



## 單元

# 4

# 變壓器

### » 單元重點

變壓器是一種將交流電壓提高或下降的電工機械，在電力系統中佔有很重要的地位。在輸電線路中，適當的提高電壓，可以降低線路損失，節省導線成本；在配電線路中，可以配合負載，調降成適合不同之負載電壓。本單元第一章會先介紹變壓器的基本構造及動作原理，第二章介紹變壓器的特性，第三章介紹變壓器的三相連接與並聯運轉，第四章則介紹變壓器的開路與短路試驗，最後一章則介紹自耦變壓器、比壓器及比流器的特性。

### » 單元綱要

- 第十三章 變壓器之原理構造與等效電路
- 第十四章 變壓器之特性
- 第十五章 變壓器之連結
- 第十六章 變壓器短路及開路試驗
- 第十七章 特殊變壓器

本單元學習時間 18 小時

### 單元四 生活知識家 變壓器—電能轉換的好幫手

隨著國人出國觀光或是工作日益頻繁，經常會遇到電器產品的使用問題。一般來說，世界各國家用電壓通常在 100 V 到 240 V 之間，頻率是 50 Hz 和 60 Hz。出國購買或是使用電器產品時，要先確認電壓與接頭型式是否適用。若將台灣 110 V 的電鍋直接插到歐洲或是中國 220 V 插座，由於電壓太高，可能會導致電鍋線路燒毀，此時就可以選用適合的變壓器，將電壓降低後再給電器使用。

至於大部分 3C 產品所使用的交流電源整流器 (AC adapter)，大多採用交換式電源 (switching power) 原理，適用於交流 100 ~ 240 V，頻率為 50/60 Hz (國際電壓)，只要配合插座型式，3C 產品就可以正常使用。 圖片來源：威訊科技



220 V  $\longleftrightarrow$  110 V 交流電源  
變壓器 整流器



# CHAPTER 13

## 變壓器之原理構造與等效 電路

### » 本章重點

變壓器的功能是将交流電壓升高或是降低，以方便電力傳輸或提供用戶使用。變壓器在 19 世紀末的問世，成為交流供電擊敗直流供電的重要原因之一。本章首先介紹變壓器的基本原理，之後陸續說明變壓器的等效電路及構造。

### 13-1 變壓器的基本原理

變壓器利用電磁感應原理，由一個繞組輸入電能，另一個繞組就會輸出電能，兩繞組繞製匝數不同，則電壓與電流關係也隨之改變。

圖 13-1 為變壓器基本構造，左側與電源連接者稱為一次側繞組 (primary winding) 也稱為一次側線圈或主線圈 (primary coil)；右側與負載連接者稱為二次側繞組 (secondary winding) 也稱為二次側線圈或次線圈 (secondary coil)。兩個繞組分別繞製於矽鋼薄片疊積而成的鐵心上，讓磁通 ( $\phi$ ) 能夠順利流動。

圖 13-1 中，由於二次側繞組匝數較少，因此當一次側外加電壓 ( $V_1$ )，二次側繞組受到電磁感應產生的電壓 ( $V_2$ ) 會低於一次側電壓 ( $V_2 < V_1$ )，此時稱為降壓變壓器。

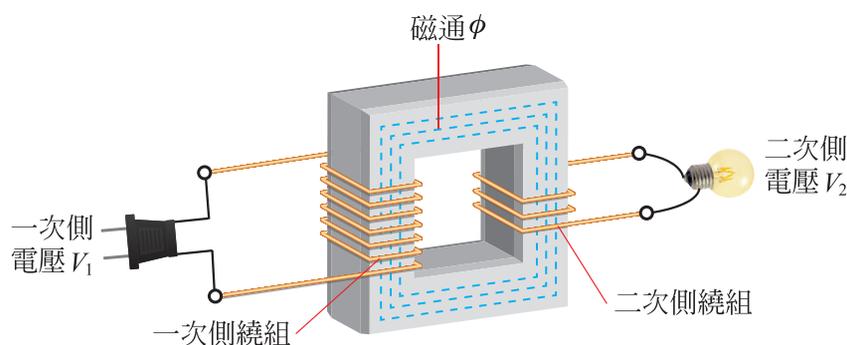


圖 13-1 變壓器基本構造 (降壓用)

若將變壓器接線端互調，如圖 13-2 所示，此時右側繞組與電源連接就稱為一次側繞組，左側繞組與負載連接則稱為二次側繞組。由於二次側繞組匝數較多，因此當一次側外加電壓 ( $V_1$ )，二次側繞組感應之電壓 ( $V_2$ ) 會高於一次側電壓 ( $V_2 > V_1$ )，就會稱為升壓變壓器。

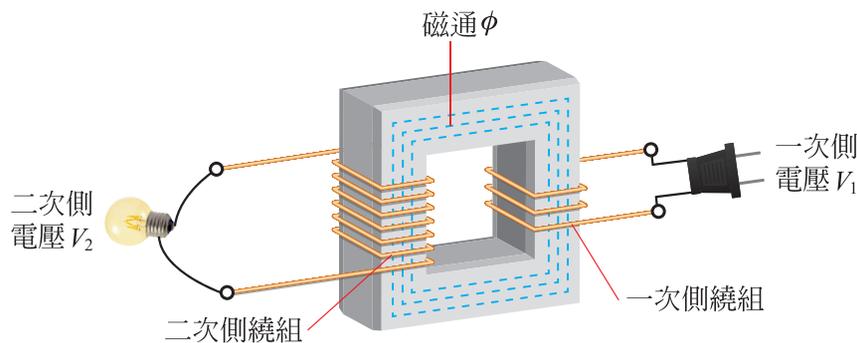


圖 13-2 升壓用變壓器

理想狀態下，變壓器輸入功率等於輸出功率，因此使用變壓器將電壓降低，則電流成正比增加；反之若是將電壓升高，則電流成反比降低。變壓器的電壓與電流轉換現象與換錢情況很類似，例如拿 1000 元 ( $V_1 = 1000 \text{ V}$ ) 的鈔票 1 張 ( $I_1 = 1 \text{ A}$ ) 可以換到 100 元 ( $V_2 = 100 \text{ V}$ ) 的鈔票 10 張 ( $I_2 = 10 \text{ A}$ )；也可以拿 100 元 ( $V_1 = 100 \text{ V}$ ) 的鈔票 10 張 ( $I_1 = 10 \text{ A}$ ) 換回 1000 元 ( $V_2 = 1000 \text{ V}$ ) 的鈔票 1 張 ( $I_2 = 1 \text{ A}$ )。



## 13-2 變壓器的構造

變壓器的構造包括鐵心、繞組及其他附屬裝置，分述如下：

### (一) 鐵心 (core)

鐵心材料需具備較大的導磁性 (relative permeability)，使磁通  $\phi$  能夠順利通過，以降低產生磁通所需之激磁電流，並且避免波型畸變。理想的鐵心具有導磁係數高，無載電流小、鐵損小、機械强度高、飽和磁通密度高。

變壓器的鐵心多採用 0.35 mm 厚，含矽約 3% ~ 4% 的方向性矽鋼片而成。鐵心含矽的目的是減少磁滯損，而每片矽鋼片表面經過化學處理或塗上絕緣凡立水後，以減少渦流損失。由矽鋼薄片組合成鐵心的方式分成：

#### 1. 積鐵式

鐵心用矽鋼薄片疊成，外觀如圖 13-3 所示，製造容易，但是磁漏較高、效率較低，普遍用於小型變壓器，依疊製方式又分為：



圖 13-3 矽鋼薄片

- (1) 內鐵式 (core type)：構造如圖 13-4(a)，口字型鐵心被高、低壓繞組包圍在內。高壓繞組繞於外側，低壓繞組繞於內側靠鐵心處，散熱與絕緣效果較佳，缺點是鐵心的壓制應力較差，適用於高壓、小電流之變壓器。



(2) 外鐵式 (shell type)：構造如圖 13-4(b)，日字形鐵心在外包圍著繞組。高壓繞組繞製在中間，低壓繞組繞於接近鐵心的兩側。散熱與絕緣較差，但是鐵心壓制應力較佳，適用於低壓、大電流之變壓器。

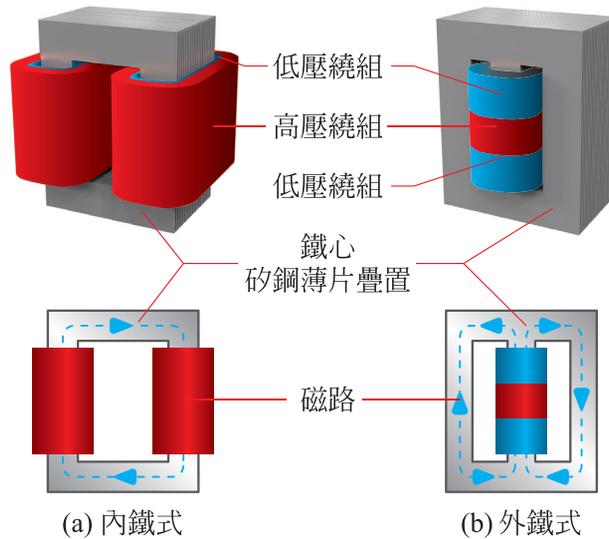


圖 13-4 積鐵式鐵心

## 2. 捲鐵式 (cut core)

構造如圖 13-5(a)，鐵心採用矽鋼帶捲製而成，可以降低變壓器之鐵心接縫，導磁性比積鐵式佳，並可節省組合矽鋼片的時間，是目前普遍使用的鐵心形式。

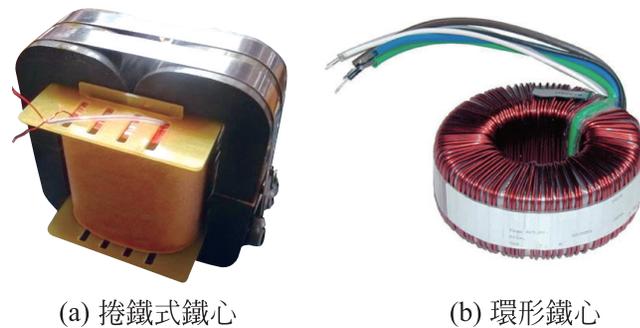


圖 13-5 捲鐵式與環形鐵心

## 3. 環形鐵心 (toroidal core)

構造如圖 13-5(b)，具有高效率、低漏磁通、暫態反應佳等優點，但是製作成本高、繞線繁雜、鐵心被銅線繞組包覆在內，散熱不易、整個鐵心的重量落於銅線繞組上，無法應用於大容量的變壓器。

目前業界發展「非晶質鐵心變壓器」(amorphous metal transformer)，使用非晶質合金做為變壓器鐵心材料，以代替傳統的矽鋼片，鐵損僅為傳統矽鋼片鐵心的 1/3 ~ 1/4。



### 隨堂練習

- ( ) 1. 變壓器鐵心採用矽鋼片的原因為  
(A) 鐵損大 (B) 電阻大 (C) 激磁電流小 (D) 飽和磁通密度小。
- ( ) 2. 有關變壓器鐵心採用外鐵式、內鐵式之比較，下列何者正確？  
(A) 外鐵式用於低電流及低電壓 (B) 內鐵式用於低電流及低電壓  
(C) 外鐵式用於低電流及高電壓 (D) 內鐵式用於低電流及高電壓。

## (二) 繞組 (winding)

### 1. 繞組材料

變壓器繞組多以銅線繞製，少數以鋁線繞製。採用 A 級 (105 °C) 以上的絕緣材料。小型變壓器繞組使用漆包線繞成；中、大型變壓器爲了增加空間利用率會採用平角銅線；或是採用片狀導體，可使繞組電氣中心一制，並獲得良好散熱，外觀如圖 13-6 所示。



圖 13-6 變壓器繞組材料 (圖片來源：大同電機)

### 2. 繞組特性

同一部變壓器，高壓側繞組由於電壓高，因此電流較小，線徑細，匝數多。低壓繞組由於電壓低，相對而言電流較大，線徑粗，匝數少。

導線截面積太大時，爲了施工方便以及降低渦流損及交流阻抗，會將數條導線並聯使用，另外高低壓繞組會交互疊置，可以減少漏磁通。

### 3. 繞組繞製方法

- (1) 直繞：將繞組銅線直接纏繞於鐵心上，可以讓鐵心與繞組緊密接觸，因此漏磁減少、損失小，適用於小型變壓器。

(2) 型繞：先將銅線纏繞於專用的絕緣筒後，再與鐵心裝配。適用於中、大型變壓器。

### (三) 外殼 (case)

爲了避免變壓器繞組因爲受潮或異物破壞而損壞，因此當鐵心與繞組繞置完成後，會將變壓器本體放入由鑄鐵或是鋼板製成的箱體內部，外觀如圖 13-7(a) 所示。同時爲了幫助散熱，外殼上會加裝波浪式散熱片或板狀散熱管，或是加裝風扇等設備幫助散熱。

### (四) 絕緣套管 (insulating bushing)

變壓器本體放入密封後的外殼後，爲了讓繞組能夠與外部線路連接，必須安裝絕緣套管。套管外觀如圖 13-7(b) 所示，外體以玻璃纖維或瓷器製成，內部裝有導體讓電流通過，再利用法蘭盤 (flange) 將套管與變壓器外殼妥善固定，確保變壓器內部維持密封狀態。

### (五) 絕緣油 (insulating oil)

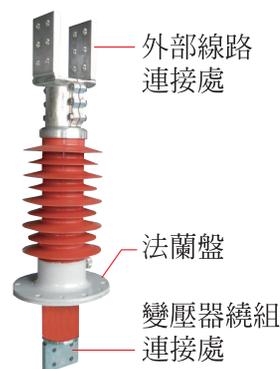
變壓器的鐵心與繞組裝配完成後，經過乾燥處理後，會裝入圖 13-7(a) 充滿絕緣油的箱體內。絕緣油具有絕緣及冷卻功能，具備的條件有絕緣耐力大、引火點高、凝固點低、黏度點低、性質安定，冷卻作用良好。

變壓器負載變動時，溫度變化使得絕緣油產生熱漲冷縮現象，因此會在通氣孔上用裝有脫水劑之呼吸器或將箱體封入氮氣，以隔絕空氣，防止絕緣油變質。

爲了環保與安全，廠商也推出不需絕緣油的乾式 (模鑄式) 變壓器或利用 SF<sub>6</sub> (六氟化硫) 的氣體絕緣變壓器。



(a) 外殼



(b) 絕緣套管

圖 13-7 變壓器外殼與絕緣套管  
(圖片來源：大同電機)



## (六) 冷卻方式

變壓器運轉中的損失大多轉換成熱能，造成溫度上升，而容量越大的變壓器，產生的熱量越高，必須有良好的散熱裝置，才能維持正常工作。變壓器冷卻方式大致分為：

### 1. 乾式變壓器

- (1) 自冷式 (air natural, AN)：利用空氣中自然對流與輻射散熱，適用於小型變壓器。
- (2) 風冷式 (air forced, AF)：利用風扇送風，強迫空氣循環幫助散熱。

### 2. 油浸式變壓器

- (1) 油浸自冷式 (oil natural air natural, ONAN)：變壓器置於裝滿絕緣油外箱內，將熱量自然散發至空氣中，一般桿上變壓器多為此類。
- (2) 油浸風冷式 (oil natural air forced, ONAF)：於外箱增加風扇，增加散熱效果。
- (3) 送油風冷式 (oil forced air forced, OFAF)：利用油泵強迫絕緣油流動，再以風扇加強散熱。
- (4) 送油水冷式 (oil forced water forced, OFWF)：利用油泵強迫絕緣油流動，再以冷卻水幫絕緣油散熱，效果最好。

### 隨堂練習

- ( ) 1. 有關變壓器高、低壓側繞組的敘述，下列敘述何者錯誤？
- |                |                 |
|----------------|-----------------|
| (A) 高壓側繞組匝數較多  | (B) 低壓側繞組電流較大   |
| (C) 線徑粗的是高壓側繞組 | (D) 匝數少的是低壓側繞組。 |
- ( ) 2. 變壓器中絕緣油之目的為
- |          |          |          |            |
|----------|----------|----------|------------|
| (A) 防止潮濕 | (B) 防止雷擊 | (C) 防止噪音 | (D) 絕緣及冷卻。 |
|----------|----------|----------|------------|

## 13-3 變壓器的感應電勢

### (一) 感應電勢的發生

爲了方便說明，將變壓器簡化成圖 13-8，一次側繞組 ( $N_1$ ) 外加交流電壓 ( $V_1$ )，一次側繞組內有交流電流 ( $I_1$ ) 流動，此電流所產生的磁通 ( $\phi$ ) 隨時間呈現正弦變化，即  $\phi(t) = \phi_m \sin \omega t$ 。

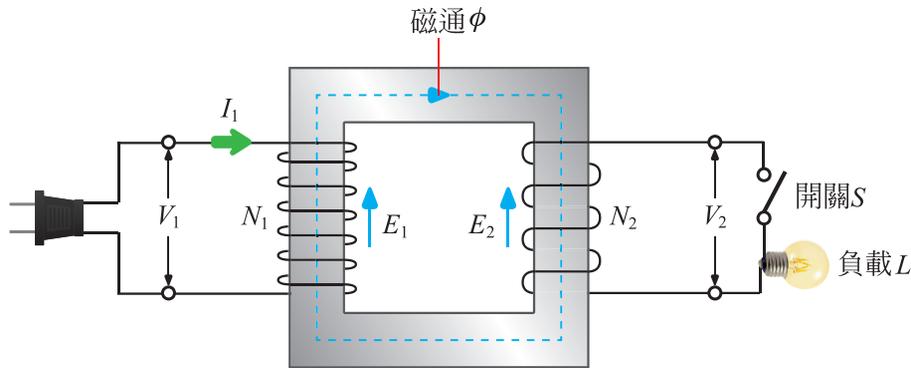


圖 13-8 變壓器的感應電勢

依據法拉第 - 冷次定律，線圈受到交變磁通割切而產生感應電勢，其值爲

$$\begin{aligned}
 e &= -N \frac{\Delta \phi}{\Delta t} = -N \frac{\Delta(\phi_m \sin \omega t)}{\Delta t} = -N \frac{\Delta(\phi_m \sin 2\pi ft)}{\Delta t} \\
 &= -2\pi f N \phi_m \cos(2\pi ft) = 2\pi f N \phi_m \cos(2\pi ft - 180^\circ) \\
 &= 2\pi f N \phi_m \sin(\omega t - 90^\circ) \text{ V}
 \end{aligned} \tag{13-1}$$

### (二) 變壓器的相位關係

變壓器的波形圖與相量關係如圖 13-9 所示。當變壓器一次側繞組加上電源電壓 ( $\bar{V}_1$ )，假設一次側繞組無電阻，可視爲理想電感器，因此一次側電流 ( $\bar{I}_1$ ) 相位較一次側電壓 ( $\bar{V}_1$ ) 落後  $90^\circ$  電機角，一次側電流所形成的磁通 ( $\phi$ ) 與一次側電流同相。由公式 13-1 得知一、二次側應電勢 ( $\bar{E}_1$ 、 $\bar{E}_2$ ) 相位落後磁通  $90^\circ$ ，至於二次側端電壓 ( $\bar{V}_2$ ) 在無載時會等於二次側應電勢 ( $\bar{V}_2 = \bar{E}_2$ )。

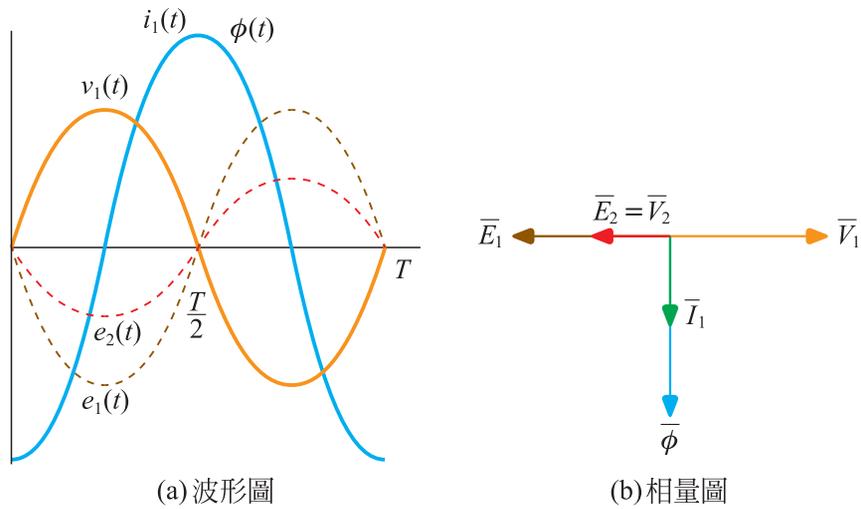
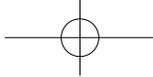


圖 13-9 變壓器的相位關係

依據公式 13-1 可得，線圈感應電勢最大值  $E_m = 2\pi fN\phi_m$ ，而應電勢相位會落後磁通  $90^\circ$ 。由於正弦波有效值  $E_{eff} = \frac{E_m}{\sqrt{2}}$ ，因此感應電勢以有效值表示為：

$$E_{eff} = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} fN\phi_m = 4.44 fN\phi_m \quad (13-2)$$

$E_{eff}$ ：感應電勢有效值 (V)                       $N$ ：線圈匝數 (匝)  
 $f$ ：頻率 (Hz)                                       $\phi_m$ ：最大磁通量 (Wb)

由圖 13-8 可知，一、二次側繞組均會被磁通 ( $\phi$ ) 切割，因此依據公式 13-2 可得一、二次側繞組感應電勢 ( $E_1$ 、 $E_2$ ) 分別為：

$$E_1 = 4.44 fN_1\phi_m \quad (13-3a)$$

$$E_2 = 4.44 fN_2\phi_m \quad (13-3b)$$

$E_1$ ：一次側感應電勢 (V)                       $E_2$ ：二次側感應電勢 (V)  
 $N_1$ ：一次側繞組匝數 (匝)                       $N_2$ ：二次側繞組匝數 (匝)

### (三) 匝數比

將公式 13-3(a)(b) 相除可得變壓器一、二次側繞組的感應電勢與匝數成正比，兩者關係稱為匝數比或變壓比，以  $a$  代表之，即：

$$a = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (13-4)$$

理想變壓器忽略繞組電阻壓降，則一次側外加電壓會等於一次側應電勢 ( $V_1 = E_1$ )，二次側應電勢等於二次側端電壓 ( $E_2 = V_2$ )，公式 13-4 可寫成：

$$a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{V_1}{V_2} \quad (13-5)$$

$V_1$ ：一次側 ( 電源 ) 電壓 (V)       $V_2$ ：二次側 ( 負載 ) 端電壓 (V)

由公式 13-5 結果可知，若是匝數比  $a > 1$  時，代表  $V_1 > V_2$ ，稱為降壓變壓器。反之匝數比  $a < 1$  時，表示  $V_2 > V_1$ ，稱為升壓變壓器。

#### 範例

#### 01

某廠商欲設計一次側額定電壓 3330 V，二次側額定電壓 222 V，頻率 50 Hz 之理想變壓器，若使用之鐵心最大磁通量為  $5 \times 10^{-3}$  Wb，則

(1) 匝數比 (2) 一次側繞組匝數 (3) 二次繞組匝數

解 (1) 匝數比  $a = \frac{V_1}{V_2} = \frac{3330 \text{ V}}{222 \text{ V}} = 15$

$$(2) N_1 = \frac{E_1}{4.44 f \phi_m} = \frac{3330}{4.44 \times 50 \times 5 \times 10^{-3}} = 3000 \text{ 匝}$$

$$N_2 = \frac{E_2}{4.44 f \phi_m} = \frac{222}{4.44 \times 50 \times 5 \times 10^{-3}} = 200 \text{ 匝}$$

$$\text{或是 } a = \frac{N_1}{N_2} \Rightarrow 15 = \frac{3000 \text{ 匝}}{N_2} \Rightarrow N_2 = 200 \text{ 匝}$$



### 範例

#### 02

有一理想變壓器，當一次側外加電壓為 3300 V 時，測得二次側電壓為 110 V，試求以下各值：(1) 匝數比 (2) 當一次側外加 3000 V 時，二次側電壓為何？(3) 欲使二次側電壓為 115 V，一次側所需加的電壓為何？(4) 已知二次側繞組匝數為 80 匝，一次側繞組匝數為何？

解 (1) 匝數比  $a = \frac{V_1}{V_2} = \frac{3300 \text{ V}}{110 \text{ V}} = 30$  (2)  $a = \frac{V_1}{V_2} \Rightarrow 30 = \frac{3000 \text{ V}}{V_2} \Rightarrow V_2 = 100 \text{ V}$   
 (3)  $a = \frac{V_1}{V_2} \Rightarrow 30 = \frac{V_1}{115 \text{ V}} \Rightarrow V_1 = 3450 \text{ V}$  (4)  $a = \frac{N_1}{N_2} \Rightarrow 30 = \frac{N_1}{80} \Rightarrow N_1 = 2400$  匝

### 隨堂練習

- 範例 01 中，廠商研發出最大磁通量為  $10^{-2} \text{ Wb}$  之新型鐵心，欲設計相同規格變壓器，則 (1) 一次側繞組匝數 (2) 二次繞組匝數分別為何？
- ( ) 2. 有一部 220 V / 110 V 理想變壓器，若高壓側外加 110 V 交流電，則低壓側電壓為多少？ (A) 440 V (B) 220 V (C) 110 V (D) 55 V。

## 13-4 理想變壓器的特性

### (一) 理想變壓器的條件

爲了方便進行分析及原理說明，可先將變壓器理想化，如圖 13-10 所示，理想變壓器的條件包括：

- (1) 繞組電阻值爲零，即銅損爲零。
- (2) 鐵心導磁係數無窮大，磁阻爲零，磁化曲線爲直線。
- (3) 鐵心磁滯損與渦流損爲零，即鐵損爲零。

- (4) 磁通完全耦合，沒有漏磁通。  
 (5) 損失為零，電壓調整率為零，效率為 100 %。

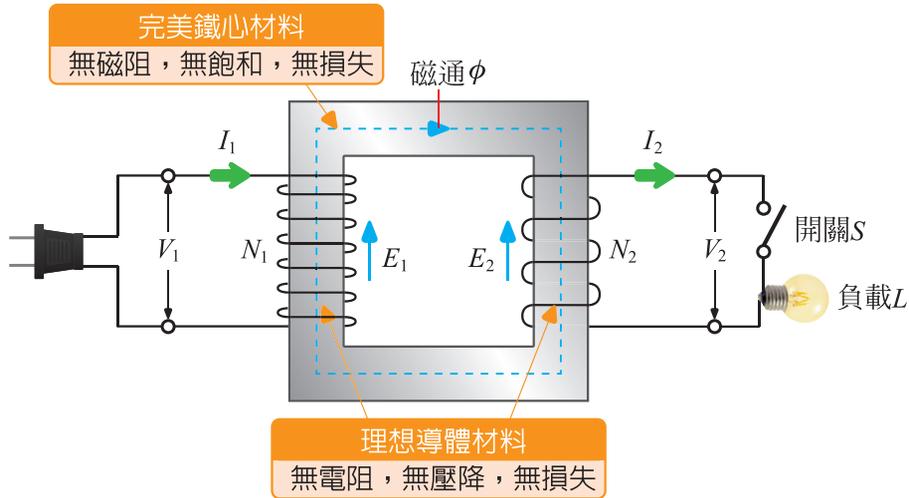


圖 13-10 理想變壓器的特性

## (二) 電流比

圖 13-10 的理想變壓器，忽略損失則一次側輸入電功率 ( $S_1 = V_1 \times I_1$ ) 全部轉到二次側 ( $S_2 = V_2 \times I_2$ ) 輸出給負載使用，即  $V_1 \times I_1 = V_2 \times I_2$ ，與公式 13-5 合併後可得理想變壓器匝數比關係為：

$$a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (13-6)$$

由公式 13-6 結果可知，變壓器高壓側繞組匝數多、電壓高、電流小。低壓側繞組匝數少、電壓低、電流大。

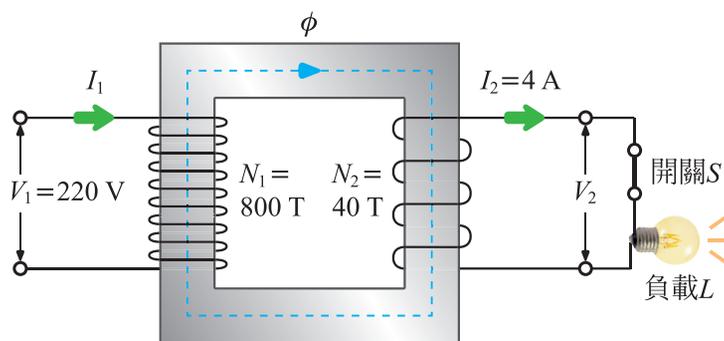
範例

03

有一部理想變壓器，高壓側繞組有 800 匝，低壓側繞組有 40 匝，已知高壓側額定電壓為 220 伏特，低壓側額定電流 4 安培，則此變壓器

- (1) 匝數比 (2) 低壓側額定電壓  $V_2$  (3) 高壓側額定電流  $I_1$  ?  
 (4) 變壓器額定容量  $S$  分別為何？

解 依題意可得變壓器電路如下圖所示：



- (1) 匝數比  $a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{800}{40} = 20$   
 (2)  $a = \frac{V_1}{V_2} \Rightarrow 20 = \frac{220 \text{ V}}{V_2} \Rightarrow V_2 = 11 \text{ V}$   
 (3)  $a = \frac{I_2}{I_1} \Rightarrow 20 = \frac{4 \text{ A}}{I_1} \Rightarrow I_1 = 0.2 \text{ A}$   
 (4) 容量  $S = V_1 \times I_1 = 220 \text{ V} \times 0.2 \text{ A} = 44 \text{ VA}$   
 或是  $S = V_2 \times I_2 = 11 \text{ V} \times 4 \text{ A} = 44 \text{ VA}$

隨堂練習

- ( ) 1. 有一單相降壓變壓器匝數比為 500 / 100，若負載電流為 5 A，則一次側的電流為多少？ (A) 25 (B) 10 (C) 5 (D) 1。
- ( ) 2. 有一部 220 V / 110 V 單相變壓器，有關繞組敘述何者錯誤？  
 (A) 匝數多的是高壓繞組 (B) 線徑粗的是高壓繞組  
 (C) 低壓繞組電流大 (D) 高壓繞組電流小。

### (三) 阻抗比

變壓器的匝數比不同，除了造成電壓與電流變動外，對於阻抗也會造成影響。依據歐姆定律可得一次側阻抗 ( $Z_1$ ) 與二次側阻抗 ( $Z_2$ ) 的關係為：

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{V_1 / I_1}{V_2 / I_2} = \frac{I_2}{I_1} \times \frac{V_1}{V_2} = \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 = a^2 \quad (13-7)$$

由公式 13-7 可知變壓器的阻抗比等於匝數的平方比。利用此關係，變壓器常用於電子電路中，作為阻抗匹配用。例如音頻放大器常使用輸出變壓器 (output transformer, OPT) 常做為半導體電路 (高阻抗) 與喇叭 (低阻抗) 間的轉移橋樑。

將公式 13-7 與公式 13-6 合併後，可得理想變壓器匝數比的完整關係式為：

$$a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1} = \sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}} \quad (13-8)$$

$a$  : 匝數比 (變壓比)

$N_1$  : 一次側繞組匝數 (匝)

$N_2$  : 二次側繞組匝數 (匝)

$E_1$  : 一次側感應電勢 (V)

$E_2$  : 二次側感應電勢 (V)

$V_1$  : 一次側外加 (電源) 電壓 (V)

$V_2$  : 二次側 (負載) 端電壓 (V)

$I_1$  : 一次側電流 (電源電流) (A)

$I_2$  : 二次側電流 (負載電流) (A)

$Z_1$  : 一次側阻抗 ( $\Omega$ )

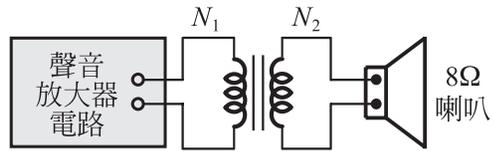
$Z_2$  : 二次側阻抗 ( $\Omega$ )



### 範例

#### 04

如右圖所示之聲音放大器電路，其輸出阻抗為  $72\ \Omega$ ，喇叭的阻抗為  $8\ \Omega$ ，若欲將最大功率傳輸到喇叭上，則變壓器的匝數比應該為多少？



解 匝數比  $a = \frac{N_1}{N_2} = \sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}} = \sqrt{\frac{72\ \Omega}{8\ \Omega}} = 3$

### 隨堂練習

- ( ) 1. 某  $240\ \text{V} / 120\ \text{V}$ ， $480\ \text{VA}$  單相理想變壓器，若一次側外加電壓為  $240\ \text{V}$ ，則二次側所接之負載電阻不得小於 (A)  $120\ \Omega$  (B)  $90\ \Omega$  (C)  $60\ \Omega$  (D)  $30\ \Omega$  以免變壓器過載。
- ( ) 2. 有一部理想變壓器，輸入電源電壓為交流  $100\ \text{V}$ ，負載端有一個  $30\ \Omega$  的電燈泡，已知負載電流為  $2\ \text{A}$ ，則此電源電流為 (A)  $3\ \text{A}$  (B)  $1.2\ \text{A}$  (C)  $0.6\ \text{A}$  (D)  $0.3\ \text{A}$ 。

## 13-5 實際變壓器的特性

### (一) 理想與實際的落差

依據範例 03 之計算結果，當開關  $S$  閉合，電壓與電流都符合理想變壓器匝數比  $a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1}$  之關係。

但是將變壓器開關  $S$  打開時，負載端開路，二次側電流  $I_2 = 0\ \text{A}$ ，但一次側繞組仍與電源連接，因此一次側繞組內會有電流 ( $I_1 \neq 0\ \text{A}$ )，加上繞組本身有電阻會造成壓降與損失，至於鐵心導磁係數也非無窮大，而且有磁滯現象，因此必須針對實際變壓器特性探討之：

## (二) 實際變壓器無載的特性

圖 13-11 中當二次側無載 ( $I_2 = 0 \text{ A}$ ) 時，此時一次側繞組內的電流 ( $I_1$ ) 稱為無載電流或激磁電流 (exciting current)，常以  $I_0$  表示。

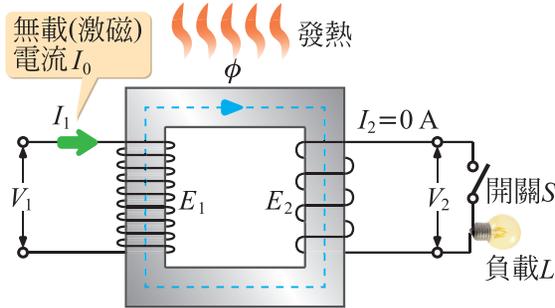


圖 13-11 無載 ( 激磁 ) 電流的現象

無載 ( 激磁 ) 電流 ( $I_0$ ) 在一次側繞組內流動時，一方面產生磁通 ( $\phi$ ) 切割繞組產生感應電勢 ( $E_1, E_2$ )；另一方面磁通變化過程中也造成鐵心發熱。爲了方便描述這兩種現象，會將無載 ( 激磁 ) 電流  $I_0$  拆解成兩個部分表達：

1. 鐵損電流 ( $I_e$ )：形成鐵心發熱的現象，視爲電阻性，鐵損電流相位與一次側電壓同相。
2. 磁化電流 ( $I_m$ )：代表產生磁通的部分，視爲電感性，磁化電流相位落後一次側電壓  $90^\circ$  電機角。

變壓器無載時一次側電流的相量如圖 13-12(a)，無載電流間的關係爲：

$$I_e = I_0 \times \cos \theta_0$$

$$I_m = I_0 \times \sin \theta_0$$

$$I_0 = \sqrt{I_e^2 + I_m^2} \quad (13-9)$$

$I_0$ ：無載 ( 激磁 ) 電流 (A)

$I_e$ ：鐵損電流 (A)

$\theta_0$ ：無載時的功率因數角

$I_m$ ：磁化電流 (A)

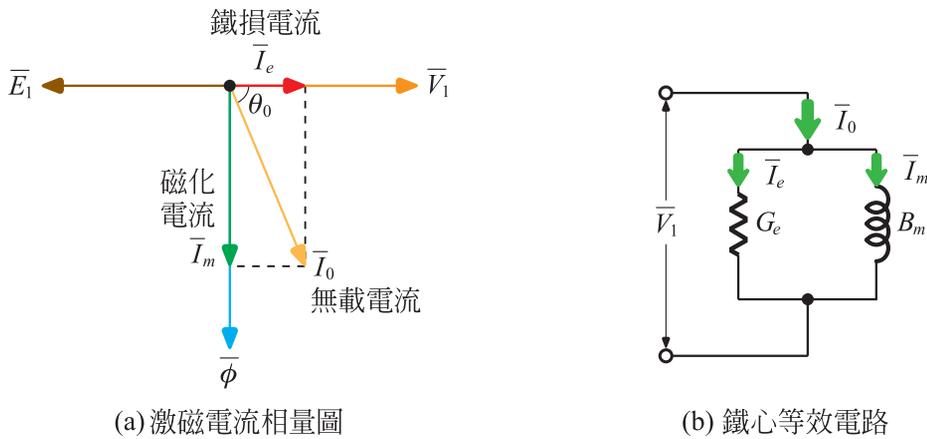


圖 13-12 激磁電流與鐵心等效電路圖

綜合上述，變壓器的鐵心對於電源如圖 13-12(b) 的  $RL$  並聯電路，其中：

1. 激磁電導 ( $G_e$ )：鐵心消耗的實功率，鐵損電流  $I_e$  通過造成鐵心發熱的鐵損。
2. 激磁電納 ( $B_m$ )：鐵心消耗的虛功率，磁化電流  $I_m$  通過時，形成鐵心內的磁通。

