

電 機 學

第 二 冊

Л. М. ПИОТРОВСКИЙ 著

清華大學電力機械教研組譯

目 錄

第二篇 變 壓 器

第十四章 概論	259
1. 變壓器製造的發展	259
2. 基本定義	261
3. 變壓器的基本類型	263
4. 額定值	263
5. 變壓器的運行原理	264
6. 變壓器的基本構造元件	265
第十五章 單相變壓器的無載運行	275
1. 概述	275
2. 變壓器無載運行時的物理情況	275
3. 最簡單的變壓器的無載運行	277
4. 變比	281
5. 實際的單相變壓器的運行情況	281
6. 變壓器的無載損耗	283
7. 變壓器的無載等值電路及參數	286
8. 無載實驗	287
9. 單相變壓器無載運行特性數據	288
10. 決定三相變壓器無載運行的附加因數	288
11. 三相變壓器磁路系統的分類	288
12. 繞組連接的分類	290
13. 繞組連接圖	291
14. 變壓器繞組連接組	292
15. 各種繞組連接法的應用範圍	297
16. Y/Y—12 聯接變壓器的無載運行	297
17. Δ /Y 聯接變壓器的無載運行	300
18. Y/ Δ 聯接變壓器的無載運行	301

19. 有第三繞組的 Y/Y-12 聯接法	302
20. 三相變壓器無載運行的特性數據	302
21. 例題	302

第十六章 單相和三相變壓器的短路 304

1. 概述、短路電壓	304
2. 短路時變壓器工作的物理情況	305
3. 被折合過的變壓器	308
4. 折合過的變壓器短路時的向量圖	310
5. 變壓器短路時的等值電路	311
6. 變壓器的短路三角形	312
7. 短路時的損耗	313
8. 短路參數的決定	314
9. 三相變壓器的短路	315
10. 例題	316
11. 簡單同心繞組變壓器的漏磁	316
12. 例題	321

第十七章 變壓器在負載時的運行 323

1. 概述	323
2. 最簡單變壓器在負載時的運行	323
3. 正常負載時變壓器的向量圖	324
4. 變壓器的基本方程式	326
5. 變壓器正常的等值電路	328
6. 將激磁線路移前的變壓器等值電路	329
7. 等值變壓器的向量圖	331
8. 變壓器向量圖的簡化	332
9. 當 $U_2 = f(\cos \varphi_2)$ 時的向量圖	333
10. 副電壓變化 ΔU 的確定	334
11. 例題	335
12. 變壓器的效率	336
13. 例題	339

第十八章 三相變壓器的不平衡負載 340

1. 不平衡的概念和在不平衡負載下的分析條件	340
2. Y/Y ₀ -12 系統的單相短路	341

3. Δ/Y_0-11 系統的單相短路	346
4. $Y/\Delta-11$ 系統的二相短路	347
5. V 形接法變壓器的運行	348
第十九章 變壓器的發熱和冷卻	351
1. 概述	351
2. 變壓器按照冷卻方法的分類	351
3. 變壓器的散熱情況	352
4. 變壓器發熱的時間常數	353
5. 變壓器的鐵心	354
6. 繞組	356
7. 油	357
8. 油箱	358
9. 最大允許溫界	364
10. 溫度對變壓器壽命的影響	365
11. 變壓器的過載	366
12. 變壓器的溫度控制及過熱保護	367
第二十章 變壓器的並聯運行	370
1. 變壓器並聯運行的條件	370
2. 不同變比時變壓器的並聯運行	371
3. 不同組別的變壓器的並聯運行	375
4. 短路電壓不同的變壓器的並聯運行	376
第二十一章 變壓器的瞬變情況	380
1. 瞬變情況的分類	380
2. 無載合閘電流	380
3. 突然短路電流	385
4. 短路時的發熱現象	386
5. 突然短路時的機械應力	386
6. 變壓器的過電壓現象, 它們的原因和特性	389
7. 在過電壓時變壓器的等值電路	391
8. 在變壓器端點的過電壓	393
9. 在開始的一瞬間, 變壓器繞組裏的電壓分佈	393
10. 瞬變過程	395
11. 過電壓的保護	397

