

內 容 提 要

本書敘述了自耦變壓器代替普通變壓器的優點，並對自耦變壓器的基本原理，自耦變壓器的阻抗及其對系統短路電流的影響，自耦變壓器的電壓調整、運行方式及在電力系統中的應用等作了詳細的闡述。

本書可供發電廠和電力網的設計和運行人員參考。

自耦變壓器在高压電力網中的應用

電力系統設計院著

*

1504D420

水利電力出版社出版(北京西郊科學路二里溝)

北京市書刊出版業營業許可証出字第 105 号

水利電力出版社印刷廠排印 新华書店發行

*

787×1092 1/32 開本 * 2 1/8 印張 * 50 千字

1958年11月北京第1版

1959年1月北京第2次印刷(4,101—7,130册)

統一書号: 15143·1192 定價(第10类) 0.35元

自耦变压器在 高压电力网中的应用

电力系统设计院著

水利电力出版社

前 言

在电力系統中采用自耦变压器来代替普通变压器，已經为世界各国广泛重視，它是各国在发展电力系統中所采取的一項新技术。对于我国来說，全国工农业生产的全面大跃进，更加迫切要求我們在电力系統中广泛采用自耦变压器以代替普通变压器。正是这个緣故，虽然目前我国在这方面尚缺乏制造与运行經驗，但它却引起了系統发展設計單位和其他有关部門的密切注意，在我国各地区电力系統发展設計中，未来 110 千伏电压以上的变电所內，只要可能，几乎均拟定裝設自耦变压器。因此可以断言，自耦变压器在我国高压电力系統中將有着它更为广闊的应用前途。

但是，自耦变压器具有一系列与普通变压器不同的特点，在应用时必须对这些特点加以研究。

由于以上原因，我們編写出这份关于自耦变压器的專題介紹，供大家参考。这里需要說明，我們只对自耦变压器与电力系統发展設計有关的一些特点作了闡述，其他一些关系不大的特点，例如自耦变压器的过电压保护、繼电保护等，則未作詳細說明，希望有关的专业單位，能够編写出这方面的資料。

編写象这类的專題介紹，对于我們来說，还是初次嘗試，由于編者水平的限制，謬誤之处一定不少，希望讀者提出批評与指正。

电力系統設計院

1958年8月

目 录

第一章	世界各国自耦变压器应用及制造簡况.....	4
第二章	自耦变压器的基本原理.....	10
第三章	自耦变压器的优缺点.....	17
第四章	自耦变压器的阻抗及其对 系統短路电流的影响.....	27
第五章	自耦变压器的电压調整.....	42
第六章	自耦变压器的运行方式.....	55
第七章	自耦变压器在电力系统中的应用.....	61
第八章	結束語.....	70

第一章 世界各國自耦變壓器 · 應用及製造簡況

世界各國自耦變壓器應用及製造簡況

在電力系統中採用自耦變壓器來代替普通變壓器的問題，近幾年來引起了世界各國極大的重視。到目前為止，許多國家已經在這方面取得了成功的製造與運行經驗。例如蘇聯、美、英、法、瑞典、瑞士、西德和加拿大等國，已經生產出許多高壓或超高壓電力自耦變壓器並在電力系統內應用；在芬蘭和澳大利亞，他們也擬定在未來的超高壓系統內採用自耦變壓器。

世界各國採用自耦變壓器是和他們發展超高壓電力系統緊密相聯的，到目前為止，已經有瑞典、英、法、西德、意大利、瑞士、加拿大、美、日本、澳大利亞、芬蘭和蘇聯等國，擬定了發展超高壓(275千伏以上)電力系統的計劃，其中瑞典、英、法、西德、加拿大、日本、美國和蘇聯并已建成了一些超高壓輸電綫路。

隨着電力系統容量、規模的發展以及發電廠與變電所容量的增加，提高變壓器單位容量和降低變壓器的造價與損耗，有着十分重要的意義。而自耦變壓器在電力系統中所以能夠逐漸獲得廣泛應用的主要原因，正是它比同容量普通變壓器的造價低、損耗小和重量輕。在同樣運輸條件下，變壓器做成自耦的可以大大提高它的單位容量。

下面分別就有關各國自耦變壓器的應用及製造情況，作一簡述。

瑞典

瑞典是世界上第一个最早建成(1952年)超高压(380千伏)输电线路的国家,同时也是第一个在超高压电力网中应用自耦变压器的国家。

从前,瑞典220与130千伏高压电力网的中性点系经消弧线圈卷接地,随着网路长度不断地增加,在这种网路内装设消弧线圈来消除单相弧光接地故障,逐渐不能起到作用,因此,在1950年,他们将220千伏网路改成了直接接地的运行方式。这样一来,给采用自耦变压器来连接380与220千伏网路创造了可能。

随着第一条380千伏输电线路(哈尔斯波朗格水电厂—密斯柯—哈里斯堡)的建成,在其受端哈里斯堡降压变电所内装设了自耦变压器。变压器系单杆,变比为 $\frac{400}{\sqrt{3}} / \frac{225}{\sqrt{3}} / 21.5$

千伏,容量为100/100/50兆伏安。在这个变电所内一共装设了六台这种容量的自耦变压器。从1952年到现在,瑞典380千伏电力网有了相当大的发展,目前,在大部份380千伏的变电所内普遍装设了自耦变压器。

瑞典380/130千伏的变压器也采用了自耦的,在其南部的哥登堡和哈尔新堡两个380千伏降压变电所内,由于130千伏网路改为直接接地,采用了 $\frac{425}{\sqrt{3}} / \frac{146}{\sqrt{3}} / 21.2$ 千伏,容量为170/170/100兆伏安的单相自耦变压器,每组容量达510兆伏安。

在另外一个水电厂内,装设了13/220/400千伏、594兆伏安的单相自耦变压器组,该变压器组的第三线圈连接两台容量各65千瓦的发电机。

以上这些自耦变压器都是由本国ASEA工厂制造的。这家公司认为400/220千伏不带调压装置的单相自耦变压器，最大可以做到270兆伏安，即一组容量为810兆伏安。

瑞典的自耦变压器都是没有带负荷调整电压装置的，他们认为，如果在变压器内部装了带负荷改变抽头的调压装置，将会影响提高自耦变压器的极限容量。

今后，随着用电量的增长，瑞典专家们认为380千伏电力系统已不能满足传输容量的要求，而需要采用更高的电压等级。现在他们正在研究采用500或650千伏的输电方案。500或650千伏网路与现有400千伏网路的连接，他们只考虑采用自耦变压器，而不采用普通变压器。他们认为，根据本国运输条件500/400千伏的单相自耦变压器的单位容量可以做到400兆伏安（每组容量1200兆伏安）；650/400千伏的单相自耦变压器的单位容量可以做到300兆伏安（每组容量900兆伏安）。

2 英 国

英国超高压系统的电压为275千伏。275千伏网路与132千伏网路的连接一律采用了自耦变压器。现在已经制造了275/132千伏，120兆伏安的带负荷调压的三相自耦变压器。

英国的自耦变压器一律做成三相的，并有带负荷调压装置，在大多数情况下，调压装置装于132千伏线卷内。

275/132千伏三相自耦变压器的额定容量统一规定为120兆伏安。到1959年，在他们275千伏超高压电网内预定装设83台这种型式的自耦变压器。

3 法 国

法国目前正在建设380千伏的超高压电力系统，其中许多

380千伏輸電綫路系由原来的225千伏双回綫路改造而成。380千伏网路与225千伏网路的連接，采用了自耦变压器。現在已經制造出了380/225千伏，100兆伏安的單相自耦变压器。

近年来，法国有許多100与150千伏的輸電綫路升压至150与225千伏使用。在这些升压綫路的兩端普遍裝設了100/150和150/225千伏的自耦变压器。

4 西 德

自耦变压器在以前沒有得到应用，因为西德所有高压电力系统是經過消弧綫卷接地的。随着380千伏超高压系統的发展和220千伏网路改为中性点直接接地，自耦变压器在电力网中开始得到了应用。目前，自耦变压器拟定用来連接380千伏网路与220千伏网路。西德AEG公司已經制造出了400/231+18%/30千伏、220/220/66兆伏安的帶負荷調压的單相自耦变压器。这种变压器連油約重206吨，綫卷的电抗如下：

高压与中压間	10%
高压与低压間	13%
中压与低压間	10%

5 瑞 士

瑞士目前尚无超高压系統，將來考虑采用380千伏。但現在已經用自耦变压器来連接200与150千伏网路。在留森德罗及劳芬堡变电所內裝設了253/207—140/11.3千伏、125兆伏安、帶負荷調压的單相自耦变压器組。

这种自耦变压器系由布朗-波弗里公司制造。这家公司还制造出了 $\frac{400}{\sqrt{3}} / \frac{260-190}{\sqrt{3}} / 16$ 千伏、200/200/40兆伏安的帶負荷

調壓單相自耦變壓器。

瑞士製造的自耦變壓器都是有帶負荷調壓裝置的。

6 加拿大

加拿大目前正在建設 345 千伏的超高壓系統。自耦變壓器擬定用來連接 345 千伏網路與 220 千伏網路。加拿大通用電氣公司已經製造出了 345/238 千伏，150 兆伏安的單相自耦變壓器。該變壓器將裝于橋河-巴古維爾電力系統內。變壓器連油約重 136 噸，長 7.93 公尺，寬 6.7 公尺，高 7.93 公尺。

7 美國

自耦變壓器在美國目前已經用來連接 345 與 300、345 與 230、330 與 130 千伏及 230 與 120 千伏的網路。

西屋電氣公司製造了兩台世界上最大的自耦變壓器。變壓器的電壓為 341/300—327/13.9 千伏，容量為 400 兆伏安，三相，連油總重 255 噸，長 7.6 公尺，寬 4.1 公尺，高 8.4 公尺，變壓器中壓側有帶負荷調壓裝置。這兩台自耦變壓器裝在印第安那密支干電力公司所屬垣納克利克發電廠內。

阿里斯-查姆公司製造了 345/230 千伏、200 兆伏安的單相自耦變壓器，變壓器連油重 180 噸，高約 9.3 公尺。

通用電氣公司製造了 230/120 千伏，185 兆伏安的三相自耦變壓器，變壓器連油重 260 噸。

美國煤氣及電力公司所屬 330 千伏系統內有幾個發電廠與變電所裝設了 330/130/13.2 千伏，容量為 150 兆伏安的三相自耦變壓器。

美國俄亥俄河流域 330 千伏電力系統的克利夫脫-克利克發電廠內裝設了二台 330/138 千伏，125 兆伏安的三相自耦變壓

器。此外，該系統還有二个 330 千伏降壓變電所也裝設了 330/138 千伏、125 及 150 兆伏安的三相自耦變壓器。

8 澳大利亞

澳大利亞目前尚無超高壓電力系統，但現在已經計劃在南部建設 330 千伏的超高壓系統。在這個計劃中，330 千伏系統與現有 220 千伏系統擬定採用自耦變壓器連接。

自耦變壓器由於運輸條件的限制，擬定採用單相的，每組容量為 200 兆伏安。

9 芬蘭

芬蘭第一條 380 千伏超高壓輸電綫路於 1954 年開始建設，預計到 1958 年有 650 公里的 380 千伏輸電綫路開始送電。在 380 千伏系統內所有與 220 千伏網路連系的升壓與降壓變電所皆擬定採用自耦變壓器。1962 年以前，在別他亞可斯基發電廠內將安裝一組（四台，其中一台備用） $\frac{405}{\sqrt{3}} / \frac{241}{\sqrt{3}} / 12.5$ 千伏、125/85 / 40 兆伏安的單相升壓自耦變壓器；在皮加拉中間降壓變電所內將安裝一組 $\frac{400}{\sqrt{3}} / \frac{238}{\sqrt{3}} / 21$ 千伏，75/75/50 兆伏安的單相自耦變壓器；在里基亞受端降壓變電所內將安裝一組 $\frac{380}{\sqrt{3}} / \frac{232}{\sqrt{3}} / 21$ 千伏，140/140/60 兆伏安的單相自耦變壓器。

10 蘇聯

以前，自耦變壓器未曾得到應用。隨着 400 千伏超高壓系統的建立和吸取了國外應用自耦變壓器的經驗，最近幾年來，

他們对在电力系统內应用自耦变压器的問題，特別重視起来。

苏联 110 千伏以上的电力系统采取了中性点直接接地的运行方式，这对自耦变压器的广泛采用創造了一个优越条件。

1955年，苏联莫斯科变压器厂制造了 $\frac{220}{\sqrt{3}} / \frac{110}{\sqrt{3}} / 10.5$ 千伏，容量为 40 和 80 兆伏安的單相自耦变压器。

1956年，莫斯科变压器厂又制造了 $\frac{220}{\sqrt{3}} / \frac{110}{\sqrt{3}} / 13.8$ 千伏，容量为 138/100/69 兆伏安的單相自耦变压器。該变压器裝在西伯利亞安加拉河上的伊尔庫斯克水电厂內。

1957年上半年，有三台 400/242/11 千伏、167 兆伏安的單相自耦变压器制成，該变压器組裝于古比雪夫水电厂——莫斯科 400 千伏輸电綫路的某受压端变电所內。

从以上所述，可以看出，在高压电力系統中采用自耦变压器来代替普通变压器，已經成为許多国家的一致方向。今后，随着世界各国超高压系統的发展和高压电力系統与中性点改为直接接地的运行方式，可以肯定，自耦变压器在各国电力系統中將會得到更为广泛的应用。

第二章 自耦变压器的基本原理

自耦变压器不同于普通变压器之点，是其一次綫卷和二次綫卷有着电路上的联系，而普通变压器的一次綫卷与二次綫卷單独分开，在电路上彼此沒有联系。

为了簡化起見，我們研究單相自耦变压器，其原理接綫如图 2-1 所示。

BB 綫卷叫做自耦变压器的公共綫卷。

AB 綫卷叫做自耦变压器的串联綫卷。

(一) 自耦变压器的电压及电流关系

当自耦变压器二次侧 bd 端空载，一次侧 ab 端加一电压 U_1 时，该电压产生的磁通貫鏈着 AB 綫卷的每个綫匝。令 AB 綫卷的匝数为

N_1 ，公共綫卷 BB 的匝数为 N_2 ，串联綫卷的匝数为 n ($n = N_1 - N_2$)，这时二次侧 bd 端的电压 U_2 为：

$$U_2 = \frac{U_1}{N_1} \cdot N_2 = \frac{U_1}{\frac{N_1}{N_2}} = \frac{U_1}{k_{1,2}} \quad (2-1)$$

式中 $k_{1,2}$ —— 自耦变压器一次侧与二次侧的变比，此变比亦等于自耦变压器一次侧額定电压 U_{1n} 与二次侧額定电压 U_{2n} 之比，即 $k_{1,2} = \frac{U_{1n}}{U_{2n}}$ 。

当 bd 端接入一負荷， bd 回路內將有电流 I_2 流过。令这时串联綫卷內流过的电流为 I_1 ，公共綫卷內流过的电流为 I ：

$$I = I_2 - I_1$$

略去自耦变压器的磁化电流，根据变压器基本定律，串联綫卷的磁动势应被公共綫卷的磁动势所均衡，即此兩綫卷的安匝数应相等

$$nI_1 = N_2 I \quad (2-2)$$

而

$$n = N_1 - N_2$$

$$I = I_2 - I_1$$

$$\frac{N_1}{N_2} = k_{1,2}$$

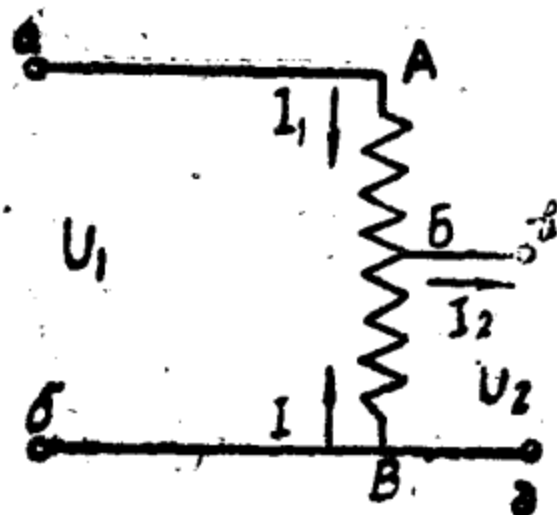


图 2-1

得电流关系:

$$\begin{aligned} \frac{I_1}{I_2} &= k_{12} \\ \frac{I}{I_1} &= k_{12} - 1 \\ \frac{I}{I_2} &= 1 - \frac{1}{k_{12}} \end{aligned} \quad (2-3)$$

(二) 自耦变压器的容量关系

因为: $\frac{U_n}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$

式中 U_n —— 串联绕组上的电压。

代入(2-2)式, 得:

$$U_n I_1 = U_2 I \quad (2-4)$$

由此可知, 自耦变压器串联绕组的容量与其公共绕组的容量相等。但是根据负荷分配情况, 在制造上两者可以不一定做得容量完全相同。

自耦变压器公共绕组的额定容量, 有人也叫做自耦变压器的标准容量。

略去自耦变压器的损耗和磁化电流, 一次侧输入的功率应与二次侧输出的功率相等, 即

$$\begin{aligned} U_1 I_1 &= U_2 I_2 = U_2 (I_1 + I) = U_2 I_1 + U_2 I \\ &= \frac{U_2 I_1}{k_{12}} + U_2 I_2 \left(1 - \frac{1}{k_{12}} \right) \end{aligned} \quad (2-5)$$

从这个式子可以看出, 通过自耦变压器传输的功率系由两部分组成, 一部分, 即(2-5)式中的前一项 $\frac{U_2 I_1}{k_{12}}$, 表示通过自耦变压器的串联绕组, 利用电路直接由一次侧传输到二次侧去的功率; 另一部分, 即(2-5)式中的后一项 $U_2 I_2$,

$(1 - \frac{1}{k_{12}})$ ，表示通过自耦变压器的公共綫卷，利用磁路由一次側傳輸到二次側去的功率。因为变压器的尺寸、重量及鉄心截面是由通过其磁路傳輸的这部分功率决定的，因此对于自耦变压器來說，其尺寸和重量是由公共綫卷的容量，亦即由其标准容量决定的。

因为自耦变压器的标准容量为 $U_2 I$ ，而通过容量为 $U_2 I_2$ ，

利用(2-3)式
$$I = I_2 \left(1 - \frac{1}{k_{12}} \right)$$

$$U_2 I = U_2 I_2 \left(1 - \frac{1}{k_{12}} \right) \quad (2-6)$$

由此可知，自耦变压器的标准容量只有其通过容量的 $(1 - \frac{1}{k_{12}})$ 倍，所謂自耦变压器的額定容量，系指其額定通过容量而言。

令
$$k_s = 1 - \frac{1}{k_{12}} \quad \text{而} \quad k_{12} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_{1N}}{U_{2N}}$$

$$k_s = 1 - \frac{N_2}{N_1} = 1 - \frac{U_{2N}}{U_{1N}} = \frac{U_{1N} - U_{2N}}{U_{1N}} \quad (2-7)$$

k_s 叫做自耦变压器的效益系数。 k_s 永远小于 1，因此，自耦变压器的标准容量总是小于其通过的容量，換句話說，用自耦变压器来傳輸功率时，它本身的容量可以比其通过的容量小。

当自耦变压器的变比 k_{12} 增加时，其效益系数亦随之增加，而自耦变压器的优越性随其电压变换比的增加而减少，当一次側电压与二次側电压相差不大时，采用自耦变压器来傳輸功率，其经济效益是非常显著的；反之，如果一次側电压与二次側电压相差很大时，采用自耦变压器的经济效果就不大。目

前各国实际应用的自耦变压器，其变比一般都在 3:1 以内，再大变比的自耦变压器还极少见。

自耦变压器可以做成三相的，也有做成单相的，绕线的接线方式有以下几种：

1. 星形接法

如图 2-2 所示

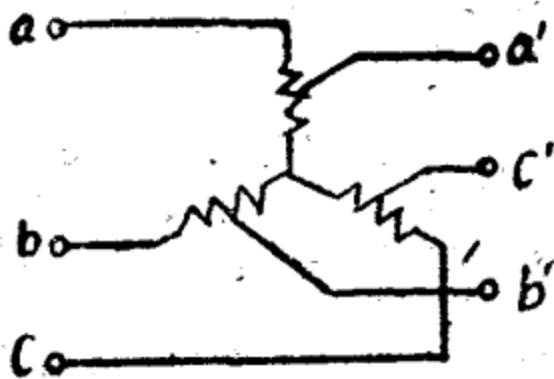


图 2-2

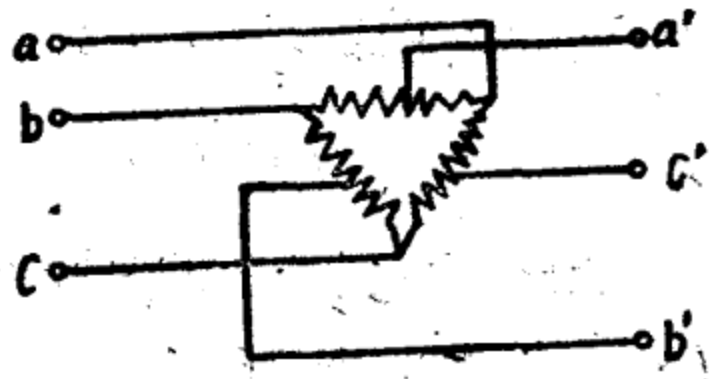


图 2-3

$$P_m = \left(1 - \frac{1}{k_{12}} \right) P_n$$

式中 P_m ——自耦变压器的标准容量（下同）；

P_n ——自耦变压器的额定容量（下同）；

k_{12} ——自耦变压器的变比， $k_{12} = \frac{U_{1N}}{U_{2N}}$ （下同）。

2. 三角形接法

如图 2-3 所示

$$P_T = \frac{k_{12} - 1}{\sqrt{3}} P_n$$

3. 延长三角形接法

如图 2-4 所示

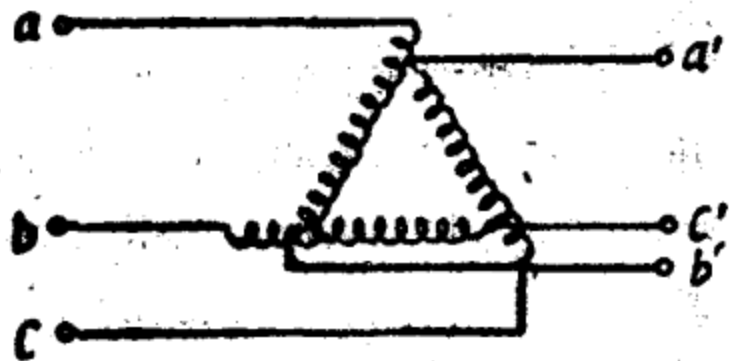


图 2-4

$$P_T = \left(\sqrt{1 - \frac{k_{12}^2}{4}} - \frac{\sqrt{3}}{2} k_{12} \right) P_N$$

