

变压器

1-1 为了得到正弦感应电势，当铁心不饱和时，空载电流各成何种波形？为什么？

答：为了得到正弦感应电势，根据 $E = -W \frac{d\phi}{dt}$ 知，就必须使磁通也是正弦量，当铁心不饱和时 $\phi \propto I_0$ ，故，此时空载电流也是正弦变化量，即呈正弦波。当铁心饱和时，根据磁

路欧姆定律 $\Phi = \frac{F}{\Omega}$ ， Ω 变大，则空载电流比磁通变化大，此时空载电流呈尖顶波形。

1-2. 试说明电势平衡、磁势平衡 的概念及其在分析变压器中的作用。

答：电势平衡指忽略线圈电阻时，外施电压和线圈感应电势相等，电势平衡是分析变压器问题时常用的、必要的条件。磁势平衡就是在变压器中，当副边有感应电流产生时，

根据楞次定律， I_2 的去磁作用使得整个磁势减小 $N_2 I_2$ ，那么原边电流就要增加以抵消付

方线圈的去磁作用，使 $N_1 \Delta I_1 = N_2 I_2$ ，这就是磁势平衡。在分析变压器中，可据此从一个已知电流求出另一个电流，并知其电磁本质。

1-3、为什么可以把变压器的空载损耗近似看成是铁耗，而把短路损耗看成是铜耗？变压器实际负载时实际的铁耗和铜耗与空载损耗和短路损耗有无区别？为什么？

答：因为空载时电流很小，在空载损耗中铁耗占绝大多数，所以空载损耗近似看成铁耗。而短路时，短路电压很低，因而磁通很小，铁耗也很小，短路损耗中铜耗占绝大多数，所以近似把短路损耗看成铜耗。实际负载时铁耗和铜耗与空载时的铁耗和铜耗有差别，因为后一个是包含有其它损耗。

1-4 一台频率 $f=60\text{HZ}$ 得变压器，现用于 $f=50\text{HZ}$ 的电源上，并使电压 $U'_{1N} = \frac{5}{6} U_{1N}$ ，磁路饱和程度， I_m , X_m , R_m , $X_1 \sigma$, $X_2 \sigma$ 及 P_{Fe} 有何变化？

答 由 $U_1 \approx E_1 = 4.44 f N_1 \phi_m$

原为 $U_{1N} = 4.44 f N_1 \phi_m$

现改为 $U'_{1N} = \frac{5}{6} U_{1N} = 4.44 f' N_1 \phi'_m$

得 $\phi'_m = \frac{U'_{1N} f}{U_{1N} f'} \phi_m = \frac{5}{6} \times \frac{60}{50} \phi_m = \phi_m$

因此 $B'_m = B_m$

(1) 由于铁心磁密不变, 故磁路饱和程度不变, 磁路磁导 Λ_m 不变

(2) 由于 ϕ_m 不变, 励磁电动势 $N_1 I_m$ 不变, 故励磁电流 I_m 不变。

(3) 由于 $X_m = 2\pi f N_1^2 \Lambda_m$, 由 (1) 知 Λ_m 不变, 故得改变后励磁电抗为

$$X'_m = \frac{f'}{f} X_m = \frac{5}{6} X_m$$

(4) 由于 $X_m = 2\pi f N_1^2 \Lambda_{1\sigma}$, $X_{2\sigma} = 2\pi f N_2^2 \Lambda_{2\sigma}$, 而漏磁导 $\Lambda_{1\sigma}$ 和 $\Lambda_{2\sigma}$ 均不变, 故改变后的漏电抗分别为

$$X'_{1\sigma} = \frac{f'}{f} X_{1\sigma} = \frac{5}{6} X_{1\sigma}$$

$$X'_{2\sigma} = \frac{f'}{f} X_{2\sigma} = \frac{5}{6} X_{2\sigma}$$

(5) 由于 $P_{Fe} \propto f^\beta B_m^2$, 故改变后的铁耗

$$P'_{Fe} = \left(\frac{f'}{f}\right)^\beta P_{Fe} = \left(\frac{5}{6}\right)^\beta P_{Fe}$$

因为 $1 < \beta < 2$, 故 $P'_{Fe} < P_{Fe}$, 即铁耗将减小。

(6) 由于 $R_m = \frac{P_{Fe}}{I_m^2}$, P_{Fe} 减小而 I_m 不变, 故 R_m 将减小。

1-5. 变压器的其它条件不变, 仅将原、副边线圈匝数变化 $\pm 10\%$, 试问对 $X_{1\sigma}$ 和 X_m 的影响怎样? 如果仅将外施电压变化 $\pm 10\%$, 其影响怎样? 如果仅将频率变化 $\pm 10\%$, 其影响又怎样?

$$x_{1\sigma} = \frac{E_{1\sigma}}{I_1}$$

答: 因为 $E_{1\sigma} = 4.44 f N_1 \Phi_{1\sigma}$, $\Phi_{1\sigma} = N_1 I_{1\sigma} \Lambda_{1\sigma}$, 其中 $\Lambda_{1\sigma}$ 为漏磁导, 即漏磁

阻的倒数, 故而 $x_{1\sigma} = 4.44 f N_1^2 \Lambda_{1\sigma}$, 漏磁通回路不会饱和, 磁阻不变, 可知当原、副边匝

数变化 $\pm 10\%$ 时, $x_{1\sigma}$ 变化 $\pm 20\%$ 。同样可得励磁电抗表达式 $x_m = 4.44 f N_1^2 \Lambda_m$, 根据电势

平衡道理, 由于 N_1 变化 $\pm 10\%$, 而 U 不变 $E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m$, 则 Φ_m 变化 $\mp 10\%$, 磁通 Φ_m

变化 $\pm 10\%$ 时磁路饱和程度会相应改变, Λ_m 变化, Λ_m 变化 $\pm k\%$ (为什么), 所以 x_m 的变化大于 $\pm 20\%$ 。

将外施电压变化 $\pm 10\%$ 时, Φ_m 也将变化 $\mp 10\%$, 则 $x_{1\sigma}$ 几乎不变 (为什么?), x_m 的变化

大于 $\mp 10\%$ 。这是因为 Φ_m 变化 $\mp 10\%$ ，由于磁路饱和影响， Λ_m 变化大于 $\mp 10\%$ 。

如果频率变化 $\pm 10\%$ ， $X_{1\sigma} \propto f$ ，所以 $X_{1\sigma}$ 变化 $\pm 10\%$ ，而 f 变化 $\pm 10\%$ ，则因为 U 不变，使 Φ_m 变化 $\mp 10\%$ 。同样使 X_m 的变化大于（为什么） $\pm 10\%$ 。

1-6. 一台变压器，原设计频率为 50 赫兹，现将它接到 60 赫兹的电网上运行，额定电压不变。试问对激磁电流，铁耗，漏抗，电压变化率有何影响？

答：因为 $E = 4.44 f N \phi_m \approx U$ ，当 U 不变而 f 改变后， ϕ_m 将下降到原来的 $5/6$ ，所以激磁电流将减小（为什么？）。根据 $X_{1\sigma}$ 的定义（如何定义的？），将增大 $6/5$ 倍。电压变化率随增大而增大。又因为 $P_{Fe} \propto f^\beta \cdot B_m^2$ ，而 $\beta < 2$ ，所以铁耗将下降。

1-7 一台单相双绕组变压器，在 $U_1=\text{常数}$ ， $f=\text{常数}$ 的条件下，试比较下列三种情况下其主磁通的大小（计及漏阻抗压降）。

- (1) 空载；
- (2) 带感性负载；
- (3) 二次绕组短路。 $X_{1\sigma}$

答 在 f 一定，匝数一定的条件下，据式 $E_1=4.44fN_1\phi_m$ 可知，感应电动势的大小与主磁通成正比。又据方程式 $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1$ 可知，在电压 U_1 一定时，漏抗压降 $I_1 Z_1$ 的大小必然影响 E_1 的大小。

- (1) 空载时， $I_1=I_0$ 最小， $I_0 Z_1$ 最小， E_1 最大，主磁通也最大。
- (2) 带感性负载运行时， I_1 增大， $I_1 Z_1$ 增大，使得 E_1 及主磁通变得小些。
- (3) 二次绕组短路时， I_1 很大，造成很大的电压降 $I_1 Z_1$ ，此种情况下 E_1 及主磁通最小。当 $Z_1=Z'_2$ 时， $E_1 \approx \frac{1}{2} U_1$ ，即此时 Φ_m 约为空载时的一半。

1-8、有一台单相变压器，额定容 $SN=100KVA$ ，原副边额定电压 $6000/230$ 伏， $fN=50$ 赫兹。原副线圈的电阻及漏抗为 $r_1=4.32 \Omega$ ， $r_2=0.0063 \Omega$ ， $x_{1\sigma}=8.9 \Omega$ ， $x_{2\sigma}=0.013 \Omega$ 。试求：

- (1) 折算到高压边的短路电阻 r_k ，短路电抗 x_k 及阻抗 Z_k ；
- (2) 折算到低压边的短路电阻 r'_k ，短路电抗 x'_k 及阻抗 Z'_k ；
- (3) 将(1)、(2)求得的参数用标么值表示；
- (4) 计算变压器的短路电压百分比 u_k 及其分量 u_{kr} ， u_{kx} 。
- (5) 求满载及 $\cos \phi_2 = 1$ ， $\cos \phi_2 = 0.8$ 滞后及超前等三种情况下的电压变化率 ΔU 并讨

论计算结果。

$$k = \frac{U_{1N}}{U_{2N}} = \frac{6000}{230}$$

解：（1）折算到高压边的短路阻抗

$$r_{kH} = r_1 + r_2' = 4.32 + k^2 r_2 = 8.61 \Omega$$

$$x_{kH} = x_{1\sigma} + k^2 x_{2\sigma} = 8.9 + 26.09^2 \times 0.013 = 17.75 \Omega$$

$$Z_{kH} = r_{kH} + jx_{kH} = 8.61 + j17.75 = 19.73 \angle 64.12^\circ \Omega$$

（2）折算到低压边的短路阻抗

$$r_{kL} = \frac{r_1}{k^2} + r_2 = 0.01265 \Omega$$

$$x_{kL} = \frac{x_{1\sigma}}{k^2} + x_{2\sigma} = 0.0261 \Omega$$

$$Z_{kL} = r_{kL} + jx_{kL} = 0.01265 + j0.0262 = 0.029 \angle 64.12^\circ \Omega$$

$$(3) \quad I_{1N} = \frac{S_N}{U_{1N}} = 16.67 \text{ A} \quad I_{2N} = \frac{S_N}{U_{2N}} = 434.78$$

$$Z_{1N} = \frac{U_{1N}}{I_{1N}} = \frac{6000}{16.67} = 359.93 \text{ W}$$

$$Z_{2N} = \frac{U_{2N}}{I_{2N}} = \frac{230}{434.78} = 0.529 \Omega$$

$$\text{所以} \quad r_{kH}^* = \frac{r_{kH}}{Z_{1N}} = \frac{8.61}{359.93} = 0.0239$$

$$x_{kH}^* = \frac{x_{kH}}{Z_{1N}} = \frac{17.75}{359.93} = 0.049$$

$$Z_{kH}^* = \frac{Z_{kH}}{Z_{1N}} = \frac{19.73}{359.93} = 0.054$$

$$r_{kL}^* = \frac{r_{kL}}{Z_{2N}} = \frac{0.01265}{0.529} = 0.0239$$

$$x_{kL}^* = \frac{x_{kL}}{Z_{2N}} = \frac{0.0261}{0.529} = 0.049$$

$$Z_{kL}^* = \frac{Z_{kL}}{Z_{2N}} = \frac{0.029}{0.529} = 0.0548$$

(4) 短路电压百分值 $u_{kr} = r_k^{\bullet} \times 100\% = 2.39\%$

$$u_{kx} = x_k^{\bullet} \times 100\% = 4.93\%$$

$$Z_{kr} = Z_k^{\bullet} \times 100\% = 5.48\%$$

(5) 当满载, 功率因数 $\cos \phi_2 = 1$ 时变压器的电压变化率

$$\Delta u = (r_k \cos \phi_2 + x_k \sin \phi_2) \times 100\% = 2.39\%$$

当 $\cos \phi_2 = 0.8$ 滞后时, $\sin \phi_2 = 0.6$

$$\begin{aligned} \Delta u &= (r_k \cos \phi_2 + x_k \sin \phi_2) \times 100\% \\ &= (0.0239 \times 0.8 + 0.0493 \times 0.6) \times 100\% = 4.87\% \end{aligned}$$

当 $\cos \phi_2 = 0.8$ 超前时, $\sin \phi_2 = -0.6$

$$\begin{aligned} \Delta u &= (r_k \cos \phi_2 - x_k \sin \phi_2) \times 100\% \\ &= (0.0239 \times 0.8 - 0.0493 \times 0.6) \times 100\% = -1.046\% \end{aligned}$$

对于电压变化率, 当 $\cos \phi_2 = 1$ 即阻性负载时电压变化率较小, 当负载为感性时, 电压变化率大, 当负载为容性时, 负载时的端电压可能高于空载时的端电压。

$$k = \frac{N_1}{N_2} = 3.37$$

1-9、一台单相变压器, 已知 $r_1=2.19 \Omega$, $x_{1\sigma}=15.4 \Omega$, $r_2=0.15 \Omega$, $x_{2\sigma}=0.964 \Omega$, $r_m=1250$

Ω , $x_m=12600 \Omega$, $N_1/N_2=876/260$, 当 $\cos \phi_2 = 0.8$ 滞后时, 副边电流 $I_2=180A$,

$U_2=6000V$ 。试求:

用近似 T 形等效电路和简化等效电路求 U_1 和 I_1 , 并将结果进行比较
画出折算后的矢量图和 T 形等效电路。

解: 变压器变比 $k = \frac{N_1}{N_2} = 3.37$

$$\text{则 } r_1' = \frac{r_1}{k^2} = \frac{2.19}{3.37^2} = 0.193 \Omega$$

$$x_{1\sigma}' = \frac{x_{1\sigma}}{k^2} = \frac{15.4}{3.37^2} = 1.357 \Omega$$

$$r_m' = \frac{r_m}{k^2} = \frac{1250}{3.37^2} = 110.16 \Omega$$

$$x_m' = \frac{x_m}{k^2} = \frac{12600}{3.37^2} = 1109.96 \Omega$$

用近似 T 形等效电路计算时, 以 \dot{U}_2 作参考向量

$$\dot{U}_2=6000V, \dot{I}_2=144-j108A=180\angle-36.87^\circ$$

$$\text{则 } \dot{U}'_1 = -\dot{U}_2 - \dot{I}_2(Z'_1 + Z_2)$$

$$=180\angle-36.87^\circ - (0+j93 + 1.357 + j0.1)$$

$$=-6300.08 - j2987.16 = 6307V$$

$$\dot{I}'_1 = \frac{\dot{U}'_1}{Z'_m} - \dot{I}_2 = -\frac{6307.08\angle2.7^\circ}{110.16 + j1109.96} - 144 + j108$$

$$=-144.83 + j113.59 = 184.06\angle141.9^\circ A$$

$$\text{故 } \dot{U}_1 = k\dot{U}'_1 = 3.37 \times (-6307.08\angle2.7^\circ) = 21250\angle2.7^\circ V$$

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{I}'_1}{k} = \frac{184.06\angle141.9^\circ}{3.37} = 54.63\angle141.9^\circ A$$

用简化等效电路计算时，仍以 \dot{U}_2 作参考向量

$$\dot{U}'_1 = -\dot{U}_2 - \dot{I}_2(Z'_1 + Z_2) = -6307.08\angle2.7^\circ V$$

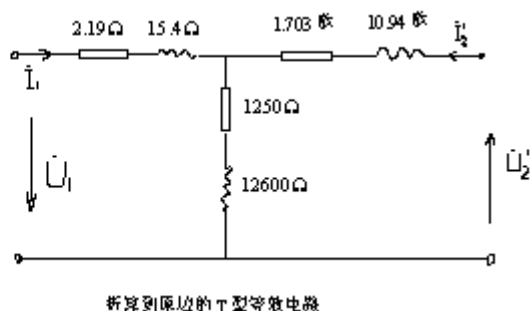
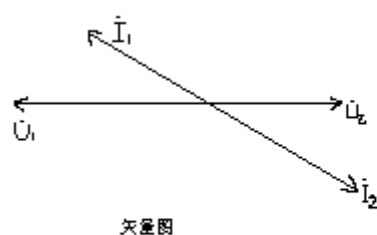
$$\dot{I}'_1 = -\dot{I}_2 = -180\angle-36.87^\circ A$$

$$\text{故 } \dot{U}_1 = k\dot{U}'_1 = 3.37 \times (-6307.08\angle2.7^\circ) = 21250\angle2.7^\circ$$

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{I}'_1}{k} = \frac{180\angle143.13^\circ}{3.37} = 53.42\angle143.13^\circ$$

用两种等效电路计算结果相差很小。U 相同，I 略变。

(2)



1-10、一台单相变压器， $S_N = 1000KVA$ ， $\frac{U_{1N}}{U_{2N}} = \frac{60}{6.3}KV$ ， $f_N = 50Hz$ ，空载及短路

实验的结果如下：

实验名称	电压（伏）	电流（安）	功率（W）	电源加在
------	-------	-------	-------	------

空载	6300	10.1	5000	低压边
短路	3240	15.15	14000	高压边

试计算（1）折算到高压边的参数（实际值及标么值），假定 $r_1 = r_2 = \frac{r_k}{2}$ ，

$$x_{1\sigma} = x_{2\sigma} = \frac{x_k}{2} \quad (2) \text{ 画出折算到高压边的 T 型等效电路；}$$

（3）计算短路电压的百分值及其二分量；

（4）满载及 $\cos \varphi_2 = 0.8$ 滞后时的电压变化率及效率

（5）最大效率。

解：（1）空载实验可以得到折算到高压边的参数

$$Z_m = k^2 \cdot \frac{U_0}{I_0}, \quad \text{而 } k = 60/6.3 = 9.524$$

$$\text{所以 } Z_m = 9.524^2 \cdot \frac{6300}{10.1} = 56.577 k\Omega$$

$$r_m = 9.524^2 \cdot \frac{P_0}{I_0^2} = 4.446 k\Omega$$

$$x_m = \sqrt{Z_m^2 - r_m^2} = 56.402 k\Omega$$

根据短路实验得到折算到低压边的参数

$$r_1 = r_2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{P_k}{I_k^2} = \frac{14000}{2 \times 15.15^2} = 30.5 \Omega$$

$$\frac{Z_k}{2} = \frac{U_k}{2I_k} = \frac{3240}{2 \times 15.15} = 106.93 \Omega$$

$$x_{1\sigma} = x_{2\sigma} = \sqrt{\left(\frac{Z_k}{2}\right)^2 - r_1^2} = 102.5 \Omega$$

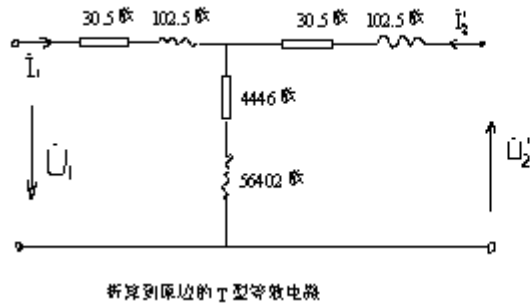
$$Z_{1N} = \frac{U_{1N}}{I_{1N}} = \frac{U_{1N}^2}{S_N} = 3.6 k\Omega$$

$$\text{所以 } r_m^* = \frac{r_m}{Z_{1N}} = 1.235 \quad x_m^* = \frac{x_m}{Z_{1N}} = 15.6 \%$$

$$r_1^* = r_1 = \frac{r_1}{Z_{1N}} = 8.472 \times 10^{-3}$$

$$x_{1\sigma} = x_{1\sigma} = \frac{x_{1\sigma}}{Z_{1N}} = 2.8472 \times 10^{-2}$$

(2) 折算到高压的 T 型等效电路



$$(3) \quad u_{kr} = r_1' + r_2' = 2r_1' = 1.6944\% \quad u_{kx} = x_{1\sigma}' + x_{2\sigma}' = 2x_{1\sigma}' = 5.6944\%$$

$$\text{所以 } u_k = \sqrt{u_{kr}^2 + u_{kx}^2} = 5.94\%$$

$$(4) \quad \text{电压变化率 } \Delta u = u_{kr} \cos \phi_2 + u_{kx} \sin \phi_2$$

$$= (1.6944 \times 0.8 + 5.6944 \times 0.6) \%$$

$$= 4.77\%$$

$$\text{此时, } U_2' = U_{1N} - \Delta u \cdot U_{1N} = 57.138 \text{ kV}$$

$$I_2' \approx I_{1N} = \frac{S_N}{U_{1N}} = 16.667 \text{ A}$$

而

$$\text{所以 } P_2 = U_2' I_2' \cos \phi_2 = 57.138 \times 16.667 \times 0.8 = 952.3 \text{ kw}$$

$$P_1 = P_2 + P_0 + \left(\frac{I_{1N}}{I_k} \right)^2 P_k = 974.24$$

故

kw

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \frac{952.3}{974.24} \times 100\% = 97.75\%$$

则

$$(5) \quad \text{达到最大效率时, } P_{cu} = P_{Fe} = 5000$$

$$\text{所以 } I_1 = \sqrt{\frac{5000}{r_1 + r_2}} = 9.05 \text{ A}, \quad I_1^* = \frac{9.05}{16.67} = 0.543$$

$$\eta_{\max} = \left(1 - \frac{P_0 + I_1^{*2} P_k}{I_1^* S_N \cos \phi_2 + P_0 + I_1^{*2} P_k} \right) \times 100\%$$

所以

$$=98.19\%$$

1-11、 两台变压器 A 和 B，容量各为 100kVA，最高效率为 97%，在功率因数为 1，变压器 A 负载系数为 0.9 时，有最高效率，变压器 B 在满载时有最高效率。现负载情况为：空载工作 10h；满载工作 8h 且功率因数为 1；过载 10%，工作 6h 且功率因数 0.8（滞后），应选哪台变压器？

解 应选用题中负载情况下总损耗小的变压器。

由最高效率求各变压器的损耗，最高效率公式为

$$\eta_{\max} = \frac{\beta S_N \cos \varphi_2}{\beta S_N \cos \varphi_2 + 2P_0}$$

对于变压器 A，将 $S_N=100\text{kVA}$, $\beta = 0.9$, $\cos \varphi_2 = 1$, $\eta_{\max} = 0.97$ 代入上述公式，得

$$0.97 = \frac{0.9 \times 100 \times 10^3}{0.9 \times 100 \times 10^3 + 2P_0}$$

$$P_0 = 1392\text{W}$$

由最高效率时， $\beta^2 P_{kN} = P_0$ ，得

$$P_{kN} = \frac{P_0}{\beta^2} = \frac{1392}{0.9^2} \text{W} = 1718\text{W}$$

对于变压器 B，将 $S_N=100\text{kVA}$, $\beta = 1$, $\cos \varphi_2 = 1$, $\eta_{\max} = 0.97$ 代入最高效率公式，得

$$0.97 = \frac{100 \times 10^3}{100 \times 10^3 + 2P_0}$$

$$P_0 = P_{kN} = 1546\text{W}$$

24h 变压器总损耗

$$\sum P_t = P_0 \times 24 + P_{kN} \times 8 + 1.1^2 \times P_{kN} \times 6$$

变压器 A

$$\sum P_t = (1392 \times 24 + 1718 \times 8 + 1.1^2 \times 1718 \times 6) \text{kW} \cdot \text{h} = 59.62 \text{kW} \cdot \text{h}$$

变压器 B

$$\sum P_t = (1546 \times 24 + 1546 \times 8 + 1.1^2 \times 1546 \times 6) \text{kW} \cdot \text{h} = 60.70 \text{kW} \cdot \text{h}$$

变压器 A 较变压器 B 的总损耗小，故选用变压器 A。

1-12、 变压器空载时，一方加额定电压，虽然线圈（铜耗）电阻很小，电流仍然很小，为什么？

答：因为一方加压后在线圈中的电流产生磁场，磁场交链原付方线圈，根据楞次定律，线圈有很大的自感电势（电势平衡，接近额定电压，比额定电压小），所以虽然线圈电阻很小，电流仍然很小。

1-13、变压器的额定电压为 220/110 伏，若不慎将低压方误接到 220 伏电源上，试问激磁电流将会发生什么变化？变压器将会出现什么现象？

答：误接后由 $U \approx E = 4.44fN\varphi$ 知，磁通增加近一倍，饱和程度也增加，根据磁路欧姆定律，激磁电流增加很多。此时变压器处于过饱和状态，高压边电压 440 伏左右，使效率降低，绝缘可能被击穿等现象发生。

1-14、一台 220/110 伏、50Hz 的空心变压器。参数如下： $r_1 = 0.02\Omega$ ， $L_1 = 0.036H$ （原线圈自感）， $L_{1\sigma} = 0.00036H$ ； $r_2 = 0.005\Omega$ ， $L_2 = 0.009H$ （副线圈自感）， $L_{2\sigma} = 0.00009H$ ，试求（1）原副线圈的漏抗和变压器的激磁电抗；（2）画出 T 型等效电流，将各数值标在等效短路图上，计算空载电流。

解：（1）根据 $L_{1\sigma} = 0.00036H$ 得，

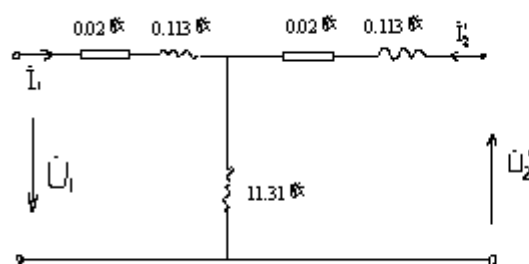
$$x_{1\sigma} = 2\pi \times 50 \times 0.00036 = 0.113\Omega$$

$$x_{2\sigma} = 2\pi \times 50 \times 0.00009 = 0.0283\Omega$$

$$x_m = 2\pi \times 50 \times 0.036 = 11.31\Omega$$

$$x'_{2\sigma} = k^2 x_{2\sigma} = \left(\frac{220}{110}\right)^2 \times 0.0283 = 0.113\Omega$$

（2）它的等效电流图



空载

$$\text{电流 } I_0 = \frac{220}{\sqrt{0.02^2 + (0.113 + 11.31)^2}} = 19.26A \quad (\text{高压边})$$

1-13、一台三相变压器，原、副方额定电压 $\frac{U_{1N}}{U_{2N}} = 10/3.15kV$ ， $Y/\Delta - 11$ 连接，匝电压

为 14.189 伏，副方额定电流 $I_{2N} = 183.3A$ 。试求（1）原副方线圈匝数；（2）原线圈电流

及额定容量；(3) 变压器运行在额定容量且功率因数为 $\cos\phi_2 = 1$ 、0.9（超前）和 0.85（滞后）三种情况下的负载功率。

$$1) \text{ 原方 } U_{1N} = \frac{10}{\sqrt{3}} = 5.7735 \text{ kV}$$

$$\text{副方 } U_{2N} = 3.15 \text{ kV}$$

$$\text{所以 } N_1 = \frac{U_{1N}}{14.189} = 407 \text{ T}, \quad N_2 = \frac{U_{2N}}{14.189} = 222 \text{ T}$$

$$(2) \text{ 额定容量 } S_N = \sqrt{3} U_{2N} I_{2N}$$

$$S_N = \sqrt{3} \times 3.15 \times 183.3 = 1000 \text{ KVA}$$

$$I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3} U_{1N}} = \frac{1000}{\sqrt{3} \times 10} = 57.74 \text{ A}$$

$$(3) \text{ 因 } P_2 = S_N \cos\phi_2$$

$$\text{所以当 } \cos\phi_2 = 1 \text{ 时, } P_2 = 1000 \text{ W}$$

$$\text{当 } \cos\phi_2 = 0.9 \text{ 时, } P_2 = 1000 \times 0.9 = 900 \text{ W}$$

$$\text{当 } \cos\phi_2 = 0.85 \text{ 时, } P_2 = 1000 \times 0.85 = 850 \text{ W}$$

1-14、一台 3KVA, 230/115 伏单相变压器, 原线圈电阻 $r_1 = 0.3\Omega$, 副线圈电阻 $r_2 = 0.05\Omega$,

原线圈漏抗 $x_{1\sigma} = 0.8\Omega$, 副线圈漏抗 $x_{2\sigma} = 0.1\Omega$, 铁耗 $P_{Fe} = 45 \text{ W}$, 额定负载时铜耗

$$P_{cu} = 85 \text{ W}。 \text{求}$$

(1) 副方功率因数为 0.9（滞后）时的电压变化率；

(2) 供给 3.04kW, 功率因数为 0.95（滞后）负载时的效率

$$\text{解: (1) } I_{1N} = \frac{S_N}{230} = \frac{3000}{230} = 13.043 \text{ A}$$

$$I_{2N} = \frac{S_N}{115} = \frac{3000}{115} = 26.087 \text{ A}$$

$$Z_{1N} = \frac{U_{1N}}{I_{1N}} = 17.634\Omega \quad Z_{2N} = \frac{U_{2N}}{I_{2N}} = 4.40\Omega$$

$$\text{所以 } r_k^* = r_1^* + r_2^* = \frac{r_1}{Z_{1N}} + \frac{r_2}{Z_{2N}} = \frac{0.3}{17.634} + \frac{0.05}{4.408} = 0.0284$$

$$x_k^* = x_{1\sigma}^* + x_{2\sigma}^* = \frac{0.8}{17.634} + \frac{0.1}{4.408} = 0.0681$$

故副方 $\cos\phi_2 = 0.8$ (滞后) 时电压变化率

$$\Delta u = r_k^* \cos\phi_2 + x_k^* \sin\phi_2$$

$$= 5.524\%$$

(2) 供给负载 3.04kw 时, 如不考虑电流对 Δu 的影响时,

$$\Delta u' = r_k^* \cos\phi_2 + x_k^* \sin\phi_2$$

$$= 0.028 \times 0.95 + 0.0681 \times \sqrt{1 - 0.95^2}$$

$$= 4.78\%$$

$$\text{此时端电压 } U_2' = U_{2N} (1 - \Delta u) = 115 \times (1 - 0.0478) = 109.5V$$

$$\text{此时负载电流 } I_2' = \frac{P_2}{U_2'} = \frac{3040}{109.5} = 27.76A$$

这个电流对电压变化率的影响为 $\Delta u = I_2' \Delta u$

所以考虑电流变化对电压变化率的影响后电压变化率

$$\Delta u = \frac{27.76}{26.087} \times 4.78\% = 5.0$$

$$\text{端电压 } U_2 = 115 \times (1 - 0.0509) = 109.17V$$

$$\text{负载电流 } I_2 = \frac{P_2}{U_2} = \frac{3040}{109.17} = 27.85A$$

在这个负载时变压器的铁耗不变, 铜耗为

$$P_{cu} = I_2^2 P_k = \left(\frac{27.85}{26.087} \right)^2 \times 85 = 96.88 \text{ W}$$

所以供给 3.04kw、功率因数为 0.95 (滞后) 负载时的效率为

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_2}{P_2 + P_0 + P_{cu}} \times 100\% \\ &= \frac{3040}{3040 + 45 + 96.88} \times 100\% = 95.54\% \end{aligned}$$

