

第一部分 变压器

本课程主要讨论用来实现电能传输、分配的变压器，称为**电力变压器**，其作用有：(1)变换电压等级（简称**变压**）。以利于电能的高效传输和安全使用；(2)控制电压水平（简称**调压**）。以保证电能的质量指标，即保证电压稳定在规定的范围内。

按用途不同，变压器可分成多种类型。

- (1) 电力变压器：用来实现电能传输、分配的变压器；
- (2) 仪用变压器（又称为互感器）：包括电压互感器（TA）、电流互感器
- (3) 特种变压器：交流电焊机（电焊变压器）、整流变压器、脉冲变压器等

一、变压器的结构（要掌握各部件的组成、作用、要求）

1. 电磁部件（也称器身）

这部分是变压器工作的核心部件，包括**绕组和铁心**。

(1) **铁心**：铁心通常是用 0.35mm 或 0.5mm 厚的硅钢片（为了减小铁耗）叠压而成的闭合框体，它可分成心柱式和铁壳式两种型式。铁心中套有绕组的部分称为**铁心柱**；其余部分称为**磁轭**，用来连通主磁路。铁心的基本作用是导磁，同时兼作器身的机械支承，所以要求它具有良好的导磁性能和足够的机械强度。

(2) **绕组**：绕组是用带绝缘的铜导体绕制而成的线圈或线圈组合，有多种形式。绕组作用是导电并产生磁场，同时感应电动势，并通过**磁场耦合**把电能从一次侧传递到二次侧。

对绕组的要求有：①每相（匝链同样的主磁通）至少有两个匝数不同的绕组（供变压用）；②在高压绕组上引出若干分接抽头（供调压用）。

相关术语

高压绕组是指线圈匝数多的绕组，其电压高、电流小、导线细而电阻大；匝数少的就称为**低压绕组**，它的电压低、电流大、导线粗而电阻小。

输入电能（或接电源）的绕组称为**一次绕组**，该侧称为**一次侧**；输出电能（或接负载）的绕组叫做**二次绕组**，该侧称为**二次侧**。为绝缘方便，低压绕组绕在内层而高压绕组绕在外层，一相绕组整体套在铁心柱上。必须注意，一、二次绕组与高、低压绕组是不同的概念。

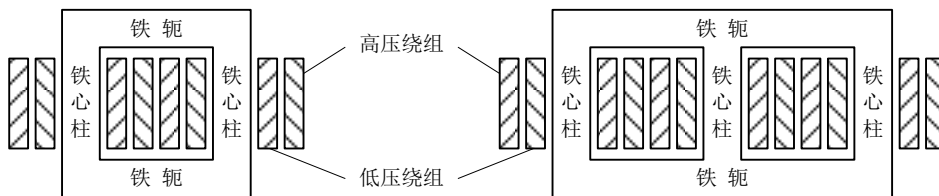


图 1-1 绕组套装在铁心柱上的情况

(a) 单相变压器；(b) 三相变压器

对变压器，一次电压高于二次电压的称为**降压变压器**；而一次电压低的称为**升压变压器**。

2. 冷却部件

(1) **油箱**：用钢板焊接而成，用来盛放变压器油，器身浸在变压器油中。

变压器油：是变压器的冷却介质，这是一种无色透明的矿物油，它盛放在油箱中，变压器的器身浸在油中。变压器油起冷却与加强绝缘双重作用。

(2) 散热管：装在油箱表明，与油箱内部相通，以增大散热面积。

(3) 散热器：用薄铜片组合而成，装在与油箱连通的油管上，以增大散热面积，散热器的外面装一组风扇，以提高散热效果。

(4) 冷却器。用于特大型变压器。

3. 保护部件

(1) 储油柜（俗称油枕）：钢板焊接成的油桶，放在变压器某侧上部，其中大部分冲油，以保证器身可靠浸在变压器油中。储油柜的一个端面上装在油位计（俗称油标），用来指示油量，供运行人员观察，以及及时补油或放油。储油柜下部装一个呼吸器。

(2) 气体继电器：装在连通油箱与油枕的管道上，对气体的压力敏感

(3) 安全气道（俗称防爆管）

(4) 出线套管等

二、变压器的额定值及其相互关系

1. 额定值：是指变压器正常使用时应满足的一组规定值，包括：

(1) 额定容量 S_N ，单位 kVA；基本含义 $S_{1N} = S_{2N} = S_N$

(2) 一次额定电压 U_{1N} ，单位 V 或 kV；一次额定电流 I_{1N} ，A。三相指线值

(3) 二次额定电压 U_{2N} ，指一次为额定电压下的二次开路电压，即 $U_{2N} = U_{20} | U_1 = U_{1N}, I_2 = 0$ ，单位 V；三相指线值

(4) 一、二次额定电流 I_{1N} 、 I_{2N} ，A。三相指线值

额定值的相互关系：

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

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

补充：绕组连接方法及其端头标记

绕组连接方法

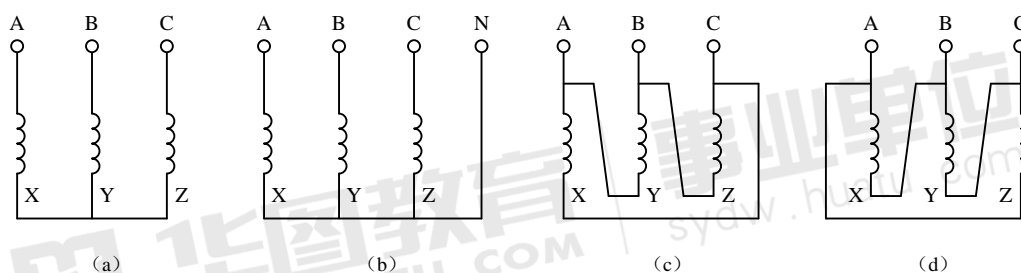


图 1-2 三相绕组联结法

(a) Y 联结；(b) YN 联结；(c) D 联结（后接，标准接法）；(d) D 联结（前接）

Y（星形）连接：将三个（相）绕组的尾端连在一起，连接点称为中性点，中性点出线称为中性线（带中性线的星形 YN）；首端（称为端点）对外出线（称为端线，俗称火线）。 Δ （三角形）连接：将三相绕组的首尾端依次串联出闭合回路，三个连接点称为端点，对外引出三条端线。端点间的电压称为线电压，绕组首尾端间的电压称为相电压；端线电流称为线电流，绕组内部电

