

电机拖动 28讲

吉林大学

通信工程学院自动控制教研室

试验确定绕组极性

先标出原、副绕组的假定同极性的出线标号A、a和X、x，把X和x用导线连接，在原边加一较低的便于测量的交流电压，分别测量

$$U_{AX}、U_{Aa}$$

和 U_{ax} ，如果 $U_{Aa}=U_{AX}-U_{ax}$ ，则说明假定标号

A、

a是同极性，即为同名端；如果

$$U_{Aa}=U_{AX}+U_{ax},$$

则说明假定标号A、a是异名端，假定标号不正

确，将原绕组或副绕组的出线端标号互换即

可。

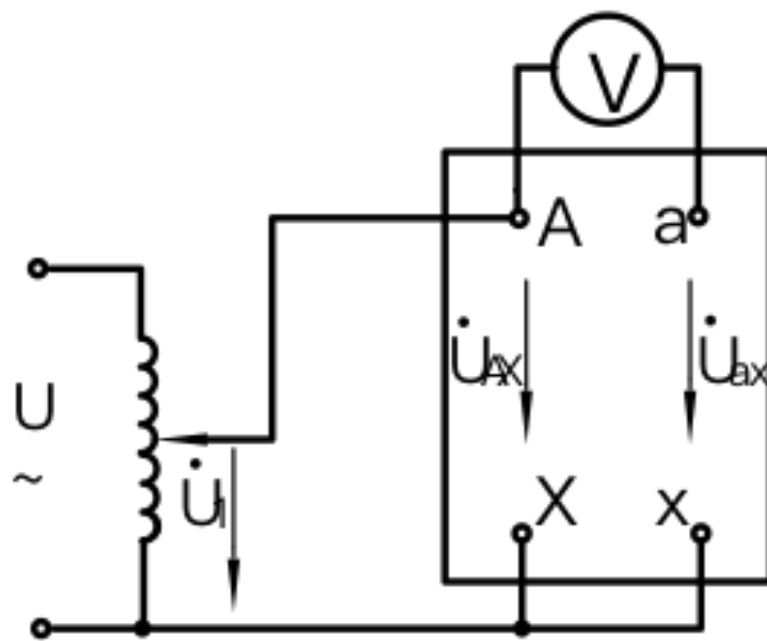


图4-30 变压器相性的测定

试验确定绕组极性

对于三相变压器的每一相原、副绕组之间的极性，与上述单相变压器的测法相同。而三相心式变压器原边各相绕组之间的极性，也可用交流法试验测定。

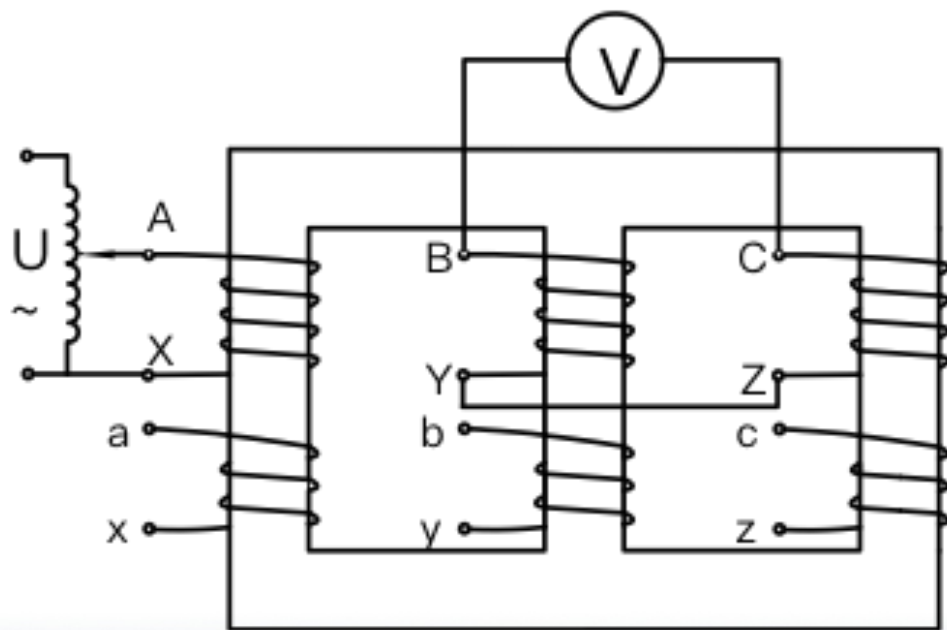


