

電動機械實驗 Lab4_2 報告

(Electrical Machinery Laboratory Lab4 Report)

實驗題目 (Experiment title) : 變壓器實驗(二)

日期 (Date) : 2022/03/30

時間 (Time) : 15:30 ~ 21:50

地點 (Place) : 台達館 218

組別 (Group number) : 第 3 組

組員 (Group member) (簽名) : 王致中、黃威誌、楊松諭、陳竑廷

撰寫人 (Writer) : 108061106 王致中

實驗項目及步驟：

3.10 單相變壓器之三相接線

較大容量之供電系統一般以三相配電系統供電較經濟，三相變壓器可為單鐵芯三線圈之三相變壓器，或由多個單相變壓器適當連接而成。三相變壓器之接法相當多，如：Y-Y，Y- Δ ， Δ -Y， Δ - Δ ，V-V...等。使用三台同額定之變壓器可構成三相 Y 型或 Δ 型連接，使用二台同額定之變壓器則可構成三相 V 型或 T 型連接，不同連接各有其特性及適用情形。

● Y- Δ 接變壓器：

本實驗使用 Y- Δ 接變壓器，由於接線包含 Δ 回路，感應電勢不含三次諧波，但如果變壓器有一具故障時，即無法繼續供電。此方式適用於降壓之場合，通常在一次變電所採用此種接線方式。

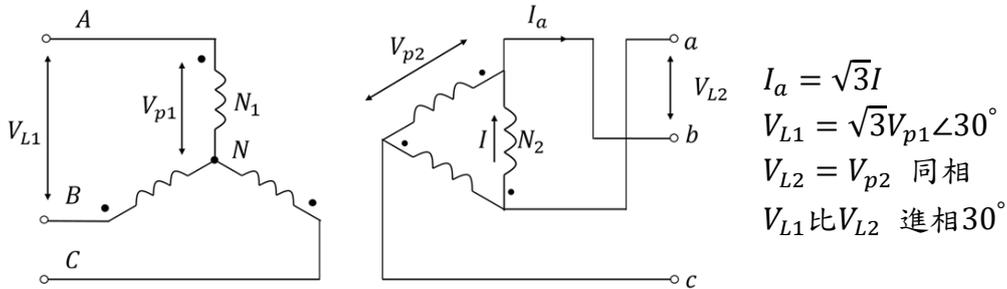


Fig. 3.10.1. Y- Δ 接變壓器

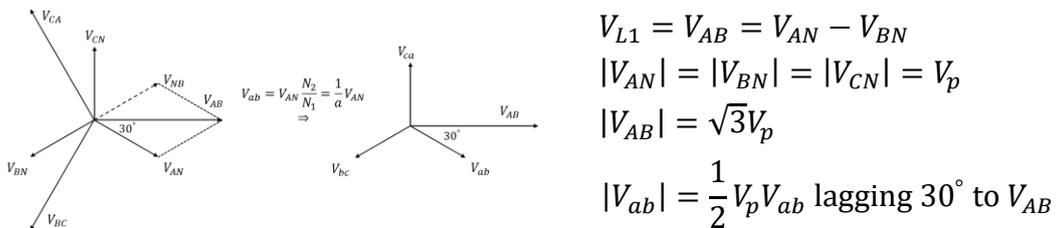


Fig. 3.10.2. Y- Δ 接向量圖

● V-V 接變壓器：

其各電壓關係為： $V_{L1} = V_{p1}$ ， $V_{L2} = V_{p2}$ ， $I_{L1} = I_{p1}$ ， $I_{L2} = I_{p2}$ 。根據電壓電流量之關係，可以知道 V-V 連接的總容量等於 $\sqrt{3}V_L I_L$ 或 $\sqrt{3}V_p I_p$ ，亦等於 Δ - Δ 連接之總容量的 $1/\sqrt{3}$ 倍。如以兩台總容量為 $2V_p I_p$ 考慮，若使用 V-V 連接則其利用率僅達總容量之 $\sqrt{3}/2$ 倍，也就是 86.6%。使用 V-V 連接的優點為，當 Δ - Δ 接線的變壓器組中，有一台壞掉時，可改用此接法繼續供電。缺點是變壓器的利用率低，接負載時二次端電壓會有少許不平衡的情形。

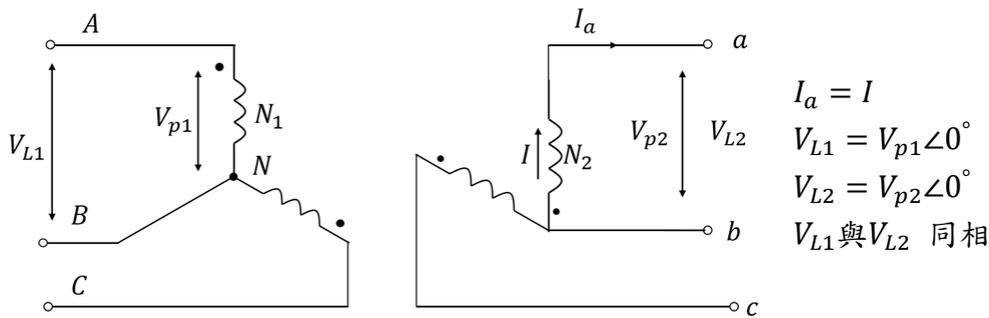


Fig. 3.10.3. V-V 接變壓器

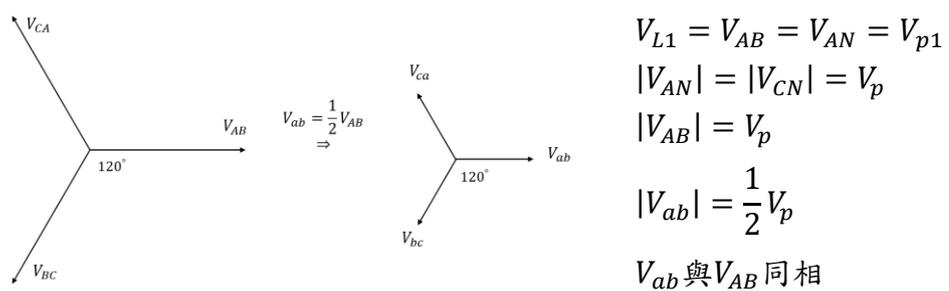


Fig. 3.10.4. V-V 接向量圖

● 實驗步驟

- (1) 將三個單相變壓器接成 Y- Δ transformer(一次側接 Y、二次側接 Δ)。
- (2) 量測一次與二次側之線壓及相壓。
- (3) 測量並繪出線壓 V_{l1} 及 V_{l2} 之波形。
- (4) 將 A,B 兩個變壓器接成 V-V transformer，重複步驟(2)、(3)。

