

電世界電工技術叢書
變壓器的運用與檢修

祝平編 蔡頤等校

電世界出版社

變壓器的運用與檢修

編著者 祝 平

校閱者 蔡 頤 奚紹申
梁伯高

電 世 界 出 版 社

內 容 介 紹

本書以簡明扼要的方式，說明變壓器的用途，型式，構造，損失，效率，調整率，連接法，運行特性，溫昇和參考數字，故障和處理辦法，試驗，變壓器油，保護裝置，檢修方法等共九章；可供從事電工技術工作者，特別是輸配電工作者，的參考。

變 壓 器 的 運 用 與 檢 修

編 著 者	祝	平
校 閱 者	蔡 頤 奚紹申 梁伯高	
校 對 者	賈 文 玉 翁 蘋 心	
出 版 者	電 世 界 出 版 社	
	上海圓明園路 169 號 203-206 室	
印 刷 者	中 和 印 刷 廠	
	上海淮安路 727 弄 30 號	

版 權 所 有 ★ 不 可 翻 印

專—10: 0·12 開本: $762 \times 1067, \frac{1}{2}_5$ 印張: $5 \frac{3}{2}_5$

98,000 千字 定價 ¥ 7,600 元

1954 年 10 月第一版第一次印刷 印數 0001—2000

上海市書刊出版業營業許可證零陸伍號

目 錄

第一章 變壓器的用途、型式和構造	1—8
第一節 變壓器的用途和簡單原理	1
第二節 變壓器的種類和型式	4
第三節 變壓器的構造	7
第二章 變壓器的損失、效率和調整率	9—17
第一節 變壓器的損失	9
第二節 變壓器的效率	12
第三節 變壓器的調整率	16
第三章 變壓器的連接法和運行特性	18—38
第一節 變壓器連接法的分類	18
第二節 雙線捲變壓器的運行特性	21
第三節 單線捲自耦變壓器的運行特性	31
第四章 變壓器的運行、溫昇和參考數據	39—64
第一節 變壓器的正常運行和檢查	39
第二節 電壓和週波變化對變壓器的影響	42
第三節 變壓器的運行和溫昇關係	43
第四節 根據線捲內部「熱點」決定過負載的量和時間	46
第五節 變壓器的並聯運行	54
第五章 變壓器故障的現象、原因、和處理辦法	65—76
第一節 變壓器的一般故障現象	65

第二節 變壓器故障的原因·····	67
第三節 故障的預防和處理·····	76
第六章 變壓器的試驗·····	77—93
第一節 試驗項目·····	77
第二節 試驗前的準備·····	78
第三節 試驗步驟和方法·····	79
第七章 變壓器油·····	94—97
第一節 變壓器油的規格·····	94
第二節 變壓器油含水的影響和檢查法·····	96
第三節 變壓器油的過濾法·····	97
第八章 變壓器的保護裝置·····	98—104
第一節 過負載保護·····	98
第二節 短路過電流保護·····	99
第三節 差動保護·····	100
第四節 氣體繼電器保護裝置·····	102
第九章 變壓器的檢修方法和質量標準·····	105—121
第一節 檢修年限和日期·····	105
第二節 檢修項目和要求條件·····	106
第三節 變壓器滲漏的修補方法·····	109
第四節 變壓器墊料的更換方法·····	110
第五節 變壓器的乾燥方法·····	111
附錄·····	122—123

第一章

變壓器的用途、型式和構造

第一節 變壓器的用途和簡單原理

變壓器俗稱方棚，在街頭的電桿上，我們都能看到它。它是電力工業中最重要的設備之一，也是在電氣的工業中不可缺少的東西。靠了它，才能方便而又經濟地將電力輸送到任何一個需用的地方，以及構成穩定的電力網系統。因為一般大中容量發電機發出的電源電壓，既不適合於工業用電或民用電，也不能經濟地輸送至較遠的用電場合；只有利用變壓器作適當的變換，才能使我們合適而又方便地利用在他處所發生之電力。

根據各種不同的用途，變壓器可以具有各種不同的構造形式，例如作指示用的、作整流用的、作變換電壓用的和作變換電流用的變壓器等。根據一般的情況。變壓器的構造形式，可以分為以下幾種：