4. 开口三角形接法

如图 2-5 所示

$$P_T = \frac{2}{\sqrt{3}} \left(1 - \frac{1}{k_{12}} \right) P_N$$

5. T 形接法

如图 2-6 所示

$$P_T = \frac{1.866}{\sqrt{3}} \left(1 - \frac{1}{k_{12}} \right) P_N = 1.075 \left(1 - \frac{1}{k_{12}} \right) P_N$$

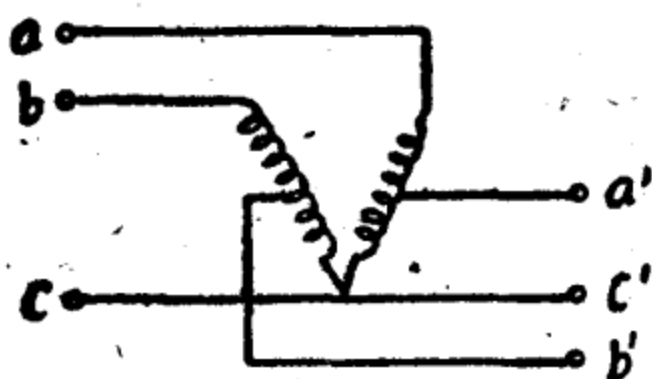


图 2-5

在图(2-2)~(2-6)中分别列出了在不同线卷接线方式下,自耦变压器的标准容量与其额定容量的关系,从比较各公式可知,对于以上五种线卷接线方式,以第一种星形接

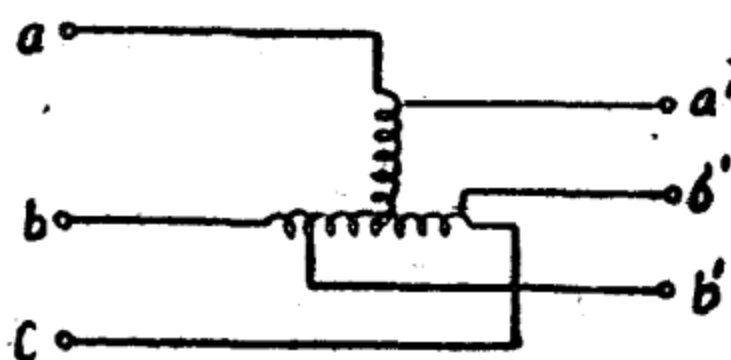


图 2-6

法最为经济,即在相同的额定容量下,自耦变压器的标准容量,以星形接法为最小。关于以上公式,可以根据前面所述的基本原理进行推导,此处不作叙述。

目前,在电力系统中最广泛应用的自耦变压器的线卷接线方式,是星形接法,其他的线卷接线方式的自耦变压器,极少应用。因此,下面所讨论的问题均指这种星形接线的自耦变压器而言。

实际中采用的星形接法的自耦变压器,由于铁心有饱和现象,因此在其线卷的感应电压内有三次谐波出现,为了消除三次谐波电流,这种星形接法的自耦变压器除了串联线卷与公共

繞卷外，还另外增設一个单独接成三角形的第三繞卷，如图 2-7 所示。

这个用来补偿三次諧波电流的第三繞卷与有自耦联系的高压及中压繞卷只在磁路上有联系，而在电路上是分开的。

自耦变压器的第三繞卷除了用作补偿三次諧波电流外，还可以作其他用途。例如連接发电机，同期調相机，靜电电容器，長綫电容补偿的并联电抗器以及作为变电所的附近用户的

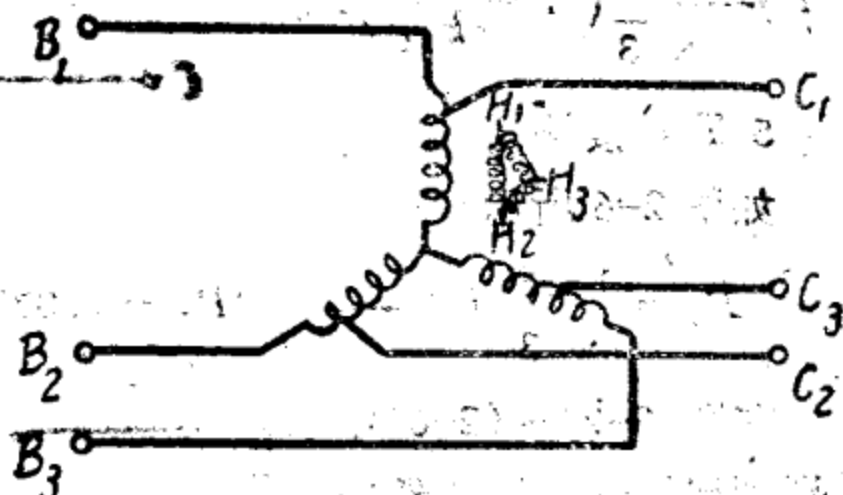


图 2-7

供电电源及变电所的所用电源。这时，这种自耦变压器与一个普通的三卷变压器的作用相等。

自耦变压器的第三繞卷的容量，从补偿三次諧波电流角度出发，根据有关資料，应不小于自耦变压器标准容量的 35% [文献 17, 18]。而第三繞卷的最大容量，则不能超过自耦变压器的标准容量，因为自耦变压器的尺寸及鉄心截面仅决定于通过其磁路所傳輸的这部分容量，也就是决定于自耦变压器的标准容量。

上面說过，自耦变压器的銘牌容量系指其額定的通过容量，而变压器本身的容量（即其标准容量）視自耦变压器高压与中压的电压变比不同而变化。因此自耦变压器第三繞卷的最大容量，亦隨高、中压的变比不同而变化。对于 220/110 千伏的自耦变压器其第三繞卷的最大容量为額定容量的 50%（因为变比 $k_{12} = 2$ ，效益系数 $k_s = 0.5$ ）；对于 330/110 千伏的自耦变

器，其第三綫卷的最大容量則可达額定容量的67%（这时 $k_{1,2} = 3$ ， $k_a = 1 - \frac{1}{3} = \frac{2}{3} = 0.67$ ）。

第一章 自耦变压器的优缺点

由第二章所述可知，利用自耦变压器高、中压綫卷的自耦联系，变压器本身的容量可以小于它所能通过的容量。而且这种效益随自耦变压器高、中压的变比不同而异。对于不同的額定电压变比，自耦变压器的效益系数 k_a 如下（表 3-1）。

表3-1

額定电压变比	效益系数 k_a
220/110	0.5
220/154	0.32
154/110	0.27

对于 154/110 千伏的自耦变压器，它的本身容量（即标准容量）仅为其通过容量的27%；对于 220/110 千伏的自耦变压器，它的标准容量也只有其通过容量的50%。

因此，自耦变压器較之普通变压器，有以下一些优点：

1. 消耗的制造材料少——因为自耦变压器本身容量的降低，其鋼材与銅的消耗量相应减少。与同容量（指通过容量）的普通变压器相比，从理論上講，自耦变压器的耗銅量与耗鋼量仅为普通变压器的 k_a 倍。这一点可以証明如下：

普通变压器的耗銅量

$$G_{mp} = G_{01} + G_{02} \propto S_1 n_1 l_{1cp} + S_2 n_2 l_{2cp}$$

式中 G_{01}, G_{02} ——普通变压器一次綫卷与二次綫卷的耗銅量。

S_1, S_2 ——普通变压器一次綫卷与二次綫卷的导綫截面。

l_{1cp}, l_{2cp} ——普通变压器一次綫卷与二次綫卷每匝綫圈的平均長度。

n_1, n_2 ——普通变压器一次綫卷与二次綫卷的匝数。

自耦变压器的耗銅量

$$G_{asmp} = G_{nocA} + G_{obu}$$

式中 G_{nocA} ——自耦变压器串联綫卷的耗銅量。

G_{obu} ——自耦变压器公共綫卷的耗銅量。

$$G_{nocA} \propto S_1 l_{1cp} (n_1 - n_2) = S_1 l_{1cp} n_1 \left(1 - \frac{n_2}{n_1} \right) = S_1 \cdot l_{1cp} \cdot n_1 \cdot k_{12}$$

式中 S_1 ——自耦变压器串联綫卷的导綫截面。

l_{1cp} ——自耦变压器串联綫卷每匝綫圈的平均長度。

n_1 ——自耦变压器串联綫卷加公共綫卷的总匝数。

n_2 ——自耦变压器公共綫卷的匝数。

$$G_{obu} \propto S_{obu} \cdot l_{2cp} \cdot n_2$$

式中 S_{obu} ——自耦变压器公共綫卷的导綫截面，由上章公式

(2-3) 可知 $\frac{I}{I_2} = 1 - \frac{1}{k_{12}}$ ，假定自耦变压器

公共綫卷与普通变压器二次綫卷內的电流密度

相同，則 $\frac{S_{obu}}{S_2} = 1 - \frac{1}{k_{12}}$ 。

$$\therefore G_{obu} \propto S_{obu} l_{2cp} n_2 = S_2 l_{2cp} n_2 \left(1 - \frac{1}{k_{12}} \right)$$

$$G_{asmp} = G_{nocA} + G_{obu} \propto [S_1 n_1 l_{1cp} + S_2 n_2 l_{2cp}] \left(1 - \frac{1}{k_{12}} \right) = [S_1 n_1 l_{1cp} + S_2 n_2 l_{2cp}] \cdot k_{12}$$

$$\therefore G_{asmp} = k_e \cdot G_{mp}$$

自耦变压器鋼材消耗量仅决定于通过其磁路傳輸的这部分容量，即决定于自耦变压器的标准容量。而普通变压器，由于其一次与二次綫卷沒有电路上的联系，其鋼材消耗量由其通过容量决定。因此自耦变压器的鋼材消耗量只有同容量普通变压器的 k_e 倍。

表 3-2 中列出了苏联制造的 220/110/11 千伏普通变压器与自耦变压器制造材料的实际消耗量資料：

表 3-2

变压器型式 及 容 量 (兆伏安)	鋼材消耗量	銅 消耗量	抽出部分容量	总 重	运输重量 (吨)
	(吨) (公斤/千伏安)	(吨) (公斤/千伏安)	(吨) (公斤/千伏安)	(吨) (公斤/千伏安)	
普通变压器① 40/40/26.7	37 0.93	9.7 0.24	58 1.45	150 3.75	75 ^②
自耦变压器 40/40/20	16.8 0.42	7.5 0.19	29 0.73	88 2.2	63 ^③
普通变压器 60/60/40	45 0.75	12 0.2	72 1.2	180 3.0	90 ^②
自耦变压器 80/80/40	25.5 0.32	12.8 0.16	49 0.61	131 1.64	66 ^② 98 ^③

①——热轧矽鋼片，其余变压器皆为冷轧矽鋼片。

②——不包括油重。

③——包括油重。

由表中所列数字可以看出，由于制造結構等一系列原因，使得自耦变压器的銅与鋼材的消耗并不完全按效益系数的关系降低，但其抽出部分的重量仍大致符合这一关系。

2. 造价低——自耦变压器由于材料消耗較少，因此它比同容量普通变压器的造价要低。目前关于自耦变压器的造价究竟应比普通变压器低多少，尙难提出肯定的数字。有人用效益系

数的关系来估算自耦变压器的价格，这样不能认为是合适的，因为尽管自耦变压器的材料消耗量比起普通变压器材料消耗量在理論上是按效益系数下降，但实际上由于自耦变压器的結構比較复杂，这样使其造价与效益系数之間并不成一定的关系。

根据有关文献，自耦变压器造价的降低，有以下几个参考数字。

苏联莫斯科变压器厂制造的220/121/13.8千伏、70/70/70兆伏安的普通單相三卷变压器与相同电压变比而容量为138/100/69兆伏安的單相自耦变压器，在造价及重量、尺寸方面几乎完全相等（文献2）。

在苏联文献〔2〕中提出，220/110千伏自耦变压器的造价約为同容量普通变压器造价的70%。

苏联文献〔19〕提出，自耦变压器的价格大約为同容量普通变压器价格的65%。

瑞士曾經对220/150千伏、125,000千伏安帶負荷調压的單相普通变压器与自耦变压器进行了比較，在造价上后者約为前者的75%（文献13）。

綜合以上所述，大概可以这样認為，对于两种电压变比的自耦变压器（例如220/121、220/169、154/121千伏），其价格可按同容量、相同电压变比的普通双卷变压器价格的70%計算；对于三种电压变比的自耦变压器，其价格可按与自耦变压器标准容量相同而上电压变比亦相同的普通三卷变压器的价格計算。

3. 損耗小——自耦变压器的另一重大优点是其有功損耗和无功損耗皆显著小于同容量的普通变压器。

自耦变压器有功損耗（包括鉄損和銅損）的降低，从理論上講应与其效益系数成比例。因为自耦变压器鉄芯体积的减少

与其效益系数成比例，因此其鉄損亦随之相应减少；自耦变压器銅損的降低与效益系数的关系亦可从下面的証明中看出：

$$\text{普通变压器銅損} \quad \Delta P_{TP} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2.$$

式中 I_1, I_2 ——普通变压器一次綫卷与二次綫卷內的电流。

R_1, R_2 ——普通变压器一次綫卷与二次綫卷的电阻。

$$\text{自耦变压器的銅損} \quad \Delta P_{amp} = \Delta P_{noc.a} + \Delta P_{ob.u.}$$

$$\text{而} \quad \Delta P_{noc.a} = I_1^2 R_{noc.a} = I_1^2 R_1 \left(1 - \frac{1}{k_{12}}\right)$$

$$\Delta P_{ob.u.} = I^2 R_{ob.u.}$$

式中 $\Delta P_{noc.a}$ ——自耦变压器串联綫卷內的銅損。

$\Delta P_{ob.u.}$ ——自耦变压器公共綫卷內的銅損。

今因

$$\begin{cases} \frac{S_{ob.u.}}{S_2} = 1 - \frac{1}{k_{12}} \\ I = I_2 \left(1 - \frac{1}{k_{12}}\right) \end{cases} \quad \therefore R_{ob.u.} = \frac{R_2}{1 - \frac{1}{k_{12}}}$$

式中 $S_{ob.u.}$ ——自耦变压器公共綫卷的导綫截面。

S_2 ——普通变压器二次綫卷的导綫截面。

$$\therefore \Delta P_{ob.u.} = I^2 R_{ob.u.} = I_1^2 \left(1 - \frac{1}{k}\right)^2 \frac{R_2}{1 - \frac{1}{k}} = I_2^2 R_2 \left(1 - \frac{1}{k}\right).$$

$$\therefore \Delta P_{amp} = (I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2) \left(1 - \frac{1}{k}\right)$$

$$= k_0 (I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2) = k_0 \cdot \Delta P_{mp}.$$

表 3-3 中列出了苏联制造的 220/110/11 千伏普通变压器的有功損耗实际数据：

由表中所列数字可以看出，自耦变压器的鉄損大致按效益系数降低，而銅損却并不按照这一关系下降（由于構造及其他一系列原因）。結果使得总損耗比按效益系数下降得少。对于

表3-3

变压器型式及容量 (兆伏安)	铁 损 (瓦/%)	铜 损 (瓦/%)	总 损 耗 (瓦/%)
普通变压器 ^① 40/40/26.7	$\frac{138}{0.32}$	$\frac{238}{0.6}$	$\frac{368}{0.92}$
自耦变压器 40/40/20	$\frac{64}{0.16}$	$\frac{176}{0.44}$	$\frac{240}{0.6}$
普通变压器 60/60/40	$\frac{198}{0.33}$	$\frac{283}{0.47}$	$\frac{481}{0.8}$
自耦变压器 80/80/40	$\frac{112}{0.14}$	$\frac{303}{0.38}$	$\frac{415}{0.52}$

①矽鋼片系冷軋的。

220/110 千伏的自耦变压器，有功損耗比普通变压器大約降低 35%。

自耦变压器无功損耗的降低，是由于高、中压綫卷的自耦联系使其漏抗减小以及由于铁芯体积减小而使空載电流减少所致。自耦变压器漏抗的减小將在后一章闡述。自耦变压器的空載电流 I_0 。一般为 1.5~2.0%（而普通变压器为 4%）。

自耦变压器由于其損耗較普通变压器低，因此它的运行效率較高。

4. 便利变压器的运输及安装——由于自耦变压器比同容量普通变压器的重量輕、尺寸小，因此便利了变压器的运输和安装。也就是說，不致于由于运输条件使变压器容量受到限制，这一点对于建筑在运输条件困难而又宜于采用大容量变压器的山区和某些地区來說，具有特别的现实意义。例如对于我国西南許多山区水电站，往往由于运输条件使变压器的容量受到了限制，如果采用自耦变压器代替普通变压器，不但可以解决变压器的运输問題，而且可以使整个电站得到更好的技术經济指

标。

5. 扩大变压器的极限制造容量——变压器的极限制造容量一般受运输条件的限制。在相同的运输条件下，自耦变压器的容量可以比普通变压器制造的大，因而扩大了变压器的极限制造容量。这一点对大电力系统具有特别重要的意义，因为随着电力系统的发展，要求变压器的单位容量愈来愈大。美国已经制造了40万千伏安容量的三相自耦变压器；苏联目前已经制造了16.7万千伏安容量的单相自耦变压器。象这样巨型的变压器，如果做成普通变压器（即绕组单独分开），那是相当困难的。

自耦变压器除具有上述优点外，由于高、中压绕组的自耦联系而使其电抗减小，因此在超高压电力系统中应用自耦变压器对改善系统稳定性能起一定的作用。

在电力系统中采用自耦变压器，也有下面一些不利的影响：

1. 自耦变压器的中性点必须直接接地，或者经过小电抗器接地，以避免当自耦变压器的高压网路内发生单相接地故障时，在其中压绕组上出现过电压。通常，其过电压倍数随自耦变压器的变化大小而异。

自耦变压器中压绕组过电压倍数与其变比的关系如下：

如图 3-1 所示，正常情况下自耦变压器高压侧额定相电压为 U_{B1} 、 U_{B2} 、 U_{B3} ，中压侧额定相电压为 U_{O1} 、 U_{O2} 、 U_{O3} 。

$$U_{B1} = k_{12} U_{O1}$$

$$U_{B2} = k_{12} U_{O2}$$

$$U_{B3} = k_{12} U_{O3}$$

式中 k_{12} ——自耦变压器高、中压的额定变压比。

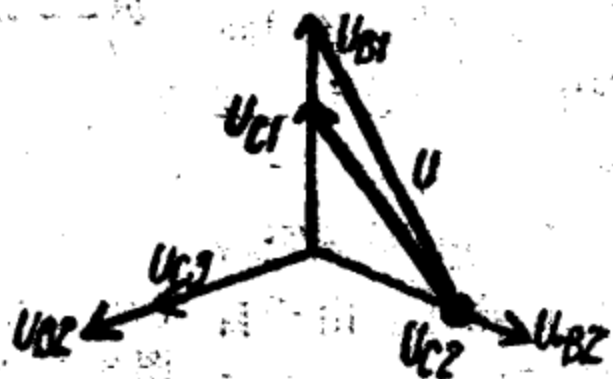


图 3-1

假定自耦变压器高压侧网络 B_1 相发生单相接地短路故障，这时自耦变压器电压向量图中的中性点发生位移，其他两相的中压绕组上的相电压则为 U

$$U = \sqrt{(U_{C1} + U_{C2} \sin 30^\circ)^2 + (U_{C2} \cos 30^\circ)^2}$$

$$= \sqrt{\left(k_{12} U_{C1} + \frac{U_{C2}}{2}\right)^2 + \frac{3}{4} U_{C2}^2} = U_{C2} \sqrt{k_{12}^2 + k_{12} + 1}$$

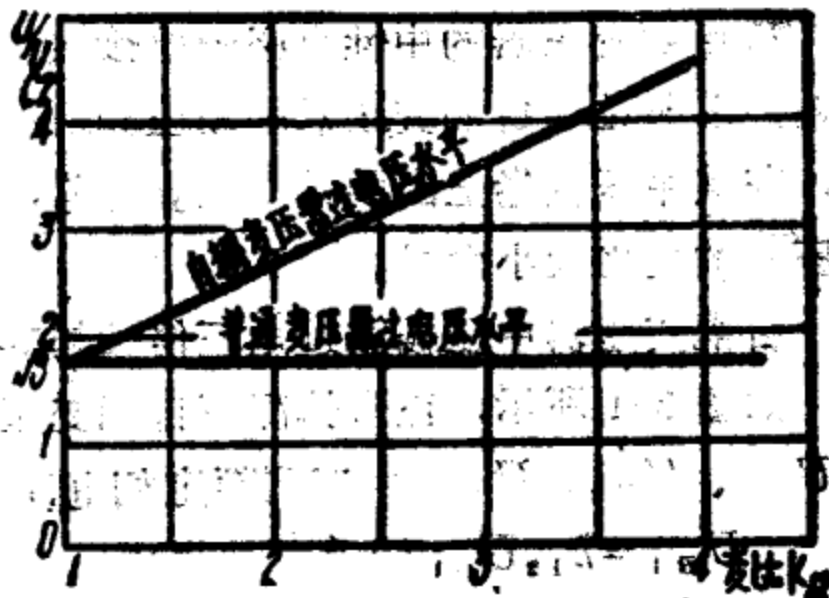
$$\frac{U}{U_{C2}} = \sqrt{k_{12}^2 + k_{12} + 1} \quad (k_{12} > 1)$$

