

《电机学》习题解答

第1章

1-4 铁心中的磁滞损耗和涡流损耗是怎样产生的，它们各与哪些因素有关？

答：磁滞损耗：铁磁材料置于交变磁场中，被反复交变磁化，磁畴间相互摩擦引起的损耗。经验公式 $p_h = C_h f B_m^n V$ 。与铁磁材料的磁滞损耗系数、磁场交变的频率、铁心的体积及磁化强度有关；
涡流损耗：交变的磁场产生交变的电场，在铁心中形成环流（涡流），通过电阻产生的损耗。经验公式 $p_e \approx C_{Fe} f^{1.3} B_m^2 G$ 。与材料的铁心损耗系数、频率、磁通及铁心重量有关。

1-8 解：∵ 磁路左右对称∴ 可以从中间轴线分开，只考虑右半磁路的情况：

$$\text{铁心、气隙截面 } A = A_\delta = 0.025 \times 1.25 \times 10^{-2} \times 0.93 m^2 = 2.9 \times 10^{-4} m^2$$

(考虑边缘效应时，通长气隙截面边长上加一个气隙的长度；气隙截面可以不乘系数)

$$\text{气隙长度 } l_\delta = 2\delta = 5 \times 10^{-4} m$$

$$\text{铁心长度 } l = \left(\frac{7.5}{2} - \frac{1.25}{2} \right) \times 2 + \left(5 - \frac{1.25}{2} + \frac{1.25}{2} \right) \times 2 cm = 16.25 \times 10^{-2} m$$

$$\text{铁心、气隙中的磁感应强度 } B = B_\delta = \frac{\Phi}{2A} = \frac{7.5 \times 10^{-4}}{2 \times 2.9 \times 10^{-4}} T = 1.29 T$$

(1) 不计铁心中的磁位降：

$$\text{气隙磁场强度 } H_\delta = \frac{B_\delta}{\mu_0} = \frac{1.29}{4\pi \times 10^{-7}} A/m = 1.0 \times 10^6 A/m$$

$$\text{磁势 } F_I = F_\delta = H_\delta \cdot l_\delta = 1.0 \times 10^6 \cdot 5 \times 10^{-4} A = 500 A$$

$$\text{电流 } I = \frac{F_I}{N} = 0.5 A$$

(2) 考虑铁心中的磁位降：

$$\text{铁心中 } B = 1.29 T \quad \text{查表可知： } H = 700 A/m$$

$$\text{铁心磁位降 } F_{Fe} = H \cdot l = 700 \times 16.25 \times 10^{-2} A = 113 A$$

$$F_I = F_\delta + F_{Fe} = 500 A + 113 A = 613 A$$

$$I = \frac{F_I}{N} \approx 0.63 A$$

补充分析题：请查阅电机和变压器用的硅钢片，列出几种型号，并解释其型号（牌号）的

含义。绘制其中一种材料的磁化和损耗曲线。指出电机和变压器工作磁通密度通常选择在那个范围内？为什么？

答：通常选在膝点，因为电流增加磁场不会无限增加而是会饱和，所以为了利用尽量小的电流产生足够强的磁场，电机和变压器工作磁通密度通常选在膝点附近。

第 2 章

2-2 一台 50Hz 的变压器接到 60Hz 的电源上运行时，若额定电压不变，问激磁电流、铁耗、漏抗会怎样变化

答：（1）额定电压不变，则 $U_{1N} \approx E_1 = 4.44 f N_1 \Phi = 4.44 f' N_1 \Phi'$

又 $\frac{f'}{f} = \frac{60}{50} \Rightarrow \frac{\Phi'}{\Phi} = \frac{50}{60}$ ，即 $\Phi' = 5/6 \Phi$ 磁通降低，此时可认为磁路为线性的，

磁阻 $R_m = \frac{l}{\mu S}$ 不变，励磁磁势 $I_m \cdot N_1 = \Phi R_m$ ， $\therefore I_m' = 5/6 I_m$ ；