接法	一次		二次		Phase difference between V_{l1} and V_{l2}
	$V_{p1}(V)$	$V_{l1}(V)$	$V_{p2}(V)$	$V_{l2}(V)$	
Y- Δ	127	221	63.8	63.8	V_{l1} 領先 V_{l2} 30°
V-V	220	220	110	110	兩者同相

● 線壓及相壓測試記錄

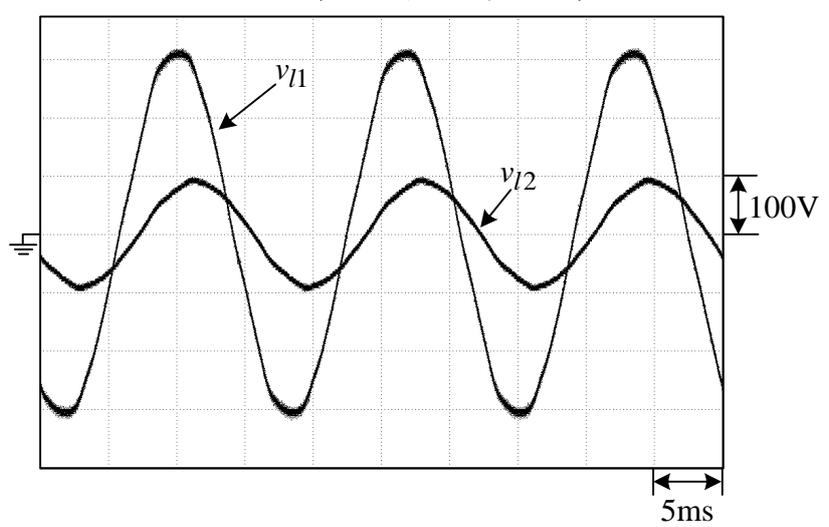


Fig. 3.10.5. Y- Δ 連接

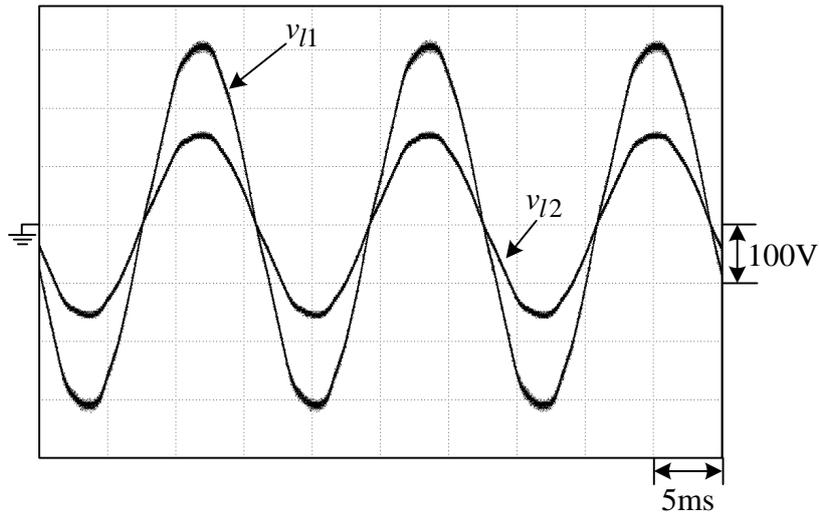


Fig. 3.10.6. V-V 連接

3.11 Scott-T 變壓器連接(三相變兩相)

Scott-T 拉線可將三相平衡電壓轉換成至兩相平衡電壓(互差 90°)，須注意 Teaser transformer 之一次側係接自 $0.866N_p$ 之抽頭，二次側係接自 N_s 之抽頭。在電流方面，由二次側所接之負載可知二次側之電流，再由安匝平衡可進一步求出一側之電流。如二次側所接之負載為平衡，則一次側之電流亦為三相平衡。

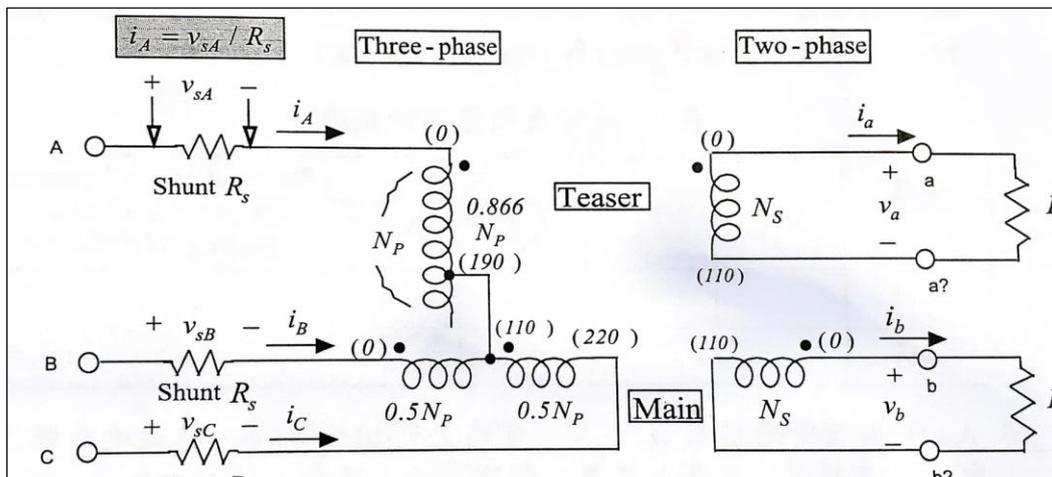


Fig. 3.11.1. Scott-T connection

● 實驗步驟：

- (1) 依上圖接線，其中，(A,B,C)接至線壓為 220V 之三相電源， R_L 接 110V 之白熾燈泡。
- (2) 以示波器量測記錄 $(v_a, v_b), (i_a, i_b)$ ，判斷是否分別為兩相平衡。量測記錄 (i_A, i_B, i_C) 之波形 $(i_A = v_{SA}/R_s, \dots)$ ，判斷是否為三相平衡。
- (3) 利用 DVM 測量記錄一次側及二次側之電壓及電流有效值。
- (4) 依下列步驟逐步計算一次側及二次側電流之 Phasors (有效值)。

● 波形結果：

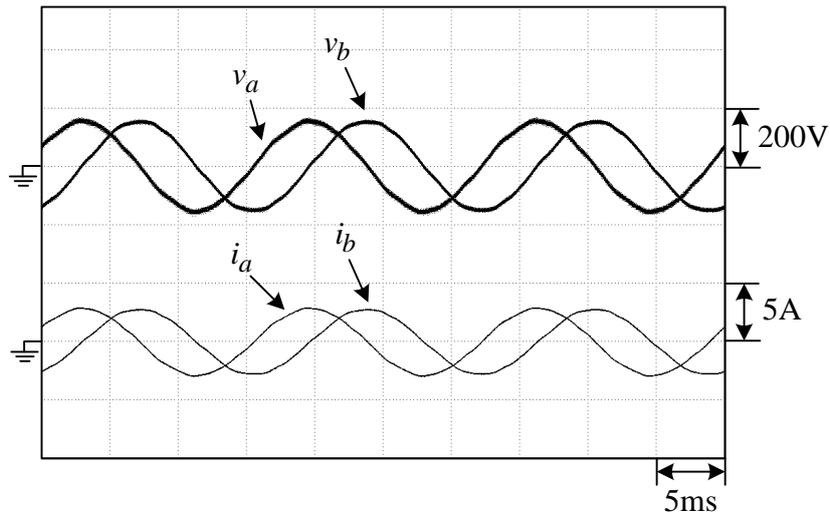


Fig. 3.11.2. (v_a, v_b) & (i_a, i_b)

