

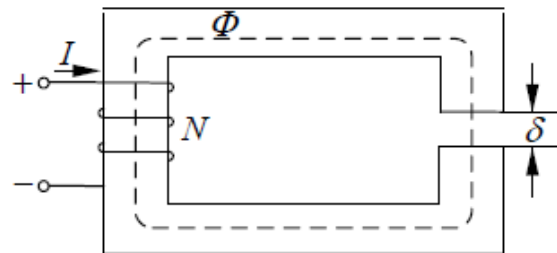
I 变压器习题课

主讲教师：马明晗

习题二

2. 如图，如果铁心用 D_{23} 硅钢片叠成，截面积 $A_c = 12.25 \times 10^{-4} \text{m}^2$ ，填充系数 $k = 0.92$ ，铁心的平均长度 $l_c = 0.4 \text{m}$ ，空气隙 $\delta = 0.5 \times 10^{-3} \text{m}$ ，线圈的匝数为 600 匝。试求产生磁通 $\Phi = 11 \times 10^{-4} \text{Wb}$ 时所需的励磁磁动势和励磁电流。（不考虑气隙的边缘效应）

D_{23} 硅钢片磁化曲线数据如下（50Hz，0.5mm 厚）



$B(\text{T})$	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6
$H \times 100(\text{A/m})$	1.58	1.81	2.10	2.50	3.06	3.83	4.93	6.52	8.90	12.6	20.1	37.8

解： $B_{\text{铁}} = \frac{\Phi}{S_{\text{铁}}} = \frac{\Phi}{A_c \times k} = \frac{11 \times 10^{-4}}{12.25 \times 10^{-4} \times 0.92} = 0.976 \text{ T}$

$B_{\text{气}} = \frac{\Phi}{S_{\text{气}}} = \frac{\Phi}{A_c} = \frac{11 \times 10^{-4}}{12.25 \times 10^{-4}} = 0.898 \text{ T}$

B-H 线性段斜率不变，由 $\frac{1.0 - 0.9}{3.83 - 3.06} = \frac{0.976 - 0.9}{H_{\text{铁}} - 3.06}$ 得 $H_{\text{铁}} = 3.645 \times 10^2 \text{ A/m}$

$H_{\text{气}} = \frac{B_{\text{气}}}{\mu_0} = \frac{0.898}{4\pi \times 10^{-7}} = 0.715 \times 10^6 \text{ A/m}$

$F = H_{\text{铁}} L_c + H_{\text{气}} \delta = 3.645 \times 10^2 \times 0.4 + 0.715 \times 10^6 \times 0.5 \times 10^{-3} = 503 \text{ A}$

$I = \frac{F}{N} = \frac{503}{600} = 0.839 \text{ A}$

0.9	$B_{\text{铁}}$	1.0
3.06	$H_{\text{铁}}$	3.83

考察内容：

1、 $\Phi = B \cdot S$

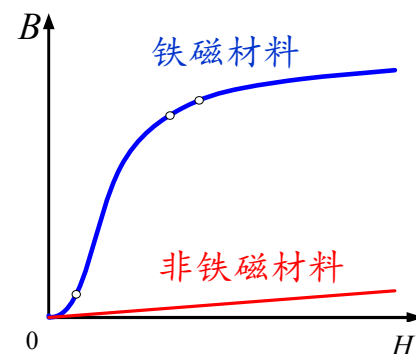
2、 $B = \mu H$

3、全电流定律

磁路的基尔霍夫定律

$F = \sum H \cdot L = \sum N \cdot I$

4、 $B-H$ 曲线



5、真空磁导率

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$

习题三

3. 变压器铭牌数据为 $S_N=100\text{kVA}$ ， $U_{1N}/U_{2N}=6300/400\text{V}$ ，Y,yn联结，如电压由6300V改为10000V，假定用改换高压绕组的办法来满足电源电压的改变，若保持低压绕组匝数每相为40匝不变，则新的高压绕组每相匝数应改为多少？如不改变会有什么后果？

解：Y,yn联结，改换后：

$$N_1 = N_2 \frac{U'_{1N}/\sqrt{3}}{U_{2N}/\sqrt{3}} = 40 \times \frac{10000}{400} = 1000 \text{匝}$$

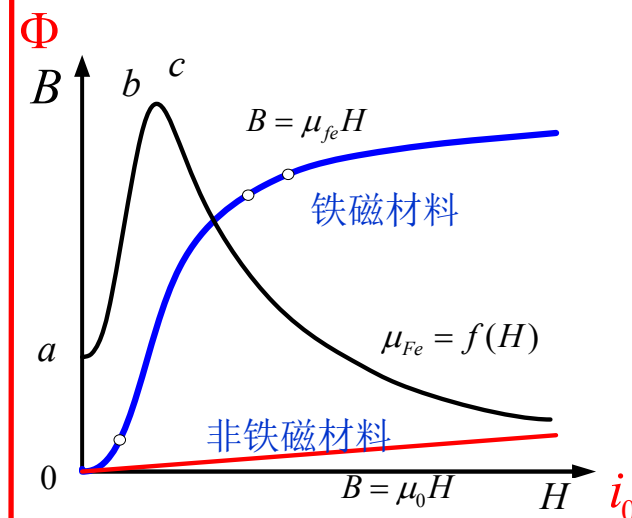
若不变，则随着 $U'_{1N} \uparrow$ ， $\Phi_m = U'_{1N}/4.44fN_1 \uparrow$ ，空载电流 $i_0 \uparrow \uparrow$

铁耗和铜耗都会增大，时间久了有可能烧毁变压器。

考察内容：

1、 $U \approx 4.44 f N \Phi_m$

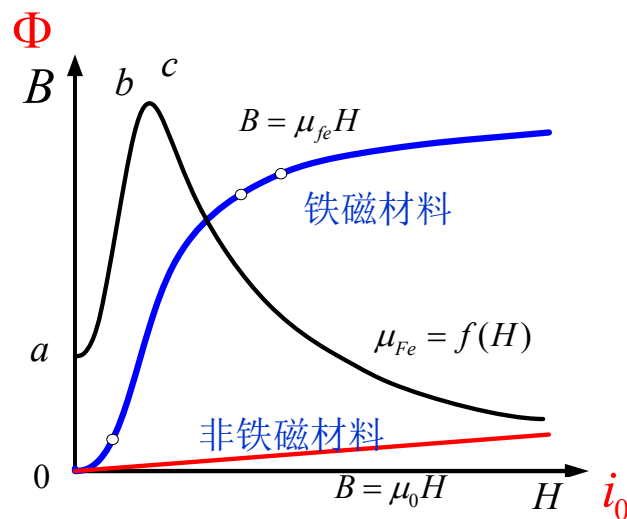
2、磁化特性曲线



习题四

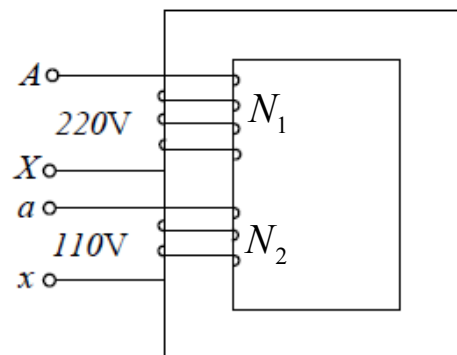
思考题4. 变压器的额定电压为220/110V，若不慎将低压方误接到220V 电源上，试问励磁电流将会发生什么变化？变压器将会出现什么现象？

答：如果将电源上，110V绕组接到220V，主磁通 $\Phi_m \approx \frac{U}{4.44fN}$ 将增到原来的220/110倍，由于铁心饱和，励磁 电流将增大很多，此时铁耗和铜耗都很大，时间久了有可能烧毁变压器。



习题四

1. 单相变压器电压为220/110V，设高压侧加220V电压，空载激磁电流为 I_0 ，主磁通为 Φ_0 。若 Xa 联在一起，在 Ax 端加电压330V，问此时激磁电流多大？主磁通是多大？若 X 、 x 联接在一起，在 A 、 a 端加110V 电压，问激磁电流和主磁通又为多大？



考察内容：

$$1、U \approx 4.44 f N \Phi_m$$

$$2、F = N \cdot I$$

解： $\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{2}{1} \Rightarrow N_2 = \frac{1}{2} N_1$

1) X, a 连在一起为顺极性串联，此时 $N' = N_1 + N_2 = \frac{3}{2} N_1, U' = \frac{330}{220} U_1 = \frac{3}{2} U_1$

则 $U' = 4.44 f N' \Phi' \Rightarrow \frac{3}{2} U_1 = 4.44 f \frac{3}{2} N_1 \Phi' \Rightarrow \Phi' = \frac{U_1}{4.44 f N_1} = \Phi_0$ ，磁通不变

所以，磁动势 F 不变，由 $F = N \cdot I$ 得 $F = N' I' = \frac{3}{2} N_1 I' = N_1 I \Rightarrow I' = \frac{2}{3} I$

