

電動機械實驗 Lab4 報告

(Electrical Machinery Laboratory Lab4 Report)

實驗題目 (Experiment title) : 變壓器實驗

日期 (Date) : 2022/03/23

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

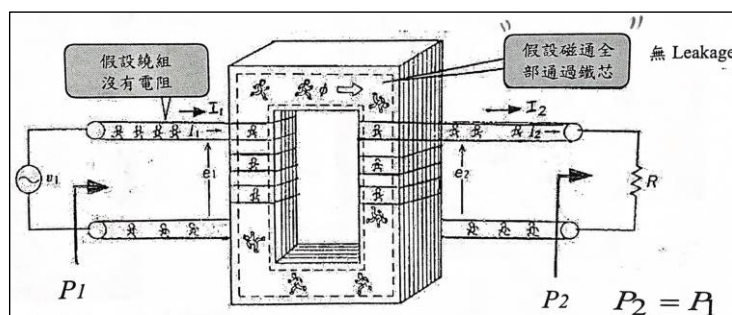
1. 實驗目的：

本實驗旨在藉由實驗中之接線與測試，了解變壓器之穩態與暫態基本特性。在此實驗中，我們將從事下列項目之測試：(1) 絕緣電阻、(2) 繞組電阻、(3) 變壓比、(4) 極性測試、(5) 短路及開路測試、(6) 自耦變壓器、(7) B-H 特性曲線、(8) 湧浪電流、(9) 變壓器除壓激磁電流瞬斷之電壓突波、(10) 單相變壓器之三相接線、(11) Scott-T 變壓器連接(三相變兩相)、(12) T-T 接變壓器。

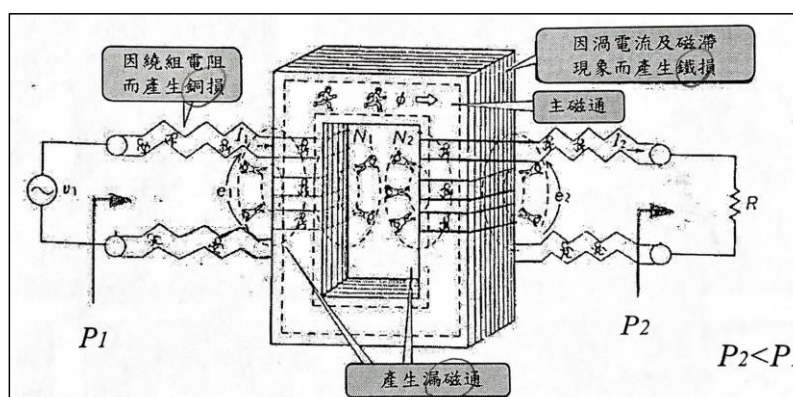
2. 實驗背景：

變壓器(Transformer)為靜止行電機機械，利用磁通交鏈為媒介從事電能轉換，其主要功能為：(1)變壓或變流 $V_1/V_2 = I_2/I_1 = N_1/N_2$ 、(2)阻抗轉換、(3)隔離。變壓器可分類為：(1)隔離式/非隔離式、(2)單相/三相、(3)內鐵式/外鐵式、(4)儀表變壓器、(5)脈衝變壓器。

一個理想的變壓器，其輸入功率會等於輸出功率，然而實際的變壓器，在電及鐵的部分均具有損失，兩者比較如下：



● 理想變壓器



● 實際變壓器

鐵損(Core loss)：渦流損 + 磁滯損

3. 實驗項目及步驟：

3.1. 絕緣電阻：使用高阻計測量。(助教 demo)

分別測試三個單相變壓器各個高壓繞組($H_1 - H_2$)於鐵心(G)間、低壓繞組($X_1 - X_2$)於鐵心(G)間、以及高壓繞組與低壓繞組間之絕緣電阻。

項目/變壓器	A	B	C
H-G (MΩ)	>2000 MΩ	>2000 MΩ	>2000 MΩ
X-G (MΩ)	>2000 MΩ	>2000 MΩ	>2000 MΩ
H-X (MΩ)	>2000 MΩ	>2000 MΩ	>2000 MΩ

表一、變壓器之絕緣特性

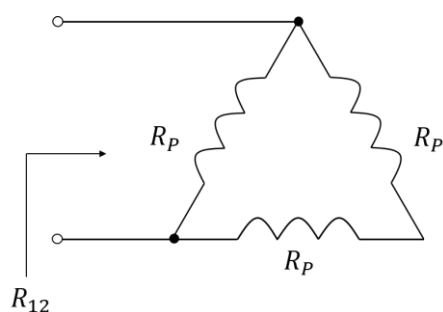
3.2. 繞組電阻：

測試繞組電阻的目的，在於求銅損、溫升、等效電路及電壓調整率。一般變壓器在工作時由於 I^2R 之功率消耗，繞組之溫度大於室溫(T_A)，因此利用惠斯登電橋或直流電壓測試法(加電壓量電流)所測得之室溫電阻 R_A (在室溫為 T_A 下之電阻)，必須換算至 75° 下之電阻值 R_{75} ：

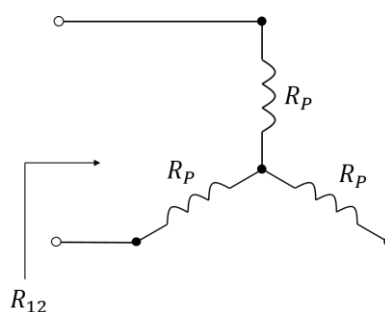
$$R_{75} = R_A \left(\frac{234.5 + 75}{234.5 + T_A} \right) \Omega$$