第二十二章 特殊變壓器及近代變壓器製造狀況	404
1. 概論	404
2. 自耦變壓器	404
3. 三繞組變壓器	408
4. 帶有在負載下調整電壓設備的大型變壓器	415
5. 具有平勻的電壓調整的變壓器	418
6. 汞弧整流器用變壓器	418
7. 試驗用變壓器	421
8. 其他特殊型式變壓器的簡述	422
9. 現代變壓器製造的發展道路	426

從二十世紀一十年代開始，在變壓器的發展中，下面的因素的影響最大：

a) 由於在工業發展的國家，電力需要迅速增長，因而中央發電站的容量增大；

b) 由於要利用低熱量的燃料和水力而引起的電力傳輸線的發展；

b) 聯接各個別電力系統成爲大的電力系統；

r) 某些用電的工業特別是電化學工業和電冶金工業的發展。

從 1910 年到 1940 年，在工業國家裏，電力的消耗大約每 8-10 年就增加一倍。因而中央發電站的容量以及發電站內設備的容量都以極快的速度增長着：在 1915 年前後大發電站的容量是 4 萬仟伏安，到了 1935 年前後已經有 60 萬仟伏安甚至更大的發電站了。

變壓器的容量和發電站裏發電機的容量差不多是同樣增長的。早在 1930 年附近就已經能夠製造容量 10 萬仟伏安的三相五鐵心柱的變壓器。這個容量到現在還認爲是最高。爲了減輕這樣大的變壓器在運輸上的困難以及減少必需的備用變壓器容量，就採用了三相變壓器組的裝置。現在這種變壓器組所能達到的容量爲 $3 \cdot 65000 = 195000$ 仟伏安， $275/132/13.2$ 仟伏。

由於電力傳輸線的發展，變壓器的運用電壓也跟着容量同時增高，從 1907 年的 110 仟伏增加到 1921 年的 220 仟伏以及增加到 1937 年的 287.5 仟伏。

巨型高壓變壓器的生產和運用，給予變壓器製造者以一系列的最困難的問題，其中以變壓器的冷卻問題以及過電壓的保護問題最有實際的意義。

關於變壓器的冷卻問題，有各種方法來解決。最初流行很廣的、在油箱裏以水管冷卻的油浸變壓器，現在已被增加了冷卻表面的、空氣自

冷式變壓器所代替。爲了要增加冷卻表面，變壓器的油箱都附有管子或輻射器。這種變壓器的容量可以到 3×45000 仟伏安。在更大的容量的變壓器裏，一般都採用以一個或幾個鼓風機將輻射器吹冷的方法。這方法可以增加變壓器的容量 25-30%。

從一開始建造高壓傳輸線的時候起，變壓器的過電壓保護就成爲特出的問題。研究的結果證明了：某些保護措施，例如端匝絕緣的加強是不夠的；另外一些設備，例如保護抗流線圈，是沒有好處的。因此還在 1915 年前後，就有了這樣一個所謂不共振的（防雷的）變壓器的概念，這是這樣一種變壓器：在這個變壓器裏，不論什麼情況下，電壓的分佈都或多或少是均勻的，在起初，不共振變壓器是做成全電容保護的，以後採用了部份電容保護。關於蘇維埃電機工程師們在後一式樣的變壓器上的工作，請參看緒言。

因爲能量往往在三個不同的電壓間轉換（例如 121, 38.5 和 11 仟伏），因此三繞組的變壓器在最近的二十五年內得到很大的推廣，在特殊的情況下，還用到四繞組的。另一方面，巨大電力系統的聯合運行，需要變壓器在負載下能有 $\pm 15\%$ 的電壓調節。並且往往不單需要調節電壓的大小，也需要調節電壓的相位（縱的和橫的調節）。有時候兩種變壓器併合成一個。

變壓器的運輸是在巨型變壓器製造上一個困難問題。通常要運輸的變壓器，用一個特殊的架子夾住，架子的兩端支持在兩個火車輪座上。全部設備的尺寸和重量都很大，特別是三相的變壓器。在這個觀點上，後者就不如三相變壓器組了。