图4-31 三相心式变压器原边各相间极性的测定

试验确定三变压器联结组别

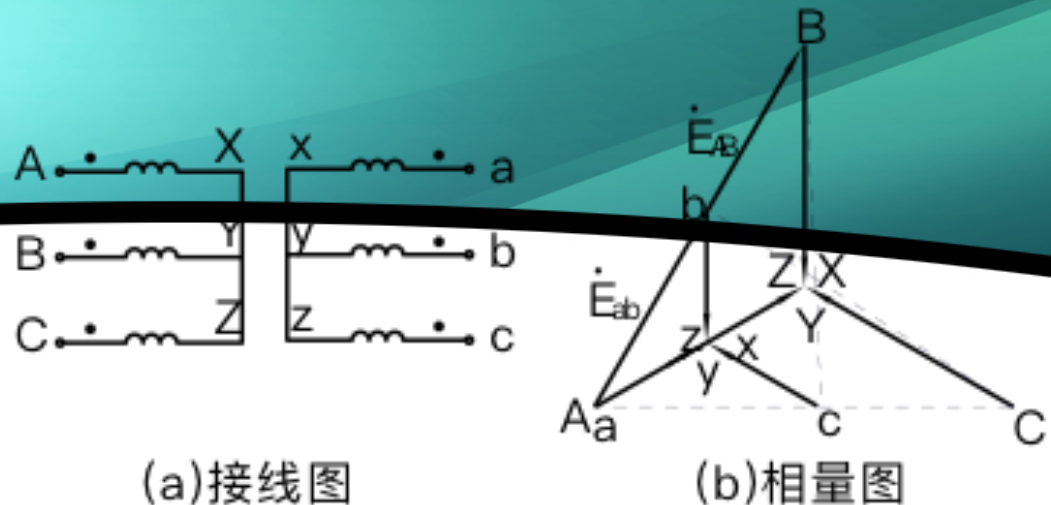


图4-32 Yy0试验接线图和相量图

根据相量图上的几何图形可推导出以下公式：

$$U_{Bb} = U_{AB} - U_{ab} = KU_{ab} - U_{ab} = U_{ab}(K - 1)$$

$$U_{Bc} = U_{Cb} = \sqrt{U_{AB}^2 + U_{ab}^2 - 2U_{AB}U_{ab}\cos 60^\circ} = U_{ab}\sqrt{K^2 + 1 - K}$$

式中 $K=U_{AB}/U_{ab}$ 为变压器的线电压之比。

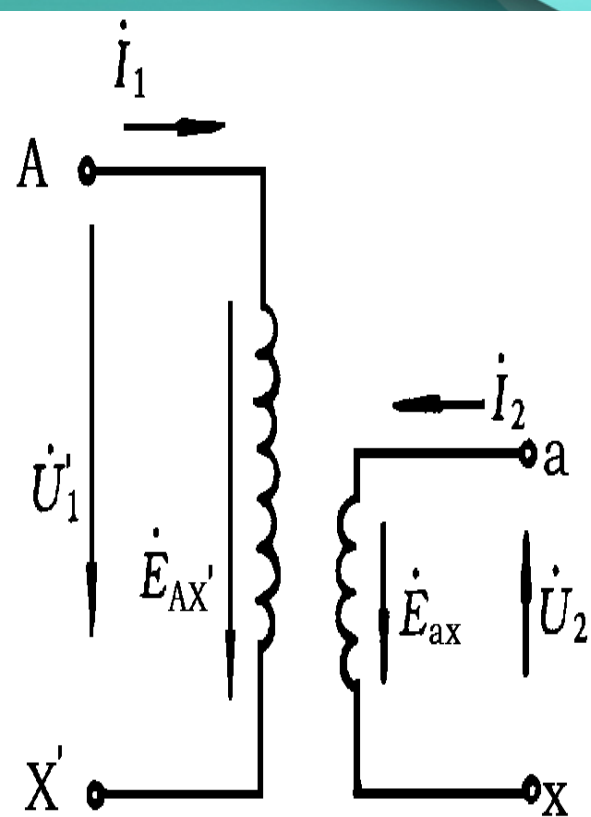
由上两公式计算所得的电压值与试验测得的电压值比较，相符，则说明是Yy0联结组别。