流称为相电流。 Δ 连接，线电压等于相电压，线电流等于 $\sqrt{3}$ 倍相电流；Y连接，线电流等于相电流，线电压等于 $\sqrt{3}$ 倍相电压。绕组端头标记：单相，高压A(U1)、X(U2)，低压a(u1)、x(u2)；三相，高压绕组首端用A、B、C，尾端用X、Y、Z表示；低压绕组首端用a、b、c，尾端用x、y、z表示。

注意!! 对三相变压器，额定电流和额定电压均指线值，但是变压器的基本方程和等效电路都是从一相导出的，因此计算分析时必须用相值带入。按照绕组接线方式的不同，变压器一、二次侧的额定相电流 $I_{1N\phi}$ 、 $I_{2N\phi}$ 和额定相电压 $U_{1N\phi}$ 、 $U_{2N\phi}$ 可分别用下式求出，即

$$\text{对 Y 接线的侧: } I_{jN\phi} = I_{jN}、U_{jN\phi} = \frac{U_{jN}}{\sqrt{3}} \quad (j=1、2, 1 \text{ 代表一次侧, } 2 \text{ 代表二次侧})$$

$$\text{对 } \Delta \text{ 接线的侧: } U_{jN\phi} = U_{jN}、I_{jN\phi} = \frac{I_{jN}}{\sqrt{3}}$$

三、变压器主要物理量及其惯例正方向

图 1-3 示出了单相变压器的原理结构和主要物理量，下面说明各物理量的惯例参考方向。

1. 一次侧

(1)外加电压 u_1 或 \dot{U}_1 ：其大小和方向都是给定的；是变压器工作过程的发起者。

(2)电流 i_1 或 \dot{I}_1 ：它由电压 \dot{U}_1 产生并与之成关联方向（负载惯例），即电流自高电位端流入绕组。

(3)主电动势 e_1 或 \dot{E}_1 ：它由主磁通 Φ 产生并与之成右手螺旋方向；

(4)漏电动势 $e_{1\sigma}$ 或 $\dot{E}_{1\sigma}$ ：它由漏磁通 $\Phi_{1\sigma}$ 产生并与之成右手螺旋方向。

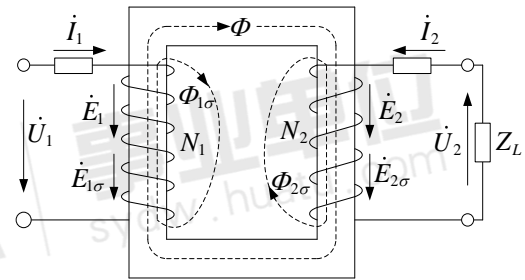


图 1-3 原理结构与惯例正方向

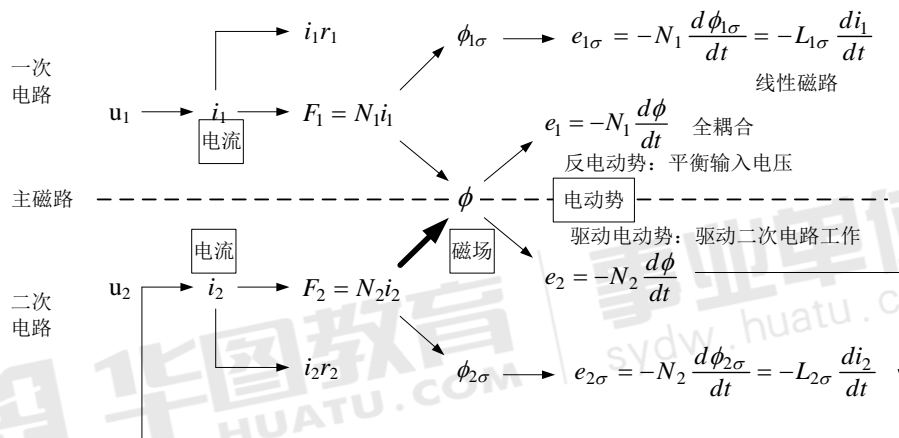


图 1-4 变压器电磁过程

2. 二次侧

(1)主电动势 e_2 或 \dot{E}_2 ，它由 Φ 产生并与之成右手螺旋方向；

(2)电流 i_2 或 \dot{I}_2 ，它是在负载情况下由 \dot{E}_2 产生并与其方向相同；

(3)漏电动势 $e_{2\sigma}$ 或 $\dot{E}_{2\sigma}$ ，由漏磁通 $\Phi_{2\sigma}$ 产生并与其成右手螺旋方向；

(4)输出电压 u_2 或 \dot{U}_2 ，它是变压器整个工作过程的最终结果，与 \dot{I}_2 成非关联方向。

3. 磁通

主磁通 Φ ：在空载时由一次侧空载电流 i_0 产生，负载时由一、二次电流共同产生，它与电流成右手螺旋方向；

一次漏磁通 $\Phi_{1\sigma}$ ：由一次电流 i_1 产生并与之成右手螺旋方向；

二次漏磁通 $\Phi_{2\sigma}$ ：由二次电流 i_2 产生并与之成右手螺旋方向。

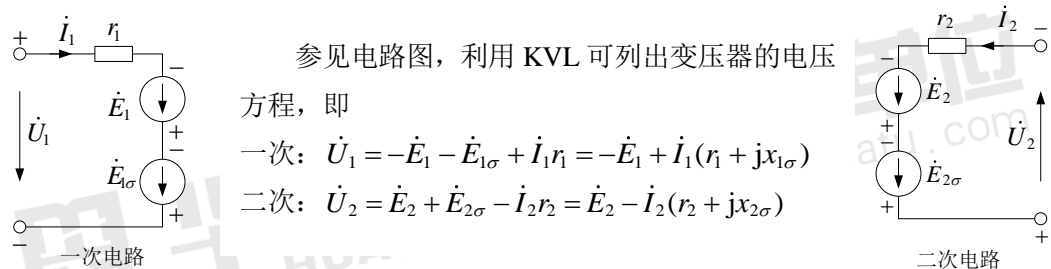
上述电磁量可见图 1-4 所示的变压器电磁过程。

四、变压器的运行分析

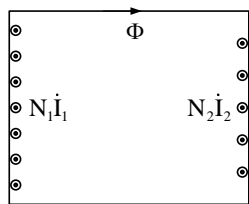
1. 变压器的电磁过程（又称工作原理）

可用图 1-4 表示，也可用文字叙述如下：一次通电后，铁心中将产生主磁通，从而在各绕组中感应出主电动势。由于两侧绕组的匝数不同，进而实现了电压等级的变换；当二次负载电流变化时，通过主磁通的自动调整作用（调整的结果是主磁通基本保持不变），一次电流发生相应地变化，从而实现了功率从一次侧向二次侧的传递。此即变压器的电磁过程，也就是变压器工作原理。

