

电力自耦变压器及其应用

杨天民 施传立 谭显弟

水利电力出版社

87
TM411
1
3

电力自耦变压器及其应用

杨天民 施传立 谭显弟

水利电力出版社



423676

内 容 提 要

本书系统地叙述了电力自耦变压器的基本工作原理、阻抗参数及等值电路；详细地分析了自耦变压器在电力系统中的应用和运行中的主要问题(各种运行方式，对称负载、不对称负载以及并联运行时的容量分配，零序阻抗及其测试计算)；讨论了电力自耦变压器的有载调压方式和过电压及其保护等问题。

本书可供从事电力设计、运行以及变压器制造部门的工程技术人员和大专院校电力类专业的师生参考。

电力自耦变压器及其应用

杨天民 施传立 谭显弟

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 13.5印张 308千字

1987年9月第一版 1987年9月北京第一次印刷

印数0001—6060册 定价2.80元

书号 15143·6420

前 言

现代电力系统正向着超高压(330~750kV)、特高压(750kV以上)、大容量、远距离、自动化等方向发展,因此电力变压器单台容量也愈来愈大。

由于电力自耦变压器具有明显的经济效益,它和同容量、同电压等级普通变压器相比,具有材料省、损耗少、重量轻、尺寸小、成本低、便于安装运输、易于制造更大容量、改善系统稳定性能等优点,近三十年来世界各主要国家电力系统中已广泛采用,并积累了丰富的经验。在330kV及以上超高压电力系统中几乎取代了普通三绕组变压器。

我国220kV电力系统中,据1972年统计全国约有自耦变压器容量500万kVA,近十几年来又有很大的发展,仅华北电力系统中1984年底自耦变压器容量就为380万kVA,占220kV电压等级变压器容量的40%。在建的超高压电力系统,特别是500kV电压等级的系统,即将成为我国几个主干电网,其联络变压器和降压变压器都将全部采用自耦变压器。从我国的实际情况出发,从技术经济的观点来看,电力系统中采用自耦变压器对于发展电力工业、降低造价、缩短建设周期具有极大的现实意义,因而有着广阔的发展前途。

随着自耦变压器的应用,也出现了一些问题。为了推动对自耦变压器技术性问题的研究并引起人们的重视,我们参阅了国内外有关文献资料和电力系统设计、运行经验编写了此书。基于读者已具备电工理论知识,有关变压器的基本理论不予重复,书中仅对自耦变压器的特殊规律力图详细分析。

本书由杨天民同志、施传立同志和谭显弟同志共同编写,由杨天民负责全书的统一校核。

在编写过程中,蒙华北电力学院杨以涵教授、戴克健副教授、王文端教授,保定变压器厂靳佳全工程师、王振武工程师,北京水利电力经济管理学院高之梁副教授,华东电力设计院钱如瑛高级工程师,水利电力部北京规划院李昌龄高级工程师,华北电力设计院牟敦庚高级工程师、王栋龄高级工程师、王承端工程师、董彦卿工程师等提出了许多宝贵意见,华东、北京电力设计院、电力中试所等设计生产单位热情提供参考资料,在此一并深表谢意。

本书初稿经东北电力设计院何新民等同志详细审阅,提出了许多宝贵意见,谨致以衷心的感谢。

因编者水平有限,书中不妥和错误之处热忱欢迎读者批评指正。

编著者

1985年7月

目 录

前言

第一章 电力自耦变压器的基本理论	1
第一节 自耦变压器的工作原理	1
第二节 自耦变压器的三相连接方式	8
第三节 单相自耦变压器的电势平衡方程式, 相量图和等值电路	14
第四节 自耦变压器的漏电抗	20
第五节 三绕组自耦变压器的等值电路和阻抗参数	28
第六节 带分裂绕组自耦变压器的等值电路和参数分析	40
第二章 电力自耦变压器的运行分析	44
第一节 自耦变压器的运行方式	44
第二节 调相用自耦变压器的公共绕组容量	52
第三节 自耦变压器的并联运行	63
第四节 自耦变压器的不对称运行	74
第五节 三绕组自耦变压器有功功率损耗的计算	83
第三章 电力自耦变压器的零序阻抗和零序等值电路	87
第一节 变压器零序阻抗和零序等值电路的概念	87
第二节 自耦变压器中性点直接接地时的零序等值电路	89
第三节 自耦变压器中性点经小阻抗接地时的零序等值电路	91
第四节 自耦变压器零序阻抗的测试与计算	101
第四章 自耦变压器在电力系统中的应用	116
第一节 自耦变压器的特点	116
第二节 自耦变压器与短路电流	122
第三节 自耦变压器对继电保护的特别要求	132
第四节 接地距离保护的应用	139
第五节 自耦变压器与电气主接线	143
第六节 全星形自耦变压器简介	150
第五章 电力自耦变压器的调压方式	153
第一节 自耦变压器的调压方式	153
第二节 自耦变压器在不同调压方式下的制造容量	156
第三节 自耦变压器的中性点侧调压方式	159
第四节 自耦变压器的线端调压方式	167
第五节 带调压绕组的自耦变压器阻抗参数	176
第六节 有载调压自耦变压器带正反向调压时换向开关的电压和电流	184
第六章 电力自耦变压器的过电压及其保护	188
第一节 自耦变压器主绕组波过程的特点	188
第二节 自耦变压器主绕组的过电压保护	193
第三节 自耦变压器调压绕组的过电压及其保护	196