將激磁電導與激磁電納合併稱為激磁導納，即：

$$Y_o = \sqrt{G_e^2 + B_m^2} \quad (13-10)$$

$Y_o$ ：激磁導納 (U)       $G_e$ ：激磁電導 (U)       $B_m$ ：激磁電納 (U)

依據圖 13-12(b) 可得，變壓器無載時，鐵心消耗功率 (鐵損) 為：

$$P_0 = V_1 I_0 \cos \theta_0 = V_1 I_e \quad (13-11)$$

$P_0$ ：無載消耗功率 (鐵損) (W)       $V_1$ ：一次側電壓 (V)

$I_0$ ：無載 (激磁) 電流 (A)       $I_e$ ：鐵損電流 (A)

$\theta_0$ ：無載時的功率因數角 ( $V_1$  與  $I_0$  的相角差)

實際變壓器外加正弦波交流電壓時，受到鐵心磁飽和以及磁滯的影響，使得激磁電流除了基本波之電流外，另含有高次諧波的電流，其中以三次諧波成分最多，鐵心的飽和程度越高，激磁電流畸變得越厲害。

## 範例

05

有一部電壓比為 5000 V / 500 V 之理想變壓器，高壓側外加額定電壓，測得激磁電流為 0.5 A，無載損失為 1500 W，則本機之

(1) 無載功率因數 (2) 鐵損電流 (3) 磁化電流分別為多少？

解 (1)  $P_0 = V_1 I_0 \cos \theta_0$ ，

$$\text{無載功率因數 } \cos \theta_0 = \frac{P_0}{V_1 \times I_0} = \frac{1500}{5000 \times 0.5} = 0.6$$

$$(2) \text{鐵損電流 } I_e = I_0 \times \cos \theta_0 = 0.5 \times 0.6 = 0.3 \text{ A}$$

$$(3) \text{磁化電流 } I_m = I_0 \times \sin \theta_0 = 0.5 \times \sqrt{1 - 0.6^2} = 0.4 \text{ A}$$

### (三) 實際變壓器外加負載的特性

圖 13-13 為變壓器二次側接上負載後，二次側繞組內有電流 ( $I_2$ ) 流動，依據安培右手定則，二次側電流產生的磁通 ( $\phi'$ ) 與一次側磁通 ( $\phi$ ) 方向相反，造成磁路上的總磁通減少，使得兩繞組的感應電勢 ( $E_1$ 、 $E_2$ ) 降低。

為了維持磁路上總磁通與應電勢不變，一次側繞組除了原本的激磁電流 ( $I_0$ ) 外，還會向電源多取入電流 ( $I_1'$ )，以便將二次側磁通 ( $\phi'$ ) 抵消，因此：

$$I_1' N_1 = I_2 N_2 \quad (13-12)$$

至於一次側電流則表示為：

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_1' + \bar{I}_0 \quad (13-13)$$

$\bar{I}_1$ ：一次側電流 (A)     $\bar{I}_1'$ ：一次側負載電流 (A)     $\bar{I}_0$ ：無載 (激磁) 電流 (A)

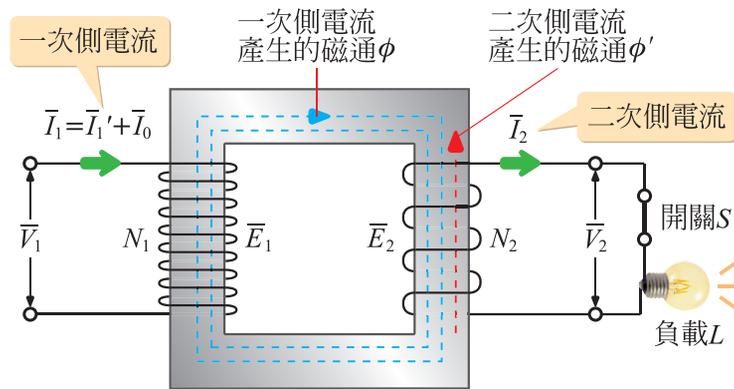


圖 13-13 外加負載時的磁通現象

#### (四) 漏磁通與漏磁電抗

由於實際變壓器鐵心導磁係數並非無限大，如圖 13-14 所示，除了兩繞組間的交鏈磁通  $\phi$  (interlinkage flux) 外，還有部分磁通經由附近的空間自行完成者，稱為漏磁通 (leakage flux)。一次側漏磁通以  $\phi_1$  表示，二次側漏磁通以  $\phi_2$  表示。

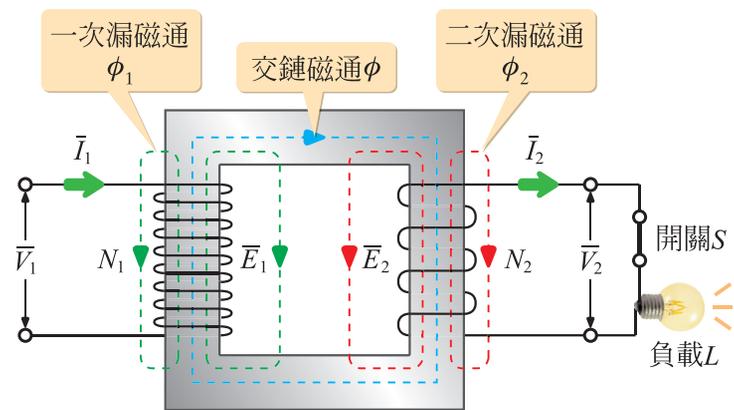
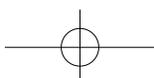


圖 13-14 交鏈磁通與漏磁通

一次側漏磁通 ( $\phi_1$ ) 會反抗一次側電流 ( $I_1$ ) 進入一次側線圈，因此以一次側漏磁電抗 ( $X_1$ ) 表示；二次側漏磁通 ( $\phi_2$ ) 會反抗二次側電流 ( $I_2$ ) 進入負載，因此以二次側漏磁電抗 ( $X_2$ ) 表示。

漏磁通會導致變壓器一、二次側電壓產生相角差、無載電流增加、功率因數降低、電壓調整率變大。為了降低漏磁通，變壓器除了使用高導磁鐵心外，也可以將一、二次繞组分拆開來，再交替繞在鐵心兩側，以降低漏磁通的影響。



漏磁通對於電力變壓器雖然有不良影響，但是當負載短路時，漏磁現象可以抑制短路電流。對於放電管燈（霓虹燈、日光燈、水銀燈等）或電焊機等需要恆定電流的場所，就會用到高漏磁變壓器。

### 隨堂練習

- ( ) 1. 在變壓器的等效電路中，下列何者代表變壓器的鐵損？  
 (A) 一次線圈電阻 (B) 二次線圈電阻 (C) 激磁電導 (D) 漏磁電抗
- ( ) 2. 正常供電中的變壓器，鐵心內的交鏈磁通，下列敘述何者正確？  
 (A) 由一次側繞組單獨產生  
 (B) 由二次側繞組單獨產生  
 (C) 由一、二次側繞組共同產生  
 (D) 依情況有時一次側、有時二次側單獨產生。

## (五) 實際變壓器的等效電路

### 1. 等效電路圖的內容

變壓器的繞組多以銅線繞製、鐵心則以矽鋼薄片製成，材料並非完美，因此如前段所述會有繞組電阻、漏磁電抗、鐵心損失等情形。為了更精確分析與方便計算變壓器特性，會改以圖 13-15 等效電路圖方式呈現。

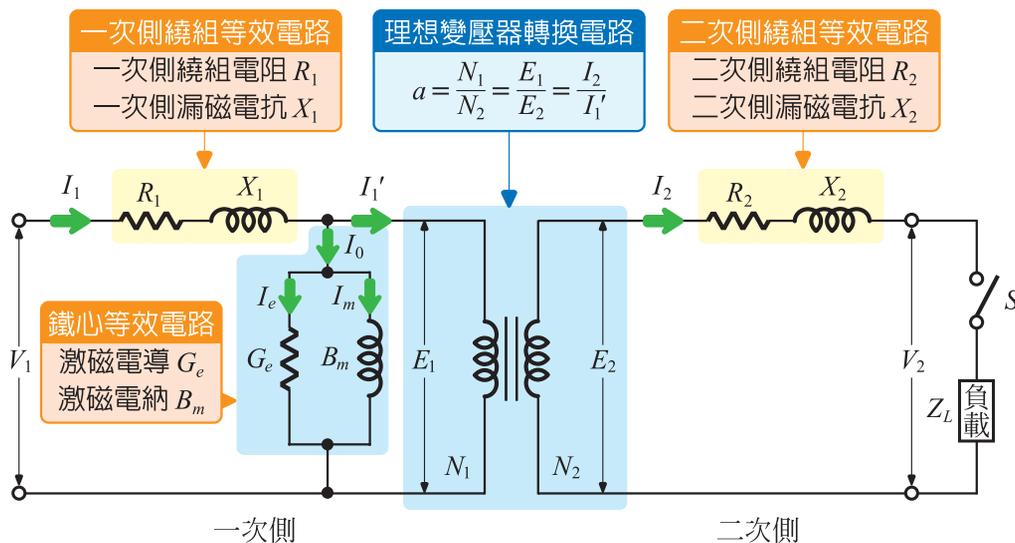
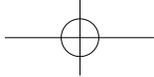


圖 13-15 實際變壓器的等效電路圖



變壓器的等效電路圖中，各元件名稱、代號及常見的特性如表 13-1 所示：

表 13-1 變壓器等效電路一覽表

代號	名稱	單位	說明
$V_1$	一次側電壓	伏特 (V)	常稱為電源電壓
$I_1$	一次側電流	安培 (A)	常稱為電源電流 $I_1 = \sqrt{I_0^2 + I_1'^2}$
$R_1$	一次側繞組電阻	歐姆 ( $\Omega$ )	一次側繞組材料本身的電阻
$X_1$	一次側漏磁電抗	歐姆 ( $\Omega$ )	代表一次側的漏磁通 ( $\phi_1$ )
$G_e$	激磁電導	姆歐 ( $\Omega$ )	兩者合稱為激磁導納 $Y_o = \sqrt{G_e^2 + B_m^2}$
$B_m$	激磁電納	姆歐 ( $\Omega$ )	
$I_0$	無載電流	安培 (A)	常稱為激磁電流 $I_0 = \sqrt{I_e^2 + I_m^2}$
$I_e$	鐵損電流	安培 (A)	代表鐵心發熱的現象 (鐵損)
$I_m$	磁化電流 (A)	安培 (A)	代表鐵心的公共磁通 ( $\phi$ )
$I_1'$	一次側負載電流	安培 (A)	與二次側電流有匝數比關係 $a = \frac{I_2}{I_1'}$
$E_1$	一次側感應電勢	伏特 (V)	應電勢與匝數成正比 $a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{E_1}{E_2}$
$E_2$	二次側感應電勢	伏特 (V)	
$I_2$	二次側電流	安培 (A)	常稱為負載電流
$R_2$	二次側繞組電阻	歐姆 ( $\Omega$ )	二次側繞組材料本身的電阻
$X_2$	二次側漏磁電抗	歐姆 ( $\Omega$ )	代表二次側的漏磁通 ( $\phi_2$ )
$V_2$	二次側電壓	伏特 (V)	常稱為負載端電壓

## 2. 等效電路圖之目的

依據等效電路圖，可將變壓器進行更具體的分析與說明，當一次側外加額定電壓 ( $V_1$ ) 後：

### (1) 變壓器無載時 (開關 $S$ 打開)

- 二次側電流  $I_2 = 0$  A，二次側電壓  $V_2 = E_2 = \frac{E_1}{a}$ 。
- 一次側負載電流  $I_1' = \frac{I_2}{a} = 0$  A，一次側電流只剩下激磁電流 ( $I_1 = I_0$ )，因此無載電流又稱為激磁電流，由於電流很低，因此一次側繞組壓降、銅損及漏磁很小，有時可以忽略不計。
- 激磁電流中的鐵損電流 ( $I_e$ ) 通過激磁電導 ( $G_e$ ) 代表鐵心發熱 (鐵損)；磁化電流 ( $I_m$ ) 通過激磁電納 ( $B_m$ ) 代表鐵心內的公共磁通，讓一、二次側呈現出理想變壓器的特性。

### (2) 變壓器有載時 (開關 $S$ 閉合)

- 二次側繞組內有電流  $I_2$  流往負載，二組側繞組的電阻與電抗造成電壓變動與損失，一般而言負載端電壓會低於二次側應電勢 ( $V_2 < E_2$ )。
- 一次側負載電流  $I_1' = \frac{I_2}{a}$  變大，導致一次側繞組向電源取用的電流增加 ( $I_1 = I_0 + I_1'$ )，一次側繞組的電阻與電抗造成電壓變動與損失也變大，一般而言一次側電源電壓會高於一次側應電勢 ( $V_1 > E_1$ )。
- 鐵心等效電路可視為與電源並聯，因此鐵損電流 ( $I_e$ ) 與磁化電流 ( $I_m$ ) 的變化受負載的影響幅度有限。

### 隨堂練習

- ( ) 1. 變壓器正常通電後，當負載無載時，下列敘述何者最正確？ (A) 一次側電壓為 0 (B) 一次側電流為 0 (C) 二次側電壓為 0 (D) 二次側電流為 0。
- ( ) 2. 將正常工作的變壓器負載由無載逐漸增至滿載，下列敘述何者錯誤？  
 (A) 一次側電流增加 (B) 二次側電流增加  
 (C) 二次側電壓增加 (D) 變壓器溫度上升。



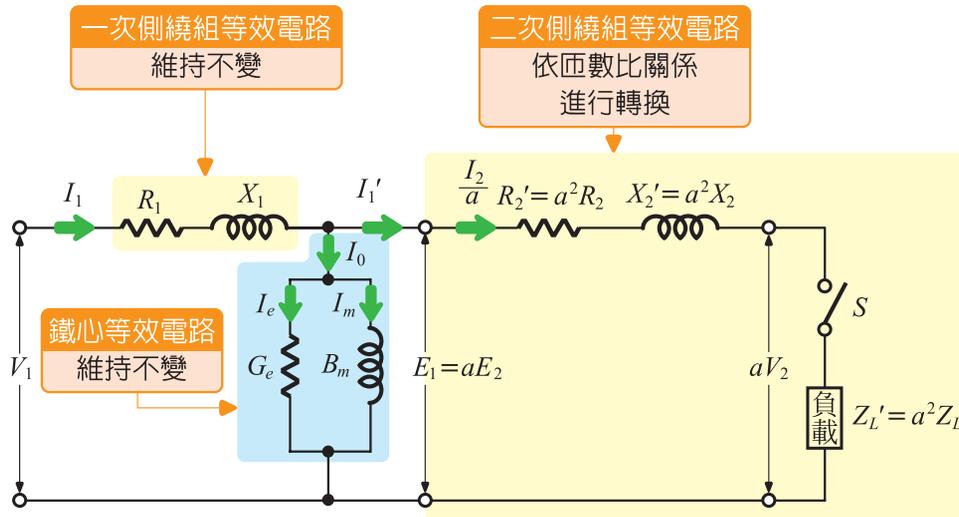


圖 13-17 二次側電路整合併入一次側之等效電路

## (2) 電路簡化

變壓器正常工作時，激磁電流  $I_0$  通常為額定電流的 2 ~ 5 % 左右，為了計算方便，可將鐵心等效電路忽略，再將兩繞組的電阻與電抗合併成  $RL$  串聯電路，可得到併入一次側近似等效電路如圖 13-18 所示。

有關變壓器一次側等值阻抗的算式如下：

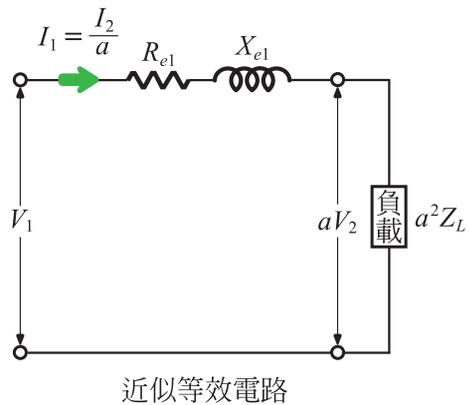


圖 13-18 併入一次側等效電路之簡化

$$R_{e1} = R_1 + R_2' = R_1 + a^2 R_2 \quad (13-14a)$$

$$X_{e1} = X_1 + X_2' = X_1 + a^2 X_2 \quad (13-14b)$$

$$Z_{e1} = \sqrt{R_{e1}^2 + X_{e1}^2} \quad (13-14c)$$

$R_{e1}$ ：一次側等效電阻 ( $\Omega$ )

$X_{e1}$ ：一次側等效電抗 ( $\Omega$ )

$R_1$ ：一次側繞組電阻 ( $\Omega$ )

$X_1$ ：一次側漏磁電抗 ( $\Omega$ )



$R_2$  : 二次側繞組電阻 ( $\Omega$ )

$X_2$  : 二次側漏磁電抗 ( $\Omega$ )

$Z_{e1}$  : 一次側等效阻抗 ( $\Omega$ )

$a$  : 匝數比

### 範例

06

有一部 100 kVA, 22 kV / 11 kV 單相變壓器, 已知一次側繞組電阻  $10 \Omega$ , 一次側漏磁電抗為  $16 \Omega$ , 二次側繞組電阻為  $5 \Omega$ , 二次側漏磁電抗為  $6 \Omega$ , 求 (1) 一次側等效電阻 (2) 一次側等效電抗 (3) 一次側等效阻抗分別為多少?

解 本題匝數比  $a = \frac{22 \text{ kV}}{11 \text{ kV}} = 2$

(1) 一次側等效電阻  $R_{e1} = R_1 + a^2 R_2 = 10 + (2^2 \times 5) = 30 \Omega$

(2) 一次側等效電抗  $X_{e1} = X_1 + a^2 X_2 = 16 + (2^2 \times 6) = 40 \Omega$

(3) 一次側等效阻抗  $Z_{e1} = \sqrt{R_{e1}^2 + X_{e1}^2} = \sqrt{30^2 + 40^2} = 50 \Omega$

## 2. 一次側電路併入二次側加以整合

### (1) 電路整合

依據匝數比  $a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{I_2}{I_1} = \sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}}$ , 將圖 13-15 變壓器一次側等效電路中的電壓除以  $a$  倍, 電流乘以  $a$  倍, 阻抗部分除以  $a^2$  倍 (導納就改乘  $a^2$  倍) 後, 再與原本二次側的等效電路連接, 其結果如圖 13-19 所示。

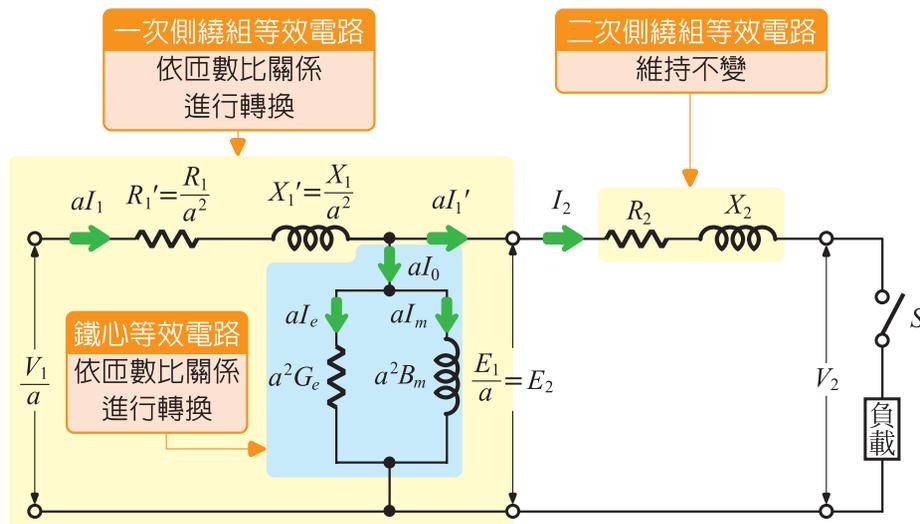


圖 13-19 一次側電路整合併入二次側之等效電路

## (2) 電路簡化

將圖 13-19 鐵心等效電路忽略後，再將兩繞組的電阻與電抗合併計算後，可得到併入二次側近似等效電路如圖 13-20 所示。

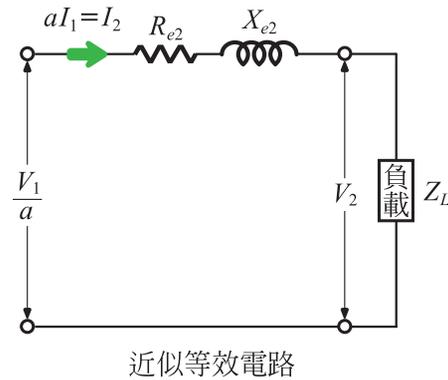


圖 13-20 併入二次側等效電路之簡化

圖 13-20 中，變壓器二次側等值阻抗的算式如下：

$$R_{e2} = R_2 + R_1' = R_2 + \frac{R_1}{a^2} \quad (13-15a)$$

$$X_{e2} = X_2 + X_1' = X_2 + \frac{X_1}{a^2} \quad (13-15b)$$

$$Z_{e2} = \sqrt{R_{e2}^2 + X_{e2}^2} \quad (13-15c)$$

$R_{e2}$ ：二次側等效電阻 ( $\Omega$ )

$X_{e2}$ ：二次側等效電抗 ( $\Omega$ )

$R_2$ ：二次側繞組電阻 ( $\Omega$ )

$X_2$ ：二次側漏磁電抗 ( $\Omega$ )

$R_1$ ：一次側繞組電阻 ( $\Omega$ )

$X_1$ ：一次側漏磁電抗 ( $\Omega$ )

$Z_{e2}$ ：二次側等效阻抗 ( $\Omega$ )

$a$ ：匝數比



### 範例

07

有一部 100 kVA，22 kV / 11 kV 單相變壓器，已知一次側繞組電阻  $10 \Omega$ ，一次側漏磁電抗為  $16 \Omega$ ，二次側繞組電阻為  $5 \Omega$ ，二次側漏磁電抗為  $6 \Omega$ ，改求  
(1) 二次側等效電阻 (2) 二次側等效電抗 (3) 二次側等效阻抗分別為多少？

解 匝數比  $a = \frac{22 \text{ kV}}{11 \text{ kV}} = 2$

(1) 二次側等效電阻  $R_{e2} = R_2 + \frac{R_1}{a^2} = 5 + \frac{10}{2^2} = 7.5 \Omega$

(2) 二次側等效電抗  $X_{e2} = X_2 + \frac{X_1}{a^2} = 6 + \frac{16}{2^2} = 10 \Omega$

(3) 二次側等效阻抗  $Z_{e2} = \sqrt{R_{e2}^2 + X_{e2}^2} = \sqrt{7.5^2 + 10^2} = 12.5 \Omega$

將範例 06 與範例 07 結果比較後，可以發現無論採用何種整合方式，

一、二次側所得到的等效阻抗等數據，也會符合匝數比關係 ( $R_{e2} = \frac{R_{e1}}{a^2}$ 、

$X_{e2} = \frac{X_{e1}}{a^2}$ 、 $Z_{e2} = \frac{Z_{e1}}{a^2}$ )，可依據情形決定採用何種轉換方式。

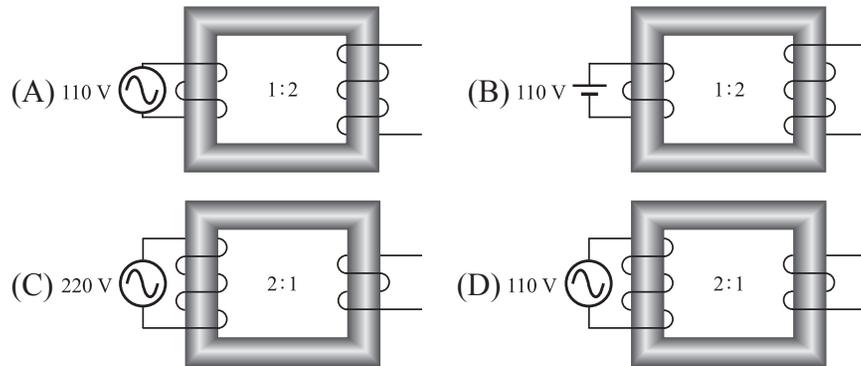


## 一、選擇題

**13-1** ( ) 1. 下列有關變壓器之敘述，何者正確？

- (A) 變壓器為一種將機械能轉換成交流電能的裝置
- (B) 變壓器為一種將直流電能轉換成交流電能的裝置
- (C) 變壓器為一種將交流電能轉換成交流電能的裝置
- (D) 變壓器為一種將太陽能轉換成交流電能的裝置。

( ) 2. 下列接法何者可能造成 110 V / 220 V 變壓器燒毀？



**13-2** ( ) 3. 變壓器矽鋼片鐵心含矽的主要目的為何？

- (A) 提高導磁係數
- (B) 提高鐵心延伸度
- (C) 提升絕緣
- (D) 減少銅損。

( ) 4. 變壓器依線圈與鐵心的配置有外鐵式、內鐵式及捲鐵式等三種配置方式，下列敘述何者正確？

- (A) 外鐵式適用於低電流及低電壓之變壓器
- (B) 內鐵式適用於低電流及低電壓之變壓器
- (C) 外鐵式適用於低電流及高電壓之變壓器
- (D) 內鐵式適用於低電流及高電壓之變壓器。

( ) 5. 變壓器中絕緣油之目的為何？

- (A) 防止潮濕
- (B) 減少用銅量
- (C) 降低噪音
- (D) 絕緣及冷卻。

**13-3** ( ) 6. 有一台 2200 V / 200 V，50 Hz 之單相變壓器，高壓側繞組的匝數為 1000 匝，試求鐵心最大磁通量約為多少？

- (A) 0.0001 韋伯
- (B) 0.001 韋伯
- (C) 0.01 韋伯
- (D) 0.1 韋伯。

## 自我評量

( ) 7. 有一部 50 Hz 變壓器，鐵心面積為  $5 \times 10^{-3}$  平方公尺，最大磁通密度為 0.6 韋伯 / 平方公尺，若初級線圈為 500 匝，則其初級線圈感應電勢為何？

(A) 444 伏特 (B) 333 伏特 (C) 222 伏特 (D) 111 伏特

**13-4** ( ) 8. 有一部 30 kVA，3000 V / 100 V 變壓器，求高壓側與低壓側額定電流各為何？

(A) 10 A，300 A (B) 100 A，300 A  
(C) 300 A，100 A (D) 300 A，10 A。

( ) 9. 單相變壓器的匝數比  $a = \frac{N_1}{N_2}$ ，其中  $N_1$  為一次側繞組的匝數， $N_2$  為二次側繞組的匝數。若  $V_1$  表示一次側電壓， $V_2$  表示二次側電壓， $I_1$  表示一次側電流， $I_2$  表示二次側電流；假設此為理想變壓器，則下列關係何者正確？

(A)  $a = \frac{V_2}{V_1}$  (B)  $a = \frac{I_2}{I_1}$  (C)  $a = \frac{V_2 + V_1}{V_1}$  (D)  $a = \frac{I_1}{I_2}$ 。

( ) 10. 單相變壓器的高壓側線圈有 800 匝，低壓側線圈有 40 匝，若高壓側額定電壓為 220 伏特，低壓側額定電流為 4 安培，則此變壓器的額定容量為何？

(A) 440 VA (B) 160 VA (C) 88 VA (D) 44 VA。

( ) 11. 單相變壓器一次側繞組為  $N_1$  匝，二次側繞組有  $N_2$  匝。假設此為理想變壓器，在二次側接有負載電阻  $R$ ，若將此負載換算為一次側之等效電阻，其值為何？

(A)  $\frac{N_2}{N_1} R$  (B)  $\left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 R$  (C)  $\frac{N_1}{N_2} R$  (D)  $\left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 R$ 。

( ) 12. 有一部單相 2400 V / 240 V 變壓器，若高壓側的電阻為 50  $\Omega$ ，則等效至低壓側的電阻值為何？

(A) 0.5  $\Omega$  (B) 5  $\Omega$  (C) 500  $\Omega$  (D) 5000  $\Omega$ 。

# 自我評量

- ( )13. 有一部變壓器初級線圈電壓為 3150 V 時，次級線圈電壓為 105 V，下列敘述何者錯誤？
- (A) 若次級線圈匝數為 80 匝，則初級線圈匝數為 2400 匝  
(B) 當初級線圈電壓增加到 3300 V，則次級線圈電壓為 120 V  
(C) 為使次級線圈電壓為 100 V，初級線圈電壓應為 3000 V  
(D) 初級與次級線圈阻抗比等於匝數之平方比。
- ( )14. 如圖 (1) 所示之聲音放大器電路，其輸出阻抗為 32 k $\Omega$ ，喇叭的阻抗為 8  $\Omega$ ，若欲將最大功率傳輸到喇叭上，則變壓器的匝數比  $N_1 : N_2$  為何？ (A) 9 : 1 (B) 8 : 1 (C) 3 : 1 (D) 2 : 1。

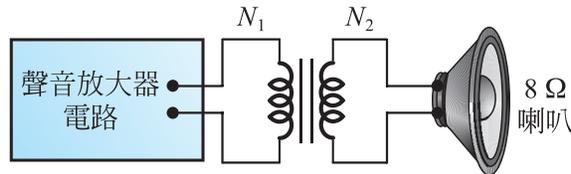


圖 (1)

- 13-5** ( )15. 在變壓器的等效電路中，下列何者代表變壓器的鐵損？
- (A) 一次線圈電阻 (B) 二次線圈電阻  
(C) 激磁電導 (D) 漏磁電抗。
- ( )16. 變壓器的一次側輸入額定電壓，激磁電流會含有鐵損電流的成分，鐵損電流造成變壓器鐵心發熱，試問鐵損電流的相位為何？
- (A) 與輸入電壓同相 (B) 超前輸入電壓 90 度  
(C) 落後輸入電壓 90 度 (D) 落後輸入電壓 180 度。
- ( )17. 有一部電壓比為 5000 V / 500 V 之理想變壓器，高壓側激磁電流為 0.5 A，無載損失為 1500 W，則其磁化電流為多少？
- (A) 0.3 A (B) 0.4 A (C) 0.5 A (D) 0.6 A。
- ( )18. 有一部單相變壓器於無載時，測得電壓為 200 V，電流為 1 A，功率因數為 0.6，試求此變壓器無載時消耗功率為何？
- (A) 200 W (B) 180 W (C) 120 W (D) 60 W。

## 自我評量

- ( )19. 變壓器通電後，磁力線直接經由氣隙與本身線圈交鏈，而不與相鄰之線圈交鏈者，稱為何？
- (A) 漏磁通 (B) 交鏈磁通  
(C) 公共磁通 (D) 互感磁通。
- ( )20 變壓器一、二次側電壓有相角差，主要是由下列哪一個因素造成？
- (A) 線圈電阻 (B) 漏磁  
(C) 鐵損 (D) 絕緣。
- ( )21. 變壓器一次側繞組加一正弦波電源，會產生正弦波的磁通，但主要因何種效應，使得激磁電流非為正弦波？
- (A) 導線集膚效應 (B) 漏磁效應  
(C) 磁場干擾效應 (D) 鐵心飽和與磁滯效應。
- ( )22. 有一部 50 kVA，1200 V / 120 V 單相變壓器，折算至高壓側等效阻抗為  $Z_{e1} = 20 + j50 \Omega$ ，當高壓側加入額定電壓，低壓側連接電感性負載  $Z_L = 5.8 + j7.5 \Omega$  時，高壓側之電流為何？
- (A) 1 A (B) 1.2 A (C) 2.4 A (D) 3.6 A。

## 二、計算題

1. 如圖 (2) 所示為一部理想變壓器，求：(1) 一次側電流  $I_1$ 、(2) 二次側電流  $I_2$ 、(3) 一次側輸入功率  $P_1$ 、(4) 二次側輸出功率  $P_2$  分別為何？

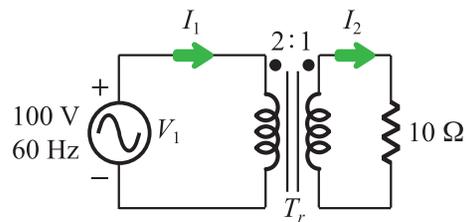


圖 (2)

2. 如圖 (3) 所示為一部理想變壓器，求：(1) 一次側電流  $I_1$ 、(2) 二次側電流  $I_2$ 、(3) 一次側輸入功率  $P_1$ 、(4) 二次側輸出功率  $P_2$  分別為何？

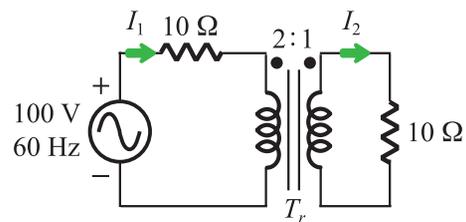
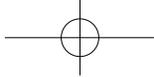


圖 (3)



# CHAPTER 14

## 變壓器之特性

### » 本章重點

變壓器在製造過程中，所用的各項材料特性並非理想，例如繞組本身有電阻值，鐵心則有漏磁與磁滯等現象，除了造成用戶端電壓會因為用電量的大小及型態產生變化外；變壓器本身也會有功率損失，影響效率。本章將依序介紹變壓器使用時的壓降、損失、效率及相關內容。

### 14-1 電壓調整率

#### (一) 電壓調整率的定義

圖 14-1 中將變壓器一次側電壓 ( $V_1$ ) 維持不變，當負載逐漸增加時，受到內部繞組電阻以及漏磁電抗的影響，二次側電壓 ( $V_2$ ) 會發生變動，其變動程度會與負載電流及功率因數有關。為了解變壓器電壓變動的幅度，因此電壓調整率 ( $V.R. \%$ ) 或稱為電壓變動率之定義為：

$$V.R.\% = \frac{V_{2(NL)} - V_{2(FL)}}{V_{2(FL)}} \times 100\% \quad (14-1)$$

$V_{2(NL)}$ ：無載 (no load) 二次側端電壓     $V_{2(FL)}$ ：滿載 (full load) 二次側端電壓

電壓調整率的高低是判斷變壓器特性的重要因素，其值越低越好，依據 CNS 規定，我國三相桿上用變壓器電壓調整率需在 3.6 % 以下，容量越大，電壓調整率越低。

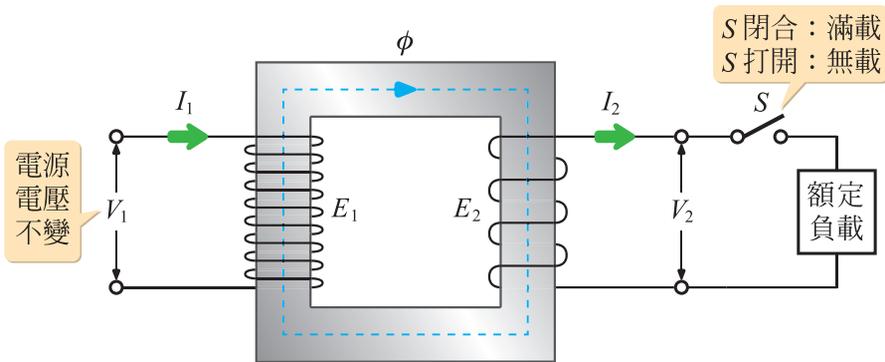


圖 14-1 無載與滿載端電壓

## 範例

## 01

有一部 5 kVA，3300 V / 220 V，60 Hz 單相變壓器，在電源電壓不變下，二次側外加額定負載時，測得端電壓為 220 V，若將負載切離，端電壓變為 225 V，則 (1) 二次側額定電流 (2) 電壓調整率分別為多少？

解 (1) 二次側額定電流

$$I_2 = \frac{S}{V_2} = \frac{5 \text{ kVA}}{220 \text{ V}} = 22.72 \text{ A}$$

(2) 電壓調整率為

$$V.R. \% = \frac{V_{2(NL)} - V_{2(FL)}}{V_{2(FL)}} \times 100 \% = \frac{225 \text{ V} - 220 \text{ V}}{220 \text{ V}} \times 100 \% = 2.27 \%$$

## 隨堂練習

有一部單相變壓器匝數比為 30，滿載時二次側端電壓為 110 V，已知其電壓調整率為 5%，則一次側端電壓約為多少？

(A) 3000 V (B) 3465 V (C) 3520 V (D) 3755 V。



## (二) 阻抗法求電壓調整率

依據圖 13-20 所述重畫變壓器二次等效電路如圖 14-2(a) 所示，當開關 S 打開 ( $I_2 = 0$ )，此時無載二次側電壓等於二次側應電勢  $V_{2(NL)} = E_2$ 。

若將開關 S 閉合，將二次側應電勢 ( $E_2$ ) 分別減去二次側電阻壓降 ( $I_2 \times R_{e2}$ ) 與電抗壓降 ( $I_2 \times X_{e2}$ ) 就可以得到滿載時二次側電壓  $V_{2(FL)}$ 。