然而在交流電流通下，因集膚作用(Skin effect)，交流電阻高於直流電阻，一般假設： $R_{ac} = KR_{dc}$, $K \approx 1.05$ 。

如果待測之變壓器係一連接完後之三相變壓器，要由其端點測得單一變壓器之繞組電阻，須作如以下之轉換：



● Delta-connected: $R_p = \frac{3}{2} R_{12}$



● Y-connected: $R_p = \frac{1}{2} R_{12}$

項目\次側	高壓側($H_1 - H_2$) (一次側)	低壓側($X_1 - X_2$) (二次側)	室溫
$R_A(T_A)\Omega$	1.3	0.6	21°C
$R_A(75^\circ)\Omega$	1.575	0.727	
$R_{ac}(75^\circ)\Omega$	1.654	0.763	

表二、變壓器之繞組電阻(Winding resistances)

3.3. 變壓比：

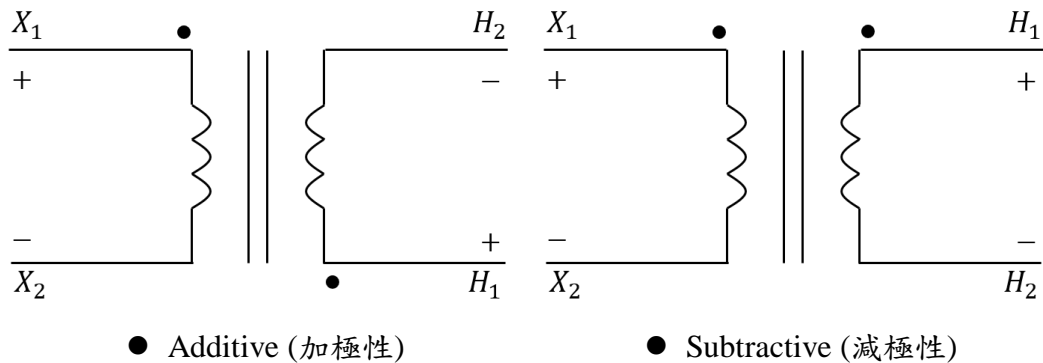
變壓比約等於匝數比，在未知匝數比時，可在高壓側加額定電壓，然後用 DVM 之交流電壓檔測量高壓側電壓 V_H 及低壓側電壓 V_L ，由變壓比概算出匝數比：

項目 變壓器	$V_H(V_1)$	$V_L(V_2)$	匝數比 $a = V_1/V_2$
A	216.8	110.3	1.966
B	216.2	110.3	1.960
C	215.5	110	1.959

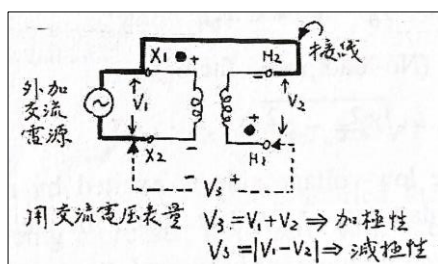
表三、變壓器之匝數比

3.4. 極性測試：將 dot 點在適當之端點

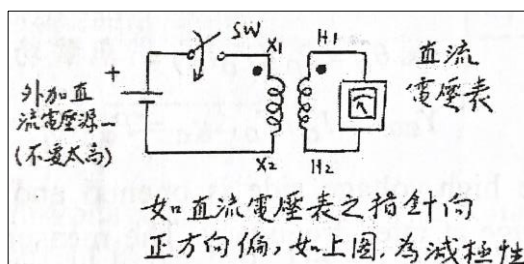
變壓器之極性係指兩次側間繞組電壓之瞬間相對極性，此極性與繞組之繞線相對方向有關。極性在單一個單項變壓器使用時不重要；然而在多個變壓器連接時(如並接、串接或接成三相變壓器)，則非常重要，如果連接不當，將會造成嚴重的短路電流而使其燒毀。假設極性之定義為：



以下列舉兩種測試方法：交流法、直流法。先在一次側之 X_1 處標一黑點，二次側之黑點依下列方法標示：



● 交流法(AC method)



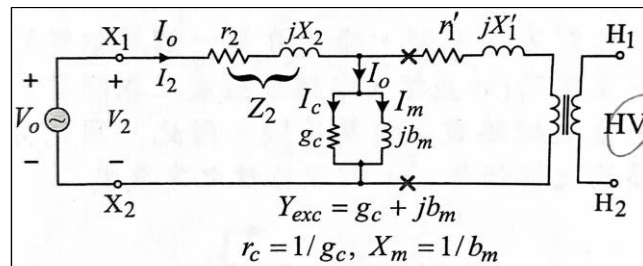
● 直流法(DC method)

3.5. 短路及開路測試：

(1) 開路測試：

在高壓側開路，低壓側加壓時，高壓側之電流為零。因此，電源電流全流過 Z_2 及 $Y_{exc} = g_c + jb_m$ (Exciting admittance)，一般激磁阻抗 $1/Y_{exc}$ 遠大於 Z_2 ，故開路測試時之銅損可以略去，所測得之阻抗幾全為激磁阻抗，損失為鐵損，變壓器之鐵損主要包括磁滯損及渦流損。