其他变压器

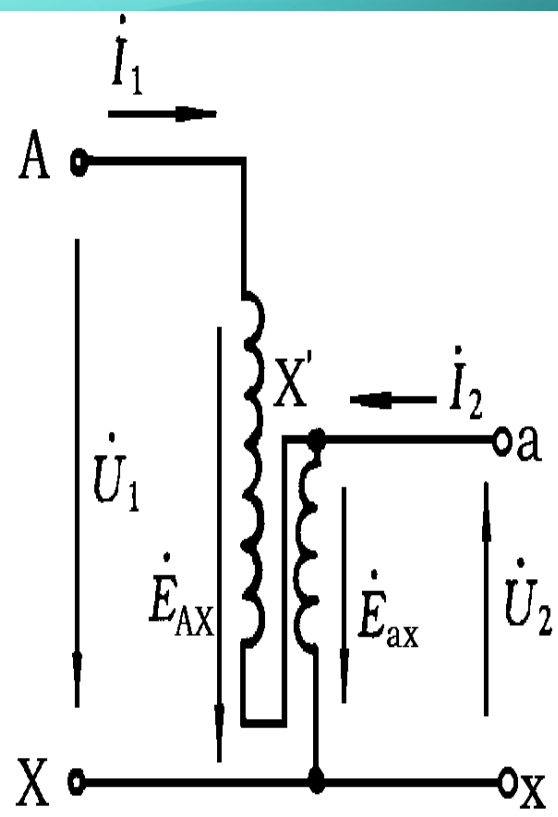
自耦变压器

一、定义：

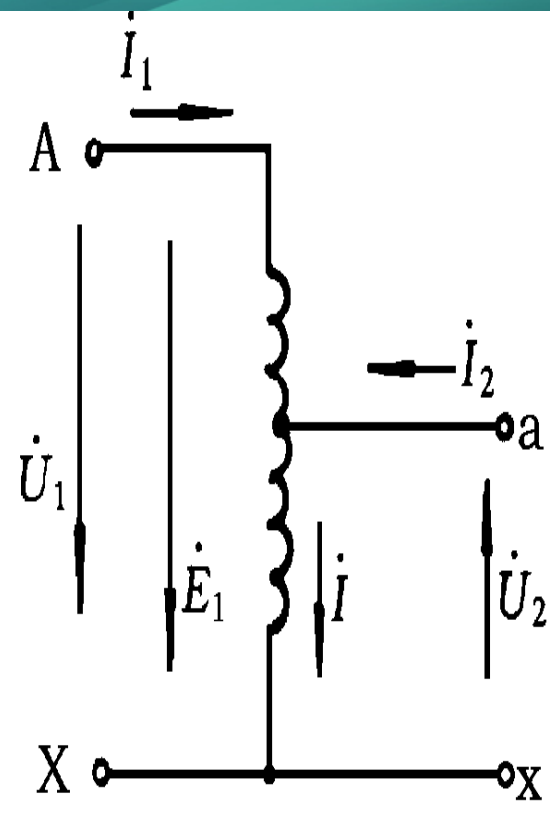
自耦变压器：把普通双绕组变压器的高压绕组和低压绕组串联连接,便构成一台自耦变压器，如图所示。正方向规定与双绕组变压器相同。



(a)



(b)



(c)

电流关系和电压关系：

如图所示，在分析时我们可忽略自耦变压器的漏磁通和绕组电阻，这样我们可以得到以下等式：

$$\frac{U_{1N}}{U_{2N}} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{E_1}{E_2} = k_A$$

k_A ：自耦变压器的变比。

负载时磁动势平衡关系为：

$$I_1(N_1 - N_2) + I_2 N_2 = I_0 N_1$$

若忽略励磁电流，则有：

$$I_1(N_1 - N_2) + IN_2 = 0$$

A点电流关系为：

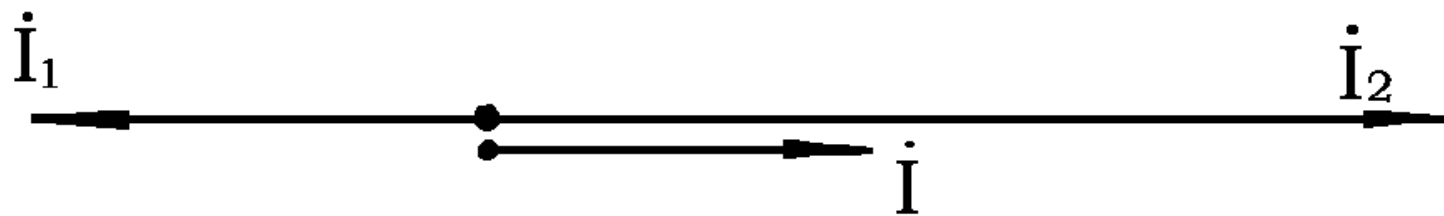
$$I_1 + I_2 = I$$

带入上式，可得：

$$I_1 N_1 - I_1 N_2 + I_1 N_2 + I_2 N_2 = 0$$

$$I_1 N_1 + I_2 N_2 = 0$$

$$I_1 = -\frac{N_2}{N_1} i_2 = -\frac{i_2}{k_A}$$



自耦变压器

对于节点a'利用基尔霍夫电流定律，可得公共绕组a'x中的电流*I*为

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = -\frac{\dot{I}_2}{k_A} + \dot{I}_2 = \left(1 - \frac{1}{k_A}\right) \dot{I}_2$$

当忽略 \dot{I}_0 时， \dot{I}_1 与 \dot{I}_2 反相，在 $k_A > 1$ 时，则有 $\dot{I}_2 > \dot{I}_1$ ，在节点a'上的电流有效值为 $I = I_2 - I_1$ 。

