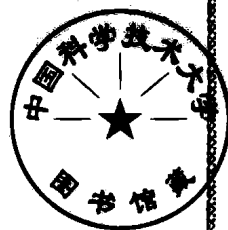


飽和電抗器

Л. А. 別索諾夫 著
С. М. 沃馬桑 諾維斯基
Д. И. 馬卡桑 諾夫切瓦
И. А. 卡桑

王 衆 託 譯



內 容 提 要

本書共選譯了蘇聯“電”雜誌上有關“飽和電抗器”的三篇論文，對於飽和電抗器這種近代的控制調整電器的作用原理、構造、用途以及設計和計算方法等作了初步介紹。其中：

“飽和電抗器在現代技術上的應用”一文，扼要地闡述了飽和電抗器的基本作用原理、分類以及在各種技術領域中的用途；

“飽和電抗器的設計與計算”一文，介紹了一種用解析法設計飽和電抗器的方法；

“飽和電抗器的簡化計算法”一文，介紹了一種當鐵心的形狀和尺寸爲已知時的飽和電抗器的簡化計算法。這種方法在大多數實際計算中是相當準確而且簡便的。

本書可供科學研究工作人員、高等學校師生以及廠礦技術人員參考之用。

飽 和 電 抗 器

原著者 Л. А. Бессонов и др.

翻譯者 王 衆 託

校訂者 蔡 宣 三

出版者 科 學 出 版 社

北京朝陽門大街117號
北京市書刊出版業營業許可證出字第061號

印刷者 上海中科藝文聯合印刷廠

總經售 新 華 書 店

1955年11月第一版 書號：0340 印張：2 21/25
1956年12月第三次印刷 開本：787×1092 1/25
(通)1.221 3.047 字數：59,000

定價：(10) 0.44 元

目 錄

飽和電抗器在現代技術上的應用.....	Л. А. 別索諾夫 (1)
飽和電抗器的設計與計算.....	С. М. 沃索維茨 (33)
飽和電抗器的簡化計算法.....	Л. И. 馬梁諾夫斯基 (56)
	И. А. 卡桑切瓦

飽和電抗器在現代技術上的應用*

Л. А. 別索諾夫

飽和電抗器(Дроссель насыщения)是一種在同時有恆定磁場與交變磁場的情況下工作的電抗器。在蘇聯文獻中,這種電抗器通常也叫作單向磁化電抗器(Дроссель с подмагничиванием);在外國文獻中,不少人把它叫作轉換器¹⁾(能量轉換器)。飽和電抗器具有下列特性:(1)可以用作一個沒有運動部分的可調整的電感抗;(2)可以用作直流量測變流器;(3)可以將週率增為原來的偶數倍。

本文首先闡述一些為說明飽和電抗器的特性與作用原理所必需的基本理論,然後研究在各種技術領域中電抗器應用的具體實例。

飽和電抗器的基本理論 設兩個同樣的電抗器的交流繞組 w 相並聯,並且與一個按餘弦函數變化的電壓相連接(如圖1);直流繞組相串聯,經過一個可調整的電阻 R 與直流電源相連接,這種直流繞組以後我們把它叫做控制繞組 w_y 。我們可使繞組的電阻與漏磁都很小;這時候,交變磁場的磁感應強度將是正弦變化的: $B \cdot \sin \omega t$ 。假設磁化曲線如圖2中的曲線1所示。如果這時沒有恆定磁場,那末兩電抗器中的電流(或磁場強度)由曲線2來決定。現在使繞組 w_y 中通入一些直流電。

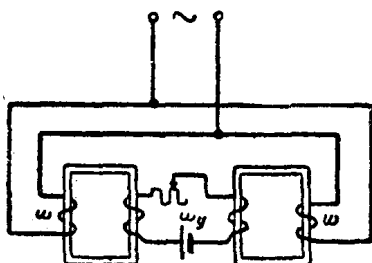


圖 1

* 原文 Л. А. Бессонов, Применение Дросселей Насыщения в Современной Технике, 載於 ЭЛЕКТРИЧЕСТВО, 5, 1948.