1. 儀表用互感器：主要用在配電板（司路屏）的各種儀表上，因為在主電路上的電壓太高，或電流太大，如果直接通至配電板而加以操縱及指示電表，不但困難，而且也不安全。所以就利用“儀表用互感器”將電壓或電流作適當變換（一般將電壓變至 100 伏，電流變至 5 安）再引至保護設備和指示表計。根據作用的不同，又可分它們為電壓互感器（P.T.）和電流互感器（C.T.）兩種。

2. 恆流變壓器：這種變壓器可以保持副路（次級）上的電流恆定不變。它的主線捲（初級）和副線捲（次級）間距離可以變動。藉以改變磁路

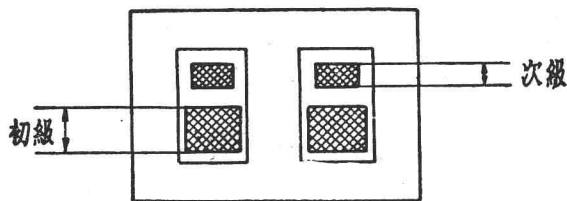


圖1 恒流變壓器示意圖

中的漏磁而保持副線捲中一定的感應電勢，維持原來的電流量。當副路中串聯負載減少時，電流就將增加；因此，主副線捲間的推拒力增大，使兩線捲分開，而線捲間漏磁也隨之增加；相連到副線捲中的磁通量相對地減少，使副捲中感應電勢降低，因而保持了副路上電流的衡定（見圖1）。

3. 恆壓變壓器：就是我們常用於電力變換上的變壓器；也就是俗稱方棚的一種。根據線捲纏繞的不同，這種變壓器又可分為：

(1) 自耦變壓器：即單線捲變壓器；它每相只有一個線捲，主、副（初、次）線捲都共用一個。由於價格低廉（指同容量的變壓器而言），在電站上用得很多，它的變換容量關係是：

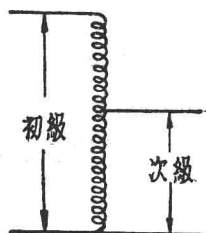


圖2 自耦變壓器示意圖

$$\frac{\text{實際構造的容量(仟伏安)}}{\text{可變換的容量(仟伏安)}} = 1 - \frac{1}{R} \quad R = \frac{\text{高壓側電壓(伏)}}{\text{低壓側電壓(伏)}} = \text{變壓比}$$

從公式中，我們可以知道變壓比愈小，就愈經濟；一般變壓比超過 2 時，就不合算了。它的線捲示意圖如圖 2 所示。

(2) 雙線捲變壓器：是一般常用的電力變壓器；每相有兩個線捲，一個是主線捲（初級），另一個是副線捲（次級），它的變壓比和主副線捲匝數多少有關，即：

$$\text{變壓比} = \frac{\text{主線捲匝數}}{\text{副線捲匝數}}$$

(3) 三線捲變壓器：爲了使變壓器的應用範圍廣一點。每相可再加繞一個線捲，構成三線捲變壓器；在輸電網中爲了方便和經濟起見，常用這種變壓器，其線捲示意圖如圖 3。在本書中所要談到的都是一些有關單雙線捲式恆壓變壓器的問題，至於三線捲的變壓器，因爲用得較少，所以不作討論。

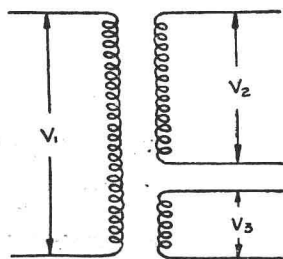


圖 3 三線捲變壓器示意圖

變壓器之所以能夠根據我們的要求合適地變換電壓，是利用了電磁感應的定律。假如我們放置兩個線捲在可以互相感應的地方；當其中一個線捲通入電流時，在這線捲中就產生磁通量，並且相連到第二個線捲中；當第一個線捲中電流發生變化時，磁通量和磁力線方向也隨之改變，則第二個線捲被相連的磁通量和磁力線方向也將改變，因而在第二線捲的導線上被感應而產生電勢。這被感應的電勢可以輸送電流給接在第二個線捲上的負載，這就是變壓器的基本原理。第二線捲內感應電壓值爲：