2) X, x 连在一起为反极性串联，此时 $N'' = N_1 - N_2 = \frac{1}{2} N_1, U'' = \frac{110}{220} U_1 = \frac{1}{2} U_1$

则 $U'' = 4.44 f N'' \Phi'' \Rightarrow \frac{1}{2} U_1 = 4.44 f \frac{1}{2} N_1 \Phi'' \Rightarrow \Phi'' = \frac{U_1}{4.44 f N_1} = \Phi_0$ ，磁通不变

所以，磁动势 F 不变，由 $F = N \cdot I$ 得 $F = N'' I'' = \frac{1}{2} N_1 I'' = N_1 I \Rightarrow I'' = 2I$

习题四

2. 将一台1000匝铁心线圈接到110V、50Hz的交流电源上，由安培表和瓦特表的读数可得知 $I_1=0.5A$ ， $P_1=10W$ ；把铁心取出后电流和功率就变为100A和10000W，设不计漏磁，试求：

- (1) 两种情况下的参数，等效电路和相量图；
- (2) 有铁心时的磁化电流和铁耗电流，无铁心时的无功电流和有功电流；
- (3) 两种情况下磁通的最大值。

解：无铁芯时，所消耗功率全部为线圈本身电阻所消耗，有铁芯时，所消耗功率为线圈本身电阻和铁耗共同消耗。

1) 无铁芯时

$$Z_1 = U_1 / I_1 = 110 / 100 = 1.1 \Omega$$

$$r_1 = P_1 / I_1^2 = 10000 / 100^2 = 1 \Omega$$

$$x_1 = \sqrt{Z_1^2 - r_1^2} = \sqrt{1.1^2 - 1^2} = 0.46 \Omega$$

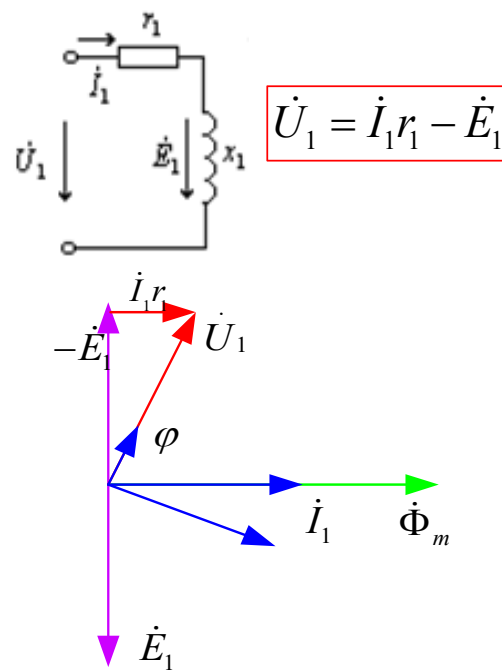
$$\varphi = \tan^{-1} \frac{x_1}{r_1} = \tan^{-1} \frac{0.46}{1} = 24.7^\circ$$

$$I_{0r} = I_1 \sin \varphi = 100 \times \sin 24.7^\circ = 41.79 A \quad (\text{无功电流})$$

$$I_{0a} = I_1 \cos \varphi = 100 \times \cos 24.7^\circ = 90.86 A \quad (\text{有功电流})$$

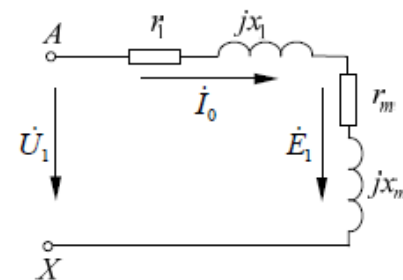
$$E_1 = I_1 x_1 = 100 \times 0.46 = 46 V \text{ 或 } E_1 = \sqrt{U_1^2 - (I_1 r_1)^2}$$

$$\Phi_m = E_1 / 4.44 f N_1 = 46 / 4.44 \times 50 \times 1000 = 0.000207 Wb$$



考察内容：

1、空载运行等效电路图



2、空载运行基本方程式

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 z_1$$

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

$$\dot{I}_0 = \frac{-\dot{E}_1}{z_m}$$

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

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

习题四

2) 有铁芯时

$$Z_1 = U_1 / I_1 = 110 / 0.5 = 220 \Omega$$

$$r_1 + r_m = P_1 / I_1^2 = 10 / 0.5^2 = 40 \Omega$$

$$r_m = 40 - r_1 = 40 - 1 = 39 \Omega$$

若不计漏磁,

$$x_m = \sqrt{Z_1^2 - (r_1 + r_m)^2} = \sqrt{220^2 - 40^2} = 216.33 \Omega$$

$$\psi = \tan^{-1} \frac{x_m}{r_m} = \tan^{-1} \frac{216.33}{39} = 79.78^\circ$$

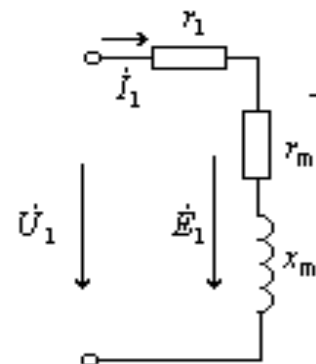
$$I_{0r} = I_1 \sin \psi = 0.5 \times \sin 79.78^\circ = 0.49 \text{ A (磁化电流)}$$

$$I_{0a} = I_1 \cos \psi = 0.5 \times \cos 79.78^\circ = 0.089 \text{ A (铁耗电流)}$$

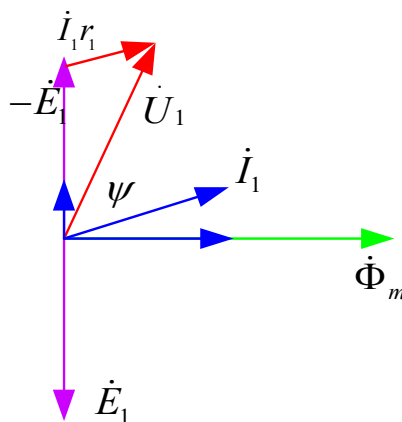
$$Z_m = \sqrt{x_m^2 + r_m^2} = \sqrt{216.33^2 + 39^2} = 219.8 \Omega$$

$$E_1 = I_1 Z_m = 0.5 \times 219.8 = 109.9 \text{ V}$$

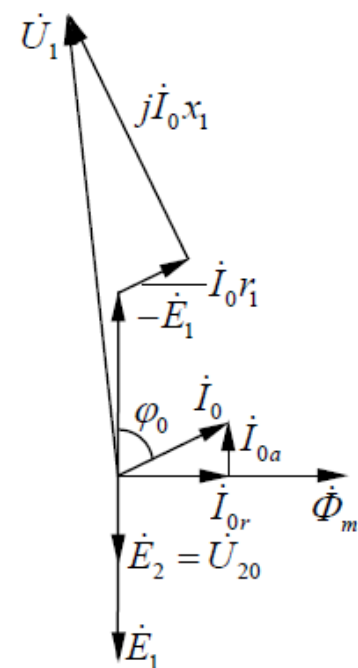
$$\Phi_m = E_1 / 4.44 f N_1 = 109.9 / 4.44 \times 50 \times 1000 = 0.000495 \text{ Wb}$$



$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 r_1 - \dot{E}_1$$

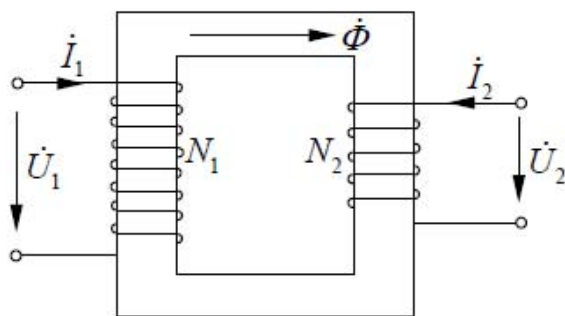


3、空载运行相量图

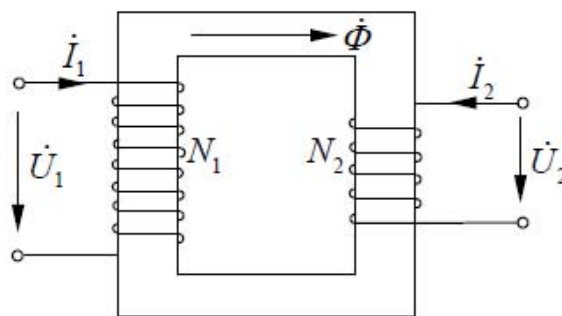


习题五

3. 变压器原、副边匝数比 $N_1/N_2 = 3.5/1.5$ ，已知 $i_1 = 10\sin\omega t$ A，写出图中(a)、(b)两种情况下副边电流 i_2 的表达式（忽略激磁电流）



(a)



(b)