關於蘇聯變壓器製造的發展，請參看緒言。

2. 基本定義

變壓器是一種靜止的電器，把一種交流電的系統——原邊——改

變為另一種系統——副邊，普通後者有不同於前者的特性，例如有不同的電壓和不同的電流。

在一般情形下，變壓器的構成包括兩部份：a) 鐵心，作為磁通的通路；b) 兩個或兩個以上互相不連接的繞組（在特殊情形下，如自耦變壓器中，繞組也可以互相接聯的）。

有兩個繞組的變壓器稱為**雙繞組變壓器**；有三個繞組或更多的稱為**三繞組或多繞組變壓器**。雙繞組是最常用的型式；三繞組祇在容量比較大的變壓器中才用（大約在 5000 仟伏安以上）；而多繞組祇在特殊情形下才用。因此在這一篇中，我們主要將祇考慮雙繞組變壓器，而將另闢一章討論三繞組變壓器。

依照電流的不同，變壓器有**單相、三相和多相**之別。所謂多相變壓器的繞組，是指所有用一定方式連接起來的各相繞組所組成的整體。

變壓器中接受外來交流電能的繞組，稱為**原繞組**。另外的對外供給電能的繞組，稱為**副繞組**。依照繞組的名稱，與原繞組有關的所有數值，如功率、電流、電阻等，稱為**原功率、原電流、原電阻**等；而與副繞組有關的也同樣的稱為**副的**。

副電壓的大小一般不等於原電壓，如它小於原電壓，則變壓器稱為**降壓變壓器**。如大於原電壓，則稱為**升壓變壓器**。

兩繞組中，接到電壓較高的電網的那一個繞組，稱為**高壓繞組**（B. H.）。而接到較低電壓的那一個，稱為**低壓繞組**（H. H.）。

有分接的變壓器，是指繞組中有分接線頭，用以改變原、副繞組的匝數比的變壓器。祇是在變壓器名牌上所指出的一個特定的分接頭（主要出頭），才能得到額定的電壓和電流值。

為了要避免空氣對於繞組絕緣的侵蝕，和改善變壓器冷卻的條件，變壓器的鐵心和繞組都一起浸在滿盛變壓器油的鐵箱裏。這種變壓器

稱為油浸的。不浸在油裏的變壓器稱為乾的。

3 變壓器的基本類型

下列各種變壓器應用得最廣泛：

- a) 電力變壓器——為輸電與配電之用；
- b) 自耦變壓器——為在比較小的範圍內改變電壓之用，或用在交流電動機的啓動器中等；
- b) 感應調整器——為調整配電網中的電壓之用；
- r) 儀器用互感器——用在量測儀表的線路中；
- A) 專用變壓器——例如為電焊用的、電爐用的、試驗用的、水銀整流器用的或醫療設備用的等等。

這樣，變壓器的應用範圍是十分廣的。因此它的構造也是多種多樣的。但是決定各種變壓器運行的基本過程，和研究發生在變壓器內各種現象的方法，在本質上是一樣的。所以，以下在講變壓器時，我們將祇看它主要的一種，那就是單相和三相的雙繞組電力變壓器。

4. 額定值

額定值的確定，按照現行的蘇聯國家標準 ГOCT 401-41。

製造工廠所擬定的變壓器的運行情況，稱為變壓器的額定運行情況。

決定變壓器額定運行情況的各條件，稱為額定的條件，如：在名牌上標誌的容量、電壓、電流和頻率，甚至冷卻介質的額定條件等。

變壓器的額定容量(用仟伏安來表示)是符合蘇聯國家標準 ГOCT 401-41 所要求的、在副繞組端點的容量。

額定原邊電壓是接到變壓器原繞組端點而且滿足蘇聯國家標準 ГOCT 401-41 的電壓。

額定副邊電壓是當變壓器在無載時，原邊電壓在額定的情況下，分

按開關在相當的位置上時，在副繞組端點上所得到的電壓。

按照變壓器的額定容量和電壓所確定的電流，稱為原邊或副邊的額定電流。

例如使三相變壓器的額定容量為 $P_n = 100$ 仟伏安，額定原邊和副邊電壓為 $U_{1n}/U_{2n} = 6000/230$ 伏。

這時，額定原邊和副邊電流將為

$$I_{1n} = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot U_{1n}} = \frac{100 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6000} = 9.63 \text{ 安,}$$

和
$$I_{2n} = \frac{P_n}{\sqrt{3} U_{2n}} = \frac{100 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 230} = 251 \text{ 安}$$