→ 由 Fig. 3.11.2 可知 V_a, V_b 及 i_a, i_b 分別相差 90° ，為兩相平衡，而且電壓與電流同相。

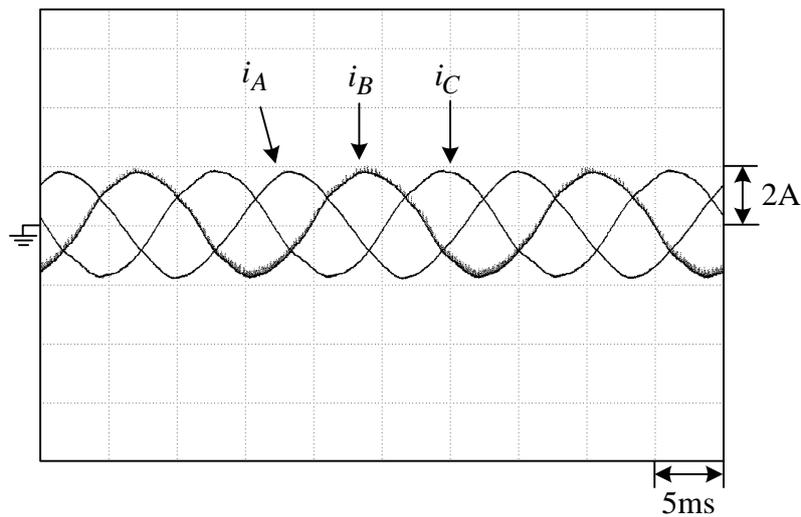


Fig. 3.11.3. (i_A, i_B, i_C)

→ 由 Fig. 3.11.3 可知 (i_A, i_B, i_C) 各差 120° ，為三相平衡。

● DVM 測量結果：

$V_a = 106V$	$V_b = 107V$	$I_a = 1.98A$	$I_b = 1.92A$
$V_{AB} = 220V$	$V_{BC} = 220V$	$V_{CA} = 220V$	
$I_A = 1.23A$	$I_B = 1.25A$	$I_C = 1.22A$	

● 計算結果：(於此 $N_p/N_s = 2$)

(1) $\bar{I}_a = I_a \angle 0^\circ = 1.98 \angle 0^\circ A$, $\bar{I}_b = I_b \angle -90^\circ = 1.92 \angle -90^\circ A$

(2) $\bar{I}_A = \bar{I}_a \times \left(\frac{N_s}{N_p \times 0.866} \right) = 1.1432 \angle 0^\circ A$, $|I_A| = 1.1432A$

$$(3) \bar{I}_B \times 0.5N_p + (\bar{I}_A + \bar{I}_B) \times 0.5N_p = \bar{I}_b \times N_s$$

將上面數值代入，可求出 $\bar{I}_B = 1.1173\angle -120.77^\circ \text{A}$, $|I_B| = 1.1173\text{A}$

$$(4) \bar{I}_C = -\bar{I}_A - \bar{I}_B = 1.1173\angle -239.23^\circ \text{A}, |I_C| = 1.1173\text{A}$$

(5) 量測值與計算值相比：

	I_A	I_B	I_C
計算值	1.1432A	1.1173A	1.1173A
量測值	1.23A	1.25A	1.22A
誤差值	7.59%	11.88%	9.19%

由上表可以發現，計算值皆比量測值來得小。推測誤差來自於匝數比誤差以及導線阻值和繞組阻值的影響。

3.12 T-T 接變壓器

以兩個單相變壓器接成三相平衡電壓轉換至三相平衡電壓，須注意 T-T transformer 之一次與二次側均係接自 $0.866N_p$ ($0.866N_s$) 之抽頭。

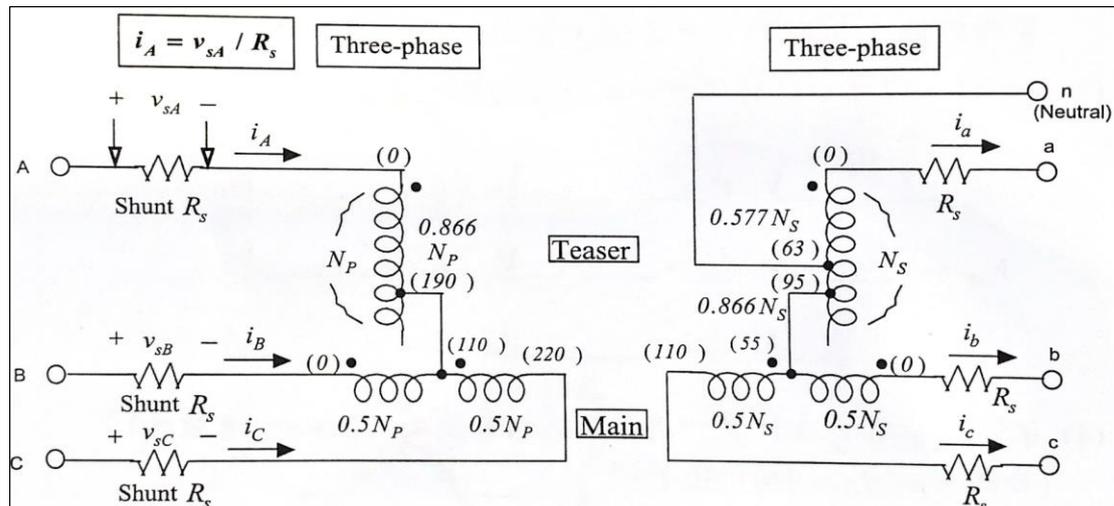


Fig. 3.12.1. T connection

● 實驗步驟：

- (1) 依上圖接線，其中，(A,B,C)接至線壓為 220V 之三相電源，二次側接 Y-connected 平衡負載(接 110V 之白熾燈泡)。
- (2) 以示波器量測記錄 (v_{ab}, v_{bc}, v_{ca}) , (i_a, i_b, i_c) ，判斷是否分別均為三相平衡。量測記錄 (i_A, i_B, i_C) 之波形， $(i_A = v_{sA}/R_s, \dots)$ ，判斷是否為三相平衡。