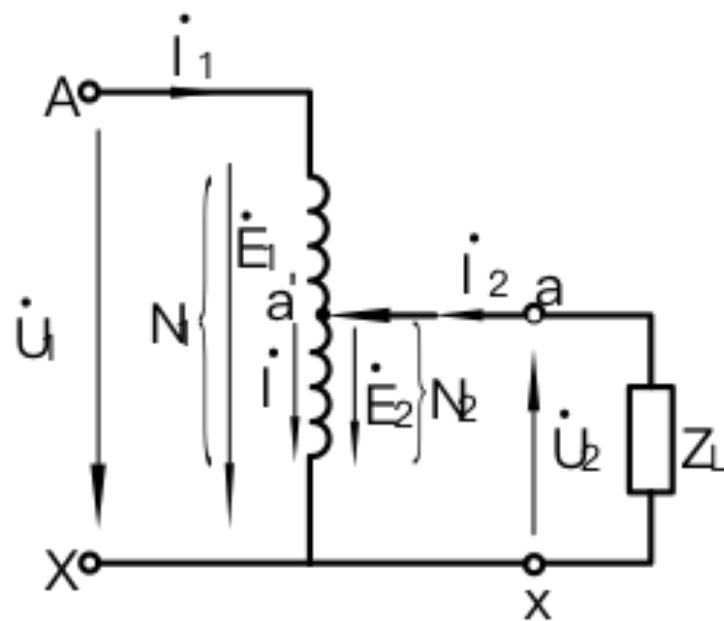


图4-33 自耦变压器接线图

自耦变压器

容量关系

自耦变压器中存在变压器容量和绕组容量这两个容量。

变压器容量是指原边输入容量或副边输出容量，又称通过容量，数值上等于额定电压与额定电流的乘积。绕组容量是指该绕组的电压与电流的乘积，又称电磁容量。

自耦变压器

对于双绕组变压器，功率是全部通过原、副绕组的电磁耦合从原边传送到副边，即有：

$$S_N = U_N I_{N1} = U_N I_{N2}$$

变压器的绕组容量就等于原绕组容量或副绕组容量，也就是铭牌上标注的变压器容量。但是自耦变压器的变压器容量与绕组容量却不相等。

自耦变压器

自耦变压器的额定变压器容量为

$$S_N = U_{1N} I_{1N} = U_{2N} I_{2N}$$

Aa串联绕组的绕组容量为

$$S_{Aa} = U_{Aa} I_{1N} = \frac{N_1 - N_2}{N_1} U_{1N} I_{1N} = \left(1 - \frac{1}{k_A}\right) S_N$$

ax公共绕组的绕组容量为

$$S_{ax} = U_{ax} I_N = U_{2N} I_{2N} \left(1 - \frac{1}{k_A}\right) = \left(1 - \frac{1}{k_A}\right) S_N$$

自耦变压器

结论:

额定运行时串联绕组与公共绕组的绕组容量相等，均为自耦变压器容量的 $(1-1/k_A)$ 倍。

自耦变压器的输入容量为

$$S = U_1 I_1 = (U_{Aa} + U_{ax}) I_1 = U_{Aa} I_1 + U_{ax} I_1 = S_{ex} + S_{tr}$$

式中 S_{em} 为电磁容量； S_{tr} 为传导容量，说明输入容量

中一部分是电磁容量，是通过电磁感应作用传到副边的；另一部分是传导容量，它是由 I_1 直接传到副边的，它不需要增加绕组容量。

自耦变压器

结论:

自耦变压器的变压器容量大于绕组容量，和同容量的普通双绕组变压器比，耗材少，体积小，成本低，效率高。

变比 k_A 越接近1， $(1-1/k_A)$ 越小，绕组容量越小于

变压器容量，自耦变压器优点越突出，故一般变比在1.5~2之间。

主要优缺点：

优点： 由于自耦变压器的绕组容量小于额定容量，当额定容量相同时，自耦变压器与双绕组变压器相比，其单位容量所消耗的材料少、变压器的体积小、造价低，而且铜耗和铁耗也小，因而效率高。这就是自耦变压器的主要优点。

缺点： 由于自耦变压器原、副绕组之间有直接电的联系，为了防止因高压边单相接地故障而引起低压边的过电压，用在电力系统中的三相自耦变压器中性点必须可靠接地。同样，由于原、副绕组之间有直接电的联系，当高压边遭受过电压时，会引起低压边严重过电压，为避免这种危险，需要在原、副边都装设避雷器。

电压互感器和电流互感器

电压互感器和电流互感器又称仪用互感器，是电力系统中使用的测量设备，其工作原理与变压器基本相同。使用互感器的目的是：**1. 与小量程的标准化电压表和电流表配合测量高电压、大电流；**2. 使测量回路与被测回路隔离，以保障工作人员和测试设备的安全；3. 为各类继电保护和控制系统提供控制信号。

电压互感器

原绕组并联在被测的高压线路上，副绕组与电压表、功率表的电压线圈等构成闭合回路。由于副边所接的电压表等负载的阻抗很大，副边电流很小，电压互感器实际上相当于一台空载运行的双绕组降压变压器。

