

3. 2 单相变压器的空载运行

空载运行:一次绕组接额定电压、额定频率的交流电源,二次绕组开路的运行情况。

3. 2. 1 空载运行时的电磁关系

一、空载运行时的物理情况

1、物理情况

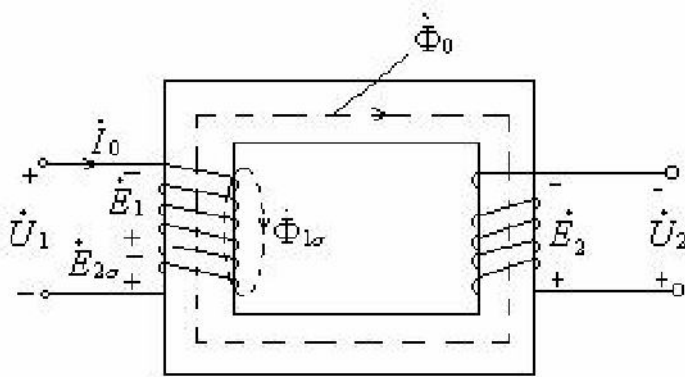
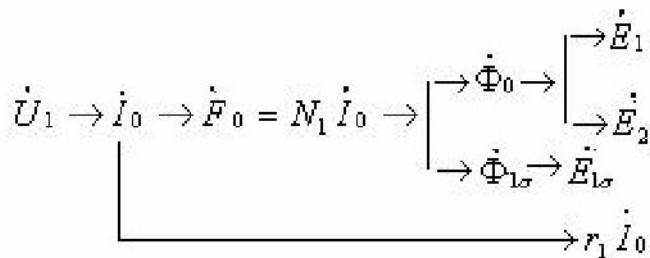


图3.1.1 变压器空载运行示意图



2、主磁通和漏磁通的差异

(1) 性质: 主磁通磁路由铁磁材料组成, 具有饱和特性, Φ_0 与 I_0 呈非线性关系; 漏磁通磁路由非铁磁材料组成, 磁路不饱和, Φ_0 与 I_0 呈线性关系。

(2) 数量: 铁心磁导率大, 磁阻小, 主磁通 (99%) 远大于漏磁通 (1%)。

(3) 作用: 主磁通在二次绕组感应电动势, 起传递能量的媒介作用; 漏磁通仅在一次绕组中感应漏磁电动势, 仅起漏抗压降的作用。

二、感应电动势分析

1、主磁通感应的电动势

设： $\Phi_0 = \Phi_m \sin \omega t$

$$\begin{aligned} e_1 &= -N_1 \frac{d\Phi_0}{dt} = -N_1 \omega \Phi_m \cos \omega t = 2\pi f N_1 \Phi_m \sin(\omega t - 90^\circ) \\ &= E_{1m} \sin(\omega t - 90^\circ) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} e_2 &= -N_2 \frac{d\Phi_0}{dt} = -N_2 \omega \Phi_m \cos \omega t = 2\pi f N_2 \Phi_m \sin(\omega t - 90^\circ) \\ &= E_{2m} \sin(\omega t - 90^\circ) \end{aligned}$$

∴ 感应电动势比磁通落后 90° 。

有效值为：

$$E_1 = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega N_1 \Phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f N_1 \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4.44 f N_1 \Phi_m$$

$$E_2 = \frac{E_{2m}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega N_2 \Phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f N_2 \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4.44 f N_2 \Phi_m$$

相量表达式为：

$$\dot{E}_1 = -j 4.44 f N_1 \dot{\Phi}_m$$

$$\dot{E}_2 = -j 4.44 f N_2 \dot{\Phi}_m$$

2、漏磁通感应的电动势

同样的方法可推导出

$$\dot{E}_{1\sigma} = -j 4.44 f N_1 \dot{\Phi}_{1\sigma m} = -j \dot{I}_0 x_1$$

$x_1 = 2\pi f L_{1\sigma}$ 为一次绕组的漏电抗不随电源电压及负载情况而变，是常数。

$$L_{1\sigma} = \frac{\Psi_{1\sigma}}{I_0} = \frac{N_1 \Phi_{1\sigma}}{I_0} \text{ 为一次绕组的漏感系数。}$$

3. 2. 2 空载电流和空载损耗

一、空载电流

1、空载电流的作用与组成

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_{0a} + \dot{I}_{0r}$$

\dot{I}_{0r} —励磁分量，是无功电流，任务是建立主磁通。

\dot{I}_{0a} —铁损耗分量，是有功电流，任务是供给交变主磁通产生的铁损耗。

2、空载电流的性质与大小

$\because I_{0r} \gg I_{0a}, \dot{I}_{0r} \approx \dot{I}_0 \therefore$ 空载电流近似为无功性质的电流。

