



电机与拖动**课件**之四

变 压 器

胡梦月、韩谷静

纺大电子电气



章节目录

3.1 变压器的基本工作原理和结构

3.2 单相变压器的空载运行

3.3 单相变压器的负载运行

3.4 变压器的参数测定

3.5 标么值

3.6 变压器的运行特性

3.7 三相变压器

3.8 变压器的并联特性

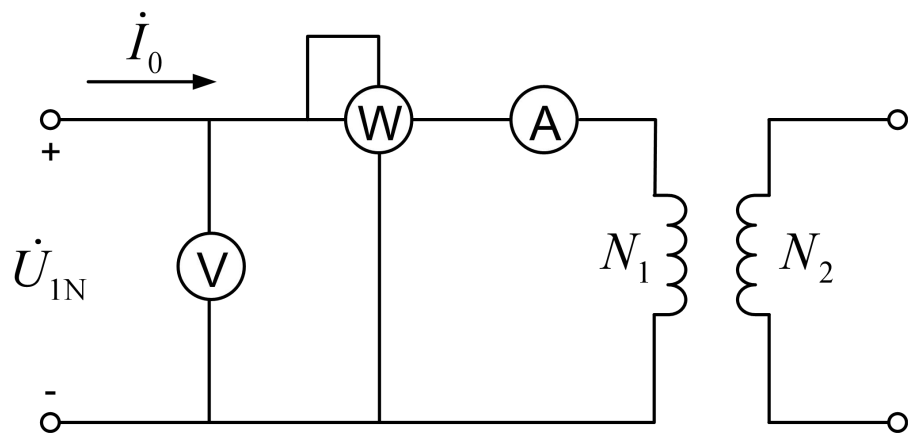
3.9 特种变压器

在使用基本方程式、等值电路或相量图分析变压器的运行情况时，首先要知道变压器的基本参数 Z_1 , Z_2 , Z_m , 这些参数需通过空载实验和短路实验来测定。

一、实验目的

变压器空载，测定变比 K ，空载电流 I_0 ，铁损耗 P_{Fe} ，计算励磁阻抗 Z_m 。

二、接线图



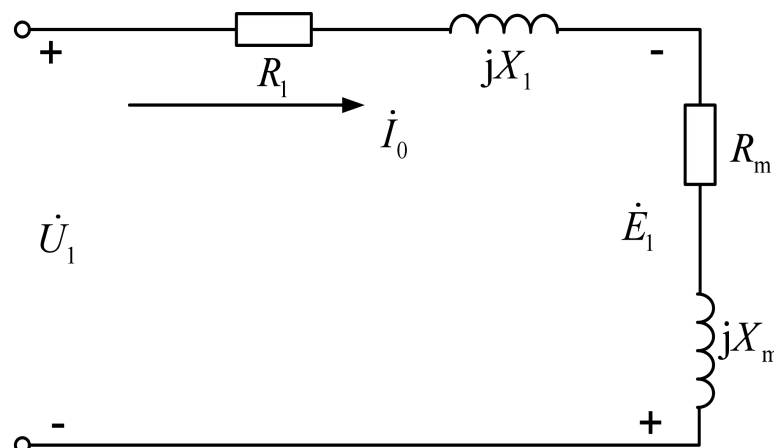
空载试验接线图（单相）

三、实验步骤

- 1、低压侧加电压，高压侧开路；
- 2、电压 U_1 在 $0 \sim 1.2U_N$ 范围内单方向调节，测出 U_{20} , I_0 和 P_0 ，画出 $P_0 = f(U_1)$ 和 $I_0 = f(U_1)$ 曲线；
- 3、忽略 R_1 和 X_1 ，即 $P_0 \approx p_{Fe}$



三、实验步骤



空载等值电路

➤ 空载试验也可以在二次侧进行，即二次绕组上接额定电压，一次绕组开路。若最终要得到一次侧的电量，则需要根据二次侧测量及计算值向一次侧折算，为了便于测试和安全原因，通常在**低压绕组侧**做空载试验。

4、求出参数

因为 $Z_0 = Z_1 + Z_m = (R_1 + jX_1) + (R_m + jX_m) \approx Z_m$ ($R_m \gg R_1, X_m \gg X_1$)

所以空载阻抗 $Z_0 = Z_m = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_0}$

输入功率 P_1 ，空载损耗 P_0 $P_1 = P_0 = P_{\text{Cul}} + P_{\text{Fe}} = R_1 I_0^2 + R_m I_0^2 \approx R_m I_0^2 = P_{\text{Fe}}$ ($R_m \gg R_1$)