1-15、一台单相变压器 50KVA、7200/480V、60Hz。其空载和短路试验数据如下

实验名称	电压 (伏)	电流 (安)	功率 (W)	电源加在
------	--------	--------	--------	------

空载	480	5.2	245	低压边
短路	157	7	615	高压边

试求：

(1) 短路参数及其标么值；

(2) 空载和满载时的铜耗和铁耗；

(3) 额定负载电流、功率因数 $\cos\phi_2 = 0.9$ 滞后时的电压变化率、副边电压及效率。(注：电压变化率按近似公式计算)

$$\text{解： } I_{1N} = \frac{S_N}{U_{1N}} = 6.944A \quad I_{2N} = \frac{S_N}{U_{2N}} = 104.17A$$

$$\text{短路参数 } Z_k = \frac{U_k}{I_k} = \frac{157}{7} = 22.42\Omega$$

$$r_k = \frac{P_k}{I_k^2} = \frac{615}{49} = 12.55\Omega \quad x_k = \sqrt{Z_k^2 - r_k^2} = 18.58\Omega$$

$$\text{其阻抗基值 } Z_{1N} = \frac{U_{1N}}{I_{1N}} = \frac{7200}{6.944} = 1036.87\Omega$$

$$\text{所以 } Z_{k*} = \frac{Z_k}{Z_{1N}} = 0.0216 \quad r_{k*} = \frac{r_k}{Z_{1N}} = 0.012$$

$$x_{k*} = \frac{x_k}{Z_{1N}} = 0.0179$$

$$\text{空载时铁耗 } P_{Fe} \approx P_0 = 245 \text{ W}$$

$$\text{满载铜耗 } P_{kN} = \left(\frac{I_{1N}}{I_k}\right)^2 P_k = \left(\frac{6.944}{7}\right)^2 \times 615 = 605.2 \text{ W}$$

$$\text{额定负载电流时 } I_2 = I_{2N} = 104.167A$$

根据电压变化率近似公式

$$\Delta u = r_k^* \cos\phi_2 + x_k^* \sin\phi_2 \text{ 得}$$

$$\Delta u = 0.0121 \times 0.9 + 0.0179 \times \sqrt{1 - 0.81} = 1.87\%$$

$$\text{此时副方电压 } U_2 = U_{2N} \times (1 - 1.87\%) = 471.02V$$

$$\text{所以 } P_2 = U_2 I_{2N} \cos\phi_2 = 471 \times 104.167 \times 0.9 = 44158.64 \text{ W}$$

$$P_1 = P_2 + P_0 + P_{kN} = 44158.64 + 245 + 605.2 = 45008.64 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = 98.11\%$$

1-16、在上题变压器的副边并联 250uF 的电容器，仍到上题之负载阻抗。求副方电压、电流和功率因数。

解：在上题中，如 $\dot{U}'_2 = 471.02 \angle 0^\circ \text{V}$

$$\text{则 } \dot{I}_2 = I_{2N} \cos \phi_2 + j I_{2N} \sin \phi_2 = I_{2N} \angle \phi_2 = 104.167 \angle -25.84^\circ$$

$$\text{所以 } Z_L = \frac{U_2}{I_2} = 4.52 \angle 25.84^\circ$$

当并联上 250uF 电容器后，电容器阻抗

$$Z_c = \frac{1}{j2\pi fC} = -j12.73 \Omega$$

所以此时变压器总的负载阻抗

$$Z'_L = \frac{Z_L \cdot Z_c}{Z_L + Z_c} = 5.003 \angle 5.13^\circ \Omega$$

$$\text{则 } Z_{L*} = \frac{Z'_L}{Z_{2N}} = \frac{5.003}{480/104.167} \angle 5.13^\circ \Omega = 1.086 \angle 5.13^\circ \Omega$$

如设原方外加电压 $U_{1*} = 1 \angle 0^\circ$ ，则根据变压器电压平衡方程式

$$\dot{I}_{1*} = -\dot{I}_{2*} \text{ 有 } U_{1*} = I_{1*}(Z_{k*} + Z_{L*})$$

$$\text{则 } -I_{2*} = I_{1*} = \frac{U_{1*}}{Z_{k*} + Z_{L*}} = 0.9091 \angle -6^\circ$$

$$\text{副边的端电压 } \dot{U}_{2*} = \dot{I}_{2*} Z_{L*} = 0.9873 \angle -0.87^\circ$$

将标么值折算成实际值可得：

$$\text{副边电压 } U_2 = U_2^* \cdot U_{2N} = 0.9873 \times 480 = 473.9 \text{V}$$

$$\text{副边电流 } I_2 = I_2^* \cdot I_{2N} = 0.9091 \times 104.167 = 94.7 \text{A}$$

$$\text{功率因数 } \cos \phi_2 = \cos(\phi_v - \phi_i) = \cos(-6^\circ + 0.87^\circ) = 0.996$$

1-17、单相变压器 $S_N = 10 \text{KVA}$ ， $\frac{U_{1N}}{U_{2N}} = \frac{2200}{220} \text{V}$ ， $f_N = 50 \text{Hz}$ ，参数：

$r_1 = 3.6\Omega, r_2 = 0.036\Omega, x_k = x_{1\sigma} + x_{2\sigma} = 26\Omega$ 。在额定电压下铁耗 $P_{Fe} = 70\text{W}$ ，空载电流 $I_0 = 5\% I_N$ 。求

(1) 假定原副边漏抗折算到同一方时相等，求各参数的标么值，并绘出 T、Γ 等效电路；

(2) 假若副边电压和电流均保持为额定值且功率因数 $\cos\varphi_2 = 0.8$ （滞后）时，求原边电流基功率因数（用 Γ 等效电路解）。

$$\text{解：(1) } Z_{1N} = \frac{U_{1N}^2}{S_N} = 484\Omega \quad Z_{2N} = \frac{U_{2N}^2}{S_N} = 4.84\Omega$$

$$r_{1*} = \frac{r_1}{Z_{1N}} = \frac{3.6}{484} = 0.00744 \quad r_{2*} = \frac{r_2}{Z_{2N}} = \frac{0.036}{4.84} = 0.00744$$

$$x_{1\sigma*} = x_{2\sigma*} = \frac{r_k}{2Z_{1N}} = \frac{26}{2 \times 484} = 0.02686$$

$$I_{1N} = \frac{S_N}{U_{1N}} = \frac{10000}{2200} = 4.545\text{A}$$

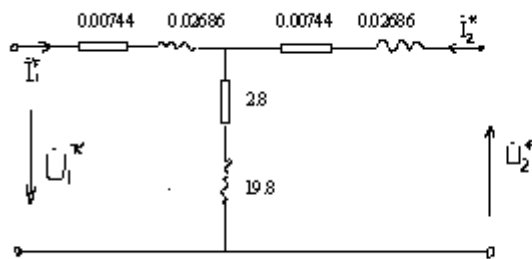
$$I_0 = I_{1N} \times 0.05 = 0.22725\text{A}$$

$$I_{0*} = 5\% = 0.05$$

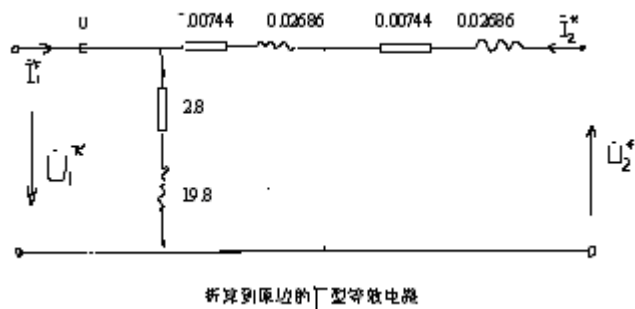
$$\text{所以 } r_{m*} = \frac{P_{Fe*}}{I_{0*}^2} = \frac{70}{10000 \times 0.05^2} = 2.8$$

$$Z_{m*} = \frac{U_{N*}}{I_{0*}} = \frac{1}{0.05} = 20 \quad x_{m*} = \sqrt{Z_{m*}^2 - r_{m*}^2} = 19.8$$

等效电路如图



折算到原边的 T 型等效电路



(2) 设 $-U_2^* = 1 \angle 0^\circ$, 则 $\dot{I}_2^* = 0.8 + j0.6 = 1 \angle -36.87^\circ$

$$U_{1*} = -U_{2*} - I_{2*}(Z_{1*} + Z_{2*}) = 1 + 2 \angle -36.87^\circ (0.00744 + j0.02686) \\ = 1.022 + j0.017 = 1.022 \angle 0.95^\circ$$

$$Z_{m*} = r_{m*} + jx_{m*} = 2.8 + j19.8 = 20 \angle 81.95^\circ$$

所以 $\dot{I}_{m*} = 0$ 故

$$\dot{I}_{1*} = \dot{I}_{m*} - \dot{I}_{2*} = 0.008 - j0.0505 + 0.8 - j0.6 = 0.808 - j0.6505 = 1.037 \angle 37.84^\circ$$

$$\text{原边电流 } I_1 = \left| \dot{I}_1^* \right| I_{1N} = 1.037 \times 4.545 = 4.72A$$

$$\cos \phi_2 = \cos(-38.83^\circ - 0.95^\circ) = 0.768$$

1-18、一台三相变压器， $S_N = 5600KVA$ ， $\frac{U_{1N}}{U_{2N}} = \frac{10}{6.3}kV$ ，Y/ Δ -11 连接，变压器空载

基短路实验数据如下：

实验名称	线电压（伏）	线电流（安）	三相功率（W）	电源加在
空载	6300	7.4	6800	低压边
短路	550	324	18000	高压边

求：（1）计算变压器参数，实际值基标么值；

（2）利用 Γ 型等效电路，求满载 $\cos \varphi_2 = 0.8$ 滞后时的副边电压基原边电流；

（3）求满载 $\cos \varphi_2 = 0.8$ 滞后时的电压变化率级效率。

$$\text{解：(1) } I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}} = \frac{5600}{\sqrt{3} \times 10} = 323.32A$$

$$I_{2N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{2N}} = \frac{5600}{\sqrt{3} \times 6.3} = 513.2A$$

$$\text{所以 } P_0^* = \frac{P_0}{S_N} = \frac{6800}{5600 \times 1000} = 1.2143 \times 10^{-3}$$

$$I_0^* = \frac{I_0}{I_{2N}} = \frac{7.4}{513.2} = 0.0144 \quad U_0^* = \frac{U_0}{U_{2N}} = \frac{6300}{6300} = 1$$

$$P_k^* = \frac{P_k}{S_N} = \frac{18000}{5600 \times 1000} = 3.2143 \times 10^{-3}$$

$$I_k^* = \frac{I_k}{I_{1N}} = \frac{324}{323.32} = 1.002 \quad U_k^* = \frac{U_k}{U_{1N}} = \frac{550}{10000} = 0.055$$

$$\text{则: } r_m^* = \frac{P_0^*}{I_0^{*2}} = \frac{1.2143 \times 10^{-3}}{0.01442^2} = 5.84$$

$$Z_m^* = \frac{U_0^*}{I_0^*} = \frac{1}{0.01442} = 69.3 \quad x_m^* = \sqrt{Z_m^{*2} - r_m^{*2}} = 69.10$$

$$r_k^* = \frac{P_k^*}{I_k^{*2}} = \frac{3.2143 \times 10^{-3}}{1.002^2} = 0.003201$$

$$Z_k^* = \frac{U_k^*}{I_k^*} = \frac{0.055}{1.002} = 0.05489 \quad x_k^* = \sqrt{Z_k^{*2} - r_k^{*2}} = 0.0548$$

$$\text{因 } Z_{1N} = \frac{U_{1N\varphi}}{I_{1N\varphi}} = \frac{U_{1N}}{\sqrt{3} I_{1N}} = 17.857 \Omega$$

$$\text{所以 } Z_m = Z_m^* \times Z_{1N} = 69.34 \times 17.857 = 1238.2 \Omega$$

$$r_m = r_m^* \times Z_{1N} = 5.84 \times 17.857 = 104.1 \Omega$$

$$x_m = x_m^* \times Z_{1N} = 69.1 \times 17.857 = 1234.1 \Omega$$

$$Z_k = Z_k^* \times Z_{1N} = 0.05489 \times 17.857 = 0.979 \Omega$$

$$r_k = r_k^* \times Z_{1N} = 0.003201 \times 17.857 = 0.057 \Omega$$

$$x_k = x_k^* \times Z_{1N} = 0.0548 \times 17.857 = 0.979 \Omega$$

(2) 以 \dot{U}_1 作参考向量, 即 $\dot{U}_1^* = 1 \angle 0^\circ$, 并近似认为 \dot{U}_2 相位与 \dot{U}_1 相反, 故可以得到

$$\dot{I}_2^* = 1 \angle \arccos 0.8 = 0.8 - j0.6$$

所以

$$\begin{aligned} -\dot{U}_2^* &= \dot{U}_1^* - \dot{I}_2^* Z_k^* = 1 \angle -36.87^\circ \times (0.003201 + j0.0548) \\ &= 0.9655 \angle -2.5^\circ \end{aligned}$$

$$\text{故 } U_2 = U_2^* \times U_{2N} = 0.9655 \times 6.3 = 6.08 \text{ kV}$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_1^* &= \dot{I}_m^* + \dot{I}_2^* = \frac{\dot{U}_1^*}{Z_m^*} + \dot{I}_2^* = \frac{1}{5.84 + j69.1} + 0.8 - j0.6 \\ &= 0.8012 - j0.6144 = 1.01 \angle -37.48^\circ \end{aligned}$$

$$\text{故 } I_1 = I_1^* \times I_{1N} = 1.01 \times 323.32 = 326.44 \text{ A}$$

$$(3) \Delta u = r_k^* \cos \phi_2 + x_k^* \sin \phi_2 = (0.3201 \times 0.6 + 5.48 \times 0.6) = 3.54\%$$

$$\eta = \frac{U_2^* I_2^* \cos \phi_2}{U_1^* I_1^* \cos \phi_1} = \frac{0.9655 \times \cos 34.37^\circ}{1.01 \times \cos 37.48^\circ} = 99.43\%$$

对于第(2)个问题, 由于假设 \dot{U}_1 与 $-\dot{U}_2$ 同相, 如想减小这一假设造成的误差, 可对 \dot{I}_2 相位进行修正

$$\begin{aligned} \text{现修正后的 } -\dot{I}_2^* &= 1 \angle \arccos 0.8 + \phi_{2v} \\ &= 1 \angle -39.37^\circ = 0.773 - j0.6343 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} -\dot{U}_2^* &= \dot{U}_1^* + \dot{I}_2^* Z_k^* \\ &= 1 \angle -39.37^\circ (0.003201 + j0.0548) = 0.9636 \angle -2.4^\circ \end{aligned}$$

这样, $\phi_{v2} - \phi_{I2} = -2.6 + 39.37 = 36.77^\circ$ 与 $\arccos 0.8$ 很接近了。

$$\dot{I}_1^* = \dot{I}_m^* - \dot{I}_2^* \frac{\dot{U}_1^*}{Z_m^*} = \dot{I}_2^* \angle -39.9^\circ$$

$$I_1 = \dot{I}_1^* \cdot I_{1N} = 1.01 \times 323.32 = 326.44 \text{ A}$$

1-19、 如何确定变压器的联结组标号?

答 将变压器二次侧线电动势(或线电压)滞后于一次侧对应线电动势(线电压)的角度

除以 30° 即为联结组标号。也可以通过钟表法来确定联结组标号，即把一次侧线电动势（或线电压）看成是钟表的长针，且固定指向钟表的 12 点，把对应的二次侧线电动势（或线电压）看成是钟表的短针，该短针指向的针表数字既是其联结组标号。

1-20、为什么三变压器组不能采用 Y_Y 联结？而三相心式变压器又可采用 Y_y 联结？

答 Y_y 联结的三相变压器，一、二次绕组中都不能流通 3 次谐波电流，励磁电流基本接近正弦形。由于磁路饱和的原因，铁心中主磁通基本为平顶波，其中含较强的 3 次谐波磁通。对于三相变压器组，各相磁路彼此独立，3 次谐波磁通沿铁心闭合。由于铁心磁组很小，故 3 次谐波磁通较大，加上 3 次谐波的频率为基波频率的 3 倍，所以，由它所感应的 3 次谐波相电动势相当大，在数值上可达基波幅值的 45%~60%，甚至更大，结果使相电动势波形畸变，最大值升高很多。可能将绕组绝缘击穿，故不能采用 Y_Y 联结。对于三相心式变压器，由于三相磁路彼此相关，三次谐波磁通又彼此同相位，同大小，不能沿铁心闭合，只能借油，油箱壁等形成闭合。由于这些磁路的磁阻很大，故 3 次谐波磁通很小，主磁通基本接近于正弦形，相电动势也基本接近正弦波，因此可以采用 Y_y 联结，但由于 3 次谐波磁通通过油箱壁闭合，引起附和涡流损耗，因此对容量较大，电压较高的三相心式变压器，也不宜采用 Y_Y 联结。

1-21、一台 Y/Δ 连接的三相变压器，原边加对称正弦额定电压，作空载运行，试分析：

原边电流、副边相电流和线电流中有无三次谐波成分？

主磁通及原副边相电势中有无三次谐波成分？原方相电压及副方相电压和线电压中有无三次谐波成分？

答：（1）由于原方 Y 接，三次谐波电流无通路。所以原边电流没有三次谐波成分。副边三角形接法，由于原边电流没有三次谐波成分，在铁心中产生了平顶波，在线圈中产生了三次谐波感应电势，导致相电流中有三次谐波成分，而线电流中没有三次谐波成分（为什么，自己回答）。

（2）主磁通中有三次谐波，原副方相电势中也有三次谐波成分。原方的相电压中有三次谐波成分，副边相电压及原副方线电压中均无三次谐波成分（这又是为什么）。

1-22、一台 Y/Δ 连接的三相变压器，原边加额定电压空载运行。此时将副方的三角形打开一角测量开口处的电压，再将三角形闭合测量其中的电流。试问当此时三相变压器分别为组式或心式时，所测得的数据有什么不同？为什么？

答：由于组式变压器各相磁路相互独立，三次谐波磁通的磁路就是主磁路，而心式变压器中三次谐波磁通只能走箱壁，与空气等耦合，三次谐波磁阻 Ω_3 很大。故测开口处电压时组式很大，而心式很小（为什么）。当闭合测电流时，表中测得的电流就是三次谐波电流。这个 I_3

起一个激磁电流的作用，使主磁通中 φ^3 减小，根据电压可以知道电流大小情况。

1-23、两台三相变压器并联运行，组号均为 Y/Δ－11，数据如下：

- 1. 变压器 1：5600KVA ， 6000/3050V ， $Z_k^*=0.055$ ；
- 2. 变压器 2：3200KVA ， 6000/3000V ， $Z_k^*=0.055$ 。

两台变压器的短路电阻与短路电抗之比相等，试求空载时每一变压器的循环电流及其标么值。

解：电流 $I_{1N1} = \frac{5600000}{\sqrt{3} \times 6000} = 538.86 \text{ A}$ $I_{2N1} = \frac{5600000}{\sqrt{3} \times 3050} = 1060.05 \text{ A}$

$$I_{1N2} = \frac{3200000}{\sqrt{3} \times 6000} = 307.92 \text{ A} \qquad I_{2N2} = \frac{3200000}{\sqrt{3} \times 3050} = 615.84 \text{ A}$$

则 $Z'_{k1} = Z_k^* \cdot \frac{U_{2N1}}{I_{2N1}} = 0.055 \times \frac{3050}{1060.05} = 0.15825 \Omega$

$$Z'_{k2} = Z_k^* \cdot \frac{U_{2N2}}{I_{2N2}} = 0.055 \times \frac{3000}{615.84} = 0.26793 \Omega$$

变比 $k_1 = 6000 / 3050 = 1.9672$ $k_2 = 6000 / 3000$

环流（线电流） $I_{cr} = \frac{\frac{6000}{k_1} - \frac{6000}{k_2}}{Z'_{k1} + Z'_{k2}} = \frac{3050 - 3000}{0.15825 + 0.26793} = 117.32 \text{ A}$

所以， $I_{cr1}^* = I_{cr} / I_{2N1} = 0.1107$ $I_{cr2}^* = I_{cr} / I_{2N2} = 0.1905$

1-24、 5 台单相变压器具有下列数据：

变压器编号	1	2	3	4	5
额 定 容 量 /kVA	100	100	100	200	200
额定电压/V	3000/230				
短 路 试 验 电 压/V	155	k201	100	138	135
短 路 试 验 电 流/A	34.4	30.5	22.2	61.3	50
短 路 试 验 功 率/W	2200	1300	1500	3549	2812

今需供给一个 300kVA 负载，应选哪几台变压器并联最理想。

解 按规定短路试验应在 高压方接电源，低压方短路，因此由上述数据及高压方额定电压分别计算出短路参数和 短路阻抗角，如下表所示：

变压器编号	1	2	3	4	5
I_{1N}/A	33.33	33.33	33.33	66.67	66.67
$Z_k = \frac{U_k}{I_k} / \Omega$	4.506	6.590	4.505	2.251	2.700
$R_k = \frac{P_k}{I_k^2} / \Omega$	1.859	1.397	3.044	0.944	1.125
$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} / \Omega$	4.104	6.440	3.320	2.044	2.454
$Z_k^* = \frac{Z_k I_{1N}}{U_{1N}}$	0.050	0.073	0.050	0.050	0.060
$\varphi_k = \arctan \frac{X_k}{R_k}$	65.63°	77.76°	47.49°	65.20°	65.37°

根据并联运行的 3 个条件：①电压比相等；②联结组标号相同；③短路阻抗标幺值相等，短路阻抗角相等。题目已明确给出 5 台变压器的电压比相同，所以条件①已满足。由于是单相变压器并联，所以条件②不必考虑。从上表计算出的数值可以看出，当供给负载 300kVA 时，1 号和 4 号变压器并联运行最理想，因为这两台变压器符合并联运行的条件③。

1-25 变压器的空载电流很小，但空载合闸时可能出现很大的电流，这是为什么？什么情况下的合闸电流最大？怎样避免过大的合闸电流？

答 变压器空载合闸时，铁心磁通处于瞬变过程中，其最大值可达稳态时的 2 倍。变压器稳态时，铁心已处于饱和状态，因此在瞬变时，铁心处于过度饱和状态，从磁化曲线可以看出，此时励磁电流一空载电流大大增加，可达稳态空载电流的几十倍。

空载合闸时 磁通的变化与合闸时刻有关，当电源电压瞬时值为零的瞬间合闸时，铁心磁通最大，空载电流亦最大。

要避免空载合闸电流过大可采取的措施有：①选择在电源电压瞬时值为最大的 时刻合闸，此时一合闸即进入稳态，合闸电流最小；②在一次侧串联一个合闸电阻，加速电流的衰减，合闸完后再去掉，第一种方法再实际操作中不易达到。

1-26 单相变压器额定容量为 180kVA，额定电压为 3000/400V,其试验数据为：

实验项目	电压/V	电流/A	功率/W
高压方进行短路试验	90	60	4030
低压方进行空载试验	400	13.5	810

现将变压器的一，二次绕组改接成 3000/3400V 升压自耦变压器，供给 $\cos \varphi_2 = 0.8$ (滞后)

的负载，求该自耦变压器额定容量，满载时的电压调整率及效率。

解
$$I_{1N} = \frac{S_N}{U_{1N}} = \frac{180 \times 10^3}{3000} A = 60 A$$

$$I_{2N} = \frac{S_N}{U_{2N}} = \frac{180 \times 10^3}{400} A = 450 A$$

由高压方侧得短路参数

$$Z_k = \frac{U_k}{I_k} = \frac{90}{60} \Omega = 1.5 \Omega$$

$$Z_k^* = \frac{Z}{U_{1N} / I_{1N}} = \frac{1.5}{3000 / 60} = 0.03$$

$$R_k = \frac{P_k}{I_k^2} = \frac{4030}{60^2} \Omega = 1.119 \Omega$$

$$R_k^* = \frac{R_k}{U_{1N} / I_{1N}} = \frac{1.119}{3000 / 60} = 0.0224$$

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = \sqrt{1.5^2 - 1.119^2} \Omega = 1 \Omega$$

$$X_k^* = \sqrt{Z_k^{*2} - R_k^{*2}} = \sqrt{0.03^2 - 0.0224^2} = 0.02$$

作升压自耦变压器联结时，如图 3-54 所示。

$$I = 60 A \quad I_{2a} = 450 A$$

$$I_{1a} = (450 + 60) A = 510 A$$

$$\text{电磁功率} \quad S_N = U_{1a} I = 3000 \times 60 \times 10^{-3} kVA = 180 kVA$$

$$\text{传递功率} \quad S'_N = U_{1a} I_{1a} = 3000 \times 450 \times 10^{-3} kVA = 1350 kVA$$

$$\text{额定功率} \quad S_{aN} = U_{1a} I_{1a} = 3000 \times 510 \times 10^{-3} kVA = 1530 kVA$$

$$\text{或} \quad S_{aN} = S_N + S'_N = (180 + 1350) kVA = 1530 kVA$$

$$\text{自耦变压器得变化} \quad k_a = \frac{U_{1a}}{U_{2a}} = \frac{3000}{3400} = 0.882$$

短路阻抗标么值分别为

$$R_{ka}^* = (1 - k_a) R_k^* = (1 - 0.882) \times 0.0224 = 0.00264$$

$$X_{ka}^* = (1 - k_a) X_k^* = (1 - 0.882) \times 0.02 = 0.00236$$

电压调整率（满载时）

$$\Delta U = R_{ka}^* \cos \varphi_2 + X_{ka}^* \sin \varphi_2 = 0.00264 \times 0.8 + 0.00236 \times 0.6 = 0.0035$$

满载时得效率

$$\eta = 1 - \frac{P_0 + P_{kN}}{S_{aN} \cos \varphi_2 + P_0 + P_{kN}} = 1 - \frac{0.81 + 0.403}{1530 \times 0.8 + 0.81 + 0.403} = 99.9\%$$

1-27、用对称分量法分析 Y/Y 连接的三相变压器两相短路时，原、副方电流的相互关系。此种情况下是否有中点移动现象？为什么？

解：设副方 a、b 两相短路，并令短路电流为 \dot{I}_k ，则由对称分量法得出：

$$\dot{I}_a = -\dot{I}_b = \dot{I}_k, \quad \dot{I}_c = 0$$

$$\text{所以 } \dot{I}_{A+} = \frac{1}{3}(\dot{I}_A + a\dot{I}_B + a^2\dot{I}_C) = \frac{1}{3}(1-a)\dot{I}_k$$

$$\dot{I}_{A-} = \frac{1}{3}(\dot{I}_A + a^2\dot{I}_B + a\dot{I}_C) = \frac{1}{3}(1-a^2)\dot{I}_k$$

$$\dot{I}_{A0} = \frac{1}{3}(\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C) = 0$$

$$\text{所以 } \dot{I}'_{A+} = -\dot{I}_{A+} = \frac{1}{3}(a-1)\dot{I}_k$$

$$\dot{I}'_{A-} = -\dot{I}_{A-} = \frac{1}{3}(a^2-1)\dot{I}_k$$

$$\dot{I}'_{A0} = \dot{I}'_{B0} + \dot{I}'_{C0} = 0$$

$$\text{则 } \dot{I}'_A = \dot{I}'_{A+} + \dot{I}'_{A-} + \dot{I}'_{A0} = \frac{1}{3}(a-1)\dot{I}_k + \frac{1}{3}(a^2-1)\dot{I}_k = -\dot{I}_k$$

$$\dot{I}'_B = a^2\dot{I}'_{A+} + a\dot{I}'_{A-} + \dot{I}'_{A0} = \frac{1}{3}(1-a^2)\dot{I}_k + \frac{1}{3}(1-a)\dot{I}_k = \dot{I}_k$$

$$\dot{I}'_C = a\dot{I}'_{A+} + a^2\dot{I}'_{A-} + \dot{I}'_{A0} = \frac{1}{3}(a^2-a)\dot{I}_k + \frac{1}{3}(a-a^2)\dot{I}_k = 0$$

$$\text{原方实际电流 } \dot{I}_A = -\dot{I}_B = -\frac{\dot{I}_k}{k}, \quad \dot{I}_C = 0$$

$$\text{因 } \dot{I}_{A0} = 0 \quad \text{没有零序分量}$$

所以 $E_0 = 0$ 此种情况下没有中点移动现象

$$\begin{aligned} \text{由 } -\dot{U}_{a+} &= \dot{U}_{A+} + Z_k \dot{I}_{a+}, & -\dot{U}_{a-} &= \dot{U}_{A-} + Z_k \dot{I}_{a-} \\ -\dot{U}_{b+} &= \dot{U}_{B+} + Z_k a^2 \dot{I}_{a+}, & -\dot{U}_{b-} &= \dot{U}_{B-} + Z_k a \dot{I}_{a-} \end{aligned}$$

$$\text{得 } -\dot{U}_a + \dot{U}_b = \dot{U}_{AB} + 2Z_k \dot{I}_k = 0$$

$$\text{故 } \dot{I}_k = \frac{\dot{U}_{AB}}{2Z_k}$$

1-28、有一台 100 千伏安，Y/Y₀-12，三相心式变压器，U_{1N}/U_{2N}=6000/400 伏，Z_k^{*}=0.055，R_k^{*}=0.02，Z_{m0}^{*}=1+j6，如发生单相短路，试求：（1）原线圈的三相电路；（2）副线圈三相电压；（3）中点移动的数值。

解：（1）当短路时 Z₁=0 时，则有在单相短路时

$$\begin{aligned} -\dot{I}^* &= -3\dot{I}_{a+}^* = \frac{3\dot{U}_{A+}}{2Z_k^* + Z_2^* + Z_{m0}^*} \\ &= \frac{3}{2 \times 0.055 \angle \cos^{-1} \frac{0.02}{0.055} + 0 + 1 + j6} = 0.4846 \angle -80.32^\circ \end{aligned}$$

$$\text{所以 } \dot{I}_A^* = -\frac{2}{3} \dot{I}^* = \frac{2}{3} \times 0.4846 \angle -80.32^\circ = 0.322 \angle -80.32^\circ$$

$$\dot{I}_B^* = \dot{I}_C^* = \frac{1}{3} \dot{I}^* = -\frac{1}{3} \times 0.4846 \angle -80.32^\circ = -0.1615 \angle -80.32^\circ$$

$$\text{而 } I_{1N} = \frac{100000}{\sqrt{3} \times 6000} = 9.623 \text{ A}$$

$$\text{所以变压器原方三相电流为 } I_A = I_A^* I_{1N} = 3.108 \text{ A} \quad I_B = I_C = I_B^* I_{1N} = 1.5 \text{ A}$$

$$(2) \text{ 副线圈电压 } -\dot{U}_{a+}^* = \dot{U}_{A+}^* + \dot{I}_{a+}^* Z_k^* = 1 + \left(\frac{1}{3} \dot{I}^* Z_k^*\right)$$

$$= 0.9991 \angle 0^\circ$$

$$= 1 + \left(-\frac{1}{3} \times 0.4846 \angle -80.32^\circ \times 0.055 \angle \cos^{-1} \frac{0.02}{0.055}\right)$$

$$-\dot{U}_{a-}^* = \dot{I}_{a-}^* Z_k^* = -\frac{1}{3} \times 0.4846 \angle -80.32^\circ \times 0.055 \angle \cos^{-1} \frac{0.02}{0.055}$$

$$= 0.00888 \angle -11.64^\circ$$

$$-\dot{U}_{a0}^* = \dot{I}_{a0}^* Z_{m0}^* = -\frac{1}{3} \times 0.4846 \angle -80.32^\circ \times (1 + j6)$$

$$= -0.9825 \angle 0^\circ$$

$$\text{所以 } -\dot{U}_a^* = -\dot{U}_{a+}^* - \dot{U}_{a-}^* - \dot{U}_{a0}^* = 0$$

$$-\dot{U}_b^* = -a^2 \dot{U}_{a+}^* - a \dot{U}_{a-}^* - \dot{U}_{a0}^* = -1.718 \angle 30.57^\circ$$

$$-\dot{U}_c^* = -a \dot{U}_{a+}^* - a^2 \dot{U}_{a-}^* - \dot{U}_{a0}^* = -1.714 \angle -30.57^\circ$$

$$\text{所以 } U_a = \frac{U_a^* U_{2N}}{\sqrt{3}} = 0 \quad \text{V} \quad U_b = \frac{U_b^* U_{2N}}{\sqrt{3}} = 396.75 \quad \text{V}$$

$$U_c = \frac{U_c^* U_{2N}}{\sqrt{3}} = 395.83 \quad \text{V}$$

$$(3) \text{ 中点移动数值: } E_0 = I_{a0}^* Z_{m0}^* \frac{U_{2N}}{\sqrt{3}} = \frac{1}{3} \times 0.4846 \times \sqrt{1+6^2} \times \frac{400}{\sqrt{3}} = 226.91 \text{ V}$$

1-29、如上题的变压器，副方接一个 $R_L^* = 1$ 的单相负载，试求原边三相电流，副方三相电压和中点移动数值。

$$\text{解: (1) } Z_k^* = 0.055 \angle 68.68^\circ \quad Z_2 \text{ 不计}$$

$$-\dot{I}^* = -3\dot{I}_{a+}^* = \frac{3\dot{U}_{a+}^*}{2Z_k^* + Z_2^* + Z_{m0}^* + 3Z_L^*}$$

$$= \frac{3}{2 \times 0.055 \angle 68.68^\circ + 0 + j6} = 0.4129 \angle -56.4^\circ$$