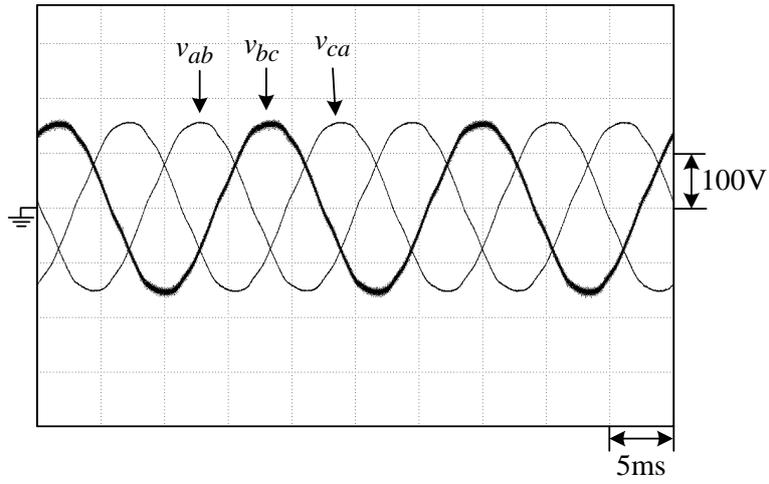


Fig. 3.12.2. 110W, (v_{ab}, v_{bc}, v_{ca})

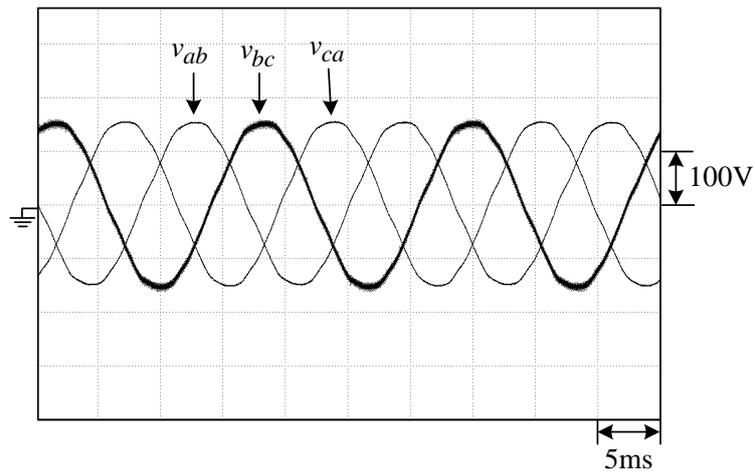


Fig. 3.12.3. 250W, (v_{ab}, v_{bc}, v_{ca})

觀察 Fig. 3.12.2 以及 Fig. 3.12.3，(v_{ab}, v_{bc}, v_{ca})各差 120° ，為三相平衡。在不同功率下量測之波形也大致相同。

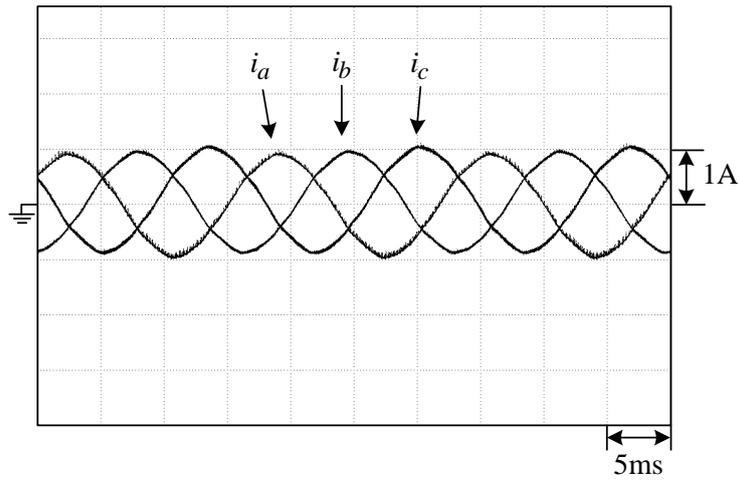


Fig. 3.12.4. 110W, (i_a, i_b, i_c)

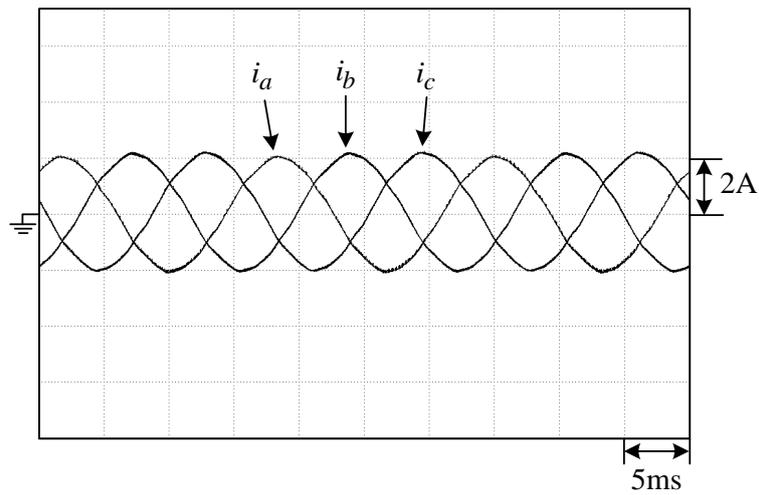


Fig. 3.12.5. 250W, (i_a, i_b, i_c)

觀察 Fig. 3.12.4 以及 Fig. 3.12.5，(i_a, i_b, i_c)各差 120° ，為三相平衡。在不同功率下量測之波形也大致相同，但 250W 之電流值較大。

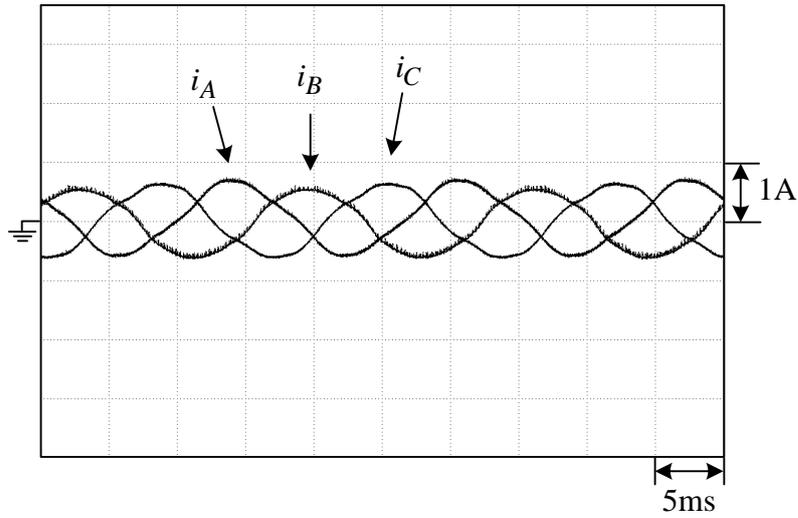


Fig. 3.12.6. 110W, (i_A, i_B, i_C)