第一章 电力自耦变压器的基本理论

第一节 自耦变压器的工作原理

一、关于自耦变压器的概念

自耦变压器的工作原理,可以从普通双绕组变压器的工作原理来理解。如图1-1所示,双绕组变压器原、副绕组绕向相同,它们被铁芯中同一交变磁通所匝链,则各绕组中每匝的感应电势应相同。假如将X与x点相连并接地,这对变压器工作将无影响,我们在原绕组上总可以找出一一点 a' ,使 a' 与副绕组上 a 点等电位。或可写为

$$W'_{a'X} = W_{ax}$$

式中 $W'_{a'X}$ 和 W_{ax} 分别为 $a'X$ 和 ax 绕组的匝数。

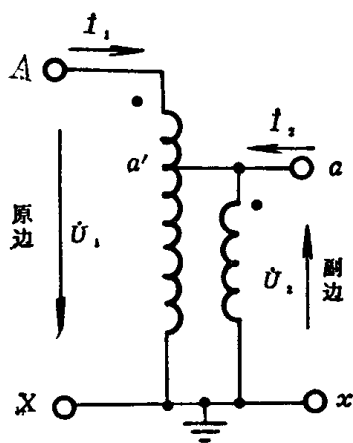


图 1-1 自耦变压器原理图

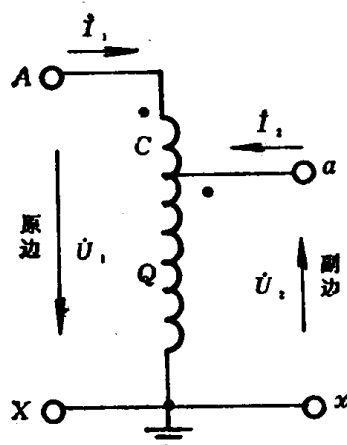


图 1-2 自耦变压器原理接线图

若低压绕组绝缘能耐高压时,即可将 a' 与 a 点连起来,并将 $a'X$ 与 ax 两部分合并为一个绕组,演变成图1-2。这种变压器好像只有一个绕组,低压绕组是高压绕组中的一个组成部分,所以它也叫“单绕组变压器”,这个变压器高压绕组 AX 是由低压绕组 ax 和另一个绕组 Aa 串联而成。 Aa 绕组通常叫“串联绕组”以汉语拼音字母“C”代表; ax 绕组为高压与低压侧所共有,通常叫“公共绕组”以字母“Q”代表。

公共绕组和串联绕组是通过“电磁感应”和“电”的直接连接关系耦合起来,以改变原、副边的电压和在原、副边之间传输电能的,所以这种变压器叫“自耦变压器”。

国产的自耦变压器其串联绕组和公共绕组一般按同芯式放置,因串联绕组与高压系统连接,它总是布置在铁芯最外侧,其结构示意图于图1-3。

自耦变压器可以是单相的,也可以是三相的,可以降压也可以升压。

如图1-4(a)所示,电力系统中的自耦变压器每相有两个绕组,其中 AX 绕组系由公共

绕组 $A_m X$ 和串联绕组 AA_m 组成，按自耦方式连接，另一个低压绕组 ax 与绕组 AX 之间靠磁路联系。这种自耦变压器联系着高、中、低压三级，一般叫做“三相三绕组自耦变压器，”如图1-4(b)所示。电力系统中最常见的是三相和单相三绕组自耦变压器，对超高压

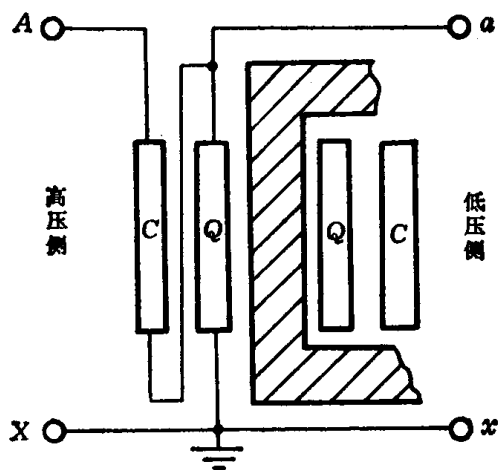


图 1-3 自耦变压器结构示意图

巨型容量的自耦变压器，因受极限容量和运输条件的限制一般都做成单相的。三相或单相三绕组自耦变压器组中三个有自耦连接的绕组一般为Y形连接，其中性点直接接地，三个低压绕组可连接为△形或Y形。本书中分别以汉语拼音字母“G”“Z”和“D”来表示高、中、低压三侧；英、日文等文献资料上分别以“H”表示高压侧，“L”表示低压侧（对于三绕组自耦变压器即相当于中压侧），“T”表示第三绕组即三绕组自耦变压器的低压侧；而俄文文献资料上分别以“B”表示