（2）铁耗： $p_{Fe} \propto B_m^\alpha f^\beta$ ， $\therefore \alpha > \beta$ 铁耗稍有减小；

（3） $x'_{1\sigma} = 2\pi f' \cdot L_{1\sigma} = \frac{6}{5} x_{1\sigma}$ ， $x'_{2\sigma} = 2\pi f' \cdot L_{2\sigma} = \frac{6}{5} x_{2\sigma}$

2-17 有一台三相变压器，额定容量 $S_N = 5000 \text{kVA}$ ，额定电压

$U_{1N}/U_{2N} = 10 \text{kV}/6.3 \text{kV}$ ，Y,d 联结，试求：（1）一次、二次侧的额定电流；

（2）一次、二次侧的额定相电压和相电流。

解：（1） $I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3} U_{1N}} = \frac{5000}{\sqrt{3} \times 10} \text{A} = 288.68 \text{A}$

$I_{2N} = \frac{S_N}{\sqrt{3} U_{2N}} = \frac{5000}{\sqrt{3} \times 6.3} \text{A} = 458.21 \text{A}$

（2）原边 Y 联结： $U_{1N\Phi} = \frac{U_{1N}}{\sqrt{3}} = \frac{10}{\sqrt{3}} \text{kV} = 5.77 \text{kV}$

$I_{1N\Phi} = I_{1N} = 288.68 \text{A}$

副边 Δ 联结： $U_{2N\Phi} = U_{2N} = 6.3 \text{kV}$

$I_{2N\Phi} = \frac{I_{2N}}{\sqrt{3}} = \frac{458.21}{\sqrt{3}} \text{A} = 264.55 \text{A}$

2-19 有一台单相变压器，已知参数为： $R_1 = 2.19 \Omega$ ， $X_{1\sigma} = 15.4 \Omega$ ， $R_2 = 0.15 \Omega$ ，

$X_{2\sigma} = 0.964\Omega$, $R_m = 1250\Omega$, $X_m = 12600\Omega$, $N_1/N_2 = 876/260$ 。当二次侧电压 $U_2 = 6000V$, 电流 $I_2 = 180A$, 且 $\cos\varphi_2 = 0.8$ (滞后) 时: (1) 画出归算到高压侧的 T 型等效电路; (2) 用 T 型等效电路和简化等效电路求 \dot{U}_1 和 \dot{I}_1 , 并比较其结果。

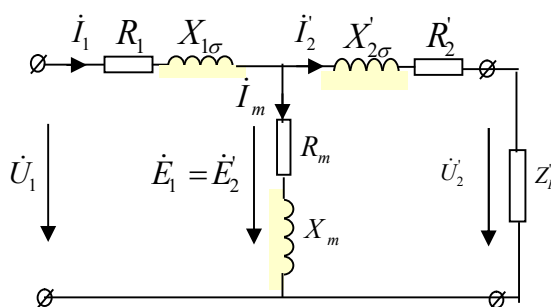
解: (1) 归算到高压侧:

$$R_1 = 2.19\Omega \quad X_{1\sigma} = 15.4\Omega$$

$$R_m = 1250\Omega \quad X_m = 12600\Omega$$

$$R'_2 = k^2 R_2 = \left(\frac{876}{260}\right)^2 0.15\Omega = 1.70\Omega$$

$$X'_{2\sigma} = k^2 X_{2\sigma} = \left(\frac{876}{260}\right)^2 0.964\Omega = 10.94\Omega$$