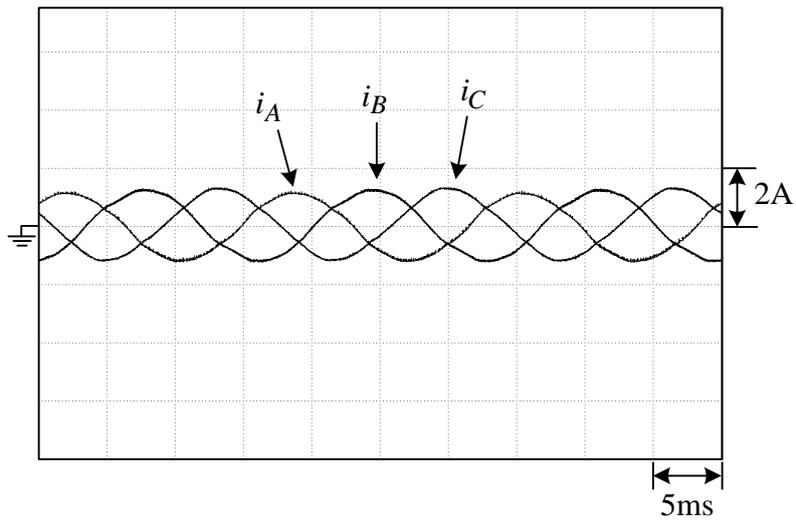


Fig. 3.12.7. 250W, (i_A, i_B, i_C)

觀察 Fig. 3.12.6 以及 Fig. 3.12.7，(i_A, i_B, i_C)各差 120° ，為三相平衡。在不同功率下量測之波形也大致相同，但 250W 之電流值較大。

3.12 多相變壓器之應用: 18-脈衝整流器系統

18-脈衝變壓器由一組 delta-delta 連接與兩組 polygon-delta 之變壓器組成。18-脈衝變壓器提供三組三相電源，分別具有+20度、0度、-20度之相位移，此三組電源分別連接至個別的三相全橋式整流器，三組整流器並聯輸出以建立直流鏈電壓。18-脈衝變壓器產生之直流鏈連波頻率高於直接使用三組三相整流器之連波頻率，因此可以使用電解電容來濾除連波。

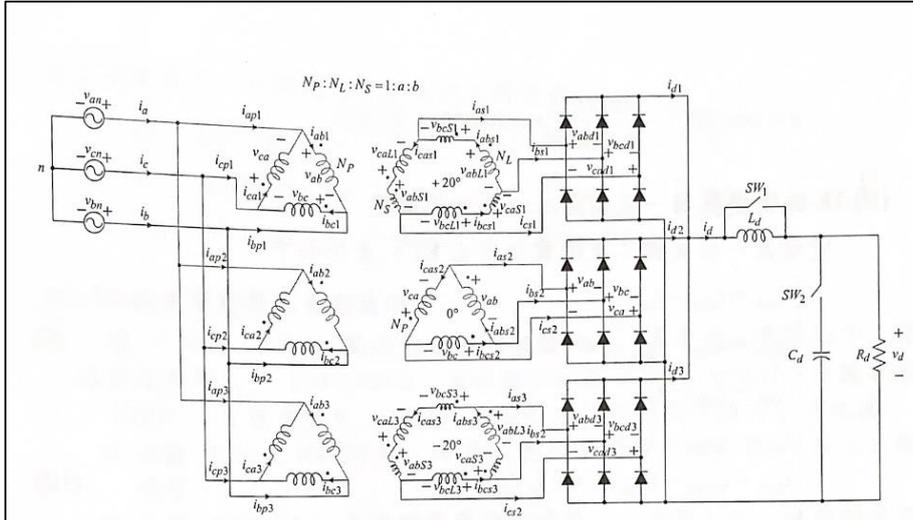


圖 9 18-脈衝整流器系統之電路圖

(A) polygon-delta 接線變壓器之匝數比推導

為了簡化推導，假設輸入三相交流電壓為正相序且 $v_{ab} = v_{bc} = v_{ca} = V$ ，並定義變壓器匝數比為：

$$N_P : N_L : N_S = 1 : a : b \quad (1)$$

根據圖 9 電路中所需的二次側輸出電壓，可得到如下之電壓方程式：

$$\bar{v}_{abd1} = V \angle 20^\circ = \bar{v}_{abL1} - \bar{v}_{bcS1} \quad (2)$$

$$\bar{v}_{abd3} = V \angle -20^\circ = \bar{v}_{abL3} - \bar{v}_{caS3} \quad (3)$$

其中

$$\bar{v}_{abL1} = a \times V \angle 0^\circ, \quad \bar{v}_{bcS1} = b \times V \angle -120^\circ \quad (4)$$

$$\bar{v}_{abL3} = a \times V \angle 0^\circ, \quad \bar{v}_{caS3} = b \times V \angle 120^\circ \quad (5)$$

將(4)式與(5)式分別代入(2)式與(3)式可得：

$$\begin{aligned} V \angle 20^\circ &= a \times V \angle 0^\circ - b \times V \angle -120^\circ \\ \Rightarrow \cos(20^\circ) + j \sin(20^\circ) &= a - b \cos(-120^\circ) - jb \sin(-120^\circ) \\ &= a + b \cos(60^\circ) + jb \sin(60^\circ) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} V \angle -20^\circ &= a \times V \angle 0^\circ - b \times V \angle 120^\circ \\ \Rightarrow \cos(-20^\circ) + j \sin(-20^\circ) &= a - b \cos(120^\circ) - jb \sin(120^\circ) \\ \Rightarrow \cos(20^\circ) - j \sin(20^\circ) &= a + b \cos(60^\circ) - jb \sin(60^\circ) \end{aligned} \quad (7)$$

經由比較係數法，可求出所需匝數比 a 與 b ：

$$\begin{cases} a + b \cos(60^\circ) = \cos(20^\circ) \\ b \sin(60^\circ) = \sin(20^\circ) \end{cases} \quad (8)$$

$$\Rightarrow b = \frac{\sin(20^\circ)}{\sin(60^\circ)} \approx 0.3949,$$

$$a = \cos(20^\circ) - \frac{\sin(20^\circ)}{\sin(60^\circ)} \times \cos(60^\circ) \approx 0.7422$$