既然鐵損與激磁程度有關，且一般變壓器在正常使用下均係加額定頻率之額定電壓，因此，開路測試必須加以額定頻率之額定電壓，才可使激磁在額定磁通密度下。因較低電壓之測試電源容易取得，故在高壓側開路、在低壓側加壓。



● 開路測試實驗圖

定義 V_o, I_o, P_o 分別為開路測試時之電表讀數，再利用 $1/Y_{exc} \gg Z_2$ 之關係，可以得到以下關係式：

$$I_c = P_o/V_o, (P_o \approx \text{鐵損})$$

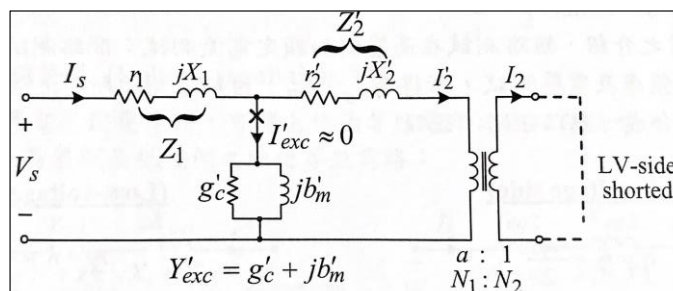
$$I_m = \sqrt{I_o^2 - I_c^2}, (I_m = \text{磁化電流}, I_o = \text{激磁電流})$$

$$\cos\theta_o = P_o/V_o I_o = \text{無載功因}$$

$$Y_{exc} = I_o/V_o, g_c = P_o/V_o^2, b_m = \sqrt{Y_{exc}^2 - g_c^2}$$

(2) 短路測試：

在短路的情況下，由於 $(1/Y'_{exc}) \gg Z'_2$ ，所以我們知道 I_s 大部分均流過線圈之阻抗 Z_1 及 Z'_2 ， $I'_{exc} \approx 0$ 。因此由短路測試所得幾乎全為二線圈之全部銅損(鐵損因激勵磁通小而可以省略)，測得之阻抗全為 $Z_1 + Z'_2$ 。由於在高壓側較容易達到額定電流，因此我們在低壓側短路，高壓側加壓測量，另外需注意電源電壓是從零調起，以確保安全。



● 短路測試實驗圖

定義 V_s, I_s, P_s 分別為短路測試時之電表讀數，再利用 $1/Y'_{exc} \gg Z'_2$ 之關係，可以得到以下關係式：

$$P_s \approx I_s^2(r_1 + r'_2) = \text{銅損}$$

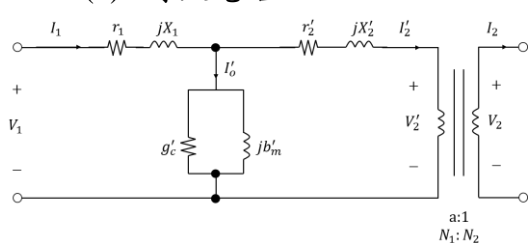
$$Z_{eq1} = r_{eq1} + jX_{eq1} = (r_1 + r'_2) + j(X_1 + X'_2)$$

$$= (r_1 + a^2r_2) + j(X_1 + a^2X_2)$$

$$a = V_1/V_2 = (\text{turn ratio})$$

$$Z_{eq1} = V_s/I_s, r_{eq1} = P_s/I_s^2, X_{eq1} = \sqrt{Z_{eq1}^2 - r_{eq1}^2}$$

(3) 等效電路：

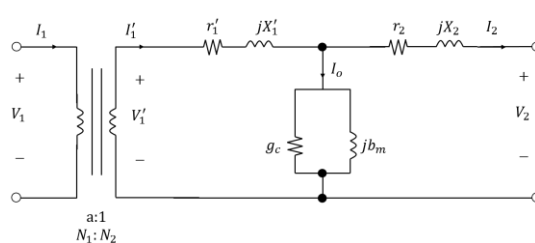


$$V'_2 = aV_2, I'_2 = I_2/a, a = \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$r'_2 = a^2r_2, X'_2 = a^2X_2$$

$$g'_c = g_c/a^2, b'_m = b_m/a^2$$

● 高壓側之等效電路



$$V'_1 = V_1/a, I'_1 = aI_1$$

$$r'_1 = r_1/a^2, X'_1 = X_1/a^2$$

● 低壓側之等效電路

由於先前於短路測試所得之阻抗(r_{eq1}, X_{eq1})為兩個繞組之合成，難以分開，故設：

(High-voltage side)	(Low-voltage side)
$r_1 = r'_2 = \frac{r_{eq1}}{2}$	$r_2 = r'_1 = \frac{r_1}{a^2}$
$X_1 = X'_2 = \frac{X_{eq1}}{2}$	$X_2 = X'_1 = \frac{X_1}{a^2}$
$g'_c = \frac{g_c}{a^2}, b'_m = \frac{b_m}{a^2}$	g_c, b_m

(4) 效率

$$\text{變壓器之效率為：} \eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

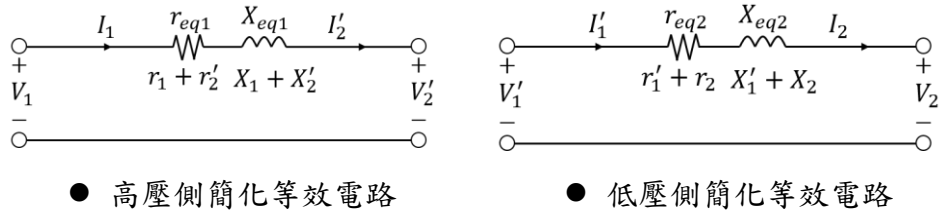
$$\text{變壓器之滿載效率為：} \eta_{rated} = \frac{P_{rated}}{P_{rated} + P_o + P_s} = \frac{V_{rated} I_{rated} \cos\theta}{V_{rated} I_{rated} \cos\theta + P_o + P_s}$$