原方三相电流为

$$\dot{I}_A^* = -\frac{2}{3} \dot{I}^* = \frac{2}{3} \times 0.4129 \angle -56.4^\circ = 0.2753 \angle -56.4^\circ$$

$$\dot{I}_B^* = \dot{I}_C^* = -\frac{\dot{I}_A^*}{2} = 0.13765 \angle -56.4^\circ$$

$$\text{所以 } I_A = I_{1N} I_A^* = 2.649 \text{ A} \quad I_B = I_C = \frac{1}{2} I_{1N} I_A^* = 1.325$$

(2) 副方线圈电压为

$$-\dot{U}_{a+}^* = \dot{U}_{A+}^* + \dot{I}_{a+}^* Z_k^*$$

$$= 1 + \left(-\frac{1}{3} \times 0.4129 \angle -56.4^0 \times 0.055 \angle 68.68^0\right)$$

$$= 0.9926 \angle -0.0929^0$$

$$-\dot{U}_{a-}^* = \dot{I}_{a-}^* Z_k^*$$

$$= \left(-\frac{1}{3} \times 0.4129 \angle -56.4^0 \times 0.055 \angle 68.68^0\right)$$

$$= -0.0075 \angle 2.2^0$$

$$-\dot{U}_{a0}^* = \dot{I}_{a0}^* Z_{m0}^*$$

$$= \frac{1}{3} \times 0.4129 \angle 56.4^0 \times (1 + j0.57735) \angle 30^0$$

$$= -0.8372 \angle 24.1^0$$

$$-\dot{U}_a^* = -U_{a+}^* - \dot{U}_{a-}^* - \dot{U}_{a0}^*$$

$$= 0.4103 \angle -57.38^0$$

$$-\dot{U}_b^* = -a^2 U_{a+}^* - a \dot{U}_{a-}^* - \dot{U}_{a0}^*$$

$$= -1.7423 \angle 43.84^0$$

$$-\dot{U}_c^* = -a U_{a+}^* - a^2 \dot{U}_{a-}^* - \dot{U}_{a0}^*$$

$$= -1.7444 \angle 43.9^0$$

则: $-\dot{U}_a = -\dot{U}_a^* \times \frac{U_{2N}}{\sqrt{3}} = 0.4103 \angle -57.38^0 = 94.755 \angle -57.38^0$

$$-\dot{U}_b = -\dot{U}_b^* \times \frac{U_{2N}}{\sqrt{3}} = -402.37 \angle 43.8^0$$

$$-\dot{U}_c = -\dot{U}_c^* \times \frac{U_{2N}}{\sqrt{3}} = -402.85 \angle -43.9^0$$

(3) 中点移动数值:

$$-E_0 = \dot{I}_{a0}^* \cdot Z_{m0}^* \cdot \frac{U_{2N}}{\sqrt{3}}$$

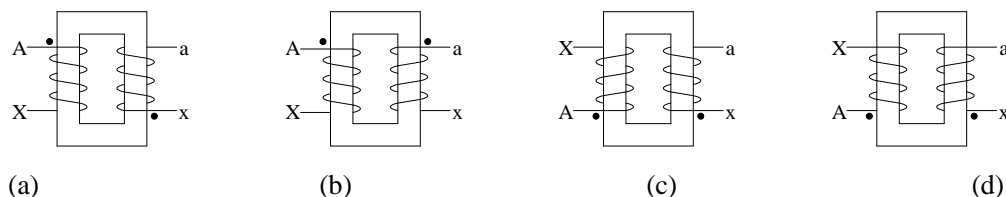
$$= -\frac{1}{3} \times 0.4129 \angle -56.4^\circ \times (1 + j6) \times \frac{400}{\sqrt{3}} = 193.34 \angle 24.14^\circ \quad \text{伏}$$

$$\eta = \frac{113.33 - 0.616 - 2.35}{113.33} = 97.38\%$$

1-30 三相变压器组与三相心式变压器在磁路上各有什么特点？

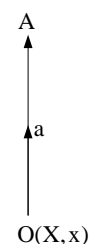
【解】变压器组每相有一个闭合的独立磁路；心式变压器每相磁路需经过另外两相铁心柱闭合。

1-31 试标出图 3-29(a)、(b)、(c)、(d)四图中变压器绕组的同极性端，并画出高、低压侧绕组的电压向量图，写出其连结组标号。

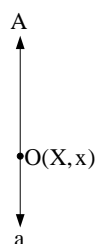


【解】根据绕向可判断出绕组的同极性端，其标注如上图所示。

按同极性端画出相量图，其中图 (b) 对应于 (g) 图，图 (a)、(c)、(d) 对应于 (h) 图。



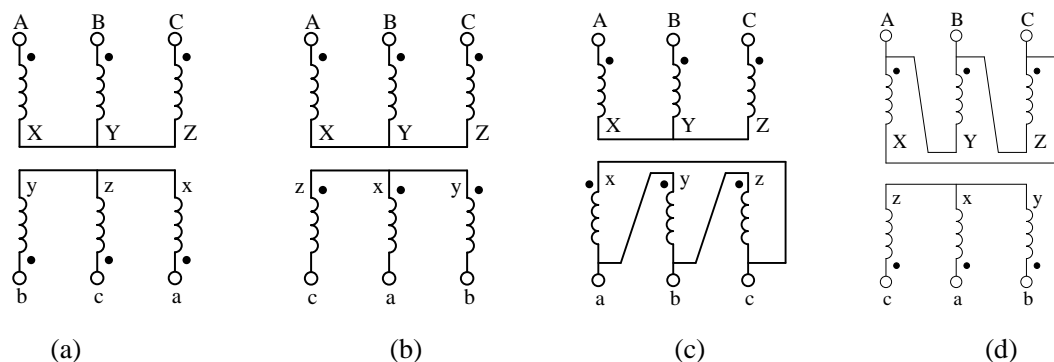
(g)



(h)

即图 (a)、(c)、(d) 变压器的连结组别为 I,i6；图 (b) 变压器的连结组别为 I,i0。

1-32 已知图 3-30 所示三相变压器连结组及绕组相对极性，试画相量图判定其连结组标号。



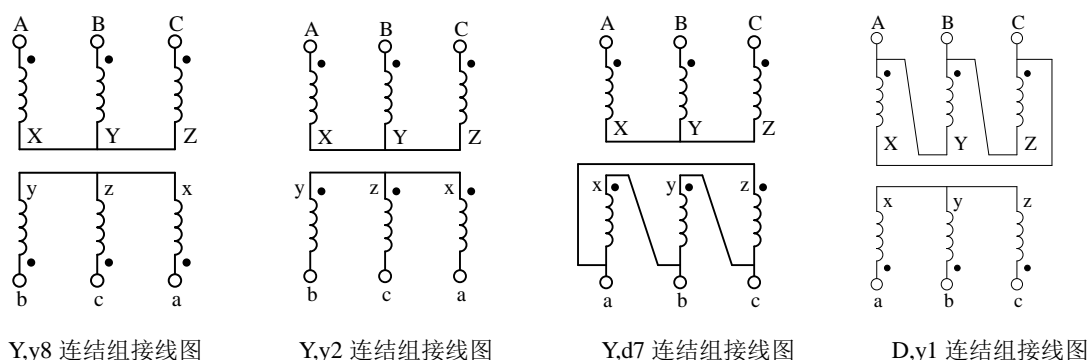
1-33 根据下列连结组标号，画出其三相绕组的接线(1)Y,y8；(2)Y,y2；(3)Y,d7；(4)D,y1。

解：第一步：作 电压相量图

第二步：然后画出三相绕组，把高压绕组的首端分别标成 A、B、C 并打上同极性端记号“●”。

第三步：根据高、低压侧电压相量图上的相位关系，在接线图低压绕组上标出与高压绕组首端对应的同极性端、以及低压绕组首端的字母。

第四步：按联结组别给出的接法将高、低压绕组分别连接成三相电路，这样就得到了接线图。



1-34 一台 Y,d 联结组的三相变压器，一次侧加三相对称电压，二次侧空载。试分析：

(1) 一、二次侧相电流及线电流中是否有了 3 次谐波成分。

(2) 主磁通及一、二次相电压及线电压中有无 3 次谐波成分。

解：在电源电压对称的条件下，三相变压器中出现谐波的根本原因是磁路饱和。在磁路饱和（正常如此）情况下，为了获得正弦波电压，要求电流中有谐波（通常主要考虑幅值最大 3 次谐波），而 3 次谐波电流能否流通取决于其绕组接线方式。由于电力系统象一个大仓库，能够提供变压器工作所需的各种电流成分（包括基波和各次谐波）。因此，只要一次侧进线中有 3 次谐波电流通路（带中性线的星形接线，即 YN 接线），主磁通和绕组电动势便能保持为正弦波，否则主磁通和绕组电动势中就要出现 3 次谐波。但是，当变压器绕组中任意一侧为 Δ 接线时，3 次谐波电动势将在 Δ 内部产生 3 次谐波电流，它将会产生一个 3 次谐波磁通并与原有的 3 次谐波磁通相互抵消，最终在铁心中维持一个不大的 3 次谐波磁通，结果使主磁通和绕组电动势接近正弦波；当二次侧绕组采用 YN 接线时，3 次谐波电动势也能在其中产生 3 次谐波电流，不过其大小受负载阻抗的限制，这一电流所产生的 3 次谐波磁通虽然也与原有 3 次谐波磁通抵消，但抵偿效果较差，最终使主磁通和绕组电动势中仍有较大的 3 次谐波。综上所述，在 Y,y 或 y,yn 接线的三相变压器中将存在 3 次谐波，谐波的幅值与变压器的磁路结构有关，对三相变压器组，谐波的幅值很大，容易造成绕组过电压而损坏，故实际不采用这两种接线；对三相心柱式变压器，谐波幅值相对较小，实际允许采用这两种接线，但仅限于容量在 1800kVA 及以下的变压器。大型变压器通常都采用一侧为 Δ 的接线方式。

(2)、二次侧线电流中都不可能有 3 次谐波；一、二次侧相电流都有不大的 3 次谐波分量。

(2) 铁心磁通（即主磁通）中存在不大的 3 次谐波分量；一次侧线电压和二次侧的线电压与相电压中均无 3 次谐波，但一次侧相电压中存在不大的 3 次谐波分量。

1-35 变压器并联运行要满足那些条件？哪些条件允许稍有松动？会带来什么后果？

【解】变压器理想并联应满足的条件有：

(1) 各变压器一、二次侧额定电压相同，通常表现为变比相同。

(2) 各变压器的联结组标号相同，即二次侧电压相位相同，通常表现为联结组相同。

(3) 各变压器的短路电压百分数 u_K （即短路阻抗标幺值 z_K^* ）相同，并且短路阻抗角相同。

其中，条件(1)、(3)允许稍有松动；条件(2)必须满足，否则会出现极大的环流而损坏变压器。变比不同时，各并联变压器之间会产生环流，其方向是从变比小的变压器流出而进入变比大的

的变压器，同时变比相对误差 $\Delta K = \frac{|K_1 - K_2|}{\sqrt{K_1 K_2}} \times 100\%$ 每增大 1% 其大小约增加额定电流的

10%，结果导致变比小的变压器负载加重而容易过载、变比大的变压器负载减轻而不能充分容量。因此，实际并联运行的变压器，变比通常都应该是相同的，如不同则 ΔK 也应该控制在 1% 以内。

变压器短路电压百分数 u_K 不同时，负载系数 β 就不同，即 u_K 小的 β 大、 u_K 大的 β 小，这会使变压器的利用率降低；短路阻抗角 φ_K 不同则会造成电流相位不同，这样在总负载一定时各变压器的电流将增大，从而使铜耗增大。实际要求 u_K 尽可能相近，而容量比不超过 1: 3 以保证 φ_K 相等。

1-36 几台并联运行的变压器其 z_K^* 不等，并联组带负载时，哪一台变压器负载系数 β 最大？

z_K^* 大的变压器，希望其容量大些还是小些好？若 K 不等又如何？

【解】由上题可知， z_K^* 最小的变压器负载系数 β 最大。为提高变压器的利用率，通常希望 z_K^* 大的变压器容量小一些。若 K 不等，希望 K 小的变压器容量大，原因是容量大额定电流大，承受电流能力强。

1-37 两台联结组别为 Y,d11 的三相变压器并联运行，其中第一台 $S_{N1}=5600\text{kVA}$ 、 $U_{1N}/U_{2N}=6000/3050\text{V}$ 、 $z_{K1}^*=0.055$ ，第二台 $S_{N2}=3200\text{kVA}$ 、 $U_{1N}/U_{2N}=6000/3000\text{V}$ 、 $z_{K2}^*=0.055$ 。不计短路阻抗角的影响，试求空载时每台变压器中环流标么值。

【解】第一台变压器二次侧阻抗基准值 $Z_{2B1}=3\times\frac{(3.05\text{k})^2}{5600\text{k}}=4.9835\Omega$ ，

$$z_{K1}=z_{K1}^*Z_{2B1}=0.2741\Omega$$

第二台变压器二次侧阻抗基准值 $Z_{2B2}=3\times\frac{(3\text{k})^2}{3200\text{k}}=8.4375\Omega$ ， $z_{K2}=z_{K2}^*Z_{2B2}=0.4641\Omega$

$$\text{二次侧环流 } I_h = \left| \frac{U_{2N1} - U_{2N2}}{z_{K1} + z_{K2}} \right| = \left| \frac{3050 - 3000}{0.2741 + 0.4641} \right| = 67.7\text{A}$$

$$\text{二次额定电流：第一台 } I_{2N1} = \frac{5600\text{kVA}}{\sqrt{3} \times 3.05\text{k}} = 1060\text{A}，\text{第二台 } I_{2N2} = \frac{3200\text{kVA}}{\sqrt{3} \times 3\text{k}} = 615.8\text{A}$$

$$\text{环流标么值：第一台 } I_{h1}^* = \frac{I_h}{I_{2N1}} = \frac{67.7}{1060} = 0.064，\text{第二台 } I_{h2}^* = \frac{I_h}{I_{2N2}} = \frac{67.7}{615.8} = 0.11$$

注意每台变压器一、二次侧的环流标么值相等。

1-38 某变电所有两台变压器联结组别相同，第一台 $S_{N1}=3200\text{kVA}$ 、 $U_{1N}/U_{2N}=35/6.3\text{kV}$ 、 $u_{K1}=6.9\%$ ，第二台 $S_{N2}=5600\text{kVA}$ 、 $U_{1N}/U_{2N}=35/6.3\text{kV}$ 、 $u_{K2}=7.5\%$ 。试求：

(1) 两台变压器并联运行，输出总负载为 8000kVA 时，每台变压器应分担多少？

(2) 在没有任何一台过载的情况下可输出的最大总负载为多少？设备利用率是多少？

【解】(1) 输出总负载为 $S=8000\text{kVA}$ 时

$$\text{第一台变压器负载 } S_1 = \frac{\frac{S_{N1}}{u_{K1}^*}}{\frac{S_{N1}}{u_{K1}^*} + \frac{S_{N2}}{u_{K2}^*}} S = \frac{\frac{3200}{0.069}}{\frac{3200}{0.069} + \frac{5600}{0.075}} \times 8000 = \frac{46377}{121043} \times 8000 = 3065 \text{ kVA}$$

$$\text{第二台变压器负载 } S_2 = \frac{\frac{S_{N2}}{u_{K2}^*}}{\frac{S_{N1}}{u_{K1}^*} + \frac{S_{N2}}{u_{K2}^*}} S = \frac{\frac{5600}{0.075}}{\frac{3200}{0.069} + \frac{5600}{0.075}} \times 8000 = \frac{74667}{121043} \times 8000 = 4935 \text{ kVA}$$

$$\text{或 } S_2 = S - S_1 = 8000 - 3065 = 4935 \text{ kVA}$$

(2) 在没有任何一台变压器过载的情况下

因 $u_{K1} < u_{K2}$, 故第一台先达到满载, 即其 $\beta_1 = 1$, 而第二台 $\beta_2 = \frac{u_{K1}}{u_{K2}} = \frac{0.069}{0.075} = 0.92$, 则有

$$\text{最大输出总负载 } S_{\max} = \beta_1 S_{N1} + \beta_2 S_{N2} = 3200 + 0.92 \times 5600 = 8352 \text{ kVA}$$

$$\text{设备利用率 } K = \frac{S_{\max}}{S_{N1} + S_{N2}} = \frac{8352}{3200 + 5600} = 0.949 = 94.9\%$$

1-39 由于生产发展, 某工厂用电量由 500kVA 增为 800kVA, 原有一台变压器的额定数据 $S_N = 560 \text{ kVA}$ 、 $U_{1N}/U_{2N} = 6300/400 \text{ V}$ 、 $Y, yn0$ 联结组, $u_K = 6.5\%$ 。今有 4 台备用变压器数据如下:

$S_{N1} = 320 \text{ kVA}$ $U_{1N}/U_{2N} = 6300/400 \text{ V}$ $Y, yn0$ $u_{K1} = 5\%$
 $S_{N2} = 240 \text{ kVA}$ $U_{1N}/U_{2N} = 6300/400 \text{ V}$ $Y, yn2$ $u_{K2} = 6.5\%$
 $S_{N3} = 240 \text{ kVA}$ $U_{1N}/U_{2N} = 6300/400 \text{ V}$ $Y, yn4$ $u_{K3} = 6.5\%$
 $S_{N4} = 320 \text{ kVA}$ $U_{1N}/U_{2N} = 6300/420 \text{ V}$ $Y, yn0$ $u_{K4} = 6.5\%$

(1) 试说明在不允许变压器过载的情况下, 选用哪一台?

(2) 上述 5 台变压器哪几台可以并联运行? 可以并联的变压器能承担的最大负载为多少?

【解】(1) 输出总负载为 $S = 800 \text{ kVA}$ 、且不允许变压器过载情况下的备用并联变压器选择。选择变压器是并联运行要解决的首要问题, 它通常按照在一定总负载下变压器不过载的原则、对照并联条件来选择变压器容量。当并联条件理想时, 只要保证所选择的变压器容量总和不小于总负载即可。条件不理想时就要分别加以分析, 由题 3-9 可知: 联结组标号必须相同, 否则环流就会使变压器严重过载; 变比不同时, 环流会导致变比小的变压器负载加重, 这就要求容量总和比总负载大许多, 否则该台变压器就容易过载; 短路电压百分数不同会使变压器的利用率降低, 故容量总和一定比总负载要大。

第二台变压器要改接成 $Y, yn0$ 必须开盖来改变其内部接线, 因难于现场操作而不宜采用; 第三台只要将一次侧顺序前移一相便与原变压器联结组相同, 实施方便可以采用; 第四台与原

$$\text{变压器的变比误差 } \Delta K = \frac{|K_1 - K_2|}{\sqrt{K_1 K_2}} = \frac{|420 - 400|}{\sqrt{420 \times 400}} = 4.9\%, \text{ 环流相当大而使原变压器过载, 故}$$

不能采用。据此

若选第一台变压器并联时, 由于 $u_K > u_{K1}$, 此时能带的最大负载为

$$S_{\max} = S_{N1} + \frac{u_{K1}}{u_K} S_N = 320 + \frac{0.05}{0.065} \times 560 = 750.76 \text{ kVA} < 800 \text{ kVA}, \text{ 故也不能采用。}$$

若选第三台变压器并联时，由于 $u_K = u_{K3}$ ，此时能带的最大负载为

$$S_{\max} = S_{N3} + S_N = 240 + 560 = 800 \text{ kVA}$$

综上所述，应选择第三台变压器来与原变压器并联。

(2) 上述 5 台变压器中，原变压器可以与第一、第三台并联，当他们均不过载时

$$\text{最大负载 } S_{\max} = S_{N1} + \frac{u_{K1}}{u_K} S_N + \frac{u_{K1}}{u_{K3}} S_{N3} = 320 + \frac{0.05}{0.065} \times 560 + \frac{0.05}{0.065} \times 240 = 935.4 \text{ kVA}$$

1-40 设有两台变压器并联运行，其额定电压 $U_{1N}/U_{2N}=110/10\text{KV}$ ，其它数据为：

第一台： $S_{N1}=100000\text{kVA}$ ， $p_{01}=80\text{KW}$ ， $u_{K1}=0.05=\mathbf{z}_{K1}^*$ ， $p_{KN1}=100\text{kW}$

第二台： $S_{N2}=50000\text{kVA}$ ， $p_{02}=42\text{KW}$ ， $u_{K2}=0.055=\mathbf{z}_{K2}^*$ ， $p_{KN2}=55\text{kW}$

(1) 当它们带 135000kVA ，功率因数为 0.8 滞后的负荷时，每台变压器分别承担多大的负荷？

(2) 保证每台变压器均不过载时，它们所能承担的最大负荷为多少？

(3) 并联的两台变压器带多大的负荷时，它们的总效率最高？

(4) 若第二台变压器的 $u_{K2}=0.05$ 而其它条件不变时，它们的负载系数是否相同？

【 解 】 短 路 阻 抗 角 $\varphi_{K1} = \cos^{-1} \frac{P_{K1}^*}{u_{K1}^*} = \cos^{-1} \frac{0.0001}{0.05} = 89.89^\circ$ 、

$$\varphi_{K2} = \cos^{-1} \frac{P_{K2}^*}{u_{K2}^*} = \cos^{-1} \frac{0.00011}{0.055} = \varphi_{K1} \text{，所以这是两台变压器短路电压百分数不等的并联情况。}$$

在此条件下：

(1) 带 $S=135000\text{kVA}$ 、 $\cos\varphi=0.8$ 滞后负载时，此时各台负载的功率因数不变、大小则分别为

$$\text{第一台 } S_1 = \frac{\frac{S_{N1}}{z_{K1}^*}}{\frac{S_{N1}}{z_{K1}^*} + \frac{S_{N2}}{z_{K2}^*}} S = \frac{\frac{100000}{0.05}}{\frac{100000}{0.05} + \frac{50000}{0.055}} \times 135000 = \frac{2 \times 10^6}{2.91 \times 10^6} \times 135000 = 92783.5 \text{ kVA}$$

$$\text{第二台 } S_2 = \frac{\frac{S_{N2}}{z_{K2}^*}}{\frac{S_{N1}}{z_{K1}^*} + \frac{S_{N2}}{z_{K2}^*}} S = \frac{\frac{50000}{0.055}}{\frac{100000}{0.05} + \frac{50000}{0.055}} \times 135000 = \frac{0.91 \times 10^6}{2.91 \times 10^6} \times 135000 = 42216.5 \text{ kVA} = S - S_1$$

(2) 在任一台变压器均不过载的情况下

$$\text{最大负载 } S_{\max} = S_{N1} + \frac{u_{K1}}{u_{K2}} S_{N2} = 100000 + \frac{0.05}{0.055} \times 50000 = 145454.5 \text{ kVA}$$

(3) 总效率最高时，若设负载为 S 、第一台负载系数为 β_1 、第二台负载系数为 β_2 ，则由条件知：

$$\frac{\beta_1}{\beta_2} = \frac{u_{K2}}{u_{K1}} = \frac{0.055}{0.05} = 1.1 \text{，即 } \beta_1 = 1.1\beta_2 \text{，于是}$$

$$S = \beta_1 S_{N1} + \beta_2 S_{N2} = 1.1\beta_2 S_{N1} + \beta_2 S_{N2} = A\beta_2$$

式中 $A=1.1S_{N1}+S_{N2}=1.1\times 100000+50000=160000\text{kVA}$

这样变压器组的总效率为：

$$\eta = \frac{S \cos \varphi_2}{S \cos \varphi_2 + p_{01} + p_{02} + \beta_1^2 p_{KN1} + \beta_2^2 p_{KN2}} = \frac{A \beta_2 \cos \varphi_2}{A \beta_2 \cos \varphi_2 + B + C \beta_2^2}$$

式中： $B=p_{01}+p_{02}=80+42=122\text{kW}$ ，为并联变压器总的不变损耗；

$C=1.1^2 p_{KN1}+p_{KN2}=1.21\times 100+55=176\text{kW}$ ， $C\beta_2^2$ 为并联变压器总的可变损耗。

$$\text{令 } \frac{d\eta}{d\beta_2} = \frac{A \cos \varphi_2 (A \beta_2 \cos \varphi_2 + B + C \beta_2^2) - A \beta_2 \cos \varphi_2 (A \cos \varphi_2 + 2C \beta_2)}{(A \beta_2 \cos \varphi_2 + B + C \beta_2^2)^2} = 0$$

即 $B - C\beta_2^2 = 0$ 时，并联变压器总的效率最高。于是可求得

$$\beta_2 = \sqrt{\frac{B}{C}} = \sqrt{\frac{122}{176}} = 0.8326, \quad \beta_1 = 1.1\beta_2 = 0.9158, \quad S = A\beta_2 = 133212\text{kVA}$$

本项结论说明：当总的可变损耗与总的不变损耗相等时，并联变压器总的效率最高。

(4) 在 $u_{K2}=0.05$ 而其他条件不变的情况下，设总负载为 S ，则

$$\text{此时 } u_{K1}=u_{K2}=0.05, \quad \varphi_{K1} = \cos^{-1} \frac{0.0001}{0.05} \neq \varphi_{K2} = \cos^{-1} \frac{0.00011}{0.05}, \quad \text{则}$$

第 一 台 负 载 系 数

$$\beta_1 = \frac{|S_1|}{S_{N1}} = \frac{\frac{1}{u_{K1} \angle \varphi_{K1}} S}{\frac{S_{N1}}{u_{K1} \angle \varphi_{K1}} + \frac{S_{N2}}{u_{K2} \angle \varphi_{K2}}} = \frac{1 \angle \varphi_{K2}}{|S_{N1} \angle \varphi_{K2} + S_{N2} \angle \varphi_{K1}|} S = \frac{S}{|S_{N1} \angle \varphi_{K2} + S_{N2} \angle \varphi_{K1}|}$$

第 二 台 负 载 系 数

$$\beta_2 = \frac{|S_2|}{S_{N2}} = \frac{\frac{1}{u_{K2} \angle \varphi_{K1}} S}{\frac{S_{N1}}{u_{K1} \angle \varphi_{K1}} + \frac{S_{N2}}{u_{K2} \angle \varphi_{K2}}} = \frac{1 \angle \varphi_{K1}}{|S_{N1} \angle \varphi_{K2} + S_{N2} \angle \varphi_{K1}|} S = \frac{S}{|S_{N1} \angle \varphi_{K2} + S_{N2} \angle \varphi_{K1}|}$$

可见，两台变压器的负载系数相等，但他们的电流相位不同。

1-41 何谓相序阻抗？正序、负序、零序阻抗在变压器分析中有何不同？如何理解磁路结构与绕组连接对零序阻抗的影响？

说明：对称分量法是分析交流电机（含变压器）不对称运行问题时所普遍采用的一种变量代换方法。它基于《电路》课程中的叠加原理，这要求电机是一个线性系统，即其主磁路不饱和。实际电机的磁路都具有一定程度的饱和，故运用此法所得结论只能供问题定性时参考。

【解】相序阻抗是指正序、负序和零序电流所遇到的变压器内部阻抗，包括绕组漏阻抗和激磁阻抗。（它用来模拟变压器正序、负序和零序的物理状况，数值则与各序主磁通和电流的路径有关。）

从电流路径看，正、负序电流不受绕组连接影响而正常流通；零序电流则受绕组连接影响而

不一定能流通。从主磁通路径看，正、负序磁通都经铁心闭合而与磁路结构无关，因此，激磁阻抗 Z_m 接近无穷大，变压器正、负序都能用简化等效电路分析，即正序阻抗和负序阻抗都是短路阻抗；零序磁通路径则受磁路结构影响，所以零序阻抗与绕组连接和磁路结构都有关系，这就是区别。

零序电流受绕组接线的影响是：星形（Y）不能流通；三角形（ Δ ）不能在线电流（ Δ 外部）但能在相电流（ Δ 内部）中流通；带中性线星形则能流通。零序磁通受磁路结构的影响是：变压器组中经铁心闭合，零序激磁阻抗 $Z_{m0}=Z_m$ ；心柱式变压器中经漏磁路闭合， $|Z_{m0}|$ 比 $|Z_m|$ 小得多。因此，从接线为 Y 或 Δ 的一侧看，零序阻抗 $Z_0=\infty$ ；从接线为 YN 的一侧看，零序阻抗还与另一侧绕组接线方式有关，如是 Δ 接线则 $Z_0=Z_K$ ，若是 Y 接线则 $Z_0=Z_{m0}$ 。

1-42 何谓中性点位移？三相变压器日常供电时，三相负载总会有一定的不平衡，是否会产生中性点位移？会带来什么影响？

【解】变压器中性点偏离三角形中心是现象称为中性点位移。当三相负载不平衡时，除二次侧为 Y 接线的情况外，其他情况下变压器都会产生一定的中性点位移，结果使负载重的一相电压降低，其他两相电压往往升高，从而影响用电器正常工作，甚至有损坏电器的可能。

1-43 已知三相不对称电流的分量为： $\dot{I}_{A1}=20A$ ， $\dot{I}_{A2}=5-j8.66A$ ， $\dot{I}_{A0}=j5$ 。试求不对称电流 \dot{I}_A 、 \dot{I}_B 、 \dot{I}_C 。

【解】 $\dot{I}_A = \dot{I}_{A1} + \dot{I}_{A2} + \dot{I}_{A0} = 20 + (5 - j8.66) + j5 = 25 - j3.66 = 25.3 \angle -8.33^\circ A$

$\dot{I}_B = \dot{I}_{B1} + \dot{I}_{B2} + \dot{I}_{B0} = a^2 \dot{I}_{A1} + a \dot{I}_{A2} + \dot{I}_{A0} = (-10 - j17.32) + (5 + j8.66) + j5 = 6.2 \angle -143.8^\circ A$

$\dot{I}_C = \dot{I}_{C1} + \dot{I}_{C2} + \dot{I}_{C0} = a \dot{I}_{A1} + a^2 \dot{I}_{A2} + \dot{I}_{A0} = (-10 + j17.32) + (-10) + j5 = 30 \angle 131.86^\circ A$

1-44 Y,yn 接法、100kVA、6000/400V 的三相心柱式变压器，其参数的标幺值 $z_K^*=0.055$ ， $r_K^*=0.02$ ， $Z_{m0}^*=0.1+j0.6$ 。该变压器二次侧单相对地短路，试求：

(1)一次侧三相电流。

(2)二次侧三相电压。

(3)中性点移动数值。

【解】额定电流： $I_{1N} = \frac{S_N}{U_{1N}} = \frac{100kVA}{\sqrt{3} \times 6k} = 9.6225A$ ， $I_{2N} = \frac{S_N}{U_{2N}} = \frac{3200kVA}{\sqrt{3} \times 0.4k} = 144.34A$

短路阻抗： $x_K^* = \sqrt{z_K^{*2} - r_K^{*2}} = 0.051$ ， $Z_K^* = r_K^* + jx_K^* = 0.02 + j0.051 = 2Z_1^* = 2Z_2^*$

(1) $Z_L=0$ （短路）时，若设 $\dot{U}_A^* = 1 \angle 0^\circ = 1$ ，则

$$-\dot{I}^* = \frac{3\dot{U}_A^*}{2Z_K^* + Z_2^* + Z_{m0}^*} = \frac{3 \times 1}{2.5 \times (0.02 + j0.051) + (0.1 + j0.6)} = \frac{3}{0.15 + j0.728} = 4.04 \angle -78.36^\circ$$

二次侧电流： $\dot{I}_a^* = \dot{I}^* = 4.04 \angle 101.64^\circ$ 、 $\dot{I}_b^* = \dot{I}_c^* = 0$ ，即 $I_a=583.1A$ 、 $I_b=I_c=0$

一次侧电流: $\dot{I}_A^* = -\frac{2}{3}\dot{I}^* = 2.69\angle -78.36^\circ$ 、 $\dot{I}_B^* = \dot{I}_C^* = \frac{1}{3}\dot{I}^* = 1.35\angle 101.64^\circ$

即 $I_A = 25.89A \approx 26A$ 、 $I_B = I_C = 12.95A \approx 13A$

(2)额定相电压 $U_{1N\phi} = \frac{U_{1N}}{\sqrt{3}} = \frac{6000}{\sqrt{3}} = 3464.1V$, $U_{2N\phi} = \frac{U_{2N}}{\sqrt{3}} = \frac{400}{\sqrt{3}} = 230.9V$

由于 a 相负载短路, 故 b、c 相电压均上升为线电压, 即有

二次侧电压: $U_a = 0$ 、 $U_b = U_c = \sqrt{3}U_{2N\phi} = 400V$

(3)中点移动的数值 $E_0 = U_{2N\phi} = 230.9V$

或 $E_0 \approx I_0 Z_{m0} = (4.04 \div 3) \times |0.1 + j0.6| \times 230.9 = 0.82 \times 230.9 = 188.9V$

交流绕组共同问题

3-1 三相双层短距交流绕组 $q=5$, 已知其 5 次谐波的绕组 $k_{N5}=0.10$, 求该绕组的基波及 7 次谐波的绕组系数.