高压侧，“C”表示中压侧，“H”表示低压侧。

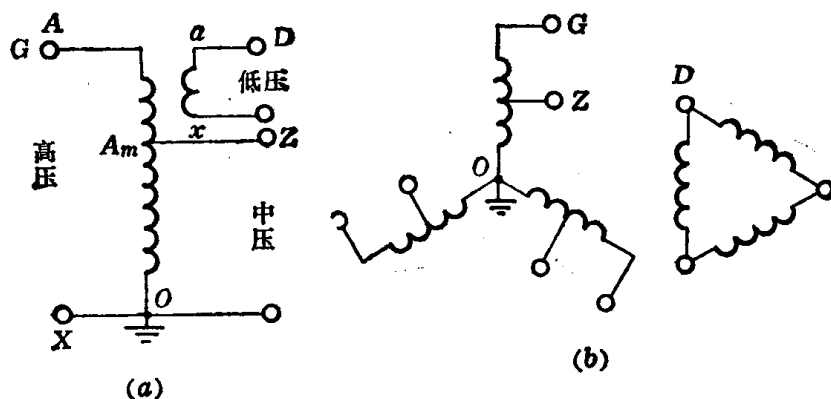


图 1-4 三绕组自耦变压器原理接线图
(a)单相；(b)三相

二、自耦变压器的空载运行

为便于叙述，现以如图1-5所示的单相两个电压等级的降压自耦变压器进行分析。

自耦变压器空载下副边开路 $\dot{I}_2 = 0$ 。则

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0$$

式中 $\dot{I}_0$ 为空载激磁电流。 $\dot{I}_0$ 产生的空载激磁磁势

$$F_0 = \dot{I}_0 W_1 = \dot{I}_0 W_{AD}$$

由于大容量的自耦变压器空载电流远远小于额定电流，并且漏电抗也很小，则在忽略空载电流在原边产生的漏抗压降后可得出

$$\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1 = -\dot{E}_{AD}$$

因每匝电势

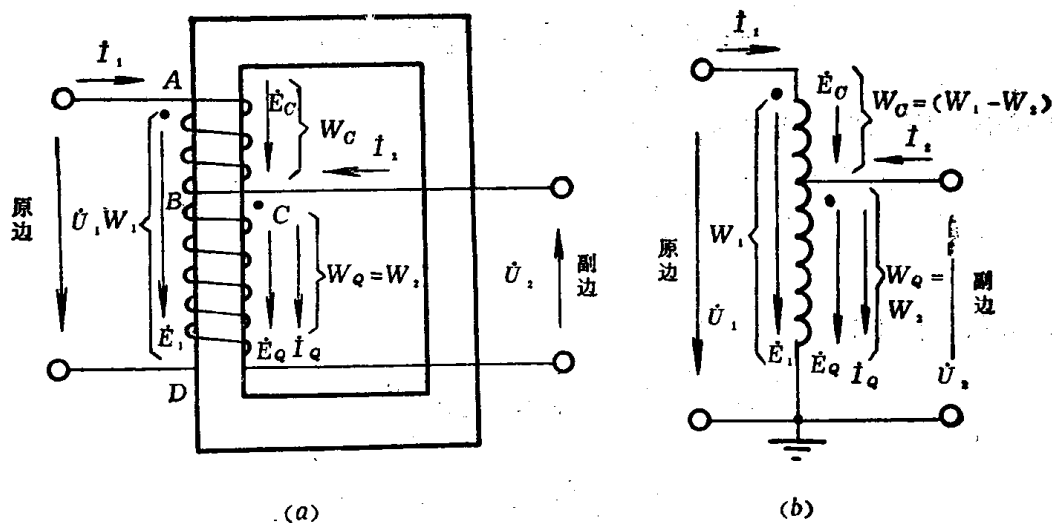


图 1-5 单相双绕组降压自耦变压器

(a) 示意图; (b) 接线图

$$E_t = \frac{E_{AD}}{W_{AD}} \approx \frac{U_1}{W_{AD}}$$

则自耦变压器副边开路端电压为

$$U_{2,0} = E_{CD} = E_t W_{CD} \approx \frac{U_1}{W_{AD}} \times W_{CD}$$

自耦变压器的“变压比”为

$$K_{12} \approx \frac{U_1}{U_{2,0}} = \frac{U_1}{\frac{U_1}{W_{AD}} \times W_{CD}} = \frac{W_{AD}}{W_{CD}} = \frac{W_1 (\text{高压匝数})}{W_2 (\text{低压匝数})}; K_{12} > 1$$

当原边电压 U_1 为额定电压 U_{1e} 时, 副边开路端电压 $U_{2,0}$ 为副边额定电压 U_{2e} , 这时的变压比叫“标准变比”, 即

$$K_{12} = \frac{U_{1e}}{U_{2e}}$$

三、自耦变压器的负载运行

(一) 磁势关系

当自耦变压器副边接入负载后, 负载电流为 $\dot{I}_2$, 原边电流为 $\dot{I}_1$, 铁芯中合成磁势为

$$[\dot{I}_1 W_{AB} + (\dot{I}_1 + \dot{I}_2) W_{CD}]$$

假如外加电压 $\dot{U}_1$ 不变, 则铁芯中主磁通最大值 Φ_m 基本不变, 负载以后作用在铁芯中总合成磁势仍应与空载磁势基本相同, 即

$$[\dot{I}_1 W_{AB} + (\dot{I}_1 + \dot{I}_2) W_{CD}] \approx \dot{I}_0 W_{AD} \approx 0 \quad (1-1)$$

式中 $\dot{I}_1 W_{AB}$ 为自耦变压器上段串联绕组的磁势, $(\dot{I}_1 + \dot{I}_2) W_{CD}$ 为自耦变压器下段公共绕组的磁势。所以

$$(\text{自耦变压器上段磁势}) + (\text{自耦变压器下段磁势}) \approx 0$$

即自耦变压器上段磁势与下段磁势相平衡。

展开 (1-1) 式得

$$\dot{I}_1 W_{AB} + \dot{I}_1 W_{CD} + \dot{I}_2 W_{CD} \approx 0$$

或

$$\dot{I}_1 W_{AD} + \dot{I}_2 W_{CD} \approx 0 \quad (1-2)$$

(1-2) 式中 $\dot{I}_1 W_{AD}$ 为原边磁势, $\dot{I}_2 W_{CD}$ 为副边磁势。所以

(自耦变压器原边磁势) + (自耦变压器副边磁势) ≈ 0

即自耦变压器的原边磁势与副边磁势相平衡。

(二) 电流关系

在忽略 $\dot{I}_0$ 后由 (1-2) 式得出

$$\dot{I}_1 + \frac{W_{CD}}{W_{AD}} \dot{I}_2 = 0; \quad \dot{I}_1 + \frac{1}{K_{12}} \dot{I}_2 = 0$$

则

$$\dot{I}_1 = -\frac{1}{K_{12}} \dot{I}_2 \quad \text{或} \quad \dot{I}_2 = -K_{12} \dot{I}_1$$

公共绕组中电流 $\dot{I}_Q = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = (1 - K_{12}) \dot{I}_1 = \left(1 - \frac{1}{K_{12}}\right) \dot{I}_2$, 实际上任何瞬间公共绕组中的电流瞬时值 i_Q 等于原边与副边电流瞬时值 i_1 与 i_2 之差。这一问题可以从图1-6中分析自耦变压器两个不同瞬间电流分布情况得到证明。