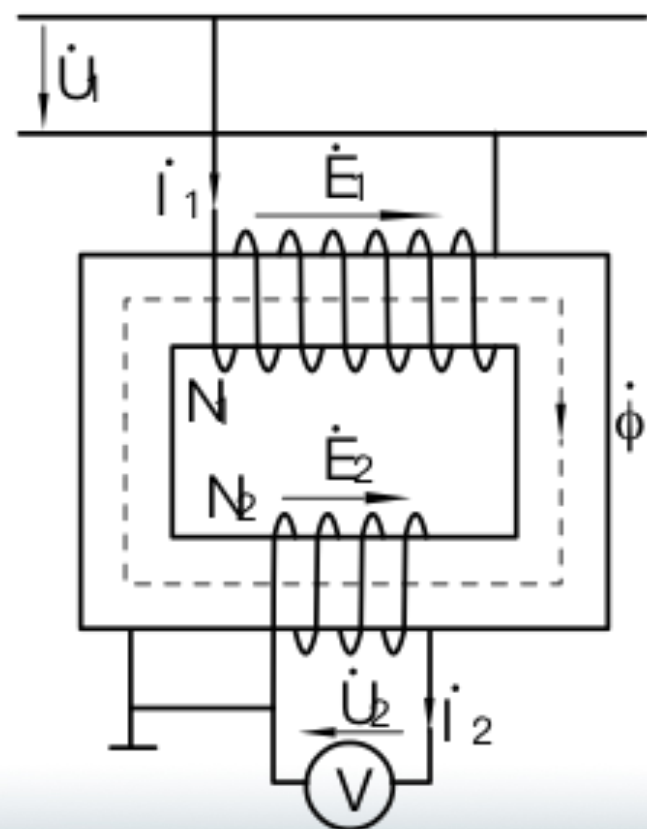


图4-34 电压互感器接线图

电压互感器

为了减少测量误差，设计时应尽量减小短路阻抗和励磁电流，当忽略漏阻抗压降时有：

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = k_u$$

式中 k_u 为电压互感器的变压比。

一般与电压互感器相配的电压表，已考虑变比的折算，所以从电压表上可直接读出实际的电压值。

电压互感器

但实际上很明显，电压互感器存在着误差，这个误差包括变比误差和相位误差。(例如阻抗压降虽很小但还是存在，会产生一定的误差，所以电压互感器常用精度等级有：0.2、0.5、1.0、3.0。)

电压互感器在使用时应注意：

- ①副边决不允许短路，否则会产生很大的短路电流，烧坏电压互感器；
- ②为确保工作人员安全，电压互感器的副绕组以及铁心应可靠接地；
- ③为确保测量精度，电压互感器的副边不宜并接过多的负载（副方接入的阻抗不得小于规定值）。

电流互感器

电流互感器(Current Transformer)作用是将电路中流过的大电流变换成小电流(额定值为5A或1A)供电给测量仪表和继电器的电流线圈。

电流互感器

原绕组串在被测的高压线路中，副绕组与电流表、功率表的电流线圈等构成闭合回路。由于原绕组匝数为一匝或几匝，副绕组匝数很多，而副边所接的电流表等负载的阻抗很小，电流互感器实际上相当于一台处于短路状态升压变压器。

升压变压器

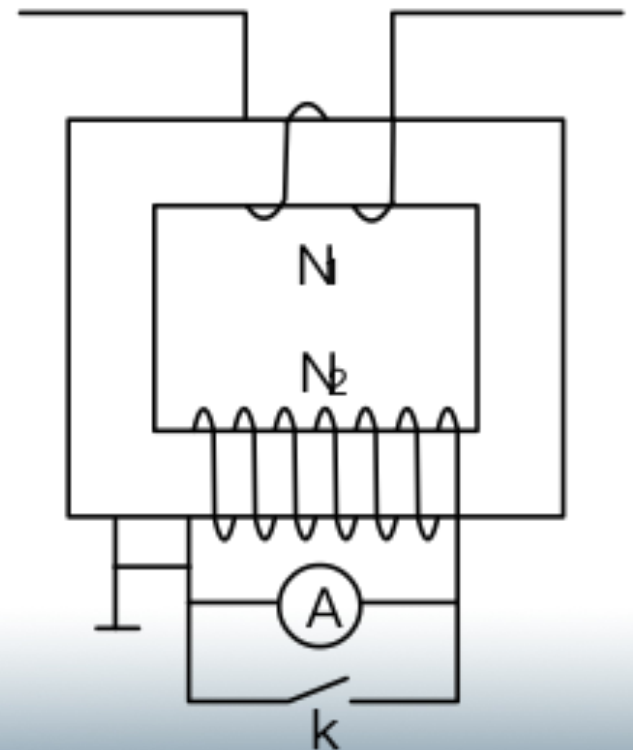


图4-35 电流互感器接线图

电流互感器

为了减少测量误差，设计时应尽量减小励磁电流。电流互感器磁势平衡关系为

$$\dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2 = \dot{I}_0 N_1$$

当忽略励磁电流时，则有：

$$\dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2 = 0 \text{ 或 } \dot{I}_1 = -\frac{N_2}{N_1} \dot{I}_2 = -k_i \dot{I}_2$$