因此，对于不同变比 k_{12} 值，自耦变压器中压绕组上的过电压倍数 $\left(\frac{U}{U_{C2}}\right)$ 如下：

自耦变压器的额定变压比 k_{12}	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
中压绕组上的过电压倍数	2.18	2.64	3.12	3.6	4.1	4.58

根据这个关系，繪出了图 3-2 的曲线，由图可知，自耦变压器变比愈大，则中压绕组的过电压倍数愈高，为了避免发生这种现象。自耦变压器的中性点必须直接接地或经过小电抗器接地。

2. 引起系统短路电流的增加。由于自耦变压器的高、中压



U/U_{C2} —— 中性点不接地的自耦变压器，当高压侧网络发生单相接地时，中压绕组的电压与其额定电压之比；

k —— 自耦变压器的变压比；

$$U/U_{C2} = \sqrt{k^2 + k + 1}$$

图 3-2 自耦变压器中压绕组过电压倍数与变压比的关系曲线

繞卷之間有自耦联系，其電抗比普通變壓器小。因此，在電力系統中採用自耦變壓器后，將使三相短路電流顯著增加，有時甚至造成選擇高壓電氣設備的困難和使變壓器的結構難以滿足機械強度的要求。這時必須從製造上設法提高自耦變壓器有自耦联系的高壓與中壓繞卷間的短路電壓。

由于自耦變壓器的中性點必須直接接地，同時高壓與中壓繞卷又有自耦联系，因此，在電力系統中採用自耦變壓器后，也將使單相短路電流大大增加。在許多情況下，系統中某些地點的單相短路電流甚至會超過三相短路電流，這就加大了对通訊線路的危險影响。

採用自耦變壓器引起單相短路電流的增加，對於 110 千伏網路比對於 220 千伏及以上電壓的網路更為嚴重。因為在 220 千伏及以上電壓的電力網中，所有變壓器一般均直接接地，與自耦變壓器的採用與否無關；而在 110 千伏的電力網中，當採用普通變壓器時，只有一部分變壓器的中性點直接接地，而採用自耦變壓器時，則情況兩樣，其中性點必須全部直接接地。

關於採用自耦變壓器所引起系統三相短路和單相短路電流的增加值，應根據具體情況進行計算后確定。並從計算結果來決定採取限制短路電流的措施。

3. 造成調壓上的一些困難。自耦變壓器調壓上的困難主要是因其高、中壓繞卷有自耦联系而引起的。目前自耦變壓器的電壓調整有這樣幾種方式：（1）在自耦變壓繞卷內部裝設帶負荷改變抽頭位置的調壓裝置；（2）在高壓與中壓繞卷的公用中性點內接入附加調壓設備；（3）在中壓線路上裝設附加變壓器。

這三種調壓方式中以第一種最為經濟，但目前在製造上還存在相當多的困難需要加以克服。第二種調壓方式比較經濟，

附加調压設備在這種情況下的機械強度和絕緣水平的要求都不高。但它在運行中有着嚴重的缺點，當自耦變壓器的第三繞卷接有負荷時，因為其低壓繞卷與高壓或中壓繞卷間的短路電壓比普通變壓器要大，它的電壓不能保持到必要的水平。第三種調壓方式是最貴的一種，這時附加變壓器的絕緣水平應與中壓網路的電壓相適應。但從運行觀點來看，它卻是最好的一種，沒有第二種調壓方式的缺點。

關於自耦變壓器的調壓問題，將在後面加以詳細闡述。

4. 使繼電保護複雜。自耦變壓器的繼電保護方式較普通變壓器複雜，這是因為自耦變壓器的高、中壓繞卷有共同的中性點以及它的繞卷的負荷運行方式比較特殊所致。

自耦變壓器一般均應裝設下列繼電保護裝置：(1) 保護變壓器內部故障及各側引出綫上故障的差動保護裝置；(2) 作為網路保護及母綫保護的後備過電流保護裝置；(3) 保護有可能過負荷運行的繞卷的過負荷保護裝置以及保護變壓器殼內故障及油位降低的瓦斯保護裝置。

自耦變壓器的差動保護，推薦採用 9T-561 電流繼電器帶速飽和變流器的差動保護裝置，在上述保護不能滿足靈敏度的要求時，則推薦採用具有磁力制動的差動保護裝置 (ДЗТ)。

自耦變壓器的過流保護僅作為網路保護和母綫保護的後備，不考慮作為差動保護的後備。自耦變壓器的零序過流保護必須考慮到在中壓或高壓側系統內接地故障時，流經自耦變壓器的零序電流的影響。

自耦變壓器的繞卷過負荷保護應根據其各種過負荷的可能性進行具體設計。因為自耦變壓器的運行方式與普通變壓器有顯著的不同，這一點將在後面闡述。

為了進一步明確自耦變壓器繼電保護的特點，現舉出 220A

121/11千伏、容量为80/80/40兆伏安降压自耦变压器的繼电保护原理接綫图，作为一个例子說明（图3-3見書末插頁）。

需要指出，图中繼电器30和31是一套为补足差动保护灵敏度的过流保护装置。装設这套保护装置的理由是考虑到自耦变压器220千伏与11千伏綫卷間的阻抗較大，差动保护对于低压側的短路故障反应可能不够灵敏。

5. 使綫卷的过电压保护复杂。由于高、中压綫卷的自耦联系，当任一側落入一个波幅与該側絕緣水平适应的过电压进行波时，另一側出現的过电压进行波的波幅則可能超出那一側的絕緣水平，在切除自耦变压器的中压或高压綫卷时，也会产生这种現象。为了避免这种現象的发生，苏联莫斯科变压器厂經過研究認為，自耦变压器的高、中压兩側出綫端必須按一組閘型避雷器。

由于在系統內采用自耦变压器后，有上述一些問題产生，除了解决这些問題外，还需要研究解决如何改善系統中現有高压电气设备的性能及与自耦变压器配合运行的有关問題。

第四章 自耦变压器的阻抗及其 对系統短路电流的影响

（一）自耦变压器和普通变压器的电抗值的比較

自耦变压器由于其高、中压綫的自耦联系，它的电抗值与普通变压器相比，有所不同。但在結構相同情况下，兩者之間具有一定的关系。

假定普通变压器的額定变压比与自耦变压器相同，而其額定容量等于自耦变压器的标准容量，它們的短路电压值关系如

下:

$$e_{B-C}^{aemP} \% = k_e e_{B-C}^{mP} \% \quad (4-1)$$

$$e_{C-H}^{aemP} \% = \frac{1}{k_e} e_{C-H}^{mP} \% \quad (4-2)$$

式中 $e_{B-C}^{aemP} \%$ ——自耦变压器高、中压間短路电压百分值
(以高压側額定电压及自耦变压器的額定容量为基值);

$e_{C-H}^{aemP} \%$ ——代表的意义同上, 但为中、低压間的短路电压百分值;

$e_{B-C}^{mP} \%$ ——普通变压器高、中压間短路电压百分值
(以高压側額定电压及与自耦变压器的标准容量相同的額定容量为基值);

$e_{C-H}^{mP} \%$ ——代表的意义同上, 但为中、低压間的短路电压百分值;

k_e ——自耦变压器的效益系数。

上述关系可以証明如下:

(1) 高、中压間短路电压的关系:

当自耦变压器中压側短路, 这时高压側电压完全加在自耦变压器的串联綫卷上, 假定自耦变压器高、中压間的漏抗为 x_{12}^{aemP} (欧姆), 归算到以高压側額定电压 (千伏) 及自耦变压器額定容量 (兆伏安) 为基值的短路电压百分值为:

$$e_{B-C}^{aemP} \% = x_{12}^{aemP} \cdot \frac{P_N}{U_{1H}^2 \cdot 100} \% \quad (4-3)$$

假定普通变压器高、中压間的漏抗为 x_{12}^{mP} , 归算到以其高压側額定电压及本身的額定容量为基值的短路电压百分值为:

$$e_{B-C}^{mP} \% = x_{12}^{mP} \cdot \frac{k_e P_N}{U_{1H}^2 \cdot 100} \% \quad (4-4)$$

从电机学中我們知道, 綫卷同心布置的变压器的漏抗值,

与綫卷的匝数平方成正比，即与綫卷的額定电压平方成正比，而与綫卷的高度成反比，因此变压器高、中压間的漏抗：

对于自耦变压器

$$x_{12}^{amp} = k_1 \frac{n^2}{h_1}$$

式中 n ——自耦变压器串联綫卷的匝数；

h_1 ——自耦变压器串联綫卷的高度；

k_1 ——常数。

对于普通变压器

$$x_{12}^{TP} = k_2 \frac{N_1^2}{h_2}$$

式中 N_1 ——普通变压器高压綫卷的匝数；

h_2 ——普通变压器高压綫卷的高度；

k_2 ——常数。

因为上述自耦变压器与普通变压器的結構相同，所以

$$k_1 \approx k_2, h_1 = h_2$$

$$\text{故 } \frac{x_{23}^{amp}}{x_{12}^{mp}} = \frac{n^2}{N_1^2} = \frac{(U_{1H} - U_{2H})^2}{U_{1H}^2} = k_0^2 \quad (4-5)$$

比較(4-3)，(4-4)及(4-5)三式得

$$e_{B-C}^{amp} \% = k_0 e_{B-C}^{mp} \%$$

(2)中、低压間短路电压的关系

当自耦变压器的高压側开路，它的中压綫卷（即公共綫卷，下同）和低压綫卷就形成和普通变压器一样的变压器。因为它們的結構相同，容量和額定电压相等，所以自耦变压器和普通变压器中、低压間的漏抗值是相等的，即 $X_{23}^{amp} = X_{23}^{mp} = X_{23}$ 。

將它們各自归算到其額定容量，則可得：

对自耦变压器

$$e_{C-H}^{aomP} \% = X_{23} \frac{P_u}{U_{2u}^2 \times 100} \% \quad (4-6)$$

对普通变压器

$$e_{C-H}^{mP} \% = X_{23} \frac{k_s P_u}{U_{2u}^2 \times 100} \% \quad (4-7)$$

从(4-6)及(4-7)式可得与(4-2)相同的結果，即：

$$e_{C-H}^{aomP} \% = \frac{1}{k_s} e_{C-H}^{mP} \%$$

(3) 下面我們进一步討論自耦变压器和普通变压器高、低压間短路电压的关系。

必須指出，自耦变压器与普通变压器高、低压間短路电压的关系不能仿照上述討論中、低压間短路电压关系的方法来解决。因为对于結構相同，綫卷布置方式一样的自耦变压器和普通变压器，它們的高、低压間的漏磁通分布是不同的。以下面綫卷布置方式为例，就可以看到它們的漏磁通分布的不同。

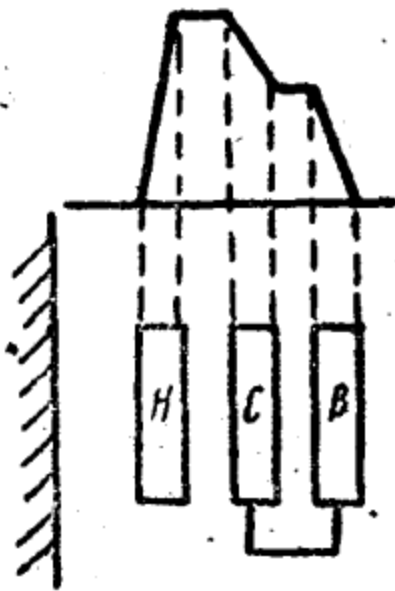


图 4-1 自耦变压器高、低压間的漏磁通分布

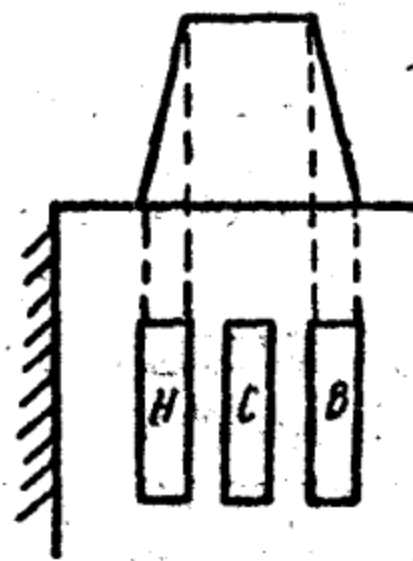


图 4-2 普通变压器高、低压間的漏磁通分布

因为自耦变压器高压綫卷是由串联綫卷和公共綫卷所組成，因此当自耦变压器高、低压間进行短路試驗时，它的中压

繞卷內也有電流通過，這時漏磁通分布如圖 4-1 所示。而對於普通變壓器，當高、低壓間進行短路試驗時，其中壓繞卷內是沒有電流的，這時漏磁通分布如圖 4-2 所示。比較圖 4-1 和圖 4-2 可以看出，它們的漏磁通分布不同，因此它們的高、低壓間的漏抗，就不能象上面討論高、中壓或中、低壓間的漏抗關係時那樣簡便地得出它們之間的關係。

但是，自耦變壓器高、低壓間的漏抗，可以從研究它的漏磁圖分布圖中求出。

自耦變壓器的漏磁通分布與其繞卷的排列方式有關。電力自耦變壓器的繞卷排列，一般有兩種方式：(1) 公共繞卷布置於串聯繞卷和低壓繞卷的中間，如圖 4-3(a) (這種布置方式用於降壓自耦變壓器及中小型的升壓自耦變壓器)。(2) 低壓繞卷布置於串聯繞卷和公共繞卷的中間。如圖 4-3(b) (這種布置方式用於大容量的升壓自耦變壓器)。

對於採用第一種繞卷布置方式的自耦變壓器，其高、低壓、高、中壓、和中、低壓間分別進行短路試驗時，它們的漏磁通分布如圖 4-5，圖 4-6 及圖 4-7 所示。

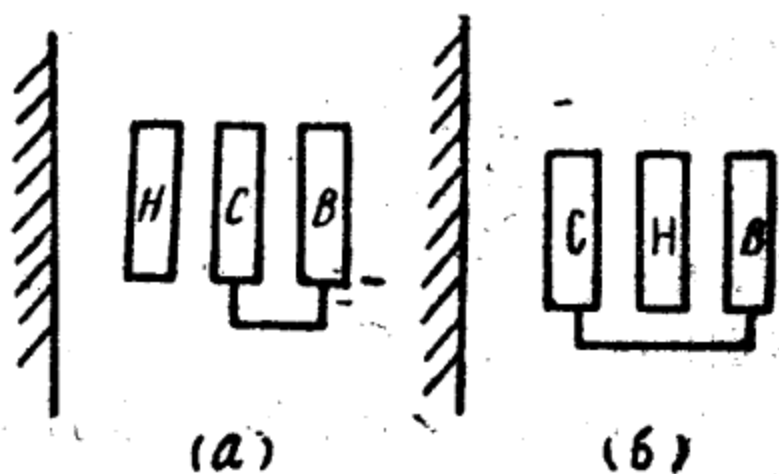


圖 4-3 自耦變壓器的繞卷排列方式
B—串聯繞卷；C—公共繞卷；H—低壓繞卷。

從幾何的分析和計算可以證明，高、低壓間短路試驗時漏磁通分布的形狀和面積(圖 4-4)恰好等於高、中壓(圖 4-5)和中、低壓間(圖 4-6)短路試驗時漏磁通之和。

即

$$x_{13}^{a_2 m p} = x_{12}^{a_2 m p} + x_{23}^{a_2 m p}$$

或者,
$$e_{B-H}^{amp} \% = e_{B-O}^{amp} \% + e_{O-H}^{amp} \% \quad (4-8a)$$

式中 x_{13}^{amp} , x_{12}^{amp} 及 x_{23}^{amp} —— 分別代表自耦變壓器高、低壓, 高、中壓及中、低壓間的漏抗。

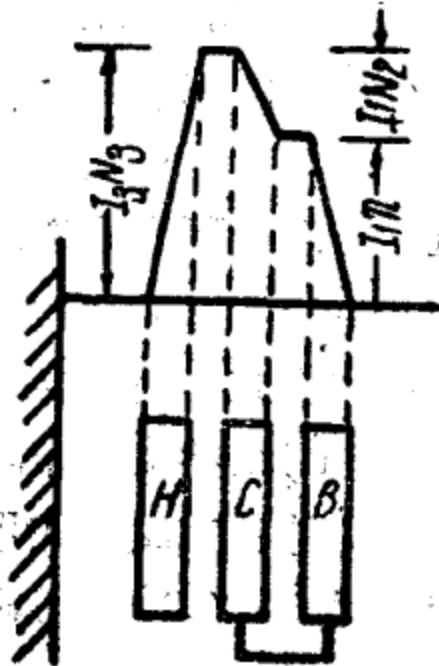


圖4-4 高、低壓間短路試驗時的漏磁通分布 (第一種繞卷布置方式)

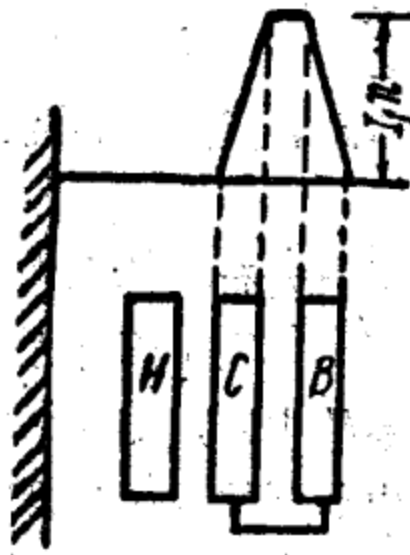


圖4-5 高、中壓間短路試驗時的漏磁通分布 (第一種繞卷布置方式)

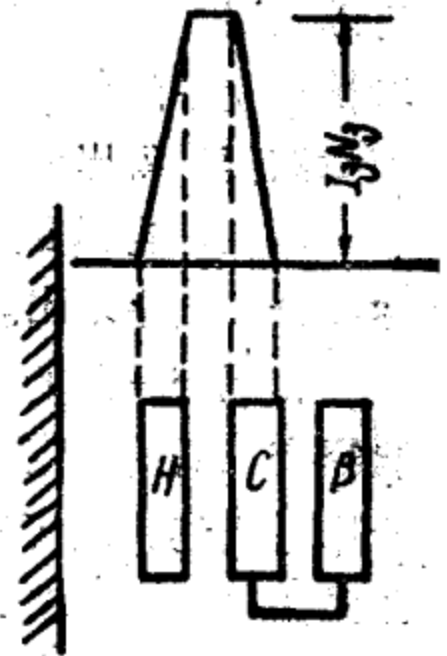


圖4-6 中、低壓間短路試驗時的漏磁通分布 (第一種繞卷布置方式)

對於第二種繞卷布置方式的自耦變壓器, 其高、低壓、高、中壓和中低壓間短路試驗時的漏磁通分布如圖4-8, 圖4-9及圖4-10所示。

從幾何的分析和計算, 同樣可以證明, 高、低壓間短路試驗時漏磁通分布的形狀和面積(圖4-7)恰好等於中、低壓(圖4-9)與高、中壓間(圖4-8)短路試驗時漏磁通之差。

$$\text{即} \quad x_{13}^{amp} = x_{23}^{amp} - x_{12}^{amp}$$

$$\text{或者} \quad e_{B-H}^{amp} \% = e_{O-H}^{amp} \% - e_{B-O}^{amp} \% \quad (4-8b)$$

利用(4-1), (4-2)和(4-7)三式, 即可根據普通變壓器各對繞卷間的短路電壓值推求自耦變壓器相應電壓間的短路電壓值。從這三個式子中也可以看到, 自耦變壓器高、中壓間的短路電壓比普通變壓器為小, 而其中、低壓間的短路電壓則較普

通变压器为大，这个特点对于电力系统设计者应特别注意。

但是必须指出，利用上述关系式求出的自耦变压器各对绕组间的短路电压，有时比制造厂家提出型录中的实际短路电压数值为小，这时就不能利用计算所得的数字，而必须采用型录中的数字。

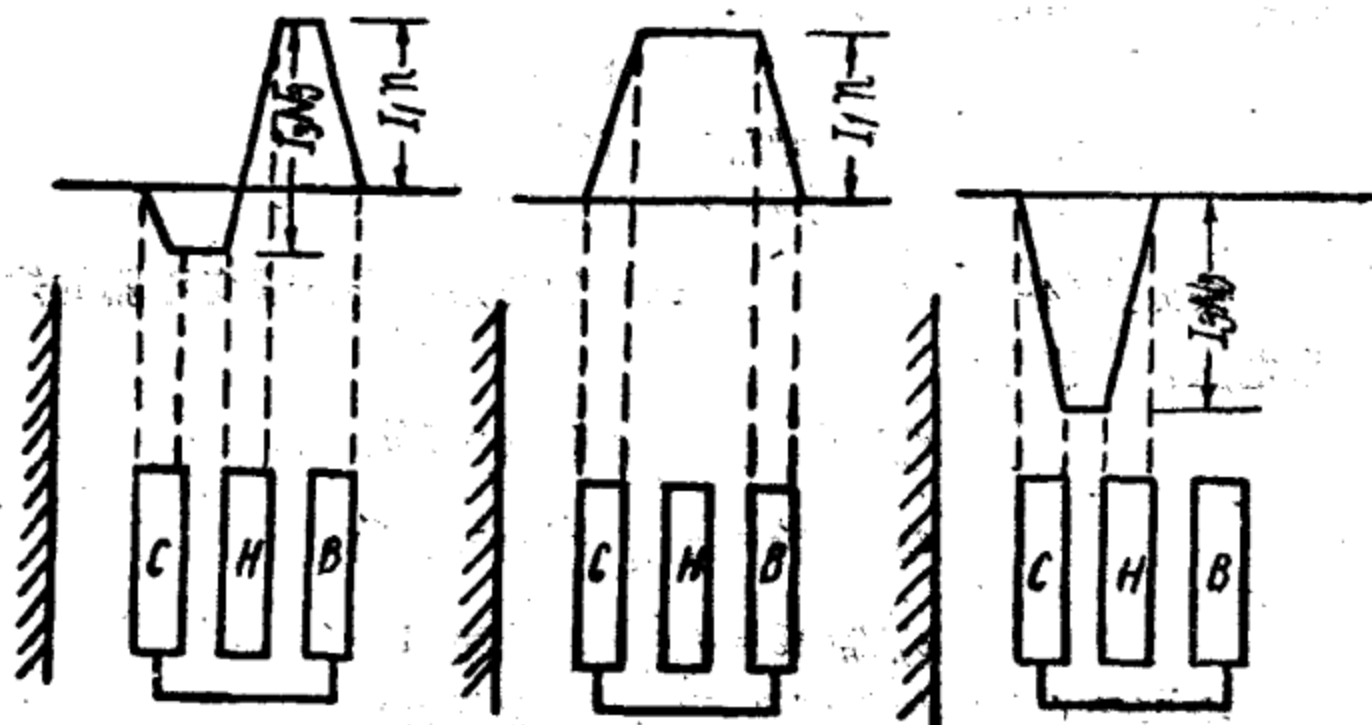


图4-7 高、低压间短路试验时漏磁通的分布 (第二种绕组布置方式) 图4-8 高、中压间短路试验时漏磁通的分布 (第二种绕组布置方式) 图4-9 中、低压间短路试验时漏磁通的分布 (第二种绕组布置方式)