(2) T 型等效电路如图示:

$$\text{设 } \dot{U}'_2 = k \dot{U}_2 = 20215 \angle 0^\circ V$$

$$\text{则 } \dot{I}'_2 = \dot{I}/k = 53.42 \angle -36.88^\circ A$$

$$\begin{aligned} -\dot{E}_1 &= -\dot{E}'_2 = \dot{U}'_2 + \dot{I}'_2 Z'_2 \\ &= 20215 \angle 0^\circ V + 53.42 \angle -36.88^\circ A \cdot (1.70 + j10.94)\Omega = 20642.4 \angle 1.15^\circ V \end{aligned}$$

$$\dot{I}_m = \frac{-\dot{E}_1}{\dot{Z}_m} = \frac{20642.4 \angle 1.15^\circ V}{(1250 + j12600)\Omega} = 1.63 \angle -83.18^\circ A$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_m + \dot{I}'_2 = 1.63 \angle -83.18^\circ A + 53.42 \angle -36.88^\circ A = 54.56 \angle -38.12^\circ A$$

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 \cdot Z_1 = 21279.4 \angle 2.70^\circ V$$

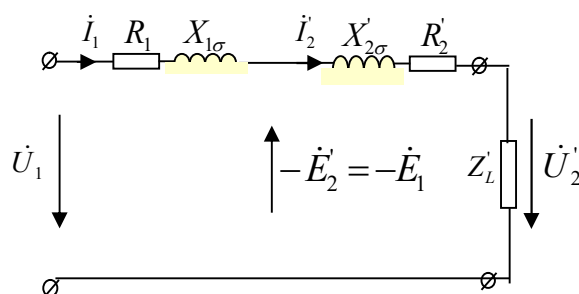
简化等效电路如右图:

$$R_k = R_1 + R'_2 = 3.89\Omega$$

$$X_k = X_{1\sigma} + X'_{2\sigma} = 26.34\Omega$$

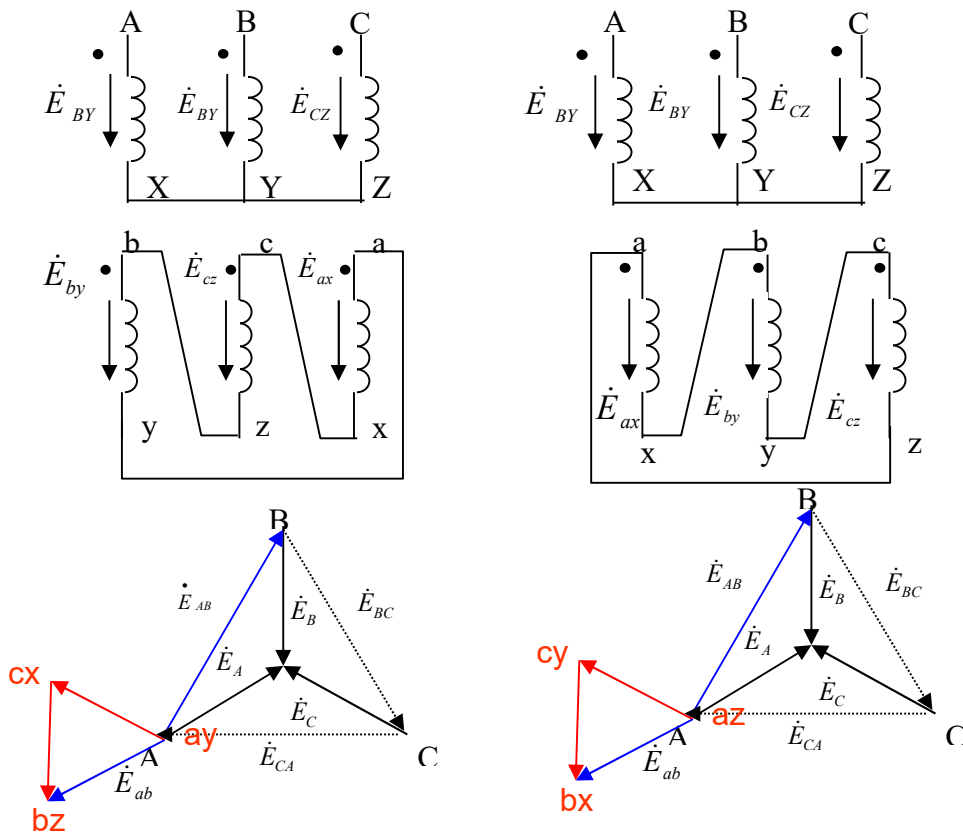
$$\dot{I}_1 = \dot{I}'_2 = 53.42 \angle -36.88^\circ A$$