$$E = \frac{4 \cdot f \cdot n \cdot \phi \cdot T}{10^8}$$

其中 E 是均方根電壓值。

f 是感應電波的波形係數（在正弦波中爲 1.11）。

n 是每秒中磁力線方向變換的次數，週率。

ϕ 是通過線捲中的磁力線數目。

T 是線捲的匝數。

在圖 4 的變壓器簡單向量圖中：

E_{ap} 是接受電壓線捲的端電壓。

i_m 是產生磁力線所需要的電流。

E_p 是可以感應的初級感應電壓值。

i_{il} 是變壓器內矽鋼片渦流損失等所需要的電流。

i_{nl} 是 i_m 和 i_{il} 的向量和。

E_s 是感應到次級的感應電壓。

e_{nl} 是由於 i_{nl} 在初級線捲內所引起的電壓降值。

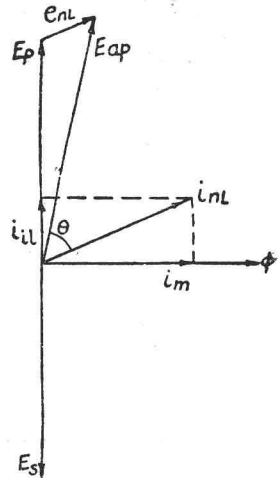


圖 4 變壓器向量圖

當電壓 E_{ap} 加於變壓器時（次級沒有接上負載）產生一無負載電流 i_{nl} ；由此電流在初級線捲內因線捲阻抗的關係所引起的電壓降為 e_{nl} ，故實際能感應的電壓為 E_p 。由電流 i_m 所產生的磁力線為 Φ ，它和 E_p 相差 90° ；由此磁力線 Φ 的感應在次級線捲中感應出的電壓為 E_s ，也和 Φ 相差 90° ；相差 90° 是說明當電壓最大時，磁力線為最小。

在直流線路上因電流流動方向永遠一致；無法使第一個線捲中產生變化的磁力線，自然也不能在第二個線捲中產生感應電勢；所以變壓器不能使用在直流電路而只能使用在交流電路上。

第二節 變壓器的種類和型式

根據應用的情況，恆壓變壓器可分為輸電變壓器和配電變壓器兩種。

一般輸電變壓器的容量較大，專用在發電站或變電站中，將發電機發出的電壓昇高到標準輸電電壓，經輸電線路而送出；或由輸電路上取得電能，將高電壓降至配電電壓。至於多大容量以上的變壓器算是輸電變壓器，這並沒有嚴格的規定，要依實際情況而定。一般在 200 仟伏安以上的

就稱為輸電變壓器。

配電變壓器是將常用的配電電壓(一般為 3300 伏或 6600 伏)降低到常用的工業低壓用電和民用電電壓(220 伏或 380 伏)。一般容量在 200 仟伏安以下。

根據鐵心的構造形式，恆壓變壓器又可分為心式、殼式和分佈式三種：

1. 心式：又稱內鐵心式，就是鐵心在內，而被各匝線捲所纏繞；它的主要優點是：絕緣較易，絕緣材料較省，修理方便，構造簡單，重量較輕。此式一般用在中型容量的變壓器上。為了節省鐵心以及纏線方便起見，鐵心截面採用由十字形變化而成的多級圓形；小容量的則採用矩形鐵心（見圖 5）。

2. 殼式：又稱外鐵心式，就是變壓器的鐵心在外，圍繞着各匝線捲，它的主要優點是空隙因數較大，線捲間油槽垂直，散熱容易，適合於強電流應用，端線引出較便，有穩固的支架，機械強度較高，偶有較大的短路電流而引起瞬變震動時也無大妨礙。此式一般用在小容量

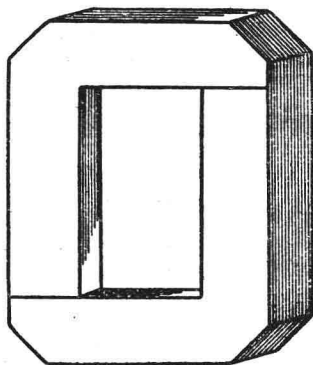


圖 5 矩形鐵心

或大容量的變壓器上。如將同容量、同特性的變壓器來比較，則心式的銅線捲平均長度較長，殼式較短；而心式的鐵心磁路平均長度較短，殼式則較長。

3. 分佈式：又稱多腳式，是由三部或四部分佈鐵心拼合而成；使磁通量可以適當地分佈在外部的幾個腳上，代替原有的一個腳；使每匝線捲的平均長度略短，而外腳因為加鐵的緣故，磁通密度也較低。