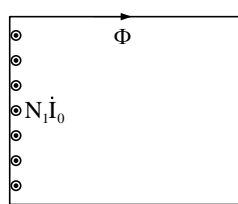
2. 变压器的基本方程



式中： $\dot{E}_{1\sigma} = [\dot{e}_{1\sigma}] = [-L_{1\sigma} \frac{di_1}{dt}] = -L_{1\sigma} j\omega \dot{I}_1 = -j\dot{I}_1 x_{1\sigma}$ ， $x_{1\sigma} = \omega L_{1\sigma}$ 为一次绕组漏磁电抗（简称一次漏抗）； $\dot{E}_{2\sigma} = -j\dot{I}_2 x_{2\sigma}$ ， $x_{2\sigma} = \omega L_{2\sigma}$ 为二次漏抗； r_1 、 r_2 为一、二次绕组电阻。



负载主磁路



空载主磁路

安培环路定律 $\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \Sigma i$

沿着闭合磁路的电场强度线积分等于回路所包围的电流代数和。当电流与回路成右手螺旋方向时取正值

电机中的形式 $\Sigma H_j l_j = Ni$

变压器中的形式 $Hl = Ni$

磁动势平衡：变压器的主磁通是基本不随负载变化的，这就要求产生主磁通的磁动势也不变，即在空载时磁动势 $\dot{F}_0 = N_1 \dot{I}_0$ 等于负载时磁动势 $\dot{F}_1 (= N_1 \dot{I}_1) + \dot{F}_2 (= N_2 \dot{I}_2)$ 。这就是磁动势平衡，即有

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

变比方程：设 $\phi = \Phi_m \sin \omega t$ ，即 $\dot{\phi} = \frac{\Phi_m}{\sqrt{2}} \angle 0^\circ$ ， Φ_m 为主磁通的最大值

由式 $e_1 = -N_1 \frac{d\phi}{dt}$ 和式 $e_2 = -N_2 \frac{d\phi}{dt}$ 知: $j = 0 + 1j = 1 \angle 90^\circ$

$$\dot{E}_1 = -j\omega N_1 \dot{\Phi} = 2\pi f N_1 \frac{\Phi_m}{\sqrt{2}} \angle -90^\circ = 4.44 f N_1 \Phi_m \angle -90^\circ, \quad \dot{E}_2 = 4.44 f N_2 \Phi_m \angle -90^\circ, \quad \text{即}$$

大小: $E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m$ 、 $E_2 = 4.44 f N_2 \Phi_m$, \dot{E}_1 、 \dot{E}_2 滞后 $\dot{\Phi}$ 90° 相位, 即感应电动势滞后相应的磁通 90° 。于是可得

$$\text{变比 } K = \frac{\dot{E}_1}{\dot{E}_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = \text{相值比}$$

上式可表示成: $\dot{E}_1 = K\dot{E}_2 = -\dot{I}_0(r_m + jx_m)$

式中, r_m 称为**激磁电阻**, 它模拟铁心损耗的大小; x_m 称为**激磁电抗**, 它对应于主磁通。

以上方程联立如下

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1(r_1 + jx_{1\sigma}) = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 \\ \dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2(r_2 + jx_{2\sigma}) = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2 \\ N_1 \dot{I}_0 = N_1 \dot{I}_1 + N_2 \dot{I}_2 \\ \dot{E}_1 = K\dot{E}_2 = -\dot{I}_0(r_m + jx_m) \end{cases}$$

式中: $Z_1 = r_1 + jx_{1\sigma}$, $z_1 = |Z_1| = \sqrt{r_1^2 + x_{1\sigma}^2}$ 为一次漏阻抗, $Z_2 = r_2 + jx_{2\sigma}$ 为二次漏阻抗, 两者都是常数。

当负载电流很小(轻载)时, 漏阻抗压降 $\dot{I}_1 Z_1$ 、 $\dot{I}_2 Z_2$ 可忽略不计, 即 $\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1$ 、 $\dot{U}_2 \approx \dot{E}_2$, 于是可得重要关系式:

$$U_1 \approx E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m \quad (U_1 = |\dot{U}_1| \approx |-\dot{E}_1| = |\dot{E}_1| = E_1)$$

上式是量值改变时变压器分析的基本依据, 此时的变比近似式为: $K \approx \frac{U_1}{U_2}$ 。

重载时, 空载电流 \dot{I}_0 可忽略, 即 $N_1 \dot{I}_0 = N_1 \dot{I}_1 + N_2 \dot{I}_2$, 于是可得 $K = \frac{N_1}{N_2} \approx -\frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1} = \frac{I_2}{I_1}$, 这就是

重载时变比的近似式, 该式还表明: 在惯例参考方向下, 一、二次侧的电流近似反相。

3. 折算法

(1) 概念

所谓**折算**就是一台变比为 1、而铁心相同的假想变压器去代替变比为 K 的实际变压器, 而保持两者的磁动势、主磁通、功率等不变。

(2) 折算关系

若设将变压器的二次侧折算到一次侧, 并将二次侧折算后的量加上标“'”以示与实际量的区别, 即有 $N'_2 = N_1$ 、 $K' = 1$, 则可得折算关系:

$$\textcircled{1} \dot{E}'_2 = K\dot{E}_2 = \dot{E}_1; \quad (\text{因为主磁通不变})$$

$$\textcircled{2} \dot{I}'_2 = \frac{\dot{I}_2}{K}; \quad (\text{因为磁动势不变, 即 } F'_2 = N'_2 \dot{I}'_2 = F_2 = N_2 \dot{I}_2)$$