式中 $k_i=N_2/N_1$ ，是电流互感器的变流比。

电流互感器

实际应用中，励磁电流虽小但还是存在，会产生一定的误差，所以电流互感器常用精度等级有：0.2、0.5、1.0、3.0和10。

电流互感器

电流互感器在使用时应注意：

- ①副边决不允许开路，否则， $I_2=0$ 时，被测线路中的大电流 I_1 全部成为励磁电流，使铁心严重过热，副边感应高电压，损坏电流互感器，并危及人员和其他设备安全；
- ②为确保工作人员安全，电压互感器的副绕组以及铁心应可靠接地；
- ③为确保测量精度，电流互感器的副边所接负载阻抗不应超过允许值。

变压器并联运行

变压器的并联运行是指将两台或两台以上的变压器的原、副绕组同一标号的出线端连在一起接到母线上的运行方式，如图4-36所示。

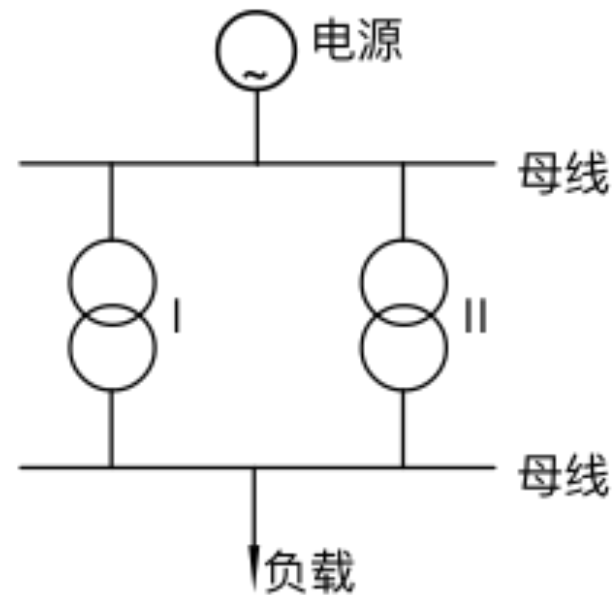


图4-36 两台变压器并联运行接线图

变压器并联运行

变压器并联运行的优点是：

供电可靠性高，检修方便，变压器利用率高，并能改善供电系统的功率因数，减少变压器的备用量。所以变压器并联运行方式技术合理且经济，但变压器并联运行的台数不能过多，否则反而不经济。

变压器并联运行

变压器理想并联运行的情况是：

空载时，每台变压器副边之间没有环流；负载时，每台变压器分担的负载电流与其容量成正比，各负载电流与总负载电流同相位，使总负载电流一定情况下，各负载电流为最小。

变压器并联运行

为了达到理想并联情况，并联运行的变压器必须满足：

- ①原、副边的额定电压相同，即变比相等；
- ②联结组别相同；
- ③短路阻抗标幺值相等。

变压器并联运行

实际上，满足①、②条件，可使变压器之间无环流，满足③条件，可使变压器所带负载按额定容量合理分配。变压器并联运行时，条件②是必须满足的，而条件①、③允许稍有一定误差。