¹⁾ 此處俄文原文為 Трансдуктор。在英文中,稱之為 Transducer, 德文稱之為 Transducer——譯者註。

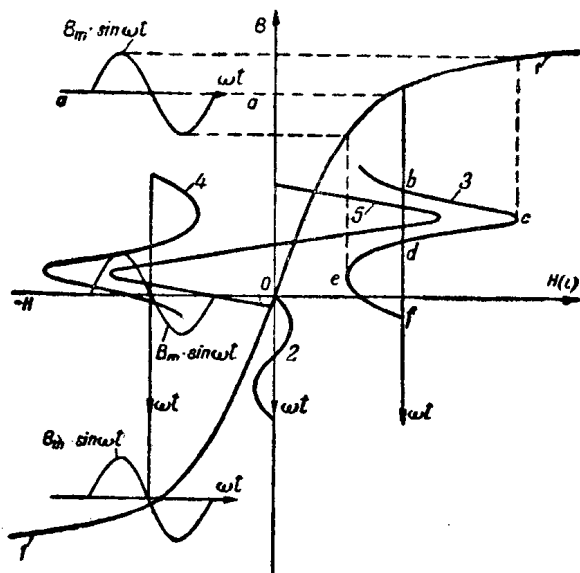


圖 2

假設在前半週期右邊的電抗器的恆定磁場與交變磁場方向相同，而在左邊的電抗器中方向相反。這時候，右邊的電抗器的磁場強度對時間的函數關係可用曲線 3 來表示，而左邊電抗器的可用曲線 4 來表示。曲線 3 與 4 的時間軸通過恆定磁場的磁場強度值；曲線 $bcd b$ 所包括的面積等於曲線 $def d$ 所包括的面積。曲線 3 與 4 對時間軸來說是不對稱的，因此包括偶次的與奇次的諧波。曲線 5 由曲線 3 與 4 相加而得來，它按一定的比例尺表示兩電抗器從電源取用的電流。由於曲線 5 對時間軸來說是对稱的，因此從電源取用的電流只包括奇次諧波。曲線 3 與 4 的偶次諧波由於在相位上是相反的，因此只是沿着線圈 w 循環流動，不會到電源中去。如果把曲線 2 和曲線 5 拿來比較一下，可以看出：在同一交變磁場 $B_m \sin \omega t$ 的情況下，當恆定磁場存在時，從電源取用的電流值要顯著地增加。在實際中常常應用如圖 3a 所示的這種伏安特性曲線族。橫軸表示交流電流（有效值）或者磁場強度，縱軸表示電壓或交流磁感應強度。這個曲線族中每一條曲線都是在恆定的直流電流 I 時取得的。最上

面的一條曲線是當沒有恆定磁場時電抗器的伏安特性曲線。若恆定磁場愈強，則其伏安特性曲線與 $I=0$ 時所得的曲線相差愈大。

如果畫一些 $B_m = \text{常數}$ 的直線與圖 3a 的曲線相交，我們可以畫出當 B_m 為常數時交流電流的有效值 I 與直流電流 $\bar{I}$ 的函數關係曲線（圖 3b）。

要是畫一些 $I = \text{常數}$ 的直線與曲線相交，我們就可以得到在不同的 I 值下 $B_m = f(\bar{I})$ 的曲線族（圖 3c）。

從圖 3b 可以知道，當交流電壓恆定不變（當 $B_m = \text{常數}$ ）時，從電源取用的交流電流的大小可以用來作為衡量直流電流的尺度，換句話說，圖 3b 說明可

以用飽和電抗器來作為一種量測直流電流大小的儀器。從圖 3c 可以知道，改變恆定磁場，可以使得飽和電抗器的電感抗值發生變化。飽和電抗器的電感抗隨繞組 w_y 中直流電流的大小變化的這一特性廣泛地應用於各種調整裝置中。在圖 1 所示的電路裏，每個繞組 w_y 中都要有一個由交流電流所產生的電動勢，這個電動勢等於繞組匝數與每個線匝中的電動勢的乘積。但是兩個繞組 w_y 中的電動勢的方向是相反的，因此在繞組 w_y 的電路中不會產生交流電流。如果把圖 1 的兩個電抗器的相鄰二鐵心支路連在一起，那末就得到了一個“Ⅲ”形的電抗器。