③ $r'_2 = K^2 r_2$, $x'_{2\sigma} = K^2 x_{2\sigma}$, $Z'_L = K^2 Z_L$; (因为功率不变, 即 $I_2'^2 (r_2'^2 + jx_{2\sigma}'^2) = I_2^2 (r_2^2 + jx_{2\sigma}^2)$)

④ $\dot{U}'_2 = K\dot{U}_2$ 。 ($\dot{U}'_2 = \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 (r'_2 + jx'_{2\sigma}) = K\dot{E}_2 - \frac{\dot{I}_2}{K} K^2 (r_2 + jx_{2\sigma})$)

(3) 折算后的基本方程

按以上关系可得折算后变压器的基本方程如下。

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 (r_1 + jx_{1\sigma}) \\ \dot{U}'_2 = \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 (r'_2 + jx'_{2\sigma}) \\ \dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}'_2 \\ \dot{E}'_2 = \dot{E}_1 = -\dot{I}_0 (r_m + jx_m) \end{cases}$$

负载方程: $\dot{U}'_2 = \dot{I}'_2 Z'_L$

4. 等效电路

依据折算后的基本方程可画出 T 形等效电路图 1-5。图 1-6 是工程计算中常用近似电路。

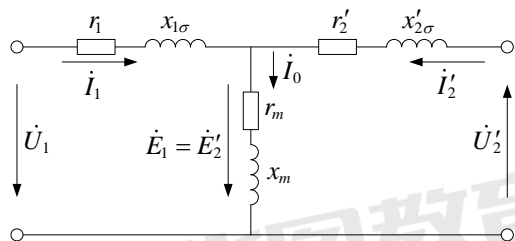


图 1-5 变压器 T 形等效电路

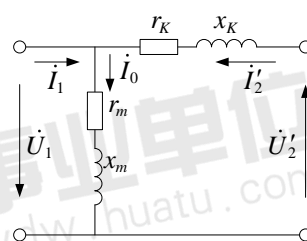


图 1-6 变压器近似 (Γ 形) 等效电路

五、变压器的参数测定

1. 空载试验: 测量值 p_0 (空载损耗)、 I_0 (空载电流)、 U_0 (外加试验电压); 利用试验数据计算励磁阻抗 r_m 、 x_m (如下)。

$$\left. \begin{aligned} |Z_0| &= \frac{U_0}{I_0} = |Z_1 + Z_m| \approx |Z_m| = z_m \\ r_0 &= p_0 / I_0^2 = r_1 + r_m \approx r_m \\ x_0 &= \sqrt{|Z_0|^2 - r_0^2} = x_{1\sigma} + x_m \approx x_m \end{aligned} \right\} \quad \left. \begin{aligned} |Z_K| &= \frac{U_K}{I_K} = |Z_{1\sigma} + Z'_{2\sigma}| = z_K \\ r_K &= \frac{p_K}{I_K^2} = r_1 + r'_2 \\ x_K &= \sqrt{z_K^2 - r_K^2} = x_{1\sigma} + x'_{2\sigma} \end{aligned} \right\}$$

2. 短路试验: 测量值 p_K (短路损耗)、 I_K (短路电流)、 U_K (短路电压, 即试验电压); 利用试验数据计算短路阻抗 r_K 、 x_K (如上) 和短路电压百分数 $U_K\%$ 。

短路阻抗与温度有关, 需要化为热态 (75°C) 数值。

定义: 短路电压百分数 $U_K\% = \frac{I_{1N\phi} Z_{K75^\circ C}}{U_{1N\phi}}$

注意: 对三相变压器, 如果测量数据的一侧为 Y 形接法, 计算值用下列数据带入

$U_0 = U_{0\text{测量值}} / \sqrt{3}$, $I_0 = I_{0\text{测量值}}$, $p_0 = p_{0\text{测量值}} / 3$; $U_K = U_{K\text{测量值}} / \sqrt{3}$, $I_K = I_{K\text{测量值}}$, $p_K = p_{K\text{测量值}} / 3$

如果测量数据的一侧为 Δ 接法, 计算值用下列数据带入

$I_0=I_0$ 测量值, $U_0=U_0$ 测量值/ $\sqrt{3}$, $p_0=p_0$ 测量值/3; $U_K=U_K$ 测量值, $I_K=I_K$ 测量值/ $\sqrt{3}$, $p_K=p_K$ 测量值/3

3. 相关问题——标么值

(1)概念: 一个物理量的标么值是指其有名值除以该值的同名基准值, 即

$$x^* = \frac{x}{x_B}$$

(2)基准值

标么值的基准值选取如下表

物理量	一次侧	二次侧	备注
电流	I_{1B} : 额定相电流	I_{2B} : 额定相电流	$I_{2B} = K I_{1B}$
电压	U_{1B} : 额定相电压	U_{2B} : 额定相电压	$U_{1B} = K U_{2B}$
阻抗	$Z_{1B} = \frac{U_{1B}}{I_{1B}}$	$Z_{2B} = \frac{U_{2B}}{I_{2B}}$	$Z_{1B} = K^2 Z_{2B}$
功率	$S_B = S_N$		$S_{1B} = S_{2B}$

(3)标么值的优点

①物理状态明晰; ②参数趋同; ③自动折算; ④特殊参数 $U_K^* = z_K^*$, 即短路电压百分数。

在用有名值计算时, 应注意用相值代入, 即有测量值如何化成相值问题, 计算的参数是折算到试验所在侧, 最终要折算到同一侧。

六、变压器的运行性能

1. 电压变化率 ΔU

定义式: $\Delta U = \frac{U_{20} - U_2}{U_{2N}} \times 100\% = 1 - U_2^*$; 计算式: $\Delta U = \beta(r_K^* \cos \varphi_2 + x_K^* \sin \varphi_2)$

$\beta = I_1^* = I_2^* = S^*$ —— 负载系数

变压器的电压变化率通常为百分之几, 且随容量增大而增大, 但不超过 15%。

2. 效率 η

(1)损耗

绕组电阻损耗——铜耗 $p_{Cu} = p_{Cu1} + p_{Cu2} = mI_1^2 r_K = \beta^2 (mI_{1N\phi}^2 r_K) = \beta^2 p_{KN}$