这种计算结果的不一致性，是因为：(1)为了满足自耦变压器在结构上动稳定性，必须提高其高、中压间的阻抗（苏联目前制造的220千伏自耦变压器，其高、中压间的最小短路电压可以做到10%左右，某些资本主义国家可以做到小于10%）。随着高、中压间电抗的增加，自耦变压器的其它高、低压与中、低压间的短路电压也相应增加；(2)为了满足高压试验的要求，使得自耦变压器的结构改变（例如苏联400千伏的超高压自耦变压器），引起高、低压与中、低压间的漏抗不成比例地增加。

最后举例说明，利用普通变压器的电抗值来推求自耦变压器的电抗。假定欲求一组电压为220/110/11千伏，额定容量为240,000千伏安的降压自耦变压器的电抗。

取一组电压亦为220/110/11千伏，而额定容量为自耦变压器的标准容量，即120,000千伏安的普通降压变压器，它的各线圈间的短路电压百分值为：

$$e_{B-C}^{mP} \% = 14\%$$

$$e_{C-H}^{mP} \% = 7\%$$

$$e_{B-H}^{mP} \% = 21\%$$

按公式(4-1)，(4-2)及(4-8a)的关系，得自耦变压器的短路电压百分值为：

$$e_{B-C}^{aemP} \% = 0.5 \times 14\% = 7\%$$

$$e_{C-H}^{aemP} \% = \frac{1}{0.5} \times 7\% = 14\%$$

$$e_{B-H}^{aemP} \% = 7\% + 14\% = 21\%$$

查型录（苏联的）制造厂家所列数据为：

$$e_{B-C}^{aemP} \% = 10.5\%$$

$$e_{C-H}^{aemP} \% = 23\%$$

$$e_{B-H}^{aemP} \% = 36\%$$

可以看出，计算结果与制造厂家所列数字出入很大，这说明计算结果不能采用，但是如果把计算的高、中压间短路电压百分值由7%提高到制造厂所允许的10.5%，则这时计算的中、低压与高、低压间的短路电压应相应提高到：

$$e_{C-H}^{aemP} \% = 14 \times \frac{10.5}{7} = 21\%$$

$$e_{B-H}^{aemP} \% = 21 \times \frac{10.5}{7} = 31.5\%$$

这个计算结果则与制造厂家所列数字相差不大。

因此大概可以这样認為，在沒有自耦变压器的制造型录的条件下，仍可以根据上述(4-1)(4-2)及(4-8)式利用普通变压器的短路电压来推算自耦变压器的短路电压；不过應該注意，如果計算所得自耦变压器高、中压間的短路电压百分值小于制造厂家允許的最低值时(对于苏联制造的自耦变压器，它的高、中压最小允許的短路电压百分值为10%)，則应將計算所得的高、中压間的短路电压百分值作相应提高。但是还必须強調指出，上述方法只有在普通变压器与自耦变压器結構相同的条件下方能采用，如果結構方式改变(例如400千伏的超高压自耦变压器)，利用上述方法計算所得自耦变压器的短路电压，与型录中的数字相差极大。

(二) 自耦变压器的阻抗計算

自耦变压器的阻抗計算，根据一些資料說明〔文献18〕和普通变压器一样，可以用星形等值阻抗图来进行。如果 $e_{B-C}^{asmp}\%$ ， $e_{C-H}^{asmp}\%$ 和 $e_{B-H}^{asmp}\%$ 代表同一基准容量的高、中压，中、低压和高、中压間的短路电压百分值，那么星形等值阻抗图中各分支的短路电压百分值为：

$$e_B^{asmp}\% = \frac{1}{2}(e_{B-C}^{asmp}\% + e_{B-H}^{asmp}\% - e_{C-H}^{asmp}\%) \quad (4-9a)$$

$$e_C^{asmp}\% = \frac{1}{2}(e_{B-C}^{asmp}\% + e_{C-H}^{asmp}\% - e_{B-H}^{asmp}\%) \quad (4-9b)$$

$$e_H^{asmp}\% = \frac{1}{2}(e_{C-H}^{asmp}\% + e_{B-H}^{asmp}\% - e_{B-C}^{asmp}\%) \quad (4-9c)$$

其中 $e_B^{asmp}\%$ ， $e_C^{asmp}\%$ 及 $e_H^{asmp}\%$ 分別代表等值阻抗图中高压、中压和低压側的短路电压百分值。同样，如果 ΔP_{B-C} ， ΔP_{C-H} 和 ΔP_{B-H} 表示归算至同一基准容量的自耦变压器的高—中压、中—低压和高—低压之間的短路有功損耗值，

則等值阻抗图中每一分支的短路有功損耗为:

$$\Delta P_B = \frac{1}{2}(\Delta P_{B-C} + \Delta P_{B-H} - \Delta P_{C-H}) \quad (4-10a)$$

$$\Delta P_C = \frac{1}{2}(\Delta P_{B-C} + \Delta P_{C-H} - \Delta P_{B-H}) \quad (4-10b)$$

$$\Delta P_H = \frac{1}{2}\left(\Delta P_{B-H} + \Delta P_{C-H} - \frac{1}{2}\Delta P_{B-C}\right) \quad (4-10c)$$

这里順便指出, 在計算时应注意各对綫卷間的短路电压值和損耗值是否以同一容量为基准, 如不是以同一容量为基准, 則应进行換算, 例如額定容量为100/100/50的自耦变压器, 因为高、低电压和中、低电压綫卷間的短路損耗是以低电压綫卷的額定容量(即自耦变压器的額定容量的50%)来进行計算的, 因此如归算至以自耦变压器的額定容量为基准容量时, 对于短路电压百分值应乘以2, 对于損耗值应乘以4。附表所列的自耦变压器的短路电压和短路有功損耗值是已經归算到同一額定容量为基准的。

在进行有功損耗計算时, 自耦变压器同普通变压器稍有不同。大家知道, 普通变压器短路有功損耗的数值是按損耗最大的运行方式来測定的。普通变压器只要給出最大的短路損耗值, 就可以推求它的等值阻抗图中各分支的电阻值, 或者在額定負載下的各分支的有功損耗值。但对于自耦变压器來說, 这种方法是不能采用的。茲举例來說明这个問題。

以220/110/11千伏, 240,000 千伏安, 額定容量比为100/100/50的自耦变压器为例, 其最大的銅損, 根据型录, 为 $3 \times 227 = 680$ 瓩。

按綫卷容量与电阻成反比的原則, 自耦变压器等值阻抗图中, 高压側支路和中压側支路的电阻相等($r_1 = r_2$), 而低压支路的电阻 $r_3 = 2r_1$ 。損耗最大的运行方式为从高压側傳送 100%

的負載測中压側，或者相反的方向。因此高压側的額定銅損与中压側的額定銅損相等，各为340瓩。低压側因只能通过高压側額定容量的50%，其額定銅損为170瓩。如將低压側的額定銅耗归算到以自耦变压器額定容量为基准，則应为 $4 \times 170 = 680$ 瓩。此时等值阻抗图各分支的額定銅損如下图所示：

根据公式(4-10)可以求得(归算到自耦变压器的額定容量)

$$\Delta P_{B-C} = 680 \text{ 瓩}$$

$$\Delta P_{C-H} = 1020 \text{ 瓩}$$

$$\Delta P_{B-H} = 1020 \text{ 瓩}$$

或者为

$$\Delta P_{B-C} = 680 \text{ 瓩 (归算自}$$

耦变压器的額定容量)

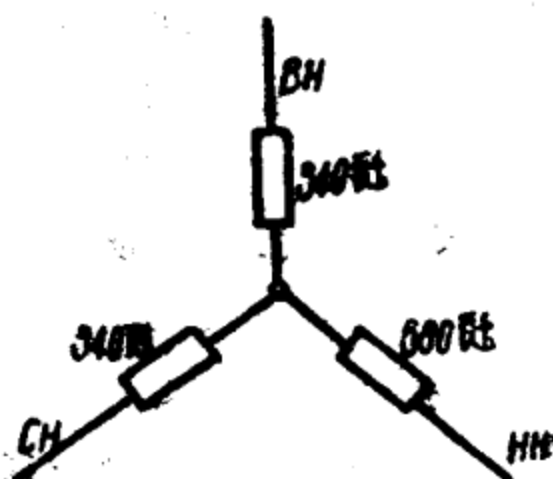


图 4-10

$$\Delta P_{C-H} = 255 \text{ 瓩 (归算到低压綫卷的額定容量)}$$

$$\Delta P_{B-H} = 255 \text{ 瓩 (归算到低压綫卷的額定容量)}$$

但制造厂家提出数据为：

$$\Delta P_{B-C} = 680 \text{ 瓩 (归算到自耦变压器額定容量)}$$

$$\Delta P_{C-H} = 504 \text{ 瓩 (归算到低压綫卷額定容量)}$$

$$\Delta P_{B-H} = 432 \text{ 瓩 (归算到低压綫卷額定容量)}$$

由此可見，計算的 ΔP_{C-H} 及 ΔP_{B-H} 的誤差达到100%，显然，这是不能允許的。

因此，自耦变压器等值阻抗图中各分支的銅損必須根据型录中三对綫卷間的短路損耗值来进行計算。

例題：計算 $OgT\Gamma A-80,000$ 千伏安，电压为 220/110/11 千伏的阻抗(上例)。

已知 $OgT\Gamma A-80,000/220$ 型自耦变压器各綫卷間的短路电压和短路損耗值如下：

$$e_{B-O} \% = 10.5\% \quad \Delta P_{B-O} = 227 \text{ 瓩(單相)}$$

$$e_{B-H} \% = 18\% \quad \Delta P_{B-H} = 144 \text{ 瓩(單相)}$$

$$e_{O-H} \% = 11.5\% \quad \Delta P_{O-H} = 168 \text{ 瓩(單相)}$$

其中 $e_{B-H} \%$, $e_{O-H} \%$, ΔP_{B-H} 及 ΔP_{O-H} 是在低壓綫卷通過該綫卷額定容量時得出的數值。在計算時必須將它們用自耦變壓器的額定容量來歸算。歸算於自耦變壓器的額定容量後為：

$$e_{B-H} \% = 36\% \quad \Delta P_{B-H} = 576 \text{ 瓩(單相)}$$

$$e_{O-H} \% = 23\% \quad \Delta P_{O-H} = 672 \text{ 瓩(單相)}$$

利用公式(4-9)及(4-10)可得

$$e_B \% = \frac{1}{2}(10.5 + 36 - 23) = 11.75\%$$

$$e_O \% = \frac{1}{2}(10.5 + 36 - 10.5) = -1.25\%$$

$$e_H \% = \frac{1}{2}(23 + 36 - 10.5) = 24.25\%$$

$$\Delta P_B = \frac{1}{2}(227 + 576 - 672) = 65.5 \text{ 瓩(單相)}$$

$$\Delta P_O = \frac{1}{2}(227 + 672 - 576) = 161.5 \text{ 瓩(單相)}$$

$$\Delta P_H = \frac{1}{2}(576 + 672 - 227) = 510.5 \text{ 瓩(單相)}$$

因為

$$x = \frac{e \% U_{1H}^2}{100 P_H} \text{ 歐姆} \quad (4-11)$$

$$r = \frac{\Delta P U_{1H}^2}{1,000 (P_H)^2} \text{ 歐姆} \quad (4-12)$$

其中 ΔP ——短路損耗，以瓩計算；

U_{1H} ——高壓側額定電壓，以千伏計算；

P_H ——自耦變壓器的額定容量以兆伏安計算。

利用(4-11)及(4-12)可得自耦變壓器等值阻抗圖中各分支的阻抗如下：

$$x_B = \frac{11.75 \times 220^2}{100 \times 3 \times 80} = 23.7 \text{ 歐姆}$$

$$x_O = \frac{-1.25 \times 220^2}{100 \times 3 \times 80} = -2.52 \text{ 歐姆}$$

$$x_H = \frac{24.25 \times 220^2}{100 \times 3 \times 80} = 48.9 \text{ 欧姆}$$

$$r_B = \frac{3 \times 65.5 \times 220^2}{1,000 \times (3 \times 80)^2} = 0.165 \text{ 欧姆}$$

$$r_C = \frac{3 \times 161.5 \times 220^2}{1,000 \times (3 \times 80)^2} = 0.407 \text{ 欧姆}$$

$$r_H = \frac{3 \times 510.5 \times 220^2}{1,000 \times (3 \times 80)^2} = 1.29 \text{ 欧姆}$$

使用上述方法求得自耦变压器的电抗值后，便可以进行电压损耗计算和对中性点直接接地或经过电抗接地的自耦变压器进行三相短路或单相短路计算。他们的等值电路图和普通变压器的等值电路图完全一样(文献18)。

对于中性点经过电抗接地的零序网络中各分支的电抗值可用下式求得：

$$e_{B0} \% = \frac{1}{2} (e_{BC} \% + e_{BH} \% + e_{CH} \%) + \frac{3(k_{12} - 1)}{k_{12}^2} z_0 \% \quad (4-13a)$$

$$e_{C0} \% = \frac{1}{2} (e_{BC} \% + e_{CH} \% - e_{BH} \%) + \frac{3(k_{12} - 1)}{k_{12}^2} z_0 \% \quad (4-13b)$$

$$e_{H0} \% = \frac{1}{2} (e_{CH} \% + e_{BH} \% - e_{BC} \%) + \frac{3(k_{12} - 1)}{k_{12}^2} z_0 \% \quad (4-13c)$$

其中 $K_{12} = \frac{U_{1H}}{U_{2H}}$ ， Z_0 为接地电抗的标么值

同时顺便指出，当自耦变压器(接线为 Y/Y/Δ)中性点不接地时，高压侧或中压侧发生接地短路，同时中压侧或高压侧有零序电压时，自耦变压器的串联绕组和第三绕组内仍有零序电流通过。而普通变压器则与此不同，当中性点不接地时，零

序阻抗的網絡圖就斷路了。因為自耦變壓器很少遇到中性點不接地的運行方式，因此這裡不詳細敘述。詳細參看文獻18。

求自耦變壓器不同運行方式下的銅損時，可以利用 ΔP_B ， ΔP_C 和 ΔP_H 的數值，按傳輸負荷的平方與損耗成正比的原理而求得。

如例題中等值阻抗圖各分支的額定短路損耗值（歸算到自耦變壓器額定容量）如下圖：

設 W_B ， W_C ， W_H 分別為高壓，中壓和低壓側通過的負荷，以兆伏安表示，則

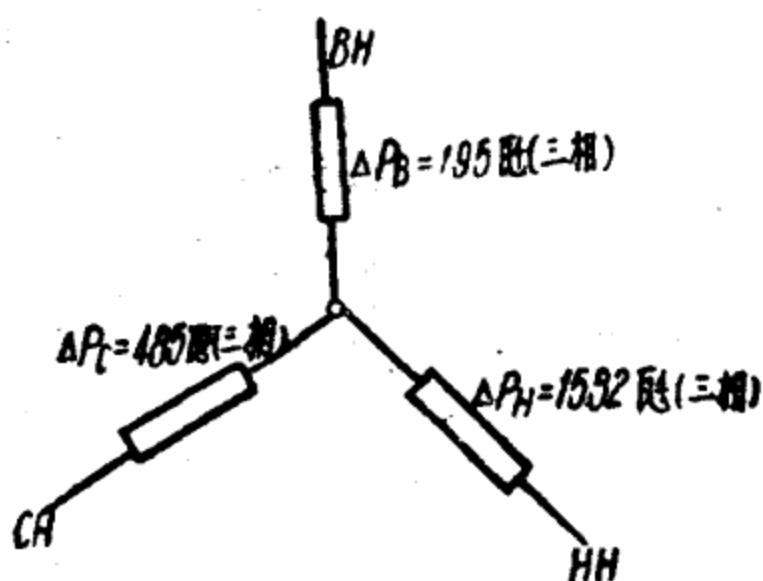


圖 4-11

$$\text{高壓側的銅損為} \left(\frac{W_B}{P_H} \right)^2 \times \Delta P_B \quad (\text{三相})$$

$$\text{中壓側的銅損為} \left(\frac{W_C}{P_H} \right)^2 \times \Delta P_C \quad (\text{三相})$$

$$\text{低壓側的銅損為} \left(\frac{W_H}{P_H} \right)^2 \times \Delta P_H \quad (\text{三相})$$

(三) 自耦變壓器對系統短路電流的影響

從上面分析可以知道，自耦變壓器高、中壓間的短路電壓比普通變壓器為小，同時自耦變壓器的中性點必須直接接地，因此廣泛採用自耦變壓器對系統的三相和單相短路電流都有很大的影響。

當電源分布在中壓和高壓側時，由於自耦變壓器高、中壓側的阻抗較小，因此高壓和中壓側的短路電流均有增加。

我們曾對某水電站的接綫方式，按以下兩種情況進行了三

相短路和單相短路電流計算，第一種情況是水电站中的聯絡變壓器採用兩組單相自耦變壓器，每組容量為 3×108 兆伏安，容量比為 $100/100/50$ ，電壓為 $242/121/15.75$ 千伏，歸算於同一基值的短路電壓分別為 $e_{BO}\% = 15\%$ ， $e_{CH}\% = 20\%$ ， $e_{BH}\% = 14\%$ ，中性點直接接地，如圖4-12所示。第二種情況是將水电站的兩組聯絡自耦變壓器以兩組普通的單相三卷變壓器來代替，此普通單相三卷變壓器的容量為 3×80 兆伏安，因為根據系統負荷分配的情況需要這樣，容量比為 $100/100/100$ ，短路電壓分別為 $e_{BO}\% = 23\%$ ， $e_{BH}\% = 15\%$ ， $e_{CH}\% = 8\%$ 。此普通三卷變壓器的中性點除了220千伏側直接接地以外，110千伏側的中性點是不接地的。

計算結果如42頁表所示。

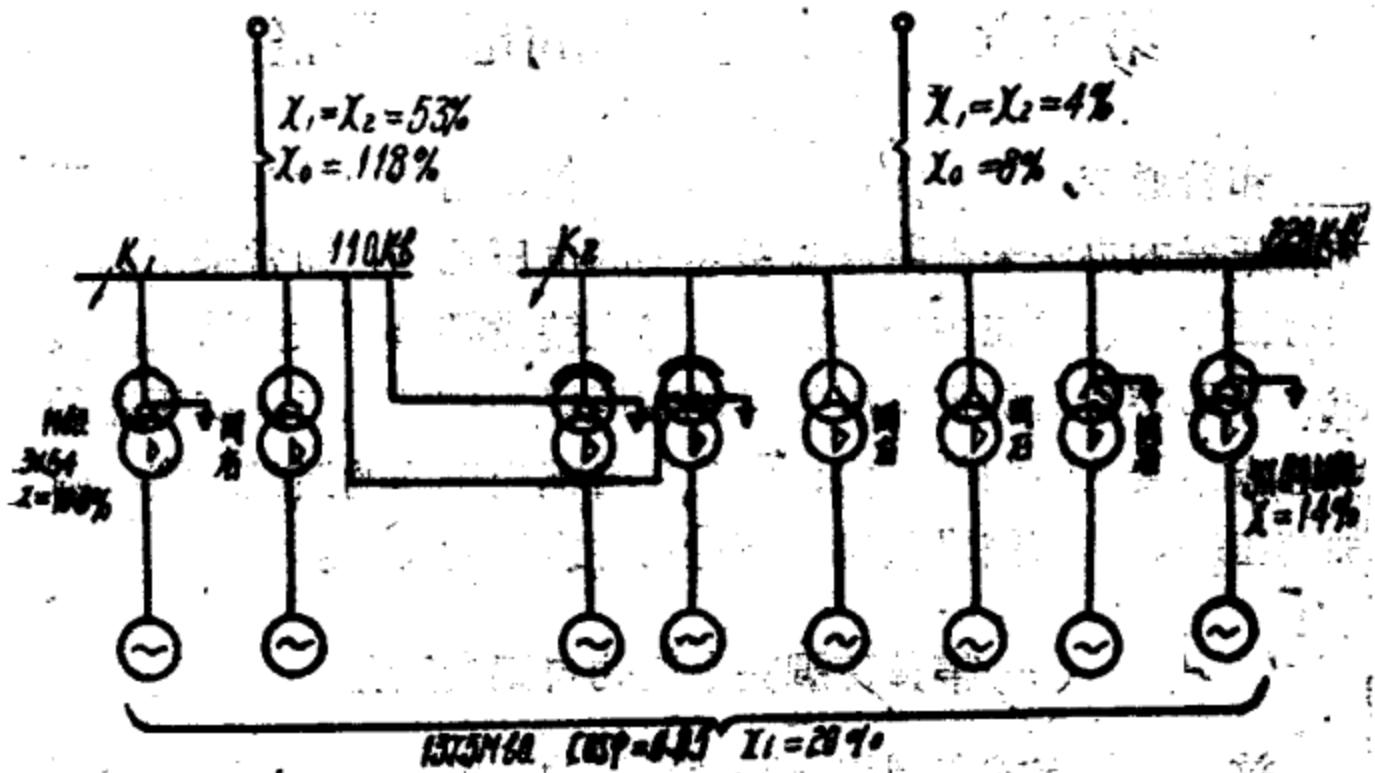


圖 4-12 137.5兆伏安 $\cos \varphi = 0.85$ $x_i = 2\%$

從以上結果看來，採用自耦變壓器後，110千伏側和220千伏側的短路容量都增加了。220千伏側的短路容量增加不大，沒有超過15%，而110千伏側的短路容量增加得多些，特別是