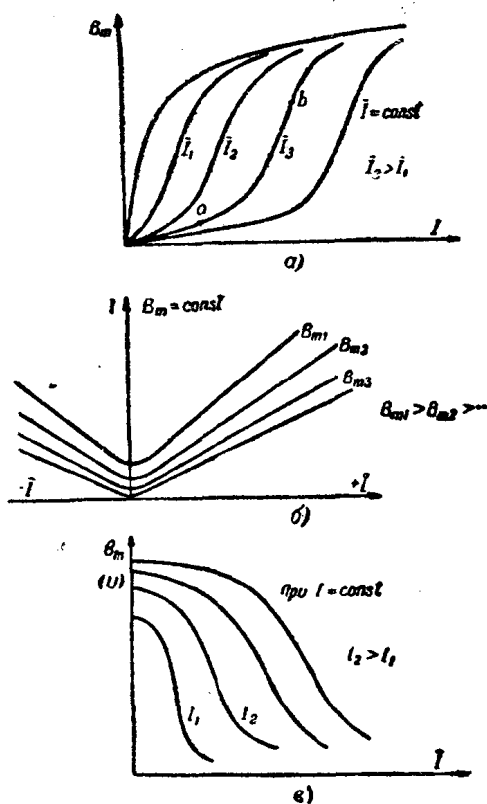


圖 3

如果交流繞組裝在“III”形電抗器的外面兩個鐵心柱上,仍然並聯,而繞組 w_y 裝在中間的柱上,那末交變磁通不會經過中間柱,因而繞組 w_y 中不會有交流電動勢。

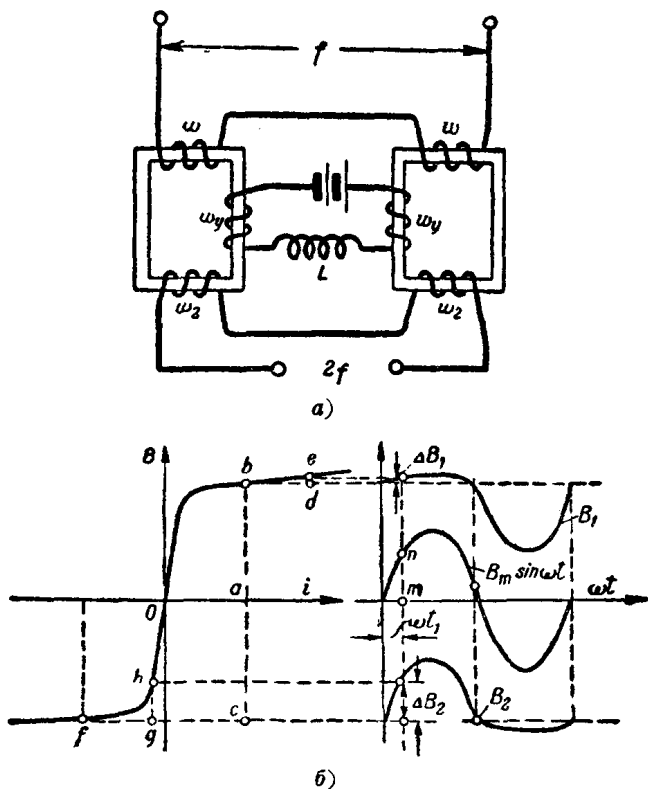


圖 4

飽和電抗器能把週率增加偶數倍這一特性可用圖 4 a、b 來說明。圖 4 a 所示為兩個電抗器,其交流繞組相串聯,而在直流繞組 w_y 的電路中接入一個大電感,以阻礙偶次諧波通過。在電抗器上還有串聯的繞組 w_2 。這種繞組是倍週繞組。倘使電源電壓是餘弦變化的,這時兩個電抗器中交變磁場的磁感應強度瞬時值的和將是正弦變化的,但是每一個電抗器的交變磁場的磁感應強度卻不是正弦變化的。這種線路的工作情況如圖 4 b 所示。令磁感應強度的恆定分量等於

線段 $ab=ac$ 。磁感應強度的瞬時值如曲線 B_1 與 B_2 所示；繪製這些曲線的根據是： B_1+B_2 的和應該是正弦形的。沿各對應繞組通過的是同樣的電流。繪製的方法如下：通過 b 點和 c 點畫水平線，任意取某一電流值，例如 bd （與其相對應的是 fg ），在磁化曲線上得 d 點與 g 點；因而可以得到 e 點和 h 點。 ed 線段等於 ΔB_1 ，而 gh 線段等於 ΔB_2 。

