

1 变压器

1.1 变压器的工作原理

1.1.1 单相变压器

原理: 线圈称为绕组, 工作中, 接电源为一次绕组, 接负载为二次绕组

1. 电压变换

变压器在工作时, 可以变换电压, 变化的大小取决于绕组的匝数多少

1) 原理: 在一次绕组加电压 u_1 , 则在一次绕组中产生电流 i_1 , i_1 在一次绕组中产生主磁通 Φ , 漏磁通 $\Phi_{\sigma 1}$, 主磁通 Φ 在一二次绕组中分别产生感应电动势 e_1, e_2, e_2 在二次绕组中产生电流 i_2 , 在负载两端产生电压 u_2 , i_2 参与产生主磁通 Φ 和仅与二次绕组较链的漏磁通 $\Phi_{\sigma 2}$

一次绕组部分

$$\dot{E}_1 = -j4.44N_1f\dot{\Phi}_m$$

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + (R_1 + jX_1)\dot{I}_1 = -\dot{E}_1 + Z_1\dot{I}_1$$

二次绕组部分

$$\dot{E}_2 = -j4.44N_2f\dot{\Phi}_m$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - (R_2 + jX_2)\dot{I}_2 = \dot{E}_2 - Z_2\dot{I}_2$$

$$\dot{U}_2 = Z_L\dot{I}_2$$

其中 Z_L 是负载部分阻抗

2) 电压比: 在忽略 Z_1, Z_2 时为: $k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$. 在空载时, 即使不忽略 Z_1, Z_2 , 电压比也十分接近匝数比

在求电压比时, 用空载时的电压比来计算

2. 电流变换

二次电流 I_2 的大小主要取决于负载阻抗模 $|Z_L|$ 的大小, 一次电流 I_1 的大小主要取决于 I_2 的大小。

磁通势平衡方程式: 空载时, 主磁通由磁通势 $\dot{F}_{0m} = N_1\dot{I}_{0m}$ 产生有负载时, 主磁通由 $\dot{F}_{1m} = N_1\dot{I}_{1m}$ $\dot{F}_{2m} = N_2\dot{I}_{2m}$ 产生又由磁路欧姆定律, U_1 不变的情况下, 主磁通 Φ_m 基本不变

$$\dot{F}_{0m} = \dot{F}_{1m} + \dot{F}_{2m}$$

$$N_1\dot{I}_{0m} = N_1\dot{I}_{1m} + N_2\dot{I}_{2m}$$

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

上面三个式子等价

在满载时, 由于 I_0 比额定电流小得多, 可以忽略, 则有

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{k}$$

3. 阻抗变换

变压器二次绕组阻抗模 $|Z_L|$, 忽略 Z_1, Z_2, I_0 , 则

$$|Z_L| = \frac{U_2}{I_2} = \frac{U_1/k}{kI_1} = \frac{1}{k^2} \frac{U_1}{I_1}$$

$\frac{U_1}{I_1}$ 视为从一次绕组看进去的等效阻抗模 $|Z_e|$

$$|Z_e| = k^2 |Z_L|$$

当负载直接接电源时, 电源的负载阻抗 $|Z_L|$, 通过变压器接电源时, 相当于把阻抗模增加到 $|Z_L|$ 的 k^2 倍

1.1.2 三相变压器

1. 三相变压器的种类:

(1) 三相组式变压器: 三相之间只有电的联系, 没有磁的联系

(2) 三相心式变压器: 三相之间同时有电与磁的联系

2. 三相绕组的联结方式:

1.2 变压器的基本结构

1.2.1 主要部件

1. 铁心: 奇数偶数层结构不同, 目的减小空气隙

2. 绕组: 绝缘导线绕成

3. 其他: 外壳, 油箱等等

1.2.2 主要种类

1. 按照结构分类: 心式变压器和壳式变压器

心式变压器: 铜包铁, 壳式变压器: 铁包铜

1.2.3 额定值

1. 额定电压 U_{1N}/U_{2N} , 指空载电压的额定值, 三相变压器的额定电压指在空载时高低压绕组线电压的额定值

2. 额定电流 I_{1N}/I_{2N} , 指满载电压的额定值, 三相变压器的额定电流时满载时高低压绕组线电流值

工作电流若长期超过额定电流, 变压器温度会过高

3. 额定容量 S_N , 指变压器视在功率的额定值

单相变压器: $S_N = U_{2N} I_{2N} = U_{1N} I_{1N}$

三相变压器: $S_N = \sqrt{3} U_{2N} I_{2N} = \sqrt{3} U_{1N} I_{1N}$

4. 额定频率 f_N : 50Hz

变压器的电压电流功率频率都在额定值时, 称为额定状态, 此时的电流为额定值, 就是满载状态

1.3 变压器的运行分析

1.3.1 等效电路

1. 折算: 将匝数为 N_2 的二次绕组折算为匝数为 N_1 的绕组, 在这个过程中要求磁通势不变功率不变, 将折算后的物理量右上角加'' ''