考察内容：

1、全电流定律

$$F = \sum N \cdot I$$

2、磁动势平衡关系

$$\dot{F}_m = \dot{F}_1 + \dot{F}_2$$

解：(a) $\dot{F}_m = \dot{F}_1 + \dot{F}_2 \Rightarrow N_1 \dot{I}_m = N_1 \dot{I}_1 + N_2 \dot{I}_2$
 $\because \dot{I}_m = 0$
 $\therefore N_1 \dot{I}_1 + N_2 \dot{I}_2 = 0 \Rightarrow \dot{I}_2 = -\frac{N_1}{N_2} \dot{I}_1$
 $\therefore i_2 = -\frac{N_1}{N_2} i_1 = -\frac{3.5}{1.5} \times 10 \sin \omega t$
 $= -23.33 \sin \omega t \text{ A}$

(b) $\dot{F}_m = \dot{F}_1 - \dot{F}_2 \Rightarrow N_1 \dot{I}_m = N_1 \dot{I}_1 - N_2 \dot{I}_2$
 $\because \dot{I}_m = 0$
 $\therefore N_1 \dot{I}_1 - N_2 \dot{I}_2 = 0 \Rightarrow \dot{I}_2 = \frac{N_1}{N_2} \dot{I}_1$
 $\therefore i_2 = \frac{N_1}{N_2} i_1 = \frac{3.5}{1.5} \times 10 \sin \omega t$
 $= 23.33 \sin \omega t \text{ A}$

习题六

思考题3. 一台额定频率60Hz 的电力变压器，接于50Hz，电压为变压器额定电压的5/6 倍的电网上运行，试问此时变压器的磁饱和程度、激磁电流、激磁阻抗、漏电抗以及铁耗等的实际值、标么值与原设计值是否相同？

答：磁饱和程度**不变**、激磁电流**不变**、激磁阻抗**减小**、漏电抗**减小**以及铁耗**减小**

$$\Phi_m \approx \frac{U}{4.44 f N}$$

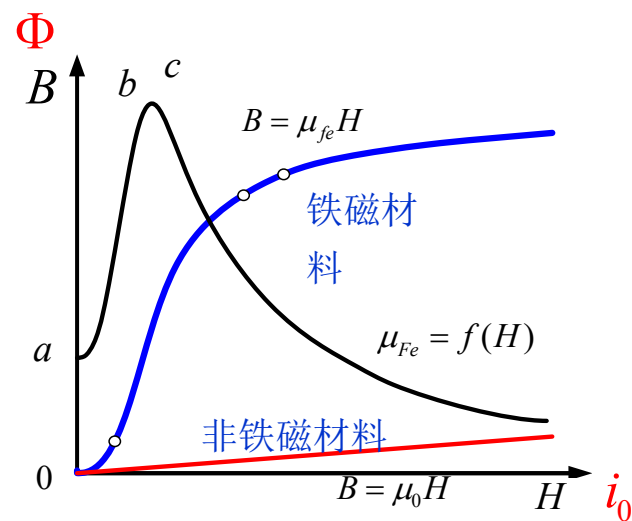
$$p_0 \propto f^\beta B^2$$

$$p_0 = I_0^2 r_m$$

$$x = \omega N^2 \Lambda = 2\pi f N^2 \Lambda$$

$$\Lambda = \frac{1}{R_m}$$

$$R_m = \frac{l}{\mu s}$$



习题六

1. 三相变压器的额定容量 $S_N=750\text{kVA}$ ，额定电压 $U_{1N}/U_{2N}=10000/400\text{V}$ ，**Y,d 联结**，在低压边做空载试验的数据为：电压 $U_{10}=400\text{V}$ ，电流 $I_{10}=65\text{A}$ ，空载损耗 $p_0=3.7\text{kW}$ 。在高压边做短路试验的数据为：电压 $U_{1k}=450\text{V}$ ，电流 $I_{1k}=35\text{A}$ ，短路损耗 $p_k=7.5\text{kW}$ 。求变压器参数的实际值和标么值，画出T型等效电路（假设漏阻抗 $z_1=z_2$ ，其中电阻 $r_1=r_2$ 和电抗 $x_1=x_2$ ，实验时室温 $\theta=25^\circ\text{C}$ ）。求出满载且 $\cos\varphi_2=0.8$ （滞后）时的电压调整率。

解：

$$k = \frac{U_{1\varphi}}{U_{2\varphi}} = \frac{10000/\sqrt{3}}{400} = 14.43 \quad I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}} = \frac{750}{\sqrt{3} \times 10} = 43.3 \text{ A} \quad I_{2N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{2N}} = \frac{750}{\sqrt{3} \times 0.4} = 1082.53 \text{ A}$$

$$\text{原边Y接, } \begin{cases} I_{1\varphi} = I_{1N} \\ U_{1\varphi} = U_{1N}/\sqrt{3} \end{cases} \quad \text{副边}\Delta\text{接, } \begin{cases} I_{2\varphi} = I_{2N}/\sqrt{3} \\ U_{2\varphi} = U_{2N} \end{cases}$$

$$\text{副边做空载试验, } Z_0 = U_{10}/I_{10} = \frac{400}{65/\sqrt{3}} = 10.659 \Omega$$

$$r_0 = \frac{p_0}{3I_0^2} = \frac{3.7 \times 10^3/3}{(65/\sqrt{3})^2} = 0.876 \Omega \quad x_0 = \sqrt{Z_0^2 - r_0^2} = \sqrt{10.659^2 - 0.876^2} = 10.623 \Omega$$

$$\text{折算到高压侧, } Z_m = Z'_0 = k^2 Z_0 = 14.43^2 \times 10.659 = 2220.625 \Omega$$

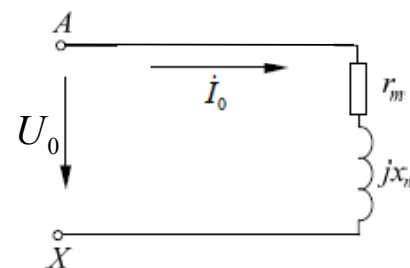
$$r_m = r'_0 = k^2 r_0 = 14.43^2 \times 0.876 = 182.5 \Omega$$

$$x_m = x'_0 = k^2 x_0 = 14.43^2 \times 10.623 = 2213.125 \Omega$$

考察内容：

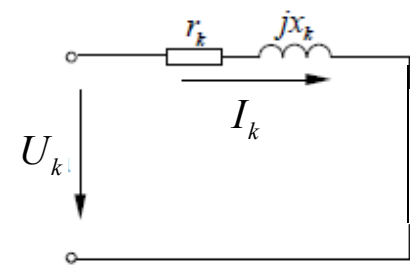
1、空载试验-求 k 、 p_0 、 z_m

低压边试验



2、短路试验-求 p_k 、 z_k 、 u_k

高压边试验



习题六

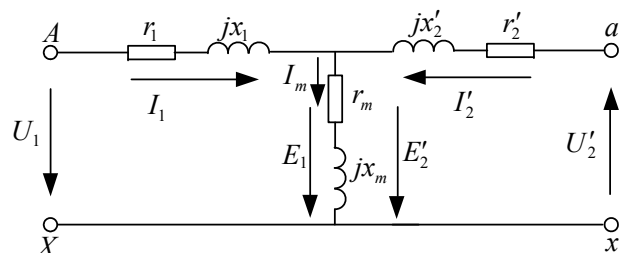
原边做短路试验, $Z_k = U_k / I_k = \frac{450 / \sqrt{3}}{35} = 7.423 \Omega$

$$r_k = \frac{p_k}{3I_k^2} = \frac{7.5 \times 10^3 / 3}{35^2} = 2.041 \Omega \quad x_k = \sqrt{Z_k^2 - r_k^2} = \sqrt{7.423^2 - 2.041^2} = 7.137 \Omega$$

折算到75°C, $r_{k75^\circ\text{C}} = r_k \frac{(235 + 75)}{235 + \theta} = 2.041 \times \frac{235 + 75}{235 + 25} = 2.434 \Omega$ $r_1 = r_2' = \frac{r_{k75^\circ\text{C}}}{2} = \frac{2.434}{2} = 1.217 \Omega$

$$x_1 = x_2' = \frac{x_k}{2} = \frac{7.137}{2} = 3.569 \Omega$$

T型等效电路图:



标么值: $Z_1 = \frac{U_{1\phi}}{I_{1\phi}} = \frac{10000 / \sqrt{3}}{43.3} = 133.34 \Omega$

$$Z_m^* = \frac{Z_m}{Z_1} = \frac{2220.625}{133.34} = 16.654 \quad r_m^* = \frac{r_m}{Z_1} = \frac{182.5}{133.34} = 1.369 \quad x_m^* = \frac{x_m}{Z_1} = \frac{2213.125}{133.34} = 16.598$$

$$r_1^* = r_2^* = \frac{r_1}{Z_1} = \frac{1.217}{133.34} = 0.0091 \quad x_1^* = x_2^* = \frac{x_1}{Z_1} = \frac{3.569}{133.34} = 0.0268$$