$\Delta B_1 + \Delta B_2$ 的和等於交變磁場磁感應強度的瞬時值。對應於交變磁場的綜合磁感應強度值的時間 ωt_1 等於 mn ，可按 $\omega t_1 = \arcsin \frac{mn}{B_m}$ 這一式子來決定。這樣，就可以逐點繪製 B_1 與 B_2 在開始四分之一週期內這一部分的曲線。第二個四分之一週期的曲線是開始四分之一週期曲線對垂直軸的映像。在後半個週期內，恆定磁場並不再像在頭半個週期內那樣與 B_1 方向一致，而是與 B_2 方向一致了。因此，後半週的 B_1 曲線將是前半週 B_2 曲線的映像。如果從 B_1 和 B_2 中減去其恆定分量，那末它們相互之間的相位差是半個週期，而對橫軸來說是互成映像的。這種曲線的特點是：偶次諧波的方向相反，奇次諧波的方向相同。所以在繞組 w_2 中由於偶次諧波所產生的偶次週率電動勢是應該相加的，而磁通的奇次諧波所產生的電動勢應該是相減的。如果繞組 w_2 聯以負載，那末其中通過的是電動勢的偶次諧波所產生的電流。

前面已經提到，飽和電抗器的電感抗因恆定磁場的大小改變而發生變化這一特性廣泛地應用於各種調整設備中。通常把應用於電力線路以調整大功率的單向磁化電抗器叫作飽和電抗器（這一名詞的狹義解釋），而把應用於控制電路、通常與其他元件一併使用以放大微弱的控制訊號的單向磁化電抗器叫作磁放大器。這種劃分是在相當大的假定下做出的，在某些情形中，有時很難決定某一飽和的電抗器究應列入那一範疇，但是從所研究的電抗器應用的具體線路的觀點來看，這種劃分還是非常有用的。

磁放大器 磁放大器的應用很廣。在最一般的情況下，它可了

解爲一種由飽和電抗器、變壓器、阻抗、固體整流器、有時還包括容電器所組成的電磁裝置。它可以放大微弱的直流訊號，把訊號變成強大得多的交流或者直流電的變化。磁放大器的主要組成部分是飽和電抗器。磁放大器可以分爲兩大類：功率磁放大器和電壓磁放大器。

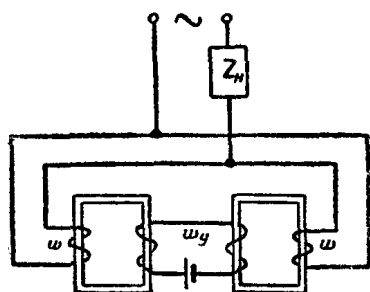


圖 5

對前者來說，要求它能因控制電路中的微小功率變化而引起負載中巨大的功率變化；對於後者來說，則要求其能因控制電路中微小的電壓變化而引起輸出端較大的電壓變化。

圖 5 所示爲最簡單的磁放大器的線路圖（它可看作飽和電抗器應用的最簡單的線路），本圖與圖 1 的唯一不同處只是電抗器與負載 Z_n 相串聯。改變直流電流（控制電流 I_y ），便可調整負載所取用的功率值。

當 $I_y = 0$ 時，負載中通過的是空載電流 $I_{x,0}$ 。用作功率放大器的磁放大器，表示其特性的量是功率放大係數 $k_{y,\alpha}$ 。所謂功率放大係數，就是負載取用的功率的變化與控制繞組（一個或多個）中耗用的功率的比，即

$$k_{y,\alpha} = \frac{(P - P_{x,x})}{I_y^2 R_y}$$

對於某一放大器來說， $k_{y,\alpha}$ 並不是常數，而是隨 R_n 與 I_y 而定的。 $k_{y,\alpha}$ 愈大，則放大器愈能發揮其作用。電壓放大用的磁放大器的工作原理將在以後討論。磁放大器如果與電子管放大器相比較，控制繞組的作用就和電子管中的柵極一樣。在磁放大器中也可達成反饋作用，正像在電子管電路中一樣。電子管放大器比磁放大器優越的地方是它沒有慣性，同時不受週率影響。而磁放大器可以得到比電子管放大器更高的效率與放大係數。

