

變壓器 設計與製造

王柯 季士 梅鏘 編著



大東書局出版

編 者 序

一)

電機工程發展的程度，也就是國家工業化的程度和經濟建設發展的程度。任何工業建設，莫不直接間接和電機工程有着密切的聯係，電工學理的探討和鑽研，實際經驗累積的記錄，都莫不是電工發展的重要環節。數十年來，國內有關電機工程的著譯雖已不少，然而在解放後的新中國，面對着經濟建設高潮和文化建設高潮的到來，過去的一些成就，顯然還是很不夠的。

中國技術協會編印各種基本技術叢書的計劃中，也特別訂立了電工叢書的計劃。由於電機工程種類的繁複，範圍的廣袤，內容的深邃，要編一套包羅詳盡的叢書，實在是很艱鉅的一件事。

要把中國穩步地從農業國轉化為工業國，廣大的農村首先應該以電氣化武裝起來，對於怎樣建立各型的電力廠、輸電網、輸電站，這樣的叢書是需要的。對於工業建設中，各式各樣電機、電力設備的裝置、應用和維護的方法，這類叢書也是需要的。要自力更生，擺脫對帝國主義國家的依賴，有關各種電機的設計和製造的叢書也是需要的。

我們曾邀請許多經驗豐富之士為我們執筆，可惜因為他們大都獻身在各個的光榮的崗位上，為創造經濟建設更有利的條件，為鞏固電工事業薄弱的基礎，日以繼夜忘我地工作，因此缺

少了充分的時間，來從事寫作。同時，由於中國技術協會已經完成了它光榮的任務，勝利地宣告結束，原訂的『叢書計劃』也要配合形勢的發展，而終止進行。因此本書不再以叢書的形式，貢獻於讀者之前了，雖然我們的工作僅僅是開始。但在原有計劃中的各書，仍將繼續努力來完成它，以應各方面的需要。

(二)

這是一冊綜合的書本，前半本（包括構造、鐵芯和鐵捲、運用特性以及設計例題中的前四個例子）都譯自 John H. Kuhlmann: Design of Electrical Apparatus. 後半本（包括變壓器的製造、試驗和附錄）大都是編者，在工廠中，好幾年實際經驗的累積。

Kuhlmann 這一本書，在實用的價值上，無可否認地存在着不少的缺點，可是由於它敘述的淺顯，運算的簡便，供初學者作電機設計入門的參考，仍有相當價值。國內外各專科學校，各大學的電機設計，採用它作為教本的還很多。

為了便利同學們的學習，我們選擇了這樣的材料，並且儘可能地將原著保存下來，又增添許多註解，提供為實際做設計者的參考。我們企圖將這本書作為橋樑，使書本中的知識，和實際工作的情況儘量結合起來。我們希望能在『理論和實踐結合』的新教育方針下，盡一份力量。

這一冊書也將能適合電機製造廠中級和中級以下的技術幹部、管理人員、具有相當文化水平的技術工人作業學習之用。書中介紹了實際施工的方法和步驟，摒除了高深的算學，祇要實

加減乘除，會開方乘方，懂得一些代數，三角，就可以學會變壓器的設計了。我們增添了許多註解，企圖用較淺的說明來補充電工基本學識的不足。

爲了萬國公制的推行，我們在英美制單位的後面，加註了公制的單位。設計例題的第五個例子，是增添上去的，完全用公制計算，便利學習用公制單位設計的參考。

『製造』一章，包括鐵芯剪裁、線捲繞製、變壓器的裝配、容器和附件等，因爲從製造的方法和步驟着眼，可以避免和僅作概略的介紹的本書第一章內容重複。我們企圖使這冊綜合的書本也有適當的體系，從變壓器的構造，介紹到設計、製造、最後還添了『變壓器試驗』一章。我們在附錄中添入了我國的變壓器製造標準，我國的線規標準，和供初學設計者參考的資料。