(B) 18-脈衝變壓器一次側與二次側電流關係

變壓器一次側與二次側電流可由 KCL 表示如下：

$$\begin{cases} \bar{i}_{apx} = \bar{i}_{abx} - \bar{i}_{cax} \\ \bar{i}_{bpx} = \bar{i}_{bcx} - \bar{i}_{abx}, \quad x = 1, 2, 3 \\ \bar{i}_{cpx} = \bar{i}_{cax} - \bar{i}_{bcx} \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} \bar{i}_{asx} = \bar{i}_{absx} - \bar{i}_{casx} \\ \bar{i}_{bsx} = \bar{i}_{bcx} - \bar{i}_{absx}, \quad x = 1, 2, 3 \\ \bar{i}_{csx} = \bar{i}_{casx} - \bar{i}_{bcx} \end{cases} \quad (10)$$

在已知的繞組電流中，一次側繞組電流可用二次側繞組電流與匝數比來表示：

$$\begin{cases} \bar{i}_{ab1} = a\bar{i}_{abs1} - b\bar{i}_{cas1} \\ \bar{i}_{bc1} = a\bar{i}_{bcs1} - b\bar{i}_{abs1} \\ \bar{i}_{ca1} = a\bar{i}_{cas1} - b\bar{i}_{bcs1} \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \bar{i}_{ab2} = \bar{i}_{abs2} \\ \bar{i}_{bc2} = \bar{i}_{bcs2} \\ \bar{i}_{ca2} = \bar{i}_{cas2} \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} \bar{i}_{ab3} = a\bar{i}_{abs3} - b\bar{i}_{cas3} \\ \bar{i}_{bc3} = a\bar{i}_{bcs3} - b\bar{i}_{abs3} \\ \bar{i}_{ca3} = a\bar{i}_{cas3} - b\bar{i}_{bcs3} \end{cases} \quad (13)$$

接著可得：

$$\begin{cases} \bar{i}_{ap1} = \bar{i}_{abp1} - \bar{i}_{cap1} = a(\bar{i}_{abs1} - \bar{i}_{cas1}) - b(\bar{i}_{cas1} - \bar{i}_{bcs1}) = a\bar{i}_{as1} - b\bar{i}_{cs1} \\ \bar{i}_{bp1} = \bar{i}_{bcp1} - \bar{i}_{abp1} = a(\bar{i}_{bcs1} - \bar{i}_{abs1}) - b(\bar{i}_{abs1} - \bar{i}_{cas1}) = a\bar{i}_{bs1} - b\bar{i}_{as1} \\ \bar{i}_{cp1} = \bar{i}_{cap1} - \bar{i}_{bcp1} = a(\bar{i}_{cas1} - \bar{i}_{bcs1}) - b(\bar{i}_{bcs1} - \bar{i}_{abs1}) = a\bar{i}_{cs1} - b\bar{i}_{bs1} \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} \bar{i}_{ap2} = \bar{i}_{abp2} - \bar{i}_{cap2} = \bar{i}_{abs2} - \bar{i}_{cas2} = \bar{i}_{as2} \\ \bar{i}_{bp2} = \bar{i}_{bcp2} - \bar{i}_{abp2} = \bar{i}_{bcs2} - \bar{i}_{abs2} = \bar{i}_{bs2} \\ \bar{i}_{cp2} = \bar{i}_{cap2} - \bar{i}_{bcp2} = \bar{i}_{cas2} - \bar{i}_{bcs2} = \bar{i}_{cs2} \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} \bar{i}_{ap3} = \bar{i}_{abp3} - \bar{i}_{cap3} = a(\bar{i}_{abs3} - \bar{i}_{cas3}) - b(\bar{i}_{bcs3} - \bar{i}_{abs3}) = a\bar{i}_{as3} - b\bar{i}_{bs3} \\ \bar{i}_{bp3} = \bar{i}_{bcp3} - \bar{i}_{abp3} = a(\bar{i}_{bcs3} - \bar{i}_{abs3}) - b(\bar{i}_{cas3} - \bar{i}_{bcs3}) = a\bar{i}_{bs3} - b\bar{i}_{cs3} \\ \bar{i}_{cp3} = \bar{i}_{cap3} - \bar{i}_{bcp3} = a(\bar{i}_{cas3} - \bar{i}_{bcs3}) - b(\bar{i}_{abs3} - \bar{i}_{cas3}) = a\bar{i}_{cs3} - b\bar{i}_{as3} \end{cases} \quad (16)$$

由上可推導出一次側與二次側電流之關係為：

$$\begin{cases} \bar{i}_a = \bar{i}_{ap1} + \bar{i}_{ap2} + \bar{i}_{ap3} = a(\bar{i}_{as1} + \bar{i}_{as3}) - b(\bar{i}_{cs1} + \bar{i}_{bs3}) + \bar{i}_{as2} \\ \bar{i}_b = \bar{i}_{bp1} + \bar{i}_{bp2} + \bar{i}_{bp3} = a(\bar{i}_{bs1} + \bar{i}_{bs3}) - b(\bar{i}_{as1} + \bar{i}_{cs3}) + \bar{i}_{bs2} \\ \bar{i}_c = \bar{i}_{cp1} + \bar{i}_{cp2} + \bar{i}_{cp3} = a(\bar{i}_{cs1} + \bar{i}_{cs3}) - b(\bar{i}_{bs1} + \bar{i}_{as3}) + \bar{i}_{cs2} \end{cases} \quad (17)$$

(C) 18-脈衝變壓器之量測波形

圖 10 與圖 11 為 18-脈衝變壓器之(關鍵波形)，其中系統參數如下：輸入線對線電壓 $V_{LL} = 220\text{V}/60\text{Hz}$ 、直流扼流線圈電感 $L_d = 5\text{mH}$ 、濾波電容 $C_d = 470\mu\text{F}$ 、負載電阻 $R_d = 50\Omega$ 。由波形中可得到幾件值得注意之處：

- 由圖 10(a)至 10(c)可知，18-脈衝變壓器可產生相位差 20 度之三相電壓。
- 由圖 10(d)可知，直流鏈電壓漣波頻率 $f_{\Delta v_d}$ 為輸入交流電壓頻率之 18 倍。
- 由圖 10(e)可知，輸入線電流為準正弦波形，並可由(17)式之關係式驗證。
- 圖 11(a)至 11(c)分別為不同負載下之直流鏈電壓 v_d 與線電流 i_a 波形， L_d 可稍微改善 THD_{ia} ， C_d 可明顯使 v_d 較為平順，但 PF_{ia} 與 THD_{ia} 會變差。

實驗步驟 (Experiment procedure) :

- 依圖9接線，其中輸入端接至線電壓為220V之三相電源。
- 先連接 R_d 負載，亦即 SW_1 closed, SW_2 opened，以示波器量測記錄 $(v_{abd1}, v_{ab}, v_{abd3})(v_{bcd1}, v_{bc}, v_{bcd3})(v_{cad1}, v_{ca}, v_{cad3})$ ，三相電壓是否分別相差20度之相位差？
- 如圖11之三種負載情況，分別量測 (v_d, v_{an}, i_a) 波形，觀察並記錄 v_d 之漣波電壓頻率，並說明 L_d, C_d 對波形之影響。