此外，磁放大器比電子管放大器顯得優越的是：(1) 可以控制隨便多低的週率；(2) 機械強度較大；(3) 耐用。

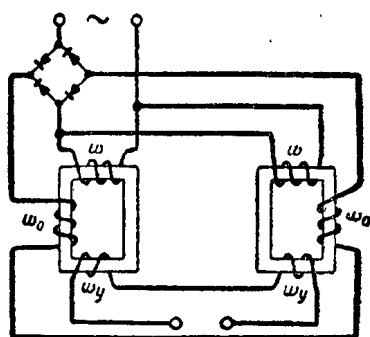
飽和電抗器提高調整能力的方法 提高飽和電抗器調整能力的方法如下：

(1) 利用正反饋作用；(2) 多級串接；(3) 利用諧振原理。

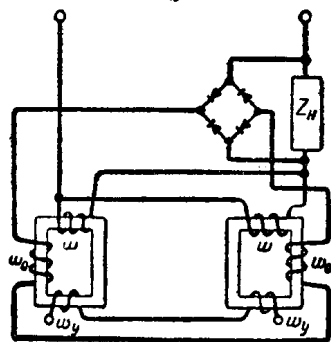
反饋作用是由負載交流電流經整流以後所產生的附加磁化力所產生的。因此，供磁化用的大部分功率得自交流電源，而飽和電抗器的調整能力却可顯著地提高。

圖 6 a 為串聯反饋線路，圖 6 b 為並聯反饋線路。在這兩個線路圖中， w_0 表示反饋繞組。在圖 6 a 線路中， w_0 繞組中流過的是整流後的電路自電源取用的電流。在圖 6 b 線路中，反饋繞組裏通過的是整流後的電流，這個電流與加於負載兩端的電壓成正比。有了反饋作用以後，圖 3 b 的特性曲線便要變形了：這些曲線變得更陡峭，而對縱軸也不對稱了（如圖 6 c 所示）。從圖 6 c 可以看出：有反饋作用時，在其他條件都相同的情況下，空載電流要比沒有反饋作用時來得大。

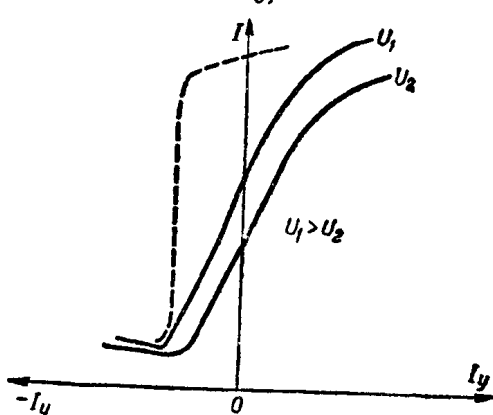
所謂飽和電抗器的多



a)



b)



c)

圖 6

級串接，就是把飽和電抗器依次聯接，使得控制電流只經過第一個飽和電抗器的控制繞組，然後每前一個電抗器輸出端的電流經整流後再流入後一個飽和電抗器的控制繞組。

圖 7 為磁放大器兩級串接的線路圖。負載接在最後一級的輸出端。

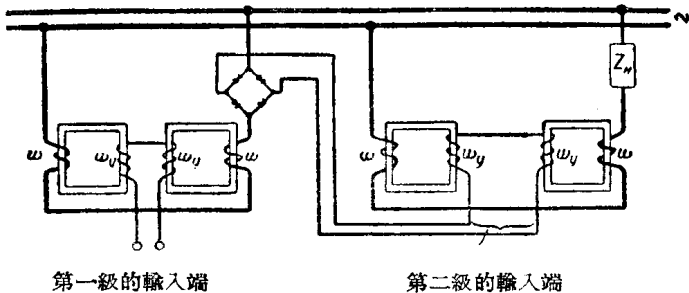


圖 7

沒有控制訊號的時候，由於每一級都被前一級的空載電流經整流以後而磁化，因此如不採取措施以減少頭幾級的空載電流，那末將要有極大的電流經過負載，這樣將使功率放大係數降低。在使用飽和電抗器時，可以利用諧振原理以提高調整能力。與鐵諧振電路相同，當輸入端的電壓發生微小變化時，可以使電路中電流發生顯著變化。許多諧振電路中可以使用飽和電抗器和容電器。磁化作用的微小變化或是引起諧振，或是使其離開諧振，因而可以得到比沒有容電器時要大的放大係數。

對控制電流極性敏感的飽和電抗器電路 有時候，要使飽和電抗器電路能够區分作用於其上的控制電流的極性。這種對極性的靈敏度可以是兩種形式：第一種形式是當某一極性時，通過飽和電抗器的交流電流增加，而當極性與前相反時，電流減少；第二種形式是當控制電流的極性變化時，在電路輸出端的交流電流的相位發生變化。我們先來研究第一種。能達成第一種對極性靈敏的方法的最簡單的電路如圖 8 a 所示。這種電路的特點是電抗器的繞組 w_B 中的電流是由電源直接經橋式整流器與電阻 R 而來，它使電抗器受到一個恆定的磁化作用（極化），而不受控制電流的影響。因此，當電源電壓