我們希望初學設計者藉這本書能有所收穫，而經驗豐富學有素養的電機製造工作者也會覺得不無內容。尤其希望能對有相當文化水平從事電機製造的工人同志有所幫助。

(三)

本書的翻譯工作，全部是由王季梅兄利用在交通大學執教的餘暇擔任了的，在增訂、修改和校對的過程中，季梅兄都曾盡了很大的努力。

變壓器試驗一章，承華通電機廠校驗工程師鄭銘芳同志，提供了許多有價值的意見和資料。本書的圖樣大部由優秀的技術工作者，孫達同志精心繪製，本書的封面承技協編審組總負責

人王樹良兄幫助設計。交通大學助教張和康先生幫助了一部份的校閱工作，並指正了若干錯誤，都應在這裏一並致謝。

最後必須表示感謝的，是前華通電機廠主任工程師沈越昭同志，編者從他這裏獲得了許多寶貴的經驗和資料。這一冊書一定還有很多錯誤和遺漏的地方，需要讀者高明指正，作再版時修訂的南針。

柯士鏘 一九五一年一月在上海

目 錄

第一章 構造	1
鐵芯	2
容器	8
第二章 鐵芯與線捲	13
鐵芯設計	17
線捲設計	28
第三章 運用特性	40
電阻	40
漏磁電抗	41
調整率	44
激磁電流	45
效率	46
溫度昇高	47
容器設計	48
第四章 設計例題	51
單相芯式電力變壓器設計例題	51
三相芯式電力變壓器設計例題	66
單相四部分佈芯式變壓器設計例題	82
單相壳式電力變壓器設計例題	96
單相芯式電力變壓器設計例題(公制)	111

第五章 製造概況	123
鐵芯製造	124
鐵圈繞製	135
絕緣漆處理	148
鐵芯鐵圈裝配	150
分接頭板和分接頭開關	166
容器及其附件	172
芯子裝入容器	188
第六章 試驗	191
電壓比試驗	191
斷路試驗	192
捷路試驗	194
絕緣電阻試驗	196
高壓試驗	197
溫升試驗	198
鐵圈電阻試驗	207
極性試驗	208
試驗用開關臺說明	210
附錄	216
圓形銅線——裸銅及包絕緣(美規)	216
正方形截面銅線——裸銅及包絕緣(美規)	217
雙紗包扁銅線(美規)	218
軟銅帶(美規)	223

銅線絕緣厚度表.....	227
中國標準單線線規表.....	229
中國線規與美規英規對照表.....	230
中國線規扁銅線參攷尺度表(公制).....	232
磁化曲線及芯損耗曲線(英制).....	233
磁化曲線及芯損耗曲線(公制).....	234
5—500仟伏安油浸自冷式變壓器磁通密度及電流密度 曲線.....	230
500—50000仟伏安油浸變壓器電流密度曲線.....	236
0.2—50 仟伏安油浸自冷芯式變壓器銅線空間因數曲 線.....	237
50—5000仟伏安油浸自冷芯式變壓器銅線空間因數曲 線.....	237
50—50000 仟伏安油浸自冷壳式變壓器銅線空間因數 曲線.....	237
配電變壓器絕緣設計參考資料.....	238
縮寫符號索引.....	241
配電變壓器標準.....	244

第一章 構造

變壓器是一種“升高”或“降低”交流電壓或電流的機械^①。它主要部份包括由鋼片構成的磁路與線捲組成的電路二部。變壓器本身又可分為三類：(1)儀器用互感器^②，(2)恆流變壓器^③，(3)恆壓變壓器^④。本書所討論祇限於一種恆壓變壓器的構

① 變壓器 (Transformer) 俗稱方棚，也有譯做互感器的。它的基本原理是由於主線捲內流通的交變電流（交流電）不斷改變它流動的方向，在鐵芯內產生交變的磁通（Flux 亦稱磁力線），因此使副線捲中發生感應電流和感應電勢。直流電在初通入主線捲的瞬時或斷去的瞬時間，也能使副線捲內產生感應電勢，但經常單向流通時磁通方向是不變的，不能產生感應電流和感應電勢，所以在直流電路上不能使用變壓器。