满载时, $I_2^* = 1, \beta = 1$

$$\Delta U = (\beta u_{kr} \cos \varphi_2 + \beta u_{kx} \sin \varphi_2) \times 100\% = r_k^* \cos \varphi_2 + x_k^* \sin \varphi_2 = \frac{r_k}{Z_1} \cos \varphi_2 + \frac{x_k}{Z_1} \sin \varphi_2$$

$$= 0.0183 \times 0.8 + 0.0535 \times 0.6 = 0.0467$$

考察内容:

$$3、r_{k75^\circ\text{C}} = r_k \frac{(235 + 75)}{235 + \theta}$$

4、电压调整率公式

$$\Delta U = \frac{U_{1N} - U_2'}{U_{1N}} \times 100\% \\ = (\beta u_{kr} \cos \varphi_2 + \beta u_{kx} \sin \varphi_2) \times 100\%$$

习题六

2. 三相变压器的额定容量 $S_N=5600\text{kVA}$ ，额定电压 $U_{1N}/U_{2N}=6000/3300\text{V}$ ，Y,d联结，空载损耗 $p_0=18\text{kW}$ 和短路损耗 $p_{kN}=56\text{kW}$ ，求：

(1) 当输出电流 $I_2=I_{2N}$ ， $\cos\varphi_2=0.8$ （滞后）时的效率 η ；

(2) 效率最大时的负载系数 β 。

解：1)
$$\beta = \frac{I_2}{I_{2N}} = 1$$
$$\eta = \left(1 - \frac{p_0 + \beta^2 p_{kN}}{\beta S_N \cos \varphi_2 + p_0 + \beta^2 p_{kN}}\right) \times 100\%$$
$$= \left(1 - \frac{18 + 56}{5600 \times 0.8 + 18 + 56}\right) \times 100\% = 98.38\%$$

2)
$$\eta = \eta_{\max} \text{ 时, } \beta = \sqrt{\frac{p_0}{p_{kN}}} = \sqrt{\frac{18}{56}} = 0.567$$

考察内容：

1、效率公式

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{P_2}{P_1} \times 100\% \\ &= \left(1 - \frac{p_{fe} + p_{cu}}{P_2 + p_{fe} + p_{cu}}\right) \times 100\% \\ &= \left(1 - \frac{p_0 + \beta^2 p_{kN}}{\beta S_N \cos \varphi_2 + p_0 + \beta^2 p_{kN}}\right) \times 100\%\end{aligned}$$

2、效率最大

不变损耗=可变损耗

→铁耗=铜耗

$$\rightarrow p_0 = \beta^2 p_{kN} \rightarrow \beta = \sqrt{\frac{p_0}{p_{kN}}}$$

习题六

3. 一台三相变压器， $S_N=20\text{kVA}$ $U_{1N}/U_{2N}=6/0.4\text{kV}$ ， 50Hz ， $p_{kN}=588\text{ W}$ ， $u_k=4\%$ ， $Y,yn0$ 联接。

(1) 求短路参数及阻抗电压的有功和无功分量；

(2) 作满载且 $\cos\varphi_1=0.8$ （滞后）时副方电压 U_2 、 $\cos\varphi_2$ 和简化相量图。

解：1) $I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}} = \frac{20 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 6 \times 10^3} = 1.925\text{ A}$

$$Z_{1N} = \frac{U_{1N} / \sqrt{3}}{I_{1N}} = \frac{6 \times 10^3 / \sqrt{3}}{1.925} = 1800\ \Omega$$

$$Z_k = u_k \cdot Z_{1N} = 4\% \times 1800 = 72\ \Omega$$

$$r_k = \frac{p_{kN} / 3}{I_{1N}^2} = \frac{588 / 3}{1.925^2} = 52.89\ \Omega$$

$$x_k = \sqrt{Z_k^2 - r_k^2} = \sqrt{72^2 - 52.89^2} = 48.84\ \Omega$$

$$u_{kr} = \frac{r_k}{Z_{1N}} = \frac{52.89}{1800} \times 100\% = 2.93\%$$

$$u_{kx} = \frac{x_k}{Z_{1N}} = \frac{48.84}{1800} \times 100\% = 2.71\%$$

$$\varphi = \text{tg}^{-1} \frac{u_{kx}}{u_{kr}} = \text{tg}^{-1} \frac{2.71}{2.93} = 42.77^\circ$$

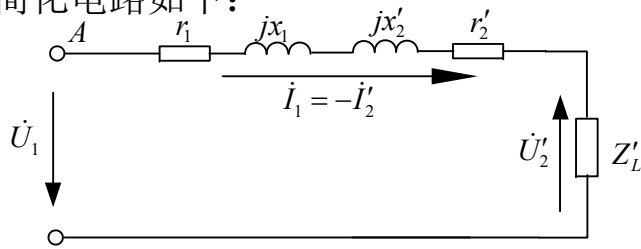
2) 设 $\dot{I}_1^* = -\dot{I}_2^* = 1 \angle 0^\circ$

$\because \cos\varphi_1 = 0.8$, 则 $\dot{U}_1^* = 1 \angle 36.87^\circ$

$\dot{U}_2^* = U_2^* \angle \varphi_2$

$Z_k^* = 0.04 \angle 42.77^\circ$

简化电路如下：



$$-\dot{U}_2'^* = \dot{U}_1^* - \dot{I}_1^* Z_k^* = 1 \angle 36.87^\circ - 0.04 \angle 42.77^\circ$$

$$= 0.8 + j0.6 - 0.0294 - j0.0272 = 0.96 \angle 36.62^\circ$$

$\therefore U_2^* = U_2' = 0.96$

则 $U_2 = U_2^* \cdot U_{2N} = 0.96 \times \frac{0.4}{\sqrt{3}} = 0.221\text{ kV}$

考察内容：

1、阻抗电压

$$u_k = Z_k^* = \frac{Z_k}{Z_{1N}}$$

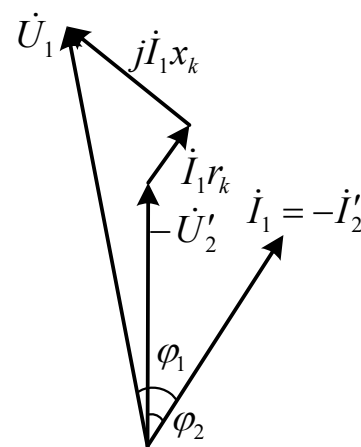
有功分量： $u_{kr} = r_k^* = \frac{r_k}{Z_{1N}}$

无功分量： $u_{kx} = x_k^* = \frac{x_k}{Z_{1N}}$

2、简化电路图和相量图

$\cos\varphi_2 = \cos 36.62^\circ = 0.803$

则简化相量图如下：



重点一【已知接线图，写出联结组别】

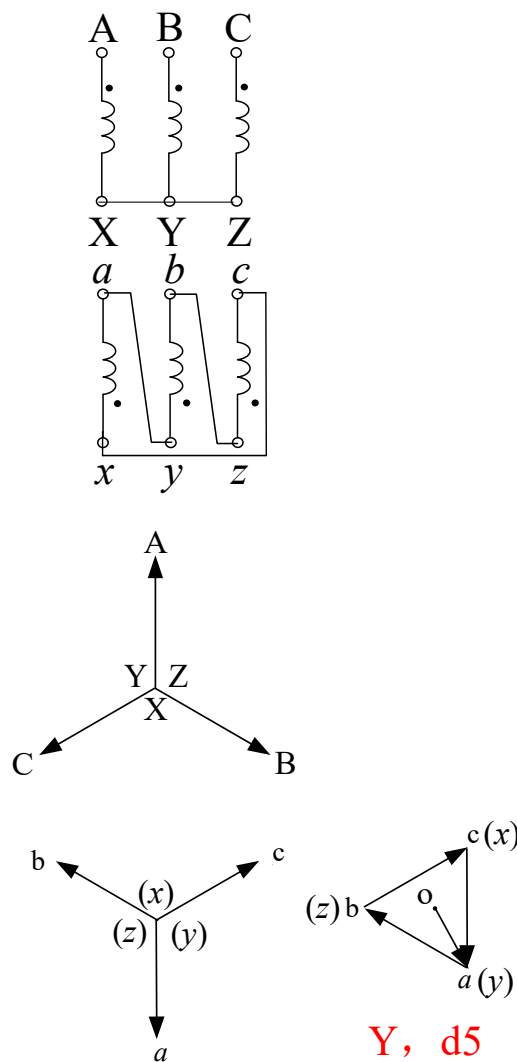
步骤①作原边位形图：在位形图中，作出A-X（原边Y接）或A-O（原边 Δ 接）绕组相量（0点方向）；顺时针旋转分别作出B-Y、C-Z（原边Y接）或B-O、C-O（原边 Δ 接）；