变压器并联运行

1.变比不等时的变压器并联运行

以其它两条件满足但变比不等的两台变压器并联运行为例,如图4-37所示。

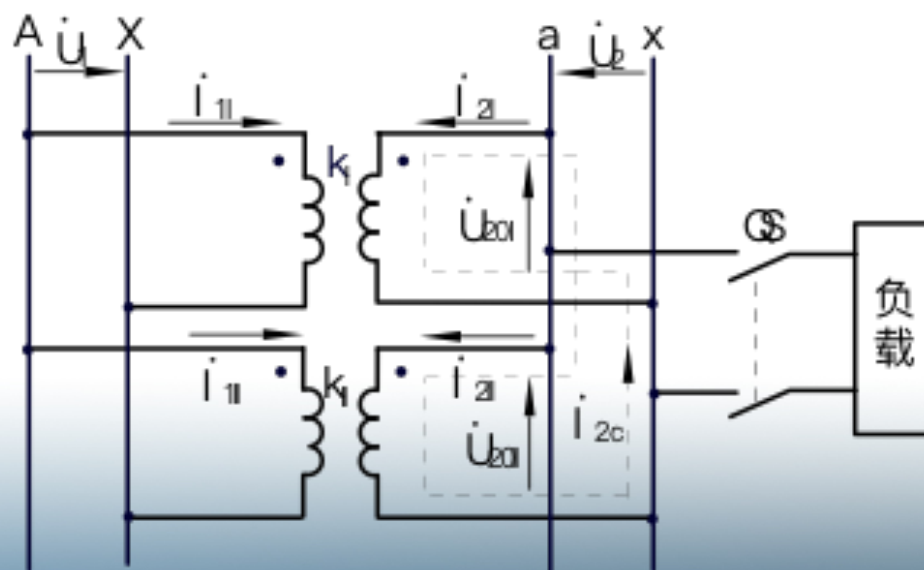


图4-37 变压器变比不等时并联运行接线图

变压器并联运行

设第一台的变比为 k_I ，第二台变比为 k_{II} ，且 $k_I > k_{II}$ ，忽略励磁电流。由于两台变压器原边同接一电源，变比不等，副边空载电压必不相等，分别为： $\dot{U}_{20I} = \dot{U}_1 / k_I$ ， $\dot{U}_{20II} = \dot{U}_1 / k_{II}$ ， $\dot{U}_{20I} < \dot{U}_{20II}$ ，说明副边空载时就已有环流，其大小为

$$\dot{I}_{2c} = \frac{\dot{U}_{20II} - \dot{U}_{20I}}{Z_{kI} + Z_{kII}}$$

式中 z_{kI} 、 z_{kII} 分别为折算到副边两台变压器短路阻抗

变压器并联运行

由于短路阻抗值很小，即使变比相差很小，也会产生较大的环流，从而造成变压器损耗增大，输出容量减小，使变压器实际分担负载电流不合理。所以应把环流限制在一定范围内，一般要求环流不超过额定电流的10%，则变比之差不超过1%。

变压器并联运行

2. 联结组别不同的变压器并联运行

以两台联结组别分别为Yy0和Yd11的变压器为例，他们并联运行时副边电压相量图如图4-38所示，副边线电动势相等，但相位互差 30°

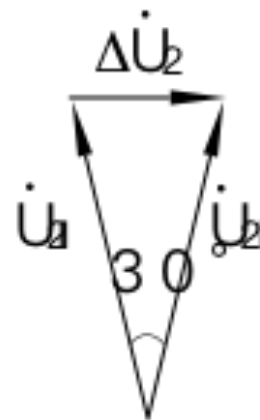


图3-38 Yy0和Yd11两台变压器并联运行时副边电压相量图

变压器并联运行

相位互差 30° ，使副边回路存在电压差为

$$\Delta U_2 = 2U_2 \sin 15^\circ = 0.518U_2 \text{ 或 } \Delta U_2^* = 0.518$$

由于短路阻抗很小，假设 $z_{kI}^* = z_{kII}^* = 0.05$ ，在副边产生的环流为

$$I_c^* = \frac{\Delta U_2^*}{z_{kI}^* + z_{kII}^*} = \frac{0.518}{2 \times 0.05} = 5.18 \text{ 或 } I_c = 5.18I_{2N}$$

环流是额定电流好几倍，非常大，决不允许的，所以变压器并联运行时，联结组别一定要相同。

变压器并联运行

3. 短路阻抗标么值不等时的并联运行

如图4-39所示两台短路阻抗标么值不等的

变压器 $U_{ab} = I_{1I} Z_{kI} = I_{1II} Z_{kII}$

并联运行，从图中可见：

$$I_{1I}^* Z_{kI}^* = I_{1II}^* Z_{kII}^* \text{ 或 } \frac{I_{1I}^*}{I_{1II}^*} = \frac{Z_{kII}^*}{Z_{kI}^*}$$

用标么值表示为

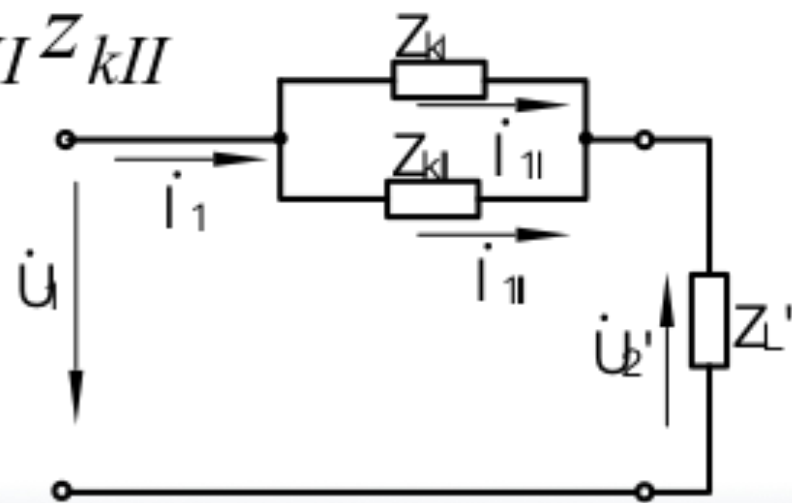


图4-39 短路阻抗标么值不等的变压器并联运行等效电路

变压器并联运行*

说明：

各变压器负载电流标么值与短路阻抗标么值成反比，为使各变压器的负担合理，应根据变压器容量来分担负载，即 $I_{I1}^*=I_{I2}^*$ 时，要求各台变压器的阻抗标么值相等。为了使各变压器负担的负载电流与理想分配相差不至于太远，规定并联运行的各变压器的短路阻抗标么值相差不应大于10%。