解 正规 60° 相带绕组 $q^{\alpha 1} = 60$

$$\text{绕组分布系数 } k_{qv} = \frac{\sin v \frac{q^{\alpha 1}}{2}}{q \sin \frac{v \alpha_1}{2}} = \frac{\sin v * 30^\circ}{q \sin \frac{v * 30^\circ}{q}}$$

由已知 $q=5$ 得 5 次谐波分布系数为

$$k_{q5} = \frac{\sin 5 * 30^\circ}{q \sin \frac{5 * 30^\circ}{q}} = \frac{\sin 150^\circ}{5 \sin \frac{150^\circ}{5}} = 0.2$$

$$\text{短距系数 } k_{y5} = \frac{k_{N5}}{k_{q5}} = \frac{0.1}{0.2} = 0.5$$

$$\text{即 } k_{y5} = \sin 5 * \frac{y_1}{\tau} * \frac{\pi}{2} = 0.5$$

$$\text{因此有 } \frac{5\pi}{2} \frac{y_1}{\tau} = 2k\pi + \frac{\pi}{6} \quad (k=0, 1, 2, \dots)$$

$$\text{取 } k=1 \text{ 得 } \frac{y_1}{\tau} = \frac{13}{15} \text{ (合理)}$$

对基波绕组系数为

$$k_{q1} = \frac{\sin 30^0}{q \sin \frac{30^0}{q}} = \frac{\sin 30^0}{5 \sin \frac{30^0}{5}} = 0.9567$$

$$k_{y1} = \sin \frac{y_1}{\tau} \frac{\pi}{2} = \sin \frac{13}{15} * \frac{\pi}{2} = 0.9781$$

$$k_{n1} = k_{y1} k_{q1} = 0.9781 * 0.9567 = 0.9357$$

对 7 次谐波

$$k_{q7} = \frac{\sin 7 * 30^0}{q \sin \frac{7 * 30^0}{q}} = \frac{\sin 7 * 30^0}{5 \sin \frac{7 * 30^0}{5}} = -0.1494$$

$$k_{y7} = \sin 7 * \frac{y_1}{\tau} * \frac{\pi}{2} = \sin 7 * \frac{13}{15} * \frac{\pi}{2} = -0.1045$$

$$k_{n7} = k_{y7} k_{q7} = -0.1045 * (-0.1494) = 0.0156$$

3-2 三相双层绕组 $Z=36, 2p=2, y_1=14, N_c=1, f=50\text{Hz}, \Phi_1=2.63\text{Wb}, a=1$, 试求:

- (1) 导体电动势;
- (2) 匝电动势;
- (3) 线圈电动势
- (4) 线圈组电动势;\
- (5) 绕组相电动势.

$$\text{解 极距 } \tau = \frac{Z}{2p} = \frac{36}{2} = 18$$

$$\text{槽距电角 } \alpha_1 = \frac{p * 360^0}{Z} = \frac{1 * 360^0}{36} = 10^0$$

$$\text{每极每相槽数 } q = \frac{Z}{2mp} = \frac{36}{2 * 3 * 1} = 6$$

$$\text{短距系数 } k_{y1} = \sin \frac{y_1}{\pi} 90^0 = \sin \frac{14}{18} * 90^0 = 0.9397$$

$$\text{分布系数 } k_{q1} = \frac{\sin \frac{q\alpha_1}{2}}{q \sin \frac{\alpha_1}{2}} = \frac{\sin \frac{6 * 10^0}{2}}{6 \sin \frac{10^0}{2}} = 0.9561$$

$$\text{绕组系数 } k_{N1} = k_{y1} k_{q1} = 0.9397 * 0.9561 = 0.8984$$

$$(1) \text{ 导体电动势 } E_{C1} = 2.22F\Phi_1 = 2.22 \times 50 \times 2.63 = 291.9\text{V}$$

$$(2) \text{ 匝电动势 } = E_{t1} = 2E_{C1} \quad k_{y1} = 2 \times 291.9 \times 0.9397 = 548.6\text{V}$$

$$(3) \text{ 线圈电动势 } E_{y1} = N_c \quad E_{t1} = 1 \times 548.6 = 548.6\text{V}$$

$$(4) \text{ 线圈组电动势 } E_{q1} = q E_{y1} \quad k_{q1} = 6 \times 548.6 \times 0.9561 = 3147\text{V}$$

$$(5) \text{ 相绕组电动势 } E_{\phi 1} = \frac{2pE_{q1}}{a} = 2 \times 3147 = 6294\text{V}$$

3-3 试从物理方面说明分布和短距能改善磁动势波形的理由

答:为简单起见,以单相绕组磁动势为例进行分析,结论同样实用于多相绕组,集中绕组次动势为矩形波分布,分布绕组磁动势是多个矩形波磁动势的错位叠加,合成磁动势是每极高度相同的阶梯行波,与矩形波相比它明显接近正弦波,因此说分布能使合成磁动势波形比较接近正弦波,短距使得各槽内上下层导体都不完全属于同一相,就单相绕组而言,槽内导体电流数量不在完全相同,合成磁动势波各级高度不再相同,结果是合成磁动势波形更趋近正弦波,因此短距绕组也能有效的改善磁动势波形.

3-4 在任一瞬间,脉振磁场,圆形旋转磁场,椭圆行旋转磁场的;间分布是怎样的?当仅观察一瞬间,能否区别该磁场是脉振磁场,圆形旋转磁场或椭圆行旋转磁场?当连续观察几个瞬间时,又如何区分?

答:在任一瞬间,三种磁场在空间均成正弦行分布,无法区别他们的不同,但是只要连续观察就不难发现三种磁场是有区别的:脉振磁场的零点在空间不动,波幅在变化;原形旋转磁场的波幅不变切匀速旋转;椭圆行旋转磁场的波幅几旋转又变化,在最大和最小之间变化,转速也不均匀,波幅达到最大值时,转速最慢,波幅达最小值时,转速最快.

3-5 分析下列情况会不会产生旋转磁动势?转向怎样?并请说明理由.

$$(1) \text{ 三相绕组在空间个差 } 120^\circ \text{ 电角度 } \dot{I}_U = I \angle -240^\circ$$

$$, \dot{I}_V = I \angle 240^\circ, \dot{I}_W = I \angle 0^\circ;$$

$$(2) \text{ 二相绕组在空间差 } 90^\circ \text{ 电角度 } i_U = I_m \sin \omega t, i_V = I_m \sin \omega t$$

$$(3) \text{ 二相绕组在空间差 } 90^\circ \text{ 电角度 } .i_U = I_m \sin \omega t, i_V = I_m \sin \omega .$$

解(1)因为三相电流是对称的,其相序为 U W V,且绕组在空间上也是对称的,故合成磁动势为旋转磁动势,转向为 U W V U;

(2)因为两绕组在空间上互差 90° 电角度,所同电流在时间上也相差 90° 电角度,即绕组和电流均对称,故合成磁动势为旋转磁动势.由于 U 相电流超前于 V 相电流,故磁动势转向为 U V.

(3)因为绕组对称,而电流为单相电流,故合成磁动势为脉振磁动势.

3-6 在三相绕组中,将通入三相负序电流和通入幅值相同的三相正序电流进行比较,旋转磁场有何区别??

答:幅值,频率相同而相序不同的三相交流电流通入三相绕组,分别形成的合成磁动势是幅值相同且转速相等的旋转磁动势,所不同的是他们的旋转方向相反,因为三相合成磁动势的旋转

方向和绕组中电流的相序有关,总是从电流超前的相绕组轴线转向电流置后的相绕组轴线.

3-7 u,v 两相绕组,其空间轴线互成 90° 电角度,每相基波的有效匝数为 Nk_{n1} (两相绕组都相同),绕组为 p 对极,现给两相绕组中通以对称两相交流电流,即

$$i_u = \sqrt{2} I \cos \omega t$$

$$i_v = \sqrt{2} I \cos(\omega t - 90^\circ)$$

试求绕组的基波合成磁动势及 3 次谐波合成磁动势的表达式 $f(\theta, t)$ 和 $f_3(\theta, t)$, 写出两者的振幅计算式, 并分别指出磁动势的转速及转向如何?

解: 各相磁动势基波

$$f_{u1}(\theta, t) = F_{\phi 1} \cos \theta \cos \omega t$$

$$f_{v1}(\theta, t) = F_{\phi 1} \cos(\theta - 90^\circ) \cos(\omega t - 90^\circ)$$

$$\text{振幅 } F_{\phi 1} = 0.9 \frac{INk_{N1}}{p} \quad (\text{)}$$

两相合成磁动势基波

$$f_1(\theta, t) = f_{u1}(\theta, t) + f_{v1}(\theta, t) = F_{\phi 1} \cos(\omega t - \theta)$$

$$\text{令 } \cos(\omega t - \theta) = 1, \frac{d\theta}{dt} = \omega$$

$$\text{机械角速度 } \Omega_1 = \frac{\omega}{t} = \frac{2\pi f}{p}$$

$$\text{转速 } n_1 = \frac{60\Omega_1}{2\pi} = \frac{60f}{p}, \text{ 转向为正转}$$

对于 3 次谐波磁动势

$$f_{u3}(\theta, t) = F_{\phi 3} \cos 3\theta \cos \omega t$$

$$f_{v3}(\theta, t) = F_{\phi 3} \cos 3(\theta - 90^\circ) \cos(\omega t - 90^\circ)$$

$$F_{\phi 3} = 0.9 \frac{INk_{n3}}{3p}$$

$$f_3(\theta, t) = f_{u3}(\theta, t) + f_{v3}(\theta, t) = F_{\phi 3} \cos(\omega t + 3\theta)$$

$$n_3 = \frac{n}{3}, \text{ 转向与基波相反.}$$

3-8 一台两极电机中有一个 100 匝的整距线圈:

(1) 若通入 5A 直流电流, 其所产生的磁动势波的形状如何? 这时基波和 3 次谐波脉振磁动势的

幅值个为多少?

(2) 若通入正弦电流 $i = \sqrt{2} * 5 \sin \omega t$ A, 试求出基波和 3 次谐波脉振磁动势的幅值.

解 (1) 通入 5A 直流电流时的磁动势为一个两极分布的恒定的空间矩形波, 其幅值为

$$F_c = \frac{1}{2} N_c I = \frac{1}{2} * 100 * 5 \text{ A/极} = 250 \text{ A/极}$$

基波磁动势幅值为

$$F_{c1} = \frac{4}{\pi} F_c = \frac{4}{\pi} * 250 \text{ A/极} = 318.3 \text{ A/极}$$

3 次谐波磁动势幅值为

$$F_{c3} = \frac{1}{3} * F_c = \frac{1}{3} * 318.3 \text{ A/极} = 106.1 \text{ A/极}$$

(2) 通入正弦电流 $i = \sqrt{2} * 5 \sin \omega t$ A 时, 磁动势为一个随时间脉动, 在空间上仍为两极分布的矩形波, 其基波分布的幅值为

$$F_{c1} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \frac{IN_c}{p} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} * \frac{5 * 100}{1} \text{ A/极} = 450.2 \text{ A/极}$$

3 次谐波分量幅值为

$$F_{c3} = \frac{1}{3} * F_c = \frac{1}{3} * 450.2 \text{ A/极} = 150.1 \text{ A/极}$$

3-9 一对称三相绕组, 如图所示, 在 U、V 之间通入电流 $i = I \sin \omega t$. 试求:

(1) 分别写出 U、V 相基波磁动势表达式;

(2) 写出合成基波磁动势表达式;

解 (1) 依题意有 $i_U = i = I_m \sin \omega t$, $i_V = -i = -I_m \sin \omega t$. 将坐标原点取在 U 相绕组轴线上, U 相磁动势表达式

$$f_{U1} = F_{\phi 1} \cos \alpha \sin \omega t$$

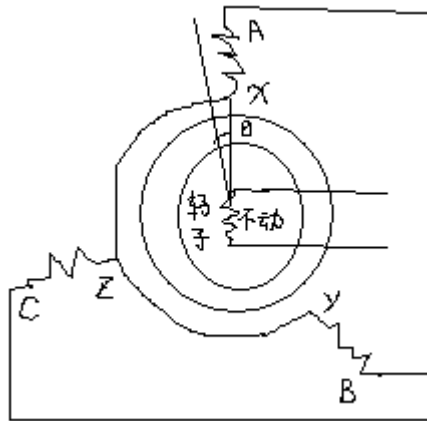
V 相磁动势表达式 $f_{V1} = -F_{\phi 1} \cos(\alpha - 120^\circ) \sin \omega t$

(2) 合成磁动势基波表达式

$$\begin{aligned} f_1 &= f_{U1} + f_{V1} \\ &= F_{\phi 1} \cos \alpha \sin \omega \end{aligned}$$

磁势及感应电机

4-1 一电机 (如图所示) 当在不动的转子上的单相绕组中通以 50Hz 电流后, 将在定子三相对称绕组中感应电势。今如将定子三相绕组端点短路, 问此时定子三相绕组中流过的电流产生的合成磁势是脉振的还是旋转的?



解：设转子绕组轴线与 AX 轴线差 θ 角

$$\text{则 } i_A = k \cos \theta \cdot \sin \omega t \quad i_B = k \cos(\theta - 120^\circ) \cdot \sin \omega t$$

$$i_C = k \cos(\theta - 240^\circ) \cdot \sin \omega t$$

它们电流同相，仅大小不一样。

$$\text{所以 } f_{A1} = k_1 \cos \theta \cdot \sin \omega t \cdot \cos \alpha$$

$$f_{B1} = k_1 \cos(\theta - 120^\circ) \cdot \sin \omega t \cdot \cos(\alpha - 120^\circ)$$

$$f_{C1} = k_1 \cos(\theta - 240^\circ) \cdot \sin \omega t \cdot \cos(\alpha - 240^\circ)$$

$$\begin{aligned} \text{故 } f_1(\alpha, t) &= k_1 \sin \omega t \cdot [\cos \theta \cos \alpha + \cos(\theta - 120^\circ) \cos(\alpha - 120^\circ) \\ &\quad + \cos(\theta - 240^\circ) \cos(\alpha - 240^\circ)] \\ &= \frac{3}{2} k_1 \sin \omega t \cdot \cos(\alpha - \theta) \\ &= F_1 \sin \omega t \cdot \cos(\alpha - \theta) \end{aligned}$$

为一个脉振磁场。

4-2 把一台三相交流电机定子绕组的三个首端和三个末端分别联在一起，再通以交流电流，合成磁势是多少？如将三相绕组依次串联起来后通以交流电流，合成磁势又是多少？

答：不论是串、并联，绕组中均通以的电流为同相的，所以三相合成的磁势为零。

4-3 一台三角形连接的定子绕组，当绕组内有一相断线时，产生的磁势是什么磁势？

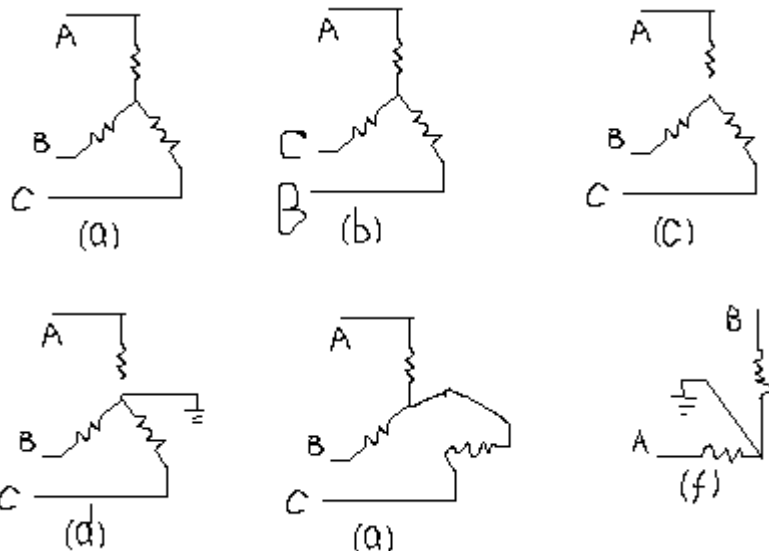
答：如假定 C 相断开，则 A、B 两相中通以的交流电时间上相差 120° ，合成磁势为椭圆旋转磁势。

4-4 试述三相绕组产生的高次谐波磁势的极对数、转向、转速和幅值。它们建立的磁场在

定子绕组内感应电势的频率是多少？

答：对 γ 次谐波磁势，极对数为 γP ，转速为 n_1/γ ，当 $\gamma = 2mk - 1$ 时与 n_1 转向相反。当 $\gamma = 2mk + 1$ 时与 n_1 方向相同。其幅值为 $F_\gamma = 1.35 \frac{WI}{\gamma P} k_{wr}$ 。它们所建立的磁场在定子绕组内感应电势的频率仍为 f_1 。（ $\gamma = 3k$ 时， $F_\gamma = 0$ ）

4-5 试分析下列情况下是否会产生旋转磁势，转向是顺时针还是逆时针？



- (1) a、b 两图中，三相绕组内通正负对称电流。
- (2) a、b 两图中通以 $\dot{I}_A = 100 \angle 0^\circ \text{ A}$ ， $\dot{I}_B = 80 \angle -110^\circ \text{ A}$ ， $\dot{I}_C = 90 \angle -250^\circ \text{ A}$
- (3) 在 c、d 中通以三相对称正序电流。
- (4) e 中有一相接反了，通以三相正序对称电流。
- (5) $i_A = I_m \cos \omega t$ ， $i_B = I_m \sin \omega t$

4-6 为什么感应电机的功率因数总是置后的？为什么感应电机的气隙比较小？

答：感应的磁场由交流电流激励产生，激励电流是感性无功电流，需从电网吸取感性无功功率，所以感应电机的功率因数总是置后的。气隙大则磁阻大，产生同样磁通所需的无功电流就大，功率因数变低，所以感应电机的气隙一般较小。

4-7 感应电机中，主磁通和漏磁通的性质和作用有什么不同？

答：主磁通通过气隙沿铁心闭合，与定转子绕组同时交链，它是实现能量转换的媒介，它占总磁通的绝大部分。主磁通可以由定子电流单独产生，也可以由定转子电流共同产生。主磁通路径的磁导率随饱和程度而变化，而与之对应的励磁电抗 X_m 不是常数。

除主磁通以外的磁通统称为漏磁通，它包括槽漏磁通，端部漏磁通和谐波漏磁通。仅与定子交链的称为定子漏磁通，仅与转子交链的成为转子漏磁通。漏磁通在数量上仅占总磁通很小的一部分，没有传递能量作用。漏磁通路径的磁导率是常数，与之对应的定子漏电抗

$X_{1\sigma}$ ，转子漏电抗 $X_{2\sigma}$ 是常数。

4-8 为什么相同容量的感应电动机的空载电流比变压器的大得多？

答：变压器的主磁路全部用导磁性能良好的硅钢片构成，感应电机的主磁路除了用硅钢片构成的定转子铁心外，还有空气隙。气隙的长度尽管很小，但磁阻很大，使得感应电机主磁路的磁阻比相应的变压器大，感应电机空载电流标幺值为 0.2 到 0.5，变压器空载电流的标幺值为 0.02 到 0.1。

同步电机

5-1 在凸极同步电机中，为什么要采用双反应理论来分析电枢反应？

答 在凸极同步电机中，由于气隙不均匀，同一电枢磁动势作用在不同位置时所产生的电枢磁场和每极磁通量不一样。当正弦分布的磁动势作用在直轴上时，则在极轴处电枢磁场最强，向两边逐渐减弱。当正弦分布的磁动势作用在交轴上时由于极间区域气隙较大，整个磁场呈马鞍形分布。上述两种情况下，电枢磁场波形是对称的，容易由电枢磁动势计算电枢反应磁通。当电枢磁动势处于其他位置时，电枢磁场波形是不对称的，给计算电枢反应磁通带来困难。为此，在凸极同步电机中采用双反应理论，即当电枢磁动势的轴线既不和交轴重合也不和直轴重合时，可以将他分解为直轴分量和交轴分量两部分，然后分别求出交轴电枢反应磁通和直轴电枢反应磁通，再有这两个量求出直轴电枢反应电动势和交轴电枢反应电动势，最后再将他们进行叠加。

5-2 有一台凸极式 16500KVA 同步发电机，3 相，50Hz，62 极， $U_N=600V$ ， $I_N=1442A$ ，

$\cos \varphi_N = 0.85$ 。电枢绕组每相有效串联匝数是 116 匝，在额定电压时的空载磁动势为

6380A/极，饱和系数是 1.115，电枢绕组漏抗的标幺值是 $X_{\sigma}^* = 0.187$ ，设 $k_{ad} = 0.8$ ，

$k_{aq} = 0.48$ ，求此电机磁场不饱和时的直轴和交轴同步电抗标幺值 X_d^* 和 X_q^* 。

答 电枢磁动势幅值

$$F_{\delta} = 1.35 \frac{N_1 k_{N1}}{p} I = 1.35 \frac{116}{31} \times 1442 \text{A/极} = 7280 \text{A/极}$$

空载额定电压时气隙磁压降

$$F_{\delta} = \frac{F_{f0}}{k_{\mu}} = 6380 / 1.115 \text{A/极} = 5722 \text{A/极}$$

不饱和直轴电枢反应电抗标幺值

$$X_{ad}^* = \frac{I_N X_{ad}}{U_N} = \frac{I_N X_{ad} \sin \psi}{U_N \sin \psi} = \frac{E_{ad}}{U_N \sin \psi} = \frac{k_{ad} F_{ad}}{F_{\delta} \sin \psi} = \frac{k_{ad} F_d}{F_{\delta}} = \frac{0.8 \times 7280}{5722} = 1.018$$

不饱和直轴同步电抗标么值

$$X_d^* = X_{ad}^* + X_\sigma^* = 1.018 + 0.187 = 1.205$$

同理, 不饱和交轴电枢反应电抗标么值

$$X_{aq}^* = \frac{k_{aq}^*}{F_{\delta 0}} = \frac{0.48 \times 7280}{5722} = 0.61$$

不饱和交轴同步电抗标么值

$$X_q^* = X_{aq}^* + X_\sigma^* = 0.34 + 0.187 = 0.527$$

5-3 有一台三相气轮发电机, $P_N = 25000 \text{ kW}$, $U_N = 10.5 \text{ kV}$, Y 接法, $\cos \phi_N = 0.8$ (滞后),

作单机运行, 有试验测得的它的同步电抗标么值为 $X_s^* = 2.13$ 。电枢电阻忽略不计。每相磁势

电动势为 7520 V 。

试求分以下几种情况下接上三相对称负载时的电枢电流值, 并说明其用电枢反应的性质。

- (1) 每相是 7.52Ω 纯电阻;
- (2) 每相是 7.52Ω 纯电感
- (3) 每相是 7.52Ω 纯电容
- (4) 每相是 $(7.52 - j7.52) \Omega$ 电阻电容性质负载。

解 阻抗基值是

$$Z_N = \frac{U_{\phi N}}{I_N} = \frac{U_N}{\sqrt{3} I_N} = \frac{U_N^2 \cos \phi_N}{P_N} = \frac{10.5^2 \times 0.8 \times 10^6}{25000 \times 10^3} \Omega = 3.53 \Omega$$

同步电抗

$$X_s = X_s^* Z_N = 2.13 \times 3.53 = 7.52$$

(1) 纯电阻负载时

$$\text{电枢电流是 } I^* = \frac{E_0^*}{R + jX_s} = \frac{7520 \angle 0^\circ}{7.52 + j7.52} \text{ A} = 707 \angle -45^\circ \text{ A}$$

电流滞后于 E_0^* 的角度是 $\psi = 45^\circ$

故电枢反应是直轴去磁兼交磁作用。

(2) 纯电感负载时

$$\text{电枢电流是 } I^* = \frac{E_0^*}{j(X_s + X)} = \frac{7520 \angle 0^\circ}{j(7.52 + 7.52)} \text{ A} = 500 \angle -90^\circ \text{ A}$$

此时为 $\psi = 90^\circ$

故电枢反应为去磁作用

(3) 纯电容负载时,

电枢电流

$$I^* = \frac{E_0^*}{j(X_s - X)} = \frac{7520 \angle 0^\circ}{j(7.52 - 15.04)} A = 1000 \angle 90^\circ A$$

此时为 $\psi = -90^\circ$

故电枢反应为直轴助磁作用

(4) 阻容式负载并且 $X = X_s$ 时, 电枢电流

$$I^* = \frac{E_0^*}{R + j(X_s - X)} = \frac{7520 \angle 0^\circ}{7.52} A = 1000 \angle 0^\circ A$$

此时为 $\psi = 0^\circ$

故电枢反应为交磁作用.

5-4 同步发电机电枢反应的性质主要决定于什么? 在下列情况下电枢反应各起什么作用?

(1) 三相对称电阻负载; (2) 纯电容性负载 $x_c^* = 0.8$, 发电机同步电抗 $x_t^* = 1.0$;

(3) 纯电感负载 $x_L^* = 0.7$

答: 同步发电机电枢反应的性质取决于电枢磁势基波与励磁磁势基波在空间的相对位置。

(1) 三相纯电阻负载, 由于交流机电抗存在, $\varphi > 0$, 但 $\varphi < 90^\circ$, 电枢反应为直轴去磁反应, 交轴磁势与 \dot{E}_0 同相。

(2) 因为 $x_t^* - x_c^* = 0.2$, 仍为感性, 所以 $\varphi = 90^\circ$, 电枢反应只有直轴去磁。

(3) 纯感性负载时, $\varphi = 90^\circ$ 电枢反应只有直轴去磁。

5-4 一台隐机同步发电机, 在额定电压下运行, $X_s^* = 2$, $R_s \approx 0$, 求

(1) 调节励磁电流使用额定电流时, $\cos \varphi = 1$, 空载电动势 E_0^* 是多少?

(2) 保持上述 E_0^* 不变, 当 $\cos \varphi = 0.886$ (滞后) 时, I^* 是多少?

解 (1) 当 $\cos \varphi = 1$ 时, 有

$$E_0^* = \sqrt{U^{*2} + (I^* X_s^*)^2} = \sqrt{1^2 + (1 \times 2)^2} = 2.236$$

(2) 当 $\cos \varphi = 0.886$ 时, $\varphi = 30^\circ$ (滞后), 则

$$E_0^* = \sqrt{U^{*2} + (I^* X_s^*)^2 - 2U^* I^* X_s^* \cos(90^\circ + 30^\circ)}$$

$$2.236 = \sqrt{1^2 + (I^* X_s^*)^2 - 2 \times 1 \times (I^* X_s^*) \times (-0.5)}$$

$$I^* X_s^* = 1.5$$

$$I^* = \frac{1.56}{X_s^*} = \frac{1.56}{2} = 0.7$$

5-5 试验某台 $S_n=3000\text{KVA}$, 线电压 $U_n=11000\text{V}$, $I_n=1570\text{A}$, 功率因数 ,

Y 接三相气轮发电机, 得到下列数据(1)空载线性 (线值) $E_0 (\text{V}) = kI_f (\text{A})$, $k=100\text{V/A}$:

(2)短路特性 $I_k (\text{A}) = 24I_f (\text{A})$; (3)电机额定运行时漏磁电动势 $E_\sigma = 2000/\sqrt{3}\text{V/相}$, ,

电枢电阻 $R_a = 0$.

试求:

(1) 运行在额定状态时的励磁电流为多少?

(2) 求额定负载下的电压变化率。

解 (1) 当 $I_k = I_N = 1570\text{A}$ 时, $I_f = 1570/24 = 65.4\text{A}$; 当 $I_f = 65.6\text{A}$ 时,

$$E_{ok} (\text{相}) = 65.6 \times 100 / \sqrt{3} = 3787\text{V}。$$

当 $U = U_{N\phi} = 11000/\sqrt{3} = 6351\text{V}$ 大, $I_f = \sqrt{3}U_{N\phi}/k = 11000/100 = 110\text{A}。$

$$\text{同步电抗 } X_s = \frac{E_{ok}}{I_k} = 3787/1570\Omega = 2.41\Omega$$

$$\text{漏电抗 } X_\sigma = \frac{E_0 (\text{相})}{1570} = \frac{2000/\sqrt{3}}{1570}\Omega = 0.735\Omega$$

$$E_{0\phi} = \sqrt{(U \sin \phi + I X_s^2) + (U \cos \phi)^2} = \sqrt{(6351 \times 0.6 + 1570^2 \times 2.41^2) + (6351 \times 0.8)^2} = 9137\text{V}$$

运行在额定状态下所需励磁电流

$$I_f = \frac{\sqrt{3}E_{0\phi}}{k} = \frac{9137 \times \sqrt{3}}{100}\text{A} = 158.3\text{A}$$

$$(2) \quad \Delta U = \frac{E_{0\phi} - U_{N\phi}}{U_{N\phi}} = \frac{9137 - 6351}{6351} = 0.43$$

5-6 三相同步发电机对称额定运行时, 在电枢电流滞后和超前于励磁电势 \dot{E}_0 的相位差

大于 90° 的两种情况下, 电枢磁势两个分量 F_{ad} 和 F_{aq} 各起什么作用?