其中 $p_{KN} = mI_{1N\phi}^2 r_K$ —— 额定铜耗, 可见 p_{Cu} 与随负载变化, 称为可变损耗。

铁耗 $p_{Fe} = kB_m^2 f^{1.3}$, 这里 k 是常数; $B_m = \frac{\Phi_m}{A_{Fe}} = \frac{U_1}{4.44 f N_1 A_{Fe}}$ 。可见, 当 U_1 一定时, 铁耗是常数, 即与负载无关, 故称为不变损耗。通常 $p_{Fe} \approx p_0$

(2)效率公式 $\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{\beta S_N \cos \varphi_2}{\beta S_N \cos \varphi_2 + \beta^2 p_{KN} + p_0}$

(3)当 $\beta_m = \sqrt{\frac{p_0}{p_{KN}}}$ 时, 即可变损耗等于不变损耗时, 变压器的效率为最大值, 其值为

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

【例】Y,d 接法的三相变压器, $S_N=100kVA$, $U_{1N}/U_{2N}=10/0.4kV$ 。在低压侧测得空载试验数据

$U_0=400V$ 、 $p_0=1.5kW$ 、 $I_0=7.22A$ ；在高压侧测得短路试验数据 $U_K=500V$ 、 $p_K=p_{KN}=4kW$ 、 $I_K=I_{1N}$ 。试确定：

- (1) 折算到高压侧的励磁阻抗 r_m 、 x_m 和短路阻抗 r_K 、 x_K ，并画出近似等效电路；
 (2) 满载且 $\cos\phi_2=0.8$ 滞后时，变压器的电压变化率 ΔU 和效率 η 。

【解】一、数据准备

$$\begin{aligned} \text{一次额定电流 } I_{1N} &= \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}} = \frac{100kVA}{\sqrt{3} \times 10kV} = \frac{10}{\sqrt{3}} = 5.7735A = I_{1N\phi} = I_{1B} \\ \text{一次额定相电压 } U_{1N\phi} &= \frac{U_{1N}}{\sqrt{3}} = \frac{10kV}{\sqrt{3}} = 5773.5V = U_{1B} \\ \text{一次阻抗基准值 } Z_{1B} &= \frac{U_{1B}}{I_{1B}} = \frac{10/\sqrt{3}kV}{10/\sqrt{3}A} = 1000\Omega = \frac{U_{1N}^2}{S_N} \\ \text{二次额定电流 } I_{2N} &= \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{2N}} = \frac{100kVA}{\sqrt{3} \times 0.4kV} = 144.34A \\ \text{二次额定相电流 } I_{2N\phi} &= \frac{I_{2N}}{\sqrt{3}} = \frac{250/\sqrt{3}}{\sqrt{3}} = \frac{250}{3} = 83.33A = I_{2B} \\ \text{二次额定相电压 } U_{2N\phi} &= U_{2N} = 400V = U_{2B} \\ \text{二次阻抗基准值 } Z_{2B} &= \frac{U_{2B}}{I_{2B}} = \frac{400}{250/3} = 4.8\Omega = 3 \frac{U_{2N}^2}{S_N} = 3 \times \frac{(0.4kV)^2}{100kVA} \\ \text{空载试验数据的相值: } U_0 &= U_{0\phi} = 400V \text{ 或 } U_0^* = \frac{U_0}{U_{2N}} = \frac{400}{400} = 1; I_{0\phi} = \frac{I_0}{\sqrt{3}} = \frac{7.22}{\sqrt{3}} = 4.168A \\ \text{或 } I_0^* &= \frac{I_0}{I_{2N}} = \frac{7.22}{144.43} = 0.05, p_{0\phi} = \frac{p_0}{3} = \frac{1500}{3} = 500W \text{ 或 } p_0^* = \frac{p_0}{S_N} = \frac{1.5}{100} = 0.015 \\ \text{短路试验数据的相值: } U_{K\phi} &= \frac{U_K}{\sqrt{3}} = \frac{500}{\sqrt{3}} = 288.86V \text{ 或 } U_K^* = \frac{U_K}{U_{1N}} = \frac{500}{10000} = 0.05; \\ I_{K\phi} &= I_K = I_{1N} = 5.77A \text{ 或 } I_K^* = \frac{I_K}{I_{1N}} = \frac{I_{1N}}{I_{1N}} = 1, p_{K\phi} = \frac{p_K}{3} = \frac{1333.3W}{3} = 444.4W \text{ 或 } p_K^* = \frac{p_K}{S_N} = \frac{4}{100} = 0.04 \end{aligned}$$

二、按要求计算

1. 参数计算

①由空载试验数据计算励磁阻抗（折算到低压侧）的值

$$\text{励磁电阻 } r_m = \frac{p_{0\phi}}{I_{0\phi}^2} = \frac{500}{(7.22/\sqrt{3})^2} = 28.7751 \text{ 或 } r_m^* = \frac{p_0^*}{I_0^{*2}} = \frac{0.015}{0.05^2} = 6$$

$$\text{励磁阻抗 } z_m = \frac{U_{0\phi}}{I_{0\phi}} = \frac{400}{7.22/\sqrt{3}} = 95.9585 \text{ 或 } z_m^* = \frac{U_0^*}{I_0^*} = \frac{1}{0.05} = 20$$

$$\text{励磁电抗 } x_m = \sqrt{z_m^2 - r_m^2} = \sqrt{95.9585^2 - 28.7751^2} = 91.5425\Omega \text{ 或 } x_m^* = \sqrt{z_m^{*2} - r_m^{*2}} = 19.079$$

②把励磁阻抗折算到高压侧，此时 $K=(10/\sqrt{3})/0.4$

$$r_m = K^2 \times 28.7751 = 5995\Omega \text{ 或 } r_m = r_m^* \times Z_{1B} = 6 \times 1000 = 6000\Omega$$

$$x_m = K^2 \times 91.5425 = 19071\Omega \text{ 或 } x_m = x_m^* \times Z_{1B} = 19.0788 \times 1000 = 19079\Omega$$

$$z_m = K^2 \times 95.9585 = 19991.4 \Omega \text{ 或 } z_m = z_m^* \times Z_{1B} = 20 \times 1000 = 20000 \Omega$$