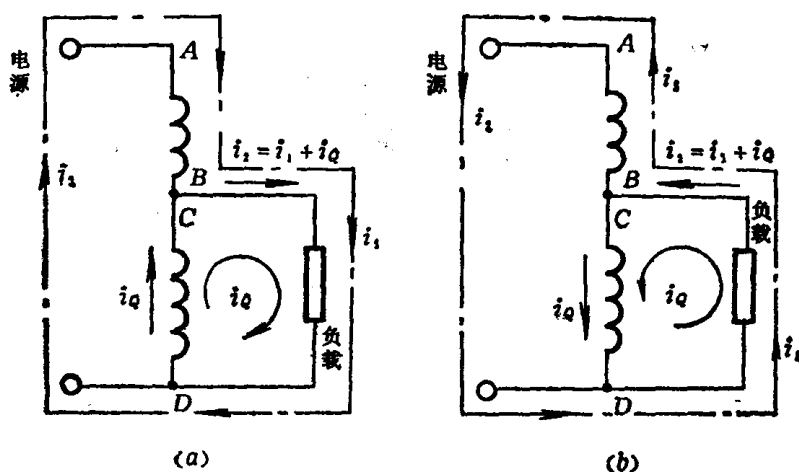


图 1-6 自耦变压器两不同瞬间电流分布图
(a)某瞬间, (b)另一瞬间

(1-1) 式可写成 $\dot{I}_1 W_{AB} + \dot{I}_Q W_{CD} = 0$, 它说明从磁势平衡关系要求 $\dot{I}_1$ 与 $\dot{I}_Q$ 的相位必须相反 (即相位差 180°), 根据图1-5(b)规定正方向 $\dot{I}_1$ 与 $\dot{I}_2$ 的相位也总是相反的, 所以 $\dot{I}_1$ 与 $\dot{I}_Q$ 的相位相同, 它们的瞬时值总可以写为

$$i_2 = i_1 + i_Q \quad \text{或} \quad i_Q = i_2 - i_1$$

即降压自耦变压器公共绕组中的电流为原边电流和副边电流的代数和。或可写为

$$I_Q = I_2 - I_1$$

(三) 容量关系

设 S_{10} 、 S_{20} 和 S_0 分别代表自耦变压器的额定输入容量, 额定输出容量和额定容量。

在忽略激磁电流和损耗的情况下则有

$$S_{1e} = U_{1e} I_{1e} = K_{12} U_{2e} \frac{1}{K_{12}} I_{2e} = U_{2e} I_{2e} = S_{2e} = S_e \quad (1-3)$$

设 S_{AB} 为上段串联绕组容量； S_{CD} 为下段公共绕组容量。

$$\begin{aligned} \text{则} \quad S_{AB} &= U_{AB} I_{1e} = \frac{U_{1e}}{W_{AD}} \times W_{AB} \times I_{1e} = \frac{(W_{AB} + W_{CD} - W_{CD})}{(W_{AB} + W_{CD})} U_{1e} I_{1e} \\ S_{AB} &= \left(1 - \frac{1}{K_{12}}\right) S_{1e} = \left(1 - \frac{1}{K_{12}}\right) S_{2e} = \left(1 - \frac{1}{K_{12}}\right) S_e \end{aligned} \quad (1-4)$$

$$\begin{aligned} S_{CD} &= U_{CD} I_Q = U_{2e} \left(1 - \frac{1}{K_{12}}\right) I_{2e} = \left(1 - \frac{1}{K_{12}}\right) S_{2e} \\ &= \left(1 - \frac{1}{K_{12}}\right) S_e \end{aligned} \quad (1-5)$$

(1-4) 式和 (1-5) 式说明自耦变压器上段串联绕组的容量等于下段公共绕组的容量。

由于 $K_{12} > 1$ ，可以看出自耦变压器串联绕组的容量，公共绕组的容量都小于自耦变压器的额定容量，这就是自耦变压器突出的优点。

例如： $K_{12} = 220\text{kV}/110\text{kV} = 2$ ； $S_{AB} = S_{CD} = 0.5 S_e$ 。

$K_{12} = 330\text{kV}/220\text{kV} = 1.5$ ； $S_{AB} = S_{CD} \approx 0.33 S_e$ 。

变比 K_{12} 愈近于 1， S_{AB} 或 S_{CD} 愈小，自耦变压器经济性愈好。

设 S_{2T} 为副边实际输出的容量，也就是实际通过的容量叫“通过容量”。因为

$$S_{2T} = U_2 I_2 = U_2 I_1 + U_2 I_Q \quad (1-6)$$

式中， $U_2 I_1$ 是由于自耦变压器有了“电”的连接，由电源直接传到副边的容量，叫“电传导容量”，以 S_{ed} 表示。 $U_2 I_Q$ 是由于电磁感应关系由电源传给副边的容量，叫“电磁容量”，以 S_{ec} 表示。

$$\text{则} \quad S_{2T} = S_{ed} + S_{ec} \quad (1-7)$$

从上两式可知，自耦变压器与普通变压器不同，一方面靠电磁感应关系传送容量，另一方面，还可以从电源直接传送容量，因而自耦变压器副边从电源吸收的容量为电磁容量与电传导容量之和。

在忽略激磁电流和损耗的情况下，当自耦变压器原边为额定电压、额定电流时，副边所通过的容量即为铭牌所标出的额定容量。

因为在进行自耦变压器的电磁设计计算时，它的尺寸、重量和铁芯截面是由电磁传输容量所决定的，所以对于自耦变压器公共绕组的电磁容量又叫“制造容量”或“计算容量”，用 S_{fe} 表示，也有些文献资料称之为“标称容量”，“标准容量”，或“型式容量”。

从式 (1-4)、式 (1-5) 可看出，串联绕组容量等于公共绕组容量，等于电磁容量，也等于 $\left(1 - \frac{1}{K_{12}}\right)$ 乘以自耦变压器额定容量。因 $K_{12} > 1$ ，

$$\text{则} \quad S_{ec} < S_{2T} \quad \text{或} \quad S_{ec} < S_e$$

电磁容量 S_{ec} ，电传导容量 S_{ed} 与通过容量 S_{2T} 之比分别为

$$\frac{S_{ec}}{S_{2T}} = \frac{U_2 I_Q}{U_2 I_2} = \left(1 - \frac{1}{K_{12}}\right)$$

$$\frac{S_{cd}}{S_{2T}} = \frac{U_2 I_1}{U_2 I_2} = \frac{1}{K_{12}}$$

即总通过容量中的 $\left(1 - \frac{1}{K_{12}}\right)$ 部分是由电磁感应作用传递的； $\frac{1}{K_{12}}$ 部分则是通过直接电传导作用而传递的。

