

T/M 402

38P
2242/1

變壓器設計

Franz Unger 原著

王仲甫 譯
程福秀 校

龍門聯合書局出版

電工叢書引言

中國科學的所以落後，原因固然很多，中文科學書籍的缺乏，也是主要原因之一。有許多科學工作者，對於他們所研究的部門都是深具心得甚或是有獨特的貢獻的，祇因大都不習慣於中文的寫作，不願從事編著中文科學書籍，即使有論文發表，也往往應用外國文字，這就對於中國科學的地位和發展，成為很大的障礙。

由於中文科學書籍的缺乏，大學裏所採用的教本和參考書，幾乎全部是外國文的，因此學生除了學習業務之外，還不得不在外國文上面化費許多的時間和精力，以致降低了學習的效率，這是何等值得惋惜的事。

同濟大學電機系全體師生有鑒於此，深感編譯中文書籍，刻不容緩，乃決定成立電工叢書編審委員會，着手編譯電工書籍。我們相信如果這個工作能夠搞好的話，對於研究電工的學者，是有相當的幫助的。

我們希望在本叢書內，對於每一門電工學科都能有專冊介紹；只因電工技術發展奇速，所牽涉的範圍異常廣泛，這點能否辦到，實在難有把握；但是我們總盡力向這目標進行。

到目前為止，英文還是為我國最普遍的外國語，平常看到的科學書籍，也以英文的為最多。其實德國的學術地位，不在英美之下，德文電工書籍也不乏精湛和獨到之作，祇由於德文在國內不普遍，能閱讀的人很少，致使寶貴的知識湮沒無聞，何等可惜。同濟向以德文為第一外國語，和德文書籍接觸較多，我們自當致力於德文電工書籍的翻譯，以介紹並推廣德國學術，如果在某些學科方面，沒有適當或完善的外國書籍可資翻譯時，則預備利用本校教學的參考資料，並參考有關書籍，從事撰述。

本系全體教授講師助教和本校的校友，都預備共同擔負這編譯的工作，爲求內容充實和完善，有所編譯，必縝密校訂。因爲現在還在嘗試時期，我們預備先譯應用技術書籍，將來再從事編譯較高深的著作。

承龍門聯合書局擔負本叢書的出版和發行，我們表示萬分的謝意，他們提倡中文科學書籍的熱忱，也是值得我們敬佩的。

這任務是非常艱巨的，我們的學力和經驗都有限得很，希望各電工界先進對我們不吝指教，多多批評，使我們的工作得以改善，同時更希望我們的工作能引起各界對於編譯中文科學書籍的興趣，一齊來從事這項工作。如果優良精湛的巨著因此源源而來，中國的科學地位因此而提高的話，那麼即使我們的成績是渺小而不足道的，我們也可引以自慰了。

黃席椿 一九五〇年八月於同濟大學

譯 序

變壓器的設計工作，向來被人視為一件麻煩的工作，因為在以前，尚沒有導出一個與變壓器的諸量如價格，功耗，電流密度及磁流密度等相互有關的公式，故往往須先假定許多數值，並須同時將同一功率的變壓器設計出許多，然後再在其中選擇一個最合適的。關於這一點，作者在引言中，說得很清楚，茲不多述。

原作者 Unger 教授，為德國電工權威，專攻電機製造，本設計為彼之一篇專論，原載德國“電工之成就”雜誌上，後經印成單行本，故本書為論文性質，而其形式亦為論文形式，譯者在翻譯時，亦未加以變動，本篇之概言，為作者對本設計之動機作扼要之說明。第十二節結論，為原作者對本設計之討論程序作一簡略之總結，今亦譯成中文，讀者在閱讀之先，可先參閱第十二節，當更能瞭解。

關於本書的特點，作者業已指出，譯者在此僅說明數點：本設計有三個基本定則，即功耗定則[(18)式]，價格定則[(21)式]及電流密度與磁流密度的密度定則[(22)]。且在功耗定則中，電流熱耗與鐵耗的比值並不等於1，而等於該變壓器的主級接入電源的時間與其副級負載的時間的比值[(9)式]，故用本書的設計方法設計一變壓器時不會再有以前的那種麻煩。在設計完成一變壓器後，再來一次鐵心的減縮(第九節)，以求得一更便宜的變壓器。