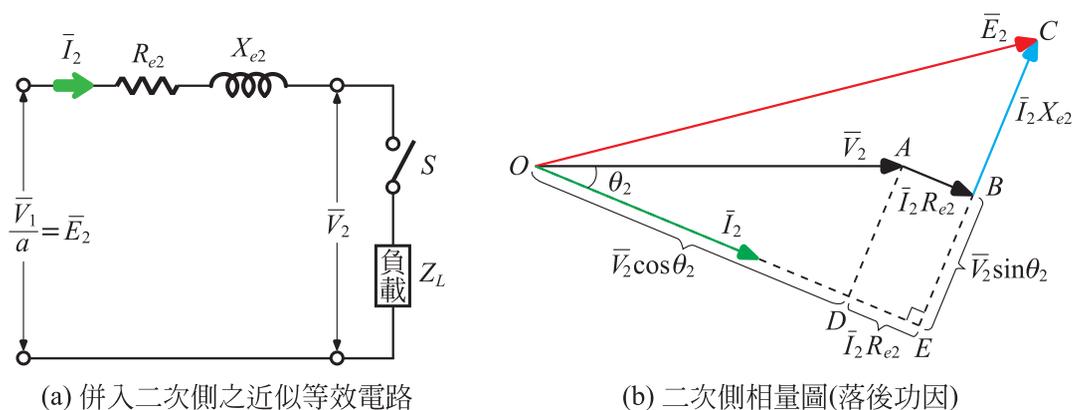


圖 14-2 等效電路與相量圖

圖 14-2(b) 相量圖是由圖 13-16 簡化而得，當變壓器外加電感性負載 ( $I_2$  落後  $V_2$ ) 時，利用電表測得二次側端電壓 ( $V_2$ ) 與二次側額定電流 ( $I_2$ ) 以及功率因數角 ( $\theta_2$ )，再透過相量圖可得變壓器無載時二次側電壓：

$$\begin{aligned}
 V_{2(NL)} = E_2 &= \overline{OC} = \overline{OA} + \overline{AB} + \overline{BC} = \sqrt{(\overline{OD} + \overline{DE})^2 + (\overline{EB} \pm \overline{BC})^2} \\
 &= \sqrt{(V_2 \cos \theta_2 + I_2 R_{e2})^2 + (V_2 \sin \theta_2 \pm I_2 X_{e2})^2} \quad (14-2)
 \end{aligned}$$

上式中，電感性負載 (落後功因) 用 + 號。電容性負載 (超前功因) 用 - 號。

依據上述，變壓器的電壓調整率也可以表示如下：

$$V.R. \% = \frac{V_{2(NL)} - V_{2(FL)}}{V_{2(FL)}} \times 100 \% = \frac{E_2 - V_2}{V_2} \times 100 \% \quad (14-3)$$

$V_2$ ：二次側額定電壓 (V)       $E_2$ ：二次側應電勢 (V)

範例  
02

有一部 10 kVA，2000 V / 200 V，60 Hz 單相變壓器，換算到二次側之等值電阻為  $0.2 \Omega$ ，等值電抗為  $0.4 \Omega$ ，將一次側外加額定電源，二次側接上功率因數為 0.8 落後的額定負載，求：

(1) 二次側額定電流 (2) 無載時二次側電壓 (3) 電壓調整率分別為多少？

解 (1) 二次側額定電流  $I_2 = \frac{S}{V_2} = \frac{10 \text{ kVA}}{200 \text{ V}} = 50 \text{ A}$

(2) 由於功率因數  $\cos\theta_2 = 0.8$ ，因此  $\sin\theta_2 = \sqrt{1-0.8^2} = 0.6$

無載時二次側電壓

$$\begin{aligned} V_{2(NL)} = E_2 &= \sqrt{(200 \times 0.8 + 50 \times 0.2)^2 + (200 \times 0.6 + 50 \times 0.4)^2} \\ &= \sqrt{170^2 + 140^2} = 220 \text{ V} \end{aligned}$$

(2) 電壓調整率  $V.R. \% = \frac{E_2 - V_2}{V_2} \times 100 \% = \frac{220 \text{ V} - 200 \text{ V}}{200 \text{ V}} \times 100 \% = 10 \%$

立即  
練習

同範例 02，若改接功率因數為 0.6 超前的額定負載，則電壓調整率為多少？

### (三) 百分比阻抗法求電壓調整率

利用 (公式 14-2) 求二次側應電勢 ( $E_2$ ) 過程比較繁瑣，實務上改用百分阻抗法計算會比較簡便，將原本圖 14-2(b) 的輔助線改畫後，如圖 14-3 所示，可得到變壓器無載時二次側電壓：

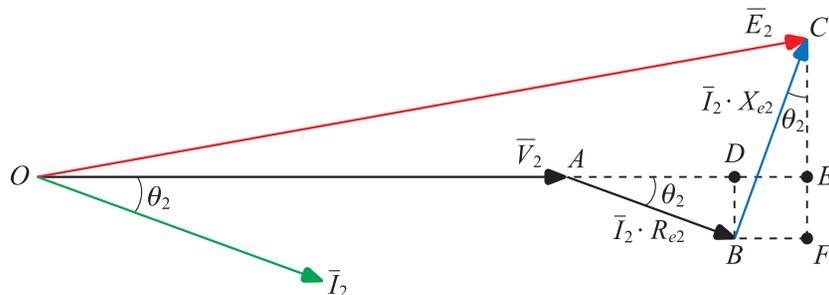


圖 14-3 等效電路與相量圖



$$V_{2(NL)} = E_2 = \overline{OC} = \sqrt{(\overline{OE})^2 + (\overline{EC})^2} = \sqrt{(\overline{OA} + \overline{AD} + \overline{DE})^2 + (\overline{CF} - \overline{EF})^2}$$

$$= \sqrt{(V_2 + I_2 R_{e2} \cos \theta_2 + I_2 X_{e2} \sin \theta_2)^2 + (I_2 X_{e2} \cos \theta_2 - I_2 R_{e2} \sin \theta_2)^2}$$

上式中，由於  $(I_2 X_{e2} \cos \theta_2 - I_2 R_{e2} \sin \theta_2)^2$  與前項相比，其值甚小，忽略後可得  $E_2 = V_2 + I_2 R_{e2} \cos \theta_2 + I_2 X_{e2} \sin \theta_2$ ，將其代入公式 14-3，則變壓器之電壓調整率改寫成

$$V.R. \% = \frac{E_2 - V_2}{V_2} \times 100 \% = \frac{(V_2 + I_2 R_{e2} \cos \theta_2 + I_2 X_{e2} \sin \theta_2) - V_2}{V_2} \times 100 \%$$

$$= \left( \frac{I_2 R_{e2}}{V_2} \cos \theta_2 + \frac{I_2 X_{e2}}{V_2} \sin \theta_2 \right) \times 100 \% = p \cos \theta_2 + q \sin \theta_2 \quad (14-4)$$

$p = \frac{I_2 R_{e2}}{V_2} \times 100 \%$  稱為百分比電阻壓降 (%R)；一次側時  $p = \frac{I_1 R_{e1}}{V_1} \times 100 \%$ 。

$q = \frac{I_2 X_{e2}}{V_2} \times 100 \%$  稱為百分比電抗壓降 (%X)；一次側時  $q = \frac{I_1 X_{e1}}{V_1} \times 100 \%$ 。

若是負載未達額定值，可將 (公式 14-4) 之值乘以負載比例 ( $k$ )，可得電壓調整率之通用公式為

$$V.R. \% = k(p \cos \theta_2 \pm q \sin \theta_2) \quad (14-5)$$

$k$ ：負載比例 =  $\frac{\text{實際負載量}}{\text{額定容量}}$   $\left\{ \begin{array}{l} \text{電感性 (落後功因) 用 + 號} \\ \text{電容性 (超前功因) 用 - 號} \end{array} \right.$

#### (四) 百分比阻抗壓降

百分比電阻壓降 ( $p$ ) 與百分比電抗壓降 ( $q$ ) 之相量和稱為百分比阻抗壓降 ( $z$ )，常以 (% Z) 代表，其值代表變壓器額定狀態使用時，電流通過繞組所產生之壓降佔額定電壓的百分比，即：

$$\% Z = \sqrt{p^2 + q^2} = \frac{I_2 Z_{e2}}{V_2} \times 100 \% = \frac{I_1 Z_{e1}}{V_1} \times 100 \% \quad (14-6)$$

依據公式 14-6 可以得到當變壓器於額定電源下，負載發生短路故障時，一、二次側穩態狀態下之短路電流為：

$$I_{s1} = \frac{V_1}{Z_{e1}} = \frac{V_1 \times I_1}{Z_{e1} \times I_1} = \frac{I_1}{\%Z} \quad (14-7)$$

$$I_{s2} = \frac{V_2}{Z_{e2}} = \frac{V_2 \times I_2}{Z_{e2} \times I_2} = \frac{I_2}{\%Z} = a \times I_{s1} \quad (14-8)$$

$V_1$  : 一次側額定電壓 (V)

$V_2$  : 二次側額定電壓 (V)

$I_1$  : 一次側額定電流 (A)

$I_2$  : 二次側額定電流 (A)

$I_{s1}$  : 一次側短路電流 (A)

$I_{s2}$  : 二次側短路電流 (A)

$Z_{e1}$  : 一次側等效阻抗 ( $\Omega$ )

$Z_{e2}$  : 二次側等效阻抗 ( $\Omega$ )

$\%Z$  : 百分比阻抗壓降 (%)

### 隨堂練習

- ( ) 1. 有一部 220 V / 110 V，1 kVA 單相變壓器，已知百分比電阻壓降為 3%，百分比電抗壓降為 4%，當滿載且功率因數為 1 時，電壓調整率為  
(A) -3% (B) 0.3% (C) 0.6% (D) 3%。
- ( ) 2. 同上題，當滿載且功率因數為 0.8 超前時，電壓調整率為  
(A) 4.8% (B) 3% (C) 0% (D) -3%。



**範例****03**

有一部 10 kVA，2000 V / 200 V，60 Hz 單相變壓器，換算到二次側之等值電阻為 0.2 Ω，等值電抗為 0.4 Ω，將一次側外加額定電源，二次側接上功率因數為 0.8 落後的額定負載，求

- (1) 百分比電阻壓降                      (2) 百分比電抗壓降  
 (3) 電壓調整率                              (4) 無載時二次側電壓分別為多少？

解  $I_2 = \frac{S}{V_2} = \frac{10 \text{ kVA}}{200 \text{ V}} = 50 \text{ A}$ ， $\cos\theta_2 = 0.8$ ， $\sin\theta_2 = \sqrt{1-0.8^2} = 0.6$

(1) 百分比電阻壓降  $p = \frac{I_2 R_{e2}}{V_2} = \frac{50 \times 0.2}{200} \times 100\% = 5\%$

(2) 百分比電抗壓降  $q = \frac{I_2 X_{e2}}{V_2} \times 100\% = \frac{50 \times 0.4}{200} \times 100\% = 10\%$

(3) 電壓調整率  $V.R.\% = p \cos\theta_2 \pm q \sin\theta_2 = 5\% \times 0.8 + 10\% \times 0.6 = 10\%$

(4)  $V.R.\% = \frac{E_2 - V_2}{V_2} \times 100\%$ ， $10\% = \frac{E_2 - 200 \text{ V}}{200 \text{ V}} \times 100\%$ ，

可得無載時二次側電壓  $E_2 = 220 \text{ V}$

比較範例 02 與範例 03 之計算結果相同，採用百分比阻抗法計算電壓調整率較為便捷。

**立即練習**

同範例 03，若將二次側負載為半載，且功率因數為 0.6 超前時，則電壓調整率為多少？

## 範例

## 04

有一部 5 kVA，2000 V / 200 V，60 Hz 單相變壓器，換算到二次側之等值電阻為  $0.12 \Omega$ ，等值電抗為  $0.16 \Omega$ ，求

- (1) 百分比阻抗壓降 (2) 額定電壓時若負載短路時，一次側短路電流  
(3) 二次側短路電流分別為多少？

解 一次側額定電流  $I_1 = \frac{S}{V_1} = \frac{5 \text{ kVA}}{2000 \text{ V}} = 2.5 \text{ A}$ ，

二次側額定電流  $I_2 = \frac{S}{V_2} = \frac{5 \text{ kVA}}{200 \text{ V}} = 25 \text{ A}$

(1)  $p = \frac{I_2 R_{e2}}{V_2} = \frac{25 \times 0.12}{200} \times 100\% = 1.5\%$

$q = \frac{I_2 X_{e2}}{V_2} \times 100\% = \frac{25 \times 0.16}{200} \times 100\% = 2\%$

百分比阻抗壓降  $\%Z = \sqrt{p^2 + q^2} = \sqrt{1.5\%^2 + 2\%^2} = 2.5\%$

(2) 一次側短路電流  $I_{s1} = \frac{I_1}{\%Z} = \frac{2.5 \text{ A}}{2.5\%} = 100 \text{ A}$

(3) 二次側短路電流  $I_{s2} = \frac{I_2}{\%Z} = \frac{25 \text{ A}}{2.5\%} = 1000 \text{ A}$

或是  $I_{s2} = a \times I_{s1} = 10 \times 100 \text{ A} = 1000 \text{ A}$

## 14-2 分接頭 (tap)

相同配電區域中，受到線路壓降影響，鄰近變電所的用戶電壓通常較高，線路末端電壓則較低。因此中、大型變壓器會在高壓側繞組（電流較低）分段引出數個分接頭，再引接至分接頭切換器 (tap changer)，就可以依據實際用電需求，將分接頭切換至適當位置，以維持穩定的輸出電壓。

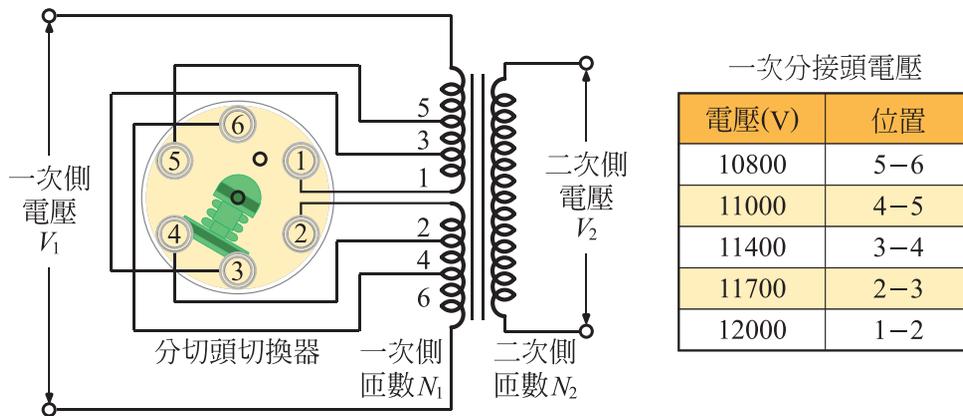


圖 14-4 分接頭切換器

圖 14-4 為 11.4 kV/220 V 配電變壓器之分接頭，正常使用時分接頭切換器切至【位置 3-4】。倘若一次側電壓低於額定值，將切換器往順時針方向切換，藉由降低一次側繞組匝數，讓二次側電壓略為增加。反之，若一次側電壓高於額定值，則將切換器往逆時針方向切換，使一次側繞組匝數增加，讓二次側電壓降低，以維持二次側電壓平穩。

分接頭的調整可透過匝數比 ( $a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2}$ ) 之關係來計算，以圖 14-4 降壓變壓器而言，分接頭裝在高壓側（一次側），透過改變一次側匝數 ( $N_1$ ) 來調整二次側電壓 ( $V_2$ )。若是升壓變壓器，分接頭裝在高壓側（二次側），則是改變二次側匝數 ( $N_2$ ) 來調整二次側電壓 ( $V_2$ )。

## 範例

## 05

有一部 11.4 kV/220 V 配電變壓器，分接頭為 (10800-11100-11400-11700-12000/220 V)，當分接頭接至 11400 V 位置時，測得二次側電壓為 231 V，求

- (1) 一次側電壓
- (2) 欲使二次側電壓調整為 220 V，則分接頭切換至哪個位置最恰當？

解 (1) 分接頭 ( $N_1$ ) 接至 11400 V 位置，

$$\text{匝數比 } a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} \Rightarrow \frac{11400}{220} = \frac{V_1}{231}, \text{ 可得一次側電壓為 } V_1 = 11790 \text{ V}$$

- (2) 由於電壓比  $a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2}$ ，在電源電壓 ( $V_1$ ) 及二次側匝數 ( $N_2$ ) 不變下，要將二次側電壓由 231 V 降至 220 V ( $V_2 \downarrow$ )，則一次側分接頭 ( $N_1$ ) 必須依比例上升，因此分接頭位置需調整至：

$$N_1' = 11400 \text{ V} \times \frac{231 \text{ V}}{220 \text{ V}} = 11970 \text{ V} \text{ 之位置 ( 選最接近之 12000 V 位置 )。}$$

## 隨堂練習

- ( ) 1. 有一部單相變壓器 (3450-3300-3150-3000-2850/110 V) 接至分接頭 3300 V 位置，測得二次側電壓為 105 V，今欲得 110 V 之二次側電壓，則一次側分接頭應改接在哪一位置？  
(A) 3450 V (B) 3150 V (C) 3000 V (D) 2850 V。
- ( ) 2. 有一部單相變壓器 (7200-6900-6600-6300/220 V) 接至分接頭 6900 V 位置，測得二次側電壓為 230 V，若是分接頭改切換至 7200 V 之位置，則二次側電壓為  
(A) 240 V (B) 230 V (C) 220 V (D) 210 V。

## 14-3 損失與效率

### (一) 變壓器之損失

變壓器的損失分成兩大類：(一) 無載損、(二) 負載損，如圖 14-5 所示，分述如下：

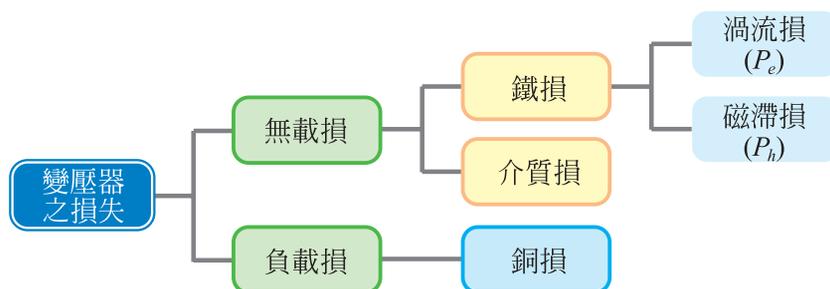


圖 14-5 變壓器之損失

#### 1. 無載損

無載損包含鐵損 (磁滯損及渦流損) 及介質損兩種；介質損是指絕緣材料在電場作用下所引起的能量損耗，其值跟鐵損相比甚小，因此可忽略。至於鐵損則包含磁滯損與渦流損，相關知識可以參考第七章直流發電機的耗損及效率的內容，針對變壓器的磁滯損與渦流損的特性，分析情形如下：

##### (1) 磁滯損

磁滯損是指鐵心材料在磁化過程中由於磁滯現象所造成之損失，公式如同 7-1 所示為：

$$P_h = K_h B_m^x fG \quad (7-1)$$

依據公式 13-2 變壓器應電勢  $E = 4.44 fN\phi_m$ ，忽略壓降情形下，端電壓  $V$  視為與應電勢  $E$  相同，而磁通量  $\phi_m = A \times B_m$ ，變壓器應電勢可以改寫成  $V = 4.44 fN(A \times B_m)$ ，因此變壓器鐵心最大磁通密度為：

$$B_m = \frac{V}{4.44 fNA} \quad (14-9)$$

將公式 14-9 代入公式 7-1，在司坦麥芝係數  $X = 2$  的情形下，可得到變壓器磁滯損的公式為：

$$P_h = K_h \times \left( \frac{V}{4.44 fNA} \right)^2 fG \quad (14-10)$$

變壓器製造完成後比例常數 ( $K_h$ )、匝數 ( $N$ )、截面積 ( $A$ ) 及重量 ( $G$ ) 均固定不變，將其統整後以  $K_h'$  代表，則變壓器磁滯損的公式可簡化如下：

$$P_h = K_h' \times \frac{V^2}{f} \quad (14-11)$$

也就是變壓器的磁滯損與電壓平方成正比，與頻率成反比。

## (2) 渦流損

渦流損是指磁通變化過程中，鐵心導體內產生漩渦狀的電流（渦流），渦流經過具有電阻的鐵心材料而發熱所形成的損失，公式如同 7-2 所示：

$$P_e = K_e B_m^2 f^2 t^2 G \quad (7-2)$$

將公式 14-9 代入公式 7-2，可得到變壓器渦流損的公式為：

$$P_e = K_e \left( \frac{V}{4.44 fNA} \right)^2 f^2 t^2 G \quad (14-12)$$

由於比例常數  $K_e$ 、線圈匝數 ( $N$ )、鐵心截面積 ( $A$ )、鐵心重量 ( $G$ ) 及鐵心疊片厚度 ( $t$ ) 均固定不變，將其統整後以  $K_e'$  代表，則變壓器渦流損的公式簡化如下：

$$P_e = K_e' \times V^2 \quad (14-13)$$

也就是變壓器的渦流損與電壓平方成正比，與頻率無關。

依據上述分析可知，當同一個變壓器運用在不同電壓與頻率的國家或地區時，其磁滯損與渦流損等性能會有所差異，使用時要特別注意。

鐵損 ( $P$ ) 為磁滯損 ( $P_h$ ) 與渦流損 ( $P_e$ ) 之和，一般而言，磁滯損與渦流損的



比例約為 4 : 1，因此變壓器的鐵損可以表示為：

$$P_i = P_h + P_e = (K_h \times \frac{V^2}{f}) + (K_e \times V^2) \doteq K \times \frac{V^2}{f} \quad (14-14)$$

由公式 14-14 可知，變壓器的鐵損與外加電壓平方 ( $V^2$ ) 成正比，與頻率 ( $f$ ) 成反比。由於鐵損與負載電流無關，因此又稱為固定損或定值損。學校或是大型工廠的配電變壓器一天 24 小時都在通電，因此需要配合用電量選用適當容量的變壓器，也可以挑選固定損較低的機種以節省電費，另外長時間不使用的家用電器 (如 3C 產品的充電器、電熱水器等)，將電源關閉或是插頭拔下，也可以節約能源。

## 2. 負載損

變壓器無載時電流很小，銅損很低。隨著負載增加，銅損與電流平方成 ( $I^2$ ) 成正比，因此又稱為負載損或變動損。

### 範例

06

有一部 240 V/120 V，1 kVA，60 Hz 之變壓器，當用於 50 Hz 之電源時，在容許磁通密度不變下，則變壓器高壓側電壓與低壓側電壓分別為多少伏特？

- 解 由於變壓器的應電勢  $E = 4.44 f N \phi_m = 4.44 f N (A \times B_m)$ ，  
相同變壓器在磁通密度  $B_m$  不變下，電源頻率與電壓成正比，  
因此本變壓器高壓側電壓應該修正為  $240 \times \frac{50 \text{ Hz}}{60 \text{ Hz}} = 200 \text{ V}$ ，  
低壓側電壓應該修正為  $120 \times \frac{50 \text{ Hz}}{60 \text{ Hz}} = 100 \text{ V}$

## 範例

07

有一部單相 20 kVA，電壓為 10 kV，頻率 50 Hz 之變壓器，其磁滯損失為 400 W，渦流損失為 100 W。假若改接在電壓為 12 kV，頻率為 60 Hz 之電源，倘若電流不變下，則其 (1) 磁滯損失 (2) 渦流損失 分別為多少瓦特？

解 (1) 磁滯損失與電壓平方成正比，與頻率成反比，因此

$$P_h' = 400 \times \left( \frac{12 \text{ kV}}{10 \text{ kV}} \right)^2 \times \left( \frac{50 \text{ Hz}}{60 \text{ Hz}} \right) = 480 \text{ W}$$

(2) 渦流損失與電壓平方成正比，與頻率無關，因此

$$P_e' = 100 \times \left( \frac{12 \text{ kV}}{10 \text{ kV}} \right)^2 = 144 \text{ W}$$

## 隨堂練習

- ( ) 1. 有關變壓器銅損之敘述，下列何者正確？  
 (A) 與頻率成正比 (B) 與頻率平方成正比  
 (C) 與負載電流成正比 (D) 與負載電流平方成正比。
- ( ) 2. 變壓器之電壓及負載電流不變，當頻率減半，則磁滯損與渦流損分別變成多少倍？  
 (A) 2、1 (B) 1、2 (C) 1、0.5 (D) 0.5、1。

## (二) 變壓器之效率

電機的效率定義為輸出功率與輸入功率之比值，一般以百分比來表示，即

$$\text{效率 } \eta = \frac{\text{輸出功率 } P_o}{\text{輸入功率 } P_{in}} \times 100 \% \quad (14-15)$$

其中輸入功率  $P_{in}$  = 輸出功率  $P_o$  + 損失  $P_{loss}$ ，其關係如圖 14-6 所示，變壓器由於沒有轉動部分及空氣隙，效率是電工機械中最高的，大約都在 95 % 以上。

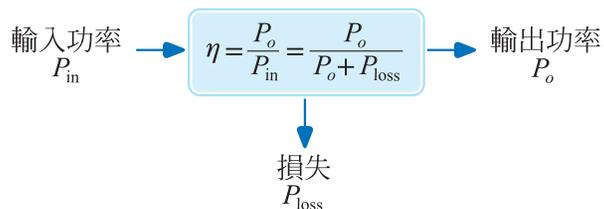


圖 14-6 損失與效率的關係



## 1. 一般效率

變壓器的效率計算方式與直流電機相似，但要注意的是變壓器的額定容量是以視在功率 ( $S$ ) kVA 來標示，因此在計算輸出功率 ( $P_o$ ) 時必須考量負載的功率因數 ( $\cos\theta$ ) 以及負載比例。至於損失 ( $P_{\text{loss}}$ ) 包含鐵損 ( $P_i$ ) 與銅損 ( $P_c$ )；因此變壓器的一般效率公式如下：

$$\eta = \frac{P_o}{P_{\text{in}}} = \frac{P_o}{P_o + P_{\text{loss}}} = \frac{S \times \cos\theta}{S \times \cos\theta + (P_i + P_c)} \quad (14-16)$$

### 範例

08

有一部 10 kVA 單相變壓器，已知滿載時銅損為 240 瓦，鐵損為 120 瓦，求

- (1) 滿載且負載功因為 1 時之效率
- (2) 半載且負載功因為 0.8 時之效率分別為多少？

解 (1) 滿載時且負載功因為 1：

$$\text{輸出功率 } P_o = S \times \cos\theta = 10 \text{ kVA} \times 1 = 10 \text{ kW} ;$$

$$\text{總損失 } P_{\text{loss}} = 240 + 120 = 360 \text{ W} ,$$

$$\text{效率 } \eta = \frac{P_o}{P_o + P_{\text{loss}}} \times 100\% = \frac{10 \text{ kW}}{10 \text{ kW} + 360 \text{ W}} \times 100\% = 96.5\%$$

(2) 半載時且負載功因為 0.8 時：

$$\text{輸出功率 } P_o = S \times \cos\theta \times \frac{1}{2} = 10 \text{ kVA} \times 0.8 \times \frac{1}{2} = 4 \text{ kW} ;$$

$$\text{半載銅損變為 } P'_c = 240 \times \left(\frac{1}{2}\right)^2 = 60 \text{ W} , \text{ 鐵損維持 } 120 \text{ W} \text{ 不變} ,$$

$$\text{總損失 } P_{\text{loss}} = 60 + 120 = 180 \text{ W} ,$$

$$\text{效率 } \eta = \frac{P_o}{P_o + P_{\text{loss}}} \times 100\% = \frac{4 \text{ kW}}{4 \text{ kW} + 180 \text{ W}} \times 100\% = 95.7\%$$

## 2. 最大效率

由範例 08 可得，變壓器的效率會隨著負載大小以及功率因數而改變。

當變壓器的銅損值等於鐵損時，效率最高。假設變壓器滿載銅損為  $P_c$ ，鐵損為  $P_i$ ，則變壓器發生最大效率時，其負載比例為：

$$\frac{1}{m} = \sqrt{\frac{\text{鐵損 } P_i}{\text{滿載銅損 } P_c}} \quad (14-17)$$

變壓器損失與效率的關係如圖 14-7 所示，效率會隨著負載大小而變化，其中無載時由於輸出功率為零，故效率為零。考量實用性，最大效率大多會設計在接近滿載時。

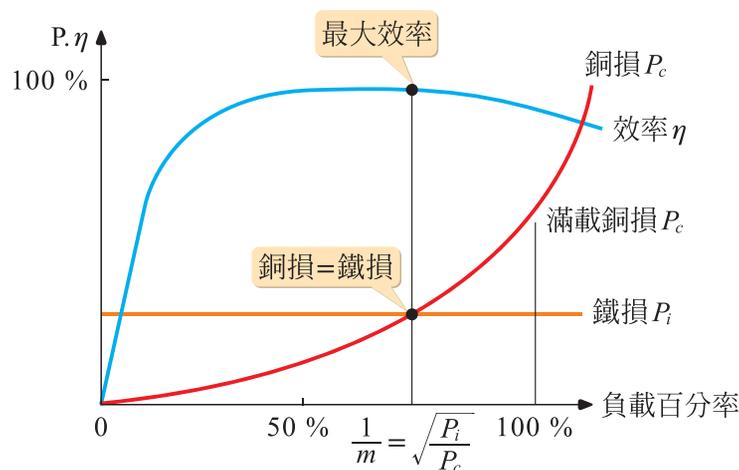


圖 14-7 變壓器之銅損、鐵損、效率與負載之關係



### 範例

09

有一部 10 kVA 單相變壓器，已知滿載時銅損為 240 瓦，鐵損為 120 瓦，負載功因為 0.8 時求 (1) 最大效率發生時的負載比例 (2) 最大效率為多少？

解 (1) 最大效率發生時，負載比例  $\frac{1}{m} = \sqrt{\frac{P_i}{P_c}} = \sqrt{\frac{120}{240}} = \sqrt{\frac{1}{2}} = 0.707$  載

(2) 0.707 載時且負載功因為 0.8 時：

$$P_o = S \times \cos\theta = 10 \text{ kVA} \times 0.8 \times 0.707 = 5656 \text{ W} ;$$

0.707 載時銅損變為  $P'_c = 240 \times (\sqrt{\frac{1}{2}})^2 = 120 \text{ W}$ ，鐵損維持 120 W 不變，

【確認銅損等於鐵損】，總損失  $P_{loss} = 120 + 120 = 240 \text{ W}$

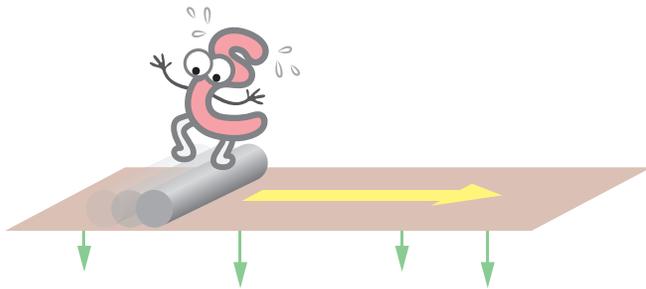
本機 0.707 載時之效率就是最大效率，其值為

$$\eta_{\max} = \frac{P_o}{P_o + P_{\text{loss}}} \times 100\% = \frac{5656 \text{ W}}{5656 \text{ W} + 240 \text{ W}} \times 100\% = 95.9\%$$

### 3. 全日效率

電力用的變壓器都是 24 小時通電，因此以全日效率來評估變壓器的性能會更為妥善：

$$\text{全日效率} = \frac{\text{全日輸出能量}}{\text{全日輸出能量} + \text{全日固定損失能量} + \text{全日變動損失能量}} \times 100\% \quad (7-5)$$



## 範例

10

有一台單相 5 kVA 變壓器，鐵損為 80 W，滿載銅損為 120 W，負載功率因數為 1 之情形下，一天內滿載運轉 12 小時，半載運轉 6 小時，其他時間無載運轉，求全日效率為何？

解 (1) 全日輸出能量： $W_o = (5 \text{ kVA} \times 1 \times 12 \text{ hr}) + \left( 5 \text{ kVA} \times 1 \times \frac{1}{2} \times 6 \text{ hr} \right) = 75 \text{ kWh}$ 。

(2) 全日固定損失能量 (鐵損)： $W_i = 80 \text{ W} \times 24 \text{ hr} = 1.92 \text{ kWh}$

(3) 全日變動損失能量 (銅損)：

$$W_c = (120 \text{ W} \times 1 \times 12 \text{ hr}) + \left( 120 \text{ W} \times \frac{1^2}{2} \times 6 \text{ hr} \right) = 1.62 \text{ kWh}$$

(4) 全日效率： $\eta = \frac{75}{75 + 1.92 + 1.62} \times 100\% = 95.49\%$

## 14-4 阻抗標么值

### (一) 變壓器之阻抗標么值

變壓器會使得電力系統中出現不同層級的電壓，各層級間的電壓、電流及阻抗標準不同，必須先將數據轉換至同一電壓等級才能運算。

常用的計算方式是透過標么值 (per-unit value) 的方式，其定義為：

$$\text{標么值 (pu)} = \frac{\text{實際值}}{\text{基準值}} \quad (14-18)$$

實用上，標么值的運算會先選定容量基準值 ( $S_{base}$ ) 及電壓基準值 ( $V_{base}$ )，以求得電流基準值 ( $I_{base}$ ) 及阻抗基準值 ( $Z_{base}$ )，其值分別為：

$$\text{電流基準值 } (I_{base}) = \frac{\text{容量基準值 } (S_{base})}{\text{電壓基準值 } (V_{base})} \quad (14-19)$$



$$\text{阻抗基準值 } (Z_{base}) = \frac{\text{電壓基準值 } (V_{base})}{\text{電流基準值 } (I_{base})} = \frac{V_{base}}{S_{base}/V_{base}} = \frac{V_{base}^2}{S_{base}} \quad (14-20)$$

之後將阻抗實際值 ( $Z$ ) 除以阻抗基準值 ( $Z_{base}$ ) 就可以得到阻抗標么值為：

$$\text{阻抗標么值 } (Z_{pu}) = \frac{\text{阻抗實際值 } (Z)}{\text{阻抗基準值 } (Z_{base})} \quad (14-21)$$

變壓器若以其額定值為基準值，則自一、二次側所求得的標么阻抗均相同。

當選定的容量基準值 ( $S_{base}$ ) 或是電壓基準值 ( $V_{base}$ ) 變動時，會使得阻抗基準值 ( $Z_{base}$ ) 改變，此時阻抗標么值 ( $Z_{pu}$ ) 必須進行轉換，轉換之原則依據公式 14-20

與 14-21 可得  $Z_{pu} = \frac{Z}{Z_{base}} = \frac{Z}{V^2/S} = Z \times \frac{S}{V^2}$ ，也就是轉換後的標么值會與容量

( $S$ ) 成正比，與電壓平方 ( $V^2$ ) 成反比。

### 範例

#### 11

有一部三相 100 kVA，2000 V / 200 V 變壓器，由高壓側測得等值阻抗為 10 歐姆，

(1) 以高壓側為基準，阻抗標么值為？ (2) 以低壓側為基準，阻抗標么值為何？

**解** (1) 以高壓側 ( $V_1 = 2000$  V) 為基準，

$$\text{阻抗基準值 } (Z_{base1}) = \frac{V_1^2}{S} = \frac{(2000 \text{ V})^2}{100 \text{ kVA}} = 40 \Omega$$

$$\text{阻抗標么值 } (Z_{pu1}) = \frac{Z_{e1}}{Z_{base1}} = \frac{10 \Omega}{40 \Omega} = 0.25$$

(2) 以低壓側 ( $V_2 = 200$  V) 為基準，

$$\text{阻抗基準值 } (Z_{base2}) = \frac{V_2^2}{S} = \frac{(200 \text{ V})^2}{100 \text{ kVA}} = 0.4 \Omega$$

$$\text{低壓側等值阻抗 } Z_{e2} = \frac{Z_{e1}}{a^2} = \frac{10 \Omega}{10^2} = 0.1 \Omega$$

$$\text{阻抗標么值 } (Z_{pu2}) = \frac{Z_{e2}}{Z_{base2}} = \frac{0.1 \Omega}{0.4 \Omega} = 0.25$$

## 範例

## 12

同範例 11，若將變壓器使用於 200 kVA，高壓側電壓 10 kV 的配電系統中分析，則變壓器阻抗標么值為何？

解 方法 1：以配電系統 ( $S = 200 \text{ kVA}$ ， $V_1 = 10 \text{ kV}$ ) 為基準，重新計算

$$\text{阻抗基準值 } (Z_{base}) = \frac{V_1^2}{S} = \frac{(10 \text{ kV})^2}{200 \text{ kVA}} = 500 \Omega$$

$$\text{阻抗標么值 } (Z_{pu1}) = \frac{Z_{e1}}{Z_{base1}} = \frac{10 \Omega}{500 \Omega} = 0.02$$

方法 2：標么值轉換會與容量 ( $S$ ) 成正比，與電壓平方 ( $V^2$ ) 成反比，因此

$$Z_{pu}' = Z_{pu} \times \frac{S'}{S} \times \left(\frac{V}{V'}\right)^2 = 0.25 \times \frac{200 \text{ kVA}}{100 \text{ kVA}} \times \left(\frac{2 \text{ kV}}{10 \text{ kV}}\right)^2 = 0.02$$

## 隨堂練習

- ( ) 1. 有一部 1000 kVA 單相變壓器，一次側電壓為 11.4 kV，阻抗標么值為 0.05，則變壓器阻抗實際值約為 (A) 1.3  $\Omega$  (B) 3.5  $\Omega$  (C) 4.6  $\Omega$  (D) 6.5  $\Omega$ 。