短路电流計算結果表 (單位: 兆伏安)

短 路 点	采用自耦变压器		采用普通变压器	
	三相短路	單相短路	三相短路	單相短路
K_1	3,950	4,370	3,480	2,520
K_2	6,500	7,120	5,900	4,180

單相短路电流, 增加了73%, 这种現象須特別注意。

自耦变压器的中、低压与高、低压間的阻抗比普通变压器为大, 因此在一些情况下, 某一电压側(視电源位置而定)的短路容量要比采用普通变压器小些。

第五章 自耦变压器的电压調整

和普通变压器一样, 自耦变压器可以用改变抽头或接入附加調压器的办法来調整各对綫卷間的电压比例, 通常采用的办法有三个: (一)在主变压器的綫卷上裝設帶負荷改变抽头的裝置——即帶負荷調整电压的自耦变压器; (二)在自耦变压器的中心点內接入附加調压器; (三)在自耦变压器的出綫端接入附加調压器。下面簡單叙述一下这三种方法的特点。

(一)帶負荷調整电压的自耦变压器

这种調整方式在制造上是最經濟的, 因为只需要在主变压器本体上附加帶負荷改变抽头位置的裝置, 但是这种帶負荷調压的自耦变压器在过去沒有得到广泛的应用, 因为在制造上存在两个困难:

(1)在整个調压範圍內, 短路电压的数值很难保持在一定

範圍內，而且採用一般的繞卷布置方法，在短路時會引起軸向機械作用力的增加，例如，如果自耦變壓器的繞卷系集中分布，並且抽頭分布在串聯繞卷的外部（圖 5-1），那麼，當調壓範圍為 $a\%$ 時，被切除的串聯繞卷的繞匝百分數為 a' ：

$$a' = \frac{x}{n} \% = \frac{x}{N_1 - N_2} \% = \frac{\frac{x}{N_1}}{\frac{N_1 - N_2}{N_1}} \% = \frac{a \%}{k_s \%} = \left(\frac{a}{k_s} \right) \%$$

式中 x ——調壓抽頭的繞匝數。

n ——串聯繞卷匝數。

N_1 ——AC 繞卷匝數。

N_2 ——公共繞卷匝數。

當調壓範圍為 10% 時，對於 121/400 千伏的變壓器， $a' = 1.43a\%$ ，對於 121/220 千伏的變壓器， $a' = 2.22a\%$ 。

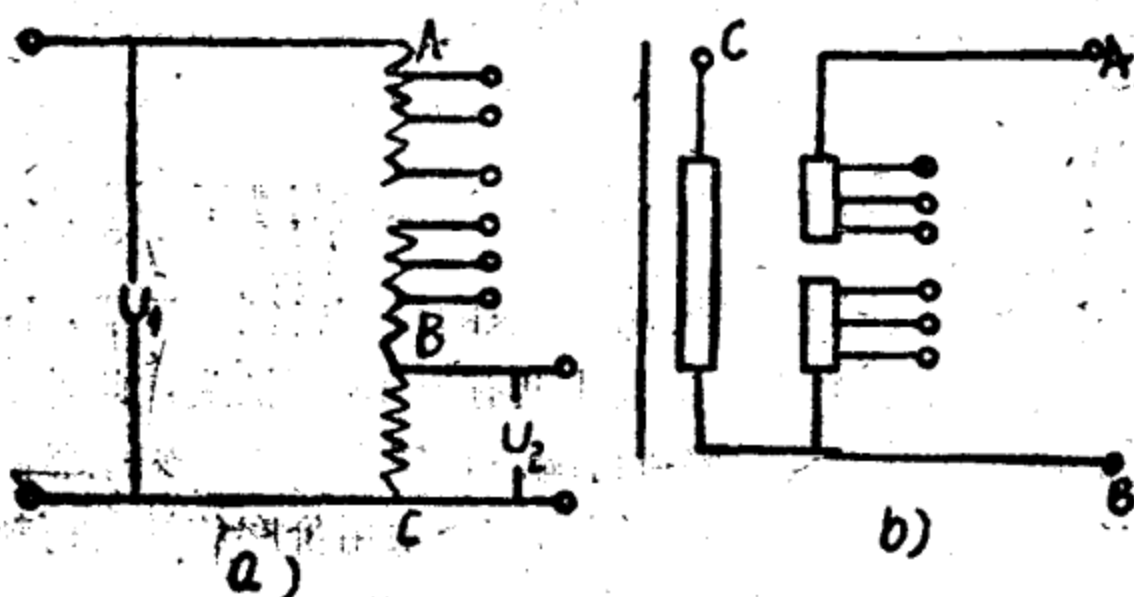


圖 5-1 自耦變壓器繞卷上的調整抽頭
a——原理接線圖， b——繞卷實際布置圖。

串聯繞卷被切除的繞匝的百分數如此之多，使縱向繞卷的磁動勢更不均衡，因而造成短路時軸向作用力的增加。

(2) 調壓繞卷和抽頭切換裝置上有沖擊過電壓的現象發生，根據莫斯科變壓器廠實驗所得的結果，對調壓範圍為 10%

的220/110千伏自耦变压器（在外部的中間綫匝上有20%的抽头），当用作一个过电压全波时，切换装置上的最大可能电压达振幅值的35%，而对于同样調压范围的普通变压器，則只有振幅值的20%。

最近一些国家的研究和試驗的結果說明，如果采取一些措施，例如变更綫卷的排列次序可以减少电抗值的变化，也可以使电容电压和电感电压的分布有利于限制冲击电压。上述困难是能够解决的（关于解决帶負荷調压自耦变压器的电抗变化和冲击电压問題的方法和有关計算資料，請參閱文献12，这里不作詳細介紹），因而有些国家已經制成了一些大容量的帶負荷調整电压的自耦变压器。例如瑞士制成了22.5/150千伏，125兆伏安的帶負荷調压的單相自耦变压器，它的变比为 $253/140 \dots 23 \times 2.94 \dots 207.6$ 千伏調压綫卷分成二个部分，一部分作粗略調压用（抽头从140~187千伏）；另一部分作精密調压用，但是后者是不接入主綫卷內的。該变压器在整个調压範圍內短路电压的变化范围在7~8%之間；西德也制造了 $\frac{400}{\sqrt{3}} / \frac{231}{\sqrt{3}}$ 千伏，220兆伏安的帶負荷調整电压的單相自耦变压器，調压范围为±18%，在231千伏綫卷上共有±13个抽头，此外美、英等国也制成了大容量的帶負荷調压自耦变压器。变压器制造上的这些成就說明，在电力系统內广泛采用价廉的帶負荷調整电压的自耦变压器，是今后一个肯定的方向。

（二）在自耦变压器的中性点內接入附加調压器

这种調压方式是目目前苏联常采用的。它的优点是調压器受到主变压器阻抗的保护。虽然他本身的漏抗很小，但流过的短路电流被减小了，因而降低了調压設備在动稳定方面的要求。

此外还可降低附加调压器在绝缘方面的要求，和使主变压器本身的容量可以制造得更大。但是因为调压器是附加的，价格要贵得多，同时将附加调压器加到自耦变压器时对各级电压的变化与加到普通变压器上是不同的，特别对于三绕组自耦变压器。采用这一种调压方式对电力系统的电压调整带来很多困难。

下面研究这种自耦变压器在空载时的电压调整情况。关于在有载时的电压调整，随自耦变压器的负荷分配情况不同而异，因此在本文不作论述。

图 5-2 表示自耦变压器中性点内接入附加调压器时的原理接线图， ΔE 是附加调压器的电势，由图可知

$$U_1 = E_1 + \Delta E$$

$$U_2 = E_2 + \Delta E$$

$$\text{而 } \frac{E_1}{E_2} = k_{12} = \frac{U_{1H}}{U_{2H}}$$

式中 k_{12} ——自耦变压器高压侧与中压侧的额定变压比。

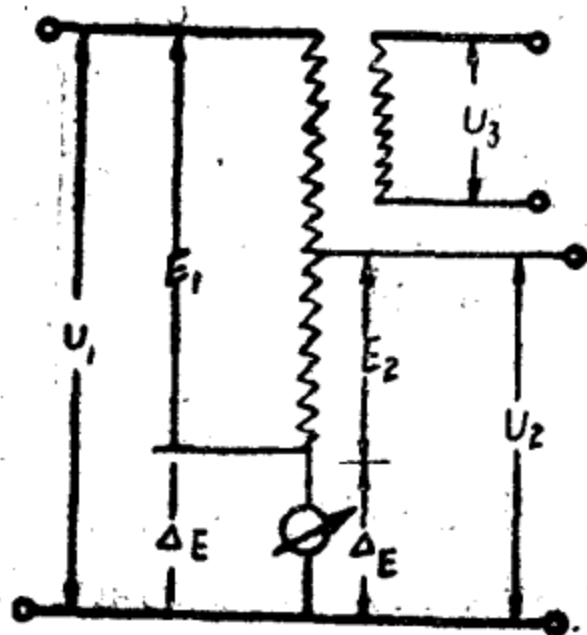


图 5-2

$$U_1 = k_{12}(U_2 - \Delta E) + \Delta E$$

$$\Delta E = \frac{U_2}{1 - \frac{1}{k_{12}}} - \frac{U_1}{k_{12} - 1} = \frac{U_2}{k_0} - \frac{U_1}{k_{12} - 1} \quad (5-1)$$

式中 k_0 ——自耦变压器的效益系数。

(5-1) 式表示自耦变压器高、中压侧电压与附加调压器的附加电势之间的关系。

(5-1) 式也可以用高压侧与中压侧的额定电压为基数，表示为百分数，这时(5-1)式变为

$$-\frac{\Delta E}{U_{1H}} = \frac{1}{k_{12} - 1} \left(\frac{U_2}{U_{2H}} - \frac{U_1}{U_{1H}} \right) \quad (5-2)$$

当高压侧电压保持为额定电压时 ($U_1 = U_{1H}$)，中压侧电压与附加调压器的附加电势之间的关系，根据(5-2)式为

$$\frac{U_2}{U_{2H}} = (k_{12} - 1) \frac{\Delta E}{U_{1H}} + 1$$

这时中压侧的电压调整率为

$$\frac{U_2 - U_{2H}}{U_{2H}} = (k_{12} - 1) \frac{\Delta E}{U_{1H}} \quad (5-3)$$

当中压侧电压保持为额定电压时 ($U_2 = U_{2H}$) 则高压侧电压与附加电势之间的关系为 $\frac{U_1}{U_{1H}} = 1 - (k_{12} - 1) \frac{\Delta E}{U_{1H}}$ 这时

高压侧的电压调整率为

$$\frac{U_1 - U_{1H}}{U_{1H}} = -(k_{12} - 1) \frac{\Delta E}{U_{1H}} \quad (5-4)$$

从(5-3)与(5-4)两式可知，中压侧或者高压侧的电压调整率不但和附加调压器的电势大小有关，而且还和自耦变压器的额定变比有关。

根据(5-3)与(5-4)两式，可作出各种变比的自耦变压器在中性点内接入的附加电势与高压侧或中压侧的电压变化关系曲线如图 5-3 所示。

从图 5-3 上可以看出，当自耦变压器的额定变比大于 2 时，中压侧或高压侧的电压调整率比所加的附加电势的变化率为大，例如 400/121 千伏的自耦变压器，如果高压侧保持额定电压，当附加调压器的电势为高压侧额定电压的 10% 时，中压侧的电压可比其额定电压升高 23%；当自耦变压器的额定变比小于 2 时，则电压调整率比所加附加电势变化为小，例如 220/169 千伏的自耦变压器，如果高压侧保持额定的电压，当附加调压

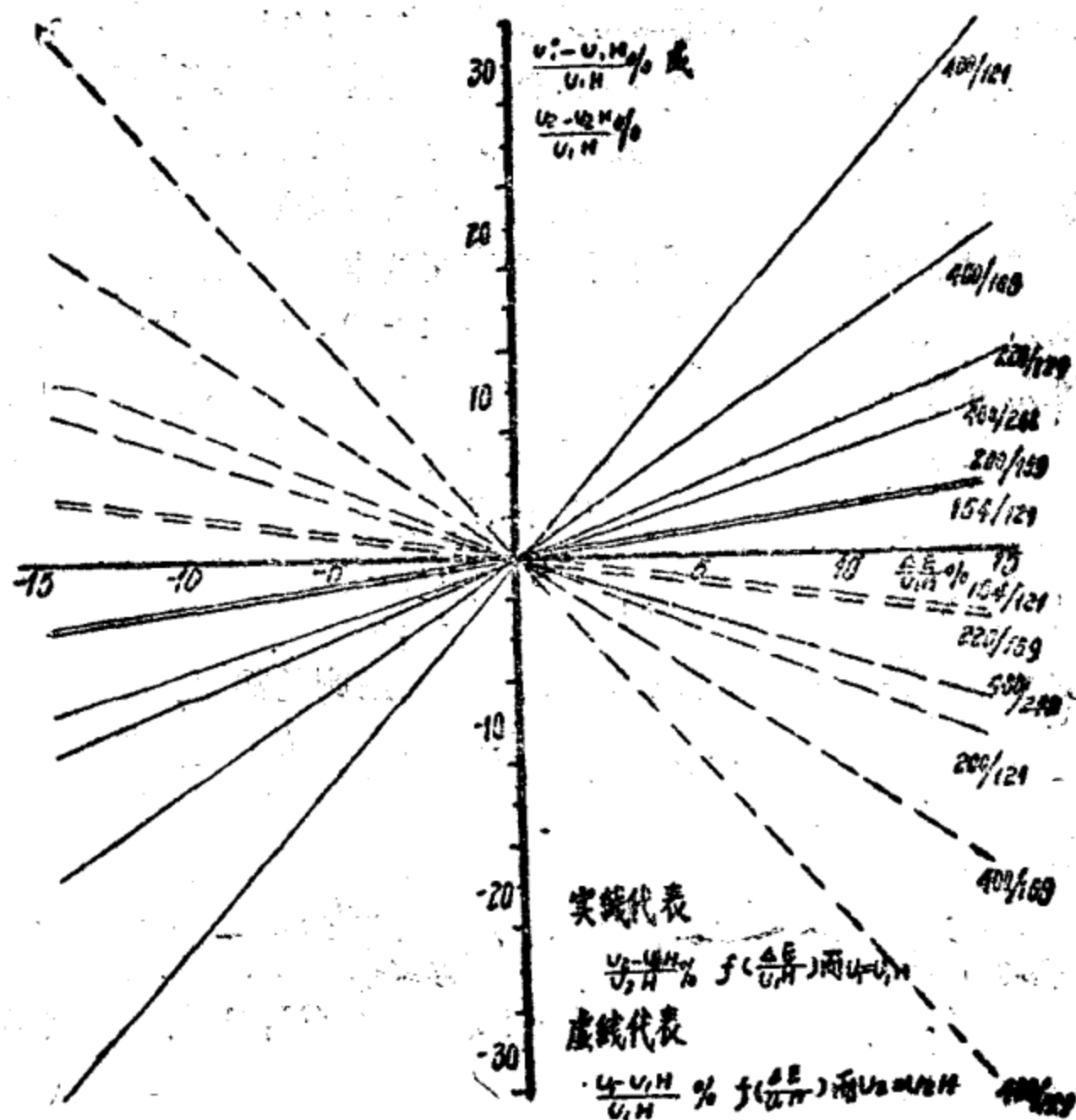


图 5-3 自耦变压器中性点内接入的附加电势与高压侧或中压侧电压调整率的关系曲线

器的电势为高压侧额定电压的10%时，中压侧的电压只比其额定电压升高3%；当变比接近于1时，不论附加电势在有限的范围内如何变化，中压侧或高压侧的电压调整率几近于零，亦即这种调压方式在自耦变压器的额定变比接近于1时是起不到调压作用的。因此，从这种调压方式的观点上看，自耦变压器的变比愈大则愈是有利，因为只有稍微改变附加调压器的电势，

就可以在高压侧或中压侧得到我們所需要的电压水平。

这种在自耦变压器中性点內接入附加調压器的調压方式，对于自耦变压器第三綫卷接有对电压有一定要求的負荷时，在运行上將造成严重的困难。因为当改变附加調压器的电势时，高压侧或中压侧的电压变化与低压侧的电压变化是极不一致的，必須对这种运行情况进行小心地驗算，以証明这种不一致性是否能够为系統所接受。

在空載情况下，由图 5-2 可知

$$U_3 = E_3$$

$$k_{31} = \frac{E_3}{E_1} = \frac{U_{3H}}{U_{1H}}$$

式中 k_{31} ——自耦变压器低压侧与高压侧的額定变压比

$$U_3 = k_{31} E_1 = k_{31} (U_1 - \Delta E) = U_{3H} \left(\frac{U_1}{U_{1H}} - \frac{\Delta E}{U_{1H}} \right)$$

低压侧的电压調整率为

$$\frac{U_3 - U_{3H}}{U_{3H}} = \frac{U_1}{U_{1H}} - \frac{\Delta E}{U_{1H}} - 1 = \frac{U_1 - U_{1H}}{U_{1H}} - \frac{\Delta E}{U_{1H}} \quad (5-5)$$

当自耦变压器高压侧保持額定电压时 ($U_1 = U_{1H}$)，其低压侧的电压調整率为

$$\frac{U_3 - U_{3H}}{U_{3H}} = - \frac{\Delta E}{U_{1H}} \quad (5-6)$$

与 (5-3) 式相比較，可知在同一附加电势下，中压侧的电压調整率与低压侧的电压調整率在数值上不同，而且符号也相反，这就是說，如果中压侧的电压升高，那么低压侧的电压一定下降；反之，如果中压侧的电压下降，那么低压侧的电压一定升高。这样，特別是在中、低二电压侧都有負載的时候，常常給系統調压帶來許多困难。

当自耦变压器中压侧保持額定电压时 ($U_2 = U_{2H}$) 利用

(5-4)式关系，这时低压侧的电压调整率变为

$$\frac{U_2 - U_{2H}}{U_{2H}} = -(k_{12} - 1) \frac{\Delta E}{U_{1H}} - \frac{\Delta E}{U_{1H}} = -k_1 \frac{\Delta E}{U_{1H}} \quad (5-7)$$

根据(5-6)与(5-7)两式，可作出各种变比的自耦变压器在中性点内接入的附加电势与低压侧的电压变化关系曲线，如图5-4所示。

由(5-3)及(5-4)两图可以看出，对于220/121/11千伏的自耦变压器，如果高压侧施加额定电压，而中压侧电压升高5%时，低压侧的电压同时下降6.1%；对于220/169/11千伏的自耦变压器，如果高压侧施加额定电压，而中压侧电压升高5%时，则这时低压侧的电压要下降16.7%，这显然是不能允许的。

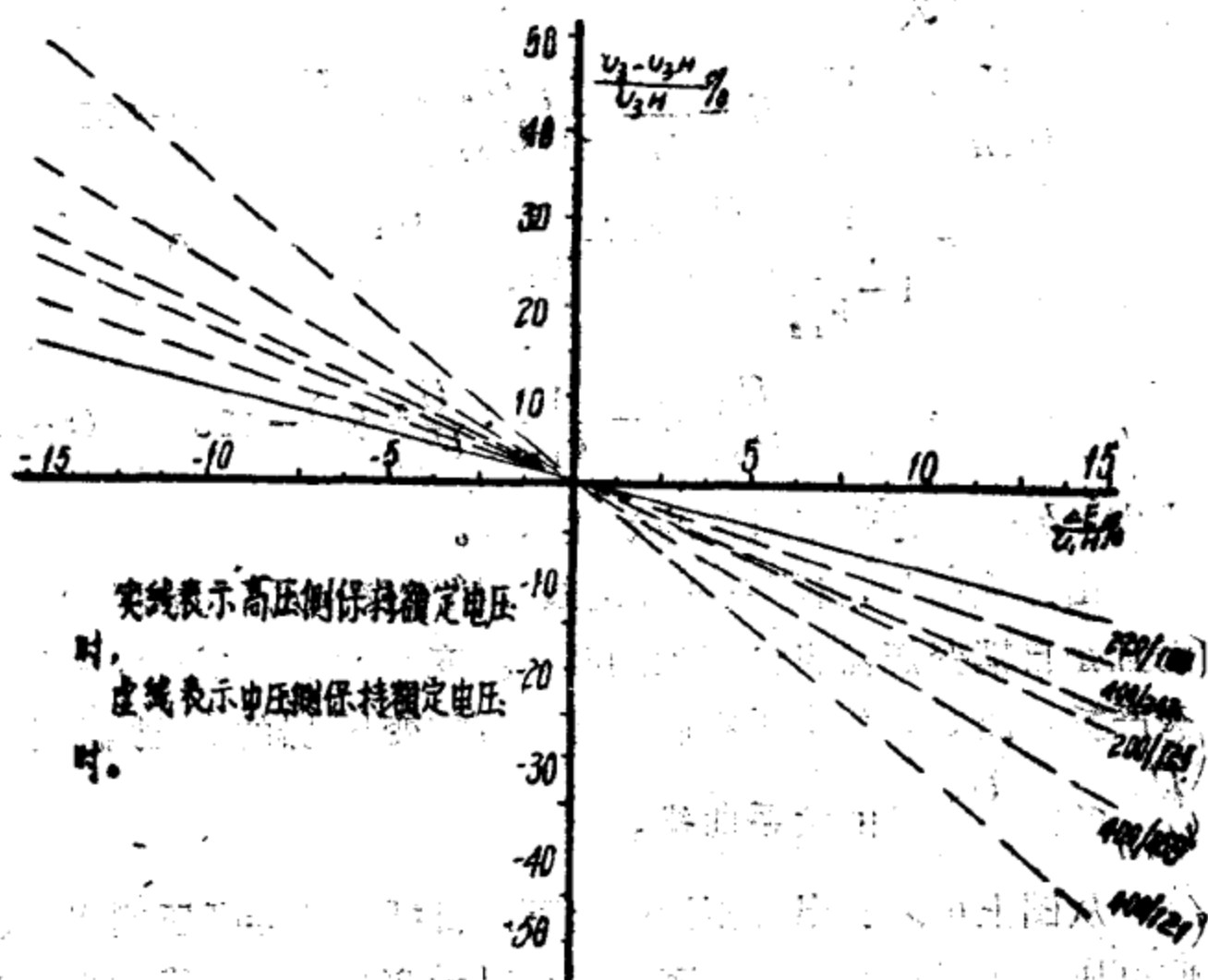


图 5-4 自耦变压器中性点内接入的附加电势与低压侧电压调整率的关系曲线

以上的分析說明，在自耦變壓器中性點內接入附加調壓器的這種調壓方式，在應用時是應當進行詳細檢驗的。

在自耦變壓器中性點內接入附加調壓器的另一個缺點，就是容易造成自耦變壓器本身的過勵磁。所謂自耦變壓器的過勵磁，系指當繞卷上施加某一電壓時，其內部電動勢與該繞卷的額定電壓之差（見圖5-2），對於高壓側繞卷來說，以式表示，即

$$\Delta V = E_1 - U_{1H} = U_1 + \Delta E - U_{1H} \quad (5-8)$$

如以高壓側的額定電壓表示為百分數

$$\frac{\Delta V}{U_{1H}} \% = \frac{U_1}{U_{1H}} \% - \frac{\Delta E}{U_{1H}} \% - 100 \quad (5-9)$$