其中 P_{rated} 為額定輸出、 P_o 為鐵損、 P_s 為銅損。

$$\text{變壓器之半載效率為：} \eta_{\frac{1}{2}} = \frac{\frac{1}{2} * P_{rated}}{\frac{1}{2} * P_{rated} + P_o + \frac{1}{4} * P_s}$$

(5) 電壓調整率：

在計算電壓調整率時，可將上述兩等效電路之激磁阻抗略去，因此可得到如下在高電壓側及低電壓側之簡化等效電路：



在高壓側計算 VR 之公式為：

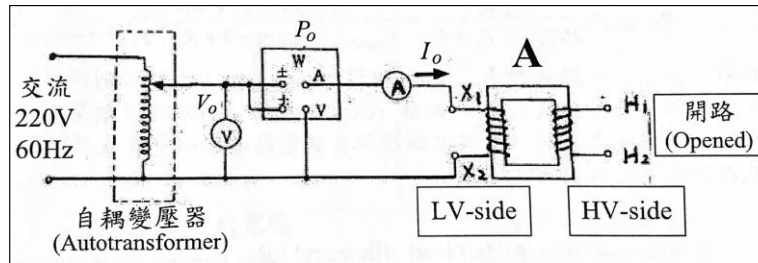
$$V_1 = V_2' + I_1(r_{eq1} + jX_{eq1})$$

$$VR = (|V_1| - |V_2'|) / |V_2'|$$

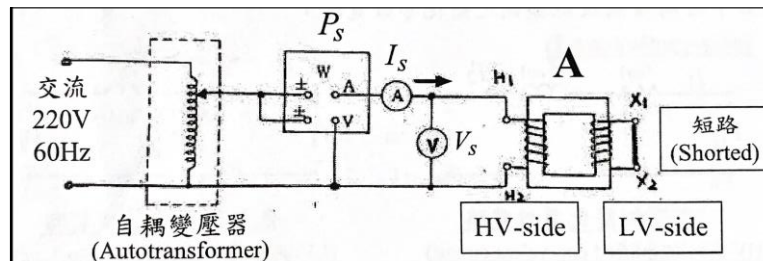
$$V_2' = |V_2'| \angle 0^\circ, I_1 = I_2' = |I_2'| \angle \theta, \theta = \text{power factor angle}$$

(6) 實驗步驟：

- a. Open-circuit test：將變壓器 A 接成下圖所示，測量鐵損。
- b. 接上電源前，先確保電壓由零開始調起，最後調至額定電壓為止。



- c. Short-circuit test：將變壓器 A 接成下圖所示，測量銅損。



- d. 電壓由零開始調起，直到 I_s 等於額定電流為止。
- e. 在短路測試時，量測當達到額定電流下， V_s 為額定電壓之百分比， $V_s / V_{rated(H)}$ 。
- f. 測量 V_2 負載及無載時的電壓，計算電阻調整率 (VR)。
- g. 分別量測 1~3 顆燈泡負載時的電壓、電流及實測功率，最後計算其效率。

(7) 測量與計算結果：

開路測試			短路測試		
記錄值	* $V_o(V)$	110.7 V	記錄值	$V_s(V)$	15.7 V
	$I_o(A)$	0.266 A		* $I_s(A)$	4.55 A
	$P_o(W)$	21 W		$P_s(W)$	68.4 W

開路測試計算：

$$\begin{aligned} \rightarrow I_c &= P_o/V_o = 20/110.7 = 0.1897(A) \\ \rightarrow I_m &= \sqrt{I_o^2 - I_c^2} = 0.1865(A) \\ \rightarrow g_c &= P_o/V_o^2 = 21/(110.7)^2 = 1.714 * 10^{-3}(mho) \\ \rightarrow Y_{exc} &= I_o/V_o = 0.266/110.7 = 2.403 * 10^{-3}(mho) \\ \rightarrow b_m &= \sqrt{Y_{exc}^2 - g_c^2} = 1.684 * 10^{-3}(mho) \\ \rightarrow \cos\theta_o &= P_o/V_o I_o = 0.713 \end{aligned}$$

短路測試計算：

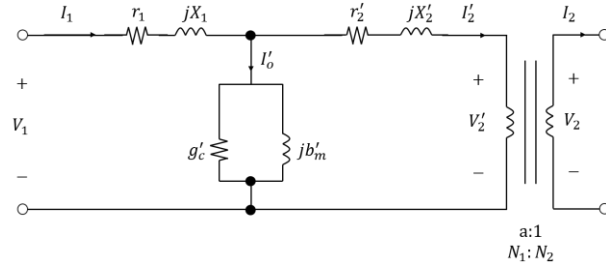
$$\begin{aligned} \rightarrow r_{eq1} &= P_s/I_s^2 = 68.4/(4.55)^2 = 3.304(ohm) \\ \rightarrow Z_{eq1} &= V_s/I_s = 3.451(ohm) \\ \rightarrow X_{eq1} &= \sqrt{Z_{eq1}^2 - r_{eq1}^2} = \sqrt{(3.451)^2 - (3.304)^2} = 0.996(ohm) \\ \rightarrow \cos\theta_s &= P_s/V_s I_s = 0.958 \\ \rightarrow V_s/V_{rated,H} &= 15.7/220 = 7.14\% \end{aligned}$$