③由短路试验数据计算短路阻抗（折算到高压侧）的值

$$\text{短路电阻 } r_K = \frac{p_{k\phi}}{I_{k\phi}^2} = \frac{4000/3}{5.7735^2} = 40\Omega \text{ 或 } r_K^* = \frac{p_k^*}{I_k^{*2}} = \frac{0.04}{1^2} = 0.04$$

$$\text{短路阻抗 } z_K = \frac{U_{K\phi}}{I_{K\phi}} = \frac{288.68}{5.7735} = 50\Omega \text{ 或 } z_K^* = \frac{U_K^*}{I_K^*} = \frac{0.05}{1} = 0.05$$

$$\text{短路电抗 } x_K = \sqrt{z_K^2 - r_K^2} = \sqrt{50^2 - 40^2} = 30\Omega \text{ 或 } x_K^* = \sqrt{z_K^{*2} - r_K^{*2}} = 0.03$$

④画出近似等效电路（要求把参数标在图中，并按惯例方向标出各物理量的参考方向）

2. 性能计算

把 $\beta = 1$ 、 $\cos \varphi_2 = 0.8$ 、 $\sin \varphi_2 = 0.6$ 代入计算式，可得

$$\text{电压变化率 } \Delta U = \beta(r_K^* \cos \varphi_2 + x_K^* \sin \varphi_2) = 1 \times (0.04 \times 0.8 + 0.03 \times 0.6) = 0.05$$

$$\text{效率 } \eta = \frac{\beta S_N \cos \varphi_2}{\beta S_N \cos \varphi_2 + \beta^2 p_{KN} + p_0} = \frac{100k \times 0.8}{110k \times 0.8 + 4k + 1.5k} = 0.9357$$

七、单相变压器的空载电流 i_0

(1) 空载电流是指二次侧开路时的一次侧电流；(2) 一次侧在额定电压下的空载电流大小 I_0 约为额定电流的百分之几，且随容量增大而减小，即 $I_{01}^* = I_{02}^* = I_0^* = 0.0 \times$ ；(3) 空载电流以感性为主（性质），包含用于建立磁场（简称励磁）的无功分量 i_{μ} 和提供铁耗的有功分量 i_{Fe} ，并且 i_{μ} 比 i_{Fe} 大得多；(4) 作用是励磁；(5) 在单相变压器中，磁路不饱和时 i_0 为正弦波；磁路饱和时 i_0 为尖顶波，见图 2-3。

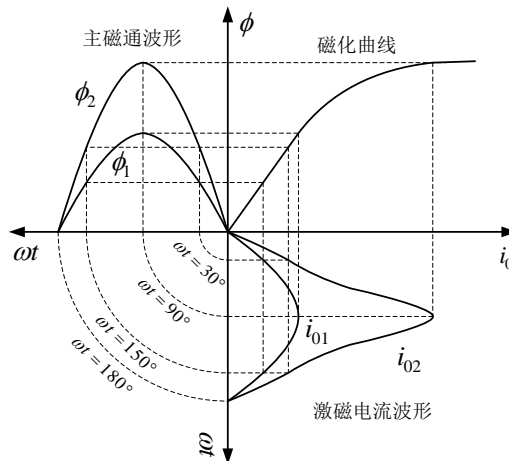


图 2-3 作图法求取变压器激磁电流波形

影响空载电流大小的因素有电源电压和频率、一次线圈匝数、铁心的磁导率与尺寸。

● 分析过程：

第一，磁路计算 $H l_{Fe} = N_1 I_0$ ，即与 (1) 一次绕组匝数 N_1 ；(2) 磁路长度 l_{Fe} 有关

第二, $H = \frac{B}{\mu_{Fe}}$, 即与(3)铁心材料 μ_{Fe} 有关

第三, $B_m = \frac{\Phi_m}{A_{Fe}}$ 即与(4)铁心截面积 A_{Fe} 有关

第四, $\Phi_m = \frac{U_1}{4.44fN_1}$ 即与(5)电源电压 U_1 (通常为额定电压不变); (6)电源频率 f (通常

通常为额定值 50Hz 不变) 有关

● 解答过程

方法: 根据条件, 从分析过程的反方向解答。即

(1) 首先用式 $U_1 \approx E_1 = 4.44fN_1\Phi_m$ 分析铁心中主磁通 Φ_m 变化情况。

(2) 再用式 $\Phi_m = B_m A_{Fe}$ 分析磁密 B_m 变化情况。 B_m 还影响铁耗 $p_{Fe} = kB_m^2 f^{1.3}$, k 为常数。

(3) 然后用式 $B_m = \mu H_m$ 和变压器空载特性(也称磁化曲线)分析磁路中磁场强度 H_m 和导磁率 μ 变化情况。三者关系为: 若 B_m 增大, 则 H_m 增大而 μ 减小; 若 B_m 减小(\downarrow), 则 H_m 减小而 μ 增大(\uparrow)。

(4) 最后依据磁路计算式 $F_m = N_1 I_{0m} = H_m l$ 确定激磁电流 I_{0m} 的变化情况。

(5) 以上结论还可用于分析铁耗、绕组铜耗 p_{Cu} 、激磁电阻 r_m 和激磁电抗 x_m 等量的变化情况。

具体看

(1) N_1 减少(匝间短路): $\Phi_m \uparrow \rightarrow B_m \uparrow \rightarrow H_m \uparrow, \mu_{Fe} \downarrow \rightarrow I_{0m} \uparrow$ (较快)。

(2) A_{Fe} 增大(也可减小): Φ_m 不变 $\rightarrow B_m \downarrow \rightarrow H_m \downarrow, \mu_{Fe} \uparrow \rightarrow I_{0m} \downarrow$ 。

(3) I_{Fe} 增大: Φ_m 不变 $\rightarrow B_m$ 不变 $\rightarrow H_m, \mu_{Fe}$ 不变 $\rightarrow I_{0m} \uparrow$ 。

(4) 铁心性能好(μ_{Fe} 大): Φ_m, B_m, H_m 均不变, $\mu_{Fe} \uparrow \rightarrow I_{0m} \downarrow$ 。