根據變壓器冷卻方法的不同，恆壓變壓器又可分為下列六種型式：

1. 空氣自然冷卻式——這是靠變壓器附近空氣的自然流動將由於鐵損(磁滯損失和渦流損失)和銅損(電流流經線捲導線時因電阻而生的損失)而生的熱量散去。這種散熱方式的效率雖不高,却是最簡單方便的一種方式,常用於儀表用互感器,恆流變壓器和感應電動機降壓起動用的自耦變壓器等。

2. 油浸自冷式——這是將變壓器的鐵心、線捲等全部浸入盛有變壓器油的容器中;一方面增加絕緣強度,防止線捲間絕緣的低劣,而且損耗所發生的熱量亦被變壓器油所吸收,再憑藉油溫冷熱程度的不同而發生流動,將熱傳到容器的四週外壳上而散去,這種方法適合於任何輸電變壓器和配電變壓器,(一般除特殊情況外,10000 仟伏安容量以下的,均採用此式)。是現用的最普遍而經濟的冷卻方法。

3. 油浸自冷加用循環冷却水式——和上法相同。但爲使變壓器油能很快地冷卻,在盛變壓器鐵心和油等的容器內,裝有冷卻用水的銅管,并使水在管內循環。銅管應裝在容器上部,恰被油所浸沒,以提高冷卻效率。如果銅管中水的壓力比油(容器內部)的壓力大,這樣在銅管損壞時,水就侵入變壓器內而損壞絕緣。要防止這種情況發生,就要使變壓器油保持一定的壓力,這是這種冷卻方式的一個很大缺點。

4. 空氣吹冷式——此法直接把冷空氣連續吹入變壓器的鐵心和線捲間,使它冷卻。

5. 油浸吹冷式——爲了使油浸自冷式的變壓器能承受過負載,在冷卻面上可加裝小風扇以吹冷。輕負載時小風扇不動,當變壓器達一定溫度時,自動控制設備使小風扇運轉,因此變壓器可承受更大的負載。

6. 油強迫流動式——這和油浸自冷方法差不多,只是爲了加速變壓器油的冷卻,將油引出到容器外的散熱設備中來冷卻,然後再壓回變壓器底部。

第三節 變壓器的構造

變壓器一般是由鐵心、線捲、絕緣管和容器等構成，茲分述於後：

1. 鐵心是組成變壓器的重要部件之一：它由許多矽鋼片互相疊合而成，鋼片很薄，厚度在 0.35 到 0.5 公厘間，當電源周率一定時，根據變壓器的容量而定。一般容量較小時，可用較薄者，容量較大時，可用較厚者。鋼片兩面均塗有絕緣漆膜，使疊合成鐵心後各片間互相絕緣，而不致增加渦流損耗；鋼片過薄，渦流損耗雖小，但鐵心空間係數增大。爲了便於交叉插入，鋼片有 *I* 形、*L* 形、*E* 形、*F* 形等形式，每塊交叉疊合，疊成後就可穿入螺栓軋緊，螺栓用紙管等絕緣，以免鋼片間發生短路而造成巨大的渦流。在鐵心和鐵軛中有時有橫油槽，在大容量單相變壓器裏也有縱油槽，以冷卻鐵心。鐵心本身及鐵心與變壓器油箱間是相連的，以保證通地和免除鐵心各部之間的跳電。

2. 線捲也是組成變壓器的重要部件之一：在小容量的變壓器中一般均採用在表面纏有棉紗、絲綫或塗有絕緣漆的圓形銅絲，在每層線捲中再加上絕緣（絕緣紙），在大容量的變壓器中，爲了縮小空間導線的截面形狀，有用矩形或方形的；小型的線捲可以直接繞在包有絕緣物的鐵心上，大型的則先繞在木模上，然後再裝在鐵心上。高壓線捲，一般都在最外層，低壓線捲則在高壓線捲和鐵心之間，所以繞製高壓線捲時要估計到這一點。線捲的繞法有很多種，如螺旋形繞法、盤形繞法、雙節形繞法和連續繞法等，根據變壓器構造的特性而採用一定型式的繞法，詳細情況不再在此敘述。