我們必須將變壓器的實用功率和它的額定容量區別開來。因為在實際運行時，副邊電壓 U_2 是變化的。例如在 $I_2 = I_{2n} = 251$ 安和 $\cos \varphi_2 = 0.8$ 而電壓 $U_2 = 220$ 伏的情況下，由變壓器供給的功率只有 $100 \cdot \frac{220}{230} = 95.5$ 仟伏安。

在一般情況下，變壓器所供給的功率，在額定電流時，不同於變壓器的額定容量。所差的值相當於副邊電壓從無載到滿載時所發生的變化。

額定電流時的負載稱為額定負載。

50 赫(週/秒)的頻率被採用作為額定頻率。

5 變壓器的運行原理

變壓器的運行基於兩個不動的電路間電磁相互作用的原理。在一般情況下也可以是幾個電路間的相互作用。如果我們將其中一個電路接到交流電源上，那麼由於交流磁通相鏈的作用，在副邊電路上將出現交流電動勢。如果將副邊電路接通，就可以產生交流電流。這樣，原邊電路的交流電能就被轉變成副邊電路上的交流電能。

為了加強各電路間的電磁連繫，我們把各個電路裝在一個共同的

由薄鋼片疊成的鐵心上。下面我們將祇研究這種變壓器，至於沒有鐵心的變壓器（空氣心變壓器），在實用上的意義是很有限的。

6. 變壓器的基本構造元件

如同第 5 節所述，變壓器包含以下各元件：(A) 鐵心，(B) 繞組，如果變壓器是油浸式的，那麼還有 (B) 通到外邊線路的絕緣套管和 (Γ) 油箱和變壓器油。

這裏我們先講述前三種元件，至於第四件在講解變壓器冷卻問題時再提出。

A. **變壓器鐵心** 整個變壓器的磁路和它的附屬零件稱為變壓器鐵心。從繞組與鐵心裝置的關係上，我們可區分它為：

- a) 鐵心式變壓器，在這裏繞組環繞着鐵心柱；
- б) 外殼式變壓器，在這裏繞組部份地被鐵心所圍着。

鐵心是由變壓器矽鋼片所疊成，矽鋼片的厚度為 0.35 或 0.5 毫米，含有高度的矽的成分（變壓器矽鋼片的品類——見第十五章第 6 節 A）。爲了減少渦流損耗，每片之間用厚度約 0.04 毫米的紙隔開或塗上絕緣漆。後者較紙絕緣有許多優點：漆層很薄，可耐熱至 150 度，在切片後可以退火，有較好的導熱性能，不易吸收水份等等。

單相和三相的鐵心式變壓器的鐵心如圖 14-1, 14-2 所示。它有兩個主要的部份，即

- a) 兩個、三個或一般地說有幾個鐵心柱 C ，上面裝着繞組；
- б) 兩個磁軛——上下各一—— A, A 。

有兩種裝配鐵心的方法——對接和重疊。第一種方法是將鐵心柱與磁軛分別集成，然後用螺絲桿壓緊並裝置而成。在鐵心柱與磁軛之間有一層耐熱的絕緣的薄層，這樣就可以避免鐵心柱與磁軛之間的渦流。