② 儀器用互感器 (Instrument Transformer 日文譯作計器用互感器) 一般應用在繼電器 (Relay 或譯作替換器，電驛器) 和司路屏 (Switch board 俗稱開關台) 上，供給繼電器運用及電表讀數指示之用，它們的容量較小。由於主電路上電壓太高，或電流太大使 (1) 繼電器和指示電表有構造上的困難，(2) 使用者太不安全而應用的。可以分為電壓互感器 (Potential Transformer 簡稱 P.T.) 和電流互感器 (Current Transformer 簡稱 C.T. 或變流器) 兩種。

③ 恆流變壓器 (Constant-current Transformer) 須使主線捲和副線捲，可以相互運動。由於負載增加，副路電流增多，主路電流也隨之增多，就增強了兩線捲間的斥力，距離移遠，因之漏磁增加而降低了副捲的感應電勢，正好使在新位置上的副線捲維持原來的電流量。

④ 恆壓變壓器 (Constant-potential Transformer) 就是我們普通所稱的方棚。

造、設計及製造，這種變壓器的本領是將電能從高壓電流變換到低壓電流，或從低壓電流變換到高壓電流。

恆壓變壓器應用在一般照明和動力方面的，可分為兩種，就是(1)配電變壓器①，(2)電力變壓器②。

配電變壓器包括容量在 200 仟伏安及低於 200 仟伏安的，專用為降低配電電壓到一標準供應電壓，或從輸送電壓降低到配電電壓。不論是單相或三相的變壓器，它的製造的最高電壓可以高到 66,000 伏③。

電力變壓器包括容量在 200 仟伏安以上的，專用在發電站上，將電壓升高到一標準的輸送電壓，或用在配電站上將電壓降低到配電電壓。或是 200 仟伏安以上的變壓器用做從輸送電壓或配電電壓降低到一標準供應電壓④，不論它是單相或三相，在星形接法⑤時，它的電壓可以達到 220,000 伏。

鐵芯——變壓器的鐵芯都是用矽鋼片疊合而成的。我國採用的頻率 50 週波的變壓器適用的矽鋼片，厚度為 0.014 吋，合

① 配電變壓器 (Distribution Transformer) 有譯作佈電變壓器。

② 電力變壓器 (Power Transformer) 有譯作強功率變壓器。

③ 我國配電變壓器標準規定油浸自冷式的變壓器三相的在 500 仟伏安以下，及單相的在 200 仟伏安以下為配電變壓器，電壓可以高到 33,000 伏。

④ 裝在工廠的變電所(俗稱方棚間)中，降低配電電壓到供應電壓，供給工廠動力用電的，也是電力變壓器。

⑤ 星形接法 (Y-connection)，在這種接法時，線路電壓比每相的電壓大 1.732 倍，而線路電流和每相電流相等。三角形接法 (Δ -connection 或 Delta-connection) 則線路電壓與每相電壓相等，而線路電流為每相電流的 1.732 倍。

英制線規 29 號，含矽 4—4.5%；而低頻率，如 25 週波的常用 0.019 吋厚，合英制線規 26 號，含矽 2.5—3.0% 的矽鋼片。因為矽鋼片具有久不陳老的特性^①及損耗較低的優點。製造變壓器時，整張矽鋼片須經剪切或銑斷成為適合的尺寸。在切斷後需要經過精密的退火手續用來退去矽鋼片中因剪切或銑斷時所發生的應變，因為矽鋼片受了應變後，一定會增加鐵損耗^②。矽鋼片經緩冷後須在表面上加塗一層絕緣清漆，以減少渦流損耗^③。小容量配電變壓器，絕緣層並非必需，因為矽鋼片表面本來有一層較厚的氧化膜，已足夠使矽鋼片絕緣^④。