空载电流的大小通常用百分数表示：

$$I_0 \% = \frac{I_0}{I_N} \times 100\%$$

一般的电力变压器， $I_0 = (2-10) \%$ 。

3、空载电流的波形

由于磁路的饱和，空载电流与它产生的主磁通呈非线性关系，当主磁通为正弦波时，空载电流为尖顶波。不考虑铁心损耗时的空载电流波形如图 3.2.2 所示。

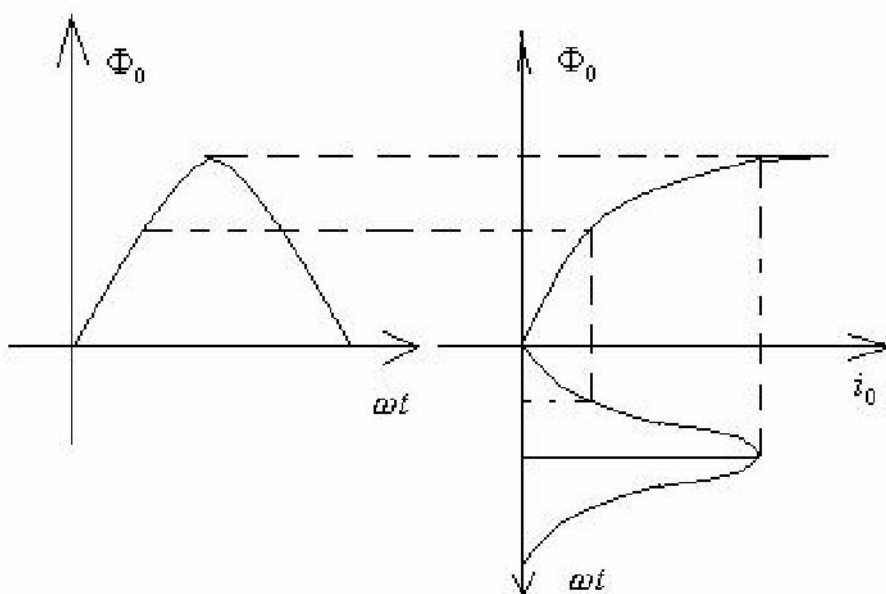


图 3.2.2 空载电流的波形

二、空载损耗

空载损耗包括铁损耗 P_{Fe} 与铜损耗 P_{Cu} ，空载时，铜损耗 $P_{Cu} = I_0^2 r_1$ 的 I_0 ， r_1 很小， $\therefore P_0 \approx P_{Fe}$ 。

铁损耗可由实验测的，也可用经验公式计算：

$$P_{Fe} = P_{1/50} B_m^2 \left(\frac{f}{50}\right)^{1.3} G$$

3. 2. 3 空载时的电动势方程、等效电路和相量图

一、电动势平衡方程和变比

1、电动势平衡方程

(1) 一次侧

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{1\sigma} + r_1 \dot{I}_0 = -\dot{E}_1 + r_1 \dot{I}_0 + jx_1 \dot{I}_0 = -\dot{E}_1 + Z_1 \dot{I}_0$$

空载时漏抗压降 $Z_1 I_0$ 很小， $\therefore \dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1$

$$U_1 \approx E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_0$$

$$\Phi_0 = \frac{U_1}{4.44fN_1}$$

电源电压一定时，主磁通基本不变。

(2) 二次侧

$$\because I_2=0, \therefore \dot{U}_{20} = \dot{E}_{20}$$

2、变比

变比的定义是一、二次绕组主电动势之比：

$$k = \frac{\dot{E}_1}{\dot{E}_2} = \frac{N_1}{N_2} \approx \frac{U_1}{U_{20}} = \frac{U_{1N}}{U_{2N}}$$

三相变压器变比的定义是一、二次绕组相电动势之比。

二、空载时的等效电路和相量图

1、电动势平衡方程

(1) 一次侧

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{1\sigma} + r_1 \dot{I}_0 = -\dot{E}_1 + r_1 \dot{I}_0 + jx_1 \dot{I}_0 = -\dot{E}_1 + Z_1 \dot{I}_0$$

空载时漏抗压降 $Z_1 \dot{I}_0$ 很小， $\therefore \dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1$

$$U_1 \approx E_1 = 4.44fN_1\Phi_0$$

$$\Phi_0 = \frac{U_1}{4.44fN_1}$$

电源电压一定时，主磁通基本不变。

(2) 二次侧

$$\because I_2=0, \therefore \dot{U}_{20} = \dot{E}_{20}$$

2、 变比

变比的定义是一、二次绕组主电动势之比：

$$k = \frac{\dot{E}_1}{\dot{E}_2} = \frac{N_1}{N_2} \approx \frac{U_1}{U_{20}} = \frac{U_{1N}}{U_{2N}}$$