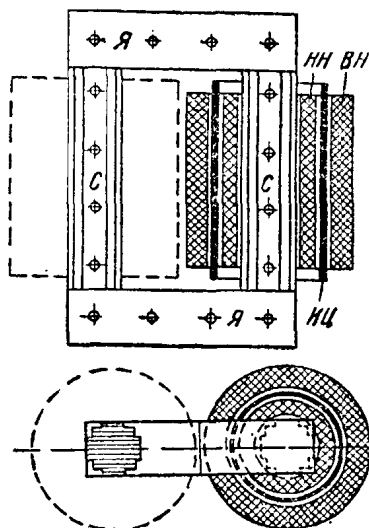


圖 14-1. 單相變壓器的鐵心和同心繞組

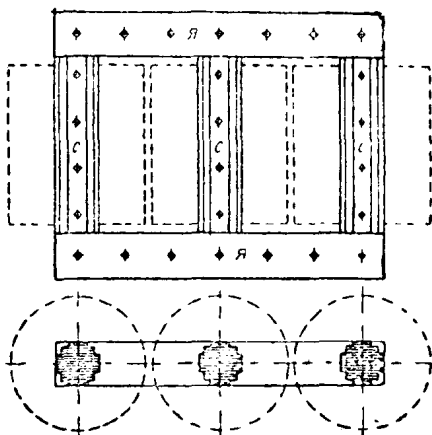


圖 14-2. 三相三鐵心式變壓器的鐵心

用第二種鐵心裝配法時，鐵心與磁軛的鋼片交錯重疊，如圖 14-3 所示。

第一種方法的優點是裝配時簡單，或以後檢修時拆卸方便。

第二種裝配方法較費時間，但是它也有一系列極有價值的優點：

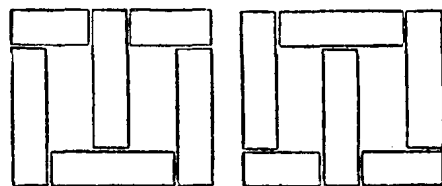


圖 14-3. 矽鋼片的重疊裝配法

a) 接縫的空隙減小，因此無載電流及接縫處的損耗也都減小了；
 б) 可以將就不用穿過鐵心的螺絲桿，或者至少可以減少些，因此鐵心的結構比較簡單；

в) 簡化裝配時用的設備及工具。

由於以上原因，使得第二種變壓器鐵心的裝配方法在現在用得最多。當鐵心的鋼片較寬的時候，有時是由幾個分開的框子所拼成的，如

圖 14-4 所示。

鐵心柱的縱斷面有時是正方形的，更常用的是外接一圓的階梯狀多邊形（圖 14-5 a, b 及 c）。正方形的鐵心只是在容量很小的變壓器裏才用，因為當鐵心是這種形狀時，在圓周內的面積不能得到很好的利用。一般的規律是：容

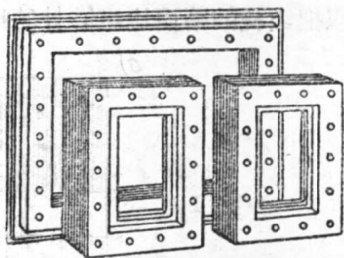


圖 14-4. 變壓器的複合鐵心

量愈大的變壓器，亦即鐵心柱外接圓的直徑愈大的變壓器，階梯數就愈多。如在莫斯科變壓器工廠所造的變壓器中，當圓周直徑在 100 毫米以下時，階梯數目不超過四個，從 100 到 500 毫米時，有五個或六個，當直徑到 1000 毫米時達到九個階梯。