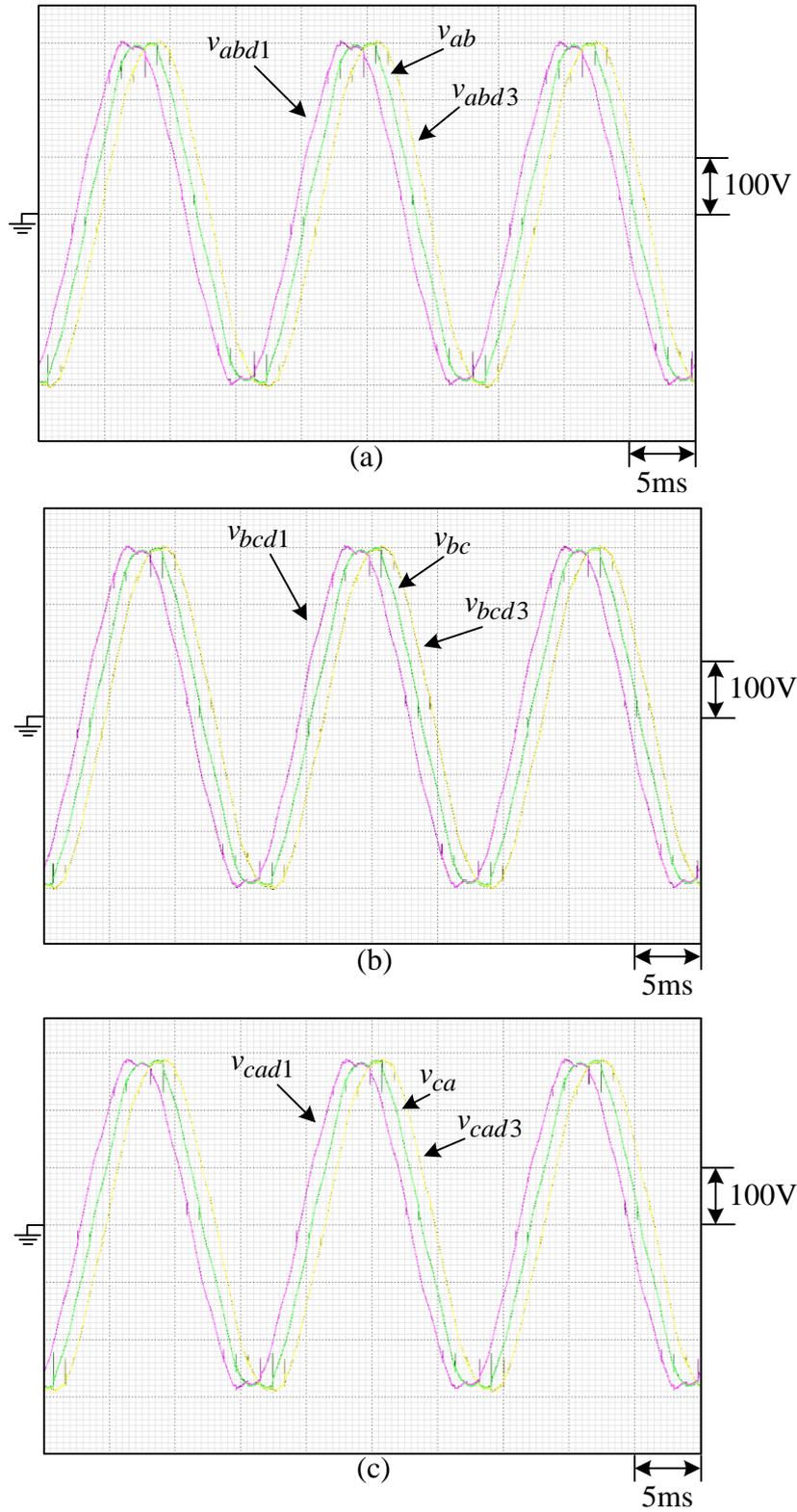


Fig. 3.13.1. 18-脈衝變壓器之關鍵波形(只連接 R_d 負載)：(a) ($v_{abd1}, v_{ab}, v_{abd3}$);
 (b) ($v_{bcd1}, v_{bc}, v_{bcd3}$); (c) ($v_{cad1}, v_{ca}, v_{cad3}$)