步骤②找平行：在接线图中找到与A-X对应的副边绕组，在位形图中作出副边绕组相量（平行于原边绕组相量，方向根据同名端标注确定）；同理作出B-Y、C-Z对应的副边绕组相量；

步骤③等电位点连接：按绕组连接图所示，在位形图中连接等电位点；

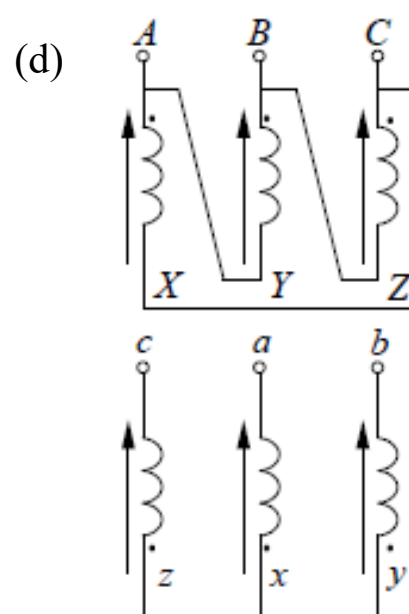
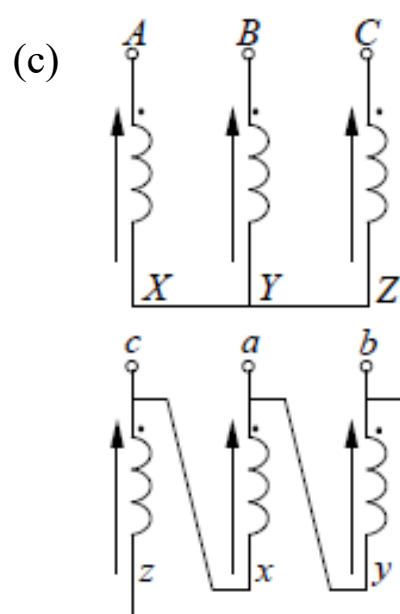
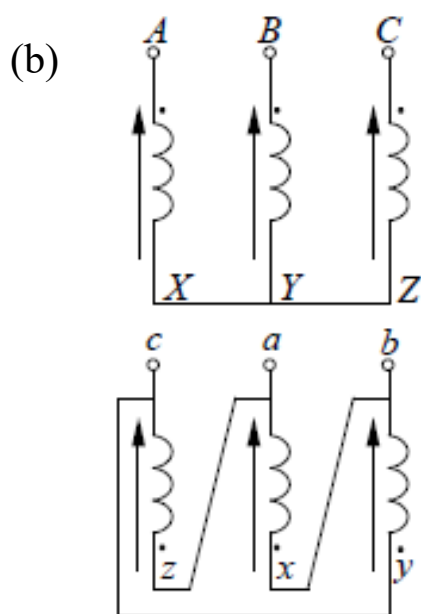
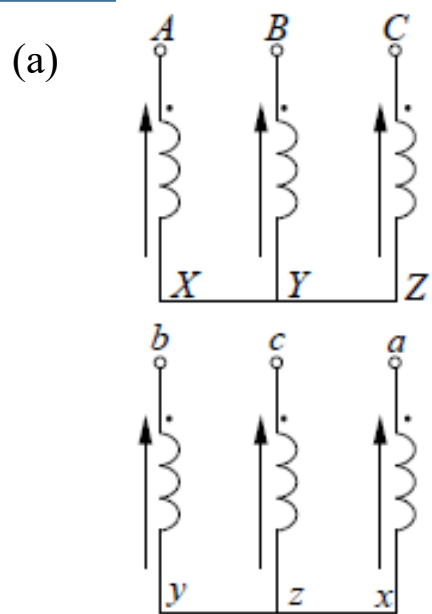
步骤④重心重合，确定时钟方向：将原副边位形图重心重合，找到 $a-o$ 向量，记录对应的时钟点数；

步骤⑤给出联结组别：根据原副边绕组联结法和记录的时钟点数即可写出联结组别；

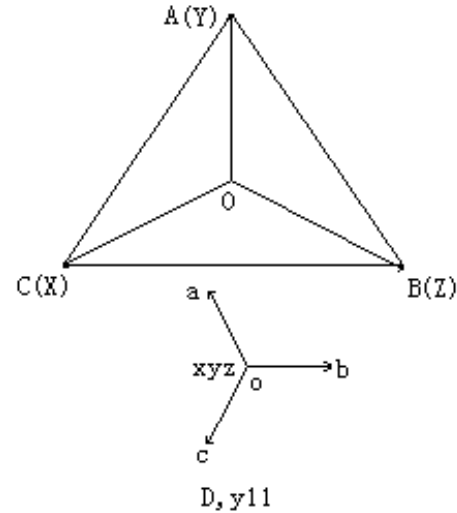
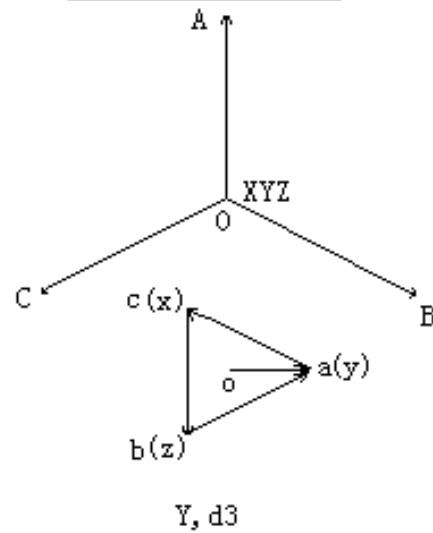
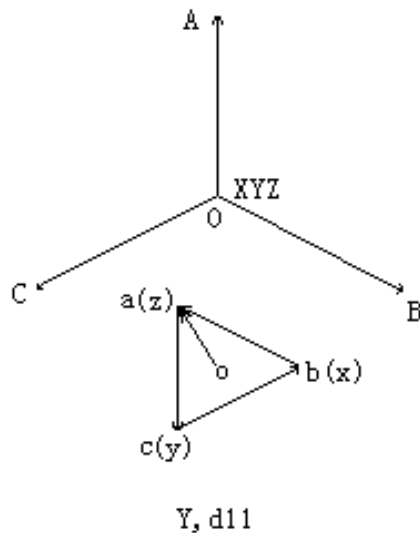
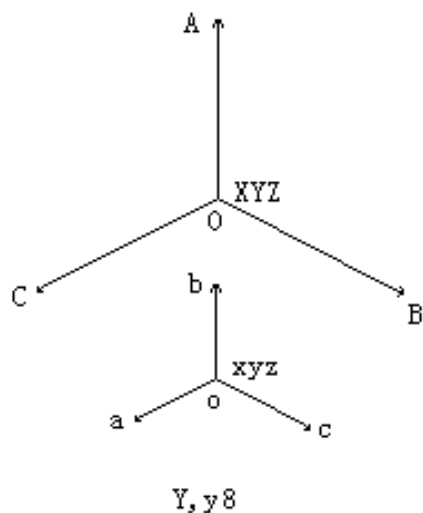


习题七

1. 根据接线图，按电势位形图定出联结组别



解:



习题七

重点二【已知联结组别画绕组接线图】

以Y, d5为例

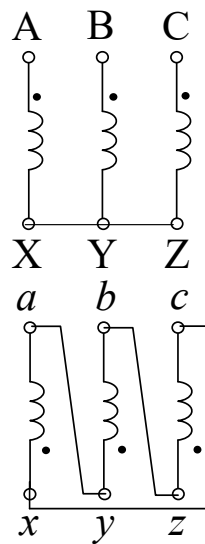
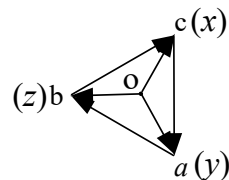
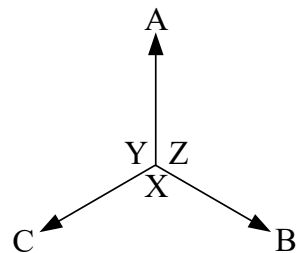
步骤①作位形图：在位形图中，确定 A 和 a 位置，作出 $A-X$ 和 $a-o$ ；在位形图中，顺时针旋转分别作出 $B-Y$ 和 $C-Z$ ， $b-o$ 和 $c-o$ ；确定 x, y, z 的位置，作出 $a-x$ ， $b-y$ ， $c-z$ （角形接法有两种）；

步骤②作原边绕组接线图：在接线图中，原边 $A-X$ 、 $B-Y$ 、 $C-Z$ 以及同名端正常顺序标注即可；原边 X 、 Y 、 Z 连接为一点，接成星型；

步骤③找平行：在位形图中，找到与原边 $A-X$ 绕组平行的副边绕组，在接线图中将该副边绕组与 $A-X$ 绕组放置在同一心柱上，根据原副边绕组相量是否同向，确定同名端的标注；同理找到 $B-Y$ 、 $C-Z$ 对应的副边绕组；