在一定通过容量下，当自耦变压器变压比 K_{12} 愈接近于 1，直接传导容量所占比重愈大，电磁容量和结构尺寸愈小，经济效益愈显著。

图1-7(a)为普通变压器容量示意图，假如AB绕组的容量为

$$10\text{A} \times 10\text{kV} = 100\text{kVA}$$

CD绕组的容量为

$$1\text{A} \times 100\text{kV} = 100\text{kVA}$$

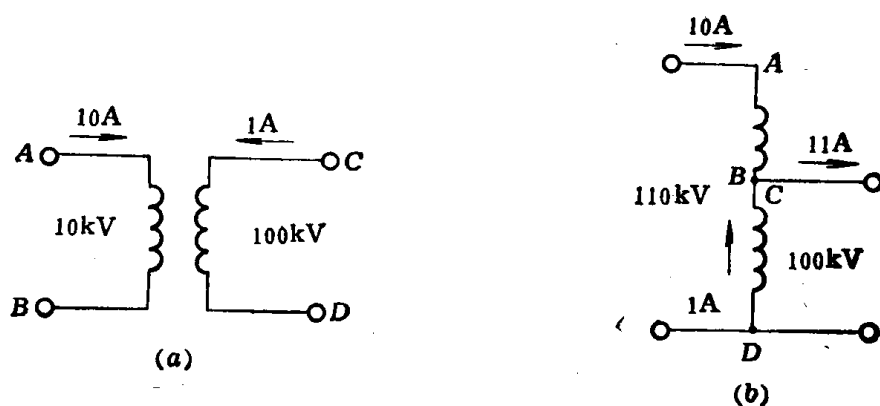


图 1-7 变压器容量示意图

(a)普通变压器；(b)自耦变压器

如不考虑耐压情况改接如图1-7(b)所示的，自耦变压器连接，它的通过容量即可变为

$$10\text{A} \times 110\text{kV} = 1100\text{kVA}$$

或

$$11\text{A} \times 100\text{kV} = 1100\text{kVA}$$

这是由于 $K_{12} = 110/100$ ； $\left(1 - \frac{1}{K_{12}}\right) = \frac{1}{11}$ ，在绕组电磁容量 $U_2 I_0$ 不变的情况下，自耦连接使通过容量 $U_2 I_2$ 增加即

$$U_2 I_0 \text{ (电磁容量)} = 100\text{kV} \times 1\text{A} = 100\text{kVA}$$

$$U_2 I_2 \text{ (通过容量)} = 100\text{kV} \times 11\text{A} = 1100\text{kVA}$$

$$\therefore U_2 I_0 = U_2 I_2 \left(1 - \frac{1}{K_{12}}\right)$$

以上说明当原边电压与副边电压相差不大时，采用自耦变压器传输功率的经济效益非常显著。

三相三绕组自耦变压器的额定容量由高压电压和串联绕组额定电流所决定，它可以理解为通过其高压侧的极限通过容量，即

$$S_e = \sqrt{3} U_{oe} I_{oe}$$

式中 U_{oe} ——高压系统的额定电压（线电压）；

I_{oe} ——串联绕组的额定电流。

若将(1-4)式和(1-5)式中 S_e 代入 $\sqrt{3}U_{oe}I_{oe}$ ，即可得出三相三绕组自耦变压器串联绕组和公共绕组的计算容量。

例如：一台三相120000kVA、220kV/121kV自耦变压器和普通变压器相比，高压绕组电流为315A，中压侧的电流为573A，则自耦变压器串联绕组容量为

$$S_e = \sqrt{3}(220 - 121) \times 315 = 54000 \text{ kVA}$$

公共绕组容量为

$$S_q = \sqrt{3}(573 - 315) \times 121 = 54000 \text{ kVA}$$

$$\therefore \left(1 - \frac{1}{K_{12}}\right) = 0.45; \text{ 根据公式(1-4)和(1-5),}$$

$$S_e = S_q = 0.45 \times 120000 = 54000 \text{ kVA}$$

说明一台计算容量为54000kVA的自耦变压器相当同电压等级的一台120000kVA普通变压器。它可以传输120000kVA容量，其中只54000kVA是靠电磁耦合方式，而其余66000kVA容量是从高压直接电传导送至中压的容量，从中可以看出自耦变压器与普通变压器相比，其经济效益是很大的。

三相三绕组自耦变压器低压绕组的计算容量，要根据它的设置目的和设计要求来决定。为了形成通过三次谐波电流通路，低压绕组的容量原则上可以很小，一般由它的热稳定电流来决定，为自耦变压器额定容量的5%~15%。例如日本日立公司已经制造成功第三绕组为额定容量9.3%的自耦变压器，但与第三绕组有关的电抗值较高，即在 $X_{12}(\%) = 10\%$ 时， $X_{13}(\%) = 40\%$ 和 $X_{23}(\%) = 35\%$ ，参照本章第四节的分析可知这种解决办法是不经济的。

在实际设计时因绕组机械强度要满足动稳定要求和低压侧接负荷的需要，一般选择为自耦变压器额定容量的 $\frac{1}{3}$ 或30%，用降压自耦变压器第三绕组接低压侧负荷时，低压绕组的极限容量等于自耦变压器的“计算容量”。美国变压器标准曾建议为35%，英国变压器标准建议为 $\frac{1}{3}$ ，苏联制造的O- Υ_0/Δ -12-11，500/(230 $\pm$ 8 $\times$ 1.5%)/15.75kV，267000/267000/83000kVA自耦变压器其低压绕组容量约为额定容量的30%。我国制造的电力自耦变压器220kV级一般为自耦变压器额定容量的50%，而且列入国标GB1094-79。例如OSFPSL-120000/220型自耦变压器其低压绕组容量为60000kVA；对330kV级，500kV级多选择为额定容量的 $\frac{1}{3}$ 或更低一些。例如OSFPSZ-90000/330型自耦变压器其低压绕组容量为30000kVA；OSSPSZ-360000/330型自耦变压器其低压绕组容量为72000kVA；ODFPSZ-120000/500型自耦变压器其低绕组容量为31500kVA。

四、自耦变压器的效益系数

为便于分析计算，令 $\left(1 - \frac{1}{K_{12}}\right) = K_{xy}$ ，“ K_{xy} ”被称作自耦变压器的效益系数。因 $K_{12} > 1$ ，所以 $K_{xy} < 1$ 。