$U_c = \text{常數}$ 時, $I = f(I_y)$ 這一特性曲線的形狀如圖 86 所示。這時候, 空載點選在 $I = f(I_y)$ 曲線的中部。當正的訊號加入時, 交流電流要增加, 而負的訊號加入時, 電流要減少。負訊號的幅值不能超過外加磁化力的值。利用這種方法以獲得極性, 可使電抗器在特性曲線最陡峭的部分工作; 從提高調整能力的觀點看來, 這是有利的。這種方法的缺點是空載電流太大。有反饋作用的線路同樣也可達成第一種感受極性作用。第二種對極性敏感的作用可用下法得到: (1) 採用差式聯接法, 使得通過負載的電流是兩電抗器的電流的差; (2) 採用電抗器的橋式聯接, 把兩個電抗器接在相反的電橋的兩臂上, 而負載接在電橋的對角線上; (3) 採用變壓器式電路, 把負載與兩個磁化變壓器的交流次級繞組相串聯, 這兩個次級繞組極性相反地聯接。

差式電路 差式電路如圖

9 a 所示, 它包括兩個 III 形鐵心電抗器。每個電抗器上除了交流繞組 w 、控制繞組 w_y 以外, 還有一個輔助磁化繞組 w_B , 它由電源經電阻與橋式整流器來供電。負載中的電流等於兩電抗器電流的差。圖 96 便是兩電抗器中電流 I_1 與 I_2 以及電流差 ($I_1 - I_2$) 的曲線, 而

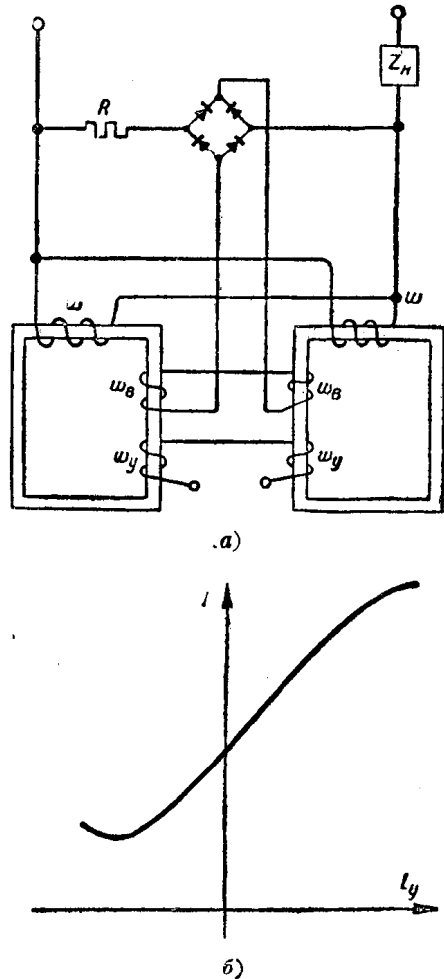


圖 8

($I_1 - I_2$) 曲線是通過原點的。從圖 9 6 可以看到, 電流 I_y 的符號改變會引起電流 I 符號的改變。

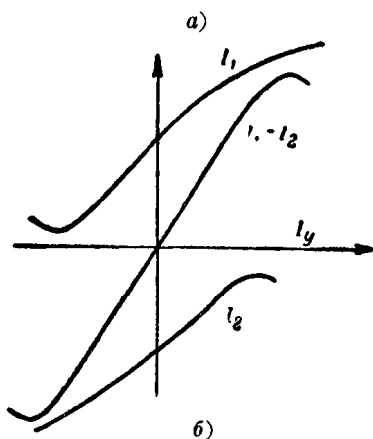
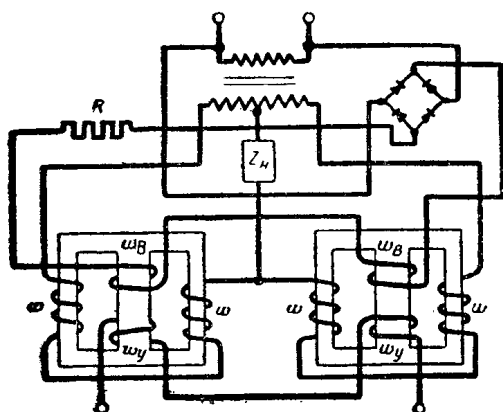