開路測試			短路測試		
計算值	$I_c(A)$	0.1897 A	計算值	$r_{eq1}(ohm)$	3.304 ohm
	$I_m(A)$	0.1865 A		$X_{eq1}(ohm)$	0.996 ohm
	$g_c(mho)$	$1.714 * 10^{-3}mho$		$\cos\theta_s$	0.958
	$b_m(mho)$	$1.684 * 10^{-3}mho$		$V_s/V_{rated,H}$	7.14%
	$\cos\theta_o$	0.713			

Exercises :

(i)

● 高壓側等效電路



由 3.3 變壓比實驗，我們可以得知： $a = 1.96$

$$V_2' = aV_2 = 1.96 * 110 = 215.6(V)$$

$$I_2' = I_2/a = 9.09/1.96 = 4.64(A)$$

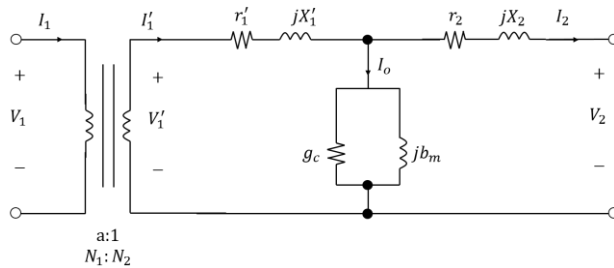
$$r_1 = r_2' = \frac{r_{eq1}}{2} = 1.652(ohm)$$

$$X_1 = X_2' = \frac{X_{eq1}}{2} = 0.498(ohm)$$

$$g_c' = g_c/a^2 = 1.714 * 10^{-3}/3.8416 = 4.462 * 10^{-4}(mho)$$

$$b_m' = b_m/a^2 = 1.684 * 10^{-3}/3.8416 = 4.384 * 10^{-4}(mho)$$

● 低壓側等效電路：



$$V_1' = V_1/a = 220/1.96 = 112.24(V)$$

$$I_1' = aI_1 = 1.96 * 4.55 = 8.918(A)$$

$$r_1' = r_2 = r_1/a^2 = 1.652/(1.96)^2 = 0.43(ohm)$$

$$X_1' = X_2 = \frac{X_1}{a^2} = \frac{0.498}{(1.96)^2} = 0.1296(ohm)$$

$$g_c = 1.714 * 10^{-3}(mho), b_m = 1.684 * 10^{-3}(mho)$$

(ii)

為什麼變壓器之容量均以 kVA 表示，而不以 kW 表示？

$$S(kVA) = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

$$P = S * \cos\theta$$

$$Q = S * \sin\theta$$

→ 其中，P 為實功、Q 為虛功， $\cos\theta$ 為功率因數，輸入之電流、電壓並非完全的作功(例如馬達會產生落後的功因)，所以我們不以 kW 表示，而以 kVA 表示，如此一來我們可以輕鬆計算出變壓器最大的電壓輸入以及電流輸入，避免危險。

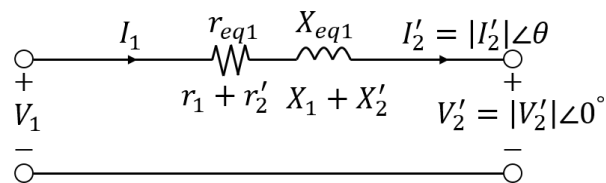
(iii)

$$\text{功率因數 } \cos\theta = 0.6$$

$$\text{滿載效率: } \eta_{\text{rated}} = \frac{P_{\text{rated}}}{P_{\text{rated}} + P_o + P_s} = \frac{1\text{kVA}\cos\theta}{1\text{kVA}\cos\theta + P_o + P_s} = \frac{600}{600 + 21 + 68.4} = 87.03\%$$

$$\frac{1}{4}\text{載效率: } \eta = \frac{\frac{1}{4}P_{\text{rated}}}{\frac{1}{4}P_{\text{rated}} + P_o + \left(\frac{1}{4}\right)^2 P_s} = \frac{\frac{1}{4} * 600}{\frac{1}{4} * 600 + 21 + \frac{1}{16} * 68.4} = 85.58\%$$

(iv)



$$\text{假設滿載時 } V_2 = 110V, V_2' = 215.6\angle 0^\circ$$

● $\cos\theta = 0.6$ leading

$$\begin{aligned} V_1 &= V_2' + I_1(r_{eq1} + jX_{eq1}) \\ &= 215.6\angle 0 + 4.64\angle 53.13 \cdot (3.304 + j \cdot 0.996) \\ &= 221.101 + 15.04j \\ |V_1| &= 221.61(V) \\ VR &= \frac{(|V_1| - |V_2'|)}{|V_2'|} = \frac{221.61 - 215.6}{215.6} = 2.788\% \end{aligned}$$

● $\cos\theta = 0.6$ lagging

$$\begin{aligned} V_1 &= V_2' + I_1(r_{eq1} + jX_{eq1}) \\ &= 215.6\angle 0 + 4.64\angle -53.13 \cdot (3.304 + j \cdot 0.996) \\ &= 228.496 - 9.492j \\ |V_1| &= 228.69(V) \\ VR &= \frac{(|V_1| - |V_2'|)}{|V_2'|} = \frac{228.69 - 215.6}{215.6} = 6.071\% \end{aligned}$$