(5) f 减小(也可增大) $\Phi_m \uparrow \rightarrow B_m \uparrow \rightarrow H_m \uparrow, \mu_{Fe} \downarrow \rightarrow I_{0m} \uparrow$ 。

(6) U_1 减小: $\Phi_m \downarrow \rightarrow B_m \downarrow \rightarrow H_m \downarrow, \mu_{Fe} \uparrow \rightarrow I_{0m} \downarrow$ 。

八、三相变压器

1. 结构特点

电路方面: 三相变压器与单相变压器的区别仅在于它的一、二次绕组分别接成星形、带中性线星形和三角形中的一种。高压侧绕组的首端, 用大写字母 Y、YN、D 表示, 低压侧用小写字母 y、yn、d 表示。

磁路系统, 包括: (1)独立磁路(三相变压器组, 又称组式变压器): 特点是各相的主磁通只经过自身铁心闭合, 即三相主磁路彼此独立; (2)相关磁路(三相心式变压器): 特点是每一相的主磁通需要经另外两相的铁心才能形成闭合回路, 即三相主磁路彼此相关。

2. 三相变压器连结组别的判定

(1) 同极性端(俗称同名端)

概念: 一相(匝链同一个主磁通)绕组中, 各绕组的交流电压瞬时极性相同的端头称为同极性端。

本质: 一相的各绕组从一个同名端到另一个同名端的电压相位相同。

(2) 连结组别的表示方法

格式：高压侧接法（大写字母，三相变压器为 $A、B、C$ ，单相为 D ），低压侧接法（小写字母，三相变压器为 $a、b、c$ ，单相为 i ）（+）组别号（钟点数）

(3) 连结组别的判定方法

第一步：画高压侧电压相量图。

第二步：根据同名端，画出对应的低压侧电压相量图。

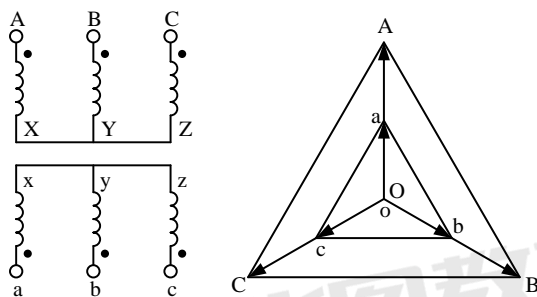
第三步：将高、低压侧的电压相量图上的某一点平移到重合，作为钟轴心，单相取 $X、x$ 点，三相取三角形的中心点；从钟轴到高、低压侧相量图上字母相同的另一点的连线分别作为时针和分针，两者构成的钟点数即为连结组号。

第四步：按格式写出连结组。

(4) 举例

情况一： Y,y 接线的首首同名端

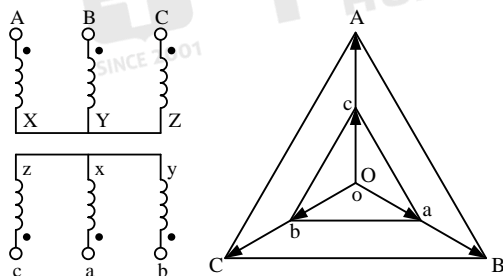
【例 1】按照接线图画出相量图，判定连结组。



【解】画出高压侧电压三角形如图中 $\triangle ABC$ ；第二步先在大三角形中截出低压侧小三角形，然后在 $A、B、C$ 对应的位置按照同名端标出低压侧的字母。

第三步：以 \vec{OA} 作为分针， \vec{oa} 作为时针，确定钟点数，即组别号。所以连结组为 $Y,y0$ 。

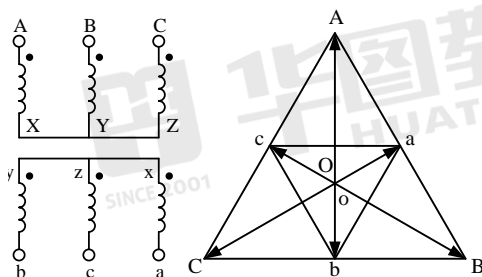
【例 2】按照接线图画出相量图，判定连结组。



【解】同样方法可判定出连结组为 $Y,y4$ 。

情况二： Y,y 接线的首尾同名端

【例 3】按照接线图画出相量图，判定连结组。



【解】画出高压侧电压三角形如图中 $\triangle ABC$ ；第二步先在高压侧相电压反向延长，然后在延长线两端标出高、低压侧的异名端字母。

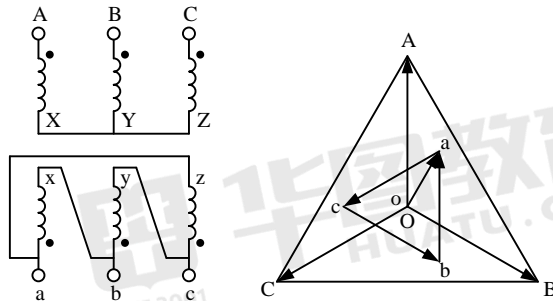
第三步：以 \vec{OA} 作为分针， \vec{oa} 作为时针，确定钟点数，即组别号。所以连结组为 $Y,y2$ 。

情况三： Y,d 接线

第二步的做法，分三小步：：

- (1) 画一（竖直）线；
- (2) （按照与 A 相对应的同名端）标（出低压侧该相绕组）两端（字母）；
- (3) （按照 a、b、c 顺时针方向，）找（出低压侧电压三角形的）第三（顶）点。

【例 4】按照接线图画出相量图，判定连结组。



【解】按照上述步骤可判定出连结组为 Y,d1。

3. 三相变压器的谐波问题

主要研究三次谐波，其特点是三相同相位，如 $i_{A3} = i_{B3} = i_{C3}$ 。出现三次谐波的**根本原因**是变压器**磁路饱和**，即磁化曲线 $U_0=f(i_0)$ 欠（低于）线性，此外还有电路原因和磁路原因。