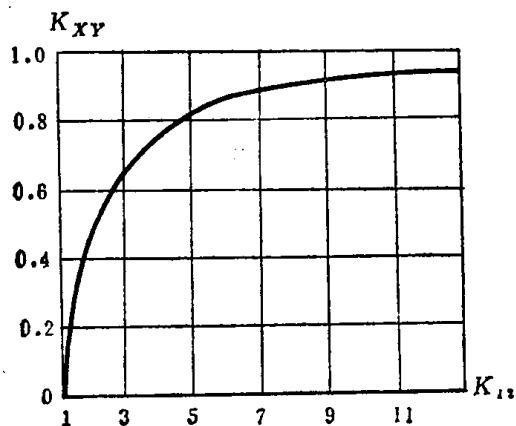


图 1-8 效益系数与变比的关系

K_{XY} 和 K_{12} 的关系曲线如图1-8所示。

根据我国电压等级的划分, 表 1-1 中列出自耦变压器变比 K_{12} 与效益系数 K_{XY} 之间的关系, 可以看出当自耦变压器所连接的高、低压电网电压相接近的情况下, 效益系数较小, 经济效益高。

当 K_{12} 达 3 ~ 4 时, 采用自耦变压器被认为还是经济的, 当变比再大, 虽然采用自耦变压器其导磁体尺寸减小, 但铜重量的减小效果并不大, 这时低压绕组和低压系统增强绝缘的费用却要增加, 综合考虑采用自耦变压器就不适宜了。

过去国内有些单位为了变压器扩容曾成功地将普通结构的双绕组变压器改造为自耦变压器运行。例如杭州供电局1972年将原 $3 \times 30\text{MVA}$, $220\text{kV}/110\text{kV}$ 三相双绕组变压器组改造成为 $3 \times 70\text{MVA}$, $220\text{kV}/110\text{kV}$ 三相自耦变压器组, 出力就提高 2.33 倍。当时这种现场改造的方法仅仅是为了应急, 但从所需人力、物力, 经济上来看并不合算。

表 1-1

K_{12}	$\frac{220\text{kV}}{110\text{kV}}$	$\frac{330\text{kV}}{110\text{kV}}$	$\frac{330\text{kV}}{220\text{kV}}$	$\frac{500\text{kV}}{220\text{kV}}$	$\frac{500\text{kV}}{330\text{kV}}$	$\frac{750\text{kV}}{330\text{kV}}$	$\frac{750\text{kV}}{500\text{kV}}$
	2	3	1.5	2.27	1.51	2.27	1.5
K_{XY}	0.5	0.667	0.334	0.56	0.338	0.56	0.334

第二节 自耦变压器的三相连接方式

电力系统中所采用的自耦变压器三个“相绕组”一般有以下几种连接方式:

一、星形连接

如图1-9所示, 设 U_1 和 U_2 分别为高压和低压侧线电压有效值, 则有

$$U_{Aa} = U_{Bb} = U_{Cc} = (U_1 - U_2) / \sqrt{3}$$

三相星形自耦变压器的“计算容量” $= 3U_{Aa}I_{Aa}$

三相星形自耦变压器的“输出容量” $= 3U_{oA}I_{Aa}$

$$\therefore K_{XY(Y形)} = \frac{3U_{Aa}I_{Aa}}{3U_{oA}I_{Aa}} = \frac{(U_1 - U_2) / \sqrt{3}}{U_1 / \sqrt{3}} = \left(1 - \frac{1}{K_{12}}\right)$$

二、三角形连接

如图1-10所示, 设 U_1 和 U_2 分别为高压和低压侧线电压的有效值, 在相量图中由于

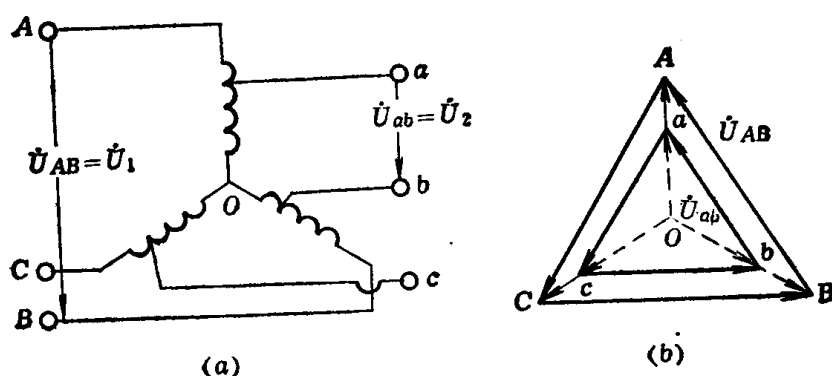


图 1-9 自耦变压器三相星形连接及其相量图
(a)连接图, (b)相量图

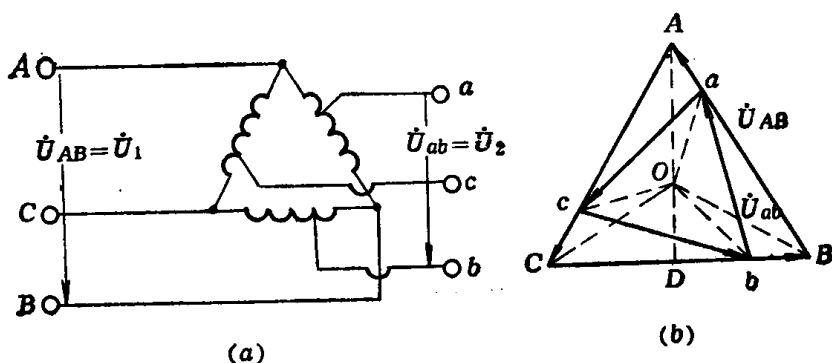


图 1-10 自耦变压器三相三角形连接及其相量图
(a)连接图; (b)相量图

$$\overline{OD} \perp \overline{BC}, \quad \therefore \overline{OD} \perp \overline{Db}, \quad \therefore \overline{OD} = \frac{1}{2} \overline{OA} \quad \text{即} \quad \overline{OD} = \frac{1}{2} U_{oA} = \frac{1}{2} U_1 / \sqrt{3}$$

$$U_{Db} = \sqrt{U_{ob}^2 - U_{oD}^2} = \sqrt{(U_2 / \sqrt{3})^2 - (U_1 / 2\sqrt{3})^2} = \sqrt{\frac{U_2^2}{3} - \frac{U_1^2}{12}}$$

$$U_{bB} = U_{DB} - U_{Db} = \frac{U_1}{2} - \sqrt{\frac{U_2^2}{3} - \frac{U_1^2}{12}}$$

$$U_{cb} = U_{cD} + U_{Db} = \frac{U_1}{2} + \sqrt{\frac{U_2^2}{3} - \frac{U_1^2}{12}}$$