# 自我評量

## 一、選擇題

- 14-1** ( ) 1. 有一部單相變壓器在初級外加額定電壓維持不變下，滿載時二次側端電壓為 200 伏特，若將負載切離二次側端電壓變為 190 伏特，則此變壓器的電壓調整率與負載性質分別為
- (A) 5 %，電阻性 (B) 5 %，電容性  
(C) - 5 %，電阻性 (D) - 5 %，電容性。
- ( ) 2. 有一部 30 kVA，3000 V/200 V 單相變壓器，已知高壓側等效阻抗為  $15 \Omega$ ，則其百分阻抗壓降為何？
- (A) 3 % (B) 4 % (C) 5 % (D) 6 %。
- 14-2** ( ) 3. 下列有關變壓器的敘述何者正確？
- (A) 鐵心採用矽鋼片疊置可減少磁滯損  
(B) 鐵心中加矽可減少渦流損  
(C) 一次繞組及二次繞組交互疊置可改善電壓調整率  
(D) 分接頭的目的是在於提高功率因數。
- ( ) 4. 有一部變壓器一次分接頭接於 3150 V 時二次電壓為 220 V，若將一次分接頭改接於 3300 V 時，則二次電壓應為
- (A) 230 V (B) 220 V (C) 210 V (D) 200 V。
- ( ) 5. 有一 6600 V/110 V，60 Hz 之變壓器，當一次側分接頭置於 6600 V，二次側電壓為 100 V，若要調整二次側電壓為 110 V，則一次側分接頭應置於何處？
- (A) 6000 V (B) 6150 V (C) 6300 V (D) 6600 V。
- 14-3** ( ) 6. 將額定為 60 Hz 之變壓器接於 50 Hz 電源上，在電源電壓不變下，對鐵心內磁通密度之影響為何？
- (A) 減少約 20 % (B) 增加約 20 % (C) 減少約 10 % (D) 無影響。
- ( ) 7. 有一部 1 kVA，220/110 V，60 Hz 之變壓器，若在 50 Hz 情況下使用，在磁通密度不變，則變壓器的容量為何？
- (A) 1.2 kVA (B) 1 kVA (C) 0.833 kVA (D) 0.5 kVA。

## 自我評量

- ( )8. 一額定為 220 V/110 V、60 Hz 的單相變壓器，若高壓側輸入電壓 220 V、120 Hz 的電源，且在低壓側無負載的狀況下，下列有關此單相變壓器的敘述，何者正確？
- (A) 低壓側電壓為 110 V                      (B) 低壓側電壓降低為 55 V  
(C) 低壓側電壓增加為 220 V                (D) 鐵心可能磁飽和。
- ( )9. 有一部 50 kVA 變壓器，當輸出 40 kVA 時，測得銅損為 800 W，則滿載銅損為？
- (A) 800 W   (B) 1000 W   (C) 1250 W   (D) 1600 W。
- ( )10. 變壓器的鐵損
- (A) 與磁通成正比                              (B) 與外加電壓成正比  
(C) 與外加電壓平方成正比                (D) 與負載成正比。
- ( )11. 某變壓器接 220 V、60 Hz 之電源時，渦流損為 10 W、磁滯損為 40 W，若改接成 110 V、50 Hz 之電源時，渦流損與磁滯損分別為
- (A) 10 W、40 W                                (B) 6 W、20 W  
(C) 5 W、10 W                                 (D) 2.5 W、12 W。
- ( )12. 變壓器之電壓與負載不變下，當頻率降低，下列敘述何者正確？
- (A) 鐵損增加   (B) 鐵損減少   (C) 銅損增加   (D) 銅損減少。
- ( )13. 一 10 kVA 變壓器，其滿載銅損為 400 W，鐵損為 100 W，若在一日運轉中，12 小時為滿載，功率因數為 1，12 小時為無載，則全日效率約為多少？
- (A) 86.3 %   (B) 90.3 %   (C) 94.3 %   (D) 98.3 %。
- ( )14. 一般電力變壓器在最高效率運轉時，其條件為何？
- (A) 銅損等於鐵損                              (B) 銅損大於鐵損  
(C) 銅損小於鐵損                              (D) 效率與銅損及鐵損無關。
- ( )15. 有一部 2000 V / 100 V、500 kVA 之單相變壓器，滿載時銅損為 5 kW，鐵損為 3.2 kW，則效率最大時之負載為多少？
- (A) 300 kVA   (B) 350 kVA   (C) 400 kVA   (D) 450 kVA。

## 自我評量

- ( )16. 有一部 10 kVA 變壓器，已知滿載銅損為 250 W，鐵損為 160 W，負載功率因數為 80%，求變壓器最大效率為何？  
(A) 92.6% (B) 94.2% (C) 95.2% (D) 96.4%。
- ( )17. 一額定為 90 kVA 的變壓器，負載功率因數為 0.8。在 3/4 載時，可獲得最大效率為 96%，請問此機滿載時之銅損為何？  
(A) 1125 W (B) 2000 W (C) 2560 W (D) 3440 W。
- ( )18. 有一部單相變壓器最大效率發生在 80% 滿載時，則半載時變壓器之鐵損與銅損之比值約為何？  
(A) 2.56 (B) 3.21 (C) 4.12 (D) 5.14。
- ( )19. 有一部 10 kVA，2400 V / 240 V 變壓器，滿載時一次側、二次側電壓分別為 2440 V 及 240 V，則其電壓調整率為何？  
(A) 1.05% (B) 1.67% (C) 2.5% (D) 3.66%
- ( )20. 有一 10 kVA 變壓器，在負載功因為 1 時，測得滿載時銅損為 200 W，則滿載時變壓器電壓調整率為  
(A) 2% (B) 2.2% (C) 2.4% (D) 2.6%。
- 14-4** ( )21. 有一部 10 MVA 單相變壓器，其初級額定電壓為 80 kV，標么電抗為 0.2 P.U.，求電抗實際值應為何？  
(A) 128  $\Omega$  (B) 256  $\Omega$  (C) 512  $\Omega$  (D) 640  $\Omega$ 。
- ( )22. 有一部 1000 kVA 變壓器，若其電阻標么值為 0.006 P.U.，電抗標么值為 0.008 P.U.，則其阻抗標么值為  
(A) 0.01 P.U. (B) 0.014 P.U. (C) 0.02 P.U. (D) 0.048 P.U.。

## 二、計算題

1. 有一 5 kVA、60 Hz、3000 V / 200 V 的變壓器，換算於二次的電阻為  $0.14 \Omega$ ，電抗為  $0.16 \Omega$ ，負載為電感性，則：
  - (1) 二次側額定電流為何？
  - (2) 百分比電阻壓降  $p$  為何？
  - (3) 百分比電抗壓降  $q$  為何？
  - (4) 滿載且功率因數為 0.8 落後時，電壓調整率為何？
  - (5) 半載且功率因數為 0.6 超前時，電壓調整率為何？
  
2. 有一台 20 kVA、2400 V / 240 V、60 Hz 單相變壓器，鐵損為 75 W，滿載銅損為 300 W，則變壓器的：
  - (1) 滿載且功率因數為 1 時，效率為何？
  - (2) 半載且功率因數為 0.8 落後時，效率為何？
  - (3) 功率因數為 1 時，最大效率為何？
  - (4) 一日運轉中，功率因數 0.8，10 小時為滿載，6 小時為半載，其餘時間無載，則全日效率為何？



# CHAPTER 15

## 變壓器之連結

### » 本章重點

變壓器的功能是将交流電壓升高或降低。用戶可以依據需要，將多部變壓器進行外部連結，就可以進行三相交流電源的升降或是相互並聯以提升供電能力。本章將針對變壓器連結前的注意事項、各種連結方式與特性做詳細說明。

### 15-1 變壓器之極性

#### (一) 極性之定義

變壓器屬於交流設備，由於交流電源並沒有固定極性，因此變壓器的極性是指兩繞組在某一瞬間電壓相位的關係，變壓器的極性可分為：

##### ■ 1. 減極性

將圖 15-1(a) 左側繞組外加交流電源於正半波期間 ( $A+$ 、 $B-$ )，電流由  $A$  端流入，依據右螺旋定則，左側繞組產生逆時針方向磁通經過鐵心至右側繞組，依據法拉第冷次定律，右側繞組感應產生電壓  $E$ ，其電流方向依據右螺旋定則可知由  $a$  端流出，可得右側繞組感應產生正半波 ( $a+$ 、 $b-$ )，將左、右兩繞組相鄰兩點 ( $B$  與  $b$ ) 連接，剩餘兩端點之電壓為兩繞組電壓之差 ( $V_{Aa} = V_{AB} - V_{ab}$ )，因此稱為減極性變壓器。依 CNS 規定我國之變壓器須為減極性。圖 15-1(b) 為減極性外鐵式的表示方式。

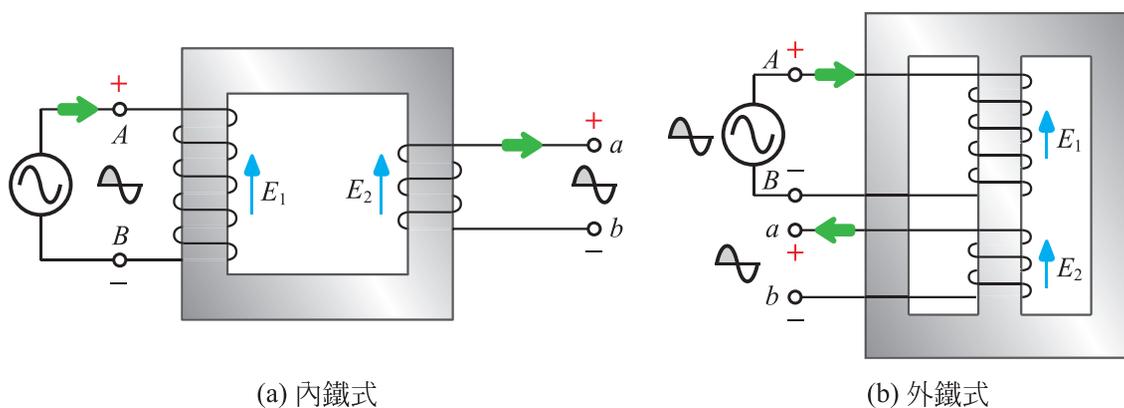


圖 15-1 減極性變壓器

## 2. 加極性

將圖 15-2(a) 左側繞組外加交流電源於正半波期間 ( $A+$ 、 $B-$ )，右側繞組感應產生負半波 ( $a-$ 、 $b+$ )，將相鄰兩點 ( $B$  與  $b$ ) 連接，剩餘兩端點之電壓為兩繞組電壓之和 ( $V_{Aa} = V_{AB} + V_{ab}$ )，就稱為加極性變壓器。

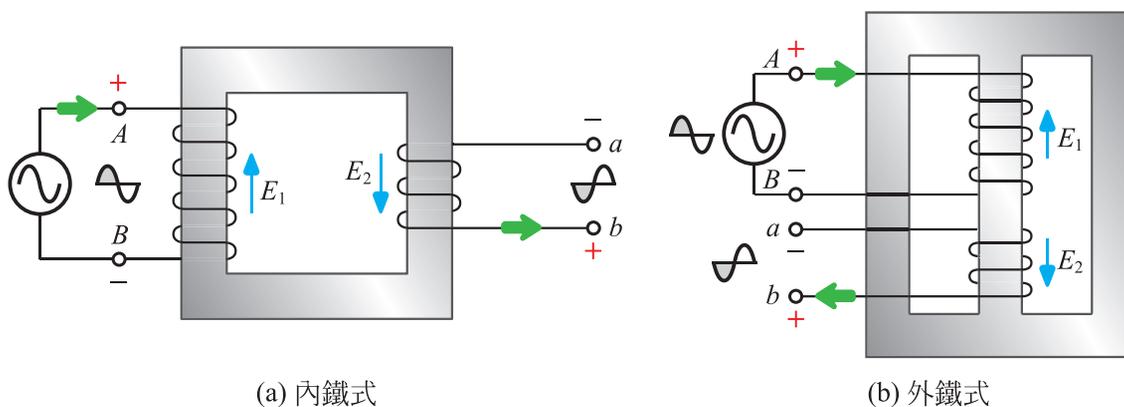


圖 15-2 加極性變壓器

變壓器單獨使用時不需要考慮極性，但若是將兩部以上變壓器連結時就必須留意極性，結線錯誤可能會導致變壓器燒毀。

## (二) 極性之標示

變壓器繞製完成後，爲了方便用戶辨識，一般使用點法則 (dot convention) 說明繞組間的電壓與電流關係，如圖 15-3(a) 所示，其原則爲：

1. 高壓側繞組有「•」的電壓相對爲正，則低壓側有「•」的線圈端也爲正電壓，換言之說，有打點的線圈端有相同的極性。
2. 高壓側繞組電流從「•」的線圈端流入，則低壓側電流從「•」的線圈端流出。

除了利用「•」方式標示外，各國也有不同標示方式，如圖 15-3 所示。

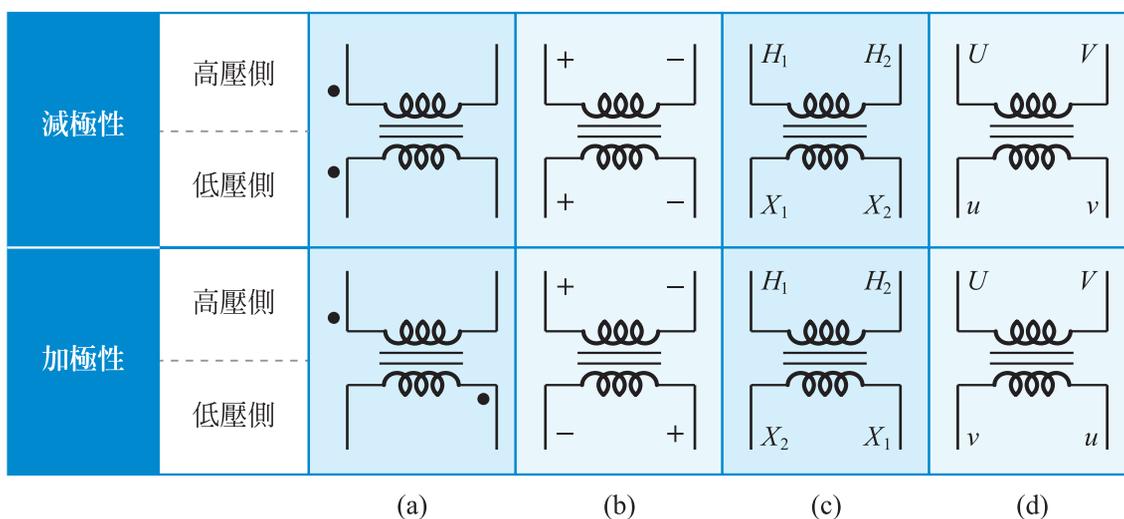
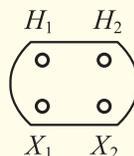


圖 15-3 變壓器極性標示方法

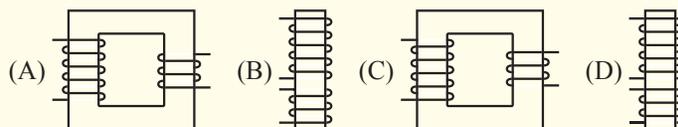
### 隨堂練習

( ) 1. 如右圖所示變壓器極性為

- (A) 加極性 (B) 減極性 (C) 雙極性  
(D) 無極性。



( ) 2. 下列何者為減極性變壓器接法？



### (三) 變壓器極性試驗

變壓器要進行連接時，必須先確認極性，常用的極性試驗有下列三種：

#### 1. 直流電壓表法

又稱為感應法。如圖 15-4 所示，將乾電池及直流電壓表之 (+) 端子，各接於變壓器高低壓繞組之對應端子，當開關  $S$  閉合之瞬間，利用電壓表之偏轉方向判斷極性：

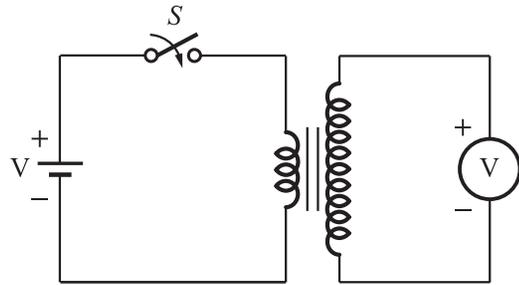


圖 15-4 直流電壓表法接線圖

1. 電壓表瞬間指示為正方向，馬上又回到 0 的位置，則為減極性。
2. 電壓表瞬間指示為負方向，馬上又回到 0 的位置，則為加極性。

#### 2. 交流電壓表法

又稱為加減法。如圖 15-5 所示，將變壓器高低壓繞組之對應端子以導線連接。於高壓側加入交流電源後，分別量測電壓值，再利用  $V_3$  電壓值判斷極性：

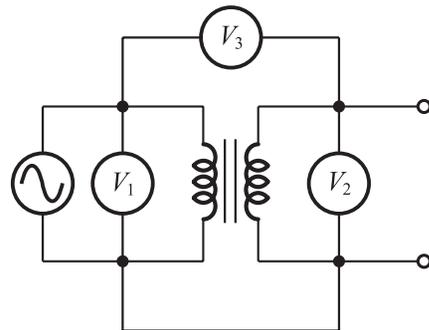


圖 15-5 交流電壓表法接線圖

1. 若  $V_3 = V_1 - V_2$ ，則變壓器為減極性。
2. 若  $V_3 = V_1 + V_2$ ，則變壓器為加極性。

#### 3. 比較法

若有一已知極性之標準變壓器，其匝數比與待側變壓器相近，可用比較法測定極性。如圖 15-6 所示接線後，外加電壓  $V$ ，利用低壓側電壓表之讀值判斷待側變壓器的極性：

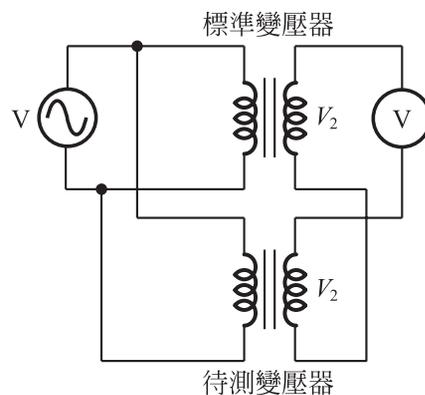
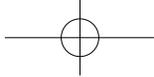


圖 15-6 比較法接線圖



- (1) 電壓表之讀值等於兩低壓側繞組之感應電壓差，則兩變壓器之極性相同。  
 (2) 電壓表之讀值等於兩低壓側繞組之感應電壓和，則兩變壓器之極性相反。

### 隨堂練習

( ) 1. 如圖 (1) 所示為一部減極性降壓變壓器，下列敘述何者正確？

- (A) 開關  $S$  閉合瞬間電壓表正偏轉  
 (B) 開關  $S$  閉合瞬間電壓表負偏轉  
 (C) 開關  $S$  閉合瞬間電壓表不會偏轉  
 (D) 開關  $S$  閉合後再打開瞬間電壓表負偏轉。

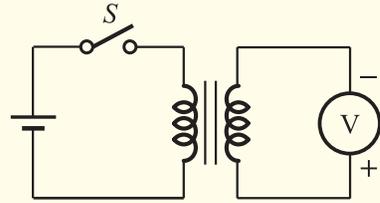


圖 (1)

( ) 2. 如圖 (2) 所示為一部加極性降壓變壓器，將高壓側外加交流電源，各電壓表之讀值敘述，下列何者錯誤？

- (A)  $V_1 > V_2$   
 (B)  $V_3 > V_1$   
 (C)  $V_3 > V_2$   
 (D)  $V_1 + V_2 > V_3$ 。

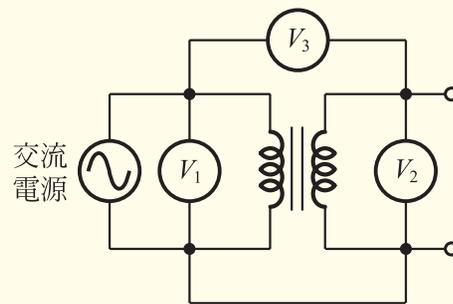
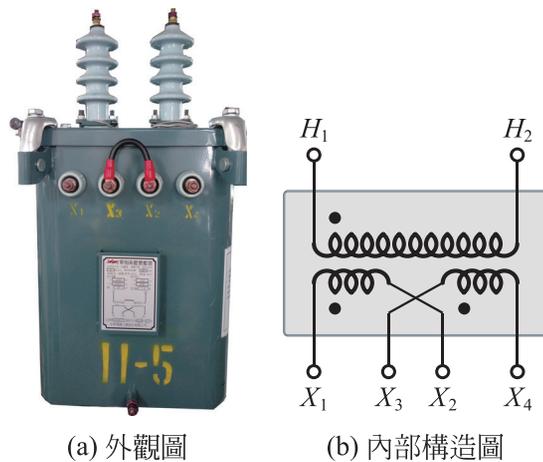


圖 (2)

## 15-2 變壓器的單相連結

圖 15-7 為台灣電力公司採用之 11.4 kV/110 ~ 220 V、5 kVA 桿上變壓器外觀與內部構造圖，將高壓側 ( $H_1 - H_2$ ) 接上配電線路的 11.4 kV 電源後，兩組低壓側繞組 ( $X_1 - X_2$ 、 $X_3 - X_4$ ) 分別感應產生 110 V 電壓。



(a) 外觀圖 (b) 內部構造圖

圖 15-7 桿上變壓器外觀與構造

(圖片來源：聯成電機)

圖 15-8(a) 中將兩組低壓側並聯後引出兩條線，則  $V_{AN} = 110 \text{ V}$ ，稱為單相兩線式 110 V。如圖 15-8(b) 則是將兩組低壓側串聯後引出兩條線，則  $V_{AN} = 220 \text{ V}$ ，稱為單相兩線式 220 V。至於圖 15-8(c) 是將二組低壓側串聯後，再將連接處中性線 ( $N$ ) 引出，則  $V_{AN} = 110 \text{ V}$ 、 $V_{BN} = 110 \text{ V}$ 、 $V_{AB} = 220 \text{ V}$ ，這種利用三條線可以提供 110 V 及 220 V 兩種電壓的形式，稱為單相三線式 (1 $\phi$ 3 W)，是目前家庭用電的主要供應方式。

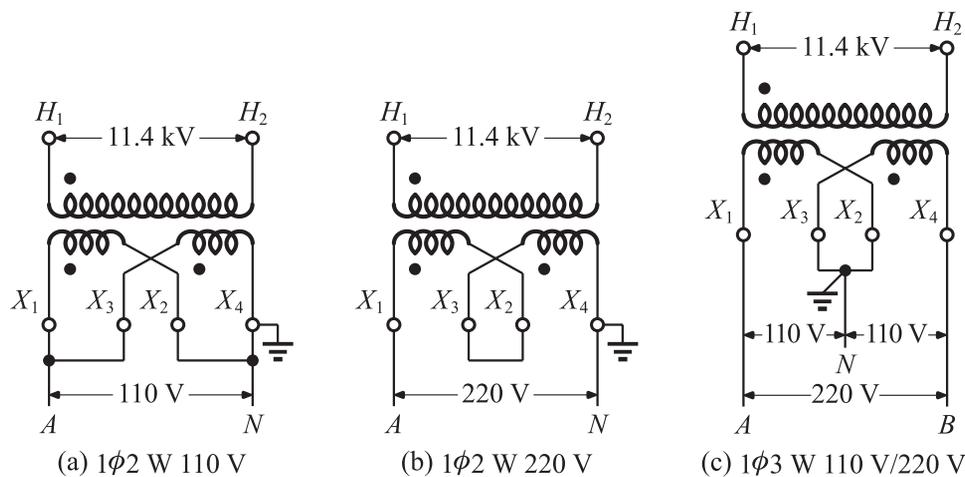


圖 15-8 變壓器的單相連結

### 隨堂練習

- ( ) 1. 單相三線制 110 V / 220 V 系統，A 相、B 相與中線  $N$ ，其電壓關係式下列何者錯誤？  
 (A)  $V_{AB} = 2V_{AN}$  (B)  $V_{AN} = V_{BN}$  (C)  $V_{AB} = 2V_{BN}$  (D)  $V_{AN} + V_{BN} = 330 \text{ V}$ 。

## 15-3 變壓器的三相連結

### (一) 三相連接觀念

三相連接主要分為星形 (Y) 連接與三角形 ( $\Delta$ ) 連接兩種，其中：

#### 1. 三相 Y 連接

接線方式如圖 15-9，將三組繞組間同極性的頭或尾端接在一起稱為中性點



(N)，另一端分別引接出來(A、B、C)。正相序三相Y連接特點為：

- (1) 線電流 = 相電流 ( $I_L = I_p$ )。
- (2) 線電壓 =  $\sqrt{3}$  相電壓，線電壓相位超前相電壓  $30^\circ$  ( $V_L = \sqrt{3}V_p \angle 30^\circ$ )。
- (3) 中性點N可以接地，可穩定各相及線對地的電位。

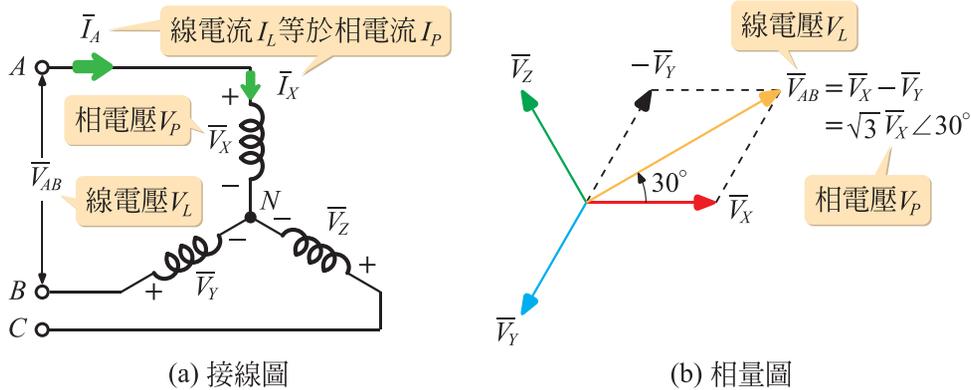


圖 15-9 三相Y連接

## 2. 三相△連接

接線方式如圖 15-10，將三組繞組彼此間的頭尾相接在一起，並將連接處引接出來(A、B、C)。正相序三相△連接特點為：

- (1) 線電壓 = 相電壓 ( $V_L = V_p$ )。
- (2) 線電流 =  $\sqrt{3}$  相電流，線電流落後相電流  $30^\circ$  ( $I_L = \sqrt{3}I_p \angle -30^\circ$ )。

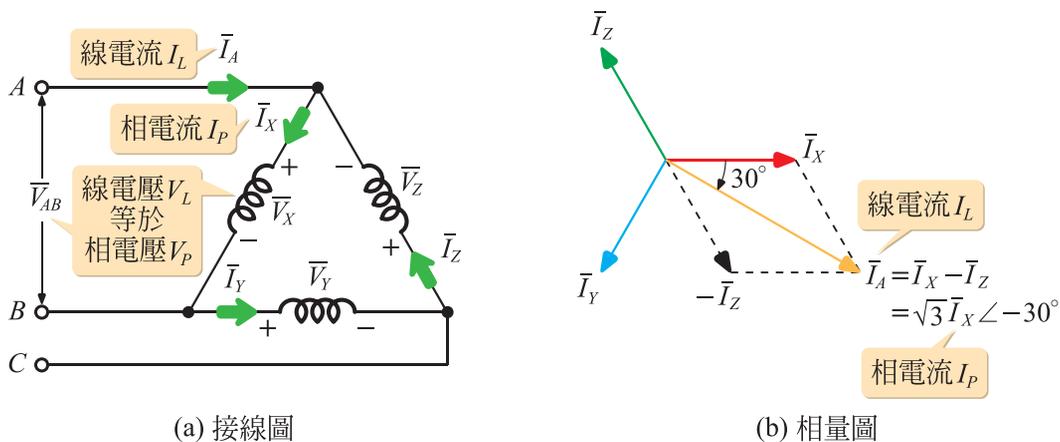
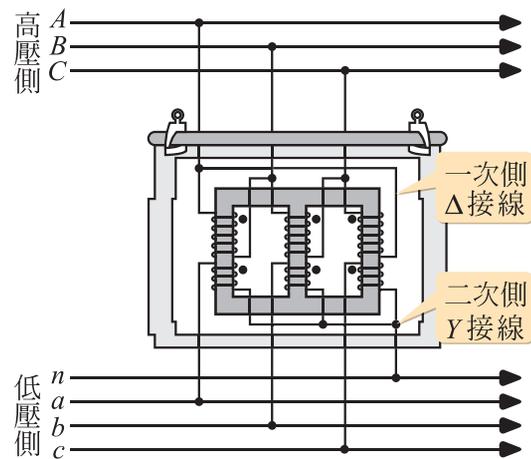


圖 15-10 三相△連接

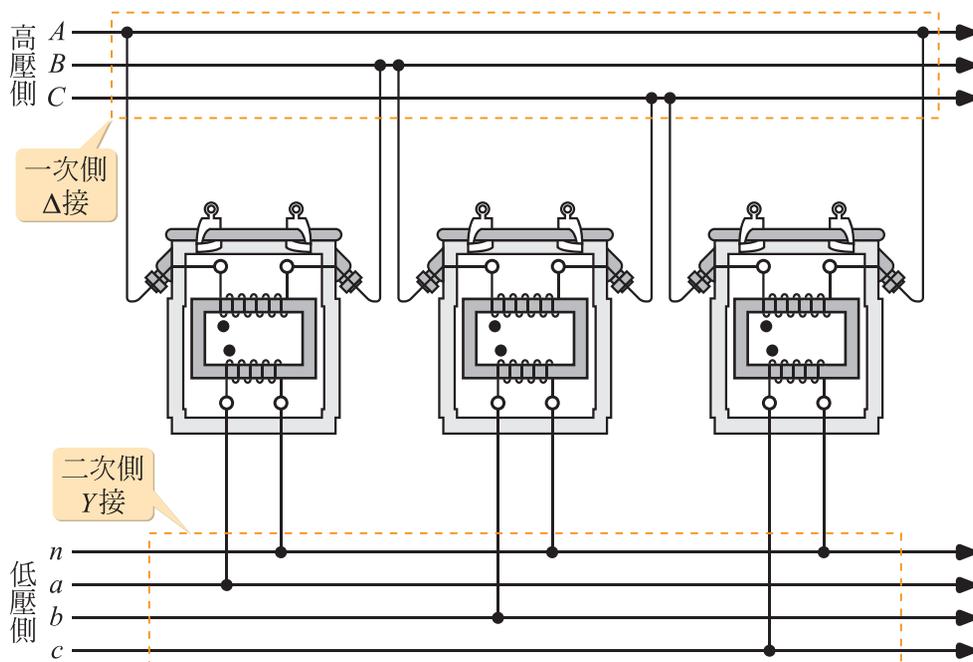
## (二) 三相電源的供應

大型電力用戶需要將三相電源降低或升高時，可以利用如圖 15-11(a) 所示以一具三相變壓器 ( 內部已連接妥當 ) 供應三相電力；或是如圖 15-11(b) 所示將三台單相變壓器在外部進行連接後，同樣可以供應三相電力。

使用一台三相變壓器供電的優點在於機器體積小、成本低；缺點則是散熱不易，且當變壓器內部故障時必須停電或是準備另一台同容量的備用變壓器供電。使用三台單相變壓器供電時，當有一台變壓器故障，只要更換該具變壓器即可，預備容量低。甚至可將線路改接，利用兩具變壓器也可以繼續供應三相電源，運用彈性佳。



(a) 一台三相變壓器供電



(b) 三台單相變壓器供電

圖 15-11 三相電源的供應方式



### 隨堂練習

- ( ) 1. 有關變壓器 Y 接線的敘述，下列何者正確？
- (A) 線電壓 = 相電壓                      (B) 相電壓 =  $\sqrt{3}$  線電壓
- (C) 線電流 = 相電流                      (D) 線電流 =  $\sqrt{3}$  相電流。
- ( ) 2. 供應三相負載時，採用單相變壓器進行三相連接與直接利用三相變壓器供電，下列何者錯誤？ (A) 可靠度高 (B) 預備容量大 (C) 散熱容易 (D) 體積大。

### (三) 單相變壓器的三相連接

將三具單相變壓器的一次側與二次側分別組合成 Y 接或是  $\Delta$  接，就可以進行三相電源的升降。倘若因故有一具變壓器故障，或是針對用電量較低的三相用戶，也可以僅用兩部單相變壓器供電。有關單相變壓器的三相連接的常用方式如圖 15-12 所示。

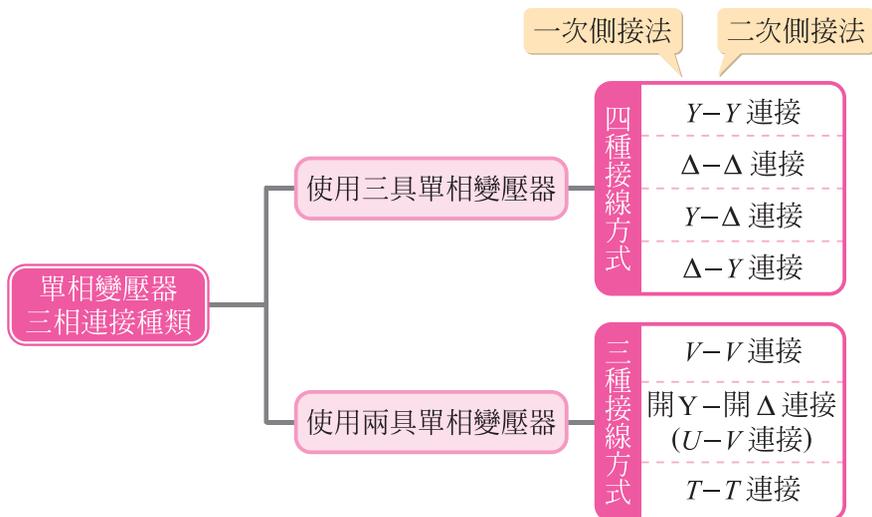


圖 15-12 單相變壓器的三相連接種類

利用多部單相變壓器作三相連接時，須要注意每一台變壓器之電壓、頻率、匝數比均相同，且極性正確。

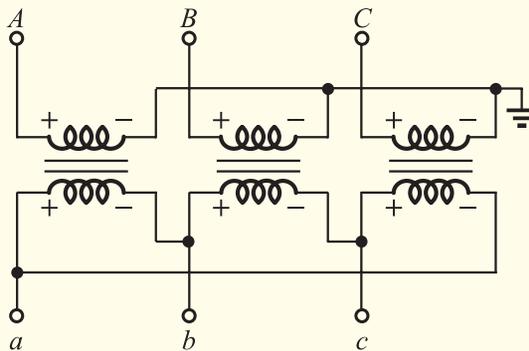
本書所介紹的三相系統皆為平衡系統，因此每部變壓器在相同之各線 (Line) 或各相 (Phase) 所量到的電壓、電流大小均相同，參考圖 15-9 及 15-10，將三相連接時所使用的代號整理成表 15-1。

表 15-1 變壓器三相連接比較表

中文	英文	內容	測量位置
一次側線電壓	$V_{L1}$	A、B、C 三條電源線，任兩條線間的電壓	$V_{AB}$ 、 $V_{BC}$ 、 $V_{CA}$
一次側相電壓	$V_{P1}$	三台變壓器任一，一次側繞組的電壓	$V_X$ 、 $V_Y$ 、 $V_Z$
二次側相電壓	$V_{P2}$	三台變壓器任一，二次側繞組的電壓	$V_x$ 、 $V_y$ 、 $V_z$
二次側線電壓	$V_{L2}$	a、b、c 三條負載線，任兩條線間的電壓	$V_{ab}$ 、 $V_{bc}$ 、 $V_{ca}$
一次側線電流	$I_{L1}$	A、B、C 三條電源線，任一條線的電流	$I_A$ 、 $I_B$ 、 $I_C$
一次側相電流	$I_{P1}$	三台變壓器任一，一次側繞組的電流	$I_X$ 、 $I_Y$ 、 $I_Z$
二次側相電流	$I_{P2}$	三台變壓器任一，二次側繞組的電流	$I_x$ 、 $I_y$ 、 $I_z$
二次側線電流	$I_{L2}$	a、b、c 三條負載線，任一條線的電流	$I_a$ 、 $I_b$ 、 $I_c$

## 隨堂練習

- ( ) 1. 將單相變壓器進行 Y- $\Delta$  接線，供應三相電源的敘述，下列何者正確？  
 (A) 採用一具單相變壓器，一次側 Y 接線，二次側  $\Delta$  接線  
 (B) 採用兩具單相變壓器，一具為 Y 接線，另一具  $\Delta$  接線  
 (C) 採用兩具單相變壓器，一次側 Y 接線，二次側  $\Delta$  接線  
 (D) 採用三具單相變壓器，一次側 Y 接線，二次側  $\Delta$  接線。
- ( ) 2. 如下圖所示利用單相變壓器進行三相連接，為哪種接線方式？  
 (A) Y-Y 接線 (B)  $\Delta$ - $\Delta$  接線 (C) Y- $\Delta$  接線 (D)  $\Delta$ -Y 接線。



- ( ) 3. 同上題，有關電壓與電流的特性，下列何者錯誤？  
 (A)  $V_{L1} = \sqrt{3}V_{P1}$  (B)  $I_{L1} = \sqrt{3}I_{P1}$  (C)  $V_{L2} = V_{P2}$  (D)  $I_{L2} = \sqrt{3}I_{P2}$ 。