Voltage regulation from measurement :

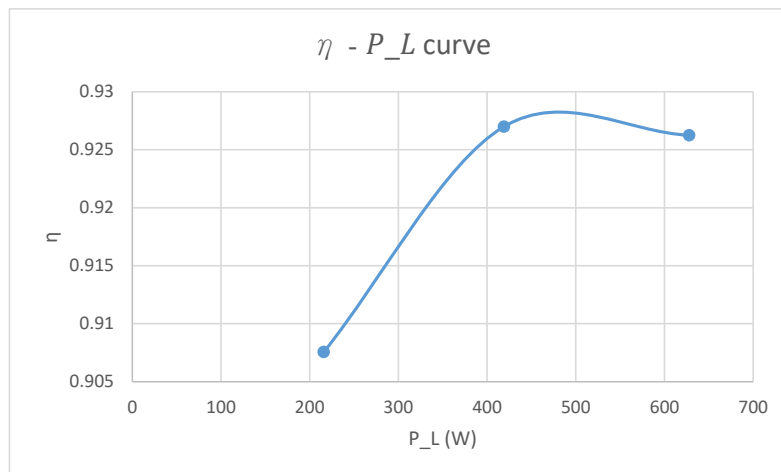
$$\rightarrow V_{2,no-load} = 110V$$

$$\rightarrow V_{2,loaded} = 102.8V, I_{2,loaded} = 6.36A$$

$$\rightarrow VR = \frac{V_{2,no-load} - V_{2,loaded}}{V_{2,loaded}} = \frac{110 - 102.8}{102.8} = 7.00\%$$

Efficiency measurement :

Load numbers	$V_s(V)$	$I_s(A)$	$P_s(W)$	$V_L(V)$	$I_L(A)$	$P_L(W)$	$\eta = \frac{P_L}{P_s}$
1	220	1.08	238	108	1.99	216	0.90756
2	220	2.06	452	106	4.93	419	0.92699
3	219	3.1	678	104.9	5.99	628	0.92625



3.6. 自耦變壓器

將變壓器連接成加極性以及減極性兩種樣貌，量測其電壓與比例：

接法	$V_1(V)$	$V_2(V)$	Voltage ratio $a' = V_2/V_1$	Voltage ratio $a = V_2/V_1$
加極性 (Additive)	127	195.9	1.54	0.51
減極性 (Subtractive)	127	65.4	0.52	0.51

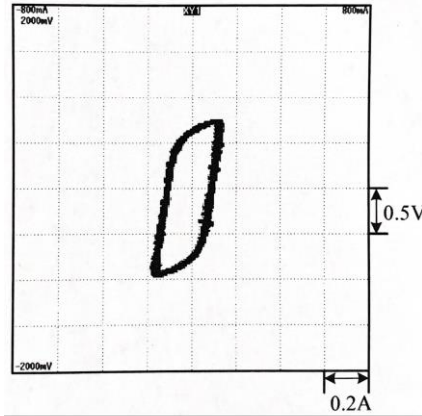
- 加極性： $V_2 = \frac{3}{2}V_1$

- 減極性： $V_2 = \frac{1}{2}V_1$

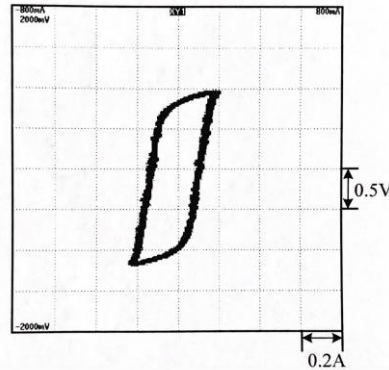
3.7 B-H 特性曲線

將自耦變壓器調整，使加至變壓器之電壓為下列三種情況，印出此三種 B-H curves：

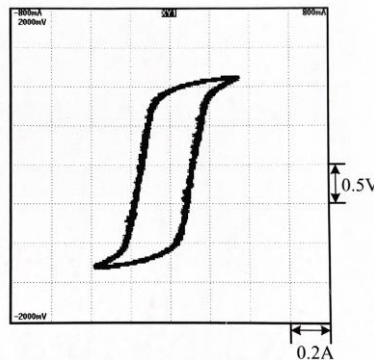
- (1) 小於額定值($150V < \text{rated voltage}$)：磁滯曲線尚未達到飽和，B-H 大致上呈線性的關係。



- (2) 等於額定值($190V = \text{rated voltage}$)：當磁場強度 H 逐漸變大，磁通密度 B 也進入飽和狀態，即增大的磁場強度已無法產生更大的磁通密度。



- (3) 大於額定值($220V > \text{rated voltage}$)：磁滯曲線兩側有明顯的尖端，代表磁通密度 B 以達到飽和狀態，即使磁場強度增大也無法再提升。



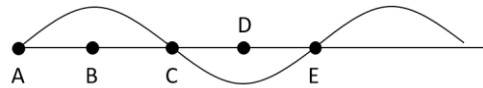
- (4) 當頻率上升時，會使得磁通量下降，但我們需要維持一定的磁場強度才能夠磁化磁性材料，因此造成電流上升，即磁場強度上升，導致磁滯曲線變寬變胖的現象。