根据测量数据 U_{1N} ， U_{20} ， I_0 和 P_0 ，可计算变比和励磁阻抗

$$K = \frac{U_{1N}}{U_{20}}, \quad Z_m = \frac{U_{1N}}{I_0}, \quad R_m = \frac{P_0}{I_0^2}, \quad X_m = \sqrt{Z_m^2 - R_m^2}$$



例 一台三相变压器, $S_N=100\text{kV}\cdot\text{A}$, $U_{1N}/U_{2N}=6/0.4\text{kV}$, YY_0 接法, $I_{1N}/I_{2N}=9.63/144\text{A}$, 在低压侧做空载试验, $P_0=600\text{W}$, $I_{20}=9.37\text{A}$, 求变压器的励磁阻抗。

解: 计算一相的数据, 由Y联结, 有:

$$U_1 = \frac{U_{1N}}{\sqrt{3}} = \frac{6000}{\sqrt{3}} \text{V} = 3460 \text{V}$$

$$U_2 = \frac{U_{2N}}{\sqrt{3}} = \frac{400}{\sqrt{3}} \text{V} = 230 \text{V}$$

$$\text{则变比为: } K = \frac{U_1}{U_2} = \frac{3460}{230} = 15$$

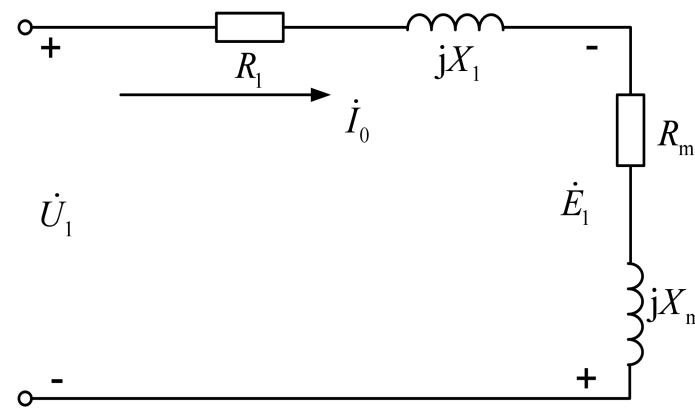
$$\text{空载损耗为: } P_0 = \frac{600}{3} \text{W} = 200 \text{W}$$

励磁阻抗为:

$$Z'_m = \frac{U_2}{I_{20}} = \frac{230}{9.37} \Omega = 24.5 \Omega,$$

$$R'_m = \frac{P_0}{I_{20}^2} = \frac{200}{9.37^2} \Omega = 2.28 \Omega$$

$$X'_m = \sqrt{(Z'_m)^2 - (R'_m)^2} = 24.4 \Omega$$



折算到高压一次侧:

$$Z_m = K^2 Z'_m = 15^2 \times 24.5 \Omega = 5512 \Omega,$$

$$R_m = K^2 R'_m = 15^2 \times 2.28 \Omega = 513 \Omega$$

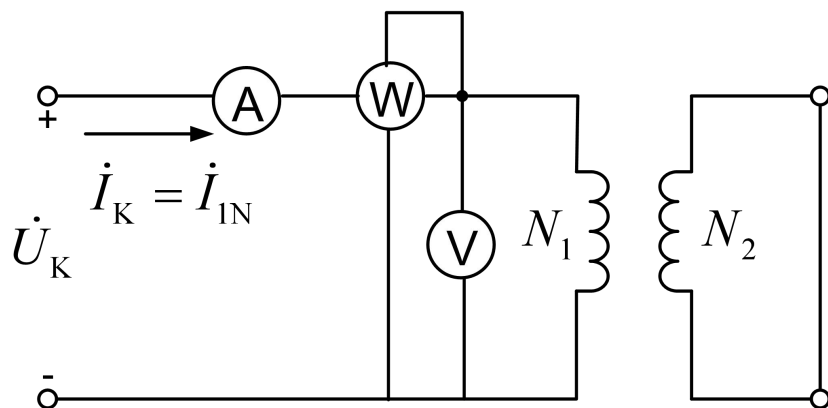
$$X_m = K^2 X'_m = 15^2 \times 24.4 \Omega = 5445 \Omega$$



一、实验目的

变压器一侧接低于其额定电压的电源，另一侧短路。以测定变压器的短路阻抗 $Z_K = R_K + jX_K$ 及短路损耗 P_{KN} （即变压器带额定负载时的铜损耗）。