## 1. Y-Y 接線

### (1) Y-Y 接線方式

將三台單相變壓器的一次側採用 Y 接線後與電源線連接、二次側也採用 Y 接線後與負載連接，接線方式、電壓與電流方向及相量關係如圖 15-13 所示。

### (2) Y-Y 接線特性

#### a. 一次側採用 Y 接線

一次側線電壓等於  $\sqrt{3}$  相電壓 ( $V_{L1} = \sqrt{3}V_{P1}$ )，

一次側線電流等於相電流 ( $I_{L1} = I_{P1}$ )，

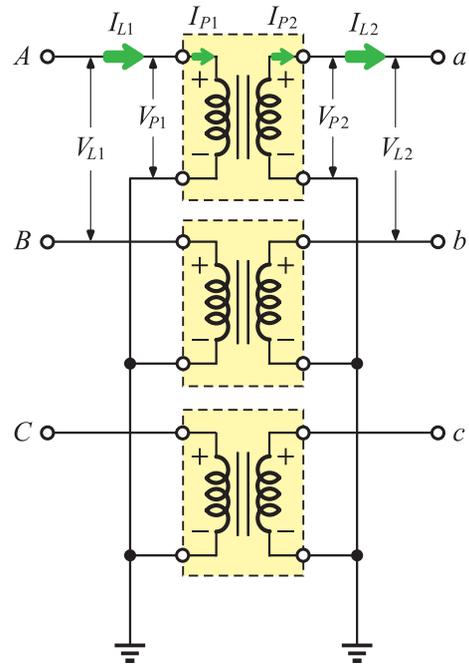
一次側線電壓超前相電壓  $30^\circ$ 。

#### b. 二次側採用 Y 接線

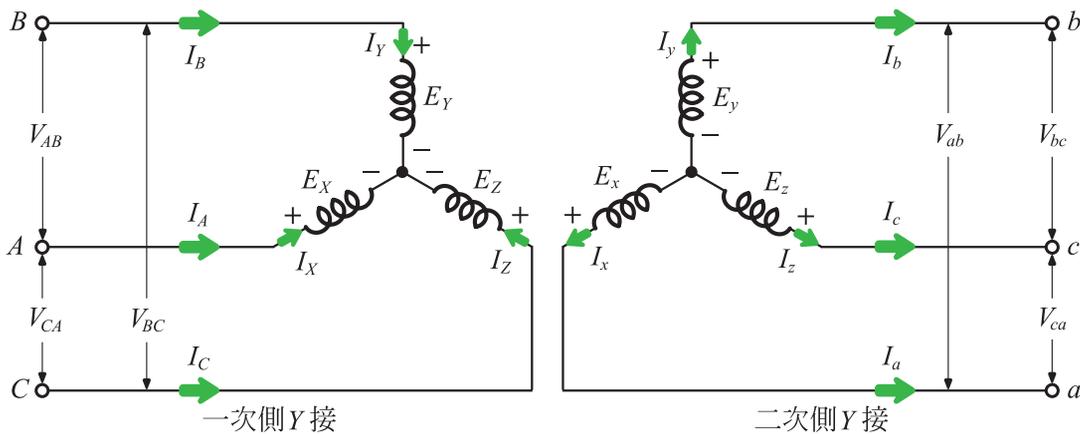
二次側線電壓等於  $\sqrt{3}$  相電壓 ( $V_{L2} = \sqrt{3}V_{P2}$ )，

二次側線電流等於相電流 ( $I_{L2} = I_{P2}$ )，

二次側線電壓超前相電壓  $30^\circ$ 。



(a) 接線圖



(b) 電壓、電流方向圖

圖 15-13 變壓器的 Y-Y 連接

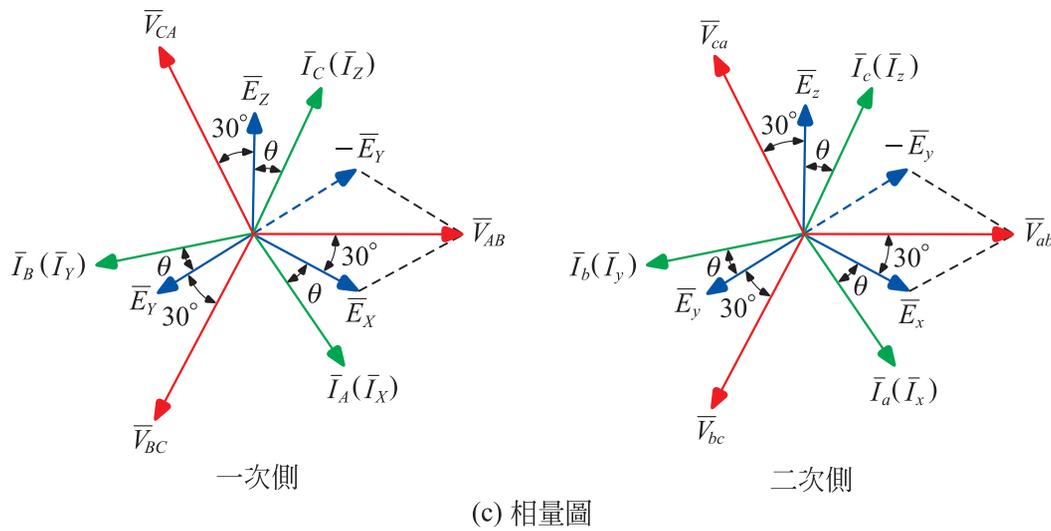


圖 15-13 變壓器的 Y-Y 連接 (續)

- c. 圖 15-13(c) 相量圖中，二次側 Y 接線，線電流等於相電流 ( $I_a = I_x$ )，倘若負載功率因數為  $\cos\theta$  時，二次側相電流 ( $I_x$ ) 落後二次側相電壓 ( $E_x$ ) 角度為  $\theta$  度，換言之二次側線電壓 ( $V_{ab}$ ) 超前二次側線電流 ( $I_a$ ) 角度為  $30^\circ + \theta$ 。同理，一次側線電壓 ( $V_{AB}$ ) 也會超前一次側線電流 ( $I_A$ ) 角度為  $30^\circ + \theta$ 。
- d. Y-Y 接線的二次側線電壓 ( $V_{ab}$ ) 與一次側線電壓 ( $V_{AB}$ ) 同相，位移角為  $0^\circ$ 。
- e. Y-Y 接線的一、二次側有中性點可接地，可穩定對地之電壓。
- f. 三相平衡電力系統中，若功率因數為  $\cos\theta$ ，負載總功率 ( $P_T$ ) 由三台變壓器共同分擔，即  $P_T = 3V_p I_p \cos\theta = \sqrt{3}V_L I_L \cos\theta$ 。
- g. Y-Y 接線當三相不平衡時會產生三次諧波，造成電壓波形畸變，此時可以在二次側加裝第三組繞組並將其接成  $\Delta$  接，以 Y-Y- $\Delta$  接法來避免諧波。

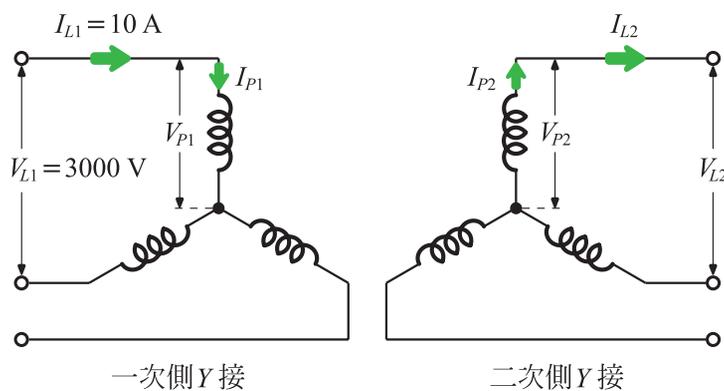
範例

01

有三台匝數比為 30 : 1 之單相理想變壓器，採 Y-Y 接線，供應功率因數為 0.8 落後之三相負載，滿載時測得一次側線電壓為 3000 V，一次側線電流為 10 A，求：(1)  $V_{P1}$  (2)  $V_{P2}$  (3)  $V_{L2}$  (4)  $I_{P1}$  (5)  $I_{P2}$  (6)  $I_{L2}$  (7) 負載總功率 (8) 每台變壓器分擔功率 (9) 每台變壓器額定容量分別為何？

解 依據題意將三台變壓器 Y-Y 接線圖簡化如下，

其中每台單相變壓器匝數比  $a = 30 \left( = \frac{V_{P1}}{V_{P2}} = \frac{I_{P2}}{I_{P1}} \right)$



1. 電壓部分：已知一次側線電壓  $V_{L1} = 3000$  V，因此：

(1) 一次側相電壓  $V_{P1} = \frac{V_{L1}}{\sqrt{3}} = \frac{3000}{\sqrt{3}} = 1000\sqrt{3}$  V  $\doteq 1732$  V

(2) 二次側相電壓  $V_{P2} = \frac{V_{P1}}{a} = \frac{1000\sqrt{3}}{30} \doteq 57.7$  V

(3) 二次側線電壓  $V_{L2} = \sqrt{3}V_{P2} = \sqrt{3} \times \frac{100}{\sqrt{3}} = 100$  V

2. 電流部分：已知一次側線電流  $I_{L1} = 10$  A，因此：

(4) 一次側相電流  $I_{P1} = I_{L1} = 10$  A

(5) 二次側相電流  $I_{P2} = aI_{P1} = 30 \times 10 = 300$  A

(6) 二次側線電流  $I_{L2} = I_{P2} = 300$  A

3. 功率部分

(7) 負載總功率  $P_T = \sqrt{3}V_{L2}I_{L2} \cos\theta = \sqrt{3} \times 100 \times 300 \times 0.8 = 24\sqrt{3}$  kW

(8) 每台變壓器分擔功率  $P_{1\phi} = \frac{P_T}{3} = 8\sqrt{3}$  kW

(9) 每台變壓器額定功率  $S_{1\phi} = \frac{P_{1\phi}}{\cos\theta} = \frac{8\sqrt{3} \text{ kW}}{0.8} = 10\sqrt{3}$  kVA

## 2. $\Delta$ - $\Delta$ 接線

### (1) $\Delta$ - $\Delta$ 接線方式

將三台單相變壓器的一次側採用 $\Delta$ 接線後與電源線連接、二次側也採用 $\Delta$ 接線後與負載連接，接線方式、電壓與電流方向及相量關係如圖 15-14 所示。

### (2) $\Delta$ - $\Delta$ 接線特性

#### a. 一次側採用 $\Delta$ 接線

一次側線電壓等於相電壓 ( $V_{L1} = V_{P1}$ )，

一次側線電流等於 $\sqrt{3}$ 相電流 ( $I_{L1} = \sqrt{3}I_{P1}$ )，

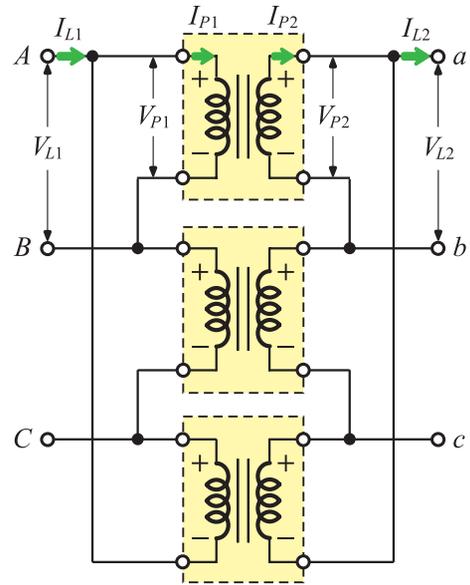
一次側線電流落後相電流  $30^\circ$ 。

#### b. 二次側採用 $\Delta$ 接線

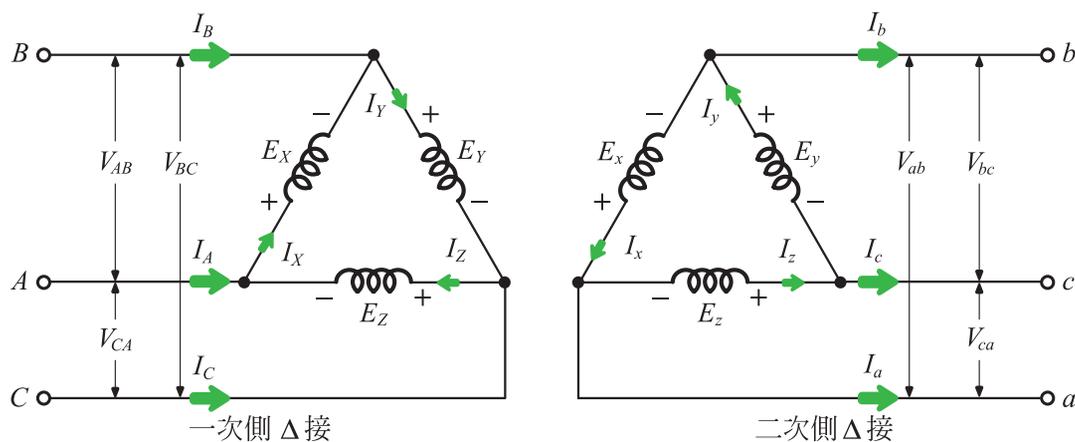
二次側線電壓等於相電壓 ( $V_{L2} = V_{P2}$ )，

二次側線電流等於 $\sqrt{3}$ 相電流 ( $I_{L2} = \sqrt{3}I_{P2}$ )，

二次側線電流落後相電流  $30^\circ$ 。

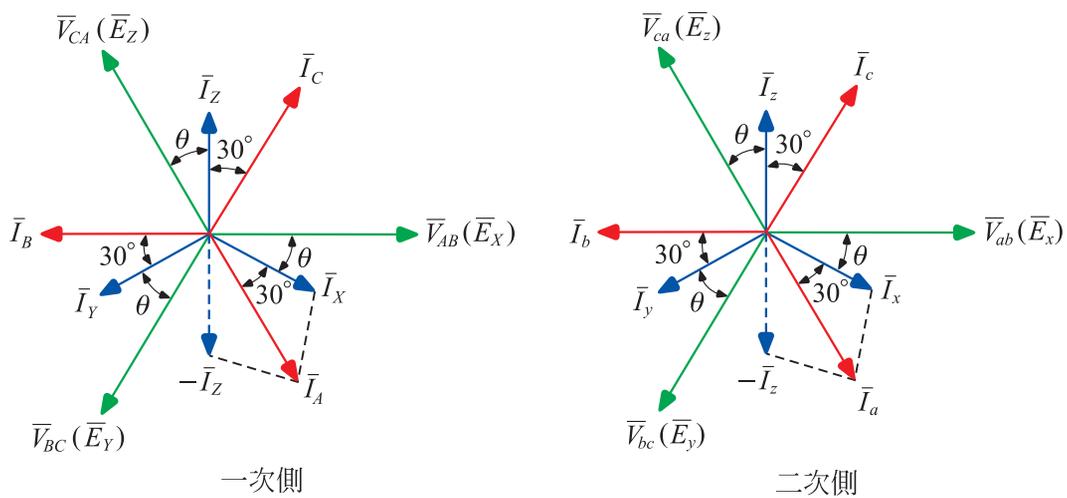


(a) 接線圖



(b) 電壓、電流方向圖

圖 15-14 變壓器的 $\Delta$ - $\Delta$ 連接



(c) 相量圖

圖 15-14 變壓器的 $\Delta - \Delta$ 連接 (續)

- c. 圖 15-14(c) 相量圖中，二次側 $\Delta$ 接線，二次側線電流 ( $I_a$ ) 落後二次側相電流 ( $I_x$ ) 為  $30^\circ$ ，倘若負載功率因數為  $\cos\theta$  時，二次側相電流 ( $I_x$ ) 落後二次側相電壓 ( $E_x$ ) 角度為  $\theta$  度，換言之二次側線電壓 ( $V_{ab}$ ) 超前二次側線電流 ( $I_a$ ) 角度為  $30^\circ + \theta$ 。同理，一次側線電壓 ( $V_{AB}$ ) 也會超前一次側線電流 ( $I_A$ ) 角度為  $30^\circ + \theta$ 。
- d.  $\Delta - \Delta$ 接線的二次側線電壓 ( $V_{ab}$ ) 與一次側線電壓 ( $V_{AB}$ ) 同相，位移角為  $0^\circ$ 。
- e.  $\Delta - \Delta$ 接線諧波有封閉迴路可以流動，電壓波形不會畸變。
- f.  $\Delta - \Delta$ 連接的優點是，當一具變壓器故障時，其他二具可改成 V-V 連接繼續供電。
- g. 三相平衡電力系統中，若功率因數為  $\cos\theta$ ，負載總功率 ( $P_T$ ) 由三台變壓器共同分擔，即  $P_T = 3V_p I_p \cos\theta = \sqrt{3}V_L I_L \cos\theta$ 。

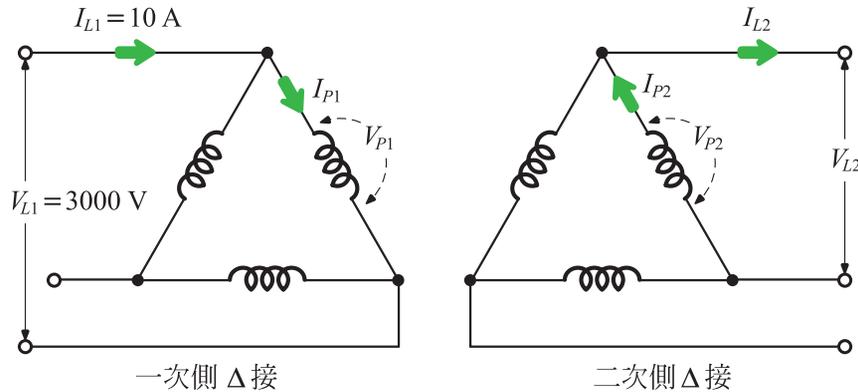
## 範例

## 02

有三台匝數比為 30 : 1 之單相理想變壓器，採  $\Delta - \Delta$  接線，供應功率因數為 0.8 落後之三相平衡負載，滿載時測得一次側線電壓為 3000 V，一次側線電流為 10 A，求：(1)  $V_{P1}$  (2)  $V_{P2}$  (3)  $V_{L2}$  (4)  $I_{P1}$  (5)  $I_{P2}$  (6)  $I_{L2}$  (7) 負載總功率 (8) 每台變壓器分擔功率 (9) 每台變壓器額定容量分別為何？

解 依據題意將三台變壓器  $\Delta - \Delta$  接線圖簡化如下，

$$\text{其中每台單相變壓器匝數比 } a = 30 \left( = \frac{V_{P1}}{V_{P2}} = \frac{I_{P2}}{I_{P1}} \right)$$



- 電壓部分：已知一次側線電壓  $V_{L1} = 3000 \text{ V}$ ，因此：
  - 一次側相電壓  $V_{P1} = V_{L1} = 3000 \text{ V}$
  - 二次側相電壓  $V_{P2} = \frac{V_{P1}}{a} = \frac{3000 \text{ V}}{30} = 100 \text{ V}$
  - 二次側線電壓  $V_{L2} = V_{P2} = 100 \text{ V}$
- 電流部分：已知一次側線電流  $I_{L1} = 10 \text{ A}$ ，因此：
  - 一次側相電流  $I_{P1} = \frac{I_{L1}}{\sqrt{3}} = \frac{10}{\sqrt{3}} \text{ A} \doteq 5.77 \text{ A}$
  - 二次側相電流  $I_{P2} = aI_{P1} = \frac{300}{\sqrt{3}} \text{ A} \doteq 173.2 \text{ A}$
  - 二次側線電流  $I_{L2} = \sqrt{3}I_{P2} = \sqrt{3} \times \frac{300}{\sqrt{3}} = 300 \text{ A}$
- 功率部分
  - 負載總功率  $P_T = \sqrt{3}V_{L2}I_{L2} \cos \theta = \sqrt{3} \times 100 \times 300 \times 0.8 = 24\sqrt{3} \text{ kW}$
  - 每台變壓器分擔功率  $P_{1\phi} = \frac{P_T}{3} = 8\sqrt{3} \text{ kW}$
  - 每台變壓器額定功率  $S_{1\phi} = \frac{P_{1\phi}}{\cos \theta} = \frac{8\sqrt{3} \text{ kW}}{0.8} = 10\sqrt{3} \text{ kVA}$



### 3.Y-△接線

(1) 如圖 15-15 為 Y - △接線方式、電壓與電流方向及相量關係。Y-△接線特性包含：

a. 一次側採用 Y 接線

一次側線電壓等於 $\sqrt{3}$ 相電壓( $V_{L1} = \sqrt{3}V_{P1}$ )，

一次側線電流等於相電流( $I_{L1} = I_{P1}$ )，

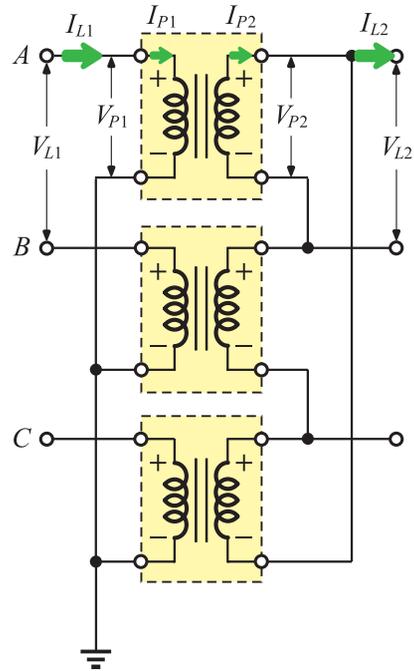
一次側線電壓超前相電壓 $30^\circ$ 。

b. 二次側採用△接線

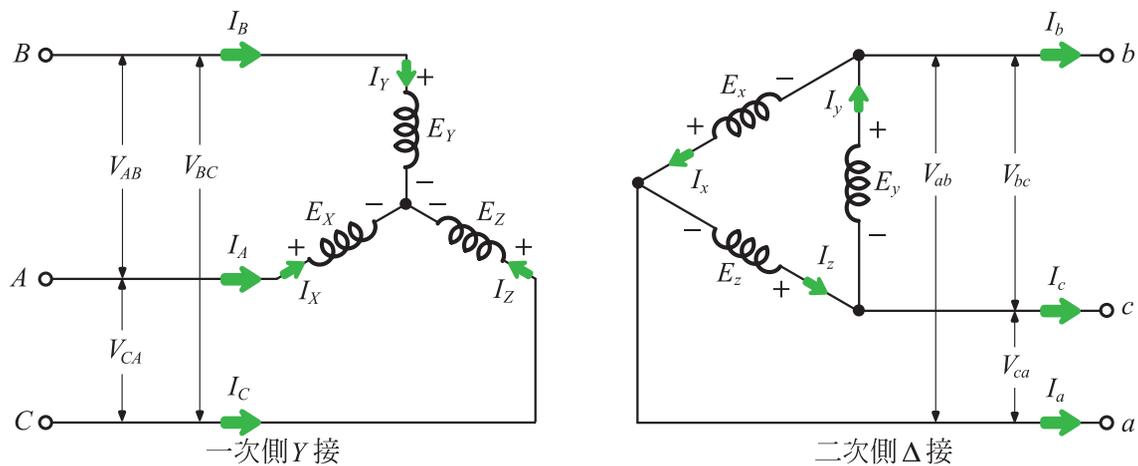
二次側線電壓等於相電壓( $V_{L2} = V_{P2}$ )，

二次側線電流等於 $\sqrt{3}$ 相電流( $I_{L2} = \sqrt{3}I_{P2}$ )，

二次側線電流落後相電流 $30^\circ$ 。

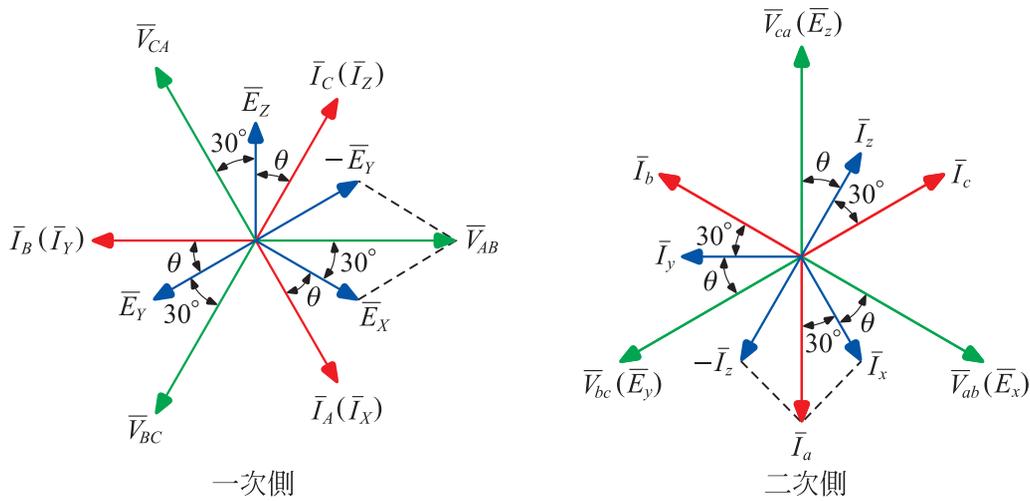


(a) 接線圖



(b) 電壓、電流方向圖

圖 15-15 變壓器的 Y-△連接



(c) 相量圖

圖 15-15 變壓器的 Y-Δ 連接 (續)

- (2) 圖 15-15(c) 相量圖中，二次側  $\Delta$  接線，二次側線電壓等於相電壓 ( $V_{ab} = E_x$ )，倘若負載功率因數為  $\cos\theta$  時，二次側相電流 ( $I_x$ ) 落後二次側相電壓 ( $E_x$ ) 角度為  $\theta$  度，二次側線電流 ( $I_a$ ) 落後二次側相電流 ( $I_x$ ) 為  $30^\circ$ ，因此二次側線電壓 ( $V_{ab}$ ) 超前二次側線電流 ( $I_a$ ) 角度為  $30^\circ + \theta$ 。至於一次側 Y 接線，一次側線電壓 ( $V_{AB}$ ) 同樣超前一次側線電流 ( $I_A$ ) 角度為  $30^\circ + \theta$ 。
- (3) Y- $\Delta$  接線的二次側線電壓 ( $V_{ab}$ ) 相位落後一次側線電壓 ( $V_{AB}$ ) 為  $30^\circ$ ，位移角為  $30^\circ$ 。
- (4) 一次側 Y 接線有中性點可以接地，穩定電壓；二次側  $\Delta$  接線可以避免諧波造成波形畸變。
- (5) 變壓器採用 Y- $\Delta$  接降壓效果較其他接法佳，因此常用二次變電所或是配電變壓器等降壓場所使用。
- (6) Y- $\Delta$  接線用在三相四線系統中，有一台變壓器故障時，其他二具可改成 U-V 接線繼續供電。
- (7) 三相平衡電力系統中，若功率因數為  $\cos\theta$ ，負載總功率 ( $P_T$ ) 由三台變壓器共同分擔，即  $P_T = 3V_p I_p \cos\theta = \sqrt{3}V_L I_L \cos\theta$

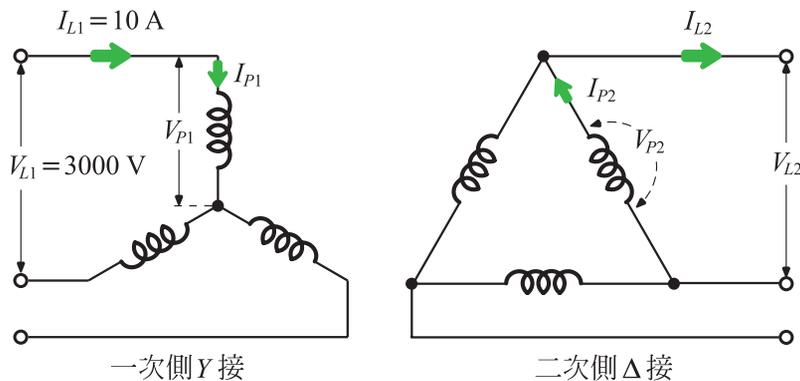
範例

03

有三台匝數比為 30 : 1 之單相理想變壓器，採 Y- $\Delta$  接線，供應功率因數為 0.8 落後之三相平衡負載，滿載時測得一次側線電壓為 3000 V，一次側線電流為 10 A，求：(1)  $V_{P1}$  (2)  $V_{P2}$  (3)  $V_{L2}$  (4)  $I_{P1}$  (5)  $I_{P2}$  (6)  $I_{L2}$  (7) 負載總功率 (8) 每台變壓器分擔功率 (9) 每台變壓器額定容量分別為何？

解 依據題意將三台變壓器 Y- $\Delta$  接線圖簡化如下，

$$\text{其中每台單相變壓器匝數比 } a = 30 \left( = \frac{V_{P1}}{V_{P2}} = \frac{I_{P2}}{I_{P1}} \right)$$



1. 電壓部分：已知一次側線電壓  $V_{L1} = 3000 \text{ V}$ ，因此：

(1) 一次側相電壓  $V_{P1} = \frac{V_{L1}}{\sqrt{3}} = \frac{3000}{\sqrt{3}} = 1000\sqrt{3} \text{ V} \doteq 1732 \text{ V}$

(2) 二次側相電壓  $V_{P2} = \frac{V_{P1}}{a} = \frac{1000\sqrt{3}}{30} = \frac{100}{\sqrt{3}} \text{ V} \doteq 57.7 \text{ V}$

(3) 二次側線電壓  $V_{L2} = V_{P2} \doteq 57.7 \text{ V}$

2. 電流部分：已知一次側線電流  $I_{L1} = 10 \text{ A}$ ，因此：

(4) 一次側相電流  $I_{P1} = I_{L1} = 10 \text{ A}$

(5) 二次側相電流  $I_{P2} = aI_{P1} = 30 \times 10 = 300 \text{ A}$

(6) 二次側線電流  $I_{L2} = \sqrt{3}I_{P2} = 300\sqrt{3} \text{ A} \doteq 519.6 \text{ A}$

3. 功率部分

(7) 負載總功率  $P_T = \sqrt{3}V_{L2}I_{L2} \cos\theta = \sqrt{3} \times \frac{100}{\sqrt{3}} \times 300\sqrt{3} \times 0.8 = 24\sqrt{3} \text{ kW}$

$$(8) \text{ 每台變壓器分擔功率 } P_{1\phi} = \frac{P_T}{3} = 8\sqrt{3} \text{ kW}$$

$$(9) \text{ 每台變壓器額定功率 } S_{1\phi} = \frac{P_{1\phi}}{\cos\theta} = \frac{8\sqrt{3} \text{ kW}}{0.8} = 10\sqrt{3} \text{ kVA}$$

說明：將範例 15-3 與 15-1 及 15-2 結果比較，相同條件下，變壓器採用 Y- $\Delta$  接線時比採用 Y-Y 或  $\Delta$ - $\Delta$  接線，二次側電壓 ( $V_{L2}$ ) 會多降低  $\sqrt{3}$  倍，二次側電流 ( $I_{L2}$ ) 增加  $\sqrt{3}$  倍，相較而言 Y- $\Delta$  接線更適用於降壓場所使用。

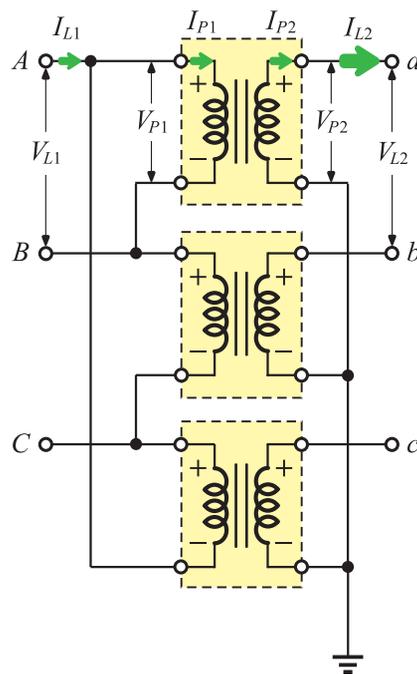
#### 4. $\Delta$ - Y 接線

1. 如圖 15-16 為  $\Delta$  - Y 接線方式、電壓與電流方向及相量關係。 $\Delta$  - Y 接線特性包含：

a. 一次側採用  $\Delta$  接線，一次側線電壓等於相電壓 ( $V_{L1} = V_{P1}$ )，一次側線電流等於  $\sqrt{3}$  相電流 ( $I_{L1} = \sqrt{3}I_{P1}$ )，一次側線電流落後相電流  $30^\circ$ 。

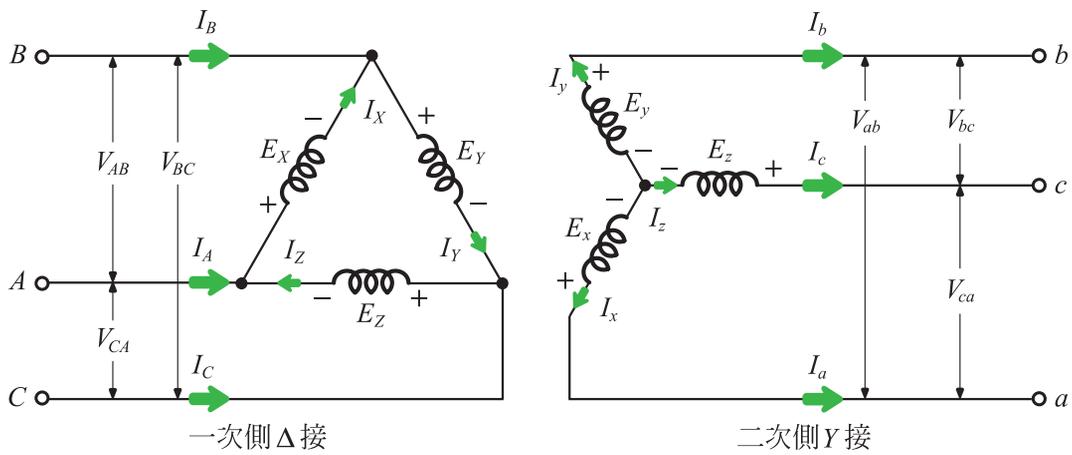
b. 二次側採用 Y 接線

二次側線電壓等於  $\sqrt{3}$  相電壓 ( $V_{L2} = \sqrt{3}V_{P2}$ )，二次側線電流等於相電流 ( $I_{L2} = I_{P2}$ )，二次側線電壓超前相電壓  $30^\circ$ 。

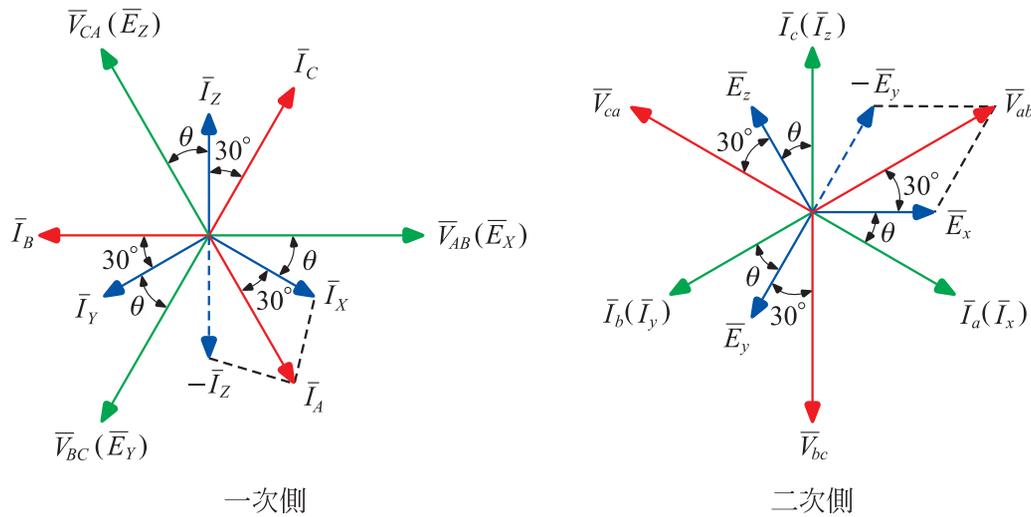


(a) 接線圖

圖 15-16 變壓器的  $\Delta$  - Y 連接



(b) 電壓、電流方向圖



(c) 相量圖

圖 15-16 變壓器的  $\Delta$ -Y 連接 (續)

- (2)  $\Delta$ -Y 接線的二次側線電壓 ( $V_{ab}$ ) 相位超前一次側線電壓 ( $V_{AB}$ ) 為  $30^\circ$ ，位移角為  $30^\circ$ 。
- (3) 一次側  $\Delta$  接線可以避免諧波造成波形畸變；二次側 Y 接線有中性點可以接地，穩定電壓。
- (4) 變壓器採用  $\Delta$ -Y 接線時會比採用 Y-Y 或  $\Delta$ - $\Delta$  接線時，再多升壓  $\sqrt{3}$  倍，因此特別適用於升壓場所，例如發電廠內的主變壓器，將發電機產生的電壓升高後，方便長距離輸送時使用。

- (5) 三相平衡電力系統中，若功率因數為  $\cos\theta$ ，負載總功率 ( $P_T$ ) 由三台變壓器共同分擔，即  $P_T = 3V_p I_p \cos\theta = \sqrt{3}V_L I_L \cos\theta$ 。

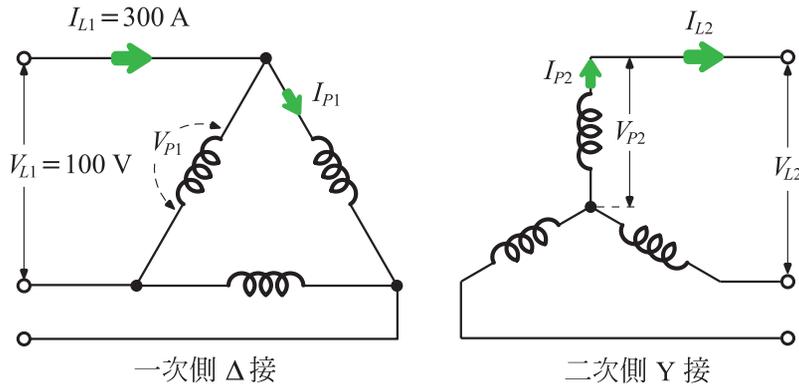
## 範例

## 04

有三台匝數比為 1 : 30 之單相理想變壓器，採  $\Delta$  - Y 接線，供應功率因數為 0.8 落後之三相負載，滿載時測得一次側線電壓為 100 V，一次側線電流為 300 A，求：(1)  $V_{P1}$  (2)  $V_{P2}$  (3)  $V_{L2}$  (4)  $I_{P1}$  (5)  $I_{P2}$  (6)  $I_{L2}$  (7) 負載總功率 (8) 每台變壓器分擔功率 (9) 每台變壓器額定容量分別為何？