原書或有不合國情之處，譯者在譯成之後，即予以補充說明，其中加入第四，第五第六第七各表及(47a)，(48a)(67a)等式，使在實際設計時，免去許多麻煩。

新中國建設伊始，百業待舉，而工業建設尤為重要，譯者自問力薄，然得稍盡綿薄，僅以本書獻給從事於製造工作者。

本書之譯成，得助於李家訓同學者良多，且蒙程福秀教授爲之校閱，並此誌謝。

譯者自問學識淺薄，謬誤之處，在所不免，尙祈海內讀者指正。

王仲甫

一九五〇年五月於上海國立同濟大學工學院。

概 言

直到現在為止，許多關於預先計算及正確設計變壓器的工作，沒有一個得到很滿意的結果。過去從事於設計工作者，從未在其設計方法的本身上去尋找錯誤，而常追逐於設計方法本身以外的事物。即對於這一問題，從事於設計工作者，至今還不清楚即在設計一變壓器時，我們究竟像設計電機一樣以其體積大小為出發點，抑或以其磁流（亦即與磁流有關的錄匝電壓）為出發點。所以以前的設計表示一種表式計算，就是必須將同一功率的變壓器，同時設計出很多個，然後再由其中選用一個最適當的，現在我們將討論一新的設計方法，此一新的設計方法，係以變壓器的基本智識為基礎，並根據已知的負荷情況（即與此有關之鐵耗及銅耗），能照下面所討論的設計程序，無疵的求得一個最便宜的變壓器。

目次

電工叢書言引

譯序

概言

一	引言.....	1
二	公式符號.....	4
三	先決條件.....	7
四	基本原理.....	11
五	幾何尺寸.....	15
六	磁流密度.....	26
七	短路電壓.....	28
八	設計程序.....	33
九	鐵心減縮.....	36
十	減縮鐵心的設計.....	42
十一	設計實例.....	43
十二	總結.....	51
	參考文獻.....	52
	附錄.....	53
	銅繞組填隙係數的曲線圖.....	54
	中國單線線規表.....	56

一. 引言

關於變壓器的設計，已有許多著述印行問世。其中最早的當推 Gilbert Kapp [1]¹⁾，彼以變壓器的功率，正比於鐵心的大小為設計的基礎。這種觀點，與按照 Esson 氏功率方程式²⁾，或 Emde 氏的轉切應力設計電機的思想程序完全相同。這種討論的方法基本上是正確的，但僅用變壓器的鐵心大小或鐵心重量對於磁流尚未談到。在 Esson 氏功率方程式中，磁流亦未直接包含進去，但因電機的極距與樞長比值僅在一定的範圍內變動故 Esson 氏功率方程式也就包括電機的磁流在內。Arnold [2] 氏在他的巨著“變壓器”的第一版中，用了另外一種方法。該方法係以一鐵窗的磁流與其安匝數之比為出發點，並視此比值為一常數。用此方法，若在處理同一型類的變壓器時，則此觀點為正確的。但如在另一條件之下，則此比值勢將變更，故嚴密地說，此比值非為一常數，此一缺點，Arnold 自己亦已發現，故在其“變壓器”一書的第二版中，又導出一鐵心截面與電流密度，磁流密度及鐵心重量與線捲重量之比有關的公式。在此公式中，又包括另一數值，此數值對某一定型類的變壓器，Arnold 視之為常數。但此數值僅在一定的條件之下方為常數，若條件變動，則此數值亦將不同。雖然如此，但在近日的變壓器設計中，尚有很多應用此公式者。在一定的條件下，用此方法，必須設計出一大羣變壓器，然後再在此一大羣變壓器中，找出最合適的一個。此一設計方法的缺點為其所設計的，僅為變壓器的鐵心截面，而非其磁流，且其磁流和電流密度，不能任意選用（後當論及之）。因之，最合適的設計方法，應以磁流或線匝電壓為出發點。Alm [4] 和另外數人均相信窗寬與鐵心寬間有一常定的比值，因之他們即以此為出發點。幸運的是 Tnambizik 氏 [9] 早就從事於以變壓器的短路電壓為出發點的研究。但因短路電壓僅為決定一變壓