圖 9

實際上由於兩電抗器並不完全相同, 因而當 $I_y = 0$ 時, 負載中的電流並不等於零 (有不平衡電流存在); 必須設法加以調節, 使其為零。

在差式電路中採用反饋作用, 可以得到較高的放大係數。反饋作用可以不與輔助磁化作用一併使用, 也可以與輔助磁化作用一併使用。輔助磁化作用在這時候並不是像圖 8 a 所示那樣用來產生第一種形式的極性作用 (它由反饋作用產生), 而是用來減少兩電抗器中的空載電流。

橋式電路 其原理圖

見圖 10。電抗器接在電

橋的第一臂和第二臂上, 兩電抗器原先已經有了輔助磁化作用, 在第三臂和第四臂上接入同樣而且相等的阻抗 Z_3 與 Z_4 。在沒有控制訊號的時候, 兩電抗器的電感抗相等。由於這時候滿足下列關係

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{Z_3}{Z_4} \text{ 而 } \varphi_1 - \varphi_2 = \varphi_3 - \varphi_4,$$

所以電橋是平衡的, 而在聯接負載的對角線中電流等於零。控制訊號所產生的磁場, 在一個電抗器中是與原來磁化的磁場相疊加的 (圖

中未畫原來磁化繞組)，而在另一電抗器中是相減的。當控制訊號出現時，一個電抗器的電感抗增加，而另一電抗器的電感抗則減少，電橋這時候就不平衡了，因而有電流通過負載。這個電流的相位決定於控制電流的極性。 Z_3 與 Z_4 或是電阻，或是電容，如果是非線性阻抗就更好。

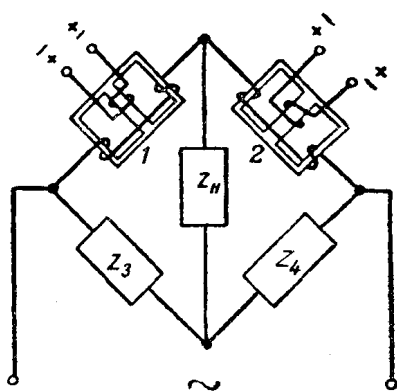


圖 10

變壓器式電路 圖 11 就是變壓器式電路。其中共有兩對電抗器（更正確一些，應該說是變壓器）。

第一對包括第一個和第二個電抗器，第二對包括第三個與第四個。各交流繞組 w_1 相串聯，方向是順次相同的，而第一個電抗器與

第二個電抗器的交流次級繞組 w_2 與第三、第四個電抗器的 w_2 反向聯接。電路中還有輔助磁化繞組 w_B 和控制繞組 w_y 。如果控制繞組中沒有直流電流，那末輸出端的電壓等於零，因為 $U_1 + (-U_2) = 0$ 。當控制繞組 w_y 中有直

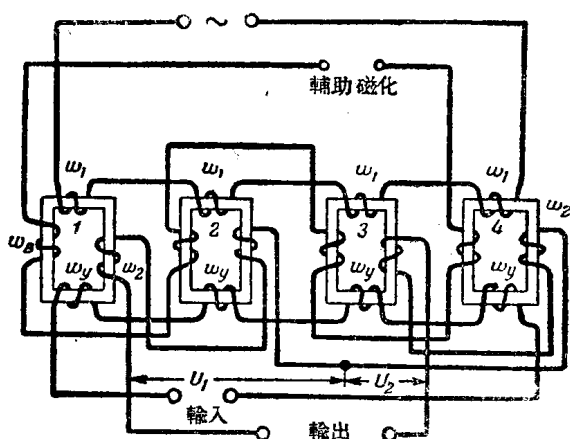


圖 11

流電流時，在一對電抗器中恆定磁場與輔助磁化磁場的方向是相同的，在另一對中是相反的。而輸出端電壓的相位則依控制電流的極性而定。這種電路當作磁性電壓放大器時，應用最廣。其優點在於 (1) 電的方面，輸出端與交流電源是完全絕緣的；(2) 增加 w_2 的匝數，可以得到較高的電壓放大係數，電壓放大係數是磁放大器輸出端