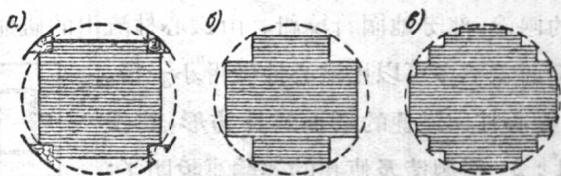


圖 14-5. 鐵心柱的斷面形狀

在容量大的變壓器中，在疊片之間留有通風道，其方向和鋼片的平面平行或垂直（圖 14-6 a 及 b）。

圖 14-6 b 的構造散熱較好，但卻比第一種複雜一些。

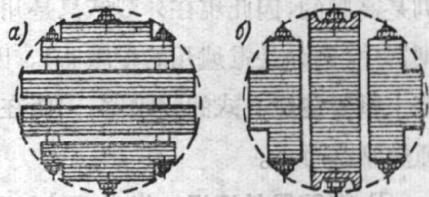


圖 14-6. 有通風道的鐵心柱的斷面

變壓器的鐵軛斷面有長方形的也有階梯形的（圖 14-7 a, b, c, d, e）。當鐵軛為階梯狀時，磁

通在軛中的分佈比較均勻，因為在這種情況下，鐵軛疊片組的斷面更相當於鐵心柱疊片組的斷面。為了減少變壓器的無載電流及鐵損耗，可

以把鐵軛的斷面比鐵心柱的斷面做大 5-15%。

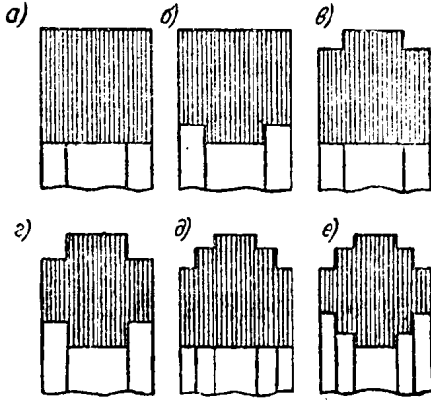


圖 14-7. 鐵軛斷面形狀

單相外殼式變壓器，如圖 14-8 所示，鐵心柱放在中間，鐵軛 $\mathcal{A}-\mathcal{A}$ 放在鐵心柱的兩邊，部份地圍着繞組。由鐵心柱流出的磁通分兩路走，因此鐵軛的斷面差不多可以比鐵心柱做得小一倍。按形狀來說，鐵心柱與鐵軛的斷面為長方形，其邊長的比約為 1:2。從製造及使用的經驗裏說明了：外殼式變壓器不如鐵心式方便。鐵心式的鐵心在構造上較簡單，繞組的安裝和絕緣也比較容易，特別是高壓的，因此現在外殼式只是用在一些特種變壓器中（例如是電爐用的變壓器）。因為在蘇聯，實際上祇製造鐵心式的變壓器，因此在下面將僅指這種變壓器而言。

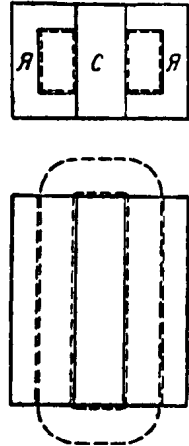


圖 14-8. 單相外殼式變壓器的鐵心

B. 變壓器的繞組 從高壓繞組和低壓繞組(B. H. 和 H. H.)相互間位置的不同，我們將繞組分別為：

a) 同心式繞組，即在每一個橫斷面上，繞組都是一些同圓心的圓周；

6) 交疊式繞組，在這種繞組裏，沿着鐵心柱的高度，高壓線圈和低壓線圈相互交替地疊裝着。

a) 同心式繞組，同心式繞組如圖 14-1 所示。通常將低壓繞組放在靠近鐵心的地方。因為從對鐵心柱絕緣的觀點來看，這種裝置方法更合適些。繞組間的絕緣採用由電木紙黏成的或由特殊紙板(элефан-тайда)所做成的絕緣筒(И. П.)。

圓筒形繞組是同心式繞組的最簡單的形式。它是一個由圓銅線或更普通的由扁銅線所繞成的線圈。如果線圈的匝數不多，那麼線圈就繞成單層的螺旋形(圖 14-9)。匝數很多的線圈則繞成好幾層，在每層

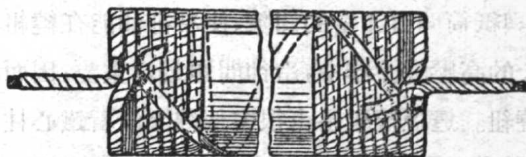


圖 14-9. 圓筒形繞組

間以厚度為 0.06—0.2 毫米的絕緣紙或紙板隔開。爲了要改善繞組的冷卻，它可以由兩個串接的線圈做成，並以寬度為 5—8 毫米的通風道將它們分開。

繞組可以做成分段式的，就是沿着鐵心柱的高度把它分成幾個線圈，而使每一個線圈的電壓不超過 600—800 伏。圖 14-10 所示是一個

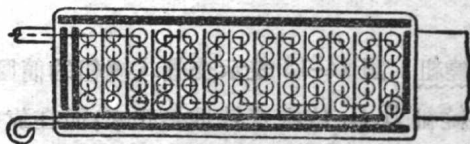


圖 14-10. 單式線圈

單式線圈(半線圈)，它是按照虛線所示的次序來繞的。線圈的裏端銲接到一根特殊的導線上，然後利用這根導線從裏面引出來。爲了避免這種麻煩，可以將兩個單線圈聯成一個雙式繞圈(圖 14-11)，從第一個