器諸量之一，故此嘗試亦沒有達到目的。Pichelmayer 氏 [5] 以一變壓器的最小價格為出發點，因之得一很合理的數量，但他仍以爲電流密度及磁流密度的數量可任意選用，因之關於功耗的規定條件，他亦僅能經過多次的試算，才能得到。Pichelmayer 及 Koller 二氏亦曾於 1903 年從事於以鐵心的減縮而求其較小的功耗的研究。

設計一價格爲最小的變壓器的研究，Pohl 及 Bohle 二氏 [3] 亦早就在 1905 年做過。其後曾有人試算過一般最經濟的變壓器。所謂一最經濟的變壓器者，係指以最小的費用，能在一定的負載情況下，其熱耗亦爲最小 (Hak [6])。Andronescu 氏 [7] 首先試圖在一定負載情況下將所能決定一變壓器的數量，都引到設計中去。但他不知道電流密度及磁流密度間一定的關係，所以他的研究亦沒有成功。Vidmar 氏 [8] 保留這種權利，首先求得電流密度及磁流密度間一定的關係。而且他更進一步的，釋明磁軛的、鐵心的及繞組的體積與價格比值的相互關係，可惜在試圖將一切有關的量總括成一個新的設計理論，而此種試圖失敗之後，他却在他的“少銅的變壓器”“Der Kupferarme Transformator” [14] 一書中，把此種設計理論完全摒棄不用。他的原因是一變壓器的鐵心與線卷的價格佔整個變壓器的價格的比值太小，所以，假如在設計一變壓器時，即使鐵心與繞組的量，用得合不適，但對整個變壓器的價格，影響還是很小。但在這裏，他忘了，在一定的功耗下，一變壓器的油櫃，冷卻油及裝配的費用，爲一不變的費用，而且，很明顯的，一變壓器的總價格與其不變的價格及其本身的可變的價格，都是相關的（所謂其本身的可變的價格，係指其本身的鐵心與繞組等，因設計方法的不同，其費用亦將因之不同而言）。一變壓器本身的可變的價格，不僅與其所費的材料有關，且亦幾與其製造費用成正比，故此可變的價格佔總價格的成分，不僅如 Vidmar 氏所說，約爲百分之二十八，而應該爲百分之五十到百分之六十。因此，我們又面臨這一問題，就是如何在一定的負載及功耗下，設計一個最便宜的變壓器。Kramer 氏 [13] 曾估出很多曲綫，用以設計變壓器（我們亦可應用此曲綫，估計鐵心及線卷的填隙係數），但在他的設計中，並未引入短路電壓。因爲他深信短路電壓與窗寬和窗高的比值無關，本書以後尚討論

到,這種觀點是錯誤的。

現在,我們將討論一變壓器的價格及其尺寸與各個條件之間的關係。根據已有的智識,我們指出一新的設計方法,由此設計方法可直接得到正確的變壓器的尺寸。

註: 1) [] 內的文字,係表書後所附參考文獻的號數。

2) Esson 氏功率方程式為:

$$N_i = C \cdot d \cdot l \cdot n \cdot 10^{-6} \quad \text{其中}$$

$$C = \frac{\pi^2}{60} \cdot \alpha_i \cdot A \cdot B_L$$

二. 公式符號

- A_1 主級接受之功,單位爲 kva-hr (仟伏安一小時).
- A_2 副級輸出之功,單位爲 kva-hr.
- A_v 損失功(Verlustarbeit),單位爲 kva-hr.
- a, a' 窗寬(Fensterbreite),單位爲 cm.
- B 鐵心磁流密度,單位爲 g(高斯).
- B_j 磁軛磁流密度,單位爲 g.
- B_s 柱足磁流密度,單位爲 g.
- C 利用係數(Ausnutzungsfaktor)(常數).
- D 常數.
- d, d' 鐵心圓直徑,單位爲 cm.
- E 電動勢,單位爲 v.
- F 常數.
- f 頻率.
- g 常數.
- h, h' 窗高(Fensterhöhen),單位爲 cm.
- h_1 繞組高,單位爲 cm.
- I 電流,單位爲 a.
- i, i' 電流密度,單位爲 a/mm²,
- K, k 常數.
- k_e 鐵心填隙係數,對鐵心外接圓而言 (Eisenfüllfaktor bezogen auf kernkreis).
- k_w 繞組填隙係數,包括一鐵心外接圓周到另一鐵心外接圓周與上磁軛的下邊到下磁軛的上邊間的空隙 (Fensterfüllfaktor von

Kernkreis zu Kernkreis und von Jochkante zu Jochkante gemessen).

l_e 鐵心總長度,單位爲 cm.

l_s 柱足總長度,單位爲 cm.

l_f 磁軛總長度,單位爲 cm.

l_w, l_w' 線匝平均長度,單位爲 cm.

m 纏線捲之柱足數.

N_2 副級輸出之功率. 單位爲 kva.

N_e 鐵耗,單位爲 w.

N_i 內功率,單位爲 kva.

N_w 電流熱耗 (Stromwärmeverlust),單位爲 w.

O 常數.

P_e 鐵心的總價格,單位爲馬克.

P_w 繞組的總價格,單位爲馬克.

p_e 鈐鋼片的單價,單位爲馬克/呎.

p_w 繞組的單價,單位爲馬克/呎.

Q_e 鐵心截面,單位爲 cm^2 .

Q_f 磁軛截面,單位爲 cm^2 .

Q_s 柱足截面,單位爲 cm^2 .

Q_w, Q_w' 繞組截面,單位爲 Cm^2 .

R 一數值.

s 常數.

T 正級接電的時間,單位爲小時.

t 副級負載的時間,單位爲小時.

U_s 虛電壓降 (Streuspannung),單位爲 v.

u_k 短路電壓,以 % 表示.

u_r 相對實電壓降 (relativer Wirkspannungsabfall),以 % 表示.

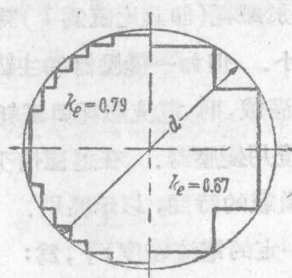
u_s 相對虛電壓降 (relative Streuspannung),以 % 表示.

v, v' 窗寬與柱足圓直徑的比值.

- w, w' 匝數.
- x 變數,
- y 鐵心總長度與其直徑的比值.
- z 鐵心總長度與線圈平均長度的比值.
- α 比電流熱耗(Spezifischer Stromwärmeverlust), 當 $j = 1 \text{ a/mm}^2$ 時, 單位為 w/kg .
- β 比鐵耗(Spezifischer Eisenverlust), 當 $B = 10000$ 高斯時, 單位為 w/kg .
- γ_e 鐵心的比重, 單位為 kg/cm^3 .
- γ_w 繞組的比重, 單位為 kg/cm^3 .
- $\delta_0, \delta_1, \delta_2$ 寬度, 單位為 cm .
- ε 鐵心減縮的比值(Kerneinschnürungsverhältnis).
- ζ 磁軛增大的比值(Jochverstärkungsverhältnis).
- θ, θ' 繞組的溫升, 單位為 $^{\circ}\text{C}$.
- λ, λ' 比漏磁導數(Spezifische Streuleitwerte).
- μ, μ' 窗比(Fensterverhältnis)(窗高與窗寬的比值).
- ξ 功耗比(Verlustverhältnis)(電流熱耗與鐵耗的比值).
- σ 由鐵心減縮而生的便宜度(Verbilligung durch Kerneinschnürung).
- Φ 主磁流, 單位為 m (馬克斯威).
- Φ_s 漏磁流, 單位為 m .
- Ψ 價格比(Preisverhältnis)(鐵心價格與繞組價格的比值).