2. 以低压绕组向高压绕组这算为例, 计算物理量的变化

1) 二次绕组电流 I'_2

$$I'_2 = \frac{I_2}{k}$$

2) 二次绕组的电压 U'_2 电动势 E'_2

$$U'_2 = kU_2$$

$$E'_2 = kE_2$$

3) 二次绕组漏阻抗 Z'_2 负载阻抗 Z'_L

$$Z'_2 = k^2 Z_2$$

$$Z'_L = k^2 Z_L$$

3.T 型等效电路:p32

4. 简化等效电路:p32, 在电流满载或接近时使用

1.3.2 基本方程式

折算前

{

折算后

1.3.3 相量图

由 T 型等效电路和基本方程式得

1.4 变压器的参数测定

1.4.1 空载试验

试验在低压绕组进行 (目的是可测量), 将低压绕组作为一次绕组, 高压绕组作为二次绕组且输出端开路

1. 铁损耗 P_{Fe} 在空载试验中, 由于 $I_0 \ll I_1$, 一次绕组部分铜损 $P_{Cu} = RI^2$ 很小, 二次绕组部分 $I_2 = 0$, 没有铜损所以可以忽略铜损。而铁损耗主要取决于一次绕组的电压和频率, 在空载时都没有发生变化, 则认为空载试验功率 P_0 有:

$$P_0 = P_{Fe}$$

2. 励磁阻抗模 $|Z_0|$

由 T 型等效电路的空载时:

$$\frac{U_1}{I_0} = |Z_1 + Z_0|$$

又

$$Z_1 \ll Z_0$$

则:

$$|Z_0| = \frac{U_1}{I_0}$$

3. 励磁电阻 R_0

$$R_0 = \frac{P_0}{I_0^2}$$

4. 励磁电抗 X_0

$$X_0 = \sqrt{|Z_0|^2 - R_0^2}$$

5. 电压比 k

$$k = \frac{U_2}{U_1}$$

由于空载试验在低压侧进行, 所以上述参数 $|Z_0|, R_0, X_0$ 是折算到低压侧数值, 当高压绕组作为一次绕组时, 需要用高压侧的数值, 将上述参数乘以 K^2 则可

1.4.2 短路试验

试验在高压侧进行, 将高压绕组作为一次绕组, 将低压绕组的输出端短路, 电压逐渐从零增加到电流等于额定电流为止, p36 图

1. 铜损耗由于输出端短路, 所以 U_s 很小, 所以铁损也很小, 而铜损耗是满载铜损耗, 所以认为可以忽略铁损耗

$$P_{Cu} = P_S$$

2. 短路阻抗模 $|Z_S|$

$$|Z_S| = \frac{U_S}{I_1}$$

3. 短路电阻 R_S

$$R_S = \frac{P_S}{I_1^2}$$

4. 短路电抗 X_S

$$X_S = \sqrt{|Z_S|^2 - R_S^2}$$

5. 阻抗电压 U_S

指额定电流通过短路阻抗时的电压,

阻抗电压的标么值:

$$\text{标么值} = \frac{\text{实际值}}{\text{基值}}$$

基值取对应的额定值, 标么值用右上角的 * 表示

$$U_s^* = \frac{U_S}{U_{1N}} = \frac{|Z_S| I_1 N}{U_{1N}} = Z_S^*$$

6. 温度转换

要将绕组电阻转换为 75 度的电阻

由于空载试验在高压侧进行,所以上述参数 $|Z_0|, R_0, X_0$ 是折算到高压侧数值,当低压绕组作为一次绕组时,需要用低压侧的数值,将上述参数除以 K^2 则可

1.5 变压器的运行特性

1.5.1 外特性

1. 定义: 保持电压 U_1, λ_2 不变,二次电压和电流之间的关系 $U_2 = f(I_2)$ 为变压器的外特性
2. 特点: 电感性电阻性电容性负载的外特性有所不同,其中电容性负载较为特殊,随着 I_2 增大, U_2 增大,而电感性负载为 λ_2 越低, U_2 下降越多
3. 电压调整率: 用来表示 U_2 随 I_2 变化的程度。在一次电压为额定值,功率因数不变的情况下,变压器从满载到空载二次电压变化的数值和空载电压的比值

$$V_R = \frac{U_{2N} - U_2}{U_{2N}} * 100\%$$

折算到一次侧:

$$V_R = \frac{U_{1N} - U'_2}{U_{1N}} * 100\%$$

利用简化电路 (在满载和接近满载时使用)

$$V_R = (R_S \cos \varphi_2 + X_S \sin \varphi_2) \frac{I_{1N}}{U_{1N}} * 100\%$$

负载电感性: $\varphi_2 > 0$; 电阻性: $\varphi_2 = 0$; 电容性: $\varphi_2 < 0$

1.5.2 效率特性

1. 功率: 变压器由电源输出的有功功率

$$P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1$$

变压器输出的有功功率

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2$$

2. 损耗: 总损耗

$$P_1 - P_2 = P_{Cu} + P_{Fe}$$

$$\begin{aligned} P_{Cu} &= R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 \\ &= R_1 I_1^2 + R'_2 I_2'^2 \text{ T 形等效} \\ &= R_S I_1^2 = R_S I_2'^2 \text{ 简化等效} \\ &= \beta^2 P_{S\text{短路试验}} \end{aligned} \quad (1)$$

其中

$$\beta = \frac{I_1}{I_{1N}}$$

所以铜损会变，称为可变损耗

$$P_{Fe} = R_0 I_0^2 T \text{ 形等效} \quad (2)$$

$$= P_0 \text{ 空载试验} \quad (3)$$

由于铁损和 I_2 无关，称为不变损耗 3. 效率

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} * 100\%$$

在忽略 V_R

$$\eta = \frac{\beta S_N \lambda_2}{\beta S_N \lambda_2 + P_0 + \beta^2 P_S} * 100\%$$

4. 效率特性: 当 $U_1 = U_{1N}$, $\cos \varphi_2$ 常数时, $\eta = f(I_2)$ 或 $\eta = f(\beta)$ 有求导求 η 的最大值, 在 $P_{Cu} = P_{Fe}$ 时, 有最大值

1.6 三相变压器的联结组