單線圈到第二個單線圈的接線是在裏面的，即在靠近鐵心柱的那一邊聯接。雙線圈的中間以厚度約為 1.5 毫米的紙板墊圈來絕緣。

由圖 14-11 所示的線圈所組成的線圈式繞組，常常直接繞在一個絕緣筒上（絕緣筒——請參看圖 14-1），這樣可以簡化繞組的製造；但這時它的冷卻表面卻祇是線

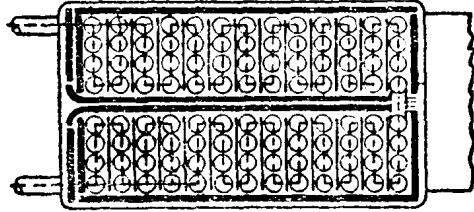


圖 14-11. 雙式線圈

圈的外表面，如果需要增加繞組的散熱面積，可以不將它直接繞在筒子上，而在線圈與紙筒間留相當的間隙，使冷卻油能在繞組裏面通過。

在容量大的高壓變壓器中，冷卻問題最為重要，因而繞組的構造採用所謂盤式繞組。這種繞組是由很多個線圈沿着鐵心柱的高度疊起來組成的；各線圈之間都留有空隙。每一個線圈（大都每一層祇有一匝），繞成一個扁平的環狀的盤形。各線圈之間，都互相串接着成爲一個所謂連續式繞組。製成這種繞組需用特種的繞法。這一種繞組的優點是在各線圈之間沒有焊接頭。假如繞組的每匝是由幾根並聯的導線組成，爲了使各導線間的電流分佈平均，導線須採用換位的方法，就是在繞製繞組時，每一根導線在連續各匝中，依次從一層換到次一層，如圖 14-12 所示。

6) 交疊式繞組 圖 14-13 表示交疊式繞組的簡圖。圖中高壓繞組 B.H. 和低壓繞組 H.H. 依次交替地疊起來，而在靠近磁軛的兩端都是 H.H.。交疊式繞組在鐵心式和外殼式變壓器中都採用，但主要是用在外殼式中。

B) 各類繞組的比較 從製造和運用的經驗裏，說明交疊式繞組不如同心式好。後者的優點是它的構造簡單，裝配或拆卸容易，高低壓繞

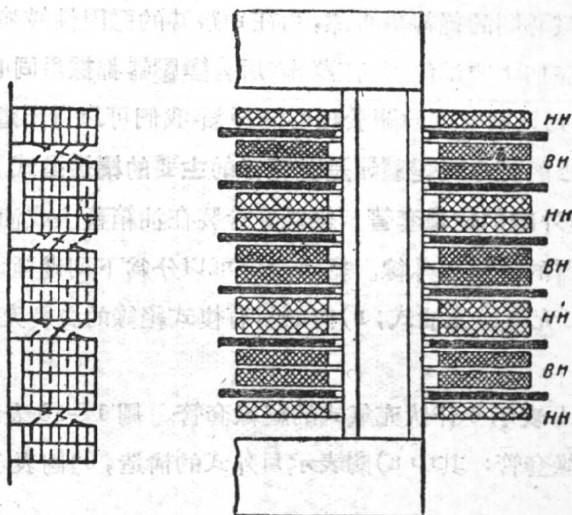


圖 14-12. 導線的換位

圖 14-13. 交疊式纜組

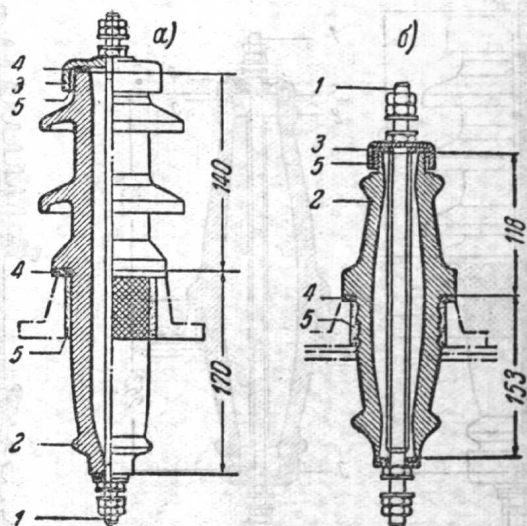


圖 14-14. 6 仟伏, 充氣式絕緣套管

1. 導電條; 2. 絕緣套管; 3. 金屬蓋;
4. 黏合油灰; 5. 防油橡膠做成的封閉墊圈