三. 先決條件

近日變壓器的製造,除少數特種製造法外,幾均用圓形鑄捲,這是因為注意到短路時所生力的作用,並為易於製造之故。因之,鐵心截面最合宜的形式亦為圓形。在近日的製造中,由於切床的代替衝床,鈔鋼片已可切成任意的寬度,故鐵心亦可製成約為圓形的截面。第一圖係一普通的鐵心截面,其所製成的級數因變壓器容量的大小而有多少之不同。



第一圖. 圓形鑄捲變壓器的鐵心截面

同。鐵的填隙係數係以假定厚為 0.35 mm 的紙絕緣鈔鋼片而決定者。(所謂鐵的填隙係數是指淨鐵心截面與其外接圓面積之比而言;在第一圖中,左邊為 0.79 右邊為 0.67)。通常,在設計中,鐵心填隙係數取 0.75 到 0.8 較小之數值適用於級數較少的鐵心及有通風槽的大容量變壓器。為簡便計,在下面的設計中,鐵心填隙係數將採用 0.75 之值。

窗的大小不應像普通那樣地在每個方向從鐵量到鐵;祇有量度窗的高度時是從下磁軛的上邊量到上磁軛的下邊的,而量度寬度時則須從一鐵心外接圓周至另一鐵心外接圓周。其誤差則很小,如第二圖所示。繞組填隙係數。是一變動很大的數值,與下列諸量有關:變壓器的容量,電壓的大小,繞組的種類及短路電壓。在設計變壓器時,繞組填隙係數,可

按 Liwschitz 氏所繪的曲綫[12]而估計之(見附錄)。

變壓器價格的變動亦很大,但由 Vidmar 氏所應用的,我們亦能得一個較合適的平均值(雖然是馬克數,但可以從此得知一個比例):已裝配好的鐵心的單價(包括厚為 0,35 mm 的高度鈔鋼片,絕緣紙及加工等一切費用),約為 2 馬克/仟克;已裝配好的繞組的單價(包括絕緣、墊板及裝入變壓器中的一切費用,但絕緣套及其引出線不包括在內),銅質線捲約為 6 馬克/仟克,鋁質線捲約為 12 馬克/仟克。

電流熱耗及鐵耗通常均為已知,有時已知其數值,有時則知其相互間的比值,由下文的討論,我們當知其相互間的比值實與該變壓器的負載種類有關。吾人均知一變壓器的電流熱耗與鐵耗的比值與該變壓器本身的可能最小的功耗有密切的關係。在所謂電力變壓器(其負荷大致常定不變)中,若電流熱耗等於鐵耗(即其比值為 1)時,則其相對功耗(功耗功率除以額定功率)為最小。但如一變壓器的主級常接於電源上,而其副級僅祇有一部分的時間滿載,則電流熱耗與鐵耗的比值,將完全不同。這種變壓器,我們稱之為燈用變壓器。在這種情況下,我們用 T 表主級接電的時間,用 t 表副級負載的時間,以示區別。一變壓器的電流熱耗 N_w ,在一定的負載(即有一定的電流密度)下,為:

$$N_w = r \cdot j^2 \quad (1)$$

其中 r 為一常數, j 為電流密度 (a/mm²)。該變壓器的鐵耗 N_e 在一定的電壓下,為:

$$N_e = s \cdot B^2 \quad (2)$$

其中 s 為一常數, B 為鐵心中的磁流密度。當主級接電的時間為 T 時,則其損失功 A_v 可如下式所示:

$$A_v = r \cdot \int_0^t j^2 dt + s \cdot B^2 T \quad (3)$$

副級輸出的功率係正比於磁流密度與電流密度的乘積,如後(14)式所示,故副級輸出的功可寫成下式:

$$A_2 = O \cdot B \cdot \int_0^t j dt \quad (4)$$

其中 O 為一比例常數。因一變壓器的電壓可視為常定不變,故 B 亦保持

不變，而僅有 j 隨負載而變。主級接受的總功 A_1 ，可由副級輸出的功與損失功之和求得：

$$A_1 = A_2 + A_v, \quad (5)$$

如將損失功與主級接受之功的比式，對電流密度 j 微分，則可得最小的相對損失功。

$$\frac{d}{dj} \left(\frac{A_v}{A_1} \right) = 0 \quad (6)$$

實行微分，並經變換後得：

$$\frac{r}{t} [2 \left(\int_0^t j \, dt \right)^2 - t \int_0^t j^2 \, dt] - s \cdot B^2 \cdot T = 0. \quad (7)$$

