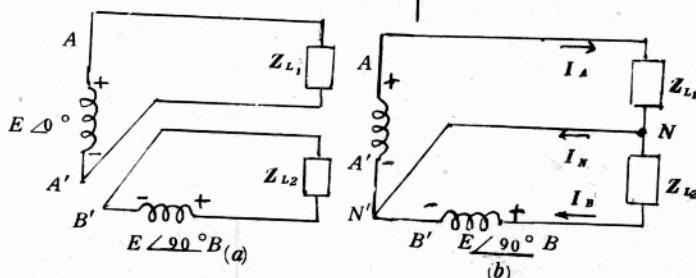


圖 8-5 (a)二相四線系統 (b)二相三線系統

(a)所示，若將 A' 與 B' 連接一起，則可減少一根銅線，稱為二相三線系統，如圖 8-5 (b) 所示，此時從 A 及 B 接到負載之二線稱為線路，中間共用之線稱為中線，設二相之電壓大小相同，負載亦相同，則二相之線電流大小相同，但仍有 90° 之相位差，故中線之電流大小為二外線電流之 $\sqrt{2}$ 倍，故中線之截面亦需為二外線截面之 $\sqrt{2}$ 倍，顯然其總用銅量為在二相四線系統中一線之 3.414 倍，故用銅量而言，二相三線制較四線制有利。圖 8-6 示二純電阻負載之電流相量關係。

茲證實在二相具有相同負載時之瞬時總功率為定值：

設二相阻抗均為 $Z \angle \theta$ ，則二線電流分別為

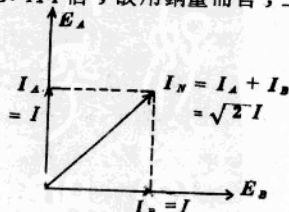


圖 8-6

$$i_A = \frac{E_m}{|Z|} \sin(\omega t - \theta) \quad \dots\dots\dots (8-2)$$

$$\begin{aligned} i_B &= \frac{E_m}{|Z|} \sin(\omega t - 90^\circ - \theta) \\ &= \frac{-E_m}{|Z|} \cos(\omega t - \theta) \end{aligned}$$

總瞬時功率為

$$\begin{aligned} p(t) &= p_A(t) + p_B(t) = i_A^2 |Z| \cos \theta + i_B^2 |Z| \cos \theta \\ &= \left(\frac{E_m}{|Z|} \right)^2 |Z| [\sin^2(\omega t - \theta) \\ &\quad + \cos^2(\omega t - \theta)] \cos \theta \\ &= \frac{E_m^2}{|Z|} \cos \theta = \text{定值} \quad \dots\dots\dots (8-3) \end{aligned}$$

由圖 8-7 中可看出，當一相之功率達最大值時，另一相之功率為 0，二相之個別功率雖為脈動性質，然而總功率為定值，設以 V_P 表示相電壓（外線與中線間之電壓）， V 表示線電壓（兩外線間之電壓），則 $|Z| = \sqrt{2} |V_P|$ ，若二相具有相同之負載 Z_P ，則由式（4-34）總複功率為

$$\begin{aligned} S &= 2V_P^* I_P = 2V_P^* \frac{V_P}{Z_P} = \frac{2|V_P|^2}{Z_P} = 2V_P I_P \\ &= 2 \frac{(|V|/\sqrt{2})^2}{Z_P} = \frac{|V|^2}{Z_P} \quad \dots\dots\dots (8-4) \end{aligned}$$

將二相制二組線圈之中點連接，由四線端引出可得四相系統，如圖 8-7(a)所示，各點間之電壓相量關係於圖 8-7(b)中，圖中具有 V_{aN} 、 $V_{a'N}$ 、 V_{bN} 及 $V_{b'N}$ 等四相相電壓（four-phase phase voltage）， $V_{aa'}$ 及 $V_{bb'}$ 等二相相電壓，（two-phase phase voltage）， V_{ab} 、 $V_{ba'}$ 、 $V_{a'b'}$ 和 $V_{b'a}$ 等四相線電壓（four-phase line voltage），在此十種電壓間，可得三種不同大小之