答: 当 $90^\circ < \varphi < 180^\circ$ 时, 直轴 F_{ad} 与 $0 < \varphi < 90^\circ$ 相同, 起去磁作用。 F_{aq} 则相反, 它使 F_δ

发生偏移，幅值稍有增大，使 \dot{E}_δ 超前 \dot{E}_0 一个角度。

当 $-90^\circ > \varphi > -180^\circ$ 时， F_{ad} 也与 $0 > \varphi > -90^\circ$ 相同，起助磁作用。 F_{aq} 与 $90^\circ < \varphi < 180^\circ$ 相同，也使 \dot{E}_δ 超前 \dot{E}_0 一个角度。

5-7 有一台 $P_N=25000\text{kW}$ ， $U_N=10.5\text{kV}$ ，Y 接法， $\cos\varphi_2=0.8$ （滞后）的汽轮发电机，其同步电抗标么值为 $x_t^*=2.13$ ， $r_a^*=0$ 。试求额定负载下发电机的励磁电势 \dot{E}_0 ， \dot{E}_0 与 \dot{U} 的夹角以及 \dot{E}_0 与 \dot{I} 的夹角。

解：以 \dot{U} 作参考向量， $U_N^*=1$ ， $\varphi = \arccos 0.8 = 36.87^\circ$

$$\dot{I}^* = 1 \angle -36.87^\circ$$

由 $\dot{E}_0 = \dot{U} + j\dot{I}x_t$ 得

$$\dot{E}_0^* = \dot{U}^* + j\dot{I}^*x_t^* = 1 + j2.13 \angle -36.87^\circ = 2.845 \angle 36.8^\circ$$

$$\text{所以 } \dot{E}_0 = 2.845 \times \frac{U_N}{\sqrt{3}} = 17.25 \text{ kV}$$

\dot{E}_0 与 \dot{U} 的夹角 $\theta = 36.8^\circ$

\dot{E}_0 与 \dot{I} 的夹角 $\varphi = \theta + \phi = 36.8^\circ + 36.87^\circ = 73.67^\circ$

5-8 一台气轮发电机， $\cos\varphi=0.8$ (滞后)， $X_s^*=1.0$ 电枢电阻可以忽略不计，该发电机并联在额定电压的无穷大电网上，不考虑磁路饱和程度的影响，试求：

(1) 保持额定运行时的励磁电流不变，当输出有功功率减半时，定子标么值 I^* 和功率因数 $\cos\varphi$ 各等于多少？

(2) 若输出有功功率仍为额定功率的一半，逐渐减少励磁到额定励磁电流的一半，问发电机能否静态稳定运行？为什么？此时 I^* 和 $\cos\varphi$ 又各为多少？

解 令 $\dot{U}^* = 1 \angle 0^\circ$ ， $\dot{I}^* = 0.8 - j0.6$ ， $P_{emN}^* = 0.8$ ， $X_s^* = 1.0$

$$(1) \dot{E}_0^* = \dot{U}^* + j\dot{I}^*X_s^* = 1 + j(0.8 - j0.6) = 1.6 + j0.8 = 1.79 \angle 26.56^\circ$$

当输出有功功率减半时，有

$$P_{em}^* = 0.8 \times \frac{1}{2} = 0.4$$

$$\sin \theta = \frac{P_{em}^* X_s^*}{E_0^* U^*} = \frac{0.4 \times 1}{1.79 \times 1} = 0.223$$

功率角

$$\theta = 12.89^\circ$$

$$(X_s^* I^*)^2 = E_0^{*2} + U^{*2} - 2E^* U^* \cos \theta = 1.79^2 + 1^2 - 2 \times 1.79 \times 1 \times 0.975 = 0.714$$

$$\text{定子电流 } I^* = \frac{\sqrt{0.714}}{X_s} \frac{0.845}{1} = 0.845$$

$$\text{有功功率 } P^* = I^* \cos \varphi$$

$$\text{功率因数 } \cos \varphi = \frac{P^*}{I^*} = \frac{0.4}{0.845} = 0.4$$

$$(1) \text{ 当 } I_f = \frac{1}{2} I_{fN} \text{ 时, } E^* = \frac{1}{2} E_N^* = 1.79 \times 0.5 = 0.895$$

$$P_{em\max}^* = \frac{E^* U^*}{X_s^*} \sin 90^\circ = \frac{0.895 \times 1}{1} = 0.895$$

$$P_{em\max}^* = 0.895 \quad P_{emN}^* = 0.4$$

因为 $P_{em\max}^* > P_{em}^*$, 所以发电机能静态稳定运行。

$$\sin \theta = \frac{P^* X_s^*}{E_0^* U^*} = \frac{0.4 \times 1}{0.895 \times 1} = 0.447$$

$$\text{功率角 } \theta = 26.5^\circ$$

$$\dot{E}_0^* = \dot{U}^* + j \dot{I}^* X_s^*$$

定子电流

$$\dot{I}^* = \frac{\dot{E}^* - \dot{U}^*}{jX_s^*} = \frac{0.895 \angle 26.5^\circ - 1}{j}$$

$$I^* = 0.44$$

功率因数

$$\cos \varphi = \frac{P^*}{I^*} = \frac{0.4}{0.447} = 0.9$$

5-9 一台三 Y 接隐极同步发电机与无穷大电网并联运行, 已知电网电压 $U=400V$, 发

电机输出有功功率为 80KW。若保持励磁电流不变，减少原动机的输出，使发电机输出有功功率为 20KW，忽略电枢电阻，求功率角、电枢电流、输出的无功功率及其性质。

解 当 $P_{em} = 80KW$ 时

$$I = \frac{P_{em}}{\sqrt{3}U_N} = \frac{80 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 400} A = 115.04 A$$

$$\dot{I} = 115.04 \angle 0^\circ \quad \dot{U} = \frac{400}{\sqrt{3}} = 230.9 \angle 0^\circ$$

令

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + j \dot{I} X_s = 230.9 + j115.04 \times 1.2 = 230.9 + j138.05$$

当 $P_{em}' = 20KW$ 时， $P_{em}' = \frac{1}{4} P_{em}$ ，即

$$P_{em}' = \frac{mE_0 U}{X_s} \sin \theta' = \frac{1}{4} \frac{mE_0 U}{X_s} \sin \theta$$

$$\sin \theta' = \frac{1}{4} \sin \theta = \frac{1}{4} \sin 30.96^\circ = 0.1286$$

功率角 $\theta' = 7.39^\circ$

电枢电流

$$\dot{I}' = \frac{\dot{E}_0' - \dot{U}}{jX_s} = \frac{230.9 \angle 7.39^\circ - 230.9 \angle 0^\circ}{j1.2} = 41.72 \angle -46.21^\circ A$$

功率因数、 $\cos \varphi' = \cos 46.21^\circ = 0.69$ (滞后)

无功功率 $Q_2' = \sqrt{3}U_N I' \sin \varphi' = \sqrt{3} \times 400 \times 41.72 \times \sin 46.21^\circ = 20.87 k \text{ var}$ (滞后)

5-10、有一台 $P_N = 72500kW$ ， $U_N = 10.5kV$ ，Y 接， $\cos \varphi_N = 0.8$ 滞后的水轮发电机，参数为： $x_d^* = 1$ ， $x_q^* = 0.554$ ，忽略电枢电阻。试求额定负载下发电机励磁电势 \dot{E}_0 和 \dot{E}_0 与 \dot{U} 的夹角。

解：先以 \dot{U} 为参考， $\dot{U}^* = 1$ ，则 $\dot{I}^* = 1 \angle -36.87^\circ$

所以 $\dot{E}_q^* = \dot{U}^* + j \dot{I}^* x_q^* = 1 + j0.554 \angle -36.87^\circ = 1.404 \angle 18.4^\circ$

\dot{E}_0 与 \dot{U} 的夹角 $\theta = 18.4^\circ$

再以 \dot{E}_0 为参考向量, 则 $\varphi = \theta + \phi = 55.27^\circ$

$$\dot{U}^* = 1 \angle -18.4^\circ = 0.949 - j0.316$$

$$\dot{I}_d^* = -j \sin \varphi = -j0.822 \quad \dot{I}_q^* = \cos \varphi = 0.57$$

所以

$$\dot{E}_0^* = \dot{U}^* + j \dot{I}_d^* x_d^* + j \dot{I}_q^* x_q^* = 0.949 - j0.316 + 0.822 + j0.57 \times 0.554 = 1.771$$

$$\text{故 } E_0 = E_0^* \cdot \frac{U_N}{\sqrt{3}} = 1.771 \times \frac{10.5}{\sqrt{3}} = 10.74 \text{ KV}$$

5—11 有一台三相 1500kw 水轮发电机, 额定电压是 6300V, Y 接法, 额定功率因数

$\cos \varphi_N = 0.8$ (滞后), 已知额定运行时的参数: $x_d = 21.2 \Omega$, $x_q = 13.7 \Omega$, 电枢电阻可略去不计。试计算发电机在额定运行时的励磁电势, 并按比例作出矢量图。

$$\text{解: } Z_{1N} = \frac{U_N}{\sqrt{3} I_N} = \frac{U_N^2 \cos \varphi_N}{P_N} = 21.17 \text{ 欧}$$

$$x_d^* = \frac{x_d}{Z_{1N}} = 1 \quad x_q^* = \frac{x_q}{Z_{1N}} = 0.646$$

$$\dot{E}_Q^* = \dot{U}^* + j \dot{I}^* x_q^* = 1 + 0.646 \angle (90 - 36.87)^\circ = 1.481 \angle 20.43^\circ$$

$$\text{则 } \varphi = 20.43 + \varphi_N = 57.3^\circ$$

将参考向量改为 \dot{E}_Q , 则有

$$\dot{U}^* = 1 \angle -20.43^\circ = 0.937 - j0.349$$

$$\dot{I}_d^* = -j \sin \varphi = 0.842 \angle -90^\circ$$

$$\dot{I}_q^* = \cos \varphi = 0.54$$

$$\begin{aligned} \text{则 } \dot{E}_0^* &= \dot{U}^* + j \dot{I}_d^* x_d^* + j \dot{I}_q^* x_q^* \\ &= 0.937 - j0.349 + 0.842 + j0.54 \times 0.646 = 1.78 \end{aligned}$$

$$\text{故 } E_0 = E_0^* \cdot \frac{U_N}{\sqrt{3}} = 1.78 \times \frac{6300}{\sqrt{3}} = 6474.4 \text{ V}$$

5-12 有一台磁路不饱和的凸极同步电机，Y 接法，运行在 $U_N = 6600\sqrt{3} \text{ V}$ ， $I_N = 200 \text{ A}$ ， $\cos \varphi_N = 0.8$ （滞后）时，若电抗标么值 $x_d^* = 1.24$ ， $x_q^* = 0.82$ ，电枢电阻可以忽略不计。

1. 试用作图法求出磁势的 $\varphi, I_d^*, I_q^*, E_Q^*, E_0^*$ 及直轴电枢电流所产生的总电势
2. 求出上列电抗的实际数值和各相电势的实际值。

解：（1）根据 $U^* = 1$ ， $I^* = 1$ ， $\cos \varphi_N = 0.8$ 滞后，画出 \dot{U}^* ， \dot{I}^*

求出 $\varphi = 61^\circ$ ， $I_d^* = 0.875$ ， $I_q^* = 0.48$ ， $E_Q^* = 1.65$ ， $E_0^* = 2.05$

$$E_d^* = 1.05, E_q^* = 0.4$$

$$(2) Z_{1N} = \frac{U_N}{\sqrt{3} I_N} = \frac{6600}{200} = 33 \Omega$$

所以 $x_d = 40.92 \Omega$ ， $x_q = 27.06 \Omega$ ， $I_d = 175 \text{ A}$ ， $I_q = 96 \text{ A}$

$$E_q = 2640 \text{ V}，E_Q = 10890 \text{ V}，E_0 = 13530 \text{ V}，E_d = 6930 \text{ V}$$

5-13 两台三相同步发电机并联，3.3KV，星形接法，向 800KW， $\cos \varphi = 0.8$ （滞后）的负载供电。调节原动机使一台电机输出的功率是另一台的两倍，其中重载的电机每相同步电抗为 10Ω ，调节它的励磁使它的 $\cos \varphi = 0.75$ （滞后）。另一台电机的每相同步电抗为 16Ω ，忽略电枢电阻，试求每台电机的电流、电动势、功率因数和功率角。

解 总负载电流

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} U \cos \varphi} = \frac{800}{\sqrt{3} \times 3.3 \times 0.8} \text{ A} = 180 \text{ A}$$

$$\dot{I} = 180 (0.8j - 1.046) = -140j$$

A 电机输出功率为 B 电机的两倍，则 A 电机输出有功电流为总负载有功功率电流的 2/3。

$$\text{A 机有功电流 } I_{aA} = \frac{2}{3} \times 140 \text{ A} = 93.3 \text{ A}$$

$$\text{A 机功率因数 } \cos \varphi_A = 0.75 \text{（滞后）}$$

$$\varphi_A = 41.4^\circ$$

$$\text{A 机无功电流 } I_{ra} = I_{aA} \tan \varphi_A = 93.3 \tan 41.4^\circ \text{ A} = 82.3 \text{ A}$$

A 机电流 $\dot{I}_A = (93.3 - j82.3)A$

B 机电流 $\dot{I}_B = \dot{I} - \dot{I}_A = [(140 - j105) - (93.3 - j82.3)]A = (46.7 - j22.7)A$

B 机功率因数 $\cos \varphi_B = \frac{46.7}{\sqrt{46.7^2 + 22.7^2}} = 0.9$

A 机电动势

$$\dot{E}_A = \dot{U} + j\dot{I}_A X_{sA} = \left[\frac{3300}{\sqrt{3}} + j10(93.3 - j82.3) \right]A = (2728 + j933)KV$$

A 机功率角 $\theta_A = \arctan \frac{933}{2728} = 18^\circ$

B 机电动势 $\dot{E}_B = \dot{U} + j\dot{I}_B X_{sB} = \left[\frac{3300}{\sqrt{3}} + j10(46.7 - j22.7) \right] = (2268 + j747)V$

B 机功率角 $\theta_B = \arctan \frac{747}{2268} = 18.2^\circ$

5-14 有一台三相、50Hz、Y 接、13.8KV、70000KVA、 $\cos \varphi_N = 0.85$ （滞后）的水轮发

电机，该机直接与电网并联：电机参数为 $X_d = 2.72 \Omega$ ， $X_q = 1.90 \Omega$ 。电枢电阻忽略

不计，试求

(1) 同步电抗的标么值

(2) 该机额定运行时的功率角和励磁电动势

(3) 该机的最大电磁功率、过载能力，以及产生最大电磁功率时的功率角

解 (1) 额定电流

$$I_N = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_N} = \frac{70000}{\sqrt{3} \times 13.8} A = 2928A$$

额定相电压

$$U_{\phi N} = \frac{U_N}{\sqrt{3}} = \frac{13.8 \times 10^3}{\sqrt{3}} V = 7967V$$

同步电抗的标么值

$$X_d^* = \frac{X_d I_N}{U_{\phi N}} = \frac{2.72 \times 2928}{7967.67} = 1$$

$$X_q^* = \frac{X_q I_N}{U_{\phi N}} = \frac{1.9 \times 2928}{7967} = 0.698$$

(2) 令 $\dot{U}_N^* = 1 \angle 0^\circ$ $\dot{I}_N^* = 1 \angle -31.7^\circ$

$$\psi_N = \arctan \frac{I^* X_q^* + U^* \sin \varphi}{U^* \cos \varphi} = \arctan \frac{1 \times 0.698 + 1 \times \sin 31.79^\circ}{1 \times 0.85} = 55.24^\circ$$

功率角 $\theta = \psi - \varphi = 55.24^\circ - 31.79^\circ = 23.45^\circ$

电动势

$$E_0^* = U^* \cos \theta + I^* \sin \theta X_d^* = 1 \times \cos 23.45^\circ + 1 \times \sin 23.45^\circ \times 1.74 = 1.74 \text{ p.u.}$$

电动势的实际值为

$$E_0 = E_0^* U_{N\phi} = 1.74 \times 7967.67 \text{ V} = 13864 \text{ V}$$

(3) 功角特性公式为

$$P_{em}^* = \frac{E_0^* U^*}{X_d^*} \sin \theta + \frac{U^{*2} (X_d^* - X_q^*)}{2 X_d^* X_q^*} \sin 2\theta = \frac{1.74 \times 1}{1} \sin \theta + \frac{1^2 (1 - 0.698)}{2 \times 1 \times 0.698} \sin 2\theta = 1.74 \sin \theta + 0.216 \sin 2\theta$$

令 $\frac{dP_{em}^*}{d\theta} = 0$, 得

$$\frac{dP_{em}^*}{d\theta} = 1.74 \cos \theta + 0.432 \cos 2\theta = 0$$

可求的 $\cos \theta = \begin{cases} 0.224 \\ -2.23 (\text{不合理, 舍去}) \end{cases}$

$$\cos \theta = 0.224 \quad \theta = 77^\circ$$

即出现最大电磁功率时的功率角为 $\theta_{\max} = 77^\circ$

$$P_{em \max}^* = 1.74 \sin 77^\circ + 0.216 \sin 154^\circ = 2.00 \text{ p.u.}$$

最大电磁功率实际值为

$$P_{em \max} = P_{em \max}^* S_N = 2.00 \times 7000 \text{ kW} = 14000 \text{ kW}$$

过载能力

$$k_M = \frac{P_{em \max}^*}{P_N^*} = 2.00 / 0.85 = 2.35$$

5-15 有一台隐极同步电动机在额定状态下运行时, 功率角 θ 为 30° 。设在励磁保持不变的情况下, 运行情况发生了下述变化, 问功率角有何变化(定子电阻和凸极效应忽略不计)?

(1) 电网频率下降了 5%, 负载转矩不变:

(2) 电网频率下降了 5%, 负载功率不变:

(3) 电网电压和频率各下降了 5%，负载 转矩不变：

(4) 电网电压和频率下降了 5%，负载 功率不变：

解： $E_0 \propto f, X_s \propto f, \Omega_1 \propto f$.

(1) 当 f 下降 5%， T_{em} 不变时

$$E_0^* = 0.95E_0 \quad X_s' = 0.95X_s \quad \Omega_1' = 0.95\Omega_1$$

$$T_{em}' = T_{em}$$

$$P_{em}' = T_{em}' \Omega_1' = 0.95T_{em} \Omega_1 = 0.95P_{em}$$

$$m \frac{E_0' U}{X_s'} \sin \theta' = 0.95m \frac{E_0 U}{X_s} \sin \theta$$

$$0.95m \frac{E_0 U}{X_s} \sin \theta' = 0.95m \frac{E_0 U}{X_s} \sin 30^\circ$$

$$\theta' = 28.3^\circ$$

(3) 当 f 下降 5%，负载功率不变时

$$P_{em}' = P_{em}$$

$$m \frac{E_0' U}{X_s'} \sin \theta' = m \frac{E_0 U}{X_s} \sin \theta$$

$$0.95m \frac{E_0 U}{0.95X_s} \sin \theta' = m \frac{E_0 U}{X_s} \sin 30^\circ$$

$$\theta' = 30^\circ$$

(4) 当 f 和 u 各下降 5%， T_{em} 不变时

$$P_{em}' = T_{em}' \Omega_1' = 0.95P_{em}$$

$$m \frac{0.95E_0 \times 0.95U}{0.95X_s} \sin \theta' = 0.95m \frac{E_0 U}{X_s} \sin 30^\circ$$

$$\theta' = 30^\circ$$

(5) 当 f 和 u 各下降 5%，负载功率不变时

$$P_{em}' = P_{em}$$

$$m \frac{0.95E_0 \times 0.95U}{0.95X_s} \sin \theta' = m \frac{E_0 U}{X_s} \sin 30^\circ$$

$$\theta' = 31.76^\circ$$

5-16 某工程一车间所消耗的总功率为 200KW, $\cos \varphi = 0.7$ (滞后); 其中有两台感应电动机, 其平均输入为:

$$P_A = 40KW \quad \cos \varphi_A = 0.625 \quad (\text{滞后})$$

$$P_B = 20KW \quad \cos \varphi_B = 0.75 \quad (\text{滞后})$$

今欲以一台同步电动机代替此两台感应电动机, 并把车间的功率因数提高到 0.9, 试求该同步电动机的容量。

解 车间总功率为 200KW, 原功率因数为 $\cos \varphi = 0.7$, 则车间原总的无功功率为

$$Q = P \tan \varphi = 200 \tan 45.57^\circ k \text{ var} = 204 k \text{ var}$$

$$P_A = 40KW \quad \cos \varphi_A = 0.625 \quad \text{则 } Q_A = 50 k \text{ var}$$

$$P_B = 20KW \quad \cos \varphi_B = 0.75 \quad \text{则 } Q_B = 17.6 k \text{ var}$$

除两台感应电动机, 其它负载需要无功功率为

$$Q' = Q - Q_A - Q_B = (204 - 50 - 17.6) k \text{ var} = 136.4 k \text{ var}$$

改用同步电动机替代两台感应电动机后, 车间的总有功功率仍为 200KW,

$$\cos \varphi' = 0.9 \quad \varphi' = 25.84^\circ, \text{ 则无功功率为}$$

$$Q'' = P \tan \varphi' = 200 \times \tan 25.84^\circ = 96.86 k \text{ var}$$

同步电动机的无功功率为

$$Q_C = Q' - Q'' = (136.4 - 96.86) k \text{ var} = 39.54 k \text{ var}$$

同步电机额定容量为

$$S_C = \sqrt{(P_A + P_B)^2 + Q_C^2} = \sqrt{(40 + 20)^2 + 39.54^2} k \text{ var} = 71.86 k \text{ var}$$

同步电动机功率因数为

$$\cos \varphi_C = \frac{P}{S_C} = \frac{60}{71.86} = 0.835 (\text{超前})$$

5-17 负序漏磁通, 零序漏磁通和正序漏磁通有何不同?

答：负序漏磁通和正序漏磁通一样，因为有正序和负序只是相序不同，漏磁通是一相电流所产生，与相序无关。零序漏磁通和正序漏磁通不同，因为零序电流合成磁动势中有 3 和 3 的倍数次谐波，是脉振磁动势，谐波磁场归入谐波漏磁。另外槽漏磁也与正序电流不同，在双层短距绕组中，有些槽的上下层导体不属同一相，零序电流产生的槽漏磁通正序电流产生的槽漏磁小。在整距绕组中零序电流和正序电流产生的槽漏磁通相同。

5-18 为什么同步电动机突然短路时，电流比稳态短路电流大得多？为什么突然短路电流大小与合闸瞬间有关？

同步发电机三相突然短路瞬间，各绕组均要保持磁链不变。电枢反应磁通的突然变化，将在转子绕组感应出电流来抵制电枢反应磁通，迫使电枢反应磁通只能从转子绕组外的漏磁路闭和，磁阻增加使电抗减少，短路电流受超瞬态电抗 X_d' 限制。稳态短路时，电枢反应磁通穿过转子绕组磁路，磁阻小电抗大，短路电流受到同步电抗 X_d 限制，因为 $X_d'' \ll X_d$ ，故突然短路电流比稳态短路电流大得多。

转子各个绕组有电阻，所以短路电流会衰减，阻尼绕组的电抗与电阻的比值比励磁绕组的电抗与电阻的比值小得多，阻尼绕组电流衰减完毕，短路电流受瞬态电抗 X_d' 限制，励磁绕组电流衰减完毕，短路电流收同步电抗 X_d 限制，即为稳态短路电流，突然短路电流可达额定电流的 10-20 倍。

突然短路电流与合闸瞬间有关，考虑以下两种情况：

(1) 合闸瞬间，短路绕组中磁链 $\psi_0 = 0$ ，此时绕组感应电动势最大，短路电流为感性电流，滞后电动势 90° ，此时短路电流中只有交流分量而无直流分量。短路电流起始值受 X_d'' 限制幅值为 I_{am}'' ，如无阻尼绕组，则短路电流其始值受 X_d' 限制，幅值为 I_{am}' ，稳定短路电流幅值为 I_{am} 。突然短路电流的表达式为

$$i_k = E_{0m} \left[\left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'} \right) e^{-\frac{t}{T_d''}} + \left(\frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-\frac{t}{T_d'}} + \frac{1}{X_d} \right] \sin \omega t$$

(2) 合闸瞬间，短路绕组中磁链最大， $\psi_0 = \psi_{\max}$ ，此时绕组感应电动势为零，短路电流滞后电动势 90° ，应有负的最大值。为了保证磁链守恒，短路电流中除了交流分量外还有直流分量，直流分量的初始值和交流分量相等，使总电流为零。突然短路电流表达式为

$$i_k = \left[\left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'} \right) e^{-\frac{t}{T_d''}} + \left(\frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-\frac{t}{T_d'}} + \frac{1}{T_d} \times \sin(\omega t - 90^\circ) + I_{qm}'' e^{-\frac{t}{T_d}} \right]$$

由此可见，直流分量与短路初瞬该绕组中的磁链大小有关，即与合闸时间有关。短路电流应为交流分量（周期性分量）和直流分量（非周期分量）有关。

5-19 突然短路对同步发电机有何影响？

答：突然短路时冲击电流最大瞬时值可达 $20I_N$ 左右，它将产生很大的电磁力。定子绕组的端接部分紧固条件比槽内差，会产生危险的应力，特别在汽轮发电机里，其端部伸出较大，更易发生损伤。

在突然短路时，气隙磁场变化不大，而定子电流却增大很多，因此将产生巨大的电磁转矩，且可以分为两大类，即单向制动转矩和交变转矩。

单向制动转矩的产生，是因为定、转子绕组都有电阻。转子非周期性电流所生磁场与定子周期性电流所生电枢反应磁场在空间上同步旋转，当定子绕组中有电阻时，这两个磁场的轴线就不重合，它们之间即产生一个方向不变的制动转矩，以产生电功率给定子铜耗。同理，也由于转子有电阻，定子非周期性电流所生静止磁场和转子周期性电流所生磁场的轴线也不重合，也产生单向制动转矩。

交变转矩是由定子非周期性电流所生静止磁场与转子非周期电流所产生旋转磁场之间相互作用引起的。其方向每经过半个周期就改变一次，轮换为制动的转矩，其值比单向制动转矩更大。

在设计同步发电机定子绕组端接，电机转轴、机座及底角螺钉等结构件时，必须考虑突然短路时的影响。

2015. 6. 5 增补：6.1 三相同步发电机基本工作原理和结构

6-1-1 同步发电机是怎样发出三相对称正弦交流电的？

答：同步发电机的转子上绕有励磁绕组，通以直流电励磁，产生磁场，并由原动机带动旋转，使定子三相对称绕组不断切割转子磁场而感应出三相交流电动势。

（1）波形：由于感应电动势的波形主要取决于转子磁场在气隙空间分布的波形，制造时使转子磁极的磁场在气隙空间尽可能按正弦波分布，三相绕组的 Y 形连接和采用短距、分布绕组，便得到正弦波形的感应电动势；

（2）大小：由于定子三相绕组对称，它们切割同一个转子磁场，三相感应电动势也对称，

大小均为 $E = 4.44 f N_1 K_{w1} \Phi_0$

（3）相位差和相序：由于定子绕组在空间位置上互差 120° 电角度，转子旋转磁场切割定子三相绕组在时间上有先后顺序，定子的三相感应电动势在时间相位上就互差 120° 电角度，如果将先切割的一相定义为 A 相，则后切割的那两相就为 B 相和 C 相，因此三相电动势的相序与转子转向一致，其由转子转向决定；

（4）频率：转子转过一对磁极，感应电动势就经历一个周期的变化，若电机有 p 对磁极，转子以每分钟 n 转旋转，则每分钟内电动势变化 pn 个周期，即频率为：

$$f = \frac{pn}{60}$$

也就是当电机的磁极对数 p 一定时，频率 f 和转速 n 有严格不变的关系。

6-1-2 什么叫同步电机？其感应电动势频率和转速有何关系？怎样由其极数决定它的转速？

答：转子的转速恒等于定子旋转磁场的转速的电机称为同步电机，其感应电动势的频率与

转速之间的关系是： $f = \frac{pn}{60}$ ，当电机的磁极对数 p 一定时， $f \propto n$ ，即：频率 f 与转速 n 之间保持严格不变的关系。

6-1-3 说明汽轮发电机的基本结构，为什么汽轮发电机的转子采用隐极式，而水轮发电机的转子采用凸极式？

答：汽轮发电机的基本结构由定子、转子两部分组成，定子由定子铁心、电枢绕组、机座及端盖等部件组成；转子由转子铁心、励磁绕组、护环、集电环、中心环、阻尼绕组和风扇等组成。

隐极式发电机转子的励磁绕组嵌放在转子表面各槽内，气隙均匀，机械强度好，适用于少极、高转速的汽轮发电机，凸极式发电机转子气隙不均匀，对着极弧气隙小，而极间气隙大，励磁绕组嵌放在极弧下，适用于多极低转速的水轮发电机。

6-1-4 有一台 QFS-300-2 的汽轮发电机， $U_N=18$ 千伏， $\cos \varphi_N = 0.85$ ， $f_N=50$ 赫兹，试求（1）发电机的额定电流；（2）发电机在额定运行时能发多少有功和无功功率？

$$I_N = \frac{P_N}{\sqrt{3}U_N \cos \varphi_N} = \frac{300 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 18 \times 10^3 \times 0.85} = 11320 \text{ A}$$

解：（1）额定电流

$$\text{（2）额定功率因数角 } \varphi_N = \arccos 0.85 = 31.79^\circ$$

有功功率 $P_N = 300 \text{ MW}$

无功功率 $Q = P_N \tan \varphi_N = 300 \times \tan 31.79^\circ = 186 \text{ M var}$

6-1-5 有一台 TS854-210-40 的水轮发电机， $P_N=100$ 兆瓦， $U_N=13.8$ 千伏， $\cos \varphi_N = 0.9$ ， $f_N=50$ 赫兹，求（1）发电机的额定电流；（2）额定运行时能发多少有功和无功功率？（3）转速是多少？

$$I_N = \frac{P_N}{\sqrt{3}U_N \cos \varphi_N} = \frac{100 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 13.8 \times 10^3 \times 0.9} = 4648.6 \text{ A}$$

解：（1）额定电流

$$\text{（2）有功功率 } P_N = 100 \text{ MW}$$

无功功率 $Q_N = P_N \tan \varphi = 100 \times \tan(\arccos 0.9) = 48.4 \text{ M var}$

$$\text{（3）转速 } n_N = \frac{60f_N}{p} = \frac{60 \times 50}{20} = 150 \text{ r/min}$$

6.2 三相同步发电机运行原理

6-2-1 试比较三相对称负载时同步发电机的电枢磁动势和励磁磁动势的性质，它们的大小、位置和转速各由哪些因素决定的？

答：电枢反应磁动势是交流励磁，励磁磁动势是直流励磁

	基波波形	大小	位置	转速
励磁磁动势	正弦波	恒定不变，由励磁电流大小决定	由转子位置决定	由原动机的转速决定（根据 f 、 p ）
电枢反应磁动势	正弦波	恒定不变，由电枢电流大小决定	由电枢电流的瞬时值决定	由电流的频率和磁极对数决定

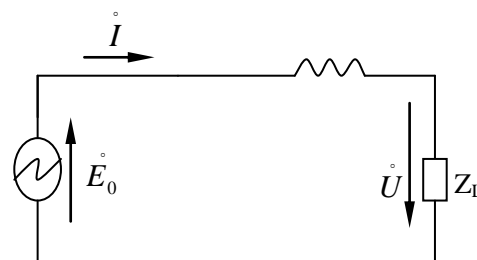
6-2-2 同步发电机的电枢反应性质主要决定于什么？在下列情况下，电枢反应各起什么作用？

1) 三相对称电阻负载；

2) 电容负载 $x_c^* = 0.8$ ，发电机同步电抗 $x_t^* = 1.0$ ；

3) 电感负载 $x_L^* = 0.7$

答：电枢反应的性质取决于内功率因数角 ψ ，而 ψ 角既与负载性质有关，又与发电机本身的参数有关。由等效电路图可知（忽略电枢绕组电阻 r_a ）：



①当负载阻抗为 $Z_L=R$ 时，阻抗 $Z=jx_t+R$ ，其阻抗

角 ψ 在 $90^\circ > \psi > 0^\circ$ 范围内，即空载电动势 \dot{E}_0 和

电枢电流 \dot{I} 之间的相位角 ψ 在 $90^\circ > \psi > 0^\circ$ 范围内，

所以电枢反应既有交轴又有直轴去磁电枢反应；

②当负载阻抗为 $Z_L=-jx_c$ 时，阻抗 $Z=jx_t-jx_c$ ，由于 $x_t^*=1.0 > x_c^*=0.8$ ，阻抗角 $\psi=90^\circ$ ，即空载电动势 \dot{E}_0 和电枢电流 \dot{I} 之间的相位角 $\psi=90^\circ$ ，所以电枢反应为直轴去磁电枢反应；

③当负载阻抗为 $Z_L=jx_L$ 时，阻抗 $Z=jx_t+jx_L$ 的阻抗角为 $\psi=90^\circ$ ，即空载电动势 \dot{E}_0 和电枢电流 \dot{I} 之间的相位角 $\psi=90^\circ$ ，所以电枢反应为直轴去磁电枢反应。

6-2-3 保持转子励磁电流不变，定子电流 $I=I_N$ ，发电机转速一定，试根据电枢反应概念，比较：（1）空载；（2）带电阻负载；（3）带电感负载；（4）带电容负载时发电机端电压的大小？为保持端电压为额定值，应如何调节？

答：（1）空载时，端电压为空载电动势，即 $U_N=E_0$ ；

（2）和（3）情况下，电枢反应有直轴去磁作用，端电压将下降，低于空载电动势，但带纯感性负载（参看上题等效电路），内功率因数角 $\psi=90^\circ$ ，而带纯电阻负载时的 ψ 更接近 0° （见上题），故纯感性负载时的电枢反应直轴去磁作用更强，端电压下降得更多；

（4）种情况由于负载的容抗大于发电机的同步电抗，使内功率因数角 $\psi < 0^\circ$ ，接近 -90° ，所以电枢反应的性质为直轴助磁，使端电压上升，即 $U > E_0$ ；

综上所述，电压从大到小的顺序为： $U_4 > U_1 > U_2 > U_3$ 。

欲保持端电压为额定值，当 $U > U_N$ 时，应减小励磁电流；当 $U < U_N$ 时，应增加励磁电流。

6-2-4 同步电机的电枢反应电抗与异步电机的什么电抗相似？指出它们的相似处？

答：同步电机电枢反应电抗 x_a 与异步电机的励磁电抗 x_m 相似；

这两个电抗所对应的磁通都是由定子三相电流产生的，都通过气隙，既交链定子绕组，又交链转子绕组，两个电抗都与气隙大小、电源频率、绕组匝数、铁心几何尺寸、材质及磁路的饱和程度有关。

6-2-5 同步电抗对应什么磁通？它的物理意义是什么？

答：同步电抗是电枢反应电抗和漏抗之和；

物理意义：同步电抗是表征三相稳定运行时，电枢旋转磁场和漏磁场对电枢电路作用的一个综合参数；同步电抗越大，表示一定负载电流时，电枢反应磁场和漏磁场越强，由它们在电枢绕组中引起的电抗压降越大。