步骤④作副边绕组接线图：根据位形图中副边首末端的连接情况，在接线图中进行相应的连接，接成角型。

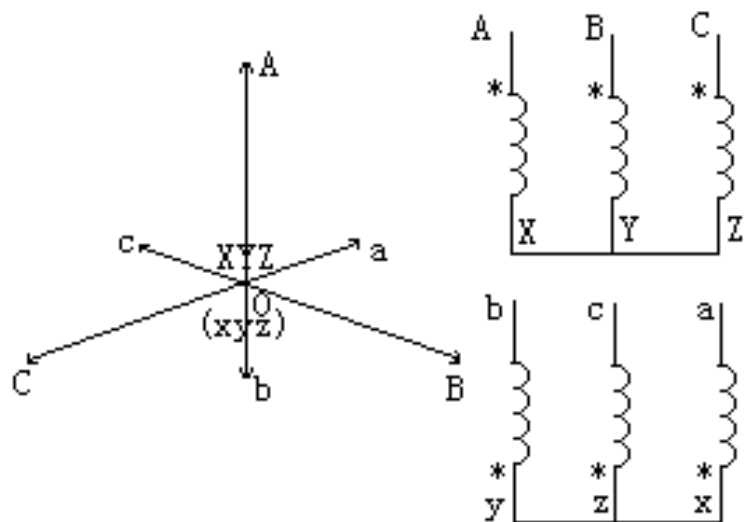
PS：原副边一侧带有角形连接（D）的联结组可以有两种接线图和位形图



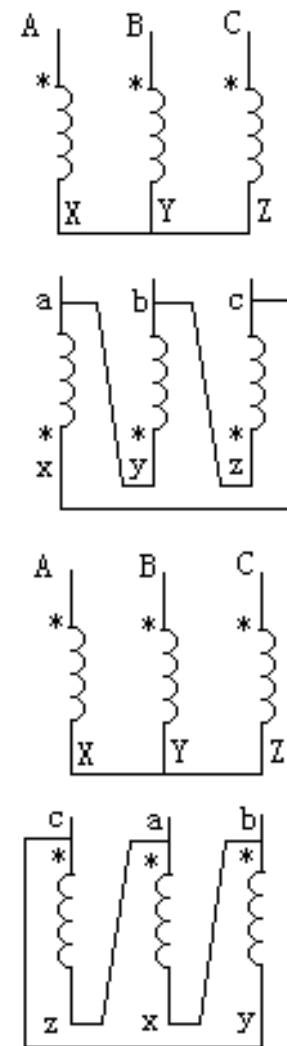
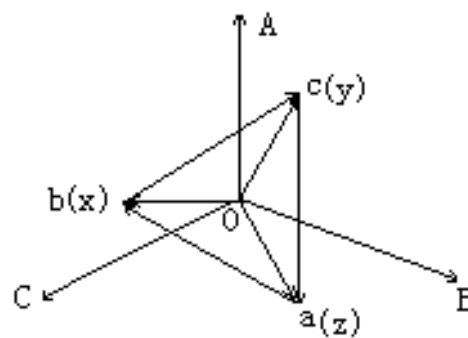
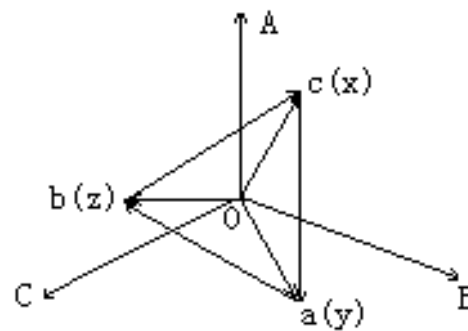
习题七

2. 根据下列联结组别按电势位形图画出接线图： (1) Y,y2 (2) Y,d5 (3) D,y1 (4) Y,y8

解： (1) Y,y2

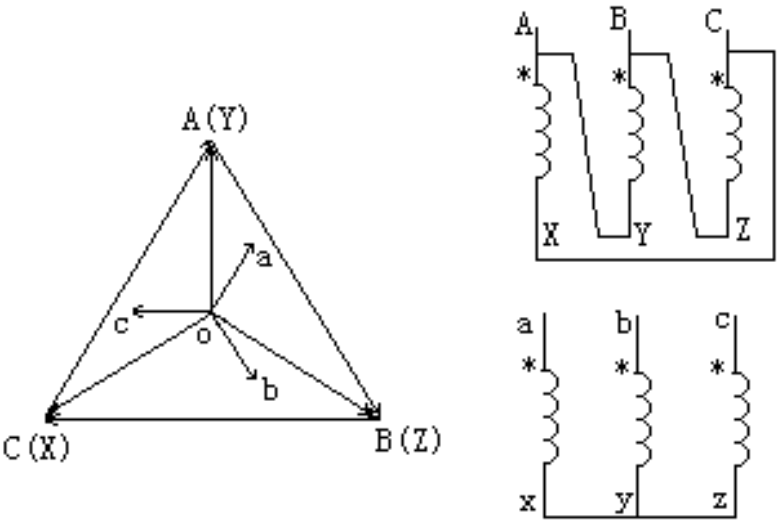


(2) Y,d5

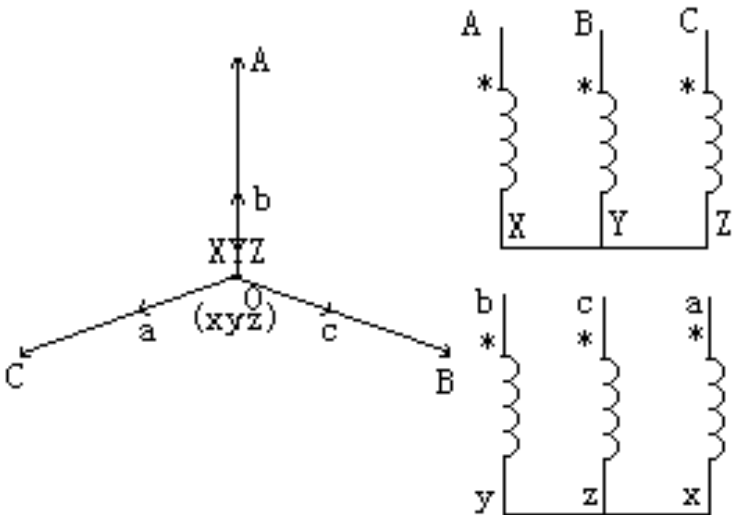


习题七

(3) D,y1



(4) Y,y8



就一种吗？

习题七

5. Y,d 接法的三相变压器原边加上额定电压，将二次侧的三角接开路，用伏特计量测开口处的电压，再将三角形连接闭合，用安培计量测回路电流，试问在三相变压器组和三铁心柱变压器中各次量测电压，电流的大小有何不同？为什么？

解：Y，d联结

1) 副边三角形开路，对三相变压器组，原边Y接，空载电流为正弦波，磁通为平顶波，副边空载电压中含有三次谐波分量。而三相心式变压器中，三次谐波磁通不能流通（基本为正弦波，变压器油和油箱结构部件闭合部分含少量三次谐波磁通），故而三次谐波电压也较小。所以，三相变压器组的副边空载电压值较大，三相心式变压器的副边空载电压值较小。

2) 副边三角形闭合，对三相变压器组，磁通为正弦波是由原边正弦波的空载电流+副边流通的三次谐波电流共同作用的结果；而三相心式变压器中，主磁通基本为正弦波，副边感应电动势基本为正弦波，所以副边三角形内基本没有三次谐波电流。因此变压器组电流较大一些。

考察内容：

①不同磁路结构
→组式、心式

②不同绕组联结形式
→Y,y、D,y、Y,d

的 i_0 、 Φ 、 E_ϕ 和 E_l 波形

联结方式	磁路	空载电流	主磁通	相电动势	线电动势
Y, y	组式	正弦波	平顶波	尖顶波	正弦波
Y, y	心式	正弦波	正弦波	正弦波	正弦波
D, y	组式/心式	尖顶波	正弦波	正弦波	正弦波
Y, d	组式/心式	正弦波	正弦波	正弦波	正弦波

习题九

思考题1. 为什么三绕组变压器副边一个绕组的负载变化对另一个副绕组的端电压会产生影响？在升压变压器中，为什么把低压绕组放在高压绕组与中压绕组之间可以减小这种影响？

解：二次绕组的负载发生变化，即二次绕组电流发生变化，则根据磁动势平衡关系可知，一次绕组和三次绕组电流会相应改变，则三次绕组漏阻抗压降也会发生变化，使得三次绕组的端电压改变。

在升压变压器中，把低压绕组放在高压绕组与中压绕组之间可以使低压和高压绕组间的漏磁场减小，漏抗压降减小，附加损耗减小，提高效率改善局部过热。

思考题2. 三绕组变压器副边额定容量之和为什么可以比原边的大？

解：三绕组变压器的额定容量是按每个绕组分别计算的，它等于绕组额定电压乘以额定电流。通常，三个绕组的容量按不同比例搭配，一次绕组额定容量与二、三次绕组的额定总容量是不相同的。例如，高、中、低压三个绕组容量搭配通常有100、100、50，此时，若一次绕组额定容量为100，则二、三次绕组额定容量为150，副边容量之和是要比原边大的。绕组额定容量仅反映绕组带负载的能力，在具体运行时各绕组负载分配仍符合能量守恒定律，即输入功率等于输出功率加上变压器本身损耗。