的電壓與加於控制繞組的直流電壓的比。

飽和電抗器用來量測直流電流^[1-6] 量測較大的直流電流時，要使用分流器。但是當直流電流達到相當大的數值時，例如在電化學和電熱學中有時要用高達 50—80 千安的直流電流；或者是當量測裝置必須緊湊、並且能夠經受震動時，例如在使用直流電的電氣鐵道上，或者是量測裝置要和直流電源相絕緣，例如在高壓直流輸電的情況下，最好是利用飽和電抗器以量測高額直流電流。用來量測直流電流的飽和電抗器，通常叫作“直流變壓器”。應該指出，這個名稱並不十分恰當，因為從字面意義看來，直流電決不能變成交流電。

如果在圖 1 電路通往交流電源的一條導線之中聯接一個安培計，那末這個裝置就是最簡單同時也是最好的直流變壓器了。從圖 36 可以看出：從電源取用的交流電流不僅是直流電流 I 的函數，而且還是交流電源電壓的函數。由此可見，要想使得量測準確，必須使得交流電壓恆定不變。要想達到這一目的，最簡單的方法便是用電壓穩定器來供電。用於“直流變壓器”的電抗器導磁體，最好是鐵鎳合金，這樣可以減少無載電流，並使 $I = f(I_y)$ 曲線有着更大的直線特性。正如一般的表用變流器與表用變壓器一樣，“直流變壓器”也有某些誤差。當直流電流較小時，由於無載電流的緣故，誤差通常是正值。

當直流電流較大時，由於漏電抗的緣故，誤差通常是負的。如果要量的直流電流非常大，那末變壓器只有一個線匝。

週率的偶數倍增^[7-10] 飽和電抗器可以使週率按偶數倍增加。使週率增至二倍的原理圖如圖 4a 所示，圖 46 說明週率倍增的原理。

如果對於倍增後電壓的波形的純正與否要求不高，則次級迴路並不需要調整得對二次諧波發生諧振。如果要想得到抑除高次諧波的電壓，那末在次級迴路中要接入調整在二次諧波的諧振電路。我們所研究的這種週率倍增器具有下垂的外特性，也就是說，當負載增加時，倍增器的電壓要降低。要想使得特性曲線下降得少一些，可以設法使得磁化作用的大小能隨負載的變化而自動改變，這只要利用

適當的反饋裝置,就可以辦到。

把週率增到四倍的方法有好幾個。第一個方法是仍舊使用圖4a的線路,不過把次級的諧振調整於四次諧波。第二種方法是把兩個如圖4a所示的倍增器串接起來。第三種方法是採用圖12所示的線路^[7],這個線路包括兩個圖4a所示的倍增器,其特點是由兩相電源

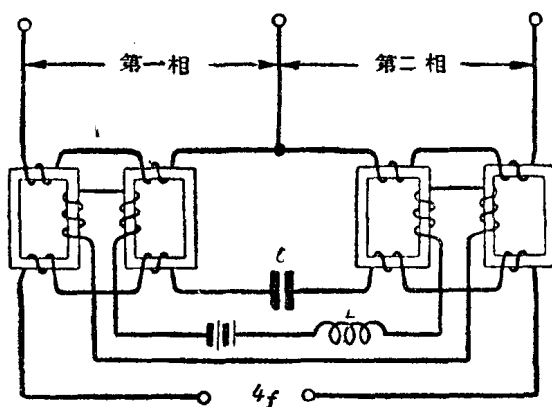


圖 12

來供電,而第一相電源與第二相相差 90° 。所有的初級繞組都相串聯,次級繞組也串聯,但卻是成雙地反接。由於在倍增器輸入端第一相與第二相間的相角差是 90° ,因此兩個倍增器的二次諧波間相角差是 180° ;換句話說,二次諧波相位相反,因而互相抵消。但兩個倍增器的四次諧波相差 360° ,也就是說同相的,而六次諧波卻又相消,其餘依此類推。要想使得這一電路的外特性下降較小,可以適當地利用反饋作用。

飽和電抗器用來調整相角差^[11, 12] 圖13左面是一個橋式電路,右面是它的圓圖。這個線路可以改變變壓器次級繞組的總電壓與A、B兩點間電壓之間的相角差 φ 。當磁化作用改變時,B點沿着半徑為 $\frac{U}{2}$ 的圓弧移動。當電抗器磁化到最大限度時, φ 角接近於零;當電抗器不受磁化作用時, φ 角接近於 180° 。