解 變壓器  $\Delta$  - Y 接線圖簡化如下，

$$\text{其中每台單相變壓器匝數比 } a = \frac{1}{30} = \frac{V_{P1}}{V_{P2}} = \frac{I_{P2}}{I_{P1}}$$



1. 電壓部分：已知一次側線電壓  $V_{L1} = 100$  V，因此：

- (1) 一次側相電壓  $V_{P1} = V_{L1} = 100$  V
- (2) 二次側相電壓  $V_{P2} = \frac{V_{P1}}{a} = 30 \times 100 = 3000$  V
- (3) 二次側線電壓  $V_{L2} = \sqrt{3}V_{P2} = 3000\sqrt{3}$  V

2. 電流部分：已知一次側線電流  $I_{L1} = 300$  A，因此：

- (4) 一次側相電流  $I_{P1} = \frac{I_{L1}}{\sqrt{3}} = \frac{300}{\sqrt{3}} = 100\sqrt{3}$  A
- (5) 二次側相電流  $I_{P2} = aI_{P1} = \frac{100\sqrt{3}}{30} \doteq 5.77$  A
- (6) 二次側線電流  $I_{L2} = I_{P2} \doteq 5.77$  A

### 3. 功率部分

$$(7) \text{ 負載總功率 } P_T = \sqrt{3}V_{L2}I_{L2} \cos\theta = \sqrt{3} \times 3000\sqrt{3} \times \frac{10}{\sqrt{3}} \times 0.8 = 24\sqrt{3} \text{ kW}$$

$$(8) \text{ 每台變壓器分擔功率 } P_{1\phi} = \frac{P_T}{3} = 8\sqrt{3} \text{ kW}$$

$$(9) \text{ 每台變壓器額定功率 } S_{1\phi} = \frac{P_{1\phi}}{\cos\theta} = \frac{8\sqrt{3} \text{ kW}}{0.8} = 10\sqrt{3} \text{ kVA}$$

### 隨堂練習

- ( ) 1. 將範例 04 改成  $\Delta - \Delta$  接線，則二次側線電壓與二次側線電流分別為  
 (A) 3000 V、5.77 A (B) 3000 V、10 A (C)  $3000\sqrt{3}$  V、10 A (D) 9000 V、5.77 A。
- ( ) 2. 使用三台 6600 V / 220 V 的單相變壓器，將三相 11.4 kV 的電源降壓成三相 220 V 供給電動機運轉使用，則變壓器應使用何種接線方式  
 (A)  $\Delta - \Delta$  (B)  $\Delta - Y$  (C)  $Y - \Delta$  (D)  $Y - Y$  接線。

### 5.V-V 接線

原本使用三台單相變壓器採用  $\Delta - \Delta$  接線時，若是一具變壓器故障，剩下來的兩台變壓器會變成 V-V 接線方式繼續供電，其接線如圖 15-17(a) 所示，電壓與電流方向如圖 15-17(b) 所示；V-V 接線的特性為：

- (1) 一次側採用 V 接線，一次側線電壓等於相電壓 ( $V_{L1} = V_{P1}$ )，一次側線電流等於相電流 ( $I_{L1} = I_{P1}$ )。

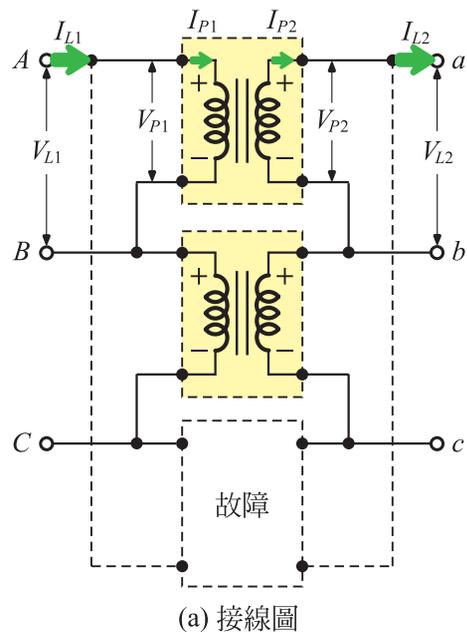
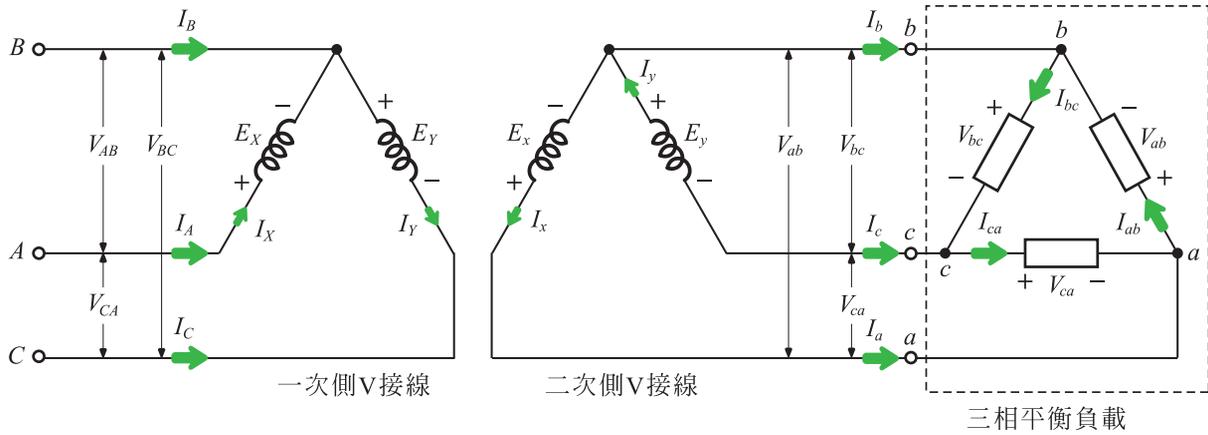
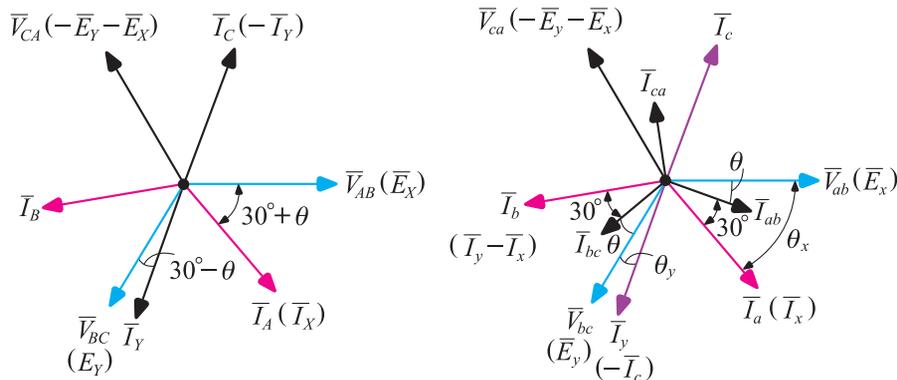


圖 15-17 V-V 接線



(b) 電壓、電流方向圖



(c) 相量圖

圖 15-17 V-V 接線 (續)

- (2) 二次側採用 V 接線，二次側線電壓等於相電壓 ( $V_{L2} = V_{P2}$ )，二次側線電流等於相電流 ( $I_{L2} = I_{P2}$ )。
- (3) 若將兩部相同規格，電壓為  $V$ 、電流為  $I$  的單相變壓器採用 V-V 接線時，變壓器 X 的輸出功率為  $VI \cos(30^\circ + \theta)$ ，Y 變壓器的輸出功率為  $VI \cos(30^\circ - \theta)$ ，兩部合計輸出功率為  $P_{V-V} = VI \cos(30^\circ + \theta) + VI \cos(30^\circ - \theta) = \sqrt{3}VI \cos \theta$ 。
- (4) 變壓器採用 V-V 接線時之利用率為  $\frac{\text{輸出容量}}{\text{設備容量}} = \frac{\sqrt{3}VI}{2VI} = 0.866$ ，也就是說變壓器只能發揮額定容量的 86.6%。
- (5) 原本三台變壓器採用  $\Delta - \Delta$  接線，若因為 1 台變壓器故障，剩餘兩台採用 V-V 接線，則供電能力為  $\frac{S_{V-V}}{S_{\Delta-\Delta}} = \frac{2VI \times 0.866}{3VI} = 0.577$ 。



### 範例

#### 05

有兩台均為 50 kVA、11.4 kV / 220 V、60 Hz 之單相變壓器，接成 V-V 接線來供給三相平衡負載，則

- (1) 總視在功率為何？
- (2) 若再增加一部相同規格的變壓器，總視在功率可以增加多少？

解 (1) 兩台變壓器採用 V-V 接線，

$$\text{總視在功率 } S_{V-V} = 2 \times 50 \text{ kVA} \times 0.866 = 86.6 \text{ kVA}$$

(2) 三台變壓器改採  $\Delta - \Delta$  接線，總視在功率  $S_{\Delta-\Delta} = 3 \times 50 \text{ kVA} = 150 \text{ kVA}$

$$\text{相較 V-V 接線，視在功率增加 } 150 - 86.6 = 63.4 \text{ kVA}$$

### 隨堂練習

- ( ) 1. 有三台均為 5 kVA、2400 V / 240 V、60 Hz 之單相變壓器，接成  $\Delta - \Delta$  接線來供給 13 kVA 之三相平衡負載，今有一部變壓器發生故障後拆除，若接線不變且要由其餘二台繼續供給全部負載，則最大供電容量約為多少？  
(A) 15 kVA (B) 10 kVA (C) 8.66 kVA (D) 5.77 kVA。
- ( ) 2. 同上題，變壓器之總過載量為多少？  
(A) 5.26 kVA (B) 4.34 kVA (C) 3 kVA (D) 2.5 kVA。
- ( ) 3. 容量相同之單相變壓器，採用 V - V 連接供電容量為  $\Delta - \Delta$  連接供電容量的比例為何？  
(A) 173.2 % (B) 115.5 % (C) 86.6 % (D) 57.7 %

### 6. 開 Y - 開 $\Delta$ (U-V 接線)

三相四線式電力系統中，原本使用三台單相變壓器採用 Y -  $\Delta$  接線時，若是一具變壓器故障，剩下來的兩台變壓器會變成開 Y - 開  $\Delta$  接線 (或稱為 U-V 接線) 方式繼續供電，其接線方式如圖 15-18(a) 所示，電壓與電流方向如圖 15-18(b) 所示；開 Y - 開  $\Delta$  接線的特性為：

- (1) 一次側採用開 Y 接線，使用三相四線式電源系統中的兩條電源線 (A, B) 及中性線 (N)。一次側線電壓等於  $\sqrt{3}$  相電壓 ( $V_{L1} = \sqrt{3}V_{P1}$ )，一次側線電流等於相電流 ( $I_{L1} = I_{P1}$ )。

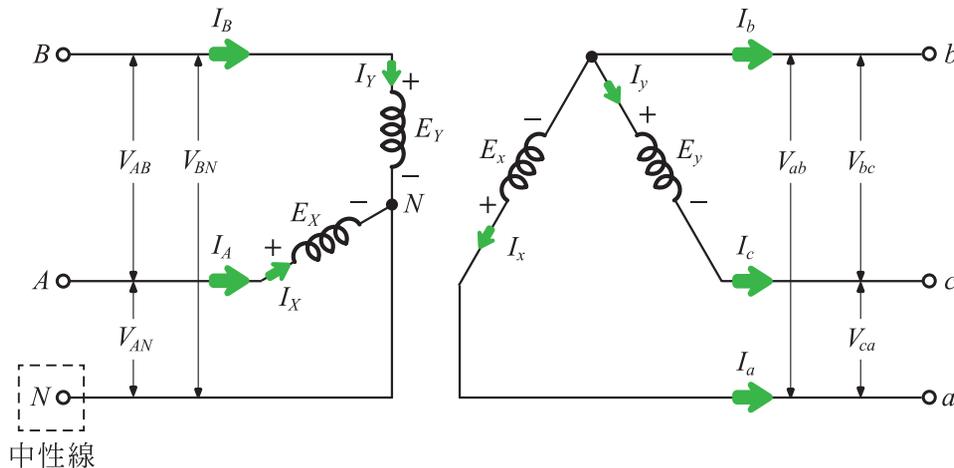
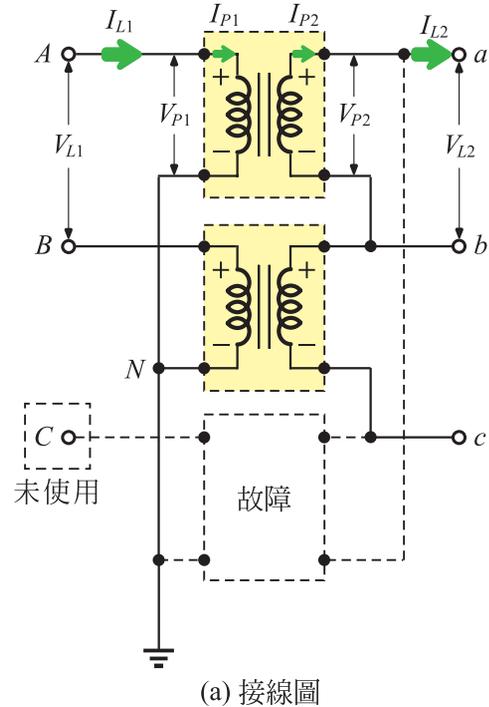
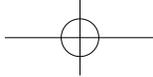


圖 15-18 開 Y - 開  $\Delta$  接線



- (2) 二次側採用開 $\Delta$ 接線，二次側線電壓等於相電壓 ( $V_{L2} = V_{P2}$ )，二次側線電流等於相電流 ( $I_{L2} = I_{P2}$ )。
- (3) 使用兩台單相變壓器可以供應三相負載，與 V-V 接法相同，**每台變壓器利用率也為 86.6 %**。
- (4) **採用兩台單相變壓器做開 Y - 開 $\Delta$ 接線的供電容量為三台變壓器做 Y -  $\Delta$  供電容量之 57.7 %**。
- (5) U-V 接線常使用於 Y -  $\Delta$  接線故障時，緊急供電之用；或用於三相四線式之配電系統供應小容量之電力。

### 隨堂練習

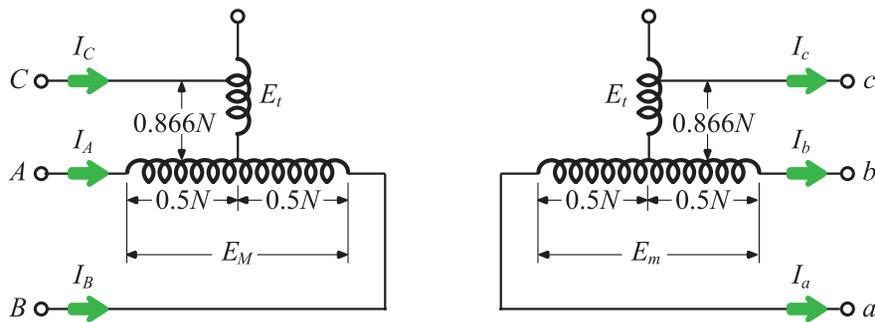
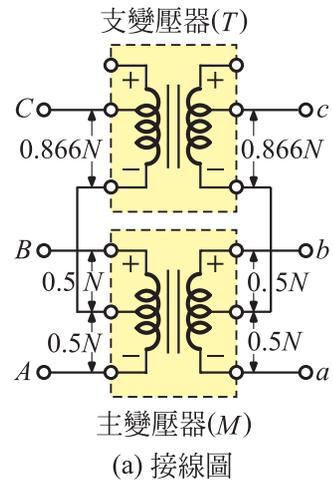
- ( ) 1. 三相四線式電源系統中，三台變壓器使用 Y -  $\Delta$  接法，若其中一具故障，下列敘述何者正確？
  - (A) 無法繼續供電
  - (B) 改接成 U - U 接線，繼續供電
  - (C) 改接成 V - V 接線，繼續供電
  - (D) 改接成開 Y - 開 $\Delta$ 接線，繼續供電。
- ( ) 2. 對於三相變壓器接線的方法及應用，下列敘述何者不正確？
  - (A)  $\Delta$  - Y 接線，二次側線電壓比一次側線電壓超前  $30^\circ$
  - (B) Y -  $\Delta$  接線於  $3\phi 4 W$  系統時，一具變壓器故障時可改開 Y - 開 $\Delta$ 接線繼續供電
  - (C)  $\Delta$  -  $\Delta$  接線，一具變壓器故障時可改 V - V 接線繼續供電
  - (D)  $\Delta$  -  $\Delta$  接線，輸出容量為 V - V 接線容量的 57.7 %



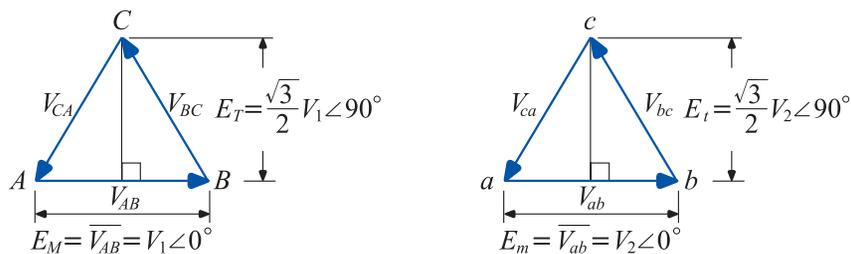
7.T-T 接線

T-T 接線又稱為史考特連接，利用兩台單相變壓器供應三相電源，接線如圖 15-19(a)，T-T 接線特性為：

- (1) 圖 15-19(b) 中位於水平位置者稱為主變壓器  $M$  (main transformer)，垂直位置者稱支變壓器  $T$  (teaser transformer)。主變壓器的一、二次側繞組必須要有 50% 中間抽頭，支變壓器的一、二次側電壓必須具有主變壓器額定電壓的  $\frac{\sqrt{3}}{2}$  (86.6%) 的分接頭，才能進行 T-T 接線。



(b) 電壓、電流方向圖



(c) 相量圖

圖 15-19 變壓器的 T-T 接線

- (2) T-T 接線的相量關係如圖 15-19(c)，主變壓器的一次側應電勢為

$$E_M = \bar{V}_{AB} = V_1 \angle 0^\circ, \text{ 支變壓器的一次側應電勢為 } E_T = \frac{\sqrt{3}}{2} V_1 \angle 90^\circ.$$

- (3) 若是主變壓器與支變壓器容量相同，利用率為  $\frac{\text{輸出容量}}{\text{設備容量}} = \frac{\sqrt{3}VI}{2VI} = 0.866$ 。



- (4) 若是支變壓器容量為主變壓器的  $\frac{\sqrt{3}}{2}$  (86.6%)，利用率為  $\frac{\sqrt{3}VI}{VI + 0.866VI} = 0.928$ 。
- (5) T-T 接線的利用率雖然比 V-V 或開 Y - 開  $\Delta$  稍佳，但是擴充不易，因此較少用於配電系統。早期作為相數轉換用 (三相交流  $\longleftrightarrow$  兩相交流)，目前則被電力電子元件取代。

### 隨堂練習

- ( ) 1. 有兩部容量均為 14.4 kVA 的單相變壓器，採用 T-T 接法供應三相負載，則最大輸出容量約為何？ (A) 14.4 kVA (B) 25 kVA (C) 26.9 kVA (D) 28.8 kVA。
- ( ) 2. 欲將二相電源變為三相電源，變壓器應選用下列何種接法？  
(A) V-V 連接 (B) Y-Y 連接 (C)  $\Delta - \Delta$  連接 (D) T 型連接。

## 15-4 變壓器的並聯運轉

當單台變壓器之容量不足以供應負載時，可並聯多台使用，增加供電之容量；並聯運轉的接線方式為一次側全部並聯接於電源側，二次側全部並聯接於負載側，如圖 15-20 所示。

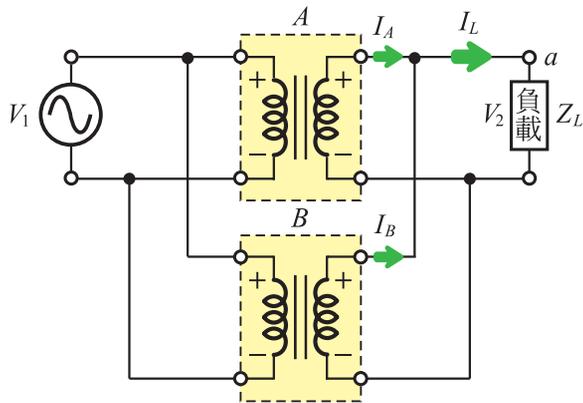


圖 15-20 二台單相變壓器並聯運轉接線圖

### 1. 單相變壓器並聯運轉時，

需符合以下條件：

- (1) 一次側、二次側之**額定電壓需相同**，並聯時才不會產生內部環流，增加損失。
- (2) 變壓器之**極性需正確的連接**。
- (3) **變壓器之內部阻抗須與額定容量成反比**，即  $\frac{S_A}{S_B} = \frac{Z_B}{Z_A}$ 。
- (4) 各變壓器之等效電阻與等效電抗比須相同。

## 2. 單相變壓器並聯運轉時之負載分配

圖 15-21 為  $A$ 、 $B$  兩台變壓器並聯運轉之等效電路圖。

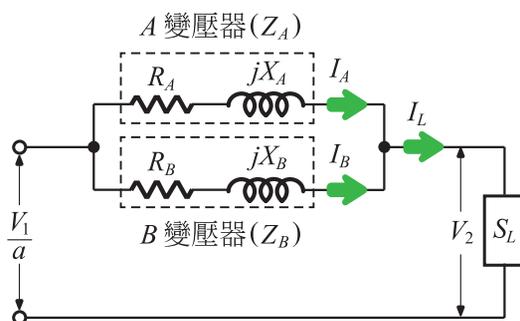


圖 15-21 單相變壓器並聯運轉等效電路圖

假設總負載量為  $S_L$ ，由  $A$ 、 $B$  兩部變壓器並聯供應，則：

(1) 利用變壓器之等效阻抗值 ( $Z_A$ 、 $Z_B$ )，應用分流定律進行計算：

$$A \text{ 變壓器分擔負載容量： } S_{LA} = S_L \times \frac{Z_B}{Z_A + Z_B} \quad (15-1)$$

$$B \text{ 變壓器分擔負載容量： } S_{LB} = S_L \times \frac{Z_A}{Z_A + Z_B} \quad (15-2)$$

(2) 利用變壓器百分比阻抗 ( $\% Z_A$ 、 $\% Z_B$ )，應用負載分配與變壓器容量成正比，與阻抗百分比成反比進行計算：

$$S_{LA} + S_{LB} = S_L \quad (15-3)$$

$$\frac{S_{LA}}{S_{LB}} = \frac{S_A}{S_B} \times \frac{\% Z_B}{\% Z_A} \quad (15-4)$$



### 範例

06

有兩台額定電壓相同之單相變壓器並聯運轉，已知  $A$  變壓器容量為 100 kVA，百分比阻抗為 4%； $B$  變壓器容量為 200 kVA，百分比阻抗為 2%，當負載為 225 kVA 時，求兩部變壓器各分擔負載為何？

解  $S_{LA} + S_{LB} = 225 \text{ kVA} \dots\dots\dots (1)$

$$\frac{S_{LA}}{S_{LB}} = \frac{100 \text{ kVA}}{200 \text{ kVA}} \times \frac{2\%}{4\%} = \frac{1}{4} \dots\dots\dots (2)$$

由 (2) 式可得  $S_{LB} = 4S_{LA}$ ，將其代入 (1) 式可得  $S_{LA} = 45 \text{ kVA}$ ， $S_{LB} = 180 \text{ kVA}$

立即練習

同範例 06，兩部變壓器並聯時可供應的最大負載量為何？

### 隨堂練習

- ( ) 1. 有兩部變壓器， $A$  機容量為 20 kVA、百分比阻抗為 4%， $B$  機容量為 30 kVA、百分比阻抗為 2%，今將兩部並聯供電時，共同供應 32 kVA 負載時，此時  $A$  機分擔為何？  
(A) 8 kVA (B) 12 kVA (C) 20 kVA (D) 24 kVA。
- ( ) 2. 同上題兩機可供應的最大負載量為何？  
(A) 32 kVA (B) 36 kVA (C) 40 kVA (D) 50 kVA。
- ( ) 3. 有兩部變壓器， $A$  機容量為 30 kVA、等效阻抗為 0.1 歐姆， $B$  機容量為 20 kVA、等效阻抗值為 0.2 歐姆，今將兩機並聯供電時共同供應 45 kVA 負載時，此時  $A$  機分擔為何？  
(A) 16 kVA (B) 20 kVA (C) 30 kVA (D) 50 kVA。

# 自我評量

## 一、選擇題

15-1 ( ) 1. 如圖 (1) 所示，電源電壓為 100 V，變壓器匝數比為 1 : 2，則電壓表的讀值應為多少？

- (A) 100 V (B) 200 V  
(C) 300 V (D) 400 V。

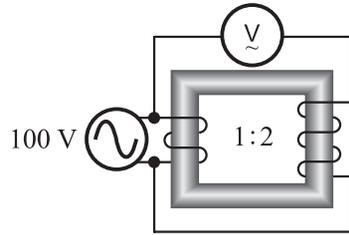


圖 (1)

( ) 2. 若圖 (2) 中之變壓器的極性已知，且匝數比  $N_1 : N_2 = 1 : 2$ ，當  $V_1 = 110$  V 時，交流電壓表  $V_2$  與  $V_3$  的讀值分別為多少？

- (A) 220 V，330 V  
(B) 220 V，- 110 V  
(C) 220 V，- 330 V  
(D) 220 V，110 V。

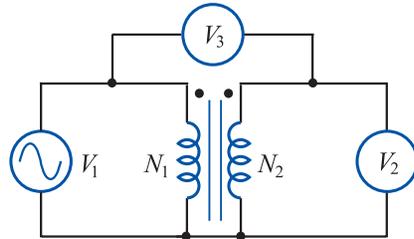


圖 (2)

( ) 3. 依圖 (3) 所示之變壓器極性測試，若該變壓器為減極性，當開關  $S$  閉合後並隨即斷開，則下列檢流器指針敘述何者正確？

- (A) 指針於開關  $S$  閉合時先向正 (+) 方向偏轉，再向負 (-) 方向偏轉，最後停在 0 點  
(B) 指針於開關  $S$  閉合時先向正 (+) 方向偏轉，接著停在正 (+) 方向位置  
(C) 指針於開關  $S$  閉合時先向負 (-) 方向偏轉，再向正 (+) 方向偏轉，最後停在 0 點  
(D) 指針於開關  $S$  閉合時先向負 (-) 方向偏轉，接著停在負 (-) 方向位置。

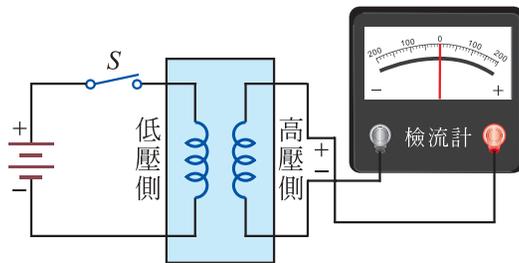


圖 (3)

## 自我評量

- ( ) 4. 如圖 (4) 所示，利用直流法測量變壓器極性的試驗，當開關  $S$  接通瞬間，伏特計往負方向偏轉，則變壓器為

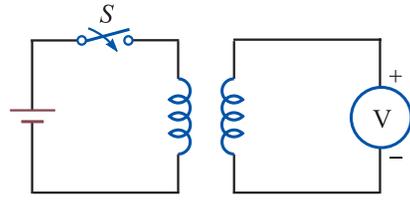


圖 (4)

- (A) 無極性 (B) 加極性  
(C) 減極性 (D) 無法判斷。

- 15-3** ( ) 5. 三台  $11.4 \text{ kV} / 380 \text{ V}$  的單相變壓器，接成三相  $Y - \Delta$  接線，高壓側為  $Y$  接，低壓側為  $\Delta$  接；若使用於三相平衡電源系統，其高壓側線電壓為  $11.4 \text{ kV}$ ，則低壓側線電壓約為多少？  
(A)  $440 \text{ V}$  (B)  $380 \text{ V}$  (C)  $220 \text{ V}$  (D)  $110 \text{ V}$ 。
- ( ) 6. 有三部  $380 \text{ V} / 11.4 \text{ kV}$  單相變壓器，接成三相  $\Delta - Y$  連接，當一次側線電壓為  $380 \text{ V}$  時，則二次側線電壓約為何？  
(A)  $6.58 \text{ kV}$  (B)  $11.4 \text{ kV}$  (C)  $19.7 \text{ kV}$  (D)  $33 \text{ kV}$ 。
- ( ) 7. 同上題，當二次側線電流為  $10 \text{ A}$  時，其一次側線電流約為何？  
(A)  $300\sqrt{3} \text{ A}$  (B)  $300 \text{ A}$  (C)  $0.577 \text{ A}$  (D)  $0.333 \text{ A}$ 。
- ( ) 8. 變壓器採用  $Y - \Delta$  接法時，二次側線電壓與一次側線電壓的相位關係為何？  
(A) 兩者同相 (B) 二次側線電壓落後  $30^\circ$   
(C) 二次側線電壓超前  $30^\circ$  (D) 二次側線電壓超前  $120^\circ$ 。
- ( ) 9. 變壓器採用  $\Delta - Y$  接法時，二次側線電流與一次側線電流的相位關係為何？  
(A) 兩者同相 (B) 二次側線電流落後  $30^\circ$   
(C) 二次側線電流超前  $30^\circ$  (D) 二次側線電流超前  $120^\circ$ 。
- ( ) 10. 有二台  $10 \text{ kVA}、2400 \text{ V} / 240 \text{ V}、60 \text{ Hz}$  單相變壓器，使用  $V - V$  接法供應三相平衡負載，功率因數為  $0.577$  落後，則此二台變壓器的輸出實功率應為何？  
(A)  $5.77 \text{ kW}$  (B)  $10 \text{ kW}$  (C)  $17.31 \text{ kW}$  (D)  $20 \text{ kW}$ 。

## 自我評量

- ( )11. 三台單相變壓器，接成 $\Delta - \Delta$ 接線，其中一台變壓器因故障而拆除，改接成V-V接線，若仍然使用三相電源供電，下列敘述何者正確？  
(A) 每台變壓器可供應的輸出容量為其額定容量的 57.7 %  
(B) 每台變壓器可供應的輸出容量為其額定容量的 2/3 倍  
(C) V-V 接線時供應的總容量僅為 $\Delta - \Delta$ 接線時總容量的 86.6 %  
(D) V-V 接線時供應的總容量僅為 $\Delta - \Delta$ 接線時總容量的 57.7 %。
- ( )12. 有三部均為 10 kVA、2400 V/240 V、60 Hz 單相變壓器，接成 $\Delta - \Delta$ 接線供給 22 kVA 三相平衡負載，今有一部變壓器發生故障後拆除，則負載應該卸載多少，以免變壓器過載？  
(A) 4.68 kVA (B) 3.64 kVA (C) 2 kVA (D) 0.866 kVA
- ( )13. 有三台單相減極性變壓器接成 $\Delta - Y$ 接線，當一次側接平衡三相電源，其一、二次側之線電壓、相電壓、線電流及相電流之關係，下列敘述何者錯誤？  
(A) 一次側線電壓與一次側相電壓之電壓大小及相角均相等  
(B) 二次側線電壓之大小為二次側相電壓之 $\sqrt{3}$ 倍，且二次側線電壓之相角超前二次側相電壓 $30^\circ$   
(C) 一次側線電壓之相角超前二次側線電壓之相角 $30^\circ$   
(D) 二次側線電流與二次側相電流之電流大小及相角均相等。
- ( )14. 用三具單相變壓器接成三相變壓器常用的接線方式中，哪種接線方式會產生三次諧波電流而干擾通訊線路？  
(A) Y-Y 接線 (B) Y- $\Delta$ 接線 (C)  $\Delta - Y$ 接線 (D)  $\Delta - \Delta$ 接線。
- ( )15. 有兩部容量分別為 30 kVA 及 26 kVA 的單相變壓器，採用 T-T 連接供應三相負載，最大供電能力約為何？  
(A) 56 kVA (B) 52 kVA (C) 44 kVA (D) 35 kVA。
- ( )16. 欲將三相交流電源變為兩相交流，變壓器應採用何種接法？  
(A) Y-Y (B)  $\Delta - \Delta$  (C) V-V (D) T-L 連接。

## 自我評量

- 15-4 ( )17. 下列何者不是單相變壓器並聯運用的條件？
- (A) 額定電壓應相等 (B) 匝數比應相等  
(C) 極性連接要正確 (D) 電流必須相同。
- ( )18. 有甲和乙兩台容量皆為 80 kVA 之單相變壓器作並聯運轉，供給 100 kVA 負載。甲和乙之百分比阻抗壓降分別為 4 % 與 6 %，則甲、乙分擔之負載分別為何？
- (A) 70 kVA、30 kVA (B) 30 kVA、70 kVA  
(C) 60 kVA、40 kVA (D) 50 kVA、50 kVA。
- ( )19. 有二部單相變壓器，已知 A 機容量為 120 kVA，百分阻抗壓降 %  $Z_A$  為 4 %；B 機容量為 180 kVA，百分阻抗壓降 %  $Z_B$  為 3 %，當兩機並聯供給 210 kVA 的負載時，兩機分擔分別為何？
- (A) 42 kVA、168 kVA (B) 70 kVA、140 kVA  
(C) 140 kVA、70 kVA (D) 168 kVA、42 kVA。
- ( )20. 同上題，兩部並聯供電時，最大供電容量為何？
- (A) 360 kVA (B) 300 kVA (C) 270 kVA (D) 240 kVA。

### 二、問答題

- 三具匝數比  $\frac{N_1}{N_2} = 20$  的單相變壓器，接成 Y - Y 接線，供應 220 V、10 kW、功率因數為 0.8 之負載，則(1)一次側相電壓、(2)一次側線電壓、(3)二次側線電流、(4)一次側線電流各為何？
- 設有一、二次側額定電壓相等之兩變壓器 A 和 B，A 之容量為 10 kVA，阻抗標么值為 5 %；B 之容量為 30 kVA，標么阻抗值為 3 %；且兩變壓器在功因為 1 時之電壓調整率相等，將兩變壓器並聯使用，(1)負載為 30 kVA 時，A 和 B 各分擔多少 kVA？(2)兩機最大供電能力為多少 kVA？



## 變壓器短路及開路試驗

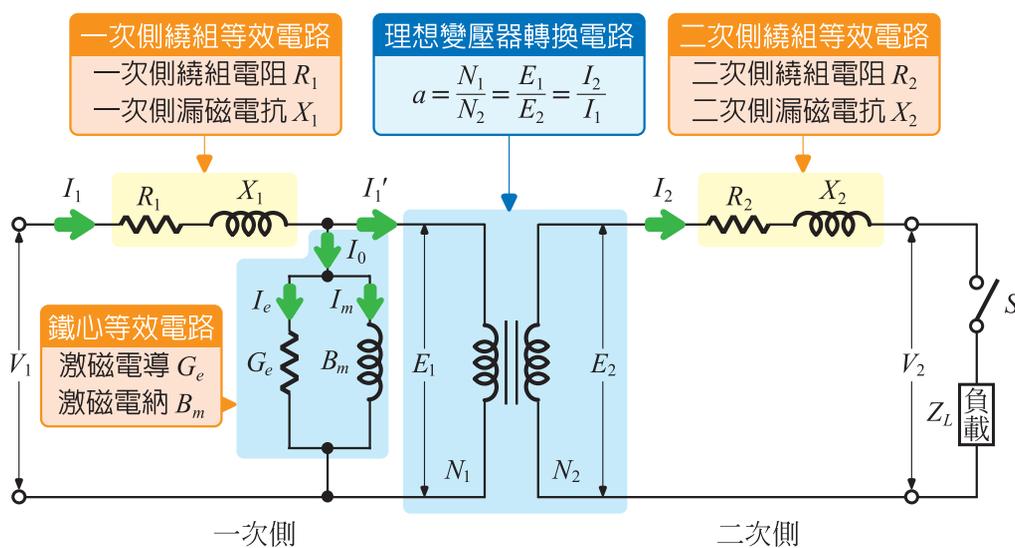
## » 本章重點

電機設備出廠前會進行各種測試，以確定性能符合相關規範，變壓器最常進行的試驗內容包含開路試驗與短路試驗等，本章將配合第 13 章等效電路圖依序針對試驗過程、目的以及注意事項做詳細說明。