用(5-2)式代入

$$\begin{aligned} \frac{\Delta V}{U_{1H}} \% &= \frac{U_1}{U_{1H}} \% - \frac{1}{k_{12}-1} \left(\frac{U_2}{U_{2H}} \% - \frac{U_1}{U_{1H}} \% \right) - 100 \\ &= \frac{1}{1 - \frac{1}{k_{12}}} \left(\frac{U_1}{U_{1H}} \% - \frac{1}{k_{12}} \cdot \frac{U_2}{U_{2H}} \% \right) - 100 \\ &= \frac{1}{k_0} \left(\frac{U_1}{U_{1H}} \% - \frac{1}{k_{12}} \cdot \frac{U_2}{U_{2H}} \% \right) - 100 \quad (5-10) \end{aligned}$$

式中 k_0 —— 自耦變壓器的效益係數。

由此式可知，自耦變壓器的過勵磁不僅和所加的電壓有關，而且是自耦變壓器自耦變比的函數。變比愈小，則過勵磁程度愈嚴重，圖5-5畫出了空載情況下自耦變壓器的過勵磁度與 $\frac{U_1}{U_{1H}} \%$ 或 $\frac{U_2}{U_{2H}} \%$ 的關係曲線。

從圖上可以看出在不同變比下，自耦變壓器高壓側或中壓側電壓變化對過勵磁的影響。例如對於220/169千伏的自耦變壓器當中壓側保持額定電壓而高壓側電壓升高10%時，主變

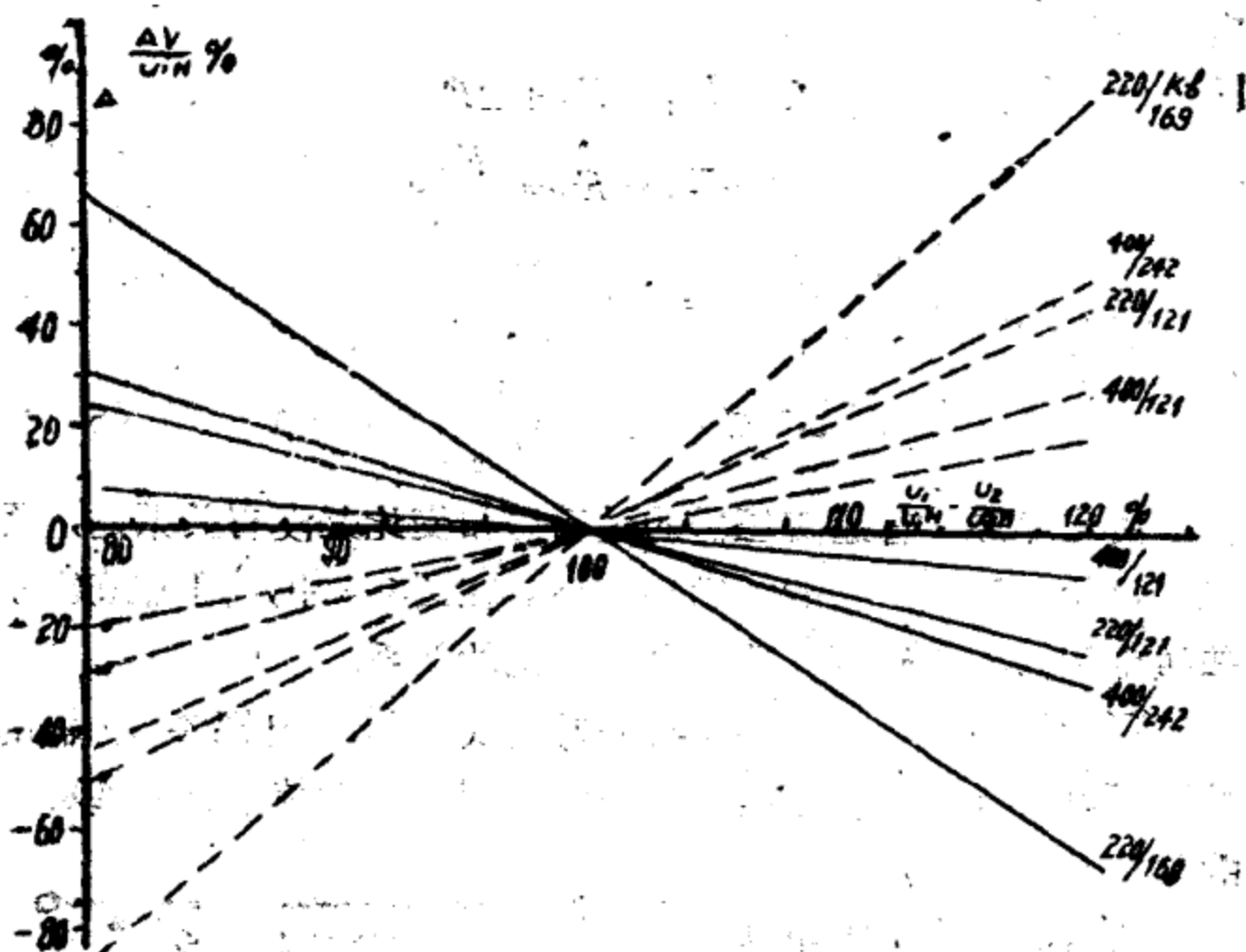


图 5-5 自耦变压器的通励磁和外加电压间的关系

实线代表 $\frac{\Delta V}{U_{1H}} \% = f\left(\frac{U_2}{U_{2H}} \%\right)$ 而 $U_1 = U_{1H}$

虚线代表 $\frac{\Delta V}{U_{1H}} \% = f\left(\frac{U_1}{U_{1H}} \%\right)$ 此时 $U_2 = U_{2H}$

点线代表普通变压器 $\frac{\Delta V}{U_{1H}} \% = f\left(\frac{U_2}{U_{2H}} \%\right)$

压器这时过励磁度达45%，这样不但大量增加了空载电流和空载损耗，而且主变压器的绝缘也是承受不了的，因此是不能允许的。对于同样条件的400/121千伏的自耦变压器来讲，过励磁的数值则显著减小，约为12%。

过励磁现象只有在自耦变压器中才如此显著，对于普通变压器来说，情况就完全不同。普通变压器当在高压侧中性点内接入附加调压器时，空载情况下的过励磁百分数可由下式决

定。

$$\because U_1 = E_1 + \Delta E$$

$$U_2 = E_2 = \frac{E_1}{k_{12}}$$

$$\begin{aligned} \text{过励磁百分数 } \frac{\Delta V}{U_{1H}} \% &= \frac{E_1 - U_{1H}}{U_{1H}} \% \\ &= k_{12} \frac{U_2}{U_{1H}} \% - 100 = \frac{U_2}{U_{2H}} \% - 100 \end{aligned} \quad (5-11)$$

由此可知，普通变压器的过励磁和变比是没有关系的，而且永远比自耦变压器的过励磁为小。在图5-5中，用点线表示普通变压器过励磁百分数与电压变化的关系。

顺便指出，比较(5-5)与(5-7)两式可知，自耦变压器的过励磁百分数与其低压侧的电压调整率，在数值上是完全相等的。

这里顺便谈一下中性点调压的自耦变压器线卷上带有附加抽头时，对其过励磁的影响。

如果自耦变压器高压侧线卷上带有附加抽头，如图5-6所示，当高压侧电压加在某一抽头位置时，其过励磁为：

$$\begin{aligned} \Delta V &= E_1 - \xi \cdot U_{1H} = \\ &= U_1 - \Delta E - \xi U_{1H} \end{aligned}$$

式中 ξ ——高压侧线卷在该抽头位置时的匝数与额定抽头位置时的匝数之比。

$$\text{而 } \xi = \frac{E_1}{E'_1} \quad k_{12} = \frac{E'_1}{E_2}$$

式中 E'_1 ——自耦变压器高压线卷在额定抽头位置时的电

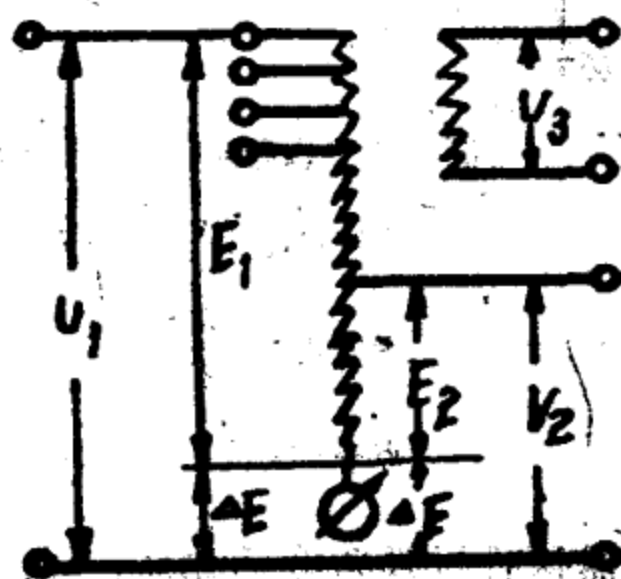


图 5-6

势。

k_{12} ——自耦变压器的额定变压比。

$$\begin{aligned} U_1 &= E'_1 + \Delta E = \xi E'_1 + \Delta E = \xi k_{12} E_2 + \Delta E \\ &= \xi k_{12} (U_2 - \Delta E) + \Delta E \end{aligned}$$

$$\therefore \Delta E = \frac{1}{1 - \xi k_{12}} \cdot U_1 - \frac{\xi k_{12}}{1 - \xi k_{12}} \cdot U_2$$

过励磁

$$\begin{aligned} \Delta V &= U_1 - \Delta E - \xi U_{1H} \\ &= U_1 - \frac{1}{1 - \xi k_{12}} U_1 + \frac{\xi k_{12}}{1 - \xi k_{12}} U_2 - \xi U_{1H} \\ &= \frac{1}{1 - \frac{1}{\xi k_{12}}} (U_1 - U_2) - \xi U_{1H} \end{aligned}$$

如以百分数表示

$$\begin{aligned} \frac{\Delta V}{\xi U_{1H}} \% &= \frac{1}{\xi} \frac{1}{1 - \frac{1}{\xi k_{12}}} \left(\frac{U_1}{U_{1H}} \% - \frac{U_2}{k_{12} U_{2H}} \% \right) - 100 \\ &= \frac{1}{\xi k'_0} \left(\frac{U_1}{U_{1H}} \% - \frac{U_2}{k_{12} U_{2H}} \% \right) - 100 \quad (5-12) \end{aligned}$$

式中 $k'_0 = 1 - \frac{1}{\xi k_{12}}$ 。

对于前面同样这个 220/169 千伏自耦变压器的例子，如果高压线卷上有 $\pm 2 \times 2.5\%$ 的附加抽头，当抽头切换装置放在最上面一个抽头上时，主变压器的过励磁百分数（假定中压侧保持额定电压高压侧电压升高 10%），为：

$$\begin{aligned} \frac{\Delta V}{\xi U_{1H}} \% &= \frac{1}{1.05 \times 0.267} \left(110 - \frac{100}{1.3} \right) \\ &- 100 = 17.5\% \end{aligned}$$

而前面无附加抽头时的过励磁百分数为 45%。因此，从这

个例子中可以看出，抽头的正确选择对减轻自耦变压器的过励磁，具有显著的效果。

(三) 在自耦变压器的出线端接入附加调压器

为了避免在自耦变压器中性点内接入附加调压器所引起的一些缺点，可以采用在自耦变压器出线端接入附加调压器的调压方式。但是这种调压方式使得附加调压器工作条件变坏，因为附加调压器本身必须能够承受在附加调压器附近发生短路时所流过的短路电流。这种短路电流由于没有受到（或受到的影响较小），而主变压器阻抗的限制增大，致使得制造复杂，价格昂贵，一般采用得较少。

最后谈一下自耦变压器抽头的选择。应该指出，自耦变压器或抽头范围愈小，并且愈接近于预想的电压水平，可以带来一定的技术经济效果。

自耦变压器抽头的范围直接影响到自耦变压器的标准容量，对于只有一个抽头的自耦变压器而言，自耦变压器的标准容量由下式求出

$$P_T = \frac{U_{1H} - U_{2H}}{U_{1H}} P_H \quad (5-13)$$

式中 P_T ——自耦变压器的标准容量；

P_H ——自耦变压器的通过容量。

如果自耦变压器的高中压都有抽头，而绝缘水平系按最高抽头电压设计，而散热系按最低抽头时的电压设计，因此：

$$P_T = \frac{U_{1\text{мак}} - U_{2\text{мин}}}{U_{1\text{мин}}} P_H \quad (5-14)$$

式中 $U_{1\text{мак}}$ 和 $U_{1\text{мин}}$ 表示高压侧最高和最低抽头的电压值， $U_{2\text{мин}}$ 表示中压侧最低抽头的电压值。

以200/169千伏的自耦变压器而言，在只有一个抽头时 $P_T = 0.232P_H$ ，如果在高压和中压侧都有 $\pm 5\%$ 的抽头，则 $P_T = 0.306P_H$ ，标准容量约增加了32%，显然要相应地增加自耦变压器的材料消耗量。

第六章 自耦变压器的运行方式

在升压及降压变电所内采用三种电压的自耦变压器时，由于不同电压侧的负荷有各种不同的组合方式，变压器会出现各种不同的运行方式。在某些情况下，自耦变压器会过负荷，而在另外一些情况下，自耦变压器却又不能充分利用，因此在应用这种自耦变压器时，必须对其运行方式加以注意。

自耦变压器常见的运行方式有以下几种：

1. 高压侧向中压侧(或中压侧向高压侧)送电。这种运行方式对于降压自耦变压器来说，其最大传输容量可以等于变压器的全部额定容量；对于升压自耦变压器来说，当低压绕组布置在高压与中压绕组之间时，由于这时低压侧连接的发电机停止运行，自耦变压器高、中压间的漏磁通增加，引起大量的附加损失。因此对于这种绕组排列的自耦变压器，其最大传输容量可能要限制到变压器的额定容量的70~80%。

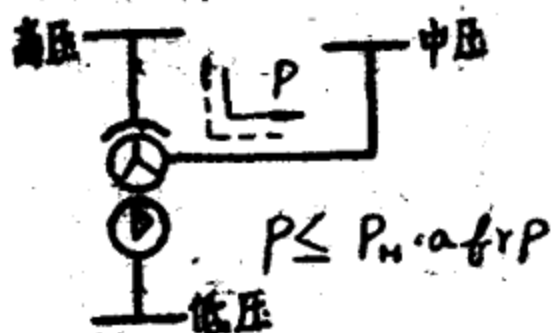


图 6-1

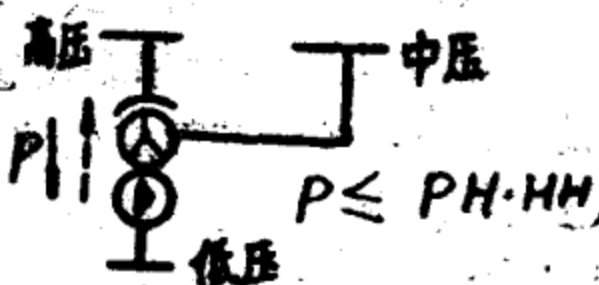


图 6-2

2. 高压侧向低压侧(或低压侧向高压侧)送电。在这种运行方式

下，变压器的最大传输容量不能超过其低压绕组的额定容量即自耦变压器的标准容量，对于高压与中压变比为2（例如220/110千伏）的自耦变压器，其最大传输容量不能超过自耦变压器额定容量的50%。

3. 中压侧向低压侧（或低压侧向中压侧）送电。这种运行方式与上面第二种运行方式相似，其最大传输容量不得超过自耦变压器的标准容量。

4. 高压侧同时向中压侧及低压侧（或低压侧及中压侧同时向高压侧）送电。这是最常见的一种运行方式。在这种运行方式下，最大允许的传输容量不能超过自耦变压器高压绕组（即串联绕组）的额定容量，否则它将过负荷，而这是不允许的。

为了确定高压向低压和高压向中压允许输送的容量之间的关系，应研究在这种运行方式下的电流向量关系。

假定在这种运行方式下，自耦变压器高压绕组（即串联绕组）内流过的电流，等于其额定电流 I_{1H} 。这时自耦变压器的电流向量图如图6-5所示。由图可知

$$I_{1H}^2 = I_2'^2 + I_3'^2 + 2I_2' I_3' \cos(\varphi_2 - \varphi_3)$$

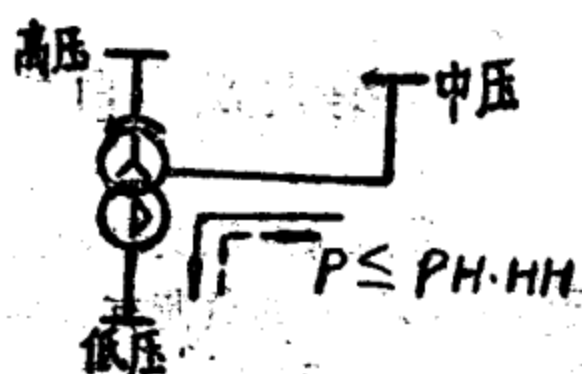


图 6-3



图 6-4

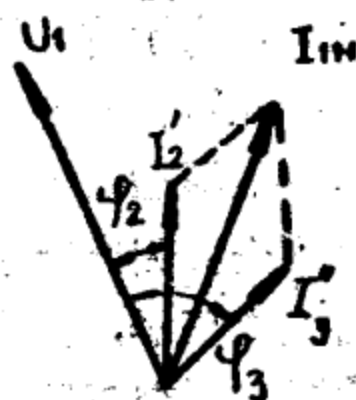


图 6-5

式中 I'_2 ——归算到高压綫卷的中压側电流 $I'_2 = \frac{I_2}{k_{12}}$,

$$k_{12} = \frac{U_{1H}}{U_{2H}},$$

I'_3 ——归算到高压綫卷的低压側电流

$$I'_3 = \frac{I_3}{k_{13}}, \quad k_{13} = \frac{U_{1H}}{U_{3H}}$$

將上式兩边乘以 $(\sqrt{3}U_{1H})^2$, 得

$$(\sqrt{3}U_{1H}I_{1H})^2 = (\sqrt{3}U_{2H}I_2)^2 + (\sqrt{3}U_{3H}I_3)^2 + 2(\sqrt{3}U_{2H}I_2)(\sqrt{3}U_{3H}I_3)\cos(\varphi_2 - \varphi_3)$$

式中 $\sqrt{3}U_{1H}I_{1H}$ 即自耦变压器的額定容量 (P_{1H});

$\sqrt{3}U_{2H}I_2$ 即由高压側傳輸到中压側去的視在容量;

$\sqrt{3}U_{3H}I_3$ 即由高压側傳輸到低压側去的視在容量。

$$\therefore P_{1H}^2 = P_2^2 + P_3^2 + 2P_2P_3\cos(\varphi_2 - \varphi_3) \quad (6-1)$$

兩边除以 P_{1H}^2 得:

$$1 = p_2^2 + p_3^2 + 2p_2p_3\cos(\varphi_2 - \varphi_3) = 1 \quad (6-2)$$

式中 p_2 、 p_3 ——由自耦变压器高压側傳輸到中压側及低压側的容量百分数(以自耦变压器的額定容量为基数)。

根据上式即可求出在不同功率因数下, 自耦变压器由高压側傳輸到中压側及低压側的視在容量之間的关系。

假定 $\cos\varphi_2 = 1$, 得:

$$p_2^2 + p_3^2 + 2p_2p_3\cos\varphi_3 = 1 \quad (6-3)$$

根据此式作出 $p_2 \sim p_3$ 关系曲綫, 如图(6-6)所示($\cos\varphi_3$ 从 0 到 1)。

由图可知, 当自耦变压器高压側向低压側傳輸一半的額定容量时, 如果中压側与低压側的电流之間沒有相角位移($\cos\varphi_3 = 1$), 則高压側可以同时向中压側傳輸, 另外一半額定容量,

如果中压侧与低压侧的电流之间有相角位移,例如 $\cos\varphi_2=0.6$,这时,则高压侧向中压侧传输的视在容量可以大于自耦变压器额定容量的50%,而为62%。需要指出,这个特点对于普通三卷变压器来说,也是存在的。