3.7. 湧浪電流

一個電力變壓器在開關剛關上的瞬間，其激磁電流會遠大於穩態值，而且此電流會與開關關上之時刻有關，需要經過數個 Cycles 後才會衰減下來，此突波電流會造成干擾及保護的問題。對於一個變壓器而言，其由系統吸入之激磁電流依磁通之狀況，由磁滯曲線決定。然而，磁通係外加電壓 $V(t)$ 之積分， $V(t)$ 之相角由電源開關 ON 之瞬間決定：

$$\phi(t) = \phi(0) + (1/N) \int_0^t v(t) d\omega t$$

其中， $\phi(0)$ 為鐵心中之剩磁， $v(t) = \sqrt{2}V \sin(\omega t + \theta)$ ， θ 由電源開關 ON 之瞬間決定。假設 $\phi(0) = 0$ ，Inrush current 產生的機制如下：



假設 SW 於 A 處投入

$$\theta = 0, v(t) = \sqrt{2}V \sin \omega t$$

$$\phi(t) = \frac{1}{N} \int_0^t v dt$$

$$= \phi_{max} - \phi_{max} \cos \omega t$$

→ ϕ_{max} 會使 Inrush current 增加。

假設 SW 於 B 處投入

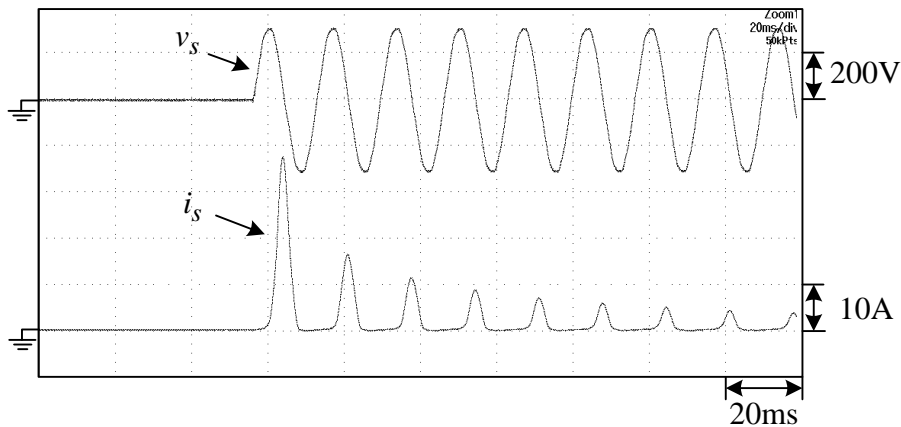
$$\theta = \pi/2, v(t) = \sqrt{2}V \cos \omega t$$

$$\phi(t) = \frac{1}{N} \int_0^t v dt = \frac{\sqrt{2}V}{\omega N} \sin \omega t$$