線捲間，及線捲和鐵心間均用木撐條打緊，以免鬆動。

3. 容器：有些小容量的變壓器，是沒有容器的；大中容量的變壓器，則將鐵心和線捲裝配完成後放入容器中，容器中灌入絕緣油，以增加絕緣

強度，並作為冷卻的介質。舊式的小容量配電變壓器，是用生鐵鑄成的容器；容器四壁有的是平面，也有為了增加散熱面積而鑄成凹凸形，新式的小容量配電變壓器則用鋼板鋸成，大容量的配電變壓器，都用鋼板鋸成，另外再加裝散熱器。為了防止潮氣浸入絕緣中，一般都將容器密閉。在較大容量的變壓器中，容器頂部裝有“油枕”（脹油桶）的設備，使變壓器油在膨脹時有伸縮的餘地，並減少變壓器熱油和空氣的接觸面，使氧化遲緩而保持油質。為了保證容器內部壓力過大時，不致爆壞容器，變壓器蓋上裝有安全氣道。當變壓器內部發生故障，油或絕緣材料燃燒而產生大量氣體，以致壓力增高時，安全氣道上的玻璃片即被脹破而使內部壓力減低，這樣就可保證容器不致被爆破。當油熱膨脹時變壓器油枕中的一部分空氣逸出；而當油冷縮時則有一部分空氣滲入容器中。為了不讓空氣中的潮氣進入容器，變壓器上裝有空氣乾燥器（呼吸器）使進入容器的空氣由此經過。乾燥器內放有乾燥劑（一般是氯化鈣或矽酸凝膠質），因此能吸收空氣中的潮氣。

4. 絕緣套管：既然鐵心和線捲都裝在密閉或半密閉的容器中，那麼帶電導線進出容器之處，必須妥為絕緣，否則容易發生短路或接地故障。所以任何變壓器均有絕緣套管將導線引出。當電壓不太高時可用瓷質絕緣套管，以隔絕導線和容器。這種瓷套管最好製成簡單形狀，用於屋外者要同時能起防水作用。假如電壓很高時，普通的絕緣套管往往不能勝任，則必須用充油式或電容式絕緣套管。充油式絕緣套管是中間有一層空隙的瓷管，其中可注入絕緣油，以增加絕緣強度。較經濟的電容式絕緣套管，是用金屬箔和絕緣物交替分層捲置而成，只要使任何兩箔間的電容相等，則各絕緣層的電壓也就相同。

第二章

變壓器的損失、效率和調整率

第一節 變壓器的損失

變壓器的組成，可分成三個系統，即：電系統、磁系統、絕緣系統。每一系統都有一定的損失，茲說明如下：

1. 電系統的損失：

甲、由於負載電流在導線內造成的銅損 $I_L^2 R_c$ 。

乙、由於激磁電流在導線內造成的銅損 $I_m^2 R_c$ 。

丙、供給雜散損失所需電流在導線內造成的銅損 $I_s^2 R_c$ 。

丁、由於漏洩磁場對導體影響所引起的渦流損失。

2. 磁系統的損失：

甲、在鐵心中矽鋼片內的磁滯損失。

乙、在鐵心中矽鋼片內的渦流損失。

丙、夾鐵、螺絲等的雜散電流損失。

3. 絕緣系統的損失：

這種損失一般都很小，所以也不予計算了。

在計算以上各種損失時，一般是按照下列情況來分類計算：

1. 無負載損失（一般稱為鐵損）：

甲、激磁電流的損失。

乙、磁滯電流的損失。

丙、鐵片內渦流的損失。

丁、絕緣的損失。

戊、夾鐵，螺絲等雜散電流的損失。

2. 負載損失（一般稱為銅損）：

甲、負載電流的銅損。

乙、供給雜散損失所需的電流在導線內造成的銅損。

丙、由於漏洩磁場對導體影響所引起的渦流損失，

由於變壓器的效率都很高，所以這些損失都很小；我們可以首先研究其特性，然後去尋找減至最小的辦法。現在分別討論於後：

(1) 負載電流在導線內引起的銅損 $I^2 R_c$ 和負載電流的平方 $\times$ 線捲內的電阻值有關；負載電流由負載的大小決定，不能因設計製造而變動；（假設額定電壓和容量已規定）所以要減少損失，就應該減少線捲的電阻；要這樣做，就只有把導線的截面積加大，導線長度減小，鐵心截面積加大，但結果磁路損失也因而加大，所以增加導線的截面積是有一定限度的。

(2) 激磁電流的銅損失：因為激磁電流一般都很小，只有滿負載電流的 10%；甚至小到 3%—4%，一般設計時，如果不使磁通密度過大又在其飽和點以下；且如能在製造時儘量避免鐵片間的空氣間隙，則此種激磁電流的銅損失可略去不計；如果磁通密度過大，所需的激磁電流要比在密度小時大得多，則此種損失也將增加不少，因而線捲內部也容易發熱。