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 + \dot{I}_1 \cdot Z_k = 21254.0 \angle 2.80^\circ V$$



由于在满载的情况下 $I_m \ll I_1$ ，励磁支路可以忽略不计，所以两种方法计算的结果相差不大，在误差允许的范围之内。

2-20 在图中，各铅垂线上对应的高、低压绕组绕于同一铁心柱上。已知 A、B、C 为正相序，试判断联结组 a 和 b 的组号。



由图可以看出两组均为 Y,d7

2-22 有一台 1000kVA，10kV/6.3kV 的单相变压器，额定电压下的空载损耗为 4900W，空载电流为 0.05（标么值），额定电流下 75°C 时的短路损耗为 14000W，短路电压为 5.2%（百分值）。设归算后一次和二次绕组的电阻相等，漏抗亦相等，试计算：（1）归算到一次侧时 T 型等效电路的参数；（2）用标么值表示时近似等效电路的参数；（3）负载功率因数为 0.8（滞后）时，变压器的额定电压调整率和额定效率；（4）变压器的最大效率，发生最大效率时负载的大小（ $\cos \varphi_2 = 0.8$ ）。

解：（1）归算到一次侧等效电路的参数：

空 载 试 验 在 低 压 侧 进 行 $U_0 = U_{2N} = 6300\text{V}$ ，

$$I_0 = I_0^* \cdot I_{2N} = 0.05 \cdot \frac{1000}{6.3} A = 7.94 A$$

$$\text{折算到高压侧: } R_m = k^2 \cdot \frac{P_0}{I_0^2} = \left(\frac{10}{6.3}\right)^2 \cdot \frac{4900}{7.94^2} \Omega = 196 \Omega$$

$$|Z_m| = k^2 \frac{U_0}{I_0} = \left(\frac{10}{6.3}\right)^2 \cdot \frac{6300}{7.94} \Omega = 2000 \Omega$$

$$X_m = \sqrt{|Z_m|^2 - R_m^2} = \sqrt{2000^2 - 196^2} \Omega = 1990.4 \Omega$$

$$\text{短路试验在高压侧进行 } U_k = U_k \% \times U_{1N} = 5.2\% \cdot 10 kV = 520 V$$

$$I_k = I_{1N} = \frac{S_N}{U_{1N}} = \frac{1000}{10} A = 100 A$$

$$\text{所以: } R_{k75^\circ c} = \frac{P_{k75^\circ c}}{I_k^2} = \frac{14000}{100^2} \Omega = 1.4 \Omega$$

$$|Z_k| = \frac{U_k}{I_k} = \frac{520}{100} \Omega = 5.2 \Omega$$

$$X_k = \sqrt{|Z_k|^2 - R_{k75^\circ c}^2} = \sqrt{5.2^2 - 1.4^2} \Omega = 5.0 \Omega$$

$$\text{即: } R_1 = R_2' = \frac{R_{k75^\circ c}}{2} = 0.70 \Omega, \quad X_{1\sigma} = X_{2\sigma}' = \frac{X_k}{2} = 2.5 \Omega$$

(2) 标么值:

$$\text{高压侧的电阻基准值 } Z_b = \frac{U_{1N}}{I_{1N}} = \frac{U_{1N}^2}{S_{1N}} = 100 \Omega$$

$$\therefore R_m^* = \frac{R_m}{Z_b} = 1.96, \quad X_m^* = \frac{X_m}{Z_b} = 19.9$$

$$R_k^* = \frac{R_k}{Z_b} = 0.014, \quad X_k^* = \frac{X_k}{Z_b} = 0.05$$

(3) 变压器额定电压调整率和额定效率:

$$\Delta U_N = I^* (R_k^* \cos \varphi_2 + X_k^* \sin \varphi_2) \times 100\%$$

$$= 1 \times (0.014 \times 0.8 + 0.05 \times 0.6) \times 100\% = 4.12\%$$

$$\eta_N = \left(1 - \frac{P_0 + P_{kN}}{S_N \cos \varphi_2 + P_0 + P_{kN}} \right) \times 100\% = 97.69\%$$