习题九

思考题4. 自耦变压器的绕组容量（即计算容量）为什么小于变压器额定容量？容量是如何传递的？这种变压器最适合的变比范围是多大？

解：因为自耦变压器的额定容量等于绕组容量（电磁容量）加上传导容量。

容量传递分为两种形式：一是通过电磁感应传递，这部分功率称为电磁功率；二是直接传导，这部分功率称为传导功率。

自耦变压器的变比 k_a 通常大于1，小于或等于2。 k_a 太大使电磁容量接近变压器容量，优越性明显降低； k_a 太小，如使 $k_a=1$ ，就可以直接传导，不需要变压器了。

思考题5. 与普通变压器相比，自耦变压器有哪些优缺点？

解：优点：节省材料；效率高；电压调整率低；体积小，重量轻，有利于运输和安装。

缺点：故障短路电流大；高压方过电压时会引起低压方产生严重过电压；原副方必须安装避雷器；运行方式、继电保护、过电压保护比较复杂。

思考题6. 使用电流互感器和电压互感器时，必须注意些什么？

解：电流互感器副边绝对不容许开路，副绕组一端应可靠接地；

电压互感器副边绝对不能短路，否则会产生很大的短路电流，电压互感器的副绕组的一端和铁心必须可靠接地

习题九

1. 单相三绕组变压器电压为：高压侧100kV，中压侧20kV，低压侧10kV。在中压侧带上功率因数为0.8（滞后），10000kVA 的负载，在低压侧带上6000kVA 的进相无功功率（电容负载）时，求高压侧的电流（不考虑变压器的等效漏阻抗及激磁电流）。

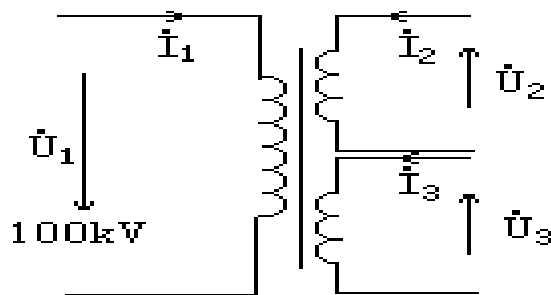
解： 中压侧有功功率 $P_2 = S_2 \cos \varphi_2 = 10000 \times 0.8 = 8000 \text{ kW}$

中压侧无功功率 $Q_2 = S_2 \sin \varphi_2 = 10000 \times \sin(\cos^{-1} 0.8) = 6000 \text{ kvar}$ （滞后）

低压侧无功功率 $Q_3 = S_3 \sin \varphi_3 = 6000 \times \sin(-90^\circ) = -6000 \text{ kvar}$ （超前）

高压侧视在功率 $S_1 = \sqrt{P_2^2 + (Q_2 + Q_3)^2} = \sqrt{8000^2 + (6000 - 6000)^2} = 8000 \text{ kVA}$

$$I_1 = \frac{S_1}{U_1} = \frac{8000}{100} = 80 \text{ A}$$



考察内容：

①三绕组变压器的能量传递

② U 与 I 超前、滞后的概念

习题九

2. 有一台三相变压器，铭牌数据为： $S_N = 31500 \text{ kVA}$, $U_{1N}/U_{2N} = 400/110 \text{ kV}$, Y,yn0 联结, $u_k = 14.9\%$, 空载损耗 $p_0 = 105 \text{ kW}$, 短路损耗 $p_{kN} = 205 \text{ kW}$, 改装前后的线路如图所示。求：

(1) 改为自耦变压器后的总容量 S_{aN} 及电磁容量 $S_{\text{电磁}}$ 传导容量 $S_{\text{传导}}$ ，改装后变压器增加了多少容量？

解：

$$k = \frac{U_{1N} / \sqrt{3}}{U_{2N} / \sqrt{3}} = \frac{400 / \sqrt{3}}{110 / \sqrt{3}} = 3.636$$

$$k_a = k + 1 = 3.636 + 1 = 4.636$$

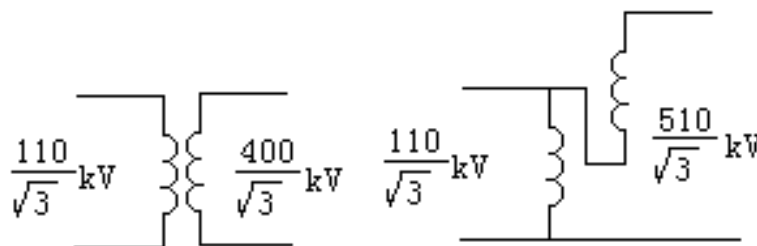
$$k_{xy} = 1 - \frac{1}{k_a} = 1 - \frac{1}{4.636} = 0.784$$

$$S_{\text{电磁}} = S_N = 31500 \text{ kVA}$$

$$S_{aN} = \frac{S_{\text{电磁}}}{k_{xy}} = \frac{31500}{0.784} = 40162.5 \text{ kVA}$$

$$S_{\text{传导}} = \frac{1}{k_a} S_{aN} = \frac{40162.5}{4.636} = 8662.5 \text{ kVA}$$

$$\text{改装前后变压器容量增加了 } \Delta S = S_{aN} - S_{\text{电磁}} = S_{\text{传导}} = 8662.5 \text{ kVA}$$



考察内容：

① 电磁关系

$$S_{aN} = S_{\text{电磁}} + S_{\text{传导}}$$

$$S_{\text{电磁}} = \left(1 - \frac{1}{k_a}\right) S_{aN} = k_{xy} S_{aN}$$

$$S_{\text{传导}} = \frac{1}{k_a} S_{aN}$$

$$S_{\text{电磁}} = S_N$$

② 变比关系

$$k_a = k + 1$$

变比是相电压之比

习题九

(2) 改为自耦变压器后，在额定负载及 $\cos \varphi_2 = 0.8$ （滞后）时，效率 $\eta_{\text{自}}$ 比未改前提高了多少？

解：
$$\eta = \left(1 - \frac{p_{fe} + p_{cu}}{P_2 + p_{fe} + p_{cu}} \right) \times 100\%$$

① p_{fe} 由于空载实验在低压侧加电压，高压侧开路，改装前后均加 $110/\sqrt{3}$ V 电压，

因此由 $\Phi_m = \frac{U}{4.44 f N}$ 可知， Φ_m 不变，故而 $p_{fe} = p_0$ 不变

② p_{cu} 高压侧短路试验， $Z_{ka} = Z_{Aa} + (k_a - 1)^2 Z_{ax} = Z_k$ ；改装前后，短路实验的绕组短路电流均为额定电流，因此短路电流不变，故而， $p_{cu} = p_{kN}$ 不变

③ P_2 改装前， $P_{2\text{双}} = S_N \cos \varphi_2 = 31500 \times 0.8 = 25200 \text{ kW}$
改装后， $P_{2\text{自}} = S_{aN} \cos \varphi_2 = 40162.5 \times 0.8 = 32130 \text{ kW}$

因此，
$$\eta_{\text{双}} = \left(1 - \frac{p_{fe} + p_{cu}}{P_{2\text{双}} + p_{fe} + p_{cu}} \right) \times 100\% = \left(1 - \frac{105 + 205}{25200 + 105 + 205} \right) \times 100\% = 98.78\%$$

$$\eta_{\text{自}} = \left(1 - \frac{p_{fe} + p_{cu}}{P_{2\text{自}} + p_{fe} + p_{cu}} \right) \times 100\% = \left(1 - \frac{105 + 205}{32130 + 105 + 205} \right) \times 100\% = 99.04\%$$

$$\eta_{\text{自}} - \eta_{\text{双}} = 99.04\% - 98.78\% = 0.26\%$$

考察内容：

①效率公式

$$\eta = \left(1 - \frac{p_{fe} + p_{cu}}{P_2 + p_{fe} + p_{cu}} \right) \times 100\%$$