假设 W_c 和 W_o 分别代表自耦变压器每相的串联绕组和公共绕组匝数。根据自耦变压器磁势平衡关系可得

$$\frac{W_c}{W_o} = \frac{U_{bB}}{U_{cb}} = \frac{I_{cb}}{I_{bB}}$$

$$\therefore \frac{I_{cb} + I_{bB}}{I_{bB}} = \frac{U_{bB} + U_{cb}}{U_{cb}}, \quad \text{即} \quad \frac{I_2}{I_{bB}} = \frac{U_1}{U_{cb}}$$

$$\text{三相三角形自耦变压器的“计算容量”} = 3U_{bB}I_{bB} = 3U_{bB} \frac{U_{cb}}{U_1} I_2 = 3 \frac{I_2}{U_1} \left[\frac{U_1^2}{4} - \frac{U_2^2}{3} + \frac{U_2^2}{12} \right] = \frac{I_2}{U_1} (U_1^2 - U_2^2)$$

三相三角形自耦变压器的“输出容量” $=\sqrt{3}U_2I_2$

$$\therefore K_{XY(\Delta形)} = \frac{(I_2/U_1)(U_1^2 - U_2^2)}{\sqrt{3}U_2I_2} = \frac{U_1^2 - U_2^2}{\sqrt{3}U_1U_2} = \frac{K_{12}^2 - 1}{\sqrt{3}K_{12}}$$

三、延边三角形连接

如图1-11所示, 设 U_1 和 U_2 分别为高压和低压侧线电压的有效值, 在相量图中 $\triangle ABC$ 与 $\triangle abc$ 有一个公共的中性点 O 。由于两个都是等边三角形, 所以 $\angle AaC = 120^\circ$ 。根据余弦定律在三角形 AaC 中

$$\overline{AC}^2 = (\overline{Cc} + \overline{ca})^2 + \overline{Aa}^2 - 2\overline{Aa}(\overline{Cc} + \overline{ca})\cos 120^\circ$$

$$\text{即 } U_1^2 = U_{oc}^2 + 2U_{oc}U_2 + U_2^2 + U_{Aa}^2 + U_{Aa}U_{oc} + U_{Aa}U_2$$

$$\therefore \overline{Cc} = \overline{Aa}$$

$$\therefore U_{oc} = U_{Aa}$$

$$\therefore U_1^2 = 3U_{Aa}^2 + 3U_{Aa}U_2 + U_2^2 \quad \text{或} \quad 3U_{Aa}^2 + 3U_2U_{Aa} + (U_2^2 - U_1^2) = 0$$

则
$$U_{Aa} = \frac{-3U_2 \pm \sqrt{9U_2^2 - 4 \times 3(U_2^2 - U_1^2)}}{2 \times 3} = \sqrt{\frac{U_1^2}{3} - \frac{U_2^2}{12}} - \frac{U_2}{2}$$

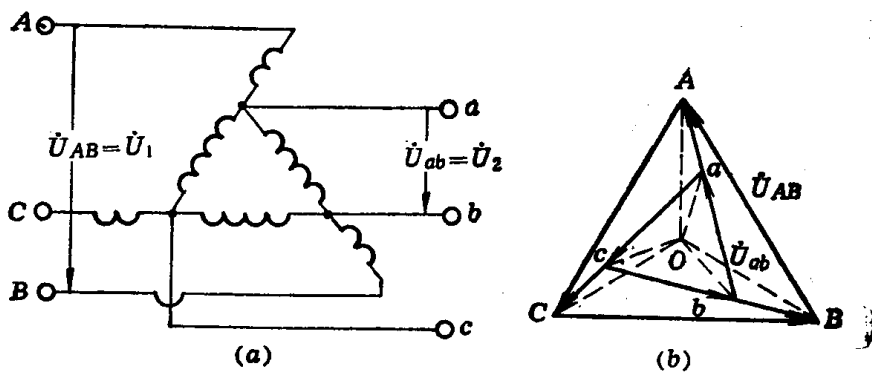


图 1-11 自耦变压器三相延边三角形连接及其相量图
(a)连接图; (b)相量图

根据自耦变压器磁势平衡关系可得

$$\frac{W_c}{W_q} = \frac{I_{ab}}{I_{Aa}}$$

$$\therefore I_{Aa} = I_1$$

$$\therefore I_{ab} = \frac{W_c}{W_q} \times I_1 = \frac{U_{Aa}}{U_2} \times I_1$$

三相延边三角形自耦变压器的“计算容量” $= 3U_{Aa}I_1$

三相延边三角形自耦变压器的“输出容量” $= \sqrt{3}U_2I_2 = \sqrt{3}U_1I_1$

$$\therefore K_{XY(\text{延边}\Delta形)} = \frac{3U_{Aa}I_1}{\sqrt{3}U_1I_1} = \sqrt{3} \left(\sqrt{\frac{U_1^2}{3} - \frac{U_2^2}{12}} - \frac{U_2}{2} \right)$$

$$= \frac{1}{2K_{12}} (\sqrt{4K_{12}^2 - 1} - \sqrt{3})$$

四、V形连接

如图1-12所示，变压器两个“相绕组”接成三相自耦接线。设 U_1 和 U_2 分别为高压和低压侧线电压，由相量图中可以看出 $U_{aA} = U_{cA} - U_{ca} = U_1 - U_2$ 。