## 16-1 變壓器之開路試驗

## (一) 等效電路

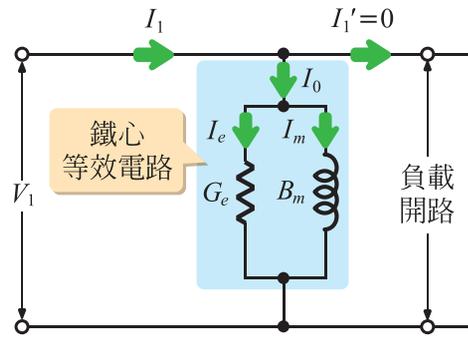
回顧變壓器等效電路如圖 16-1(a) 所示，將開關  $S$  打開，於一次側外加額定電壓 ( $V_1$ )，由於負載端開路所以二次側電流 ( $I_2$ ) 為 0，一次側負載電流 ( $I_1' = \frac{I_2}{a}$ ) 也為 0，此時一次側電流等於激磁電流 ( $I_1 = I_0$ )。



(a) 完整等效電路

圖 16-1 變壓器開路試驗等效電路

依據 CNS 規定，配電變壓器無載電流比都在 10 % 以下，因此一次側繞組的壓降及損失很低。將一次側繞組等效電路省略後，可得變壓器開路等效電路如圖 16-1(b) 所示。



(b) 開路時等效電路

圖 16-1 變壓器開路試驗等效電路 (續)

## (二) 開路試驗目的與做法

開路試驗 (open-circuit test) 之目的在測量變壓器無載電流 ( $I_0$ )、鐵損 ( $P_i$ )、鐵心等效電路 (激磁電導、激磁電納) 以及無載功率因數 ( $\cos\theta_0$ ) 等。

開路試驗接線如圖 16-2 所示，考量安全及儀表取得方便，會將高壓側開路，在低壓側接上各式儀表後加入額定電壓 (也可將低壓側開路，高壓側加入額定電壓，但較危險)。

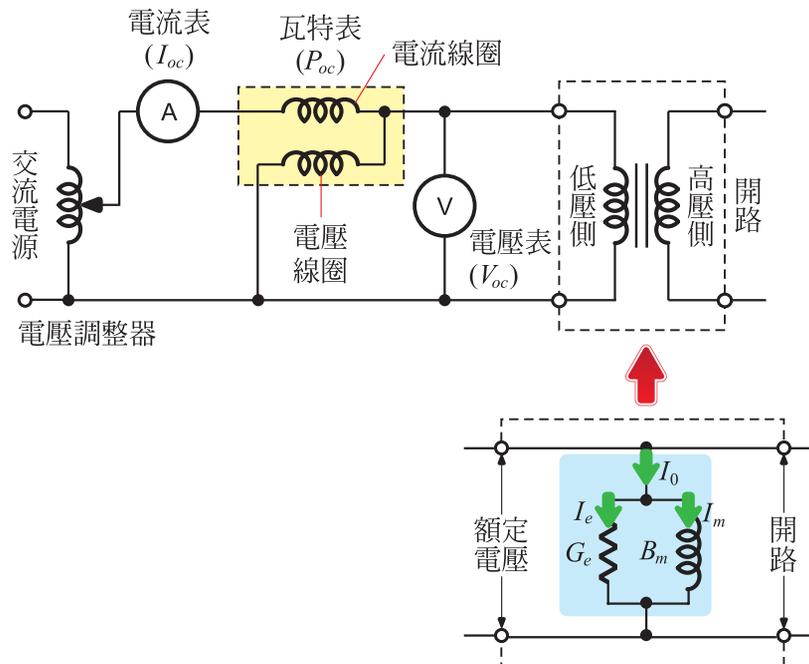


圖 16-2 開路試驗接線圖



接線完畢後，將電壓調整器輸出電壓由 0 開始逐漸增加，直到電壓表指示值 ( $V_{oc}$ ) 等於低壓側額定電壓後，此時電流表指示值 ( $I_{oc}$ ) 等於激磁電流 ( $I_0$ )；瓦特表指示值 ( $P_{oc}$ ) 即為變壓器之鐵損 ( $P_i$ )。配合圖 16-1 的等效電路圖，可以分別計算下列數值：

$$\text{無載功率因數 } \cos\theta_0 = \frac{P_{oc}}{V_{oc} I_{oc}} \quad (16-1)$$

$$\text{鐵損電流 } I_e = \frac{P_{oc}}{V_{oc}} = I_0 \cos\theta_0 \quad (16-2)$$

$$\text{磁化電流 } I_m = \sqrt{I_0^2 - I_e^2} = I_0 \sin\theta_0 \quad (16-3)$$

$$\text{激磁導納 } Y_{oc} = \frac{I_{oc}}{V_{oc}} \quad (16-4)$$

$$\text{激磁電導 } G_e = \frac{P_{oc}}{V_{oc}^2} = Y_{oc} \times \cos\theta_0 \quad (16-5)$$

$$\text{激磁電納 } B_m = \sqrt{Y_{oc}^2 - G_e^2} = Y_{oc} \times \sin\theta_0 \quad (16-6)$$



若需要高壓側數據，可依據匝數比公式轉換之。

## 範例

## 01

有一台 1 kVA、2000 V / 200 V，60 Hz 之單相變壓器，在高壓側開路，低壓側加入電源做開路試驗，已知電壓表  $V_{oc} = 200$  V，電流表  $I_{oc} = 1$  A，瓦特表  $P_{oc} = 160$  W，求 (1) 變壓器之鐵損、(2) 無載功因、(3) 鐵損電流、(4) 磁化電流、(5) 激磁導納、(6) 激磁電導、(7) 激磁電納？

解 (1) 電壓表指示值 200 V 等於變壓器低壓側額定電壓，因此瓦特表之值即為變壓器之鐵損，鐵損 = 160 W

$$(2) P_{oc} = V_{oc} \times I_{oc} \times \cos\theta_0$$

$$160 = 200 \times 1 \times \cos\theta_0$$

$$\cos\theta_0 = \frac{160}{200} = 0.8$$

$$(3) I_e = I_{oc} \times \cos\theta_0 = 1 \times 0.8 = 0.8 \text{ A}$$

$$(4) I_m = I_{oc} \times \sin\theta_0 = 1 \times 0.6 = 0.6 \text{ A}$$

$$(5) Y_{oc} = \frac{I_{oc}}{V_{oc}} = \frac{1}{200} = 0.005 \text{ S}$$

$$(6) G_e = \frac{P_{oc}}{V_{oc}^2} = \frac{160}{200^2} = 0.004 \text{ S}$$

$$(7) B_m = \sqrt{Y_{oc}^2 - G_e^2} = \sqrt{0.005^2 - 0.004^2} = 0.003 \text{ S}$$

## 隨堂練習

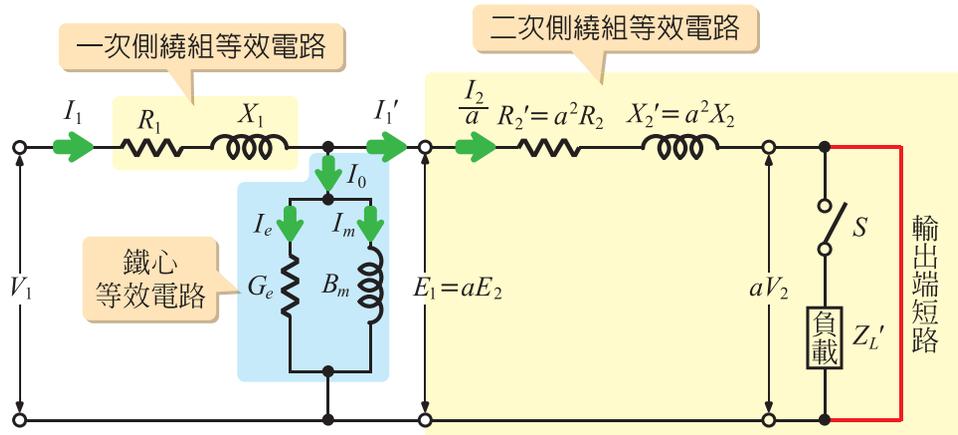
- ( ) 1. 有關變壓器開路試驗之敘述，下列何者錯誤？  
 (A) 通常將高壓側開路 (B) 需要外加額定電壓  
 (C) 測得激磁導納 (D) 測得滿載銅損。
- ( ) 2. 有一部 1.5 kVA，220 V / 110 V，60 Hz 之單相變壓器作開路實驗時，功率表、電壓表、電流表的讀值分別為  $P_{oc} = 22$  W、 $V_{oc} = 110$  V、 $I_{oc} = 0.8$  A，無載功因為何？  
 (A) 0.1 (B) 0.16 (C) 0.25 (D) 0.8。

## 16-2 變壓器之短路試驗

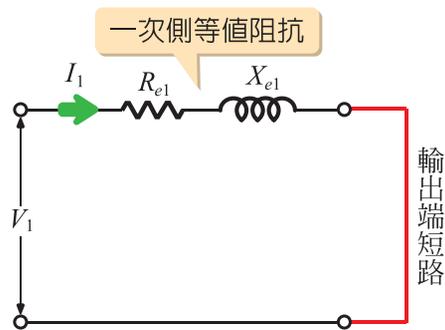
### (一) 等效電路

回顧變壓器二次側電路併入一次側等效電路如圖 16-3 所示，若是將輸出端以導線短路，此時一次側負載電流 ( $I_1'$ ) 僅由二次側繞組本身阻抗 ( $I_1' = \frac{E_1}{\sqrt{R_2'^2 + X_2'^2}}$ ) 承擔，激磁電流 ( $I_0$ ) 與短路電流相比甚低可忽略，因此一次側電流近似於一次側負載電流 ( $I_1 \cong I_1'$ )。

將鐵心等效電路省略後，再將兩繞組的電阻與電抗合併 ( $R_{e1} = R_1 + a^2 R_2$ 、 $X_{e1} = X_1 + a^2 X_2$ )，可得變壓器短路時等效電路如圖 16-3(b) 所示。



(a) 二次側電路併入一次側等效電路



(b) 短路時等效電路

圖 16-3 變壓器短路試驗等效電路

## (二) 短路試驗目的與做法

短路試驗 (short-circuit test) 之目的在測量變壓器之滿載銅損 ( $P_c$ ) 及繞組等效電路 (等值電阻、等值電抗) 等。

短路試驗前先利用公式 ( $I = \frac{S}{V}$ ) 計算出變壓器高、低壓側額定電流，之後如圖 16-4 所示完成接線。考量安全及儀表取得方便，一般會將低壓側短路，在高壓側接上各式儀表後加入額定電流 (也可將高壓側短路，低壓側加入額定電流，但所需電流大，取得較不方便)。

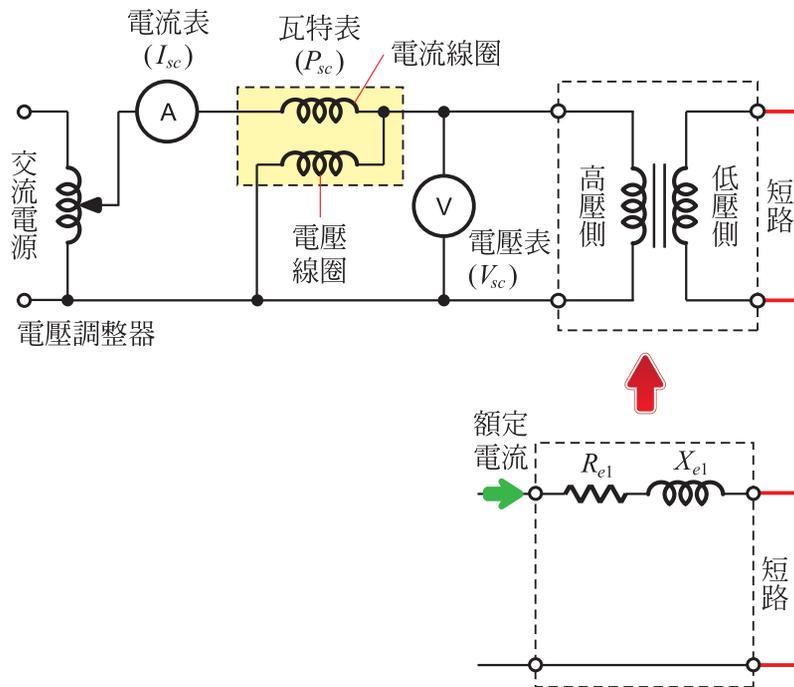


圖 16-4 短路試驗接線圖

如圖 16-4 接線完畢後，由於銅損與負載電流平方成正比，因此將電壓調整器輸出電壓由 0 開始逐漸增加，直到電流表指示值 ( $I_{sc}$ ) 等於高壓側額定電流後即停止，此時輸入電壓大約為額定電壓之 5% ~ 20% 左右，由於鐵損與外加電壓平方成正比，其值甚低可忽略不計，此時瓦特表指示值 ( $P_{sc}$ ) 即為變壓器之滿載銅損 ( $P_c = I^2 R$ )，配合等效電路可以計算出下列數值：

$$\text{短路功率因數 } \cos\theta_s = \frac{P_{sc}}{V_{sc} I_{sc}} \quad (16-7)$$



$$\text{一次側等值阻抗 } Z_{e1} = \frac{V_{sc}}{I_{sc}} \quad (16-8)$$

$$\text{一次側等值電阻 } R_{e1} = \frac{P_{sc}}{I_{sc}^2} = Z_{e1} \times \cos \theta_s \quad (16-9)$$

$$\text{一次側等值電抗 } X_{e1} = \sqrt{Z_{e1}^2 - R_{e1}^2} = Z_{e1} \times \sin \theta_s \quad (16-10)$$



若需要得到二次側數據，可依據匝數比公式轉換之。

### 範例

#### 02

有一台 1 kVA、2000 V / 100 V、60 Hz 之單相變壓器做短路試驗，高壓側加入電源，低壓側短路，測出瓦特表為 50 W、電壓表為 125 V、電流表為 0.5 A；求  
 (1) 變壓器滿載銅損？ (2) 高壓側的等效電阻、等效電抗及等效阻抗？  
 (3) 低壓側的等效電阻、等效電抗及等效阻抗？

**解** (1) 電流表指示值 0.5 A 等於變壓器高壓側額定電流 ( $I_1 = \frac{1 \text{ kVA}}{2000 \text{ V}} = 0.5 \text{ A}$ )，因此瓦特表指示值即為滿載銅損， $P_c = 50 \text{ W}$

$$(2) Z_{e1} = \frac{V_{sc}}{I_{sc}} = \frac{125}{0.5} = 250 \Omega, \quad R_{e1} = \frac{P_{sc}}{I_{sc}^2} = \frac{50}{0.5^2} = 200 \Omega$$

$$X_{e1} = \sqrt{Z_{e1}^2 - R_{e1}^2} = \sqrt{250^2 - 200^2} = 150 \Omega$$

$$(3) a = \frac{V_1}{V_2} = \frac{2000}{100} = 20, \quad Z_{e2} = \frac{Z_{e1}}{a^2} = \frac{250}{400} = 0.625 \Omega$$

$$R_{e2} = \frac{R_{e1}}{a^2} = \frac{200}{400} = 0.5 \Omega, \quad X_{e2} = \frac{X_{e1}}{a^2} = \frac{150}{400} = 0.375 \Omega$$

## 範例

## 03

有一台 50 kVA、2400 V / 120 V 單相變壓器，其開路試驗及短路試驗所得相關數據如下：(1) 開路試驗：電壓表之讀值為 120 V，電流表之讀值為 9.65 A，瓦特表之讀值為 350 W。(2) 短路試驗：電壓表之讀值為 92 V，電流表之讀值為 20.8 A，瓦特表之讀值為 800 W。求此變壓器運轉於 75 % 滿載，負載功率因數為 0.8 時之效率約為多少？

**解** 開路試驗時：電壓表讀值為 120 V 等於低壓側額定電壓，因此瓦特表讀值即為鐵損值 350 W。

短路試驗時：電流表之讀值為 20.8 A 等於高壓側額定電流

$$\left( \frac{50 \text{ kVA}}{2400 \text{ V}} = 20.8 \text{ A} \right), \text{ 因此瓦特表讀值即為銅損值 } 800 \text{ W}。$$

75 % 滿載，功率因數 0.8 時，輸出  $P_o = 50 \text{ kVA} \times 0.75 \times 0.8 = 30 \text{ kW}$ ，

鐵損為 350 W，銅損為  $0.75^2 \times 800 \text{ W} = 450 \text{ W}$ ，

$$\text{效率為 } \eta = \frac{P_o}{P_i} = \frac{P_o}{P_o + P_L} = \frac{30 \text{ kW}}{30 \text{ kW} + 350 + 450} = 0.974 = 97.4 \%$$

## 隨堂練習

- ( ) 1. 單相變壓器的開路試驗，主要目的為何？  
 (A) 求取變壓器一次側與二次側的等效阻抗 (B) 求取變壓器的銅損  
 (C) 求取變壓器的激磁導納與鐵損 (D) 測試變壓器的極性。
- ( ) 2. 有關變壓器短路試驗之敘述，下列何者錯誤？  
 (A) 通常將低壓側短路 (B) 需要外加額定電壓  
 (C) 測得等值阻抗 (D) 測得滿載銅損。
- ( ) 3. 有一部 50 kVA、2000 V / 200 V、60 Hz 單相變壓器，高壓側加電源進行短路試驗時，電壓表、電流表、功率表的讀值分別為： $V_{sc} = 80 \text{ V}$ 、 $I_{sc} = 20 \text{ A}$ 、 $P_{sc} = 400 \text{ W}$ ，則變壓器滿載銅損為何？ (A) 625 W (B) 525 W (C) 400 W (D) 320 W。
- ( ) 4. 有關變壓器量測損失之敘述，下列何者正確？  
 (A) 變壓器滿載下的鐵損遠大於無載時之鐵損  
 (B) 變壓器一次側等效阻抗可由開路試驗量測  
 (C) 變壓器的銅損主要是在短路試驗中量測  
 (D) 短路試驗是將變壓器的低壓側短路，在高壓側輸入額定的電壓。

# 自我評量

## 一、選擇題

- 16-1** ( ) 1. 有關單相變壓器之開路試驗，下列敘述何者正確？
- (A) 高壓側繞組短路，低壓側繞組之電流為額定電流，以量測其電壓及功率
  - (B) 高壓側繞組短路，低壓側繞組之電壓為額定電壓，以量測其電流及功率
  - (C) 高壓側繞組開路，低壓側繞組之電流為額定電流，以量測其電壓及功率
  - (D) 高壓側繞組開路，低壓側繞組之電壓為額定電壓，以量測其電流及功率。
- ( ) 2. 單相變壓器的開路試驗，主要目的為何？
- (A) 求取變壓器一次側與二次側的等效阻抗
  - (B) 求取變壓器的銅損
  - (C) 求取變壓器的激磁導納與鐵損
  - (D) 測試變壓器的極性。
- ( ) 3. 有一部 20 kVA、2400 V / 240 V 變壓器，低壓側做開路試驗，三個電表讀值分別為  $V = 240 \text{ V}$ ， $I = 2.5 \text{ A}$ ， $P = 150 \text{ W}$ ，求無載時功率因數為何？ (A) 0.8 (B) 0.625 (C) 0.6 (D) 0.25。
- ( ) 4. 同上題，求鐵損額定值為何？
- (A) 240 W (B) 150 W (C) 60 W (D) 2.5 W。
- ( ) 5. 同上題，求鐵損電流為何？
- (A) 0.8 A (B) 0.625 A (C) 0.6 A (D) 0.25 A。
- 16-2** ( ) 6. 有關變壓器短路試驗之敘述，下列何者正確？
- (A) 可測出變壓器的繞組電阻
  - (B) 可測出變壓器之鐵損
  - (C) 高壓側短路，低壓側加額定電壓來作試驗
  - (D) 可測出激磁電流。

- ( ) 7. 測量變壓器銅損之方法為
- (A) 耐壓試驗 (B) 絕緣試驗  
(C) 開路試驗 (D) 短路試驗。
- ( ) 8. 變壓器開路測試無法測出
- (A) 等效阻抗 (B) 鐵損  
(C) 無載功率因數 (D) 磁化電流。
- ( ) 9. 有一部 5 kVA、1000 V / 200 V、50 Hz 單相變壓器進行短路試驗，由高壓側加電源，低壓側短路，若要獲得滿載銅損，從高壓側加入的電源應為何？
- (A) 5 kVA (B) 1000 V (C) 200 V (D) 5 A
- ( ) 10. 有一部 20 kVA、2000 / 200 V 變壓器，高壓側作短路試驗，三個電表讀值分別為  $V = 50 \text{ V}$ ， $I = 8 \text{ A}$ ， $P = 320 \text{ W}$ ，求短路時功率因數為何？
- (A) 0.8 (B) 0.625 (C) 0.6 (D) 0.25。
- ( ) 11. 同上題，滿載銅損為何？
- (A) 500 W (B) 400 W (C) 320 W (D) 240 W。
- ( ) 12. 同上題，高壓側等效電抗為何？
- (A)  $10 \Omega$  (B)  $6.25 \Omega$  (C)  $5 \Omega$  (D)  $3.75 \Omega$ 。
- ( ) 13. 變壓器負載特性實驗的主要目的是
- (A) 測量電壓調整率與效率 (B) 測量等值阻抗  
(C) 測量鐵損與銅損 (D) 測量激磁電導與激磁電納。
- ( ) 14. 有關雙繞組鐵心變壓器試驗之敘述，下列何者錯誤？
- (A) 短路實驗可測得銅損與等效阻抗  
(B) 開路試驗可測得鐵損與激磁導納  
(C) 負載試驗可測得電壓調整率與效率  
(D) 極性試驗可測得變壓器是 Y 接或  $\Delta$  接。

## 自我評量

- ( )15. 有關變壓器量測損失之敘述，下列何者正確？  
(A) 變壓器滿載下的鐵損遠大於無載時之鐵損  
(B) 變壓器一次側等效阻抗可由開路試驗量測  
(C) 變壓器的銅損主要是在短路試驗中量測  
(D) 短路試驗是將變壓器的低壓側短路，在高壓側輸入額定的電壓。
- ( )16. 關於變壓器的敘述，下列何者正確？  
(A) 變壓器可提高電壓，亦可提高電流，所以變壓器可視為一功率放大器  
(B) 變壓器之銅損可由短路測試求得  
(C) 變壓器可改變輸入電壓之頻率  
(D) 固定電源電壓下，變壓器之負載越大，鐵損越大。
- ( )17. 有一部 50 kVA、2400 V / 120 V 單相變壓器，其開路試驗及短路試驗所得相關數據如下：開路試驗：電壓表讀值 120 V，電流表讀值 9.65 A，瓦特表讀值 350 W。短路試驗：電壓表讀值 92 V，電流表讀值 20.8 A，瓦特表讀值 800 W，求變壓器滿載時總損失為何？ (A) 2400 W (B) 1150 W (C) 950 W (D) 800 W。
- ( )18. 同上題，變壓器運轉於半載，負載功率因數為 0.8 時之效率約為何？  
(A) 94.3 % (B) 95.8 % (C) 96.1 % (D) 97.3 %。
- ( )19. 有一部單相變壓器，一次側繞組電阻在 25.5 °C 時測得為 2.6 Ω，若滿載時溫度為 85.5 °C，求滿載時一次側繞組電阻約為何？  
(A) 8.71 Ω (B) 5.2 Ω (C) 3.2 Ω (D) 2.6 Ω。
- ( )20. 下列何者不是變壓器的試驗項目之一？  
(A) 衝擊電壓試驗 (B) 溫升試驗  
(C) 開路試驗 (D) 衝擊電流試驗。

## 二、計算題

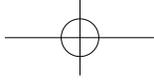
1. 有一台 50 kVA、2000 V / 200 V、60 Hz 單相變壓器，高壓側加電源進行短路試驗，所接電表讀數為： $V_{sc} = 40 \text{ V}$ 、 $I_{sc} = 25 \text{ A}$ 、 $P_{sc} = 600 \text{ W}$ ，則變壓器

- (1) 短路時功率因數為何？
- (2) 高壓側的等值阻抗、電阻、電抗分別為何？
- (3) 換算到低壓側的等值阻抗、電阻、電抗分別為何？

2. 有一部 5 kVA，2200 V / 220 V，60 Hz 之單相變壓器，分別進行開路試驗及短路試驗，其數據如下表所示，則此變壓器在

- (1) 滿載而功率因數為 1 時之效率為何？
- (2) 半載而功率因數為 0.8 落後時之效率為何？

	伏特表讀值 (伏特)	安培表讀值 (安培)	瓦特表讀值 (瓦特)
開路試驗	220	1.5	155
短路試驗	115.8	2.28	264



# CHAPTER 17

## 特殊變壓器

### » 本章重點

前面章節所介紹的變壓器，主要是針對其交流電能的轉換功能；本章所介紹的特殊變壓器（自耦變壓器、比壓器及比流器），其基本原理與變壓器相同，只是為了符合特殊功能，在設計與材料上會有些不同，需特別注意兩者間的差異。

### 17-1 自耦變壓器 (autotransformer)

雙繞組變壓器一次側繞組 ( $N_1$ ) 與二次側繞組 ( $N_2$ ) 分別繞製於鐵心上，透過鐵心中的磁場產生感應電勢，一、二次側的電路上是各自獨立，其電路圖如圖 17-1 所示。

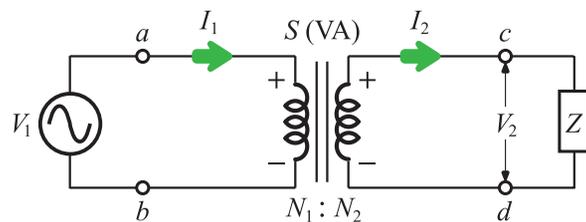


圖 17-1 雙繞組變壓器

#### (一) 自耦變壓器的種類

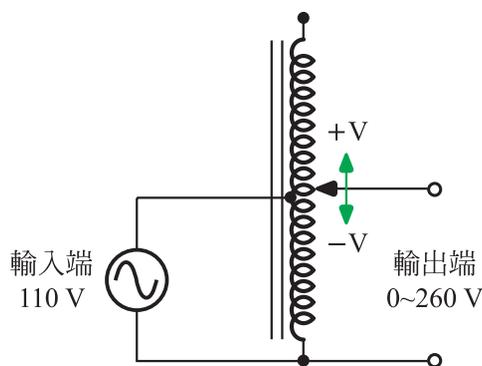
自耦變壓器只有一個繞組，因此有一部分繞組是一次側與二次側共用，又稱為單繞組變壓器 (single winding transformer)，依據輸出電壓型態可以分成：

##### 1. 可調電壓式

圖 17-2(a) 為可調電壓式之外觀，輸入端接上交流 110 V 電源後，將變壓器的轉盤順時針旋轉，輸出端 (output) 電壓就會增加，反之逆時針方向旋轉電壓就會降低，是很方便的交流電壓調整設備，其內部接線如圖 17-2(b) 所示。



(a) 外觀



(b) 接線圖

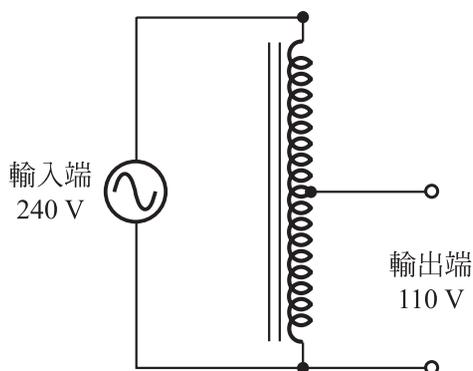
圖 17-2 可調電壓式自耦變壓器  
(圖片來源：Ravi Electricals)

## 2. 固定電壓式

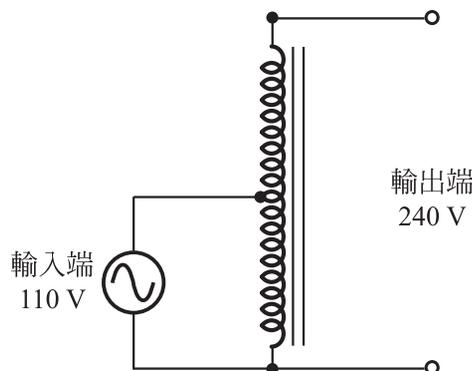
圖 17-3(a) 為固定電壓式之外觀，基本原理與雙繞組變壓器相同，差別在於自耦變壓器有部分繞組是輸入端與輸出端共用。若是如圖 17-3(b) 將輸入端加入交流 240 V 電源，輸出端提供交流 110 V 給負載，稱為降壓自耦變壓器，或是如圖 17-3(b) 將電源改由 110 V 端輸入，則輸出端提供交流 240 V 給負載，稱為升壓自耦變壓器。



(a) 外觀



(b) 降壓自耦變壓器



(c) 升壓自耦變壓器

圖 17-3 固定電壓式自耦變壓器  
(圖片來源：Southern Electricals)



## (二) 升壓自耦變壓器原理

圖 17-4(a) 為一部 200 V / 100 V，額定容量 1 kVA 的雙繞組變壓器，計算可得一次側額定電流為 5 A，二次側額定電流為 10 A。

將圖 17-4(a) 變壓器的  $a$  端與  $d$  端用導線連接後，就可改接成如圖 17-4(b) 所示的 200 V / 300 V 自耦變壓器，由  $a$ 、 $b$  兩端外加 200 V 交流電源，則  $c$ 、 $b$  兩端可以提供 300 V 給負載，等效電路如圖 17-4(c) 所示。為了與雙繞組變壓器區別，自耦變壓器的高壓側電壓與電流分別以  $V_H$  及  $I_H$  表示，低壓側電壓與電流分別以  $V_X$  及  $I_X$  表示。

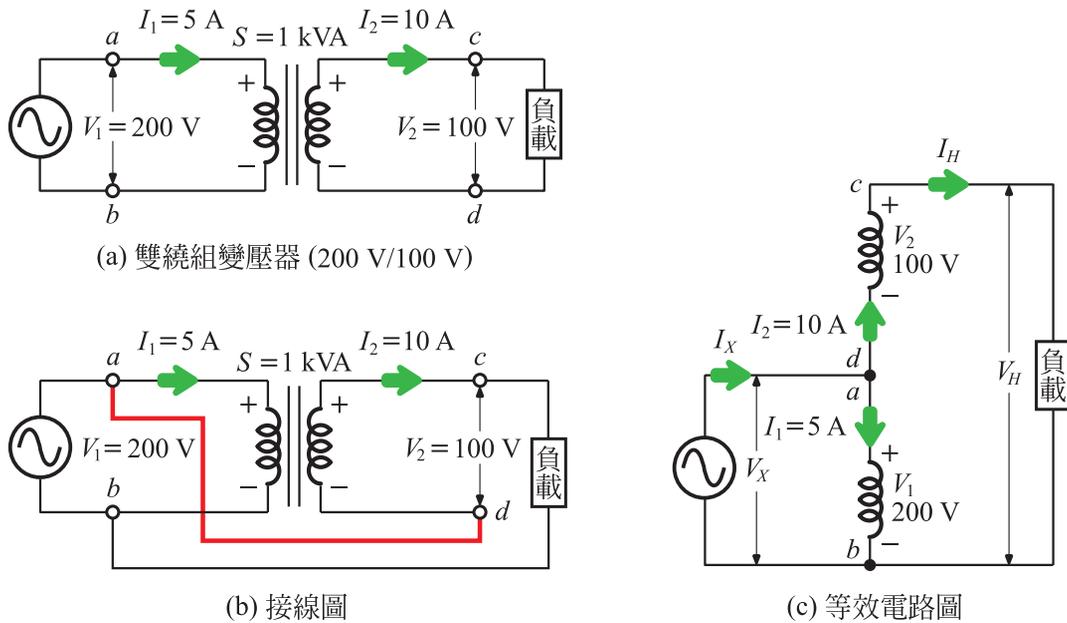


圖 17-4 升壓自耦變壓器 (200 V / 300 V)

由圖 17-4(c) 可知，改接成自耦變壓器後，低壓側額定電壓  $V_X = V_1 = 200$  V，高壓側額定電壓提高為  $V_H = V_2 + V_1 = 300$  V；高壓側額定電流  $I_H = I_2 = 10$  A，低壓側額定電流提升為  $I_X = I_1 + I_2 = 15$  A，額定容量提升為  $S_A = V_H I_H = V_X I_X = 3$  kVA。

若是將圖 17-4(a) 雙繞組變壓器的  $b$  端與  $c$  端連接起來，就可改接成如圖 17-5(a) 所示的 100 V / 300 V 自耦變壓器，由  $c$ 、 $d$  兩端外加 100 V 交流電源，則  $a$ 、 $d$  兩端可以提供 300 V 給負載，其等效電路如圖 17-5(b) 所示。

以圖 17-5(b) 為例，低壓側額定電壓  $V_X = V_1 = 100 \text{ V}$ ，高壓側額定電壓提高為  $V_H = V_2 + V_1 = 300 \text{ V}$ ；高壓側額定電流  $I_H = I_2 = 5 \text{ A}$ ，低壓側額定電流提升為  $I_X = I_1 + I_2 = 15 \text{ A}$ ，額定容量提升為  $S_A = V_H I_H = V_X I_X = 1.5 \text{ kVA}$ 。

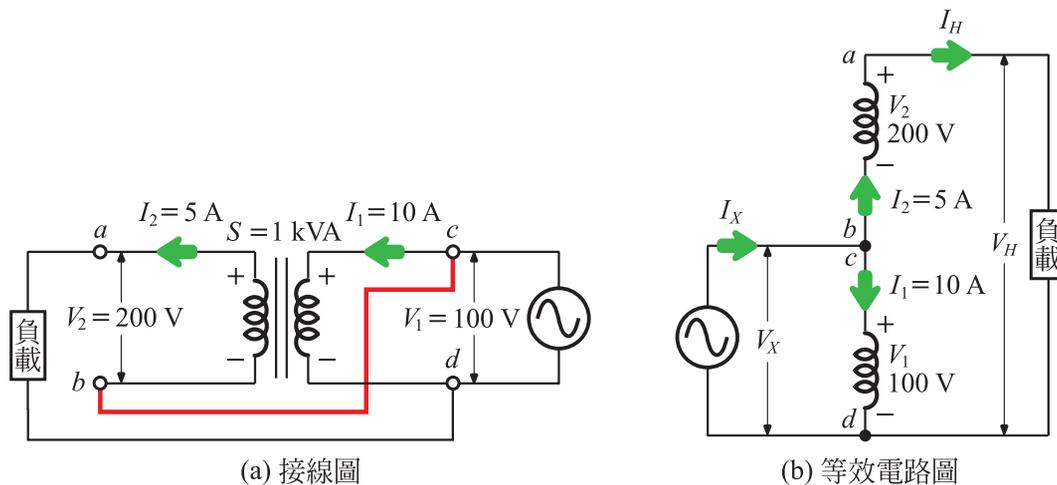


圖 17-5 升壓自耦變壓器 (100 V / 300 V)

### (三) 降壓自耦變壓器原理

自耦變壓器可以依據需求做為升壓或降壓使用。若是將圖 17-4(c) 200 V / 300 V 升壓自耦變壓器的電源與負載端對調，就變成如圖 17-6(a) 所示的 300 V / 200 V 降壓自耦變壓器，輸出容量為 3 kVA。

若是將圖 17-5(b) 100 V / 300 V 升壓自耦變壓器的電源與負載端對調，就變成如圖 17-6(b) 所示的 300 V / 100 V 的降壓自耦變壓器，輸出容量為 1.5 kVA。

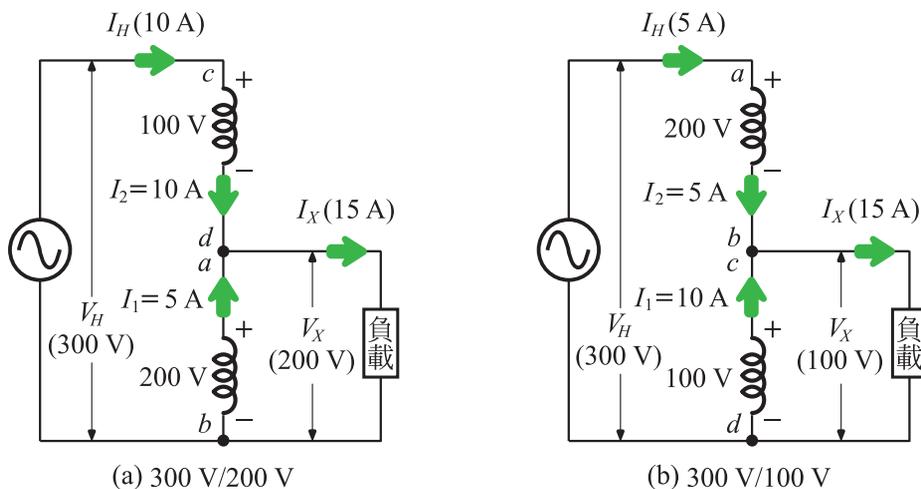


圖 17-6 降壓自耦變壓器



#### (四) 自耦變壓器容量計算

綜合上述，將原本圖 17-4(a) 所示 200 V / 100 V，額定容量 1 kVA 的雙繞組變壓器，經過不同接線後，分別變成 200 V / 300 V、100 V / 300 V、300 V / 200 V 以及 300 V / 100 V 的自耦變壓器，且輸出容量均比原本額定容量增加。

將結果整理後可得一部容量為 ( $S$ ) 的雙繞組變壓器無論接成升壓或是降壓接法，改成自耦變壓器後的容量 ( $S_A$ ) 會變成：

$$S_A = S \left( 1 + \frac{\text{共用繞組電壓}}{\text{非共用繞組電壓}} \right) \quad (17-1)$$

輸出容量變大的原因在於，自耦變壓器除了原本雙繞組變壓器的電磁感應容量 ( $S$ ) 外，還因為高低壓繞組間電流直接流動，所提供的傳導容量 ( $S_D$ )，因此自耦變壓器的容量也可以表示為：

$$S_A = S + S_D \quad (17-2)$$

$S_A$ ：自耦變壓器輸出容量 (VA)

$S$ ：雙繞組變壓器輸出容量、電磁感應容量 (VA)