6-2-6 为什么同步电抗的数值一般都较大（不可能做得较小），试分析下列情况对同步电抗的影响？

- 1) 电枢绕组匝数增加；
- 2) 铁心饱和程度增大；
- 3) 气隙加大；
- 4) 励磁绕组匝数增加。

答：由于电机的气隙较小，磁阻 R_m 很小，由
$$x = 2\pi f \frac{N^2}{R_m}$$
 得，同步电抗较大。

(1) 电枢绕组匝数增加，同步电抗增大；

(2) 铁心饱和程度提高，磁阻 R_m 增大，同步电抗减小

(3) 气隙增大，磁阻 R_m 增大，同步电抗减小。

(4) 励磁绕组匝数增加，由于未改变电枢绕组的匝数及电机磁路的磁阻，所以同步电抗不变。

6-2-7 一同步电机，定子绕组施以三相对称电压，并保持恒定，试问：抽出转子与使转子以同步速沿电枢旋转方向旋转（励磁绕组开路）这两种情况下哪种情况定子电流大，为什么？

答：定子绕组施以三相对称低电压，将在绕组中产生三相对称电流并形成旋转磁场，定子

侧的电动势方程式为：
$$\dot{U} = (-\dot{E}_1) + \dot{I}_1(r_1 + jx_1)$$

若忽略定子漏阻抗压降，上式为：
$$\dot{U} \approx (-\dot{E}) = j4.44fNK_w\dot{\Phi}_0$$

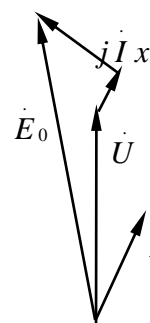
上式表明，当电源电压 \dot{U} 不变时，气隙磁通基本不变。产生气隙磁通的磁动势的大小主要取决于气隙磁通磁路的磁阻。当转子在同步速下沿电枢旋转磁场方向旋转并与抽出转子相比：前者气隙磁通路径上磁阻小而后者磁路的磁阻很大，产生同样大的磁通所需的电流前者就比后者的小。所以，抽出转子后电枢电流会很大，但由于定子只是施以三相对称低电压，

所以电枢电流不会大到烧毁绕组的程度。

6-2-8 同步发电机带上 $\varphi > 0^\circ$ 的对称负载，后，端电压为什么会下降，试用磁路和电路两方面分别加以分析？

答：磁路方面：带上 $\varphi > 0^\circ$ 的对称负载，电枢反应的性质有直轴去磁作用，故端电压会下降。

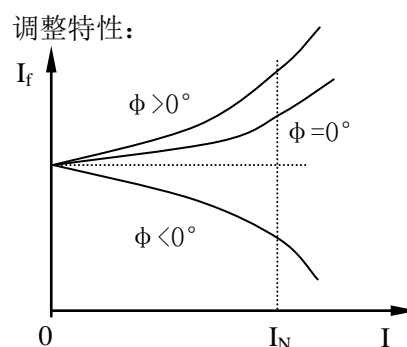
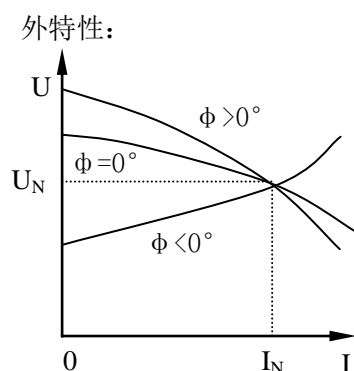
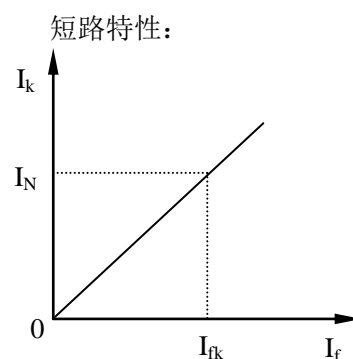
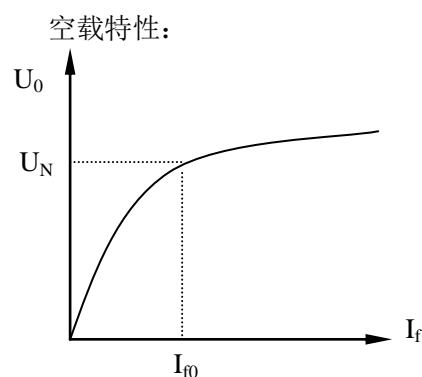
电路方面： 电动势方程：
$$\dot{E}_0 = \dot{U} + \dot{I} r_a + j \dot{I} x_t$$



由相量图可见，发电机带上 $\varphi > 0^\circ$ 的负载后，由于电机本身阻抗压降的影响，使得端电压下降。

6-2-9 表征同步发电机单机对称 稳定运行的性能有哪些特性？其变化规律如何？什么叫短路比？它和同步电抗有何关系？它的大小对电机的运行性能和制造成本有何关系？

答：有空载特性、短路特性、外特性和调整特性，变化规律曲线为：



短路比 K_c ： 是指在空载特性曲线上对应额定电压时的励磁电流 I_{f0} 下，三相稳态短路电流 I_k 与额定电流 I_N 的比值；

K_c 与同步电抗的关系是：

$$K_c = \frac{I_k|_{I_{f0}}}{I_N} = I_k^*|_{I_{f0}=1} = K_s \frac{1}{x_{d(不)}^*}$$

其中, K_s 为电机的饱和系数。

$$K_c = \frac{I_{f0}}{I_{fk}}$$

影响: 如果短路比大, 由短路比的表达式: $\frac{I_{f0}}{I_{fk}}$ 知, 空载时产生额定电压 (或 E_0) 所需的励磁电流就大, 或者说, 运行时要产生所需的 E_0 就要有较大的励磁磁动势。这就表明发电机的气隙大, 在保证气隙磁通密度一定的条件下需增大励磁磁动势, 其一需增加励磁绕组匝数, 其二需增加励磁电流 (即需增加励磁电源容量及励磁绕组导线截面)。另外, 气隙大, 必导致定子几何尺寸增加, 直接影响了电机的制造成本。另一方面, 由于气隙大, 同步电抗减小, 使电机的三相稳态短路电流大, 电压变化率小及并网运行时电机的稳定性提高。

6-2-10 同步发电机短路特性曲线为什么是直线? 当 $I_k = I_N$ 时, 这时的激磁电流已处于空载

特性曲线的饱和段, 为什么此时求得的 x_d 却是不饱和值, 而在正常负载下却是饱和值?

答: 同步发电机短路时, 略去电枢绕组电阻有: $\dot{E}_0 = j \dot{I}_k x_d$, 而气隙电动势为:

$$\dot{E}_\delta = j \dot{I}_k x_\sigma$$

此时气隙电动势只需用来平衡漏抗压降, 因 x_σ 很小, 故气隙电动势很小, 用来感应气隙电动势的气隙磁通很小, 所以短路时, 电机磁路不饱和, $E_0 \propto I_f$, 而 $E_0 \propto I_k$, 因此 $I_k \propto I_f$, 所以短路特性是一条过原点的直线。

$x_{d(不)} = \frac{E_0}{I_k}$, 尽管当 $I_k = I_N$ 时励磁电流已于空载特性的饱和段, 但其 E_0 取之于空载特性曲线的气隙线, 而且短路时电机磁路又处于不饱和状态, 所以求得的 x_d 为不饱和值。在正常负载下, 电机磁路处于饱和状态, 所以 x_d 为饱和值。

6-2-11 负载大小的性质对发电机外特性和调整特性有何影响? 为什么? 电压变化率与哪些因素有关?

答: (参看见题 6-2-9 图)

对外特性的影响:

(1) 发电机带阻、感性负载时, 电枢反应有直轴去磁作用, 随着负载的增加, 去磁作用越强, 端电压下降越多, 外特性曲线下降程度越大;

(2) 带容性负载 (负载容抗大于同步电抗) 时, 电枢反应为直轴助磁, 随着负载的增加, 助磁作用越强, 端电压上升越多, 外特性曲线上升程度越大。

对调整特性的影响:

(1) 发电机带阻、感性负载时, 电枢反应有直轴去磁作用, 随着负载的增加, 去磁作用越强, 端电压下降越多, 为保持端电压不变, 必须增加励磁电流, 使增加的励磁磁动势恰好用平衡去磁的电枢磁动势, 所以曲线上升;

(2) 带容性负载 (负载容抗大于同步电抗) 时, 电枢反应为直轴助磁, 随着负载大小的增加, 助磁作用越强, 端电压上升越多, 为保持端电压不变, 必须减小励磁电流, 使减小的励磁磁动势恰好用平衡助磁的电枢磁动势, 所以曲线下降。

6-2-12 一台同步发电机在额定负载运行情况下保持激磁电流不变而甩去全部负载, 此时端电压上升率为

ΔU_{\uparrow} , 在空载额定电压时保持激磁电流不变而加上额定负载, 此时端电压下降变化率为 ΔU_{\downarrow} , 问 ΔU_{\uparrow} 和

ΔU 哪个大? 为什么?

答: $\Delta U_{\text{降}} > \Delta U_{\text{升}}$ 。

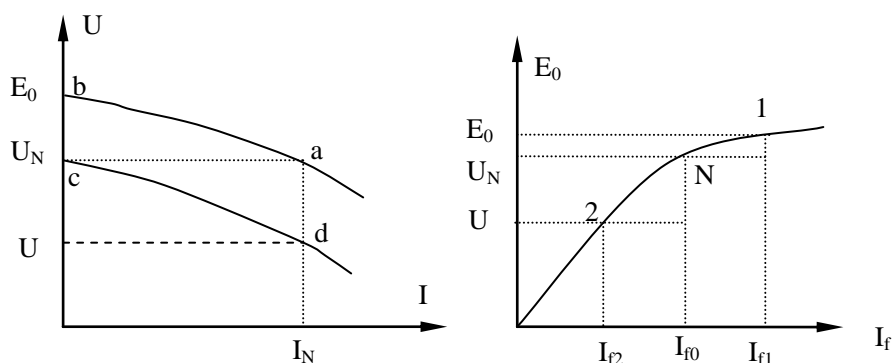
原因是: 见图 (a) (为外特性曲线) 第一种情况电机在额定状态下甩负荷, 电枢反应的去磁作用消失, 工作点由 a ($U=U_N$) 变为 b 点 ($U=E_0$), $\Delta U_{\text{升}} = E_0 - U_N$; 第二种情况电机是由空载状态 ($U=U_N$) 带上额定电流负载, 电枢反应去磁作用出现, 电机工作点由 c ($U=U_N$)

变为 d 点 (U), $\Delta U_{\text{降}} = U_N - U$; 两种情况负载都是额定负载 (I_N), 电枢反应磁动势 $\overline{F_a}$ 是相等的, 与之相平衡的励磁磁动势 $\overline{F_f}$ 是相等的, 即折算到转子绕组后用来平衡 $\overline{F_a}$ 的励磁电流 I_f 是相等的。

再看空载特性曲线图 (b):

第一种情况, 如果不存在 $\overline{F_a}$ 的去磁作用, 励磁电流为 I_{f0} 即可, 为了使额定负载时 $U=U_N$,

由于需要平衡 $\overline{F_a}$ 的去磁作用, 励磁电流就需要增加, 达到 I_{f1} , 甩负荷从而 $\overline{F_a}$ 的去磁作用消失后, 对应的空载电动势就是 E_0 , 折算到转子绕组, 励磁电流增加的部分 $I_{f1} - I_{f0}$, 就是用来平衡 $\overline{F_a}$ 的, $\Delta U_{\text{升}} = E_0 - U_N$;



(a)

(b)

第二种情况, 空载电动势为 $E_0 = U_N$, 对应的励磁电流为 I_{f0} , 负载时由于电枢磁动势 $\overline{F_a}$ 的去磁作用电压降为 U , $\Delta U_{\text{降}} = U_N - U$; 折算到转子绕组励磁电流减少的部分 $I_{f0} - I_{f2}$, 就是用来平衡 $\overline{F_a}$ 的, 根据上述, $I_{f1} - I_{f0} = I_{f0} - I_{f2}$, 由于第一种情况的励磁电流比第二种情况的更大些, 其磁路的饱和程度就更大;

由图可见, 在同样大的励磁电流 $I_{f1} - I_{f0}$ 下, 对应的电压差 $\Delta U_{\text{升}} = E_0 - U_N$ 就比第二种情况 $\Delta U_{\text{降}} = U_N - U$ 小, 即 $\Delta U_{\text{升}} (=E_0 - U_N) < \Delta U_{\text{降}} (=U_N - U)$ 。

6-2-13 一台三相汽轮发电机, $P_N = 25000$ 千瓦, $U_N = 10.5$ 千伏, $\cos \varphi_N = 0.8$ (滞后), Y

接线, 作单机运行, 同步电抗 $x_i^* = 2.13$, r_a 忽略不计。试求每相空载电动势为 7250 伏, 分下列几种财政部接上三相对称负载时的电枢电流值, 并说明电枢反应的性质?

$$I_N = \frac{P_N}{\sqrt{3}U_N \cos \varphi_N}$$

解:额定电流

$$Z_N = \frac{U_N}{\sqrt{3}I_N} = \frac{U_N^2 \cos \phi_N}{P_N} = \frac{(10.5 \times 10^3)^2 \times 0.8}{25000 \times 10^3} = 3.528 \Omega$$

额定阻抗

$$\text{同步电抗的有名值: } x_t = x_t^* Z_N = 2.13 \times 3.528 = 7.52 \Omega$$

以空载电动势为基准相量, 即 $\dot{E}_0 = 7520 \angle 0^\circ$

$$(1) \text{ 电枢电流 } \dot{I} = \frac{\dot{E}_0}{Z_L + jx_t} = \frac{7520 \angle 0^\circ}{7.52 + j7.52} = 707 \angle 45^\circ \text{ A}$$

$I=707\text{A}$, $\psi=45^\circ$, 所以电枢反应既有交轴, 又有直轴去磁。

$$(2) \text{ 电枢电流 } \dot{I} = \frac{\dot{E}_0}{Z_L + jx_t} = \frac{7520 \angle 0^\circ}{j7.52 + j7.52} = 500 \angle 90^\circ \text{ A}$$

$I=500\text{A}$, $\psi=90^\circ$, 所以电枢反应为直轴去磁。

$$(3) \text{ 电枢电流 } \dot{I} = \frac{\dot{E}_0}{Z_L + jx_t} = \frac{7520 \angle 0^\circ}{-j15.04 + j7.52} = 1000 \angle -90^\circ \text{ A}$$

$I=1000\text{A}$, $\psi=-90^\circ$, 所以电枢反应为直轴助磁。

$$(4) \text{ 电枢电流 } \dot{I} = \frac{\dot{E}_0}{Z_L + jx_t} = \frac{7520 \angle 0^\circ}{7.52 - j7.52 + j7.52} = 1000 \angle 0^\circ \text{ A}$$

$I=1000\text{A}$, $\psi=0^\circ$, 所以电枢反应为交轴。

6-2-14 有一台三相汽轮发电机, $P_N=25000$ 千瓦, $U_N=10.5$ 千伏, $\cos \varphi_N = 0.8$ (滞后),

Y 接线, 同步电抗 $x_t^* = 2.13, r_a \approx 0$ 。试求额定负载下发电机的空载相电动势 \dot{E}_0 、 \dot{E}_0 与 \dot{U}

之间的夹角 δ 及 \dot{E}_0 与 \dot{I} 之间的夹角 ψ , 并画出相量图。

解: 外功率因数角 $\varphi = \arccos 0.8 = 36.87^\circ$

以电压相量为基准, 即 $\dot{U}^* = 1 \angle 0^\circ$

空载电动势和功角

$$\dot{E}_0^* = \dot{U}_N^* + j \dot{I}_N^* x_t^* = 1 \angle 0^\circ + j 1 \angle -36.87^\circ \times 2.13 = 2.844 \angle 36.8^\circ$$

$$\delta = 36.8^\circ$$

$$E_0 = E_0^* U_N / \sqrt{3} = 2.844 \times 10.5 / \sqrt{3} = 17.25 \text{ kV}$$

$$\text{内功率因数角 } \Psi = \delta + \varphi = 36.8^\circ + 36.87^\circ = 73.7^\circ$$

6-2-15 有一台凸极同步发电机， $x_d^* = 1.0, x_q^* = 0.6$ ，电枢电阻略去不计，试计算发电机额定电压、额定千伏安、 $\cos \varphi_N = 0.8$ （滞后）时发电机的空载电动势 E_0^* ，并作出相量图。

解：外功率因数角 $\varphi = \arccos 0.8 = 36.87^\circ$

以电压相量为基准相量，即 $\dot{U}_N^* = 1 \angle 0^\circ$

内功率因数角 ψ ：

$$\dot{E}_{ON}^* = \dot{U}_N^* + j \dot{I}_N^* x_q^* = 1 \angle 0^\circ + j 1 \angle -36.87^\circ \times 0.6 = 1.44 \angle 19.44^\circ$$

$$\Psi = 19.44^\circ + 36.87^\circ = 56.31^\circ$$

电流的直轴和交轴分量：

$$\dot{I}_d^* = \dot{I}_N^* \sin \Psi \angle -(90^\circ - \Psi + \varphi) = 1 \times \sin 56.31^\circ \angle -(90^\circ - 56.31^\circ + 36.87^\circ) = 0.832 \angle -70.56^\circ$$

$$\dot{I}_q^* = \dot{I}_N^* \cos \Psi \angle \delta = 1 \times \cos 56.31^\circ \angle 19.44^\circ = 0.555 \angle 19.44^\circ$$

空载电动势：

$$\begin{aligned} \dot{E}_0^* &= \dot{U}_N^* + j \dot{I}_d^* x_d^* + j \dot{I}_q^* x_q^* \\ &= 1 \angle 0^\circ + j 0.832 \angle -70.56^\circ \times 1.0 + j 0.555 \angle 19.44^\circ \times 0.6 \\ &= 1.777 \angle 19.4^\circ \\ E_0^* &= 1.777 \end{aligned}$$

$$\Psi = \arctan \frac{I x_q + U \sin \varphi}{U \cos \varphi}$$

另外，内功率因数角 ψ 还可用公式求取：

其中 U 、 I 均为相电压和相电流。（利用相量图的几何关系推导，过程略）

6-2-16 有一台三相隐极同步发电机， $S_N = 26$ 千伏安， $U_N = 400$ 伏， $I_N = 37.5$ 安， $\cos \varphi_N = 0.85$ ，**Y** 接线，已知空载特性：

E_0^*	1.43	1.38	1.32	1.24	1.09	1.0	0.86	0.7	0.5
I_f^*	3	2.4	2	1.6	1.2	1.0	0.8	0.6	0.4

短路特性：

I_K^*	1.0	0.85	0.65	0.5	0.15
I_f^*	1.2	1.0	0.8	0.6	0.2

求： x_t^* 的不饱和值、饱和值及欧姆值。

$$x_{t(\text{不})}^* = \left. \frac{E_0^*}{I_K^*} \right|_{I_f^*=0.6} = \frac{0.7}{0.5} = 1.4$$

解：同步电抗的不饱和值标么值

$$x_{t(\text{饱})}^* = \left. \frac{U_N^*}{I_K^*} \right|_{I_f^*=1} = \frac{1}{0.85} = 1.176$$

同步电抗的饱和值标么值

$$K_c = \left. \frac{I_K^*}{I_N^*} \right|_{I_f^*=1} = \frac{0.85}{1} = 0.85$$

短路比

$$Z_N = \frac{U_{N\phi}}{I_N} = \frac{400}{\sqrt{3} \times 37.5} = 6.158 \Omega$$

额定阻抗

$$x_{t(\text{不})} = x_{t(\text{不})}^* Z_N = 1.4 \times 6.158 = 8.62 \Omega$$

同步电抗的不饱和值

$$x_{t(\text{饱})} = x_{t(\text{饱})}^* Z_N = 1.176 \times 6.158 = 7.24 \Omega$$

同步电抗的饱和值

6-2-17 一国产三相 72500 千瓦的水轮发电机， $U_N=10.5$ 千伏， $\cos \varphi_N = 0.8$ ，Y 接线，空载特性为：

E_0^*	0.55	1.0	1.21	1.27	1.33
I_f^*	0.52	1.0	1.51	1.76	2.09

短路特性为过原点的直线， $I_K^* = 1$ 时 $I_f^* = 0.965$

试求：（1）直轴同步电抗标么值 $x_{d\text{不}}^*$ 和 $x_{d\text{饱}}^*$

（2）短路比 K_C 。

解：在短路特性上取对应 $I_f^* = 0.52$ 时的 I_K^* （在空载特性上有 $I_f^*=0.52$ 时的 $E_0^*=0.55$ ）

$$\frac{1}{0.965} = \frac{I_K^*}{0.52}$$

$$I_K^* = \frac{0.52}{0.965} = 0.5388$$

在短路特性上取对应 $I_f^* = 1$ 时的 I_{K1}^* （在空载特性上有 $I_f^*=1$ 时的 $E_0^*=1$ ）

$$\frac{1}{0.965} = \frac{I_{K1}^*}{1}$$

$$I_{K1}^* = \frac{1}{0.965} = 1.036$$

同步电抗的不饱和值和饱和值的标么值

$$x_{d(不)}^* = \frac{E_0^*}{I_K^*} \bigg|_{I_f=52} = \frac{0.55}{0.5388} = 1.02$$

$$x_{d(饱)}^* = \frac{U_N^*}{I_{k1}^*} \bigg|_{I_f=1} = \frac{1}{1.036} = 0.965$$

短路比 $K_c = \frac{I_{f0}^*}{I_{fk}^*} = \frac{1.0}{0.965} = 1.036$

额定电流 $I_N = \frac{P_N}{\sqrt{3}U_N \cos \phi_N} = \frac{72500}{\sqrt{3} \times 10.5 \times 0.8} = 4983A$

额定阻抗 $Z_N = \frac{U_{N\phi}}{I_N} = \frac{10500}{\sqrt{3} \times 4983} = 1.216\Omega$

同步电抗的不饱和值和饱和值

$$x_{d(不)} = x_{d(不)}^* Z_N = 1.02 \times 1.216 = 1.24\Omega$$

$$x_{d(饱)} = x_{d(饱)}^* Z_N = 0.965 \times 1.216 = 1.17\Omega$$

6.3 三相同步发电机的并联运行 同步电动机

6-3-1 试述三相同步发电机准同期并列的条件？为什么要满足这些条件？怎样检验是否满足？

答： 条件是：（1）待并发电机的电压 U_g 与电网电压 U_c 大小相等；

（2）待并发电机的电压相位与电网电压相位相同；

（3）待并发电机的频率 f_g 与电网频率 f_c 相等；

（4）待并发电机电压相序与电网电压相序一致；

若不满足这些条件：

条件（1）不满足，发电机在并列瞬间会产生有害的滞后（或超前）发电机电压 90° （即无功性质）的巨大瞬态冲击电流，使定子绕组端部受冲击力而变形；

条件（2）不满足发电机在并列瞬间会产生有害的滞后（或超前）发电机电压一相位角的巨大瞬态冲击电流，使定子绕组端部受冲击力而变形，同时，冲击电流的有功分量还会在发电机的转轴上产生冲击机械扭转矩，使机轴扭曲变形，大的冲击电流还会使电枢绕组过热；

条件（3）不满足，发电机在并列时会产生拍振电流，在转轴上产生时正、时负的转矩，使电机振动，同时冲击电流会使电枢绕组端部受冲击力而变形，还会使电枢绕组发热；

条件（4）不满足的发电机绝对不允许并列，因为此时发电机电压 \vec{U}_g 和 \vec{U}_c 恒差 120° ， ΔU 恒等于 $\sqrt{3}U_g$ ，它将产生巨大的冲击电流而危及发电机，也可能使发电机不能牵入同步。

6-3-2 同步发电机并列时，为什么通常使发电机的频率略高于电网的频率？频率相差很大时是否可以？为什么？

答： 当发电机的频率略高于电网频率时并列，即 $f_g > f_c$ 或 $\omega_g > \omega_c$ ，并列瞬间，发电机电压

的 \dot{U}_g 略超前电网

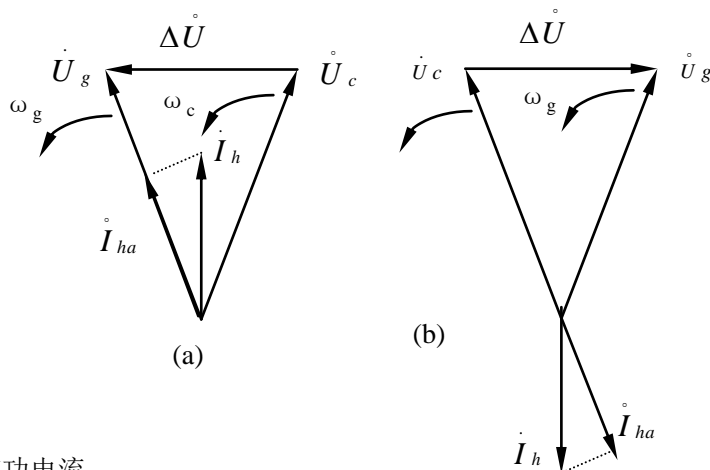
电压 \dot{U}_c ，图 (a) 在电压差的作用下产生冲击

电流，其有功分量 \dot{I}_{ha}

与发电机的电压 \dot{U}_g 同

相位，此时 $P_2 = U_g I_{ha} > 0$ ，

发电机向电网发出有功功率，并且有功电流



分量对转轴产生制动性质的转矩，使转子减速，发电机电压 \dot{U}_g 与电网电压 \dot{U}_c 之

间的夹角减小，直至为零，电压差为零，反之， $f_g < f_c$ ，图 (b) 并列时发电机 $P_2 = U_g I_{ha} < 0$ ，需从电网吸取有功功率。

6-3-3 同步发电机的功角在时间和空间上各有什么含义？

答：时间相位角：发电机空载电动势 \dot{E}_0 与端电压 \dot{U} 之间的相位角为功角 δ 。

空间相位角： δ 是感应空载电动势主磁通 $\dot{\phi}_0$ 的主磁极轴线和产生端电压的定子等效假想合成磁通 $\dot{\phi}_u$ 的磁极轴线之间的夹角。

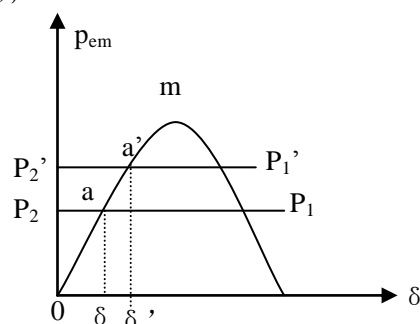
6-3-4 与无限大电网并联运行的同步发电机，如何调节有功功率，试用功角特性分析说明？

答：改变原动机的输出功率或转矩，以改变功率角 δ 的大小。

见图示：在 0—a—m 区域内，改变 P_1 或 T_1 ，即可改变功率角 δ 的大小，调节有功功率 P_2 。

(1) 原工作于 a 点，此时 $P_1 = P_2 \approx P_{em}$ （忽略 Σp ），功角为 δ ；

(2) 当增大原动机转矩 T_1 ，即增大输入功率至 P_1' ，由于输出功率瞬时未变，出现功率差额 $\Delta P = P_1' - P_1$ ，在相应于功率差额 ΔP 的剩余转矩作用下，转子加速，使功角由 δ 增至 δ' ，这时输出功率 P_2' 也相应增大，直至与输入功率达到新的平衡 ($P_2' = P_1'$)，于是电机就稳定运行在新的工作点 a' 点。

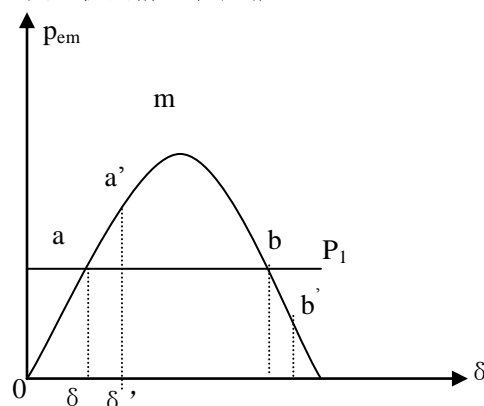


6-3-5 用功角特性说明与无限大电网并联运行的同步发电机的静态稳定概念？

答：忽略电机的各种损耗。

在 b 点， $P_1 = P_{em}$ ， $T_1 = T_{em}$ ，当受到某些原因，

使功角增大，则 $P_1 > P_{em}$ ， $T_1 > T_{em}$ ，功角继续增大，发电机功率越小，电磁转矩越小，运行点



离 b 点越来越远，最后发电机失步。同理，当某原因使功角减小时，运行点也不能回到 b 点。所以在 b 点运行时，电机不具有静态稳定性。

在 a 点， $P_1 = P_{em}$ ， $T_1 = T_{em}$ ，当受到某些原因，

使功角增大，则 $P_1 < P_{em}$ ， $T_1 < T_{em}$ ，功角减小，发电机功率越小，电磁转矩越小，电机能重新回到 a 运行点。同理，当某原因使功角减小时，运行点也能回到 a 点。所以在 a 点运行时，电机具有静态稳定性。

6-3-6 试比较在与无限大电网并联运行的同步发电机的静态稳定性能：并说明理由？

- 1) 有较大短路比或较小短路比；
- 2) 在过励状态下运行或在欠励状态下运行；
- 3) 在轻载状态下运行或在重载状态下运行；
- 4) 直接接到电网或通过升压变压器、长输电线接到电网。

答：（1）有较大短路比，稳定性好，原因由于 $K_M \propto K_c$ ，所以短路比大，过载能力大，静稳定性好。

（2）过励状态稳定性好，原因：过励磁时励磁电流大， E_0 大，功率极限值大，过载能力大，所以稳定性好。

（3）轻载状态稳定性好，电机轻载时的运行点比重载时运行点远离功率极限点（超过功率极限点为不稳定区），所以稳定性好。

（4）直接接到电网时稳定性好，直接接到电网时电抗小，功率极限大，所以稳定性好。

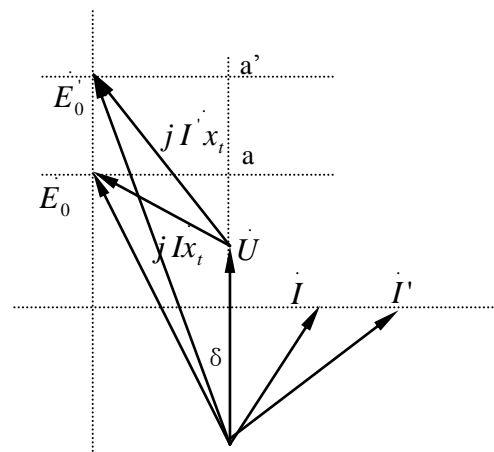
6-3-7 与无限大容量电网并联运行的同步发电机如何调节无功功率？试用相量图分析说明？

答：调节励磁电流即可调节无功功率的大小。

电机输出的无功功率（以隐极机为例）为：

$$Q = m \frac{E_0 U}{x_t} \cos \delta - m \frac{U^2}{x_t}$$

在相量图上可用 $E_0 \cos \delta - U$ 来表示，即 aU 段，当增加励磁电流时空载电动势 E_0 增大，由于调节励磁电流时有功功率不变化， E_0 相量的顶点只能向上移动，达至点 E_0' ，此时表示无功功率的线段部分变为 a'U 段，说明调节励磁电流即可改变无功功率的输出。



6-3-8 什么是 U 形曲线？什么时候是正常励磁、过励磁和欠励磁？一般情况下发电机在什么状态下运行？

答：U 形曲线：与无穷大电网并联运行的同步发电机，在输出有功功率不变的情况下，改变励磁电流 I_f ，测出相应的定子电流 I ，得到的关系曲线 $I=f(I_f)$ 因形状象字母“U”，故称为 U 形曲线。