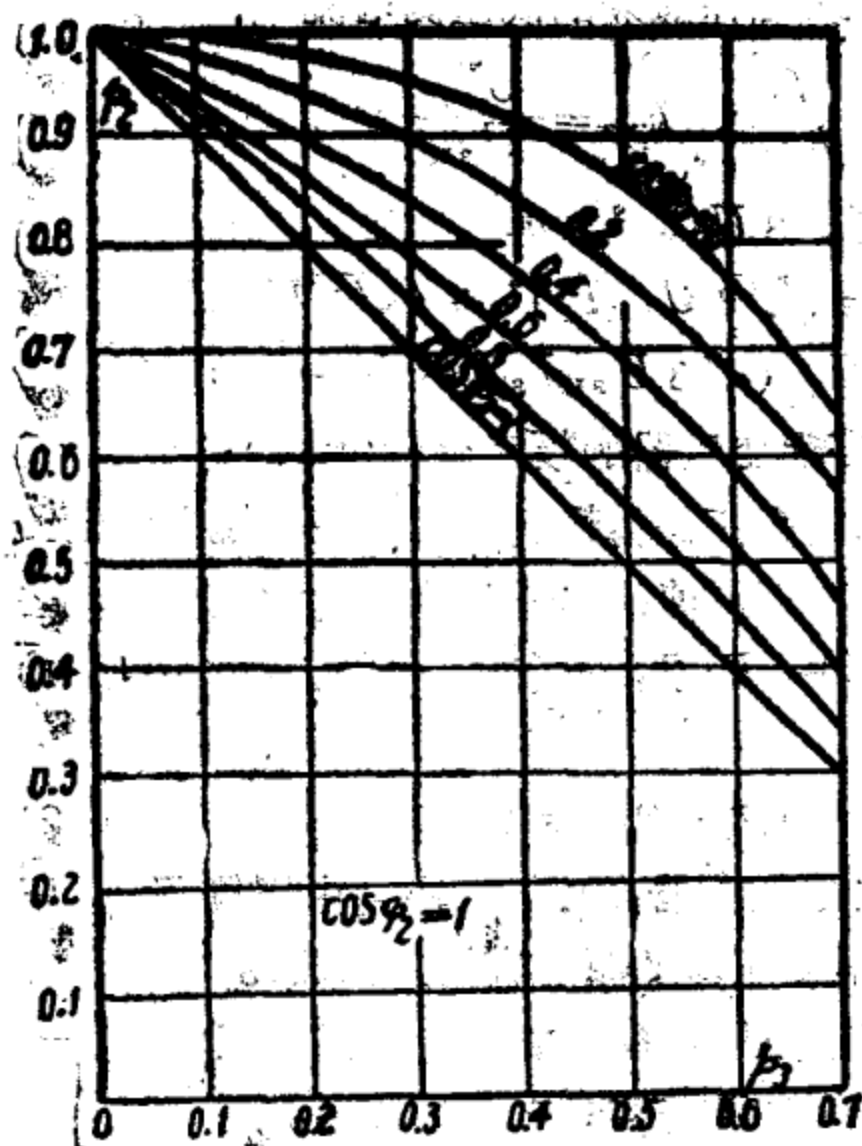


图 6-6 自耦变压器高压侧同时向中压侧及低压侧送电时 P_2P_3 关系曲线

5. 中压侧同时向高压侧及低压侧 (或高压侧及低压侧同时向中压侧) 送电。

这也是最常见的一种运行方式。在这种运行方式下,自耦变压器的中压绕组 (即公共绕组) 是一次绕组,而其他两个绕组则是二次绕组,中

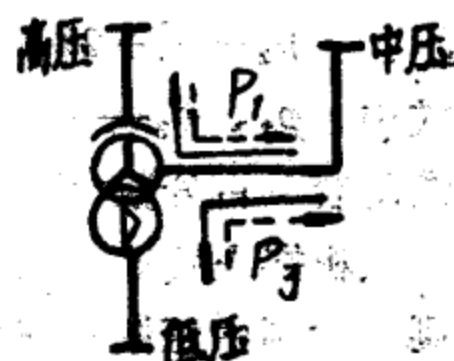


图 6-7

压绕组内最大能够流过的电流不能超过其额定电流 $I_{OH.H}$

$$I_{OH.H} = I_{2H} \left(1 - \frac{1}{k_{12}} \right) = I_{1H} (k_{12} - 1) \quad (6-4)$$

式中 I_{1H} —— 自耦变压器高压侧的额定电流。

I_{2H} —— 自耦变压器中压侧的额定电流。

这时自耦变压器的电流向量图如图6-8所示

$$\vec{I}_{OH.H} = \vec{I}'_2 + \vec{I}'_1 k_o$$

式中 I'_2 ——归算到一次绕卷的低压侧

电流, $I'_2 = \frac{I_2}{k_{23}}$

$$k_{23} = \frac{U_{2H}}{U_{3H}}$$

I'_1 ——归算到一次绕卷的

高压侧电流;

$$I'_1 = I_1 k_{12}$$

k_o ——自耦变压器的效益

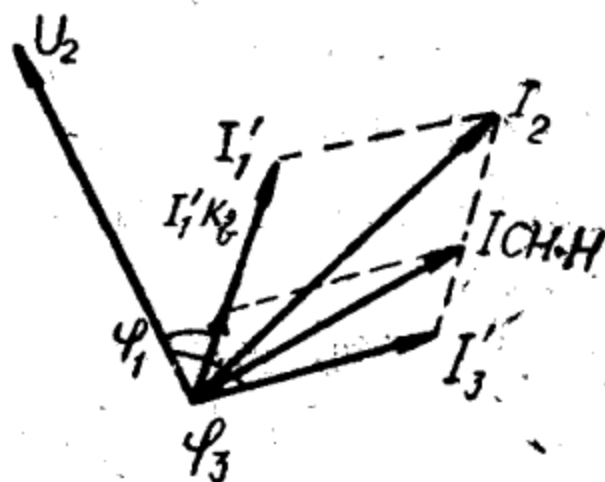


图 6-8

系数 $k_o = 1 - \frac{1}{k_{12}}$, 由图可知

$$I_{OH.H} = \sqrt{I_2'^2 + (I_1' k_o)^2 + 2(I_2')(I_1' k_o) \cos(\varphi_2 - \varphi_1)}$$

$$= I_{1H} (k_{12} - 1) \text{ 两边平方, 经简化后得:}$$

$$P_1^2 + \left(\frac{P_2}{k_o}\right)^2 + 2P_1 \frac{P_2}{k_o} \cos(\varphi_2 - \varphi_1) = P_{1H}^2 \quad (6-5)$$

式中 P_1 ——由自耦变压器中压侧传输到高压侧的视在容量。

$$P_1 = \sqrt{3} U_{1H} I_1$$

P_2 ——由自耦变压器中压侧传输到低压侧的视在容量。

$$P_2 = \sqrt{3} U_{2H} I_2$$

P_{1H} ——自耦变压器的额定容量。

将上式两边除以 P_{1H}^2 , 得

$$p_1^2 + \left(\frac{p_2}{k_o}\right)^2 + 2 \frac{p_1 p_2}{k_o} \cos(\varphi_2 - \varphi_1) = 1 \quad (6-6)$$

式中 p_1, p_2 ——由自耦变压器中压侧传输到高压侧及低压侧的容量百分数（以自耦变压器的额定容量为基数）。

根据上式即可求出在不同功率因数下，由自耦变压器中压侧传输到高压侧及低压侧的视在容量之间的关系。

当 $K_s = 0.5$ （例如220/110千伏自耦变压器），上式变为 $p_1^2 + 4p_2^2 + 4p_1p_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1) = 1 \dots \dots \dots (5-7)$

根据此式作出的 $p_1 \sim p_2$ 关系曲线如图6-9所示（假定 $\cos\varphi_1 = 1$ ）。

由图可知，当自耦变压器中压侧向低压侧传输的容量达到自耦变压器的标准容量时（对于220/110千伏自耦变压器，其标准容量等于变压器额定容量的50%），中压侧不能再向高压侧传输任何容量，尽管这时中压侧向低压侧传输的容量只有自耦变压器额定容量的50%。但是如果中压侧向低压侧传输的容量低于标准容量时，则中压侧仍可向高压侧补充传输一部分容量，并且补充传输的这部分容量可以大于标准容量与传输到低压侧的容量之差。例如220/110千伏，100/100/50兆伏安的自耦变压器组，当中压侧向低压侧传输40兆伏安时，假定 $\cos\varphi_2 = 1$ ，由图可知，这时中压侧向高压侧补

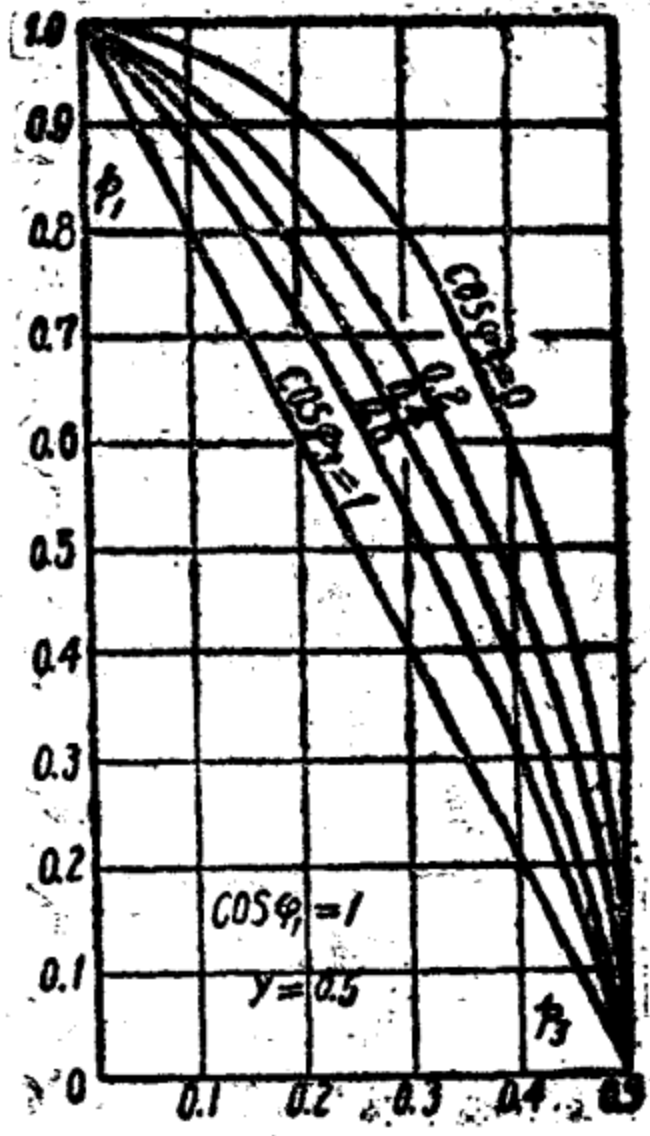


图6-9 自耦变压器中压侧同时向高压侧及低压侧送电时 p_1, p_2 关系曲线

充傳輸的容量可以达到20兆伏安，而不是 $50 - 40 = 10$ 兆伏安。同时还必須指出，如果低压側与高压側的电流之間有相角位移，則这种向高压側补充傳輸容量的可能还可以更大一些。例如上面同一例子，如果 $\cos\varphi_2 = 0.6$ 时，則中压側向高压側补充傳輸的容量可以更大，为30兆伏安。这一特点，在应用自耦变压器时，必須加以特別注意。

第七章 自耦变压器在电力系统中的应用

因为自耦变压器必須用在中性点直接接地的电力系統中，因此对于我国來說，它只能用来連接电压为110千伏及以上的电力系統。

自耦变压器可以应用在降压变电所內，也可以应用在升压变电所內。

在降压变电所內采用自耦变压器可以充分發揮它的效益。因为利用自耦变压器高、中压綫卷的自耦联系，变压器本身的容量可以大大小于它的傳輸容量。

当降压变电所仅一种电压的用户时，采用自耦变压器的变电所的一般原則接綫如图7-1所示。

当降压变电所有两种电压的用户負荷或需要裝設同期調相机或靜电电容器供給无功电力时，采用自耦变压器的变电所一般原則接綫如图7-2所示。

三种电压的降压自耦变压器的容量必須根据其中、低压側的負荷分配

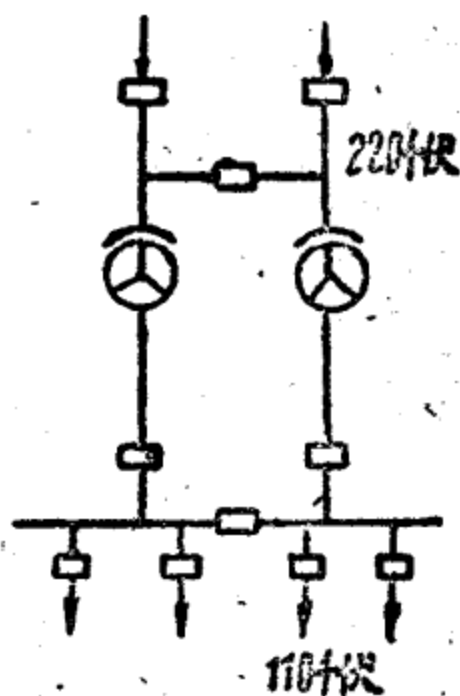


图 7-1

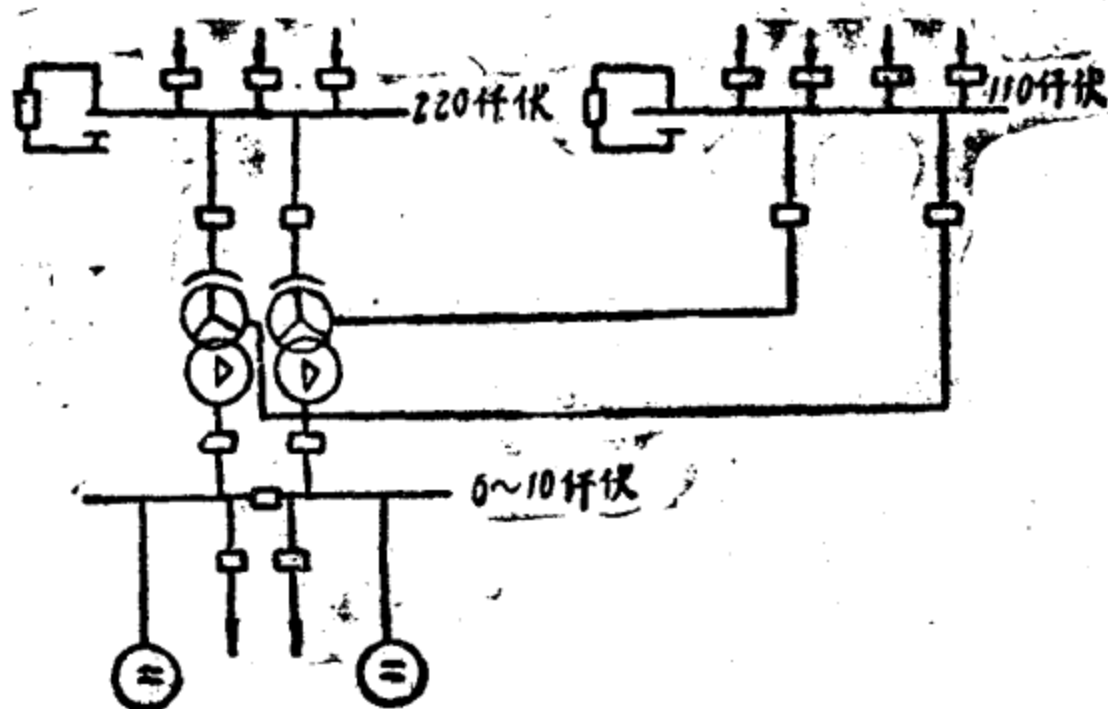


图 7-2

情况进行选择，在选择时还必须考虑由于中、低压侧电流之间的相位不一致，而减少自耦变压器容量的可能性（见自耦变压器的运行方式一章）。

由于自耦变压器的单位容量可以做得很大，因此在变电所内装设自耦变压器后，可以大大的增加变电所的容量。同时，由于自耦变压器的损耗很小，在某些情况下，经过两次电压变换后，电能损耗仍然不大，因此在这种情况下用户可以采取较低电压的供电方式，以节省送变电设备的投资。

在升压变电所内应用自耦变压器时，发电机只能接在自耦变压器的第三线圈上，如图7-3所示。

因为从发电机过电压保护和自耦变压器中性点必须直接接地两方面来看，都不允许将发电机接在自耦联系的线圈上。

这样一来，自耦变压器用在升压变电所内就不象装在降压变电所内那样能够充分发挥其效益。因为自耦变压器的第三线圈和其他两个线圈在电路上没有联系，因此它的容量应做得与传输容量相等。在这种情况下，即与发电机送出的容量相等。

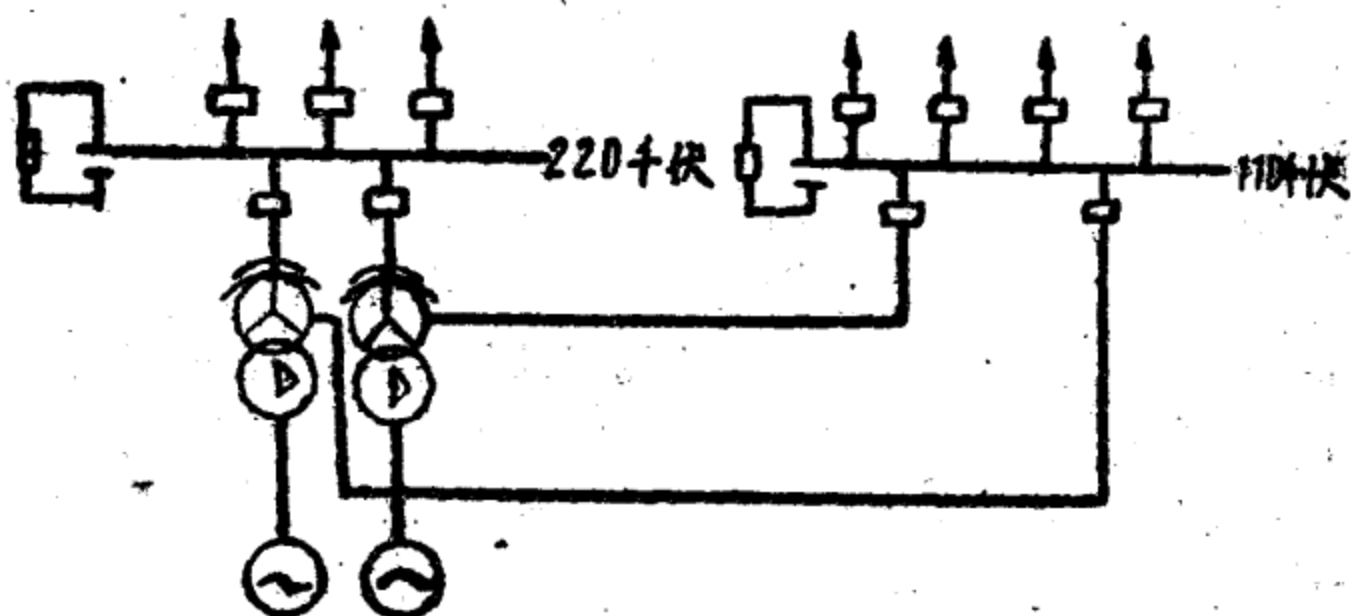


图 7-3

失去降压变电所内自耦变压器的线卷容量，只有传输的容量的 k 倍的优点。

尽管如此，在升压变电所内采用自耦变压器仍然有许多优点：

1. 供电灵活。因为除了将第三线卷所连接的发电机的容量送出外，还可以利用高压与中压线卷的自耦联系，补充传输一部分容量，如图 7-4 所示。

然而必须指出，这种高、中压线卷补充传输容量是有一定条件的。当第三线卷向高压侧传输的功率达到第三线卷的额定容量时，中压侧还可以向高压侧传输一部分补充功率；反之，当第三线卷满载向中压侧传输功率时，由于中压线卷的容量与第三线卷的容量

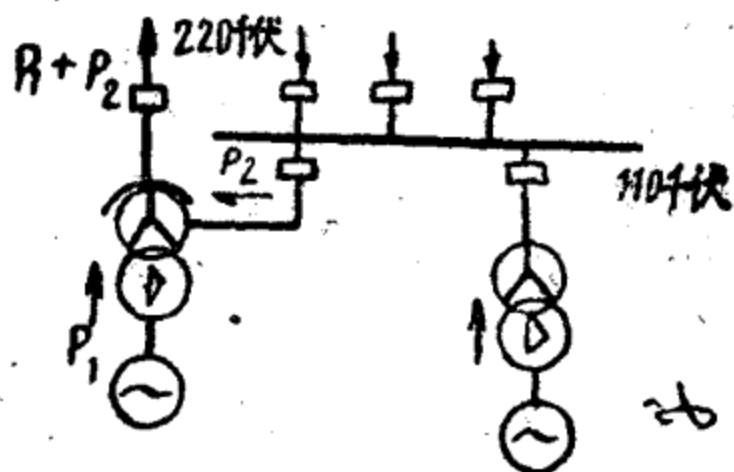


图 7-4

相等，这时它也滿載，因此高压側不能再向中压側补充傳輸功率。在电力系統中应用自耦变压器时，对于这一特点必須特別注意。同时还必須指出，当第三綫卷向中压側傳輸的容量未达到綫卷的額定容量时，則高压側仍可向中压側补充傳輸容量，并且所补充傳輸的容量能够大于第三綫卷的額定容量与該綫卷的傳輸容量之差。因为这时高压側可以利用其与中压側在电路上联系，更多地傳輸一部分功率。如果高压側与中压側的电流之間的相角不一致时，这种由高压側向中压側补充傳輸容量的可能性还可以更大一些（詳見自耦变压器的运行方式一章）。