(3) 供給雜散損失所需電流在導線內造成的銅損：任何一個變壓器的輸入是大於輸出的，而這個差數便是總損失。供給總損失所需電流值的平方 $\times$ 初級（輸入）線捲的電阻值便是，供給雜散損失所需電流，在導線內造成的銅損，這種損失一般都很小，常常略去不計。

(4) 由於漏洩磁場使導體內產生渦流的損失：計算這種損失的公式

不少，但難於準確；因為實際影響這種損失的因素太多，一般就依照一個變壓器總損失中的百分數估計定出，而不加計算。和這損失有關的主要因素有：漏磁通量的平方，變壓器銅導線的重量和垂直於磁通路的導線的尺寸平方等。

(5) 鐵心中鐵片的磁滯損失：這種損失和所用鐵片的材料有關（可由製造廠供給的曲線來計算），同時也感應密度有關。要減少這種損失就要用較好材料的鐵片，以及減少它的數量，以免增加線捲匝間的平均長度；否則就增加線捲的捲數來減低感應密度，但這樣做又會增加電系統中的損失，依然得不償失。

(6) 鐵心中鐵片的渦流損失：這種損失也同樣和所用的鐵片材料、感應密度、鐵片厚薄、以及鐵片間絕緣等情況有關。對於磁滯損失的大部論述也可適用於渦流損失，實際上這兩種損失：只是從一條曲線上來計算，一般說來，鐵片愈厚，損失愈大，所以應該愈薄愈好；但過薄以後也有以下的缺點，因而在製造時必須加以考慮後方能決定。

甲、鐵片過薄，在一定厚度的鐵心中所用鐵片數就要增多，片間的絕緣也要增多，因而使變壓器鐵心空間因數過小。

乙、鐵片愈薄，鐵心集起愈難；鐵片的機械強度也愈小。

(7) 在夾鐵、螺絲等處雜散電流的損失：這也是一種不易計算的損失，只能從總損失中估計一個百分數來決定。要減少這種損失在設計夾鐵的構造時要注意；同時它和鐵片的絕緣一定要良好，以免引起鐵片的短路。

從上面幾種主要損失的情況看來，可知在研究減少損失時必須全面考慮各種因素，假使單純設法降低鐵損，則可能因而增加銅損；因此必須設法使這兩種主要損失都降至極小才是。我們也可以知道，銅鐵損比率較小的變壓器，在重負載時效率高；銅鐵損比率較大的變壓器在輕負載時

效率高。所以在負載率低的地區所用的變壓器（如只供給照明用的變壓器）鐵損應較小，而銅損可較大。這種變壓器雖然在效率上有了優點，但也有以下幾種缺點：

（1）銅損和負載電流的平方成正比，因而在過負載方面受到限制，不及銅損和鐵損相等的變壓器那樣可以允許較長的過負載時間。

（2）銅損和鐵損的比值大時，一般就有較高的阻抗，這是不太好的。但對於常易發生線路短路故障的地方，則可減少短路電流，反而變成優點。然而阻抗太大時，尤其是用在低負載率地區，則使變壓器的電壓調整率太大。

（3）對一個變壓器講實際上電流和感應密度，幾乎是一個常數，所以鐵損和銅損的大小是和所用的鐵片和銅導線有關。假使一個變壓器所用銅鐵重量比率較小，則其銅鐵損比率較大，如果在設計這種變壓器的線捲時，不給油隙留有足夠的餘地，則在運行時比一般變壓器易生熱點。

損失的實際測量：在需要一定的數據，而不作詳細的分析時，只求一下鐵損和銅損就行了。在現場中如無適當的試驗設備，則求鐵損時可將變壓器初級接在額定的電壓上，次級不接負載而開路，用電度表量得其所耗的電度即得。銅損則在變壓器供給滿負載時，由初級的電度表讀數減去次級的電度表讀數，得出總損失。再由總損失減去鐵損而得（約數）。

第二節 變壓器的效率

任何一個機器，它的輸入總是比輸出大，這是因為功能經過變換總有一部分損失，所以任何一個機器的效率是不會大於100%，或等於100%的。變壓器也是這樣。它的效率百分數可以用下式表示：

$$\frac{\text{輸出(瓦特)}}{\text{輸出(瓦特)} + \text{損失(瓦特)}} \times 100$$