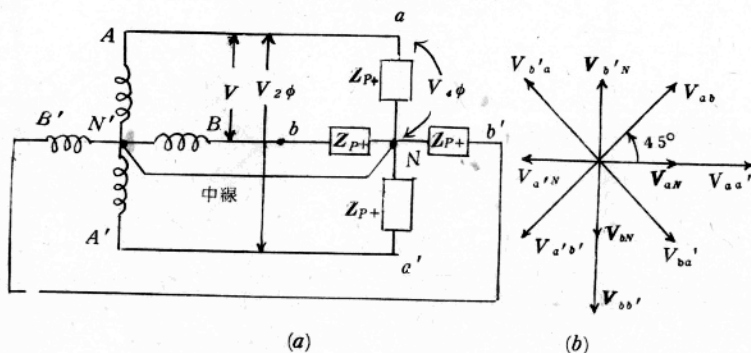


圖 8-7 平衡四相系統(a)線路圖 (b)電壓相量圖

電壓。設以 $V_{4\phi}$ 及 $I_{4\phi}$ ，表示四相制時每相負載之相電壓及相電流，以 $V_{2\phi}$ 及 $I_{2\phi}$ 表示二相制時每相負載之相電壓及相電流。則由圖示之符號及相量關係可得

$$|V| = \frac{|V_{2\phi}|}{\sqrt{2}} = \sqrt{2} |V_{4\phi}| \quad \dots\dots (8-5)$$

$$\begin{aligned} S_+ &= 2 V_{2\phi}^* I_{2\phi} = 4 V_{4\phi}^* I_{4\phi} \\ &= 4 V_{4\phi}^* \frac{V_{4\phi}}{Z} = 4 \frac{|V_{4\phi}|^2}{Z} \\ &= \frac{2 |V|^2}{Z_{P+}} \quad \dots\dots (8-6) \end{aligned}$$

圖 8-7(a)之負載為一 4 相星形負載，亦可接一 4 相網形負載，如圖 8-8 所示，則

$$\begin{aligned} S_m &= 4 V_{4\phi}^* I_{4\phi} = 4 V_{4\phi}^* \frac{V_{4\phi}}{Z_{Pm}} \\ &= \frac{4 |V_{4\phi}|^2}{Z_{Pm}} = \frac{4 |V|^2}{Z_{Pm}} \quad \dots\dots (8-7) \end{aligned}$$

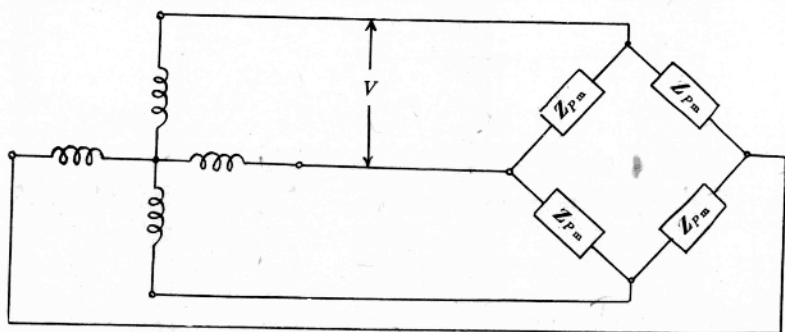


圖 8-8 網形負載之平衡四相系統

例 8-1 圖 8-9 之二相

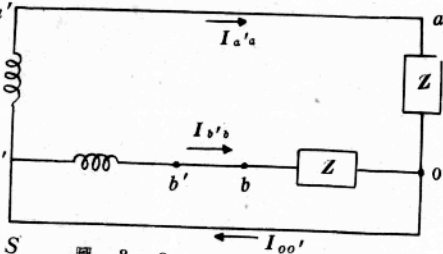
系統中，若 $V_{a'o'} =$ $200 \angle 0^\circ V$ ， $V_{b'o'}$ $= 200 \angle -90^\circ V$ ， $Z = 20 \angle 30^\circ \Omega$ ， o' 試求 (a) $I_{a'a}$ ；(b) $I_{b'b}$ (c) $I_{oo'}$ ；(d) 總復功率 S 