鐵芯構造一般的形式有芯式^⑤、殼式^⑥及分佈式^⑦三種。

① 久不陳老的特性 (Non-aging properties)。麥維裕氏譯 aging 為「陳煉」。

② 國內變壓器製造，剪切矽鋼片到適合的大小後，往往限於設備，聽其自然冷卻，不經過任何退火的手續。

③ 渦流損耗 (Eddy current loss)，如果導體的截面積較大，並且是一個整塊，就會有電流在平面內流轉，造成功率損失，稱為渦流損耗。

④ 變壓器矽鋼片目前我國還不能自己製造，外貨輸入塗有絕緣清漆 (Varnish 俗稱凡立水) 的較多，自己塗刷技術上很成問題，往往厚薄不均，或漆膜過厚，疊製鐵芯就因鐵芯有效截面積減少，而使磁通密度過高，以致鐵耗增加。

⑤ 芯式 (Core type) 日文稱內鐵型。芯式變壓器和殼式比較的優點：(1) 絕緣材料節省，(2) 便於修理，(3) 構造較簡單，(4) 重量較輕。此式應用於容量在 50—10,000 仟伏安較合經濟，電壓可以高達 138,000 伏。

⑥ 殼式 (Shell type) 日文稱外鐵型。殼式變壓器和芯式比較的優點是：(1) 合於強電流應用 (尤以電爐變壓器 Furnace Transformer 為宜)，(2) 端線引出較便，(3) 機械強度較高，(4) 線圈間油槽垂直散熱容易，熱效較高。此式適用在 50 仟伏安以下，電壓在 6,600 伏以下較合經濟，或大容量的變壓器達 50,000 或 100,000 仟伏安者。

⑦ 分佈式 (Distribution type) 也有稱做多腳型的。

芯式——圖 1 為矩形芯式變壓器的鐵芯，圖 2 是一具三相

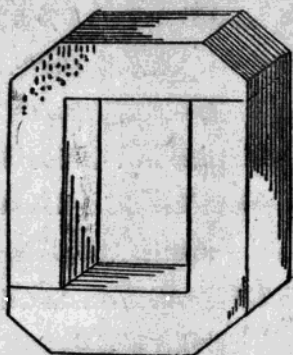


圖 1 矩形芯式變壓器的鐵芯

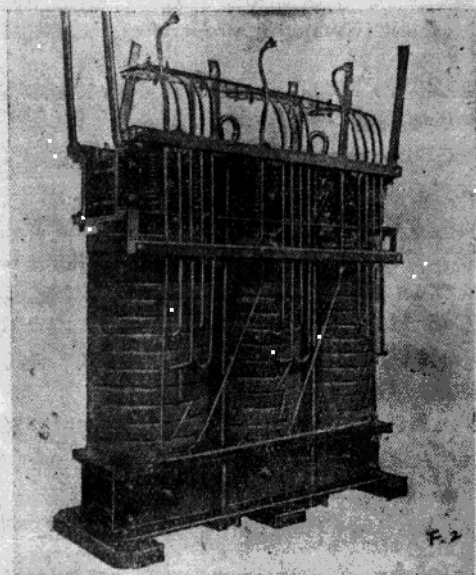


圖 2 三相矩形芯式配電變壓器的裝置

矩形芯式配電變壓器的全圖。22,000 伏及高於 22,000 伏的高壓變壓器，採用的鐵芯截面以十字形為多數^①。如圖 3，線圈就繞成圓形。

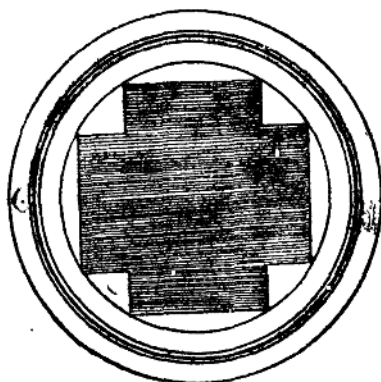


圖 3 十字形鐵芯截面圖

殼式——一般殼式結構的變壓器最適合於較低的電壓或較大的容量，這樣才有較佳的空間因數^②。圖 4 為一殼式變壓器截面圖，它的線圈為薄餅式線圈^③。殼式變壓器全圖見圖 5。