(4) 变压器效率最大时, 可变损耗等于不变损耗

$$I^* = \sqrt{\frac{P_0}{P_k}} = \sqrt{\frac{4900}{14000}} = 0.5916$$

$$\text{最大效率: } \eta_{\max} = 1 - \frac{P_0 + I^* \cdot P_{kN}}{S_N I^* \cos \varphi_2 + P_0 + I^* \cdot P_{kN}} = 97.97\%$$

2-26 某变电所有两台组号为 Y,yn0 的三相变压器并联运行，其数据为

第一台： $S_N = 180\text{kVA}$ ， $U_{1N}/U_{2N} = 6.3\text{kV}/0.4\text{kV}$ ， $Z_k^* = 0.07$ ；

第二台： $S_N = 320\text{kVA}$ ， $U_{1N}/U_{2N} = 6.3\text{kV}/0.4\text{kV}$ ， $Z_k^* = 0.065$ 。

试计算：（1）当总负载为 400kVA 时，每台变压器分担多少负载；（2）在每台变压器均不过载的情况下，并联组的最大输出是多少？

解：（1）当 $S = 400\text{kVA}$ 时，

设第一台变压器分配负载为 S_I ，则第二台变压器的负载 $S_{II} = 400 - S_I$ ，

满足：

$$\frac{S_I / S_{IN}}{S_{II} / S_{IIN}} = \frac{Z_{kII}^*}{Z_{kI}^*}, \text{ 带入数值计算可得: } \begin{aligned} S_I &= 137\text{kVA} \\ S_{II} &= 263\text{kVA} \end{aligned}$$

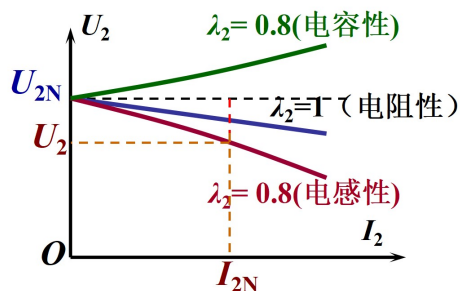
（2）求 S_{\max} ：负载增加时， Z_k^* 小的变压器（第二台）先满载，此时

$$S_{II} = S_{IIN} = 320\text{kVA}$$

$$\text{又 } \frac{S_I / S_{IN}}{1} = \frac{Z_{kII}^*}{Z_{kI}^*} \Rightarrow S_I = 167.1\text{kVA}$$

$$S_{\max} = S_I + S_{II} = (320 + 167.1)\text{kVA} = 487.1\text{kVA}$$

补充分析题：变压器在不同性质负载时的外特性差别较大，绘制感性、阻性和容性时变压器外特性曲线。试分析变压器负载运行时引起二次电压变化的原因是什么？当二次侧带什么性质负载时有可能使电压变化率为零？（上交，2022 年考题）（上交）



答：教材图 2-29。

引起二次端电压变化的内因是变压器本身的漏阻抗,外因是负载电流的大小和性质。当二次侧带容性负载时有可能使电压变化率为零。(二次电压调整率的大小和这些因素关系为 $\Delta U = \beta (R_k \cos \phi_2 + X_k \sin \phi_2)$,其中, R_k^* 和 X_k^* 分别为变压器短路电阻和短路电抗的标么值; β 为负载电流标么值($\beta = I_2 / I_{2N}$); ϕ_2 为负载电流滞后 U_2 的角度。只有二次侧带电容性负载,即 ϕ_2 为负数时, $\sin \phi_2$ 也为负数, ΔU 才有可能为零。)