圖 8-9

解：(a) $I_{a'a} = \frac{V_{a'o'}}{Z} = \frac{200 \angle 0^\circ}{20 \angle 30^\circ} = 10 \angle -30^\circ A$

(b) $I_{b'b} = \frac{V_{b'o'}}{Z} = \frac{200 \angle -90^\circ}{20 \angle 30^\circ} = 10 \angle -120^\circ A$

(c) $I_{oo'} = I_{a'a} + I_{b'b} = 10 \angle -30^\circ + 10 \angle -120^\circ$
 $= (8.66 - j5) + (-5 - j8.66)$
 $= 3.66 - j13.66 = 14.14 \angle -105^\circ A$

(d) $S = \frac{V^2}{Z} = \frac{(\sqrt{2} \times 200)^2}{20 \angle 30^\circ} = 4000 \angle -30^\circ$

$= 3464 - j2000$

或 $S = V_{a'o'} \cdot I_{a'o'} + V_{b'o'} \cdot I_{b'o'}$

$$\begin{aligned}
 &= 200 \times 10 \angle -30^\circ + 200 \angle 90^\circ \times 10 \angle -120^\circ \\
 &= 2000 \angle -30^\circ + 2000 \angle -30^\circ \\
 &= 4000 \angle -30^\circ = 3464 - j2000
 \end{aligned}$$

或

$$\begin{aligned}
 P &= |I_{a0}|^2 Z \cos 30^\circ + |I_{b0}|^2 Z \cos 30^\circ \\
 &= 10^2 \times 20 \cos 30^\circ + 10^2 \times 20 \cos 30^\circ \\
 &= 1732 + 1732 = 3464 \text{ W}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Q &= |I_{a0}|^2 Z \sin 30^\circ + |I_{b0}|^2 Z \sin 30^\circ \\
 &= 10^2 \times 20 \sin 30^\circ + 10^2 \times 20 \sin 30^\circ \\
 &= 1000 + 1000 = 2000 \text{ VAR (電感性)}
 \end{aligned}$$

$$S = P - jQ = 3464 - j2000$$

例 8-2 圖 8-8 中，四相電源以 200V 之線電壓供應 $40 \angle -60^\circ$ KVA 至四相網形連接負載，試求 (a) 網形負載相電流之大小；(b) 線電流大小；(c) 網形負載之相阻抗。

解：(a) 每相負載之視在功率為 $P_a = \frac{|S|}{4} = 10 \text{ KVA}$

$$I_P = \frac{P_a}{V} = \frac{10 \times 10^3}{200} = 50 \text{ A}$$

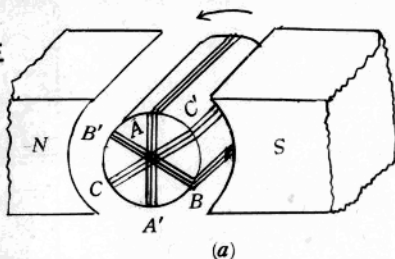
(b) 線電為相電流之 $\sqrt{2}$ 倍，即

$$I = \sqrt{2} I_P = \sqrt{2} \times 50 = 70.7 \text{ A}$$

$$(c) Z_{pm} = \frac{4 V^2}{S} = \frac{4 \times (200)^2}{40 \times 10^3 \angle -60^\circ} = 4 \angle 60^\circ \Omega$$