电路原因：电路影响三次谐波电流能否流通，进而影响主磁通和绕组电动势的波形。绕组为星形接法时，三次谐波电流不能流通（即不存在）；绕组为带中性线的星形接法时，三次谐波电流能流通（即可能存在）；绕组为三角形接法时，三次谐波电流能在三角形内部流通，但在三角形的外部不能流通。只有在励磁电流为尖顶波（即有三次谐波）时，主磁通和绕组电动势才可能象希望地那样为正弦波。Y,y 接线时三次谐波电流不存在，Y,yn 接线时三次谐波电流极小，因此，这两种接法下变压器的空载电流为正弦波、主磁通为平顶波，绕组电动势为尖顶波。对有一侧绕组为 Δ 接线，则由于三次谐波电动势在 Δ 内产生三次谐波电流，进而产生三次谐波磁通，这一磁通能抵消产生三次谐波电动势的原三次谐波磁通，最终在铁心中维持一个（存在性）不大的三次谐波磁通。这就是三角形接线抑制三次谐波的原理，此时三次谐波幅值级小，认为这类变压器不出现谐波。

磁路原因：主要影响三次谐波的幅值。对 Y,y 或 Y,yn 接线的三相变压器组，经铁心闭合的三次谐波磁通幅值较大，三次谐波电动势的幅值更大，可达额定电压的 60%，这会导致绕组严重过电压而造成绝缘击穿，因此它在实际中不能使用；对 Y,y 或 Y,yn 接线的三相心式变压器，经漏磁路闭合的三次谐波磁通幅值很小，三次谐波电动势的幅值也不大，但是对大容量变压器绝缘不利，因此只有容量在 1800kVA 以下的心式变压器才能采用接线；大容量变压器通常都有一侧接成三角形。

九、变压器并联运行

1. 理想并联及其条件

理想并联是指：(1) 空载时，各并联变压器之间没有环流，即要求 $\dot{U}_{20i} = \dot{U}_{20j}$ ；(2) 负载时，各变压器的负载与其容量成正比，即要求负载系数 $\beta_i = \beta_j$ ，并且各电流同相位。这里 i, j 为台号，并且 $i \neq j$ 。

理想并联条件有：

- (1) 额定电压相同，通常指**变比相同**；

- (2) 连接组别相同;
 - (3) 短路电压百分数相同或短路阻抗标么值相同;
 - (4) 短路阻抗角相同。(一般都能满足)
2. 条件不满足时变压器并联运行的后果

(1) 变比不同——后果是变压器之间出现环流

环流的大小与变比差有关, 一般变比相对误差 $\Delta K = \frac{|K_i - K_j|}{\sqrt{K_i K_j}}$ 每相差 1%, 环流约增加 10%

的额定电流, 因此实际允许变比有误差, 但是要求 ΔK 不超过 0.5%。环流的方向是由变比小的变压器发出, 而变比大的变压器吸收, 因此, 如果变比不同的变压器并联运行时, 希望变比小的变压器容量大一些, 而变比大的则容量小一些, 原因是容量大额定电流就大, 提供环流的能力也强。

- (2) 连接组不同——后果是一定出现极大的环流。所以实际禁止并联。
- (3) 短路电压百分数不同——后果是负载系数不等。具体分配关系如下

$$\text{各台变压器的负载系数为 } \beta_j = \frac{S_{2j}}{S_{Nj}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{S_{Ni}}{u_{Ki}}} S_2$$

$$\text{各台变压器的负载为 } S_{2j} = \frac{\frac{S_{Nj}}{u_{Kj}}}{\sum_{i=1}^n \frac{S_{Ni}}{u_{Ki}}} S_2 = \beta_j S_{Nj}$$

式中: S_2 ——并联变压器的总负载; S_{Ni} ——各台变压器的额定容量; u_{Ki} ——各台变压器的短路电压百分数。

可见, 负载系数与短路电压百分数成反比, 短路电压百分数小的负载系数大, 最小的负载系数最大。实际允许短路电压百分数不同的变压器并联运行, 但是希望短路电压百分数大的变压器容量小、而短路电压百分数小的容量大。

(4) 短路阻抗角——对容量相差不大的变压器, 短路阻抗角一般是相同的, 即本条件通常能够满足。

十、变压器过渡过程

1. 突然短路

$$\text{设 } u_1 = \sqrt{2}U_{1N\phi} \sin(\omega t + \alpha)$$

突然短路电流的表达式:

(1) 一般表达

$$i_k = \sqrt{2}I_k \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) - \sqrt{2}I_k \sin(\alpha - \varphi_k) e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$\varphi_k = \tan^{-1} \frac{X_k}{r_k} \approx 90^\circ \text{——短路阻抗角; } \tau = \frac{L_k}{\omega r_k} = \frac{X_k}{\omega r_k} \text{——时间常数;}$$

$$I_K = \frac{U_{1N\phi}}{Z_k} \text{ 或 } I_K^* = \frac{1}{Z_k^*} \text{——稳态短路电流, } Z_k = \sqrt{r_k^2 + x_k^2} \text{——短路阻抗}$$

(2) $\alpha = 0^\circ$ 或 180° 时, 即在电压过最大值瞬间发生短路, 短路电流表达式为

$$i_k\left(\frac{T}{2}\right) = \sqrt{2}I_K \sin(180^\circ \mp 90^\circ) \pm \sqrt{2}I_K e^{-\frac{t}{\tau}} = \pm \sqrt{2}I_K (1 + e^{-\frac{\pi_k}{x_k}}) = i_{\max} \approx \pm 2(\sqrt{2}I_K)$$

即在电压过 0 瞬间发生短路, 短路后经过半个周期电流达到最大值 (最大值的条件)。

(3) $\alpha = \pm 90^\circ$ 时, 即在电压过 0 瞬间发生短路, 短路电流表达式为

$$i_k = \sqrt{2}I_K \sin(\omega t + \begin{matrix} +0^\circ \\ -180^\circ \end{matrix})$$

将直接进入稳态, 此种情况短路电流最不严重。

突然短路的危害:

(1) 危害: 绕组过热; 绕组机械 (结构) 损坏

(2) 原因: 短路电流大。

2. 空载合闸 (投入) —— 后果是出现励磁涌流

(1) 出现励磁涌流的原因

内因 (根本原因): 磁路饱和;

外因: 合闸时的电压瞬时值, 在过 0 时合闸最严重; 在过最大值时不出现。

(2) 出现最严重励磁涌流的条件

在电压过 0 瞬间合闸, 经过半个周期出现。

最大值约为稳态空载电流的数十乃至上百倍, 即数倍额定电流。