正常励磁： $\cos \varphi = 1$ 的状态 对应励磁电流为 I_f ；

过励磁： $\cos \varphi$ 滞后状态 对应励磁电流 $I_f' > I_f$ ；

欠励磁： $\cos \varphi$ 超前状态。对应励磁电流 $I_f' < I_f$ 。

由于电网功率因数一般为滞后状态，并且发电机过励状态下运行时，静态稳定性好，故发电机一般处于过励磁运行状态。

6-3-9 试比较 ψ 、 φ 、 δ 这三个角的含义，同步电机下列各种运行状态分别与哪个角有关？角的正、负又如何？

答： φ 是端电压 \dot{U} 与电枢电流 \dot{I} 之间相位角， \dot{I} 滞后 \dot{U} 时， φ 为正；

ψ 是空载电动势 \dot{E}_0 与电枢电流 \dot{I} 之间相位角， \dot{I} 滞后 \dot{E}_0 时， ψ 为正；

δ 是空载电动势 \dot{E}_0 与端电压 \dot{U} 之间的相位角， \dot{U} 滞后 \dot{E}_0 时， δ 为正；

(1) 与 φ 有关，当 $\varphi > 0^\circ$ 滞后， $\varphi < 0^\circ$ 超前

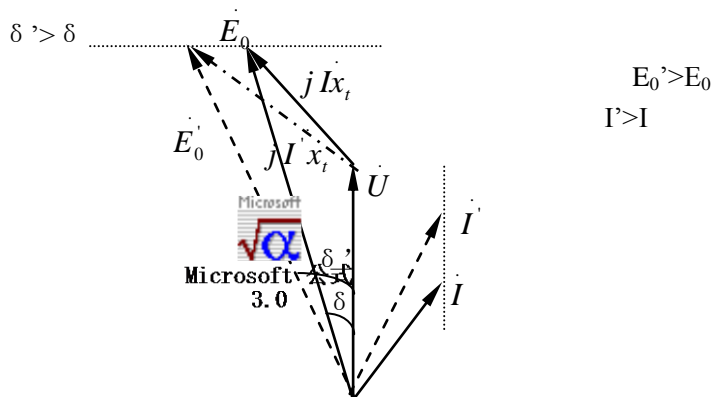
(2) 与 φ 有关，当 $\varphi > 0^\circ$ 过励， $\varphi < 0^\circ$ 欠励

(3) 与 ψ 有关，当 $\psi = 0^\circ$ 交磁， $\psi = 90^\circ$ 直轴去磁， $\psi = -90^\circ$ 直轴助磁

(4) 与 δ 有关， $\delta > 0^\circ$ 发电机， $\delta < 0^\circ$ 电动机。

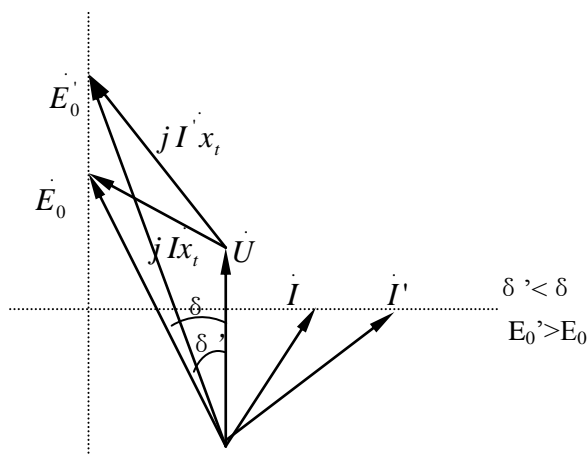
6-3-10 与无穷大电网并联运行的同步发电机，当调节有功功率输出时，如果保持无功功率输出不变，问此时此刻功角 δ 和励磁电流如何变化，定子电流和空载电动势又如何变化，用同一相量图画出变化前、后的相量图。

答：功角 δ 增大，励磁电流 I_f 增加，定子电流和空载电动势增大



6-3-11 与无穷大电网并联运行的同步发电机，当保持输入功率不变时，只改变励磁电流时，功角 δ 是否变化？，输出的有功功率和空载电动势又如何变化？用同一相量图画出变化前、后的相量图

答：假若增加励磁电流 I_f ，则功角 δ 减小，输出的有功功率不变，空载电动势增大。



6-3-12 一台同步发电机并联于无穷大电网， $U^* = 1, I^* = 1, \cos \varphi_N = 0.8$ （滞后），如果保持

激磁电流不变，在负载功率减为原来的 $\frac{3}{4}, \frac{1}{2}, \frac{1}{4}$ 时，求这三种情况下的功角 δ 、功率因数

$\cos \varphi$ 及电枢电流 I 的标么值（设 $r_a = 0, x_t^* = 0.8$ ）。

$$P_{em}^* \approx P_N^* = U^* I^* \cos \varphi = 0.8$$

解：以 U^* 为基准相量，即 $U^* = 1 \angle 0^\circ$

空载电动势： $E_0^* = U^* + j I^* x_t^* = 1 \angle 0^\circ + j(0.8 - j0.6) \times 1 = 1.7888 \angle 20.55^\circ$

$$\frac{3}{4} P_{em}^* = \frac{E_0^* U^*}{x_t^*} \sin \delta$$

(1) 负载减为原来 $3/4$ 时：

$$\sin \delta = \frac{\frac{3}{4} P_{em}^* x_t^*}{E_0^* U^*} = \frac{\frac{3}{4} \times 0.8 \times 1}{1.78881} = 0.334$$

功角： $\delta = 19.57^\circ$

$$Q^* = \frac{E_0^* U^*}{x_t^*} \cos \delta - \frac{U^{*2}}{x_t^*} = \frac{1.7888 \times 1}{1} \cos 19.57^\circ - \frac{1^2}{1} = 0.685$$

无功功率：

$$\cos \varphi = \frac{\frac{3}{4} P_{em}^*}{\sqrt{\left(\frac{3}{4} P_{em}^*\right)^2 + Q^{*2}}} = \frac{\frac{3}{4} \times 0.8}{\sqrt{\left(\frac{3}{4} \times 0.8\right)^2 + 0.685^2}} = 0.658$$

功率因数：

$$I^* = \frac{\frac{3}{4} P_{em}^*}{U^* \cos \varphi} = \frac{\frac{3}{4} \times 0.8}{1 \times 0.6589} = 0.91$$

定子电流:

$$(2) \text{ 负载减为原来 } 1/2 \text{ 时: } \frac{1}{2} P_{em}^* = \frac{E_0^* U^*}{x_t^*} \sin \delta$$

$$\sin \delta = \frac{\frac{1}{2} P_{em}^* x_t^*}{E_0^* U^*} = \frac{\frac{1}{2} \times 0.8 \times 1}{1.7888 \times 1} = 0.2236$$

$$\text{功角: } \delta = 12.9^\circ$$

$$Q^* = \frac{E_0^* U^*}{x_t^*} \cos \delta - \frac{U^{*2}}{x_t^*} = \frac{1.7888 \times 1}{1} \cos 12.9^\circ - \frac{1^2}{1} = 0.7436$$

无功功率:

$$\cos \varphi = \frac{\frac{1}{2} P_{em}^*}{\sqrt{(\frac{1}{2} P_{em}^*)^2 + Q^{*2}}} = \frac{\frac{1}{2} \times 0.8}{\sqrt{(\frac{1}{2} \times 0.8)^2 + 0.7436^2}} = 0.4737$$

功率因数:

$$I^* = \frac{\frac{1}{2} P_{em}^*}{U^* \cos \varphi} = \frac{\frac{1}{2} \times 0.8}{1 \times 0.4737} = 0.8444$$

定子电流:

$$(3) \text{ 负载减为原来 } 1/4 \text{ 时: } \frac{1}{4} P_{em}^* = \frac{E_0^* U^*}{x_t^*} \sin \delta$$

$$\sin \delta = \frac{\frac{1}{4} P_{em}^* x_t^*}{E_0^* U^*} = \frac{\frac{1}{4} \times 0.8 \times 1}{1.7888 \times 1} = 0.4472$$

$$\text{功角: } \delta = 6.42^\circ$$

$$Q^* = \frac{E_0^* U^*}{x_t^*} \cos \delta - \frac{U^{*2}}{x_t^*} = \frac{1.7888 \times 1}{1} \cos 6.42^\circ - \frac{1^2}{1} = 0.777$$

无功功率:

$$\cos \varphi = \frac{\frac{1}{4} P_{em}^*}{\sqrt{(\frac{1}{4} P_{em}^*)^2 + Q^{*2}}} = \frac{\frac{1}{4} \times 0.8}{\sqrt{(\frac{1}{4} \times 0.8)^2 + 0.7775^2}} = 0.2491$$

功率因数:

$$I^* = \frac{\frac{1}{4} P_{em}^*}{U^* \cos \varphi} = \frac{\frac{1}{4} \times 0.8}{1 \times 0.2491} = 0.801$$

定子电流:

6-3-13 设有一凸极式同步发电机, Y 接线, $x_d = 1.2\Omega, x_q = 0.9\Omega$, 和它相连的无穷大电网的线电压为 230V, 额定运行时 $\delta_N = 24^\circ$, 每相空载电动势 $E_0 = 225.5V$, 求该发电机:

- 1) 在额定运行时的基本电磁功率;
- 2) 在额定运行时的附加电磁功率;
- 3) 在额定运行时的总的电磁功率;
- 4) 在额定运行时的比整步功率;

解: 1) 额定运行时的基本电磁功率:

$$P_{em}' = m \frac{E_0 U}{x_d} \sin \delta = 3 \times \frac{225.5 \times 230 / \sqrt{3}}{1.2} \sin 24^\circ = 30445W$$

2) 额定运行时的附加电磁功率

$$P_{em}'' = m \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\delta = 3 \times \frac{(230 / \sqrt{3})^2}{2} \left(\frac{1}{0.9} - \frac{1}{1.2} \right) \sin(2 \times 24^\circ) = 5460W$$

3) 总的电磁功率: $P_{em} = P_{em}' + P_{em}'' = 35.91kW$

4) 额定运行比整步功率:

$$\begin{aligned} P_{syn} &= \frac{dP_{em}}{d\delta} = \frac{3E_0 U}{x_d} \cos \delta_N + 3U^2 \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \cos 2\delta_N \\ &= \frac{3 \times 225.5 \times 230 / \sqrt{3}}{1.2} \cos 24^\circ + 3 \times (230 / \sqrt{3})^2 \left(\frac{1}{0.9} - \frac{1}{1.2} \right) \cos(2 \times 24^\circ) \\ &= 78.2kW / rad \end{aligned}$$

6-3-14 有一台汽轮发电机并联于无穷大电网运行, 额定负载时功角 $\delta_N = 20^\circ$, 现因电网发生故障, 电压下降为原来的 60%, 试问: 为使 δ 角不超过 25° , 那么应增加励磁电流, 使发电机的 E_0 上升为原来的多少倍 (假定故障前后发电机输出的有功功率不变)?

解: 故障前后输出的有功功率不变, 则

$$\begin{aligned} P_{em}^* &= \frac{E_{01}^* U_N^*}{x_t^*} \sin \delta_N = \frac{E_{02}^* U^*}{x_t^*} \sin \delta \\ \frac{E_{01}^* \times 1}{x_t^*} \sin 20^\circ &= \frac{E_{02}^* \times 0.6}{x_t^*} \sin 25^\circ \\ \frac{E_{02}^*}{E_{01}^*} &= \frac{\sin 20^\circ}{0.6 \sin 25^\circ} = 1.349(\text{倍}) \end{aligned}$$

6-3-15 有一台汽轮发电机并联于无穷大电网， $S_N=31250\text{KVA}$ ， $U_N=10.5\text{KV}$ ， $\cos\varphi_N=0.8(\varphi_N>0)$ ，Y 接线， $x_t=7\Omega$ ， $r_a=0$ ，求：

- 1) 发电机在额定状态下运行时，功角 δ 、电磁功率 P_{em} 、比整步功率 P_{syn} 及过载能力 K_m ；
- 2) 若维持上述激磁电流不变，但输出有功功率减半时， δ 、 P_{em} 、 P_{syn} 及 $\cos\varphi$ 将为多少？
- 3) 发电机在额定状态下运行，现仅将激磁电流增加 10%（假定磁路不饱和）， δ 、 P_{em} 、 $\cos\varphi$ 及定子电流 I 将变为多少？

$$I_N = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_N} = \frac{31250}{\sqrt{3} \times 10.5} = 1718.3\text{A}$$

解：(1) 额定电流

$$\text{额定功率因数角 } \varphi_N = \arccos 0.8 = 36.87^\circ$$

$$\dot{U} = \frac{U_N}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ = \frac{10500}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ = 6062.178 \angle 0^\circ \text{V}$$

额定相电压：

空载相电动势：

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + j\dot{I}_N x_t = 6062.178 + j1718.3 \angle -36.87^\circ \times 7 = 16398.93 \angle 35.93^\circ$$

$$\text{功角： } \delta_N = 35.93^\circ$$

$$\text{电磁功率： } P_{em} \approx S_N \cos\varphi_N = 31250 \times 0.8 = 25000\text{kW}$$

比整步功率：

$$P_{syn} = \frac{mE_0 U}{x_t} \cos\delta_N = \frac{3 \times 16398.93 \times 6062.178}{7} \cos 35.93^\circ = 34.5\text{MW} / \text{rad}$$

$$\text{过载能力： } K_M = \frac{1}{\sin\delta_N} = \frac{1}{\sin 35.93^\circ} = 1.704$$

(2) 电磁功率：

$$P'_{em} = \frac{1}{2} P_{em} = \frac{1}{2} \times 25000 \times 10^3 = 12500\text{kW}$$

$$P'_{em} = \frac{mE_0 U}{x_t} \sin\delta = \frac{3 \times 16398.93 \times 6062.178}{7} \sin\delta$$

$$\text{功角： } \delta = 17.06^\circ$$

比整步功率:

$$P_{syn} = \frac{mE_0 U}{x_t} \cos \delta = \frac{3 \times 16398.93 \times 6062.178}{7} \cos 17.06^\circ = 40.8 \text{ MW} / \text{rad}$$

无功功率:

$$Q' = \frac{mE_0 U}{x_t} \cos \delta - \frac{mU^2}{x_t} \\ = \frac{3 \times 16398.93 \times 6062.178}{7} \cos 17.06^\circ - \frac{3 \times 6062.178^2}{7} = 24980.9 \text{ K var}$$

$$\cos \varphi = \cos(\arctan \frac{Q'}{P_{em}}) = \cos(\arctan \frac{24980.9}{12500}) = 0.45$$

功率因数

(3) 电磁功率:

$$P_{em}'' = P_{em} = 25000 \times 10^3 \text{ kW}$$

$$P_{em}'' = \frac{1.1mE_0 U}{x_t} \sin \delta = \frac{1.1 \times 3 \times 16398.93 \times 6062.178}{7} \sin \delta$$

功角: $\delta = 32.2^\circ$

无功功率:

$$Q'' = \frac{1.1mE_0 U}{x_t} \cos \delta - \frac{mU^2}{x_t} \\ = \frac{1.1 \times 3 \times 16398.93 \times 6062.178}{7} \cos 32.2^\circ - \frac{3 \times 6062.178^2}{7} = 23907.9 \text{ K var}$$

$$\cos \varphi = \cos(\arctan \frac{Q''}{P_{em}''}) = \cos(\arctan \frac{23907.9}{25000}) = 0.72$$

功率因数:

$$I = \frac{P_{em}''}{3U \cos \varphi} = \frac{25000 \times 10^3}{3 \times 6062.178 \times 0.72} = 1909.2 \text{ A}$$

定子电流:

该题也可用标么值计算。

6-3-16 有一台发电机向一感性负载供电,有功电流分量为 **1000A**,感性无功电流分量为 **1000A**,求:(1)发电机的电流 **I** 和 $\cos \varphi$; (2)在负载端接入调相机后,如果将 $\cos \varphi$ 提高到 **0.8**,发电机和调相机的电流各为多少? (3)如果将 $\cos \varphi$ 提高到 **1**,发电机和调相机的电流又各为多少?

解: 1) $I = \sqrt{I_a^2 + I_r^2} = \sqrt{1^2 + 1^2} = 1.414 \text{ kA}$

$$\cos \varphi = \frac{I_a}{I} = \frac{1}{1.414} = 0.707$$

$$I_1 = \frac{I_a}{\cos \varphi} = \frac{1}{0.8} = 1.25kA$$

2)发电机电流

$$\cos \varphi = 0.8 \quad \sin \varphi = 0.6$$

$$\text{发电机无功电流 } I_{r1} = I \sin \varphi = 1.25 \times 0.6 = 0.75kA$$

$$\text{调相机的电流 } I_t = I_r - I_{r1} = 1 - 0.75 = 0.25kA$$

$$3)\text{此时发电机电流全是有功分量: } I = I_a = 1kA$$

$$\text{无功电流全由调相机提供: } I_t = I_r = 1kA$$

6.4 同步发电机的三相突然短路和不对称运行

6-4-1 从磁路和电路两个方面来分析同步发电机三相突然短路电流大的原因？

答：磁路：（1）是电枢反应磁通 Φ_{ad}'' （或 Φ_{ad}' ）的路径为漏磁路径，磁阻增大：

同步发电机三相突然短路瞬间，由于穿过励磁绕组和阻尼绕组的直轴去磁电枢反应磁通的突变，励磁绕组和阻尼绕组为了保持磁链守恒，将在各自绕组中感应出电动势和电流，这两个电流产生的磁动势除了与定子三相突然短路电流的磁动势联合产生直轴去磁电枢反应外，还各自产生励磁绕组漏磁通和阻尼绕组漏磁通，这两个磁通在绕组内与直轴去磁电枢反应磁通方向相反，在绕组外与直轴电枢反应磁通方向相同，这样就把直轴去磁的电枢反应磁通“挤”到励磁绕组和阻尼绕组的外部，经过励磁绕组和阻尼绕组的漏磁路径闭合，磁路的磁阻增大，为建立此磁通所需的定子电流就很大。

（2）由于突然短路瞬间，交流分量的电枢反应磁通发生了突变，为保证磁链守恒，出现直流分量磁通，对应定子绕组中必须有直流分量电流，叠加在交流分量电流上，这也是突然短路电流大的一个原因；

电路：根据以上所述，电枢反应磁通通过励磁绕组和阻尼绕组的漏磁通路径，磁路的磁阻 R_m

$$\text{增大，使得电枢反应电抗 } x_d'' \text{ 大为减小，所以三相突然短路电流 } I_K'' = \frac{E_0}{x_d''} \text{ 大为增大。}$$

6-4-2 同步发电机三相突然短路时，定子各相电流的直流分量起始值与短路瞬间转子的空间位置是否有关？与其对应的励磁绕组中的交流分量幅值是否也与该位置有关？为什么？

答：在发生三相短路的暂态过程中，定子电流的各相直流分量起始值与发生短路时的转子位置有关，因为定子电流的各相直流分量起始值总是与交流分量起始值大小相等、方向相反，而定子电流的各相交流分量起始值与短路发生瞬间时的转子位置有关，所以定子电流的各相直流分量起始值也与短路发生瞬间时的转子位置有关。

短路发生瞬间时的转子位置不同，定子电流的各相交流分量起始值也不同，但幅值是相同的，幅值大小与转子位置无关。因此，三相短路电流产生的合成旋转磁场以及与之相应的定子直

流分量产生的恒定磁场，都与转子位置无关。可见由恒定磁场在励磁绕组中产生的交流分量电流的幅值，与短路发生瞬间时的转子位置无关。

6-4-3 同步发电机三相突然短路时，定子各相电流的交流分量起始值与短路瞬间转子的空间位置是否有关？与其对应的激磁绕组中的直流分量起始值是否也与该位置有关？为什么？

答： 在发生突然短路瞬时，各相绕组的励磁磁链决定于该瞬时的转子位置。按回路磁链守恒关系，各相电流产生的电枢反应磁链的交变分量与励磁磁链大小相等、方向相反。可见转子在不同位置发生突然短路时，各相电流产生的电枢反应磁链的交变分量的初始值是不同的，各相电流的交流分量初始值与发生短路瞬时的转子位置有关，只要励磁电流一定，各相电流的交流分量幅值就是一定的，三相合成磁势的幅值及其相对于转子的位置，都与短路发生瞬时的转子位置无关。因此，由定子电流旋转磁场对转子绕组的变化在转子绕组中感应的直流分量的电流的起始值，也与短路瞬时的转子位置无关。

6-4-4 说明 x_d'' 、 x_d' 的物理意义，比较 x_d'' 、 x_d' 、 x_d 的大小？

答： x_d'' 是表征同步发电机三相突然短路的超瞬变（次暂态）状态时直轴电枢磁场和电枢漏磁场对电枢电路作用的一个综合参数。

x_d' 是表征同步发电机三相突然短路的瞬变（暂态）状态时直轴电枢磁场和电枢漏磁场对电枢电路作用的一个综合参数。

它们之间的大小关系是： $x_d'' < x_d' < x_d$ 。

6-4-5 同步发电机三相突然短路时，定子、转子各分量短路电流为什么会衰减？衰减时哪些量是主动的？哪些量是随动的？为什么会有此区别？

答： 发生三相突然短路时，除了励磁电流和定子稳态分量的短路电流保持不变外，凡因磁场突变而在相应回路中引起的非周期分量电流，以及由这些电流产生的磁场在另一侧引起的周期分量电流，因无能源支持都将因回路电阻消耗能量而衰减，非周期分量电流的衰减是主动的。

非周期分量电流各自产生的磁通在另一侧感应的周期分量电流随着非周期分量电流衰减而衰减，周期分量电流的衰减是从动的。

6-4-6 为什么变压器的 $x^+ = x^-$ ，而同步电机 $x^+ \neq x^-$ ？

答： x^+ 、 x^- 分别为正、负序三相电流通过三相绕组时所遇到的电抗，大小与相绕组的磁链有关；

从变压器的原理和结构来看，变压器流入正序电流和负序电流所产生的电磁现象相同的，即变压器的正、负序磁通的分布及磁路情况完全一样，故 $x^+ = x^-$ ；

而同步发电机却不一样，即通入正、负序电流时在发电机内部所产生的电磁现象不一样，由于正序电流的相序是正常时的电流相序，因此它产生的电磁过程与正常时完全相同，所以正

序电抗是正常时的同步电抗，即 $x_d^+ = x_t$ ；而负序电流流经定子绕组除产生漏磁通外，还将产生以同步速旋转的反向旋转磁场，即负序旋转磁场，它以二倍同步速截切转子，在转子各部分包括励磁绕组、阻尼绕组和转子本体感应出二倍基频的电动势，由于转子绕组自成闭合，

因而就产生二倍基频电流，转子感应电流建立的磁动势将削弱负序磁场，这时负序电流所遇到的不再是同步电抗，而是负序电抗，所以 $x^+ \neq x^-$ 。

6-4-7 对两台电机，定子的材料、尺寸和零件完全一样，一个转子的磁极用钢片迭成，另一个为实心磁极，问哪台电机的负序电抗要小？为什么？

答：由于同步发电机的负序旋转磁场以 $2n_1$ 的速度切割转子，能在转子的铁心中感应出电动势和涡流，涡流建立的磁动势对负序磁场起削弱作用。

发电机转子磁极用钢片叠成和用整块钢锻成时，前一种发电机转子感应的涡流小于后一种发电机转子感应的涡流，涡流产生的磁动势对负序磁场的削弱作用比后一种发电机的弱，因此前一种发电机的合成负序磁场就大，后一种发电机的合成负序磁场就小，所以前一种发电机的负序电抗就大一些。

6-4-8 试按数值大小排列同步电机的各种电抗： $x_\sigma, x_d, x_q, x_d', x_d'', x_q'', x^-$ 。

答：同步发电机的各种电抗都是绕组磁通对电路作用的等效量，在绕组匝数一定、频率一定情况下，电抗值的大小与相关磁路的磁阻成反比。

在稳态、对称系统等效电路，有漏抗和电枢反应电抗。漏抗对应的漏磁通的磁路主要是气隙，磁阻大，电枢反应磁路除有两段气隙外，主要是定、转子的铁心，磁阻小。凸极机的转子交轴方向磁阻大于直轴方向的，隐极机的气隙均匀，交、直轴方向的磁阻相等，所以有：凸极机： $x_d > x_q > x_\sigma$ ，隐极机： $x_d = x_q > x_\sigma$ 。

在暂态参数中，分次暂态和暂态两种，它们都是对应于转子感应电流对定子电枢反应磁场的反作用而存在的等效电抗。

次暂态电抗决定于阻尼绕组和励磁绕组感应电流对电枢反应磁通的排挤作用，暂态电抗决定于励磁绕组感应电流对电枢反应磁通的排挤作用。定、转子的这种耦合关系与变压器相似。次暂态电抗相当于电枢反应电抗上并以阻尼绕组的漏抗和励磁绕组的漏抗构成，暂态电抗相当于电枢反应电抗上并以励磁绕组的漏抗构成，若是隐极机： $x_d'' < x_d' < x_d$ ；若为凸极机， $x_d'' < x_d' < x_d$ ， $x_q'' < x_q' = x_q$ 。

不对称系统中的电抗参数，是指定子三相不对称时各序等效电路中的电抗值，分正、负、零序三种参数：

正序电抗对应正转电枢反应磁场，其值为稳态的同步电抗；

负序电抗对应反转的电枢反应磁场，在这种情况下转子与电枢反应磁场之间具有与暂态过程类似的耦合关系，因此负序电抗与次暂态电抗基本相同；

2 零序电流系统在三相绕组中产生的合成磁势为零，所以零序电枢反应电抗为零，考虑到由于绕组结构，部分零序漏磁通相互抵消，所以零序电抗一般小于漏抗。

综上所述，各电抗大小为：

$$\begin{aligned} x_q'' &\geq x_\sigma \geq x_d'' > x_\sigma > x^0 \\ &\wedge \\ &\wedge \quad x_d' \\ &\wedge \\ x_q' &= x_q \leq x_d = x^+ \end{aligned}$$

6-4-9 一台汽轮发电机有下列数据：

$x_d^* = 1.62, x_d'^* = 0.208, x_d^{**} = 0.126, T_d' = 0.74$ 秒， $T_d'' = 0.208$ 秒， $T_a = 0.132$ 秒。设该电机

在空载额定电压下发生三相突然短路，求：

- (1) 在最不利情况下定子突然短路电流的表达式；
- (2) 最大冲击电流值；
- (3) 在短路后经过 0.5 秒时的短路电流值；
- (4) 在短路后经过 3 秒时的短路电流值。

解： 1)

$$I_m^{''*} = \frac{\sqrt{2}}{x_d^{''*}} = \frac{\sqrt{2}}{0.126} = 11.22$$

$$I_m^{'*} = \frac{\sqrt{2}}{x_d^{'*}} = \frac{\sqrt{2}}{0.208} = 6.8$$

$$I_m^* = \frac{\sqrt{2}}{x_d^*} = \frac{\sqrt{2}}{1.62} = 0.873$$

表达式：

$$\begin{aligned} i_k^* &= -[(I_m'' - I_m')e^{-\frac{t}{T_d'}} + (I_m' - I_m)e^{-\frac{t}{T_d}} + I_m] \sin(\omega t + 90^\circ) + I_m'' \sin 90^\circ e^{-\frac{t}{T_a}} \\ &= -[(11.22 - 6.8)e^{-\frac{t}{0.208}} + (6.8 - 0.873)e^{-\frac{t}{0.74}} + 0.873] \sin(\omega t + 90^\circ) + 11.22e^{-\frac{t}{0.132}} \\ &= -(4.42e^{-4.8t} + 5.927e^{-1.35t} + 0.873) \sin(\omega t + 90^\circ) + 11.22e^{-7.576t} \end{aligned}$$

2)最大冲击电流： $i_{k\max}^* = kI_m'' = 1.9 \times 11.22 = 21.318$

3) 将 $t = 0.5$ 代入 1) 表达式中得： $i_{k(0.5)}^* = 1.6$

4) 将 $t = 3$ 代入 1) 表达式中得： $i_{k(3)}^* = 0.595$

变压器选择题

1. 变压器空载电流小的原因是 c。
(a) 一次绕组匝数多，电阻很大； (b) 一次绕组的漏抗很大；
(c) 变压器的励磁阻抗很大； (d) 变压器铁心的电阻很大。
2. 变压器空载损耗 d。
(a) 全部为铜损耗； (b) 全部为铁损耗；
(c) 主要为铜损耗； (d) 主要为铁损耗。
3. 一台变压器一次侧接在额定电压的电源上，当二次侧带纯电阻负载时，则从一次侧输入的功率 b。
(a) 只包含有功功率； (b) 既有有功功率，又有无功功率；
(c) 只包含无功功率； (d) 为零。
4. 变压器中，不考虑漏阻抗压降和饱和的影响，若一次电压不变，铁心不变，而将匝数增加，则励磁电流 b。
(a) 增加； (b) 减少； (c) 不变； (d) 基本不变。
5. 一台单相变压器， $U_{1N}/U_{2N}=220/10$ ，若原方接在 110V 的单相电源上空载运行，电源频率不变，则变压器的主磁通将 b。
(a) 增大； (b) 减小； (c) 不变。
6. 变压器短路实验所测的电抗数值，可用于计算 d。
(a) 励磁电抗； (b) 励磁电阻； (c) 副边漏抗； (d) 原副边漏抗。
7. 做变压器空载实验所测的数值，可用于计算 a。
(a) 励磁阻抗； (b) 原边漏抗； (c) 副边漏抗； (d) 副边电阻。
8. 将 50Hz、220/127V 的变压器，接到 100Hz、220V 的电源上，铁心中的磁通将如何变化？
(c) **应选a**
- (a) 减小； (b) 增加； (c) 不变； (d) 不能确定。
9. 用一台电力变压器向某车间的异步电动机供电，当开动的电动机台数增多时，变压器的端电压将如何变化？ (b)
(a) 升高； (b) 降低； (c) 不变； (d) 可能升高，也可能降低。
10. 变压器运行时，在电源电压一定的情况下，当负载阻抗增加时，主磁通如何变化？ (b)
(a) 增加； (b) 基本不变； (c) 减小。
11. 当一次侧接额定的电压维持不变时，变压器有空载运行转为满载运行时，其主磁通将会：
c。
(a) 增大； (b) 减小； (c) 基本不变。
12. 如果将额定电压为 220/36V 的变压器接入 220V 的直流电源，则将发生什么现象？
(d)
(a) 输出 36V 的直流电压； (b) 输出 36V 电压，原绕组过热；
(c) 输出电压低于 36V； (d) 没有电压输出，原绕组过热而烧毁。
13. 变压器一次绕组接额定电压，二次绕组的输出电压高于额定电压，其负载性质是 b。
(a) 纯阻负载； (b) 容性负载； (c) 感性负载。
14. 一次侧额定电压为 220V 的单相变压器，接 220V 交流电源时，空载电流为 1A，如果不慎错误的接到了 380V 的交流电源，则空载电流为 a。
(a) 1.727A； (b) 1.0A； (c) 大于 1.727A。
15. 下列哪种形式的变压器在电力系统中 (c) 不宜采用？ **应选d**
(a) Y, d 接法的芯式变压器； (b) D, y 接法的组式变压器；
(c) Y, y 接法的芯式变压器； (d) Y, y 接法的组式变压器。

16. 一台变压器若将其原边外加电压 U_1 和频率 f_1 同时提高 10%，其铁心损耗将 a。
- (a) 升高； (b) 降低； (c) 不变。
17. 变压器空载运行时 c。
- (a) 当电流为正弦波时，主磁通为尖顶波；
 (b) 当磁通为正弦波时，电流为平顶波；
 (c) 当磁通为正弦波时，电流为尖顶波；
 (d) 当电流为正弦波时，主磁通为正弦波。
18. 关于三相变压器的变比是 d。
- (a) 副方线电势与原方线电势之比；
 (b) 原方相电流与副方相电流之比；
 (c) 原方线电压与副方相电压之比；
 (d) 原方绕组匝数与副方绕组匝数之比；
19. 变压器铁心叠片越厚，其损耗越 a。
- (a) 大； (b) 小。
20. 升压变压器，一次绕组的每匝电势 c 二次绕组的每匝电势。
- (a) 等于； (b) 大于； (c) 小于。
21. 如将额定电压为 220/110V 的变压器的低压边误接到 220V 电压，则激磁电流将 c。
- (a) 不变； (b) 增大一倍； (c) 增加很多倍。
22. 如将额定电压为 220/110V 的变压器的低压边误接到 220V 电压，则变压器将 c。
- (a) 正常工作； (b) 发热但无损坏危险； (c) 严重发热有烧坏危险。
23. 一台单相变压器， $U_{1N}/U_{2N}=220/10$ ，若原方接在 110V 的单相电源上空载运行，电源频率不变，则变压器的主磁通将 (b)。
- (a) 增大； (b) 减小； (c) 不变。
24. 变压器负载呈容性，负载增加时，副边电压 c。
- (a) 呈上升趋势； (b) 不变； (c) 可能上升或下降
25. 一台变压器原设计的频率为 50Hz，现将它接到 60Hz 的电网上运行，当额定电压不变时，铁芯中的磁通将 c。
- (a) 增加； (b) 不变； (c) 减少； (d) 为零不能运行。
26. 变压器采用从付边向原边折合算法的原则是： d。
- (a) 保持付边电流 I_2 不变；
 (b) 保持付边电压为额定电压；
 (c) 保持付边绕组漏阻抗不变；
 (d) 保持付边磁通势不变。
27. 分析变压器时，若把原边向付边折合 b。
- (a) 不允许
 (b) 保持原边磁通势不变
 (c) 原边电压折算关系是 $U_1'=kU_1$
 (d) 原边电流折算关系是 $I_1'=kI_1$ ，阻抗折算关系是 $Z_1'=k^2Z_1$
28. 额定电压为 220/110V 的单相变压器，高压边漏阻抗 $X_1=0.3\Omega$ ，折合到付边后大小为 d。
- (a) 0.3Ω ； (b) 0.6Ω ； (c) 0.15Ω ； (d) 0.075Ω 。
29. 额定电压为 220/110V 的单相变压器，短路阻抗 $Z_k=0.01+j0.05\Omega$ ，负载阻抗为 $0.6+j0.12\Omega$ ，从原边看进去总阻抗大小为 a。