二、接线图



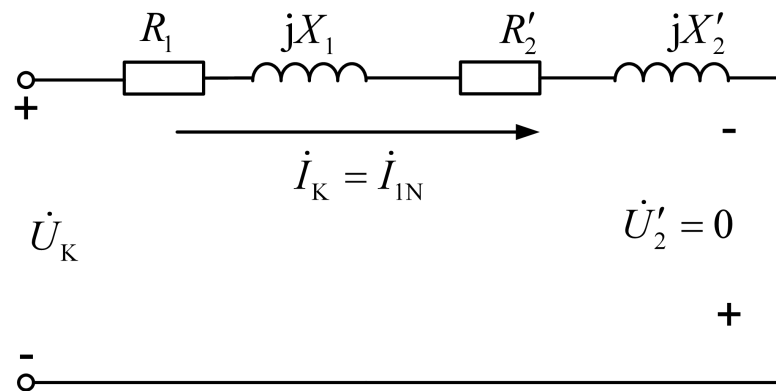
短路试验接线图（单相）

三、实验步骤

- 1、高压侧加电压，低压侧短路；
- 2、通过调节电压，让短路电流 I_S 在 $0 \sim 1.3I_N$ 范围内变化，测出对应的 U_S ， I_S 和 P_S ，画出 $P_S = f(U_S)$ 和 $I_S = f(U_S)$ 曲线；
- 3、同时记录实验室的室温；
- 4、由于外加电压很小，主磁通很少，铁损耗很少，忽略铁损，认为 $P_S = p_{Cu}$ 。



三、实验步骤



短路试验简化等值电路（单相）

5、参数计算

短路电压 $U_{KN} = Z_K I_K = Z_K I_{1N}$

短路损耗 $P_{KN} = R_K I_K^2 = R_K I_{1N}^2 = P_{Cu}$

短路阻抗 $Z_K = \frac{U_K}{I_K}, \quad R_K = \frac{P_{KN}}{I_K^2}, \quad X_K = \sqrt{(Z_K)^2 - (R_K)^2}$

对T型等效电路：

$$R_1 \approx R_2' = \frac{1}{2} R_K$$

$$X_1 \approx X_2' = \frac{1}{2} X_K$$



三、实验步骤

6、温度折算：电阻应换算到基准工作温度时的数值。

$$\text{铜绕组: } R_{K75^{\circ}\text{C}} = R_K \frac{234.5 + 75}{234.5 + \theta}$$

7、若要得到低压侧参数，须折算；

$$\text{铝绕组: } R_{K75^{\circ}\text{C}} = R_K \frac{228 + 75}{228 + \theta}$$

8、对三相变压器，各公式中的电压、电流和功率均为相值；

$$\text{则 } 75^{\circ}\text{C} \text{ 时的短路阻抗为: } Z_{K75^{\circ}\text{C}} = \sqrt{R_{K75^{\circ}\text{C}}^2 + X_K^2}$$

θ 为做实验时绕组的温度

四、短路电压

➤ 短路时，当短路电流为额定值时一次所加的电压，称为短路电压，记作 $U_{SN} = Z_{S75^{\circ}\text{C}} I_{1N}$

短路电压也称为阻抗电压。



四、短路电压

短路电压百分值: $u_s \% = \frac{I_{1N} Z_{S75^{\circ}C}}{U_{1N}} \times 100\%$

短路电压电阻（有功）分量百分值:

$$u_{sa} \% = \frac{I_{1N} R_{S75^{\circ}C}}{U_{1N}} \times 100\%$$

短路电压电抗（无功）分量百分值:

$$u_{sx} \% = \frac{I_{1N} X_S}{U_{1N}} \times 100\%$$

➤ **短路电压**的大小直接反映短路阻抗的大小，而**短路阻抗**又直接影响变压器的运行性能。

➤ 从正常运行角度看，希望短路电压小些，这样可使副边电压随负载波动小些；从限制短路电流角度，希望它大些，相应的短路电流就小些。



例 一台三相变压器, $S_N=100\text{kV}\cdot\text{A}$, $U_{1N}/U_{2N}=6/0.4\text{kV}$, YY_0 接法, $I_{1N}/I_{2N}=9.63/144\text{A}$, 短路阻抗标幺值 u_K 为0.1, 试求一次绕组、二次绕组的漏阻抗 Z_1 和 Z_2