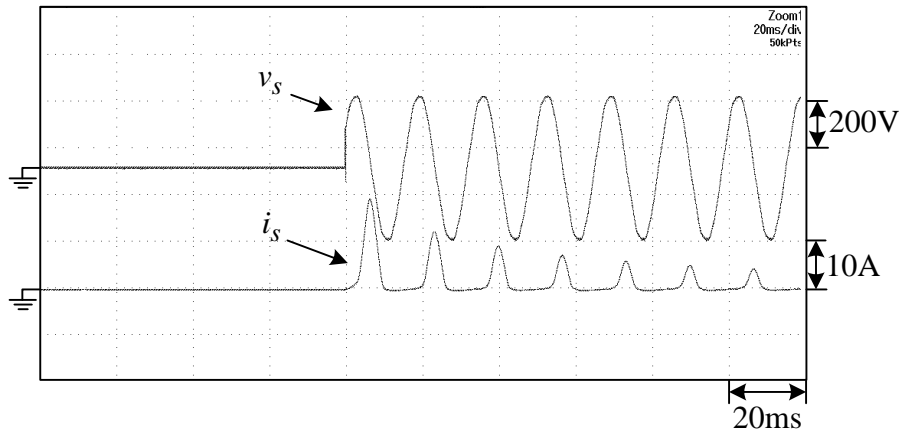
$$\triangleq \phi_{max} \sin \omega t$$

解決 Inrush current 方法：需偵測控制指令，使 SW 於 B 或 D 處投入。

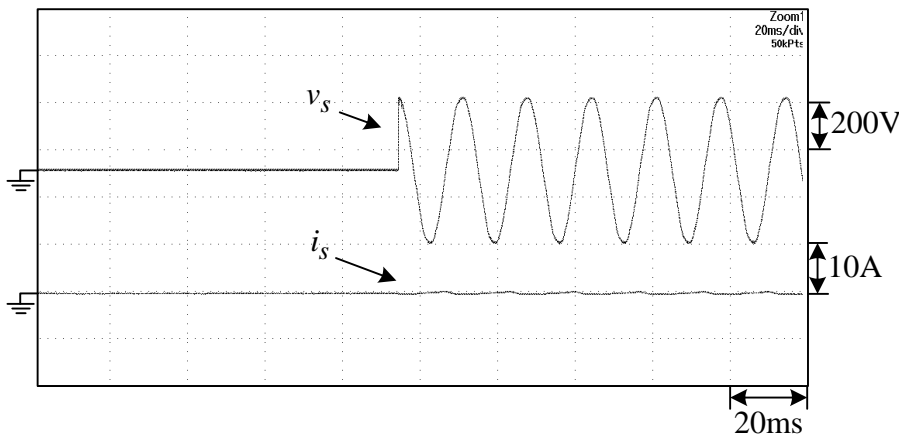
以下為不同投入時刻所得到的 Inrush current：



● Fig. 3.7.1. 於 A 處投入之波形



● Fig. 3.7.2. 於 A-B 之間投入之波形



● Fig. 3.7.3. 於 B 處投入之波形

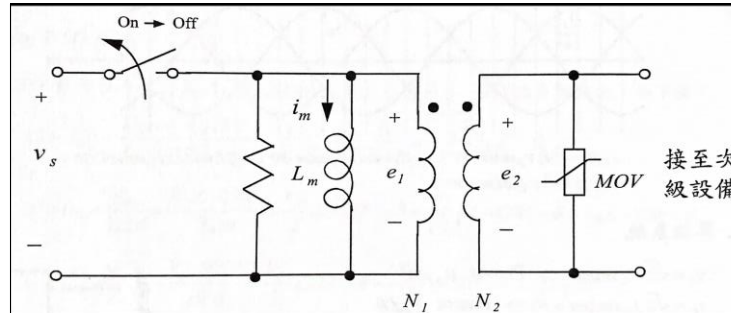
由 Fig. 3.7.1、Fig. 3.7.2、Fig. 3.7.3 三張波形圖可以觀察出，當我們在電壓越小時投入就會產生越大的 inrush current，與我們從公式得到之結論相同。如果定義入電 $v(t)$ 為 \sin 之波型，那麼 $\phi(t)$ 就會是 \cos 之波型，而電流又正比於 $\phi(t)$ ，因此當投入之電壓越小，inrush current 就會越大。

Exercises :

- (1) 湧浪電流是指電氣設備首次開啟時吸收的最大瞬時輸入電流。於變壓器中的產生原因為投入時因磁通極大，而系統吸入之激磁電流正比於磁通，故造成湧浪電流的產生。而因為每次投入之電壓皆不相同，故會產生之湧浪電流也不同。
- (2) 降低或抑制湧浪電流有以下幾種方法：a. 串聯負溫度係數熱敏限流電阻器(NTC)。 b. 串聯功率電阻限制浪涌電流。 c. 串聯固定電阻器配合功率開關元件。

3.8. 變壓器除壓激磁電流瞬斷之電壓突波

電源開關於穩態下，將其 OFF 之瞬間，因 $L_m(di_m/dt)$ 在二次側繞組端產生電壓突波，尤其於激磁電流之峰值處 OFF 時，所生之 $L_m(di_m/dt)$ 相當大。除非有採取適當限壓保護措施，此高電壓突波將危及其他連接之元件。



(1) 不接 MOV 之波形：

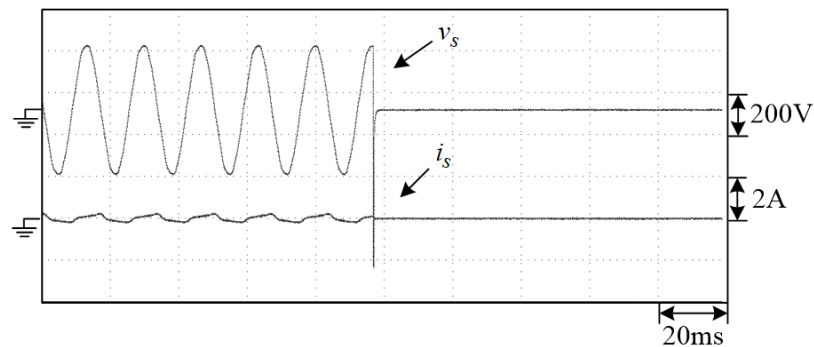


Fig. 3.8.1

(2) 接上 MOV 後之波形：

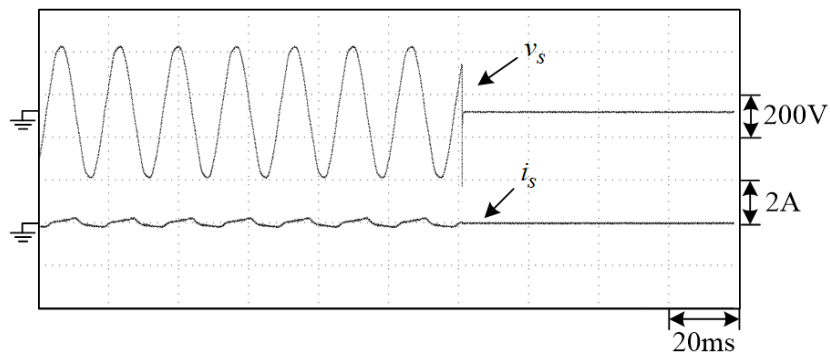


Fig. 3.8.2

比較 Fig. 3.8.1 和 Fig. 3.8.2 可以觀察出，不接 MOV 在關斷的瞬間會產生極為大的電壓突波，若是不好好防範可能會傷及電路以及負載，相當危險，故可以在二次側加上 MOV 來抑制電壓突波。

4. 實驗心得：

這次的實驗相當有趣，讓我完全回憶起之前在電動機械正課所學之變壓器的應用與知識，例如短路測試與開路測試的部分，讓我又更加熟悉了變壓器等效電路參數的量測，也很感謝助教們在實驗過程中的幫忙，並且在實驗後耐心的與我們討論實驗的相關問題，使我獲益良多，期待在下次三相變壓器的實驗我也能夠有所成長。