8-4 三相電勢之產生

將三組相同間隔及匝數之線圈置於均勻之磁場中以定速旋轉，如圖 8-10 所示，則將感應三組振幅相同，頻率相同，但相立差互為 120°



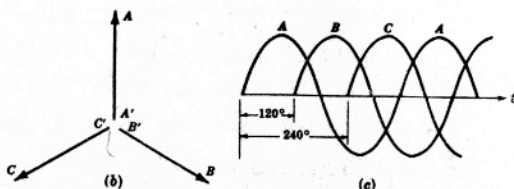


圖 8-10 三相系統

之三相電壓，依圖示之轉向，設 A 線圈先到達最大值，則其次為 B 線圈，再次為 C 線圈，然後 A 線圈，亦即依 $ABCABC\cdots$ 之次序繼續重複，此種電壓之變化關係稱為**正相序** (positive phase sequence)，從圖 8-10(c) 之瞬時電壓關係圖，吾人可看出其最大值即依此次序出現，此三相系統之瞬時關係可用式子表示如下：

$$e_A = E_m \sin \omega t$$

$$e_B = E_m \sin (\omega t - 120^\circ) \cdots \cdots \cdots (8-8)$$

$$e_C = E_m \sin (\omega t - 240^\circ)$$

$$= E_m \sin (\omega t + 120^\circ)$$

若將線圈依反方向旋轉，則可得 CBA 之次序關係，如圖 8-11 所示，稱為**負相序** (negative phase sequence)，相序有時亦以數字表示，習慣上凡依數字或英文字母之順序者稱正相序，反之，則為負相序，只要發電機之轉向確定，相序即告確定，在負載則可任意接換兩線，而得相反之相序，對三相感應電動機而言，相序相反將使電動機反轉。

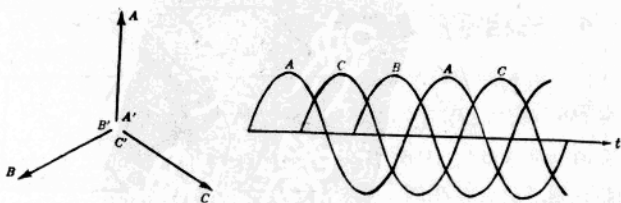
圖 8-11 CBA 相序 (負相序)

圖 8-4 及圖 8-10 之發電機稱為**樞轉式**(rotating armature type) 發電機，實際上，因受若干條件之限制，今日之發電機均採用固定之三相繞組，而使磁極旋轉，稱為**場轉式**(rotating field type) 發電機。

若一 P 極發電機之磁極旋轉一週，一線圈繞組之電壓波即完成 $\frac{P}{2}$ 週，易言之，一 P 極發電機之磁極若每秒間旋轉 n 週，則一線圈繞組之感壓電壓頻率為

$$f = \frac{Pn}{2} = \frac{PN}{120} \quad \text{赫} \quad \dots\dots\dots (8-9)$$

其中， P 為磁場之磁極數， n 為每秒轉數 (rps)， N 為每分鐘轉速 (rpm)，例如一 6 極之三相發電機，轉速為每分鐘 1200 轉，則感應電壓之頻率為 $\frac{6 \times 1200}{120} = 60$ 赫。

在任何時刻，式 (8-8) 所表示之三相電勢之代數和為零，因任何兩相電勢之和等於第三相電勢之負值，茲證明如下：

$$\begin{aligned} e_B + e_C &= E_m [\sin (\omega t - 120^\circ) + \sin (\omega t + 120^\circ)] \\ &= E_m [\sin \omega t \cos 120^\circ - \cos \omega t \sin 120^\circ + \\ &\quad \sin \omega t \cos 120^\circ + \cos \omega t \sin 120^\circ] \\ &= E_m [2 \sin \omega t \cos 120^\circ] \\ &= -E_m \sin \omega t = -e_A \end{aligned}$$

故 $e_A + e_B + e_C = 0$

若將三相電源分成三個單相電路使用，則成三個獨立電路，需要六條接線，若利用適當連接使三個電源合併使用，則接線之數目可以減少，三相電勢互相聯接之方法有二，即 Y 形接法 (Y -connection) 或 Δ 形接法 (Δ -connection)，將於以下各節分述之。

8-5 Y 形連接三相電路