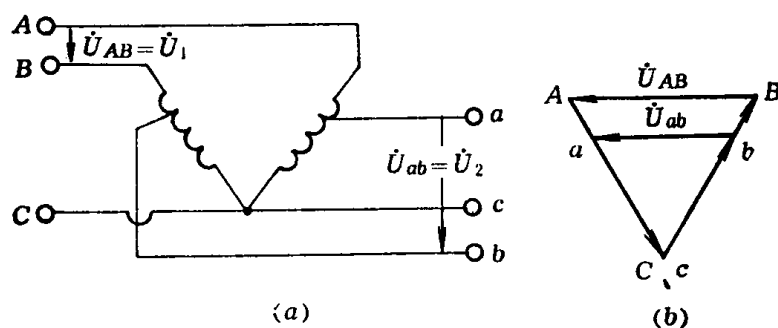


图 1-12 自耦变压器V形连接及其相量图
(a)连接图；(b)相量图

三相V形自耦变压器的“计算容量” $= 2U_{aA}I_{Aa}$

三相V形自耦变压器的“输出容量” $= \sqrt{3}U_{cA}I_{Aa}$

$$\therefore K_{XY(V)} = \frac{2U_{aA}I_{Aa}}{\sqrt{3}U_{cA}I_{Aa}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{U_1 - U_2}{U_1} = \frac{2}{\sqrt{3}} \left(1 - \frac{1}{K_{12}} \right)$$

对以上几种三相自耦变压器的连接方式进行计算和比较可以得出，在相同变比 K_{12} 的情况下以三相星形连接方式的效益系数 $K_{XY(Y)}$ 为最小，也就是在相同变比，相同输出容量下三相星形自耦连接的“计算容量”最小，最为经济。而且这种连接方式其高压和低压具有共同中性点便于引出直接接地，因此适用于高压、超高压系统。为了防止自耦变压器绕组产生过电压，要求星形连接的中性点直接接地。所以目前国内外电力系统中有自耦连接的三相自耦变压器主绕组都是星形接法，其它连接方式极少采用。

五、三绕组自耦变压器的连接

如图1-13所示，为满足低压负荷或电源、以及其它特殊用途的需要，电力系统中自耦变压器一般具有高、中、低三绕组的接法。三绕组自耦变压器的低压绕组也叫“第三绕组”，一般连接为三角形。对于升压自耦变压器它可以接入同步发电机等低压电源，对于

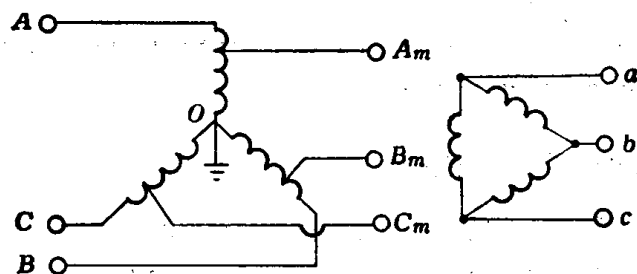


图 1-13 O-Y_o/Δ-12-11连接三相三绕组自耦变压器

降压自耦变压器它可以接入调相机、三次谐波的分流电抗器、变电所的低压用户或用电等。

三角形连接第三绕组也叫稳定绕组，它还可以提供零序电流和三次谐波电流的环流通路，以减少变压器的零序阻抗和改善各相绕组感应电势的波形。

自耦变压器设置三角形第三绕组的基本原理和普通变压器的一样，除低压负荷的需要以外，还和自耦变压器的类型，铁芯结构，星形主绕组中性点接地方式有关。对单相普通变压器组成的三相变压器组，壳式和三相五柱式三相普通变压器不设置三角形第三绕组时，若星形主绕组中性点不接地，由于三次谐波激磁电流没有回路，各相感应电势发生畸变，三次谐波相电势其幅值可达基波幅值的40~60%，这会引起严重的中性点位移；若星形主绕组中性点直接接地，则三次谐波激磁电流可以流通，影响通讯线路，当输电线路发生单相接地故障时会对附近架空通讯线路产生干扰；若星形主绕组中性点直接接地而电源不接地时，即使输电线路和地之间电容非常小，三次谐波电路也存在，三次谐波激磁电流通过变压器绕组，大地和线对地间电容形成回路，有可能和输电线的三次谐波零序容抗形成串联谐振，产生危险的过电压。

1959年AIEE杂志上由考哥贝尔 (B.A.Cogbill) 发表了“全部星形接线变压器中是否需要稳定绕组”的论文，从理论上分析了在三相三芯柱式Y/Y连接的普通变压器或自耦变压器中可以不设置三角形稳定绕组的问题，并且已有多台所谓全星形三相三芯柱式普通变压器和自耦变压器投入运行。以后国外大容量三相三芯柱式全星形变压器有了很大发展。

我国1967年常州变电所首先安装和投运了由沈阳变压器厂生产的220/121/38.5kV, 90000kVA全星形自耦变压器，并进行了大量试验研究，以后全国各大电力系统也相继采用。并将O-Y₀-12和O-Y₀/Y₀-12-12连接组列入我国《电力变压器国家标准》GB1094-71 (现修改为GB1094-79)。

图1-14示出O-Y₀/Y₀-12-12连接组全星形三相自耦变压器。这里举例说明，在某些情况下由于电力系统运行上的需要有时也必须采用全星形连接的自耦变压器。

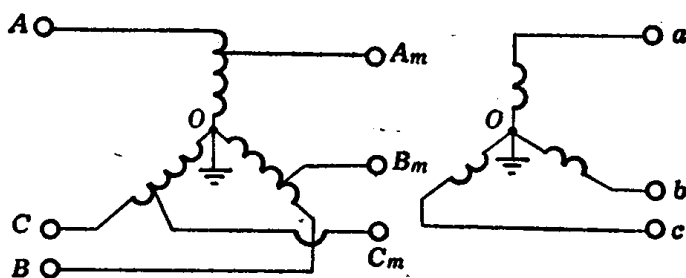


图 1-14 O-Y₀/Y₀-12-12连接三相三绕组自耦变压器

图1-15表示某变电所扩建以后的一个主结线。原有110kV电力系统1号主变压器结线方式为Y₀/Y/Δ-12-11连接组普通三绕组变压器，中压35kV侧为星形连接，若扩建的220kV 2号主变压器经过技术经济比较，选用自耦变压器O-Y₀/Δ-12-11连接组，其