解: 计算变比 K :

$$K = \frac{U_1}{U_2} = \frac{U_{1N}/\sqrt{3}}{U_{2N}/\sqrt{3}} = \frac{U_{1N}}{U_{2N}} = \frac{6000}{400} = 15$$

$$\text{又: } u_K = U_K^* = \frac{Z_K I_{1N}}{U_1} = \frac{Z_K I_{1N}}{U_{1N}/\sqrt{3}} = 10\%$$

$$Z_K = \frac{u_K U_{1N}/\sqrt{3}}{I_{1N}} = \frac{6000 \times 0.1}{\sqrt{3} \times 9.63} \Omega = 35.5 \Omega$$

可证明 $Z_2' \approx Z_1$, 又 $Z_K = Z_1 + Z_2'$ 则:

$$Z_2 = \frac{1}{K^2} Z_2' = \frac{1}{K^2} Z_1 = \frac{Z_K}{2K^2} = \frac{1}{15^2} \times 17.75 \Omega = 0.08 \Omega$$



小结

参数测定

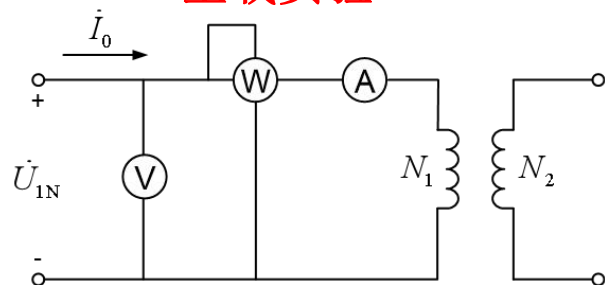
怎么接线?

在哪一侧做实验?

测什么功率损耗?

计算什么参数?

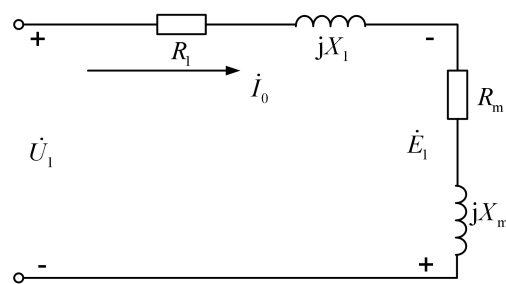
空载实验



空载试验接线图 (单相)

低压侧

铁耗



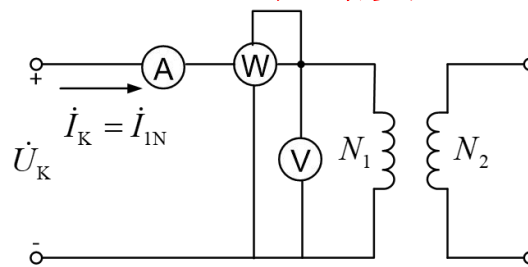
$$\text{因为 } Z_0 = Z_1 + Z_m = (R_1 + jX_1) + (R_m + jX_m) \approx Z_m$$

$$\text{所以空载阻抗 } Z_0 = Z_m = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_0}$$

$$P_1 = P_0 = P_{\text{Cul}} + P_{\text{Fe}} = R_1 I_0^2 + R_m I_0^2 \approx R_m I_0^2 = P_{\text{Fe}} \quad (R_m \gg R_1)$$

$$K = \frac{U_{1N}}{U_{20}}, \quad Z_m = \frac{U_{1N}}{I_0}, \quad R_m = \frac{P_0}{I_0^2}, \quad X_m = \sqrt{Z_m^2 - R_m^2}$$

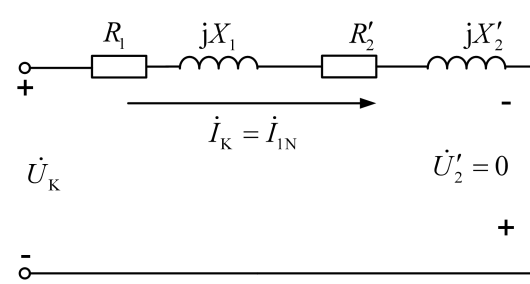
短路实验



短路试验接线图 (单相)

高压侧

铜耗



$$\text{短路电压 } U_{\text{KN}} = U_K I_K = U_K I_{1N}$$

$$R_1 \approx R'_2 = \frac{1}{2} R_K$$

$$\text{短路损耗 } P_{\text{KN}} = R_K I_K^2 = R_K I_{1N}^2 = P_{\text{Cu}}$$

$$X_1 \approx X'_2 = \frac{1}{2} X_K$$

$$\text{短路阻抗 } Z_K = \frac{U_K}{I_K}, \quad R_K = \frac{P_{\text{KN}}}{I_K^2}, \quad X_K = \sqrt{(Z_K)^2 - (R_K)^2}$$