分佈芯式——分佈芯式變壓器的構造是由二部、三部或四部分佈鐵芯造成。三部分佈芯式用於小容量的配電變壓器，並且以適中的電壓為宜。四部分佈芯式，往往用作配電變壓器及

① 我國各大電機廠製造變壓器，除很小容量的採用矩形鐵芯外，大都採用多級圓形的鐵芯。並且為了節省用鐵的關係，祇有很小的變壓器採用殼式，一般都採用芯式。

② 空間因數 (Space factor)。

③ 薄餅式線圈 (Pancake type coil)。

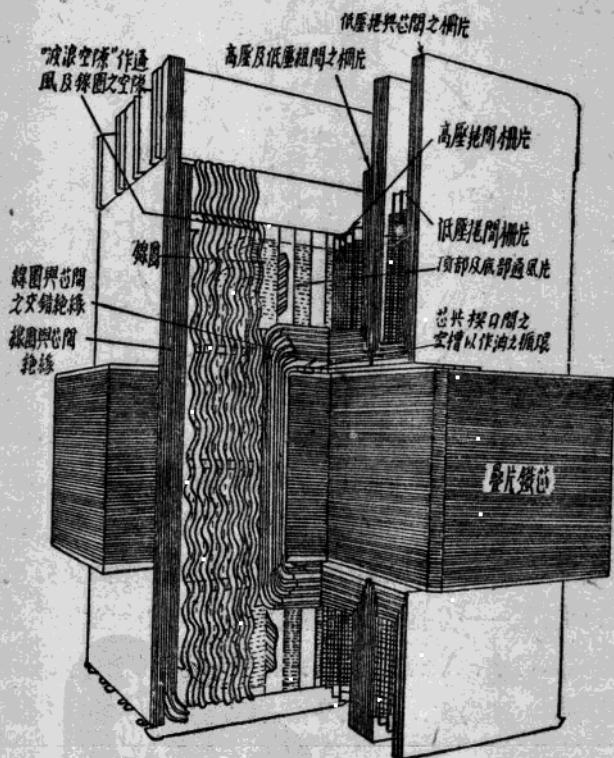


圖 4 殼式變壓器截面圖

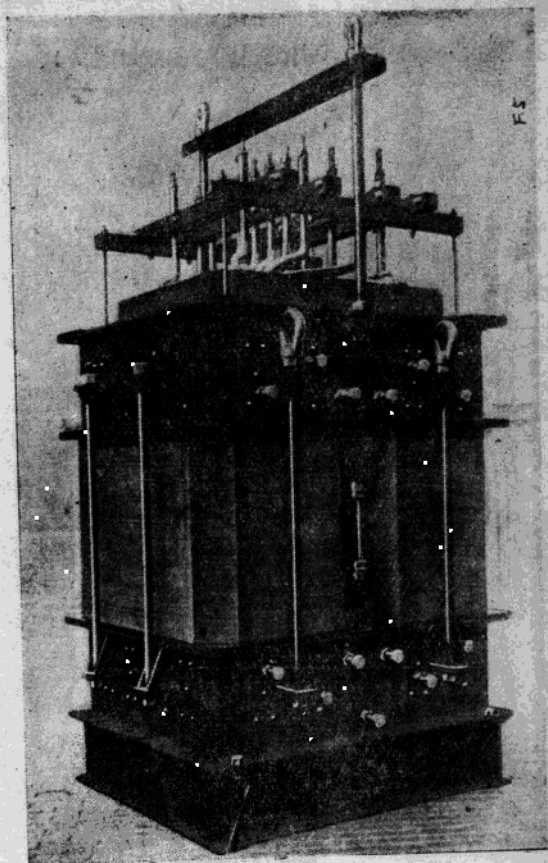


圖 5 殼式變壓器全圖

小容量的電力變壓器。圖 6 為小容量及適中電壓三部及四部分佈芯式變壓器的鐵芯，其線捲往往直接繞在鐵芯上。大容量及高電壓的線捲則繞成一定形式後，套入鐵芯如圖 7。

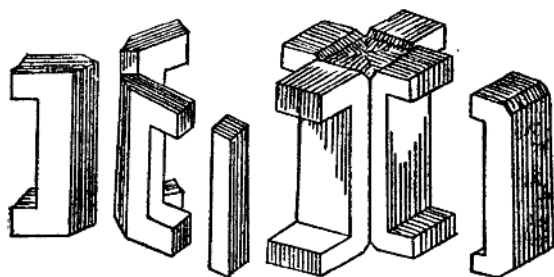


圖 6 三部及四部，分佈芯式變壓器的鐵芯

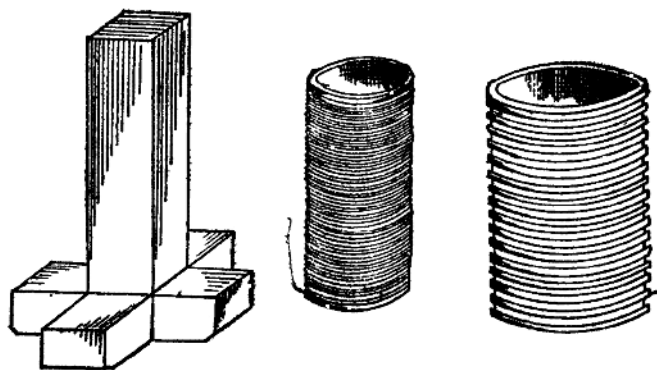


圖 7 大容量四部分佈芯式變壓器的鐵芯與線捲

容器——變壓器冷却，有下列許多方法：

(1) 空氣自然冷却——這是靠變壓器四周空氣自然的對流