②

$$U = 4.44 f N \Phi_m$$

$$p_{fe} \propto f^\beta B^2$$

③

高压侧短路试验

$$Z_{ka} = Z_{Aa} + (k_a - 1)^2 Z_{ax} = Z_k$$

改装前后欧姆值相等

习题九

(3) 改为自耦变压器后在额定电压时稳态短路电流是改装前稳态短路电流（也是在额定电压下）的多少倍？上述改装前后稳态短路电流各为其额定电流的多少倍？

考察内容：

① 高压侧短路试验

欧姆值： $Z_{ka} = Z_k$

标么值： $Z_{ka}^* = k_{xy} Z_k^*$

$$I_{自}^* = \frac{1}{k_{xy}} I_{双}^*$$

② 低压侧短路试验

欧姆值： $Z_{ka}' = k_{xy}^2 Z_k'$

标么值： $Z_{ka}'^* = k_{xy} Z_k'^*$

$$I_{自}^* = \frac{1}{k_{xy}} I_{双}^*$$

$$\text{解： } I_{1N\varphi} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_N} = \frac{31500}{\sqrt{3} \times 400} = 45.466 \text{ A} \Rightarrow Z_k = u_k \cdot \frac{U_{1N\varphi}}{I_{1N}} = 0.149 \times \frac{400 \times 10^3 / \sqrt{3}}{45.466} = 756.831 \Omega$$

① 若高压边加电压，低压边短路，则 $Z_{ka} = Z_k$

$$I_{双} = \frac{U_{1N} / \sqrt{3}}{Z_k} = \frac{400 \times 10^3 / \sqrt{3}}{756.831} = 305.141 \text{ A}$$

$$I_{自} = \frac{U_{1aN} / \sqrt{3}}{Z_{ka}} = \frac{510 \times 10^3 / \sqrt{3}}{756.831} = 389.055 \text{ A}$$

$$\frac{I_{自}}{I_{双}} = \frac{389.055}{305.141} = 1.275$$

$$I_{1aN\varphi} = \frac{S_{aN}}{\sqrt{3}U_{aN}} = \frac{S_N / k_{xy}}{\sqrt{3}U_N / k_{xy}} = I_{1N}$$

$$\frac{I_{双}}{I_{1N\varphi}} = \frac{305.141}{45.466} = 6.71 \quad \frac{I_{自}}{I_{1aN\varphi}} = \frac{389.055}{45.466} = 8.56$$

② 若低压边加电压，高压边短路，则，

$$Z_k' = Z_k / k^2 = 756.831 / 3.636^2 = 57.247 \Omega$$

$$Z_{ka}' = k_{xy}^2 Z_k' = 0.784^2 \times 57.247 = 35.187 \Omega$$

$$I_{双} = \frac{U_{2N} / \sqrt{3}}{Z_k'} = \frac{110 \times 10^3 / \sqrt{3}}{57.247} = 1109.410 \text{ A}$$

$$I_{自} = \frac{U_{2N} / \sqrt{3}}{Z_{ka}'} = \frac{110 \times 10^3 / \sqrt{3}}{35.187} = 1804.939 \text{ A}$$

$$\frac{I_{自}}{I_{双}} = \frac{1804.939}{1109.410} = 1.627$$

$$I_{2N\varphi} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{2N}} = \frac{31500}{\sqrt{3} \times 110} = 165.33 \text{ A}$$

$$I_{2aN\varphi} = \frac{S_{aN}}{\sqrt{3}U_{2N}} = \frac{31500 / 0.784}{\sqrt{3} \times 110} = 210.88 \text{ A}$$

$$\frac{I_{双}}{I_{2N\varphi}} = \frac{1109.410}{165.33} = 6.71$$

$$\frac{I_{自}}{I_{2aN\varphi}} = \frac{1804.939}{210.88} = 8.56$$

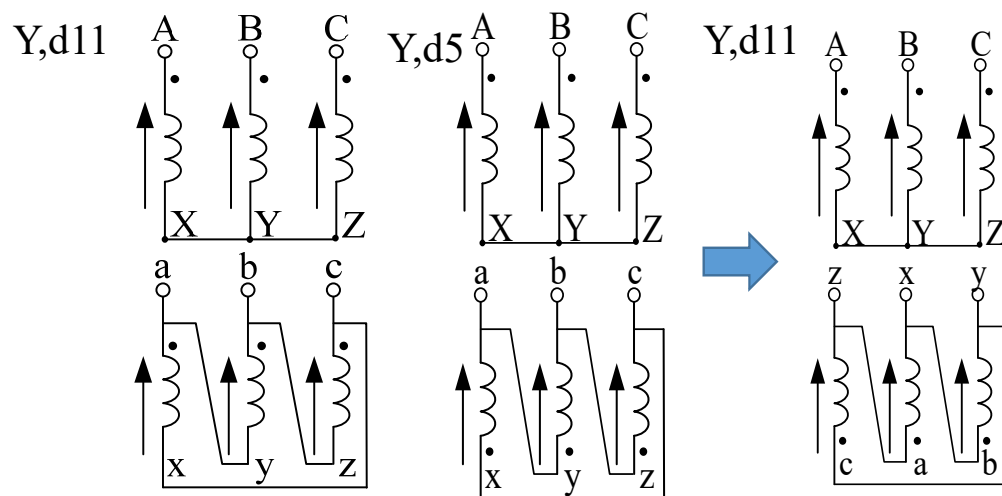
习题十

思考题1. 并联运行的变压器，若短路阻抗的标么值或变比不相等，试问将会出现什么情况？如果各变压器的容量不相等，那么以上二量对容量大些的变压器，是大些还是小些好？为什么？

解：并联运行的变压器，若短路阻抗的标么值不等，则负荷分配不均匀，短路阻抗标么值大者，负荷较小，不能同时达到满载；如果变比不等，则在并联变压器绕组内部产生环流，环流使变压器空载运行时产生额外损耗；负载运行时，可能有的变压器过载，有的欠载，容量得不到充分利用；如果两变压器容量不等，希望容量大的短路阻抗标么值小一些，容量大的满载运行容量利用率高；若变比不等，希望容量大的变比小一些好，变比小可先满载。

思考题3. 两台三相变压器，联结组号分别为Y,d11，和Y,d5，变比相等，试问能否经过适当改变标号进行并联运行。若可行，应如何改变其标号。（内部接线不改）

解：若Y,d5的副边是ay-bz-cx连接，改变同名端标号即可



习题十

3. 某工厂由于生产发展, 用电量由500kVA 增为800kVA。原有变压器 $S_N=560\text{kVA}$, $U_{1N}/U_{2N}=6300/400\text{V}$, Y,yn0 联结, $u_k=6.5\%$, 今有三台备用变压器数据如下:

(a) $S_N=320\text{kVA}$, $U_{1N}/U_{2N}=6300/400\text{V}$, Y,yn0联结, $u_k=5\%$;

(b) $S_N=240\text{kVA}$, $U_{1N}/U_{2N}=6300/400\text{V}$, Y,yn4联结, $u_k=6.5\%$;

(c) $S_N=320\text{kVA}$, $U_{1N}/U_{2N}=6300/440\text{V}$, Y,yn0联结, $u_k=6.5\%$;

试计算说明在不允许变压器过载情况下, 选哪一台运行恰当? 如负载增加后需用三台变压器并联运行, 选两台变比相等的与已有的一台并联运行, 问最大总负载容量可能是多少? 哪一台变压器最先满载?

解: 1) 原变压器与变压器 (a) 并联, 取 $S_a^*=1$

$\because u_k^*$ 小的先达到满载 $\therefore S_a = S_{aN} = 320\text{kVA}$

$$S_{\text{原}}^* = \frac{5}{6.5} S_a^* = \frac{5}{6.5} \Rightarrow S_{\text{原}} = \frac{5}{6.5} \times S_N = \frac{5}{6.5} \times 560 = 430.8 \text{ kVA}$$

$$S_a + S_{\text{原}} = 320 + 430.8 = 750.8 < 800 \text{ kVA} \quad \therefore \text{不能选变压器(a)}$$

2) Y,yn4可改为Y,yn0, 原变压器与变压器 (b) 并联, 取 $S_b^*=1$

$$\because u_{k\text{原}}^* = u_{kb}^*$$

\therefore 原变压器与变压器 (b) 可同时达到满载

$$S_b + S_{\text{原}} = S_{bN} + S_N = 560 + 240 = 800 \text{ kVA} \quad \therefore \text{可以选变压器(b)}$$

3) 变压器 (c) 的变比与原变压器不同, 不能选用。

4) 三台变压器并联运行, 变压器 (a) 首先达到满载, 取 $S_a^*=1$

$$S_{\text{原}}^* = \frac{5}{6.5} S_a^* = \frac{5}{6.5} \Rightarrow S_{\text{原}} = \frac{5}{6.5} \times 560 = 430.8 \text{ kVA}$$

$$S_b^* = \frac{5}{6.5} S_a^* = \frac{5}{6.5} \Rightarrow S_b = \frac{5}{6.5} \times 240 = 184.6 \text{ kVA}$$

$$S = S_{\text{原}} + S_a + S_b = 430.8 + 320 + 184.6 = 935.4 \text{ kVA}$$

考察内容:

①变比相同变压器并联的负载分配

$$\frac{\beta_I}{\beta_{II}} = \frac{I_I^*}{I_{II}^*} = \frac{S_I^*}{S_{II}^*} = \frac{z_{kII}^*}{z_{kI}^*} = \frac{u_{kII}}{u_{kI}}$$

② 短路阻抗标么值小的先满载