三相变压器变比的定义是一、二次绕组相电动势之比。

二、空载时的等效电路和相量图

1、空载时的等效电路

(1) 为使变压器的分析与计算简化，用一个模拟电路反映变压器运行中电与磁之间的相互关系。

(2) 主磁通感应的电动势也可表示为空载电流在励磁阻抗上的压降：

$$-\dot{E}_1 = Z_m \dot{I}_0 = (r_m + jx_m) \dot{I}_0$$

$Z_m = r_m + jx_m$ 为励磁阻抗， r_m 为励磁电阻，对应铁损耗的等效电阻； x_m 为励磁电抗，对应主磁通的等效电抗。

空载时变压器原绕组的电动势方程式可表示为：

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + Z_1 \dot{I}_0 = Z_m \dot{I}_0 + Z_1 \dot{I}_0 = \dot{I}_0 (r_1 + jx_1 + r_m + jx_m)$$

$Z_1 = r_1 + jx_1$ 为变压器原绕组的漏阻抗， r_1 为原绕组的电阻； x_1 对应漏磁通的等效电抗。

变压器空载时的等效电路为：

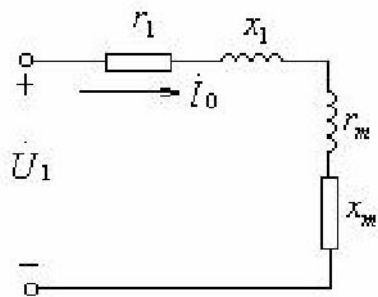


图 3.2.3 变压器空载时的等效电路

其中， $r_1 \ll r_m$ ， $x_1 \ll x_m$ 。

2、空载时的相量图

(1) 空载时的基本方程式

归纳总结变压器空载运行时的方程式，有五个：

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + Z_1 \dot{I}_0$$

$$\dot{U}_{20} = \dot{E}_2$$

$$\dot{E}_1 = -j4.44 f N_1 \dot{\Phi}_m$$

$$\dot{E}_2 = -j4.44 f N_2 \dot{\Phi}_m$$

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_{0a} + \dot{I}_{0r}$$

(2) 空载时的相量图

变压器空载时的相量图如图 3.2.4 所示。

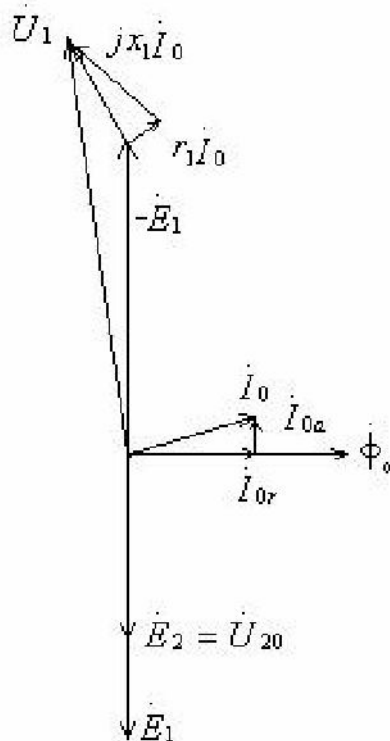


图 3.2.4 变压器空载时的相量图

作图步骤：

- ① 以 $\dot{\Phi}_0$ 为参考相量；
- ② 作 \dot{E}_1 、 \dot{E}_2 ，滞后 $\dot{\Phi}_0$ 90° ；
- ③ 作 $\dot{I}_0 = \dot{I}_{0a} + \dot{I}_{0r}$ ；
- ④ 作 $\dot{E}_2 = \dot{U}_{20}$
- ⑤ $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{Z}_1 \dot{I}_0$

思考题：

- 1、为什么要将变压器的磁通分为主磁通与漏磁通？主磁通与漏磁通有哪些区别？功能有什么不同？
- 2、变压器的空载电流的性质和作用如何，其大小与哪些因素有关？
- 3、变压器空载运行时从电网吸收哪些功率？各起什么作用？为什么小用

户使用大容量变压器对电网和用户都不利？

4、一台 60 赫兹的变压器用在 50 赫兹的电源上运行，其他条件都不变，问主磁通、空载电流、铁损耗和漏抗有何变化？

5、变压器运行时电源电压降低，试分析对变压器铁心饱和程度、励磁电流、铁心损耗、励磁阻抗有何影响？

6、当变压器原绕组匝数比设计值减少而其他条件不变时，铁心饱和程度、空载电流大小、铁损耗、副边感应电动势和变比都将如何变化？

7、变压器制造时，①叠片松散，片数不足；②接缝增大；③片间绝缘损伤。以上几种情况对铁心饱和程度、励磁电流、铁心损耗有何影响？

8、变压器原边漏阻抗 $z_1 = r_1 + jx_1$ 是什么含义？大小与什么有关系？

9、变压器的励磁电抗和漏电抗各对应于什么磁通，对于制成的变压器，它们是否是常数？当电源电压降到一半时，他们如何变化？我们希望这两个电抗大好还是小好，为什么？比较两个电抗的大小。

10、变压器励磁电抗与磁路的饱和程度有关系吗？变压器运行时为什么把励磁阻抗看成常数？

11、变压器空载运行时为什么功率因数很低？是超前的还是滞后的？