此通式可適用於任一負載變化的情況。若我們已知此負載的時間方程式，則該方程式可以解出。

當一恆定不變的負載（亦即 j 為常數），其負荷時間為 t 時，則：

$$r \cdot j^2 \cdot \frac{t}{T} = s \cdot B^2, \quad (8)$$

此式亦表示一變壓器的鐵耗必為電流熱耗的 t/T 倍，亦即其功耗的比值為：

$$\xi = \frac{N_w}{N_e} = \frac{T}{t}. \quad (9)$$

故此功耗的比值由負載的種類而定。因之，在一定的功耗比值時，如何方能製造一最便宜的變壓器，係一問題。按 Vidmar 的定義：一最便宜的變壓器，係其鐵心的價格等於其繞組的價格。若吾人欲使其功耗本身變小，則必將選用一較小的電流密度及磁流密度，因之，所需材料將較多，亦即變壓器的費用將較貴也，但欲得一最便宜的變壓器，亦應使其鐵心的價格等於其繞組的價格，同時在其功耗比為 ξ 時，僅有最小的功耗¹⁾。一變壓器本身的購置費用究應多少，我們可由其總價格的計算得出，亦即在一變壓器所使用的一生中，其所需的折舊及利息，修理及功耗的費用。如下式成立，則無疑的，我們可得一所謂最適當的變壓器：

$$\text{折舊} + \text{利息} = \text{修理費} + \text{功耗費}.$$

本書將討論四種變壓器，（均用圓形線捲，理由如前）：單相鐵心式，單

相鐵殼式，三相鐵心式及三相五柱足式。至三相鐵殼式變壓器由於其通風不良及短路時的不够安全，已很少製造（三相五柱足式已代替三相鐵殼式的地位）。用方形線捲的單相鐵心式及單相鐵殼式變壓器（如用於單相交流機車的變壓器），此處將不予討論，因由於其線匝電壓的不能任意選用，以及由於其各個線捲的抽頭情況（因機車的速度，係用變壓器的電壓來調整，故此種變壓器常有很多抽頭）的不同，已不在本書所討論的範圍內。我們亦將不討論多繞組變壓器，因其設計方法可由本書以後所用的概念中推出。

註 1) Vidmar 氏曾於 1928 年在他的“對於變壓器的設計理論”一題中證明，一“最適當的”變壓器（不是最便宜的變壓器）乃是標準的並推出一式，照此式不應 $\xi=1$ 而應 $\xi=\psi$ 公式中得來。他所導來的一式為！

$$\frac{(1+\xi)(1+\psi)}{\sqrt{\xi\psi}}$$

此式的最小值將決定一“最適當的”變壓器，並斷言，此最小值在 $\xi=\psi$ 時。在一定的負載情況下，如欲製造一相對功率耗為最小的變壓器，則首先假設 ξ 為已知。若以 ξ 為常數，將 Vidmar 氏式按 ψ 微分，則得 $\psi=1$ ，由此結果可知，欲製造一最便宜的變壓器，必須基於由負載情況而決定的最合適的功率耗比值。同樣，以 $\psi=1$ 為常數，將該式按 ξ 微分之，則得 $\xi=1$ 。由上二結果可知製造一最便宜的變壓器，係其鐵心的價格等於其線卷的價格，因之，如其電流熱耗等於其鐵耗時，則其相對功耗將為最小。如欲另用他法來研究 Vidmar 氏式者，則為不可能之事，因 ξ 與 ψ 為互不相關的變數。Vidmar 氏亦未導出其彼此之間的關係。因之，若按 Vidmar 氏的方法，將不能找出一最適當的變壓器，它必須依上述方法以求得之。