$S_D$ ：直接傳導容量 (VA)



## 範例

## 01

有一部額定容量 20 kVA，2000 V / 200 V 雙繞組變壓器，改接成 2000 V / 2200 V 之升壓自耦變壓器使用，求自耦變壓器的：

- (1) 輸出容量 (2) 感應容量 (3) 傳導容量  
(4) 輸入額定電流 (5) 輸出額定電流分別為？

解 改接後的自耦變壓器如右圖所示，其中輸入端與輸出端共用繞組位置的電壓值  $V_{ab} = 2000$  V，非共用繞組位置的電壓值  $V_{cd} = 200$  V

- (1) 輸出容量

$$S_A = S \left( 1 + \frac{\text{共用繞組電壓}}{\text{非共用繞組電壓}} \right)$$

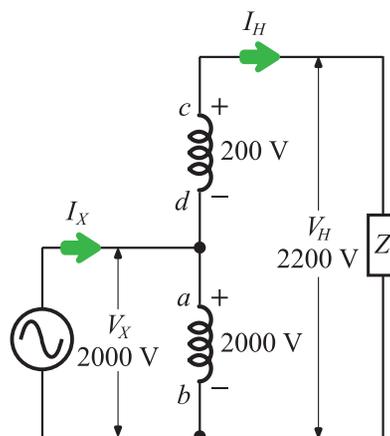
$$= 20 \text{ kVA} \left( 1 + \frac{2000 \text{ V}}{200 \text{ V}} \right) = 220 \text{ kVA}$$

- (2) 感應容量  $S = 20$  kVA ( 原本的容量 )

- (3) 傳導容量  $S_D = S_A - S = 220 - 20 = 200$  kVA ( 多出來的容量 )

(4) 輸入額定電流  $I_X = \frac{S_A}{V_X} = \frac{220 \text{ kVA}}{2000 \text{ V}} = 110 \text{ A}$

(5) 輸出額定電流  $I_H = \frac{S_A}{V_H} = \frac{220 \text{ kVA}}{2200 \text{ V}} = 100 \text{ A}$



範例

02

將額定容量 20 kVA，2000 V / 200 V 雙繞組變壓器，改接成 2200 V / 200 V 之降壓自耦變壓器使用，求自耦變壓器的：

- (1) 輸出容量 (2) 感應容量 (3) 傳導容量  
 (4) 輸入額定電流 (5) 輸出額定電流分別為多少？

解 改接後的自耦變壓器如圖所示，其中共用繞組電壓值  $V_{cd} = 200 \text{ V}$ ，非共用繞組電壓值  $V_{ab} = 2000 \text{ V}$

- (1) 輸出容量

$$S_A = S \left( 1 + \frac{\text{共用繞組電壓}}{\text{非共用繞組電壓}} \right)$$

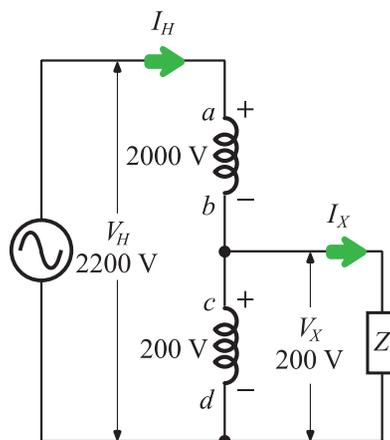
$$= 20 \text{ kVA} \left( 1 + \frac{200 \text{ V}}{2000 \text{ V}} \right) = 22 \text{ kVA}$$

- (2) 感應容量  $S = 20 \text{ kVA}$  ( 原本的容量 )

- (3) 傳導容量  $S_D = S_A - S = 22 - 20 = 2 \text{ kVA}$  ( 多出來的容量 )

- (4) 輸入額定電流  $I_H = \frac{S_A}{V_H} = \frac{22 \text{ kVA}}{2200 \text{ V}} = 10 \text{ A}$

- (5) 輸出額定電流  $I_X = \frac{S_A}{V_X} = \frac{22 \text{ kVA}}{200 \text{ V}} = 110 \text{ A}$



比較範例 01 與 02 後可得，自耦變壓器若是輸入電壓與輸出電壓相差越多，則輸出容量增加幅度越小，實際運用時，自耦變壓器的變壓比大多在 1.05 : 1 ~ 1.25 : 1 之間。

## (五) 自耦變壓器的特性

### 1. 自耦變壓器的優點

- (1) 以小的固有容量做大容量的輸出。
- (2) 節省用銅量與鐵心，較為經濟。
- (3) 銅損及鐵損較小，效率高。
- (4) 漏磁電抗較小，電壓調整率佳。

### 2. 自耦變壓器的缺點

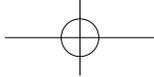
- (1) 高低壓繞組之間沒有電氣隔離，絕緣處理困難。
- (2) 漏磁電抗小，發生短路時，故障電流極大。

### 3. 自耦變壓器的用途

- (1) 補償線路壓降的大容量輸電變壓器。
- (2) 大型感應馬達的起動器 ( 降低起動電壓、以限制起動電流 ) 。
- (3) 傳統日光燈之安定器。

### 隨堂練習

- ( ) 1. 有一部 5 kVA、240 V / 480 V 的單相變壓器連接成 240 V / 720 V 的自耦變壓器，則輸出容量為何？  
(A) 7.5 kVA (B) 10 kVA (C) 15 kVA (D) 30 kVA
- ( ) 2. 額定為 10 kVA、220 V / 110 V 的雙繞組單相變壓器，改接成 330 V / 220 V 的降壓型自耦變壓器，則自耦變壓器的傳導容量為何？  
(A) 30 kVA (B) 20 kVA (C) 15 kVA (D) 10 kVA。
- ( ) 3. 下列何者不是自耦變壓器的特點？  
(A) 漏磁電抗可減少 (B) 容量可提高  
(C) 效率可提高 (D) 變壓比越高、性能越佳。



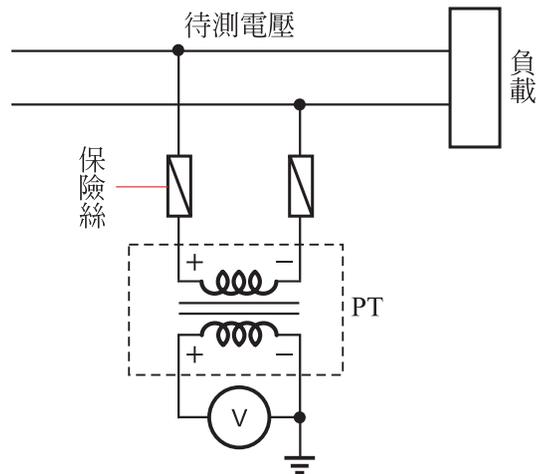
## 17-2 比壓器

比壓器 (potential transformer, PT)，外觀如圖 17-7(a) 所示，其原理與降壓變壓器相同，但二次側額定電壓一定為 110 V，接線圖如 17-7(b) 所示，一次側與待測線路並聯，二次側與伏特表並聯，使用比壓器可以將高電壓隔離，再以精準的變比關係，提供給需要電壓的儀表 ( 電壓表、瓦特表 ) 或是保護電驛 ( 如過電壓電驛、低電壓電驛 ) 使用。除了擴大電壓表的量測範圍，也可以確保儀表操作人員的安全。

為了精準量度電壓，比壓器設計特別要求精確度，鐵心使用高導磁係數材料，繞組電阻及漏電抗及相角差越小越好，容量則以伏安 (VA) 為單位。



(a) 比壓器外觀



(b) 比壓器接線

圖 17-7 比壓器外觀與接線 ( 圖片來源：巧力工業 )

比壓器使用時需注意以下事項：

1. 一次側與待測之高壓線路並聯，並加裝保險絲以保護比壓器。
2. 二次側與低壓儀表或保護電驛之電壓線圈並聯後，一端接地以防止人員感電。
3. 二次側不可以短路，以免電流過大，燒毀比壓器。
4. 二次側配線使用  $2.0 \text{ mm}^2$  紅色絞線。

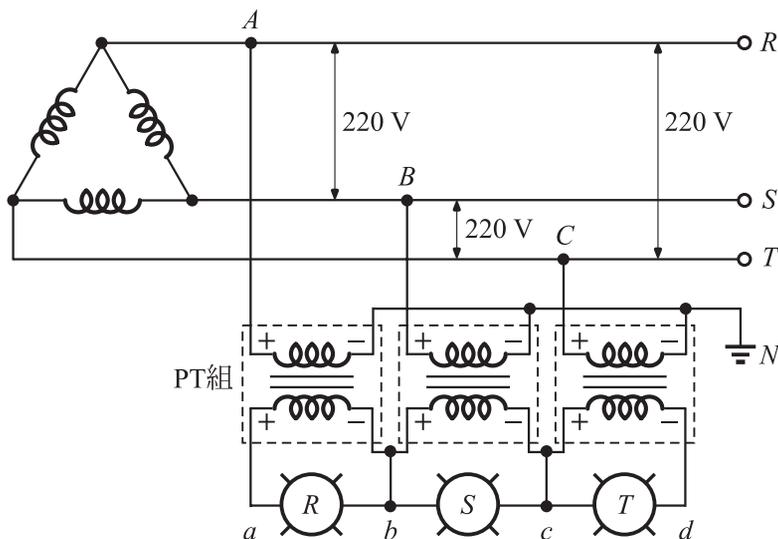
實務上常使用三個單相比壓器做 Y- 開 $\Delta$ 連接，稱為接地比壓器 (GPT)，可做為接地故障指示器之電源，也可接上接地過電壓電驛 (OVG)，原理如範例 03 所示。

## 範例

## 03

如下圖所示，已知比壓器之規格為 220 / 110 V，1 kVA，求：

- (1) 高壓側正常未接地時  $V_{ab}$ 、 $V_{bc}$ 、 $V_{cd}$ 、 $V_{ad}$  之電壓；
- (2) 若 A 相接地時  $V_{ab}$ 、 $V_{bc}$ 、 $V_{cd}$ 、 $V_{ad}$  之電壓。



- 解 (1)  $V_{ab} = V_{bc} = V_{cd} = \frac{110}{\sqrt{3}} = 63.5 \text{ V}$   
 $V_{ad} = \bar{V}_{ab} + \bar{V}_{bc} + \bar{V}_{cd} = 0 \text{ V}$  (各相相差 120 度)
- (2) 若 A 相接地， $V_{ab} = 0 \text{ V}$ 、 $V_{bc} = V_{cd} = 110 \text{ V}$   
 $V_{ad} = \bar{V}_{bc} + \bar{V}_{cd} = 110\sqrt{3} = 190 \text{ V}$  ( $V_{bc}$  與  $V_{cd}$  相差 60 度)

## 隨堂練習

- ( ) 1. 有關比壓器的連接方式，下列敘述何者正確？
  - (A) 一次側與線路並聯，二次側連接電壓表
  - (B) 一次側與線路串聯，二次側連接電壓表
  - (C) 一次側與線路並聯，二次側連接電流表
  - (D) 一次側與線路串聯，二次側連接電流表。
- ( ) 2. 比壓器的電壓比為 30 : 1，低壓側之電壓表指示為 110 伏特時，高壓側電壓為何？
  - (A) 33 kV (B) 3.3 kV (C) 330 V (D) 33 V。

## 17-3 比流器

比流器 (current transformer, CT)，根據構造不同可分成三種型式：

1. 繞線式：外觀如圖 17-8(a)，與普通變壓器相同，一、二次側均以線圈繞置，變流比固定，準確度高。
2. 貫穿式：外觀如圖 17-8(b)，主線路穿進中央孔洞，匝數可依情況改變，二次側以線圈繞置。
3. 套管式：簡稱 BCT，外觀如圖 17-8(c)，與貫穿式原理相同，但貫穿匝數不可改變。



圖 17-8 比流器外觀 (圖片來源：巧力工業)

比流器原理與升壓變壓器相同，但二次側額定電流一定為 5 A，接線圖如 17-9(a) 所示，一次側與待測線路串聯，二次側與電流表連接。圖中使用一台 100 / 5 A 的比流器，倘若一次側電流為 80 A，透過 100 / 5 A 的比流器，將電流降低為 4 A 後流入電流表，搭配圖 17-9(b) 的 100 A / 5 A 的電流表，指針會指示在 80 A 位置。

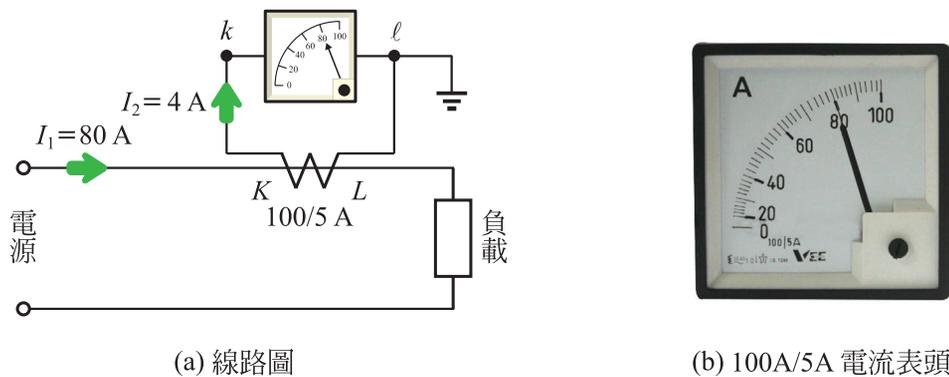


圖 17-9 比流器原理與接線

比流器使用時需注意以下事項：

1. 一次側與待測線路串聯，二次側與電流表或保護電驛之電流線圈串聯，一端接地以防止人員感電。
2. 貫穿式的變流比與一次側（電源線）貫穿導線數成反比。
3. 二次側不可以開路，以免感應高電壓發生危險，更換電流表時，二次側需先使用導線短路。
4. 二次側配線使用  $2.0 \text{ mm}^2$  黑色絞線。

比流器有多種運用方式，列舉幾項如下：

#### (1) 比流器 U 接線

三相平衡電源系統，可以使用二個比流器搭配電流表，即可測量三相電流，如圖 17-10 所示，不考慮比流器匝數比，則：

$A_1$  電流表指示： $R$  相之電流 ( $\bar{I}_R = I\angle 0^\circ$ )

$A_2$  電流表指示： $T$  相之電流 ( $\bar{I}_T = I\angle 120^\circ$ )

$A_3$  電流表指示： $R$  相電流與  $T$  相電流向量和，其值等於  $S$  相電流

(  $A_3 = \bar{I}_R + \bar{I}_T = I\angle 0^\circ + I\angle 120^\circ = I\angle 60^\circ (= -\bar{I}_S)$  )

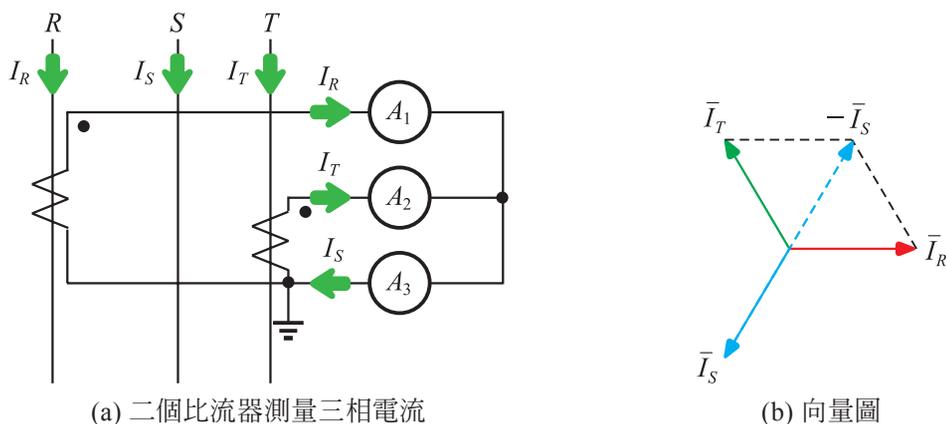


圖 17-10 比流器之三相連接



## (2) 零相比流器 (ZCT)

可以檢測線路是否漏電，將三相電源中的三條電源線穿入比流器中，當三相電流平衡時，三相向量和為 0，比流器鐵心沒有磁通，二次電流為 0。若系統發生漏電時，向量和不為 0，比流器的繞組產生感應電勢，就可以偵測系統發生漏電。

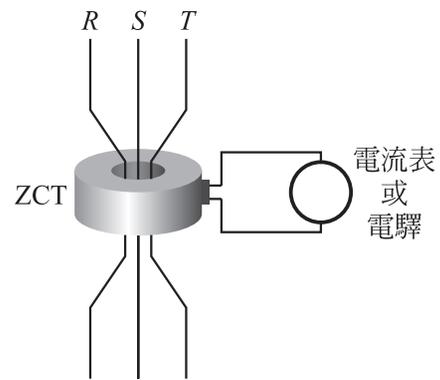


圖 17-11 零相比流器 (ZCT)

## (3) 三相電力監視

圖 17-12 利用比壓器與比流器，將三相用電設備所使用的高壓大電流轉換成低壓小電流後，提供給各式儀表監看負載用電狀態，再配合伏特表切換開關 (VS) 或電流表切換開關 (AS) 就可以分別指示各相電壓與電流值。

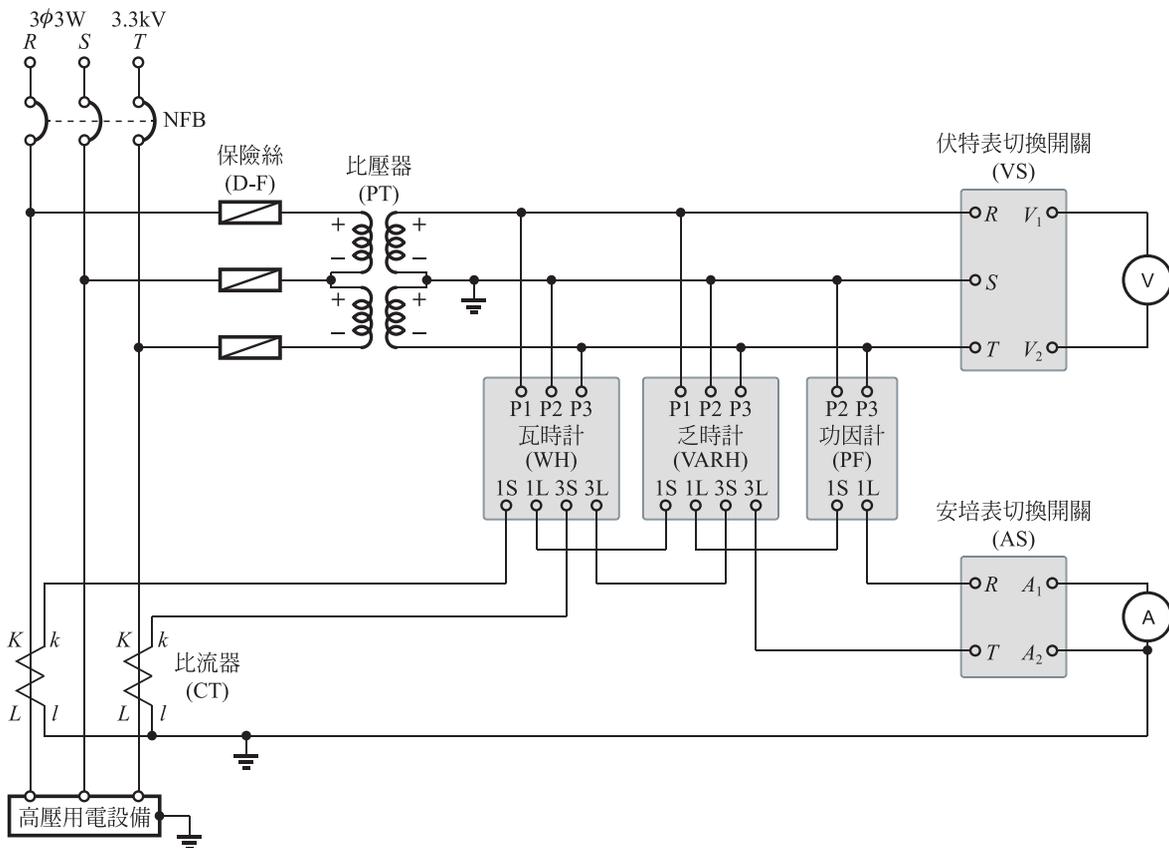


圖 17-12 比壓器與比流器的運用

## 隨堂練習

( ) 1. 使用 200 A / 5 A 的比流器 (C.T.) 量測三相平衡系統之線路電流，若一次側貫穿匝數 1 匝，當二次側的安培表讀值為 2 安培，線路電流為何？

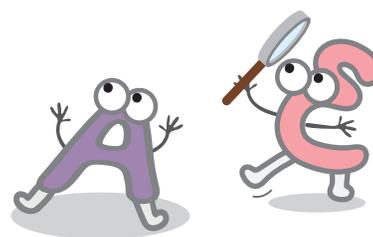
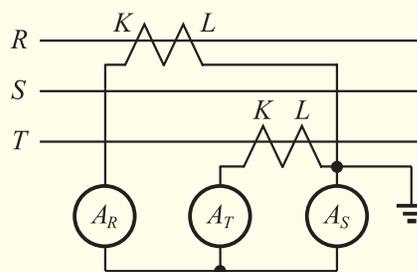
(A) 100 A (B) 80 A (C) 40 A (D) 20 A。

( ) 2. 右圖為三相平衡電源系統，已知電源電流

$i_R = i_S = i_T = 40$  A，比流器變流比為 50 A/5 A，

則  $A_R$  與  $A_S$  與  $A_T$  安培表指示值分別為何？

(A) 4 A、4 A、4 A (B) 4 A、4 A、8 A  
(C) 5 A、5 A、5 A (D) 5 A、5 A、10 A。



# 單元摘要

## 第十三章

1. 理想狀態下，變壓器將電壓降低，電流成正比增加；若將電壓升高，電流成反比降低。
2. 變壓器感應電勢有效值  $E_{eff} = 4.44 f N \phi_m$
3. 理想變壓器匝數比  $a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1} = \sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}}$ 。
4. 變壓器高壓繞組，電流小，線徑細，匝數多。低壓繞組電流大，線徑粗，匝數少。
5. 無載（激磁）電流  $I_0 = \sqrt{I_e^2 + I_m^2}$ ，其中鐵損電流（ $I_e$ ）形成鐵芯發熱現象、磁化電流（ $I_m$ ）代表產生磁通現象。
6. 漏磁通會導致變壓器產生相角差、無載電流增加、功率因數降低、電壓調整率變大。將一、二次繞組交互繞製可以降低影響。

## 第十四章

7. 變壓器電壓調整率  $V.R. \% = \frac{V_{2(NL)} - V_{2(FL)}}{V_{2(FL)}} \times 100\%$ ，其中無載時二次側電壓  $V_{2(NL)} = \sqrt{(V_2 \cos \theta_2 + I_2 R_{e2})^2 + (V_2 \sin \theta_2 \pm I_2 X_{e2})^2}$ ，電感性用+號，電容性用-號。
8. 變壓器電壓調整率  $V.R. \% = p \cos \theta_2 \pm q \sin \theta_2$ ，電感性用+號，電容性用-號。
9. 大型變壓器高壓側會加裝分接頭，以維持輸出電壓穩定。計算利用匝數比  $\frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2}$  關係。
10. 變壓器的鐵損  $P_i = K \times \frac{V^2}{f}$ ，其中包含 (1) 磁滯損  $P_h = K_h \times \frac{V^2}{f}$  (2) 渦流損  $P_e = K_e \times V^2$  兩部分。
11. 變壓器效率  $\eta = \frac{P_o}{P_{in}} = \frac{P_o}{P_o + P_{loss}}$ ，由於沒有轉動部分及空氣隙，效率高達 95 % 以上。
12. 變壓器銅損值等於鐵損時效率最高，此時負載比例為  $\frac{1}{m} = \sqrt{\frac{\text{鐵損}}{\text{滿載銅損}}}$ 。

## 第十五章

13. 變壓器極性是指兩繞組瞬間電壓相位關係，分為加極性與減極性。依 CNS 規定我國之變壓器須為減極性。
14. 單相三線式是家庭用電主要供應方式，其電壓關係為  $V_{AN} = V_{BN} = 110 \text{ V}$ ， $V_{AB} = 220 \text{ V}$ 。
15. 三相星形 (Y) 連接特色為：線電壓 =  $\sqrt{3}$  相電壓，線電壓相位超前相電壓  $30^\circ$  ( $V_L = \sqrt{3}V_p \angle 30^\circ$ )。線電流 = 相電流 ( $I_L = I_p$ )。
16. 三角形 ( $\Delta$ ) 連接特色為：線電壓 = 相電壓 ( $V_L = V_p$ )。線電流 =  $\sqrt{3}$  相電流，線電流落後相電流  $30^\circ$  ( $I_L = \sqrt{3}I_p \angle -30^\circ$ )。
17. Y- $\Delta$  接降壓效果佳，適用於需要降壓場所。 $\Delta$ -Y 接線效果佳，適用於需要升壓場所。
18. V 連接特色為：線電壓 = 相電壓 ( $V_L = V_p$ )，線電流 = 相電流 ( $I_L = I_p$ )，變壓器採用 V 連接時每台利用率為 86.6%。兩台單相變壓器做 V-V 接線的供電容量為三台變壓器做  $\Delta$ - $\Delta$  之 57.7%。
19. 三相四線系統中，採用 Y- $\Delta$  連接時若是一台變壓器故障，可改成開 Y-開  $\Delta$  接線繼續供電，供電容量剩下 57.7%。
20. 變壓器並聯運用時，額定電壓相同、極性連接正確，內部阻抗與容量成反比。

## 第十六章

21. 開路試驗目的在測量變壓器無載電流、鐵損、激磁電導、激磁電納及無載功率因數。一般會將高壓側開路，在低壓側接上儀表後加入額定電壓。
22. 短路試驗目的在測量變壓器之滿載銅損及繞組電阻、繞組電抗等。一般會將低壓側短路，在高壓側接上儀表後加入額定電流。

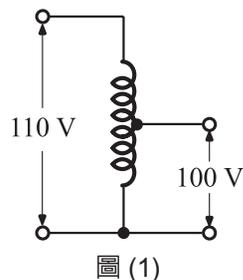
# 單元摘要

## 第十七章

23. 自耦變壓器又稱為單繞組變壓器，可做為升壓或降壓使用。實際運用時，變壓比大多在 1.05 : 1 ~ 1.25 : 1 間。
24. 容量為  $S$  的雙繞組變壓器改接成自耦變壓器後，容量變成
$$S_A = S \left( 1 + \frac{\text{共用繞組電壓}}{\text{非共用繞組電壓}} \right)。$$
25. 自耦變壓器輸出容量 ( $S_A$ ) 等於電磁感應容量 ( $S$ ) 加上直接傳導容量 ( $S_D$ )。
26. 自耦變壓器的優點：以小容量做大輸出，節省用銅量與鐵心，損失較小，效率高，電壓調整率佳。
27. 自耦變壓器的缺點：高低壓繞組間沒有電氣隔離，絕緣處理困難。漏磁電抗小，短路時故障電流極大。
28. 比壓器 (PT) 可將高電壓隔離，再以精準的變比關係，提供電壓給儀表或是保護電驛使用。二次側額定電壓為 110 V。
29. 比壓器一次側與待測線路並聯；二次側與伏特表並聯，一端接地以防止人員感電。
30. 比壓器使用時二次側不可以短路，以免電流過大燒毀比壓器。配線使用 2.0 mm<sup>2</sup> 紅色絞線。
31. 比流器 (CT) 原理與升壓變壓器相同，將電流降低後提供給儀表或保護電驛使用。二次側額定電流為 5 A。
32. 比流器一次側與待測線路串聯；二次側與電流表串聯，一端接地以防止人員感電。
33. 比流器二次側不可以開路，以免危險或是燒毀比流器。配線使用 2.0 mm<sup>2</sup> 黑色絞線。

## 一、選擇題

- 17-1** ( ) 1. 關於自耦變壓器，下列敘述何者正確？  
 (A) 體積小、成本高、但效率較普通變壓器低  
 (B) 體積小、成本低、但效率較普通變壓器高  
 (C) 體積大、成本高、但效率較普通變壓器高  
 (D) 激磁電流比普通變壓器高。
- ( ) 2. 有一部單相 10 kVA、220 V / 110 V 雙繞組變壓器，接成 220 V / 330 V 的升壓型自耦變壓器，則自耦變壓器的額定輸出容量為何？  
 (A) 50 kVA (B) 40 kVA (C) 30 kVA (D) 15 kVA。
- ( ) 3. 原為雙繞組 1 kVA、110 V / 10 V 變壓器接成自耦式變壓器，將 120 V 之電源變電供給之 110 V 負載，此時所能供給的額定容量為多少 kVA？ (A) 9 (B) 10 (C) 11 (D) 12。
- ( ) 4. 有一台 10 kVA、2400 V / 240 V、60 Hz 單相變壓器，接為 2640 V / 240 V 之自耦變壓器，則自耦變壓器高壓側的額定電流應為何？  
 (A) 3.79 A (B) 4.17 A (C) 41.7 A (D) 45.8 A。
- ( ) 5. 同上題，自耦變壓器低壓側的額定電流應為何？  
 (A) 3.79 A (B) 4.17 A (C) 41.7 A (D) 45.8 A。
- ( ) 6. 有一部 60 Hz，200 V / 100 V 單相變壓器，改接成 300 V / 100 V 自耦變壓器後容量變為 30 kVA，則原本變壓器的容量為何？  
 (A) 10 kVA (B) 20 kVA (C) 30 kVA (D) 40 kVA。
- ( ) 7. 某一負荷容量為 120 kVA、550 V / 660 V 之自耦變壓器係由普通雙繞組變壓器改接而成，則此雙繞組變壓器之定額為  
 (A) 120 kVA、660 / 550 V (B) 120 kVA、660 / 110 V  
 (C) 20 kVA、550 / 110 V (D) 20 kVA、660 / 550 V。
- ( ) 8. 如圖 (1) 所示為 110 V / 100 V 降壓自耦變壓器，滿載時可以供給 3300 VA、100 V 之負載，試求自耦變壓器之感應容量和傳導容量分別為多少 VA？  
 (A) 300、3000 (B) 300、3300  
 (C) 3000、300 (D) 3300、300。

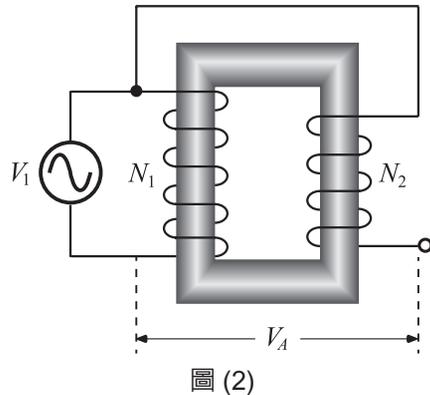


## 自我評量

- ( ) 9. 一部 220 V / 55 V 理想降壓自耦變壓器，二次側供電給 55 V、2.2 kW 的負載，則下列敘述何者錯誤？
- (A) 負載電流 40 A (B) 串聯繞組流過的電流 10 A  
(C) 共同繞組流過的電流 60 A (D) 串聯繞組端的電壓 165 V。
- ( ) 10. 將一部 5 kVA、240 V / 480 V 單相變壓器改接成 240 V / 720 V 自耦變壓器後，若負載電壓為 720 V，當供給 80 % 負載且功率因數為 0.8 落後時，自耦變壓器輸出功率約為何？
- (A) 1.8 kW (B) 2.8 kW (C) 3.8 kW (D) 4.8 kW。

- ( ) 11. 有一部理想變壓器依據圖 (2) 連接後，一次側匝數為  $N_1$ ，二次側匝數為  $N_2$ ，一次側外加電壓  $V_1$ ，則  $V_A$  兩端電壓應為何？

- (A)  $\frac{N_1 - N_2}{N_1} V_1$  (B)  $\frac{N_1 + N_2}{N_1} V_1$   
(C)  $\frac{N_1 - N_2}{N_2} V_1$  (D)  $\frac{N_1 + N_2}{N_2} V_1$ 。



- 17-2** ( ) 12. 比壓器的額定電壓比為 30 : 1，低壓側之電壓表指示為 110 V 時，則高壓側電壓為 (A) 33 kV (B) 3.3 kV (C) 330 V (D) 33 V。
- ( ) 13. 比壓器應用時，一次側與待測線路並聯，二次側要連接多個儀表時，儀表間的接線應該採用 (A) 串聯 (B) 並聯 (C) Y 接 (D)  $\Delta$  接。
- ( ) 14. 有關比壓器之敘述，下列何者正確？
- (A) 比壓器之二次側額定電壓為 110 V，且二次側須短路或接於電流表  
(B) 比壓器之二次側額定電流為 5 A，且二次側須開路或接於電壓表  
(C) 比壓器之二次側額定電流為 5 A，且二次側須短路或接於電流表  
(D) 比壓器之二次側額定電壓為 110 V，且二次側須開路或接於電壓表。

## 自我評量

- ( ) 15. 由三個單相比壓器組成的接地比壓器 (GPT)，比壓器二次側繞組的接法方式為何？ (A) Y 接 (B)  $\Delta$  接 (C) V 接 (D) 開 $\Delta$ 接。
- ( ) 16. 三相不接地系統，以 GPT( 接地比壓器 ) 搭配指示燈作為接地故障檢測，若是 S 相發生完全接地事故時，則 R 相、S 相、T 相指示燈的狀態為何？
- (A) S 相燈熄滅，R、T 相燈全亮  
(B) S 相燈全亮，R、T 相燈熄滅  
(C) S 相燈閃爍，R、T 相燈熄滅  
(D) S 相燈全亮，R、T 相半亮。
- 17-3** ( ) 17. 系統中更換電壓表及電流表時，比壓器 PT 及比流器 CT 二次側應先行處置為
- (A) PT、CT 皆短路 (B) PT 短路、CT 開路  
(C) PT、CT 皆開路 (D) PT 開路、CT 短路。
- ( ) 18. 使用貫穿式比流器時，當一次側貫穿為 1 匝時之變流比為 100 : 5，若是將一次側貫穿成 2 匝時，變流比變為何？
- (A) 200 : 5 (B) 100 : 10 (C) 50 : 10 (D) 50 : 5。
- ( ) 19. 若將比流器 CT 二次側短路，其一次側的電流為何？
- (A) 增大 (B) 不變 (C) 減小 (D) 先增大後減小。
- ( ) 20. 100 A / 5 A 比流器，一次側貫穿匝數為 2 匝，現比流器二次側接 50 / 5 安培表，則此比流器一次側之貫穿匝數應修正為
- (A) 1 (B) 2 (C) 3 (D) 4。
- ( ) 21. 一部含有 PT 和 CT 之單相瓦特計，已知 PT 和 CT 之變換比各為 3300 V / 110 V 和 100 A / 5 A，若瓦特計讀數為 60 W，則該電路之實際使用功率為何？
- (A) 60 kW (B) 36 kW (C) 12 kW (D) 6 kW。

# 自我評量

- ( ) 22. 下列有關變壓器之敘述，何者正確？  
 (A) 比流器在使用時二次側不得開路  
 (B) 多台單相變壓器並聯時，每一台變壓器容量一定要相等  
 (C) 自耦變壓器具有電氣隔離之效果  
 (D) 內鐵式比外鐵式變壓器更適用於低電壓高電流場合。
- ( ) 23. 如圖 (3) 所示利用 200 A / 5 A 之 CT 測量三相平衡電路線路電流，已知電流表讀數為 3 A，則一次線路電流為何？  
 (A) 600 A (B) 240 A (C) 180 A (D) 120 A。
- ( ) 24. 三個電流計與二個比流器測定三相平衡負載，電流結線方式如圖 (4) 所示，則各電流計之讀值為  
 (A)  $A_1 = \sqrt{3}I$ 、 $A_2 = I$ 、 $A_3 = I$  (B)  $A_1 = I$ 、 $A_2 = \sqrt{3}I$ 、 $A_3 = I$   
 (C)  $A_1 = I$ 、 $A_2 = I$ 、 $A_3 = \sqrt{3}I$  (D)  $A_1 = I$ 、 $A_2 = I$ 、 $A_3 = I$ 。

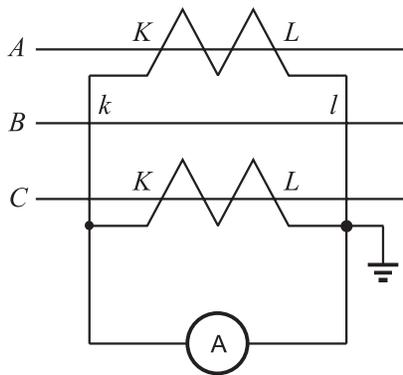


圖 (3)

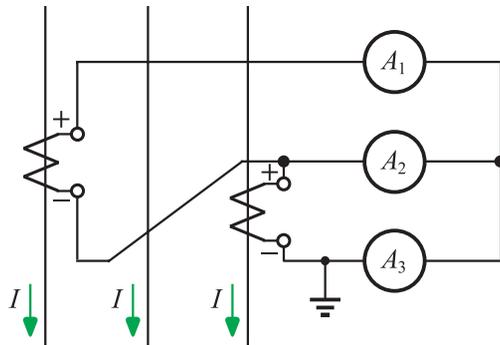


圖 (4)

## 二、問答題

1. 一台 25 kVA，2200 V / 220 V 之單相變壓器連接成 2420 V / 220 V 降壓自耦變壓器，當負載功率因數為 0.95，滿載效率為 0.98，試求此自耦變壓器：
  - (1) 容量為多少 kVA、
  - (2) 輸出功率為多少、
  - (3) 總損失為多少？