2. 降低变电所的造价。因为自耦变压器的中压側可以补充向高压側傳輸功率，同时由于自耦变压器的損耗很小，在某些情况下經過二次电压变换后电能的損耗仍然不大，因此它与普通三卷升压变压器相比可以减少变电所內变压器的台数，并且可以将部分变压器改为較低电压，这样不但可以降低变压器的投資，而且还可以减少高压开关設備的投資。

利用这种特点，在某些情况下，可以得到很大的經濟效果。例如有几个容量不大，彼此相距不远的发电厂，需要用較高的电压（例如 220 千伏）送到較远的用电中心去时，如果在这几个发电厂內都裝設 220 千伏的升压变压器，这样肯定是不經濟的。这时这些发电厂最好采用比較低的电压（例如 110 千伏），集中送到某一个发电厂內，然后再从这个发电厂將电力用 220 千伏的綫路送出。在这个发电厂內可以裝設大容量的自耦变压器，如图 7-4 所示，这样，可以使投資得到很大的节省。

3. 减少变压器的損耗。因为三卷自耦变压器的損耗比普通三卷变压器的損耗要小，因此，在升压变电所中采用自耦变压器来代替普通三卷变压器后可以改善电力網的运行及經濟指

标。

下面举几个自耦变压器在电力系统中应用的例子。

例1. 某水电站的装机容量为110万千瓦，保证出力为525万千瓦，年利用小时为5,500小时，安装八台机组，每台容量为137.5万千瓦，发电机功率因数为0.85，水电站用110千伏和220千伏二种电压分配电能，占水电站容量15%的电力送向110千伏电网，其余的电力将送到220千伏的电力系统中去。

在选择水电站的升压变压器时，研究了下面两个主要方案：第一方案，采用自耦变压器连接110千伏和220千伏二种电压，由于这种自耦变压器在高压和中压间的交换容量较高压（或中压）和低压间的交换容量大一倍，因此有可能将二台仅与220千伏母线连接的发电机-变压器组改接至110千伏母线上，它的接线图如图7-5所示。

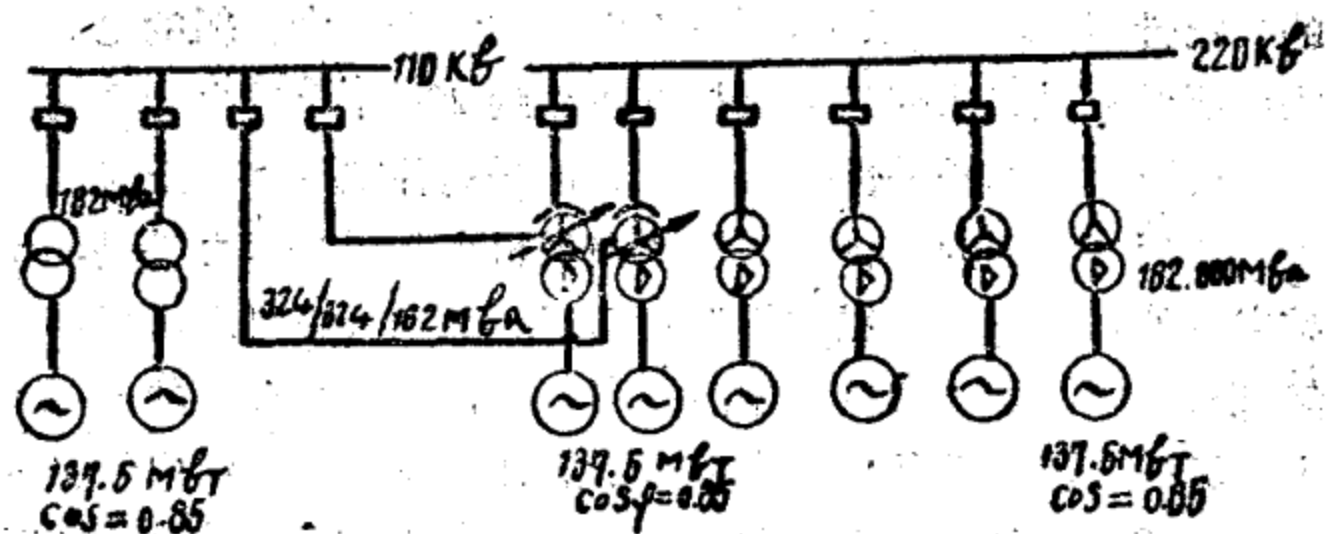


图 7-5

第二方案，采用普通变压器来连系110千伏和220千伏母线，普通变压器的容量就只有自耦变压器容量的一半，图7-6表示了这一方案的接线图。

二个方案的经济性表明在下面的经济比较表中。

由表可知，不论在投资和电能损失方面，第一方案，即采

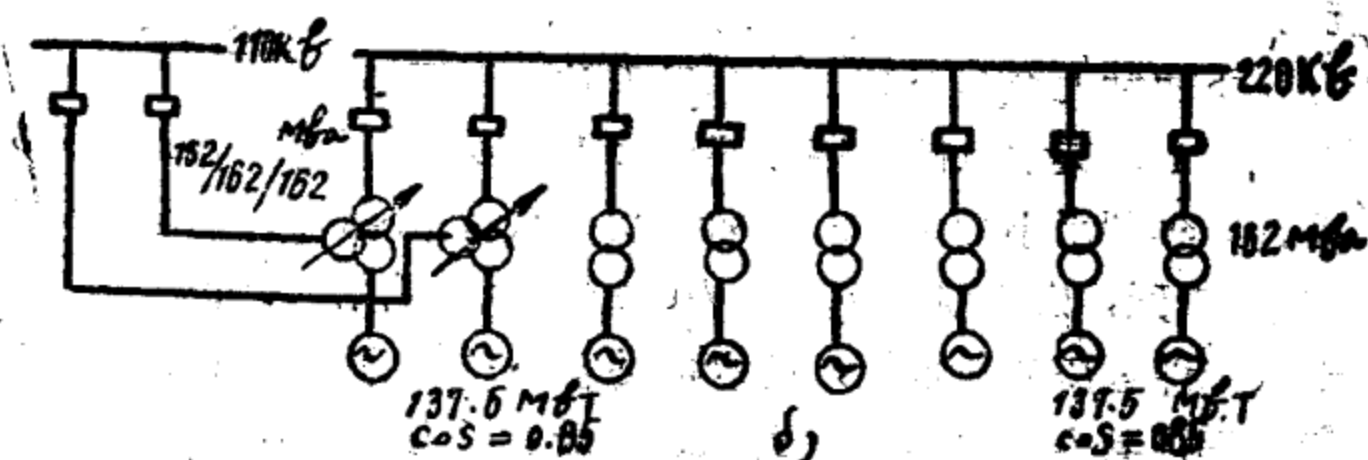


图 7-6

用自耦变压器的方案比第二方案更为节约。同时第一方案减少了 220 千伏的开关设备，从运行来讲，第一方案能将电站容量的 50% 送到 110 千伏的系统中去，而第二方案只能输送 25% 的容量。这就说明在电站 220 与 110 千伏两种电压间交换容量和适应 110 千伏侧负荷发两方面，第一方案比第二方案具有更大的灵活性。从表面上看来，第一方案有相当于一台机组的电力，需要经常经过二次变压才能把电能送到 220 千伏的电力系统中去，会减低它的经济性和可靠性。但是这种缺点实际上是没有多大作用的，因为自耦变压器的损失很小，同时水电站是经常带尖峰的，一部分机组常常停止运行。从上表中可以看出，虽然部分电能经过二次变压才能送出去，但是整个接线的电能损失，第一方案还是比第二方案为小。在可靠性方面，由于自耦变压器能够保证相当于二台发电机的功率从 110 千伏送到 220 千伏，而 110 千伏母线已有大于一台发电机容量的负荷，因此一台自耦变压器故障或者检修，都不会引起发电机容量送不出的现象，这说明一部分功率经过二次变压也不致损害结线的可靠性。

例 2. 苏联安加拉河上的伊尔库斯克水电站的装机容量为 66 万千瓦，共装八台机组，每台容量为 82.8 万千瓦，发电机功率因数

單位：百萬盧布

編号	名 称	設備规范及类型	第一方案		第二方案	
			数量	总造价	数量	总造价
1	單相双綫卷变压器	ОЦТ- $\frac{54000}{110}$	6	3.9	—	—
2	單相双綫卷变压器	ОЦТ- $\frac{54000}{220}$	12	10.8	18	16.2
3	單相三綫卷变压器	ОЦТР- $\frac{54000}{220}$	—	—	6	8.0
4	單相自耦变压器	ОЦТА- $\frac{108000}{220}$	6	8.0	—	—
5	串聯变压器	ВПТЦР-162000	—	—	2	1.66
6	串聯变压器	ВПТЦР-324000	2	2.2	—	—
7	調压自耦变压器	АВРТЦР-1620000	—	—	2	3.0
8	調压用自耦变压器	АВРТЦР-324000	2	4.0	—	—
9	110KV 間隔 (包括出綫)	ВВН-110	11	4.95	9	4.05
10	220KV 間隔 (包括出綫)	ВВН-220	14	15.4	16	17.6
11	总 計			49.25		50.5
12	电能損失(百万度)			12.6		13.4

为0.80。水电站的容量用110及220千伏两种电压送出。

在設計中原来采用的結綫方式如图7-7a, 所示。

在这种接綫方式下, 水电站的全部容量都可送入110千伏

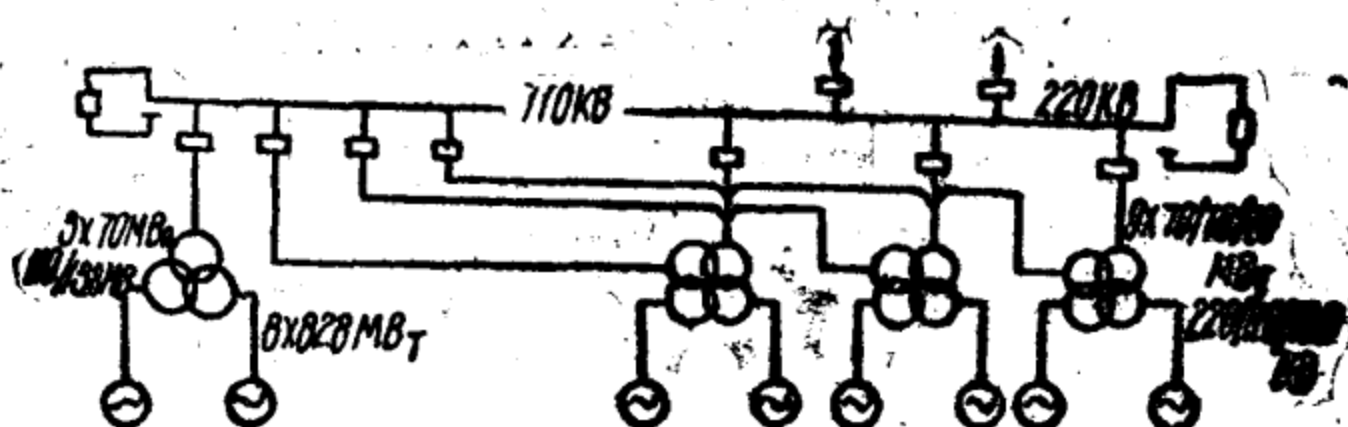


图 7-7a

电力系统，而只有 6 台机组的容量可以送入 220 千伏系统。

后来莫斯科变压器制造厂建议采用自耦变压器，接线方式如图 7 ~ 76 所示。

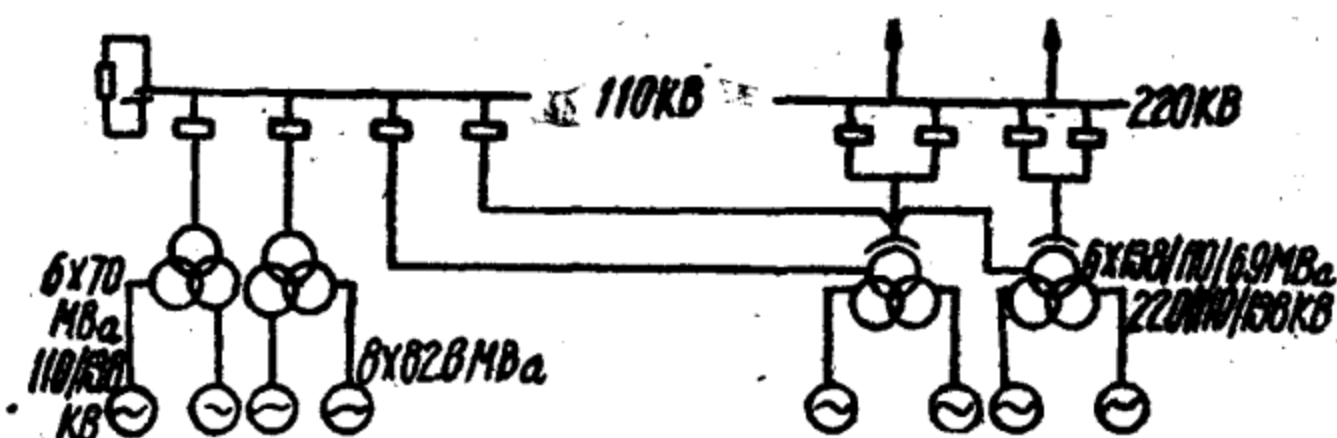


图 7-76

这种接线方式与上述的比较起来，可以将一组 220/110/13.8 千伏的三卷变压器改为 110/13.8 千伏的双卷变压器，220 千伏开关可以节省两台，这样，变电所的投资可以得到节约。而 220/110/13.8 千伏，138/100/69 兆伏安的单相自耦变压器与 220/110/13.8 千伏，70/70/70 兆伏安的普通三卷变压器，在重量、尺寸及造价上几乎相等。

采用自耦变压器除了降低变电所的造价外，在运行上还更为灵活，因为水电站八台机组的全部容量都可以送入 110 千伏

或220千伏系統。

此外，變電站的變壓器損耗大約可以降低20%左右。

但必須指出，由於採用自耦變壓器後，使變電站的短路電流增加，該升壓變電站110千伏開關採用了MKП-110型，額定電流2,000安，遮斷容量為5,000兆安的；220千伏開關採用了MKП-220型，額定電流1,000安，遮斷容量為6,000兆伏安的。

以上兩個例子說明，在發電廠升壓站內，採用自耦變壓器對簡化接綫、降低造價和減少運行費用，常能起着顯著的效果。

3. 瑞典北部某條河流上有幾個梯級水電站，彼此相距不遠而且容量不大（在十餘萬瓩以下），這些水電站的電力要用380千伏電壓的輸電綫路送到相距數百公里的南部用電中心去。他們採取了在其中某一水電站內裝設一組13/220/400千伏，容量為595兆伏安的單相自耦變壓器組的方案，該變壓器組的第三綫卷上連接了該水電站的兩台容量各為65千瓩的機組，而其他的梯級水電站的容量，則各用220千伏電壓的輸電綫路送至本電站然後經過自耦變壓器再升壓至400千伏送出去。這樣大大地節省了380千伏的超高壓設備，使整個系統的送變電設備投資得到了顯著的節約。

以上的例子說明了應用自耦變壓器可以降低整個系統的送變電投資。這種情況對於我們來說，在系統設計中也是會遇到的。

4. 在降壓變電所內採用自耦變壓器後，有時對某些大用戶的供電，可以改為採取較低的電壓等級，以大量節約高壓設備的投資，而電能損耗卻增加並不顯著。如圖7-8所示。

圖7-8a)中，用戶區域變電所以220千伏受電，圖7-8b)為當區域變電所採用自耦變壓器後，用戶改由110千伏受電，在

这种情况下，采用后一个方案，可以大量节约 220 千伏送变电设备，而损耗比第一方案增加的并不多。

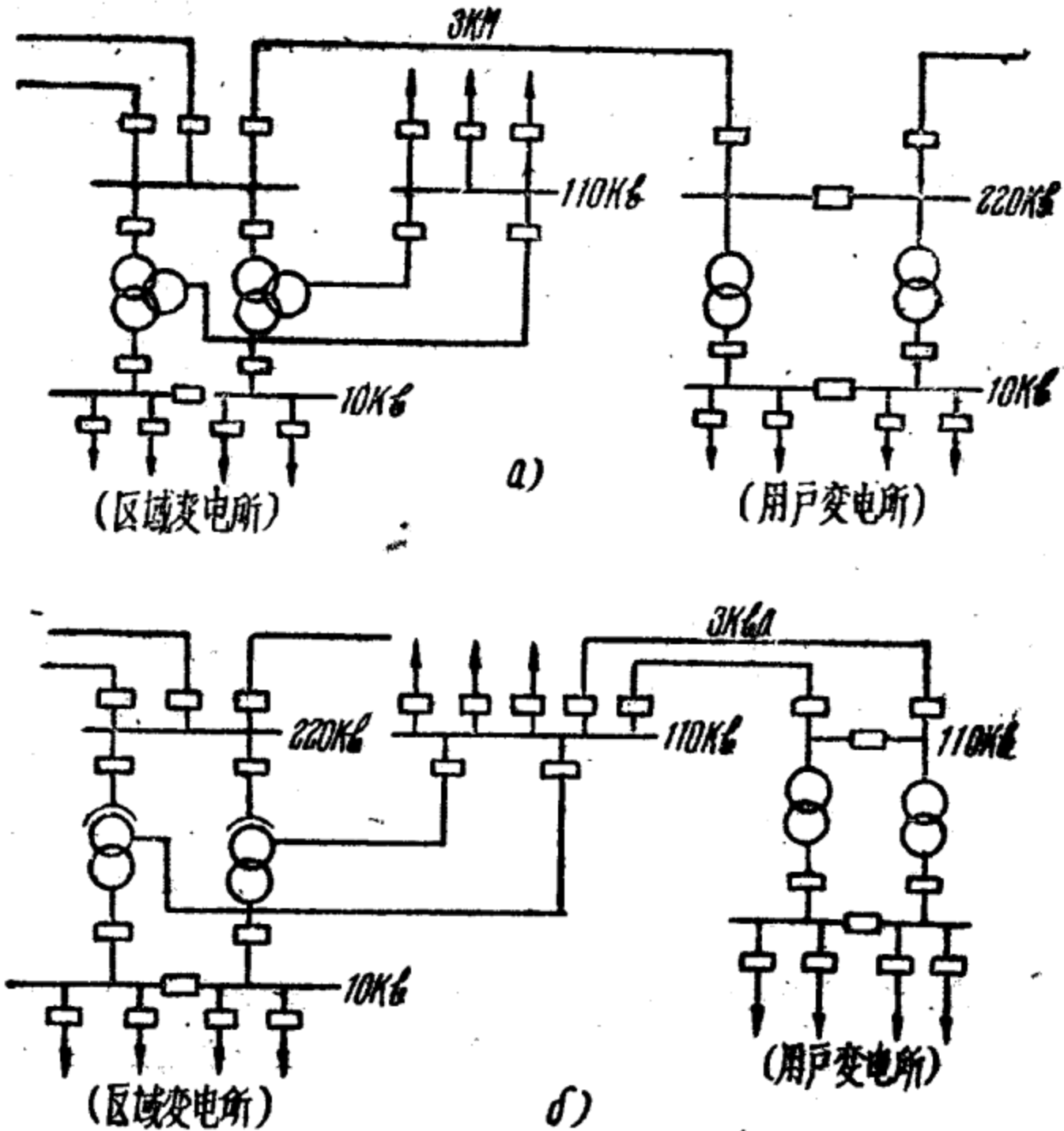


图 7-8

第八章 结 束 语

1. 在高压及超高压电力系统内采用自耦变压器代替普通变

压器，是一項新的技术。目前世界上許多国家已經在这方面取得了成功的制造与运行經驗。

2. 自耦变压器必須用在中性点直接接地的电力系统內。

3. 在电力系統中用自耦变压器代替普通变压器可以提高变压器的單位容量、降低变电所的造价和减少电力网的电能与功率損耗。

4. 在电力系統中采用自耦变压器后将引起系統短路电流的增加，特别是單相短路电流的增加。

5. 在电力系統中采用自耦变压器后，也将造成調压上的一些困难。在自耦变压器的各种調压方式中，以帶負荷改变抽头位置(即帶負荷調压的自耦变压器)的調压方式最为經濟、簡單可在自耦变压器中性点內接入附加調压器的調压方式，在运行上存在一些严重的缺点，应用时应当特別注意。

6. 在应用自耦变压器时，必須对其負荷运行方式进行研究，以避免自耦变压器过負荷运行或欠負荷运行。

7. 在我国 110 千伏以上的电力系统发展設計中，应当考虑广泛采用自耦变压器，以代替普通变压器。

8. 建議我国电工制造部門及其他有关單位立即着手研究高压自耦变压器的制造及其在电力系統中具体应用的問題。

[G e n e r a l I n f o r m a t i o n]

书名 = 自耦变压器在高压电力网中的应用

作者 = 电力系统设计院著

页数 = 71

出版社 = 北京市：水利电力出版社

出版日期 = 1958.11

SS号 = 11699776

DX号 = 000004796090

URL = [http://book.szdnnet.org.cn/bookDetail.jsp?dxNumber=000004796090&d=8](http://book.szdnnet.org.cn/bookDetail.jsp?dxNumber=000004796090&d=8B5A1421CF194B9F536EA2E480191A01)

[B5A1421CF194B9F536EA2E480191A01](http://book.szdnnet.org.cn/bookDetail.jsp?dxNumber=000004796090&d=8B5A1421CF194B9F536EA2E480191A01)

[B5A1421CF194B9F536EA2E480191A01](http://book.szdnnet.org.cn/bookDetail.jsp?dxNumber=000004796090&d=8B5A1421CF194B9F536EA2E480191A01)

版权

- 第一章 世界各国自耦变压器应用及制造简况
- 第二章 自耦变压器的基本原理
- 第三章 自耦变压器的优缺点
- 第四章 自耦变压器的阻抗及其对系统短路电流的影响
- 第五章 自耦变压器的电压调整
- 第六章 自耦变压器的运行方式
- 第七章 自耦变压器在电力系统中的应用
- 第八章 结束语