觀察 Fig. 3.13.1，三相電壓有分別相差 20 度之相位差。

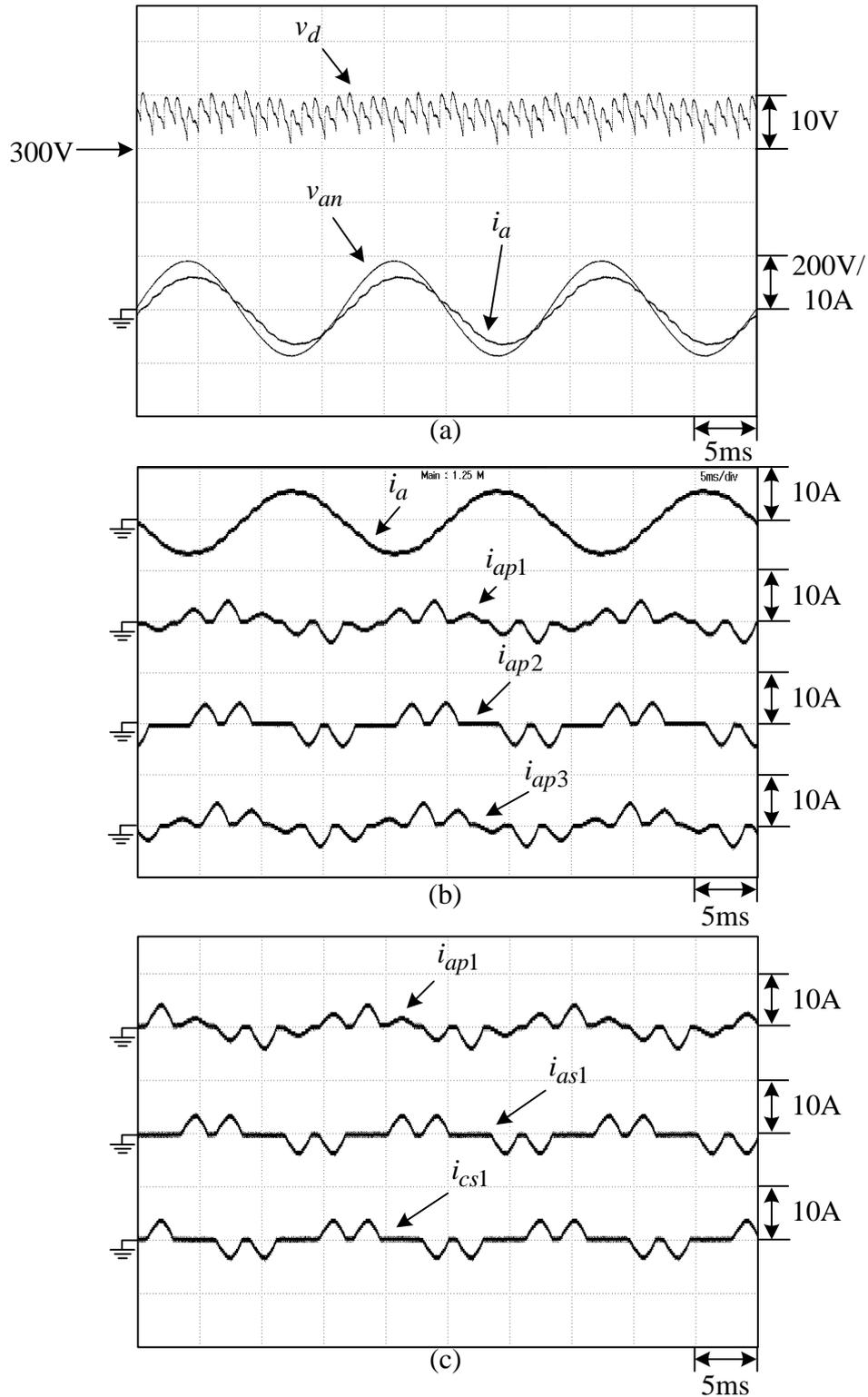


Fig. 3.13.2. 18-脈衝變壓器之關鍵波形(只連接 R_d 負載)：(a) (v_d, v_{an}, i_a)；
 (b) ($i_a, i_{ap1}, i_{ap2}, i_{ap3}$)；(c) ($i_{ap1}, i_{as1}, i_{cs1}$)

觀察 Fig. 3.13.2，(a)圖中 v_d 頻率為交流電壓頻率之18倍，(b)圖中輸入之線電流為準正弦波。

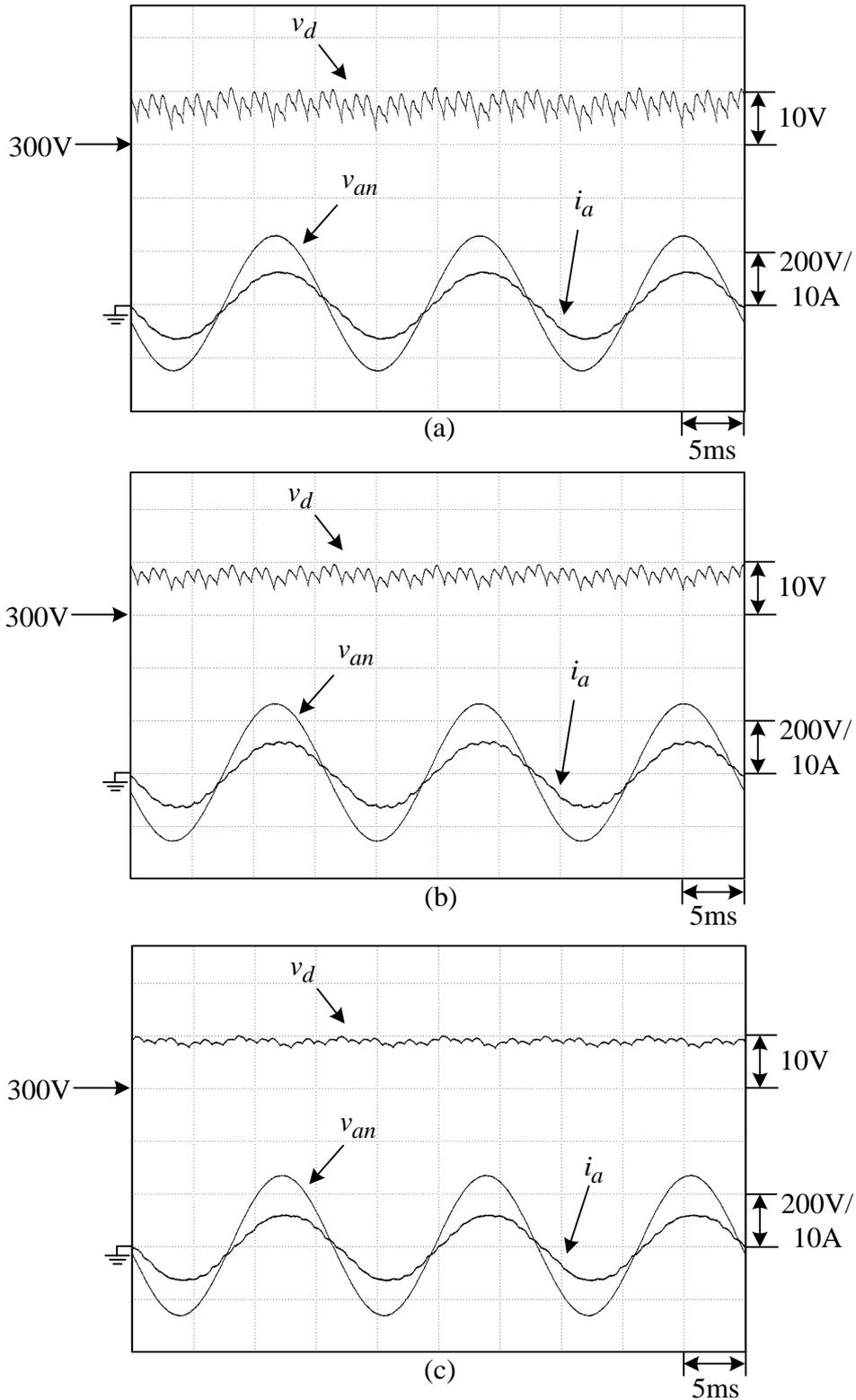


Fig. 3.13.3. 18-脈衝變壓器於不同負載情況之(v_d, v_{an}, i_a)波形：(a) (L_d, R_d)負載；(b) (C_d, R_d)負載；(c) (L_d, C_d, R_d)負載

觀察 Fig. 3.13.3 可知，(c)圖之電壓漣波明顯降低，這是因為 L(扼流圈，DC choke)搭配 C 組成濾波電路，有效除去直流鏈中的波動成份。

實驗心得：

這次實驗著重在理解三相變壓器的種類以及操作原理。三相變壓器的應用在生活中又更為廣泛，做完這個實驗後有助於我們更加了解輸配電系統中變壓器使用時機以及方法。其中最讓我印象深刻的就是 Scott-T 在列車配電系統中的應用了，這讓我想起廖老師在電機控制課程中提到列車為了讓輸電能夠穩定，所以選擇使用單相配電，而這正是使用 Scott-T 將三相電轉變為兩相分別供給雙向列車使用！多虧有實驗課程的實作歷練讓我對之前所學更加充分理解吸收，感謝所有助教的協助以及老師的指導。