作用，將損耗所發生的熱量散去，這種冷卻方法用於儀器用互感器，恆流變壓器，和感應電動機降壓開動用的自耦變壓器為多①。

(2) 油浸自冷——這方法適合於任何配電變壓器及電力變壓器。是將變壓器浸在變壓器油中，熱量由變壓器油吸收，自然流動傳到容器的四周散去的。

(3) 油自然對流及水強迫流動——這方法是將變壓器浸在變壓器油內，再用銅管佈置在變壓器的容器中，管內通入循環不斷的冷水來冷卻的，銅管必需裝在容器的上部，恰巧浸在油面以下，方能夠發揮最大的效用。

(4) 油的強迫流動冷卻——這方法是將變壓器容器內的變壓器油引出，經容器外的散熱管再送回到變壓器底部，這樣循環換流冷卻的。

(5) 空氣吹冷——這方法是用冷空氣連續吹入變壓器的鐵芯及線捲使它冷卻的。

小容量配電變壓器，常用平面生鐵容器②，而新式變壓器則常用鉚接鋼板容器③。圖8為15仟伏安，16900伏，芯式變壓器的鉚接鋼板變壓器容器。大容量配電變壓器用平面鋼板容器很難獲得足夠的散熱面積，以致溫度過量升高，就得用散熱片④鉚接在容器上部，或用瓦楞鋼板容器⑤（如圖9）以增加散熱面

① 自耦變壓器 (Autotransformer)。

② 平面生鐵容器 (Plain cast-iron tank)。

③ 鉚接鋼板容器 (Weld-sheet-steel tank)。

④ 散熱片 (Cooling vane)。

⑤ 瓦楞鋼板容器 (Corrugated sheet-steel tank)。