【实例1】

在选择变压器时，有两台电力变压器I号和II号可供选择。这两台变压器额定容量均为100kVA，最大效率也均为97%。在负载功率因数为1时，I号变压器在负载系数为0.9时有最大效率；II号变压器在负载满载时有最大效率。现实际负载情况：空载运行10小时；功率因数为1时满载运行8小时；功率因数为0.8（滞后）过载10%运行6小时，试选择变压器。

【实例1】

解：当不变损耗等于可变损耗时，变压器效率为最高，则有：

$$\eta_{\max} = \frac{\beta_m S_N \cos \varphi_2}{\beta_m S_N \cos \varphi_2 + 2p_0}$$

对于I号变压器： $S_N=100\text{kVA}$ ， $\beta_m=0.9$ ，
 $\eta_{\max}=0.97$ ， $\cos \varphi_2=1$ ，则由上式可得：

$$p_0 = \frac{1}{2} \frac{1 - \eta_{\max}}{\eta_{\max}} \beta_m S_N \cos \varphi_2 = 1392\text{W}$$

【实例1】

又因为不变损耗等于可变损耗，则有：

$$P_{Cu} = \frac{P_0}{\beta_m^2} = \frac{1392}{0.9^2} = 1719W$$

对于II号变压器：SN=100kVA， $\beta_m=1.0$ ，

$h_{max}=0.97$ ， $\cos\varphi_2=1$ ，则由上式可得：

$$P_0 = \frac{1}{2} \frac{1-\eta_{max}}{\eta_{max}} \beta_m S_N \cos\varphi_2 = 1546W$$

$$P_{Cu} = \frac{P_0}{\beta_m^2} = \frac{1546}{1.0^2} = 1546W$$

【实例1】

投入运行后变压器总损耗为：

$$\sum p = p_0 \times 24h + p_{Cu} \times 8h + 1.1^2 \times p_{Cu} \times 0.8 \times 6h$$

I号变压器的损耗为：

$$\begin{aligned} \sum p &= 1392W \times 24h + 1719W \times 8h \\ &+ 1.1^2 \times 1719W \times 0.8 \times 6h = 57.14kW \cdot h \end{aligned}$$

II号变压器的损耗为：

$$\sum p = (24h + 8h + 1.1^2 \times 0.8 \times 6h) \times 1546 = 58.45kW \cdot h$$

【实例

1) 从上面的计算可得出I号变压器的损耗比II号变压器的损耗小，所以应选择I号变压器。

【实例1】

[点评]：电力变压器的额定容量是指在设计标准规定的环境温度下（最高气温 40°C ，年平均气温 20°C ）和使用年限（一般20年）内，所能连续输出的最大视在功率（kVA）。但在实际运行中，由于负荷在不断变化，且我国绝大多数地区的环境温度低于设计标准所规定的环境温度，因而变压器具有一定的过载潜力。在选择变压器容量时，应充分利用这种潜力。

本章小结

本章主要介绍了变压器基本工作原理和运行特性；三相变压器的联结组别和并联运行问题；自耦变压器、仪用互感器的结构和特点等。

本章小结

变压器是利用电磁感应原理将某一电压等级的电能转换成相同频率的另一电压等级的电能的静止电器，在变换电压的同时，还能变换电流。在变压器中不仅有电路问题，还有磁路问题，所以它的基本工作原理是建立在电磁感应和磁动势平衡关系上的。

本章小结

基本方程式、等效电路、相量图是描述变压器内部电磁关系的工具，有关变压器的基本理论也可推广应用于交流电机中。

本章小结

通过空载和短路试验，可求得变压器励磁和短路等参数。变压器的电压调整率是表征负载运行时的副边电压稳定性和供电质量，效率特性表征负载运行时的经济性。

本章小结

表示三相变压器原、副边线电动势的相位关系是联结组别，若已知接线图，可根据接线图画出相量图，从而判断出联结组别；若已知联结组别，可根据组别画出相量图，从而画出接线图。变压器的极性和联结组别也可通过试验确定。

本章小结

变压器的并联运行应满足变比相等、联结组别相同和短路阻抗标幺值相等的条件，其中条件2必须满足，其他条件允许稍有一定误差。

本章小结

自耦变压器和仪用互感器的基本工作原理与普通双绕组变压器相同，但自耦变压器除通过电磁感应传递能量外，还能从原边直接向副边传导能量，所以在相同容量情况下，它比普通双绕组变压器耗材少，体积小，效率高。

本章小结

使用互感器的目的是使测量回路与高压线路隔离，便于测量，同时也是为了操作人员和设备的安全，互感器的使用注意事项是确保互感器正常工作的前提。