- (a) $0.61+j0.17\Omega$; (b) $0.16+j0.08\Omega$;
 (c) $2.41+j0.53\Omega$; (d) $0.64+j0.32\Omega$ 。
30. 某三相电力变压器的 $S_N=500\text{KVA}$, $U_{1N}/U_{2N}=10000/400\text{V}$, Y, yn 接法, 下面数据中有一个是它的励磁电流值, 它应该是 a。
- (a) 2A; (b) 50A;
 (c) 10A; (d) 28.78A。
31. 一台三相电力变压器的 $S_N=560\text{KVA}$, $U_{1N}/U_{2N}=10000/400\text{V}$, D, y 接法, 负载运行时不计励磁电流, 若低压边 $I_2=808.3\text{A}$, 高压边 I_1 应为 d。
- (a) 808.3A; (b) 56A; **应选c**
 (c) 18.67A; (d) 32.33A。
32. 某三相电力变压器带电阻电感性负载运行, 负载系数相同的情况下, $\cos\Phi_2$ 越高, 电压变化率 ΔU a。
- (a) 越小; (b) 不变; (c) 越大; (d) 无法确定。
33. 额定电压为 10000/400V 的三相电力变压器负载运行时, 若付边电压为 410V, 负载的性质是 c。
- (a) 电阻; (b) 电阻电感; (c) 电阻电容; (d) 电感电容。
34. 变压器归算的目的是为了计算方便, 归算前后应保持 d。
- (a) 磁势不变, 电势不变; (b) 磁势不变, 电磁功率不变;
 (c) 电势不变, 磁势不一定不变; (d) 铜耗不变, 磁势不变。
35. 下列说法正确的是 a。
- (a) 变压器短路试验的目的是为了测取变压器的 r_k, x_k, z_k ;
 (b) 变压器带纯电阻负载时, 当负载电流增加, 输出电压一定不变;
 (c) 变压器中铁耗为可变损耗, 因为它随电源电压而变;
 (d) 变压器中铜耗为不变损耗, 因为折算时保持它不变。
36. 下列说法正确的是 c。
- (a) 变压器短路试验的目的是为了测取变压器的 r_m, x_m, z_m ;
 (b) 变压器额定运行时是效率最高点;
 (c) 变压器带电阻电容性负载, 当负载电流增加时, 输出电压可能会增加;
 (d) 变压器纯电阻负载时, 当负载电流增加, 输出电压一定不变。
37. 一变压器若将其原边外加电压 U_1 和频率 f_1 同时提高 10%, 其励磁电流 c。
- (a) 升高 (b) 降低 (c) 不变。
38. 变压器负载运行时 b。
- (a) 当电流为正弦波时, 主磁通为尖顶波;
 (b) 当磁通为平顶波时, 电流为正弦波;
 (c) 当磁通为正弦波时, 电流为平顶波;
 (d) 当电流为正弦波时, 主磁通为正弦波。
39. 做变压器空载实验, 应在变压器 b。
- (a) 原边 (b) 副边 (c) 任意边。
40. 变压器在 a 时, 效率最高。
- (a) 铜损等于铁损; (b) 铜损大于铁损;
 (c) 铜损小于铁损; (d) 额定负载运行。

变压器填空题

1. 变压器铁心导磁性能越好, 其励磁电抗越 _____, 励磁电流越 _____。(越大、越小 2. 变

压器带负载运行时,若负载增大,其铁损耗将____,铜损耗将____(忽略漏阻抗压降的影响)。
(不变、增加)

3. 变压器短路阻抗越大,其电压变化率就____,短路电流就____。
(越大、越小)

4. 一台 $2\text{ kV}\cdot\text{A}$, $400/100\text{ V}$ 的单相变压器,低压侧加 100 V ,高压侧开路,测得 $I_0=2\text{ A}$, $P_0=20\text{ W}$;当高压侧加 400 V ,低压侧开路,测得 $I_0=$ ____ A , $P_0=$ ____ W 。(0.5、1.25) **第二空应是20**

5. 变压器等效电路中的 X_m 是对应于____电抗, R_m 是表示____电阻。

6. 两台变压器并联运行,第一台先达满载,说明第一台变压器短路阻抗标么值比第二台____。(励磁、励磁、小)

7. 变压器运行时,当____时运行效率最高。(铁损等于铜损)

8. 有一台三相电力变压器带感性负载运行时,在负载电流相同的情况下,功率因数越高,变压器的电压调整率 ΔU ____,效率 η ____。(越小、越高)

9. 有一台变压器原边接在 50 Hz 、 380 V 的电源上时,副边输出的电压是 36 V 。若把它的原边接在 60 Hz 、 380 V 的电源上,则副边输出的电压____ V ,输出电压的频率是____ Hz 。(36、60)

10. 变压器运行时,副边电流若分别为 0 、 $0.6I_{2N}$ 时,原边电流应分别为____、____。(0、 $0.6I_{1N}$)

11. 变压器铁心一般采用 0.27 mm 、 0.3 mm 厚的硅钢片叠压而成,是为了减少____和____。(磁滞损耗、涡流损耗)

12. 一台三相变压器原边额定相电压为 220 V ,原副边的匝数为 $N_1=1732$, $N_2=500$,副边的额定相电压为____,若副边采用 Y 接,副边输出的额定线电压为____。(63.5V、110V)

13. 一台控制用单相变压器,额定容量 $S_N=100\text{ VA}$,额定电压 $U_{1N}/U_{2N}=380/36\text{ V}$ 它的原边额定电流为____副边额定电流为____。(26.3A、277.8A)

14. 两台变压器的容量不等而阻抗电压相同并联后它们分担的电流____这种运行情况合理。(不同)

15. 变压器空载试验通常在____边进行,短路试验通常在____边进行。(低压、高压)

16. 电压互感器的主要作用是____。电压互感器副边严禁____运行。
(测量高压线路的电压、开路)

17. 电流互感器的主要作用是____。电流互感器副边严禁____运行。(测量大电流线路的、短路)

18. 变压器并联运行的条件。((1)变比相等,(2)联结组别相等,(3)短路阻抗的标么值相等)

1. 一台单相变压器额定电压为 $380\text{ V}/220\text{ V}$,额定频率为 50 Hz ,如果误将低压侧接到 380 V 上,则此时 Φ_m ____, I_0 ____, Z_m ____, P_{Fe} ____。(增加,减少或不变)

答: Φ_m 增大, I_0 增大, Z_m 减小, P_{Fe} 增大。

2. 一台额定频率为 50 Hz 的电力变压器接于 60 Hz ,电压为此变压器的 $6/5$ 倍额定电压的电网上运行,此时变压器磁路饱和程度____,励磁电流____,励磁电抗____,漏电抗____。

答: 饱和程度不变,励磁电流不变,励磁电抗增大,漏电抗增大。

3. 三相变压器理想并联运行的条件是 (1)____,
(2)____,
(3)_____。

答：(1) 空载时并联的变压器之间无环流；(2) 负载时能按照各台变压器的容量合理地分担负载；(3) 负载时各变压器分担的电流应为同相。

4. 如将变压器误接到等电压的直流电源上时，由于 $E = \underline{\hspace{2cm}}$ ， $U = \underline{\hspace{2cm}}$ ，空载电流将 $\underline{\hspace{2cm}}$ ，空载损耗将 $\underline{\hspace{2cm}}$ 。

答：E 近似等于 U，U 等于 IR，空载电流很大，空载损耗很大。

5. 变压器空载运行时功率因数很低，其原因为 $\underline{\hspace{2cm}}$ 。

答：激磁回路的无功损耗比有功损耗大很多，空载时主要由激磁回路消耗功率。

6. 一台变压器，原设计的频率为 50Hz，现将它接到 60Hz 的电网上运行，额定电压不变，励磁电流将 $\underline{\hspace{2cm}}$ ，铁耗将 $\underline{\hspace{2cm}}$ 。

答：减小，减小。

7. 变压器的副端是通过 $\underline{\hspace{2cm}}$ 对原端进行作用的。

答：磁动势平衡和电磁感应作用。

8. 引起变压器电压变化率变化的原因是 $\underline{\hspace{2cm}}$ 。

答：负载电流的变化。

9. 如将额定电压为 220/110V 的变压器的低压边误接到 220V 电压，则激磁电流将 $\underline{\hspace{2cm}}$ ，变压器将 $\underline{\hspace{2cm}}$ 。

答：增大很多倍，烧毁。

10. 联接组号不同的变压器不能并联运行，是因为 $\underline{\hspace{2cm}}$ 。

答：若连接，将在变压器之间构成的回路中引起极大的环流，把变压器烧毁。

11. 变压器副边的额定电压指 $\underline{\hspace{2cm}}$ 。

答：原边为额定电压时副边的空载电压。

12. 通过 $\underline{\hspace{2cm}}$ 和 $\underline{\hspace{2cm}}$ 实验可求取变压器的参数。

答：空载和短路。

13. 变压器的结构参数包括 $\underline{\hspace{2cm}}$ ， $\underline{\hspace{2cm}}$ ， $\underline{\hspace{2cm}}$ ， $\underline{\hspace{2cm}}$ ， $\underline{\hspace{2cm}}$ 。

答：激磁电阻，激磁电抗，绕组电阻，漏电抗，变比。

14. 既和原边绕组交链又和副边绕组交链的磁通为 $\underline{\hspace{2cm}}$ ，仅和一侧绕组交链的磁通为 $\underline{\hspace{2cm}}$ 。

答：主磁通，漏磁通。

15. 变压器的一次和二次绕组中有一部分是公共绕组的变压器是 $\underline{\hspace{2cm}}$ 。

答：自耦变压器。

16. 并联运行的变压器应满足 (1) $\underline{\hspace{2cm}}$ ，
(2) $\underline{\hspace{2cm}}$ ，(3) $\underline{\hspace{2cm}}$ 的要求。

答：(1) 各变压器的额定电压与电压比应相等；(2) 各变压器的联结组号应相同；(3) 各变压器的短路阻抗的标么值要相等，阻抗角要相同。

17. 变压器运行时基本铜耗可视为 $\underline{\hspace{2cm}}$ ，基本铁耗可视为 $\underline{\hspace{2cm}}$ 。

答：可变损耗，不变损耗。

18. 变压器由空载到负载，其主磁通 Φ_m 的大小 $\underline{\hspace{2cm}}$ 。变压器负载时主磁通 Φ_m 的作用 $\underline{\hspace{2cm}}$ 。

(基本不变；传递能量的媒介)

19. 变压器等值电路中 R_m 是代表 $\underline{\hspace{2cm}}$ 。变压器等值电路中 X_m 是代

表_____。(反映铁损的等效电阻;反映铁芯磁化性能的参数)

20、电压互感器在使用时,二次侧不允许_____。电流互感器在使用时,二次侧不允许_____。(短路;开路)

21、变压器短路试验一般_____侧测量,空载试验一般在_____侧测量。变压器短路试验可以测得_____阻抗,空载试验可以测得_____阻抗。(高压侧;低压侧;短路;激磁)

22、变压器带感性负载运行时,随负载电流的增加,二次侧端电压_____。(下降)

23、若两台变压器并联,第一台短路电压, $\frac{u_{kI}}{U_N} = 5.5\%$, 第二台短路电压 $\frac{u_{kII}}{U_N} = 6.5\%$, 负载时,第_____台变压器先满负荷。(第一台)

交流电机填空题

1. 一台 50Hz 的三相电机通以 60 Hz 的三相对称电流,并保持电流有效值不变,此时三相基波合成旋转磁势的幅值大小_____, 转速_____, 极数_____。

答: 不变, 变大, 不变。

2. 单相绕组的基波磁势是_____, 它可以分解成大小_____, 转向_____, 转速_____的两个旋转磁势。

答: 脉振磁势, 相等, 相反, 相等。

3. 有一个三相双层叠绕组, $2p=4$, $Q=36$, 支路数 $a=1$, 那么极距 τ = _____槽, 每极每相槽数 q = _____, 槽距角 α = _____, 分布因数 k_{d1} = _____, $y_1 = 8$, 节距因数 k_{p1} = _____, 绕组因数 k_{w1} = _____。

答: 9, 3, 20° , 0.96, 0.98, 0.94

4. 若消除相电势中 ν 次谐波, 在采用短距方法中, 节距 y_1 = _____ τ 。

答: $\frac{\nu-1}{\nu}$

5. 三相对称绕组通过三相对称电流, 顺时针相序 (a-b-c-a), 其中 $i_a = 10 \sin \omega t$, 当 $I_a = 10A$ 时, 三相基波合成磁势的幅值应位于_____; 当 $I_a = -5A$ 时, 其幅值位于_____。

答: A 相绕组轴线处, B 相绕组轴线处。

6. 将一台三相交流电机的三相绕组串联起来, 通交流电, 则合成磁势为_____。

答: 脉振磁势。

7. 对称交流绕组通以正弦交流电时, ν 次谐波磁势的转速为_____。

答: $\frac{n_s}{\nu}$

8. 三相合成磁动势中的五次空间磁势谐波, 在气隙中以_____基波旋转磁动势的转速旋转, 转向与基波转向_____, 在定子绕组中, 感应电势的频率为_____, 要消除它定子绕组节距 y_1 = _____。

答: $1/5$, 相反, $f_1, \frac{4}{5}\tau$

1、三相同步发电机的内功率因数角 $\psi = 0$ 时, 电枢反应磁势的轴线作用在_____位置, 对转子磁势起_____作用。

0①交轴②交磁

2、同步发电机并入电网以后, 如只要调节其输出的有功功率(无功功率不变), 必须_____, 当只调节其输出的无功功率, 可_____。

0①调节同步发电机原动机输出功率并调节励磁电流

②调节同步发电机的励磁电流

3、功角 δ 在时间上表示_____, 在空间表示_____。

0①感应电势 E_0 同端电压 U_1 之间的夹角②转子磁极的轴线与合成磁场轴线的夹角

4、有一台三相同步发电机作单机运行, 供给一个纯电阻负载, 当调节负载使输出电流增加时, 发电机端电压将_____, 这是由于_____。

0①降低②电阻性负载时, 电枢反应除交磁作用外还有去磁作用, 输出电流增加时去磁作用增强, 电机中的合成磁通减少, 发电机端电压降低

5、同步发电机并网的条件是_____。

0 同步发电机和电网相序、频率、电压相等

6、异步电机和变压器一样, 所需的励磁电流必须由电网供给。同步电机所需的励磁电流由_____供给。

0 直流电源(也可答: 由交、直流同供给)

7、隐极同步发电机中, 电枢磁势 F_a 与它产生的磁通 ϕ_a , 在空间相位上_____。
凸极同步发电机中, 电枢磁势 F_a 与它产生的磁通 ϕ_a , 在空间相位上_____。

0 同相位 可能不同相位

8、一台三相同步发电机, 额定功率为 24 千瓦, 额定电压 173 伏, Y 接法, 额定功率因数 0.8 (滞后), 此发电机的额定电流为_____安。

0 100

9、从同步电机和异步电机的理论分析可知, 同步电机的空气隙应比异步电机的空气隙要_____, 其原因是_____。

0①大②同步电机空气隙大时有较大的稳定度

10、容量相近的同步发电机的电压调整率(负载为阻感性)比直流发电机要大, 其原因是_____。

0 直流发电机中只有电阻压降, 同步发电机中除电阻压降外还有电抗压降。

11、当同步发电机空载电压大于电网电压 10% 时, 将发电机与电网并联(其它并联条件均已满足), 此时发电机将向电网输出_____性的电流。

0 电感

12、凸极同步电机直轴电枢反应电抗 X_{ad} 的物理意义是_____。

0 反映直轴电枢反应的强弱, 反映三相单位直轴电枢电流产生通过气隙的磁通大小

1 3、用一台转矩随转速增加而略有下降的原动机拖动一台同步发电机，此发电机对一台功率相近的三相异步电动机供电。若不调节同步发电机的励磁电流，当异步电动机的负载转矩增加时，同步发电机的电压将_____，频率将_____输出电流将_____输出功率将_____。

0①降低②降低③增加④增加

1 4、与电网并联运行的同步发电机，其电枢反应磁势的位置决定于_____。

0 同步发电机原动机输入功率的大小及励磁电流的大小

1 5、一台三相同步发电机作单机运行，供给一纯电阻负载，若只增加其励磁电流，则此时发电机输出的有功功率_____，无功功率输出_____，而频率将_____。

0①增加②不变③下降

1 6、三相隐极同步发电机并联在电网上运行，输出一定有功功率，合成磁势相对于磁极磁势的空间电角度为_____，它的大小决定于_____。

0①功角②同步发电机原动机输入功率的大小

1 7、三相同步电动机运行在 $\cos \phi = 1$ （不计定子的电阻效应），若此时减少励磁电流，则从电网输入的有功功率_____，输入的无功功率的性质是_____，此时功角值_____。

0①保持不变②电感性③增加

1 8、用一台并励直流电动机拖动一台三相同步发电机（已并在电网），要使发电机能增大输出功率，应将_____。若此台同步发电机运行于空载时（仍接在电网上），电网的交流电压突然升高了 10%，那么直流电动机的输出功率_____，同步发电机输出电流的大小与性质为_____（分析时不计定子电阻效应）。

0①并励直流电动机励磁回路电阻增加②不变③电容性

1 9、同步发电机与大容量电网并联运行时，其功率因数决定于_____；单独运行时，其功率因数决定于_____。

0①同步发电机的励磁电流②负载的性质

2 0、有一台三相同步电动机，已带有一定的机械负载在运行，若要改变其功率因数（如从滞后改为超前），那么应该_____。

0 增大同步电动机的励磁电流

2 1、在直流发电机中电刷的位置决定着电枢磁势的位置，在同步发电机单机运行时电枢磁势的位置决定于_____。

0 负载的性质

2 2、与大容量电网并联的同步发电机在欠励到一定程度时，将会发生失步，其原因是_____。

0 由于励磁电流过小，运行的功角达到 90° ，进入不稳定区

2 3、同步发电机单机运行时电枢反应的性质主要决定于_____，当负载为三相对称电阻性负载时，电枢反应起_____作用。

0①负载的性质②直轴去磁兼交磁

2 4、对称负载时同步电机的电枢磁场是_____磁场，其转速为_____，它在励磁绕组_____感应电势。

0①圆形旋转②同步速 n_1 ③不

2 5、同步发电机在对称负载运行时,气隙磁场是由_____磁势和_____磁势建立的。

0①励磁绕组②电枢

2 6、同步发电机对称负载运行时电枢绕组基波磁势与转子之间_____相对运动,而谐波磁势与转子之间_____相对运动。

0①没有②有

2 7、同步发电机对称负载运行时电枢绕组的谐波磁场在定子绕组中产生的电势和基波_____频率,而励磁绕组的谐波磁场在定子绕组中产生的电势和基波频率_____。

0①同②不同

2 8、凸极同步发电机与电网并联,如将发电机励磁电流减为零,此时电机的最大电磁转矩为_____。

0 附加电磁转矩 $m \cdot (U \cdot U / 2) \cdot (1 / X_q - 1 / X_d)$

2 9、已知同步电机的电压相量超前电流相量 15° 电角度,此相量关系是以发电机惯例,该电机运行在_____状态。

0 电动机

3 0、当 $\cos \phi$ 落后时,电枢反应在同步发电机的运行中起_____作用,而在电动机运行中起_____作用。

0①直轴去磁兼交磁②直轴增磁兼交磁

3 1、当凸极同步电机电枢电流为已知恒定数值,而 ψ 变动时,电枢磁场所感生的电枢反应电势 E_a 的大小 _____, 当 ψ 为 _____ 时 E_a 最大, 当 ψ 为 _____ 时 E_a 最小。

0①也将变化② 90° 或 -90° ③ 0°

3 2、设隐极同步发电机的电枢电流 I_a 落后于空载电势 E_0 30° 时间相位角,此时电枢旋转磁场与转子旋转磁场在定子绕组中所感应的电势 E_a 和 E_0 间的时间相位角为_____。

0 120°

3 3、同步电机电枢绕组匝数增加时, X_d 和 X_q 将_____。

0 增加

3 4、同步电机气隙加大时, X_d 和 X_q 将_____。

0 减小

3 5、同步电机铁芯饱和程度增加时, X_d 和 X_q 将_____。

0 减小

3 6、同步电机转子励磁绕组匝数增加时, X_d 和 X_q 将_____。

0 保持不变

3 7、一台与无穷大电网并联的隐极同步发电机,稳定运行在 $\delta = 30^\circ$, 若因故励磁电流变为零,这台发电机将_____。

0 转子加速进而失去同步

3 8、以纯电感为负载做零功率因数负载实验,若做到 $U = U_N$, $I = I_N$, $n = n_N$ 时,同步发电机处于_____状态。

0 过励

3 9、以纯电感为负载做零功率因数负载实验,若做到 $U = U_N$, $I = I_N$, $n = n_N$ 时,维持此时的励磁电流及转速 n 不变,去掉负载以后,空载电势 E_0 将_____额定电压 U_N 。

0 大于

4 0、有阻尼绕组的同步发电机突然短路电流比无阻尼绕组的同步发电机突然短路电流_____。(填写：大、小、一样)

0 大

4 1、一台并联于无穷大电网运行的同步发电机，电流落后于电压一个相位角，若逐渐减小其励磁电流，电枢电流将_____

0 先减小， $\cos \phi = 1$ 时电流值达到最小，继续减小励磁电流电枢电流将增大，且电流超前电压一个相位角

交流电机选择题：

- 三相异步电动机的定子铁心及转子铁心采用硅钢片叠压而成的原因是___。(a)
(a) 减少铁心中的能量损耗；(b) 允许电流通过；(c) 价格低廉，制造方便。
- 三相异步电动机设计时为减小磁化电流以改善功率因数，应使气隙 δ ___。(b)
(a) 增加；(b) 减小；(c) 无关。
- 三相异步电动机空载时气隙磁通的大小主要取决于___。(b)
(a) 电源电压；(b) 气隙大小；(c) 定、转子铁心材质；(d) 定子绕组的漏阻抗。
- 若在三相对称绕组中通入 $i_u = I_m \sin \omega t$, $i_v = I_m \sin(\omega t + 120^\circ)$, $i_w = I_m \sin(\omega t - 120^\circ)$ 的三相电流，当 $\omega t = 210^\circ$ 时，其三相基波合成磁动势的幅值位于___。(d)
(a) u 相绕组轴线上；(b) v 相绕组轴线上；
(c) w 相绕组轴线上；(d) 在三相绕组轴线之外的某一位置。
- 三相对称绕组中，通入三相不对称交流电流其合成磁势为___。(c)
(a) 圆形旋转磁势；(b) 脉振磁势；(c) 椭圆形旋转磁势。
- 单相绕组中，通入单相交流电流其磁势为___。(b)
(a) 圆形旋转磁势；(b) 脉振磁势；(c) 椭圆形旋转磁势。
- 两相对称绕组（空间互差 90° ）中，通入两相对称交流电流（时间互差 90° ）其合成磁势为___。(a)
(a) 圆形旋转磁势；(b) 脉振磁势；(c) 椭圆形旋转磁势。
- 一台六极感应电动机，额定转速为 950 转/分，此时转子旋转磁势相对于定子旋转磁势的转速为___。(a)
(a) 0 转/分；(b) 750 转/分；(c) 50 转/分。

同步电机部分：

1、一台并联在电网上运行的三相同步发电机，输出 $\cos \phi = 0.5$ （滞后）的额定电流，现在要让它输出 $\cos \phi = 0.8$ （滞后）的额定电流，则可以：

- 输入功率不变，增加励磁电流；
- 增加输入功率，励磁电流不变；
- 减少输入功率，增加励磁电流；
- 输入功率不变，减少励磁电流。

b

2、已知一台凸极同步发电机的 $I_d = I_q = 10$ 安，此时发电机的电枢电流为：

- 10 安；(b) 20 安；(c) 14.14 安；(d) 15 安。

c

3、相应于异步电动机的励磁电抗 X_m ，在同步电机中有：

- 漏电抗；(2) 电枢反应电抗；
- 同步电抗；(4) 没有相应的电抗与之相对应。

②

4、凸极同步发电机附加电磁功率产生的原因是：

- (1)交轴无励磁绕组；
- (2)交轴上的磁阻比直轴上的磁阻大；
- (3)直轴上的磁阻比交轴磁阻大。

②

5、三相同步电动机运行在过励状态时，从电网吸收：

- (1)感性电流；
- (2)容性电流；
- (3)纯有功电流。

②

6、凸极同步发电机突然短路时的超瞬态电流周期分量 I_k'' 衰减到 I_k' 是由于：

- (1)阻尼绕组电阻的存在；
- (2)励磁绕组电阻的存在；
- (3)电枢绕组电阻的存在。

①

7、同步发电机稳态短路电流不很大的原因是：

- (1)漏阻抗较大；
- (2)短路电流产生去磁作用较强；
- (3)电枢反应产生增磁作用较强；
- (4)同步电抗较大。

②④

8、当同步发电机供给纯电容性负载时，电枢反应使其端电压：

- (1)不变；
- (2)增加；
- (3)降低。

②

9、如果不计定子电阻效应，同步发电机运行在什么条件下，有 $\psi = \phi$ ：

- (1)纯电感负载；
- (2)纯电容负载；
- (3)纯电阻负载；
- (4)电容电阻性负载；
- (5)电感电阻性负载。

①②

10、测定同步发电机短路特性时，如果转速降低到 $0.8 n_1$ 时，测得的短路特性：

- (1)不变；
- (2)提高到 0.8 倍；
- (3)降低到 $1 / 0.8$ 。

0①

11、同步发电机短路特性是一条直线的原因是：

- (1)励磁电流较小磁路不饱和；
- (2)电枢反应去磁作用使磁路不饱和；
- (3)短路时电机相当于在一个电阻为常数的电路中运行，所以 I_k 和 I_f 成正比。

0②

12、用转差试验法求凸极同步电机的同步电抗时，转差率必须要小，如果使 $S = 0.5$ ，那么求得的同步电抗值：

- (1)偏大；
- (2)偏小；
- (3)不能求得 X_d, X_q 。

0③

13、同步发电机与电网并联时，并联条件除发电机电压小于电网电压 5% 外，其它条件均已满足，此时若合闸并联，发电机将：

- (1)产生巨大电流，使发电机不能并网；
- (2)产生不大电流，电机输出滞后的无功电流；
- (3)产生不大的电流，电机输出超前的无功电流；
- (4)产生不大电流，电机输出纯有功电流。

0③

1 4、发电机和电网并联时，如发电机的频率 f 稍大于电网的频率 f_1 ，其它并联条件均已满足，此时合闸发电机将：

- (1)产生巨大电流，使发电机不能并联；
- (2)产生不太大的纯电容性电流；
- (3)产生不大的纯电感性电流；
- (4)产生不大的有功电流。

0④

1 5、要增加并联在电网上运行的发电机的稳定性，可以：

- (1)增加励磁电流；
- (2)减少励磁电流；
- (3)减少原动机输出功率；
- (4)增加原动机输出功率。

0①③

1 6、要增加并联在电网上运行的发电机的有功输出，可以：

- (1)增加励磁电流，使 E_0 增加；
- (2)减少励磁电流，使 E_0 减小；
- (3)增加原动机的功率输出，使功角增加；
- (4)减少原动机的功率输出，使功角减小。

0③

1 7、当正常励磁的同步发电机并联在电网上运行，如果因电网故障，电压突然下降了 20%，此发电机将向电网多输出一电流（励磁不变），此电流具有：

- (1)感性；
- (2)容性；
- (3)电阻性。

0①

1 8、一台同步发电机单独供给一电阻性负载，如保持转速不变，增加发电机的励磁电流，那么它将：

- (1)多输出感性电流；
- (2)多输出容性电流；
- (3)多输出有功电流；
- (4)少输出有功电流。

0③

1 9、一台同步电动机拖动负载运行，此时 $\cos \phi = 1$ ，若不改变励磁电流，使负载降为零，则电枢电流为：

- (1)感性电流（滞后于电压）；
- (2)容性电流（超前电压）；
- (3)零值。

0②

2 0、同步电动机在异步起动时，励磁绕组必须经一电阻短接，其原因是：

- (1)避免励磁绕组两端感应高压；
- (2)减少单轴转矩的影响，有利于起动过程；
- (3)励磁绕组中感应电流有利于拉入同步。

0①②

2 1、同步发电机直轴超瞬变电抗和交轴超瞬变电抗很小，其原因是：

- (1)磁路不饱和；
- (2)电枢磁通经过励磁绕组和阻尼绕组的漏磁路，增加了磁阻；
- (3)电枢磁通经过励磁绕组和阻尼绕组的漏磁路，所以减少了磁阻；
- (4)增加了励磁电流。

0②

2 2、三相磁阻式同步电动机，在正常负载下运行，从电网吸收的电流除有功分量外，还有：

- (1)感性电流；
- (2)容性电流；
- (3)不吸收无功电流。

0①

2 3、一台同步发电机作单机运行，供给一电阻电感负载，若改变其励磁电流，则此发电机输出的无功功率：

(1)改变； (2)不变； (3)不能判别。

0①

2 4、同步发电机为了能具有较大的过载能力使稳定性能好，希望短路比：

(1)较大； (2)较小； (3)与短路比无关。

0①

2 5、同步发电机当其电枢电流 I_a 超前空载电势 E_0 30° 时，其电枢反应的性质是：

(1)直轴去磁； (2)直轴增磁；
(3)交磁作用； (4)直轴去磁兼交磁；
(5)直轴增磁兼交磁。

0⑤

2 6、三相同步发电机在与电网并联时，必须满足一些条件，但首先必须绝对满足的条件是：

(1)电压相等； (2)频率相等； (3)相序相同。

0③

2 7、同步发电机和电网并联运行时，在下列那种情况下其稳定性较好：

(1)短路比较小； (2)欠励运行； (3)过励运行；
(4)重载运行； (5)轻载运行； (6)通过电抗器接至电网。

0③⑤

2 8、一台同步发电机单机运行时，所谓改变其负载就是：

(1)调节其负载阻抗； (2)调节其原动机的输出转矩；
(3)调节其励磁电流； (4)以上三种都要调节。

0④

2 9、加在同步发电机定子上的三相对称电压大小不变，定子电流比较大的是：

(1)取出转子； (2)转子在同步速下旋转，励磁绕组开路；
(3)转子在同步速下旋转，励磁绕组短路。

0①

3 0、有两台隐极式同步电机 A、B，气隙分别为 δ_1 和 δ_2 ，其它诸如绕组、磁路结构等都完全一样，已知 $\delta_1 = 2\delta_2$ ，现分别在两台电机上做短路试验，加同样大小的励磁电流，A 电机短路电流为 I_{kA} ，B 电机的短路电流为 I_{kB} ，此时：

(1) $I_{kA} = I_{kB}$ ； (2) $I_{kA} > I_{kB}$ ； (3) $I_{kA} < I_{kB}$ 。

0③

3 1、同步电机的空气隙要比和它容量相当的异步电机的空气隙：

①大一些； ②小一些； ③一样大。

0①

3 2、同步电机当电枢绕组匝数增加时，同步电抗将：

①增加； ②减小； ③不变。

0①

3 3、同步电机当铁芯饱和程度提高时，同步电抗将：

①增加； ②减小； ③不变。

0②

3 4、同步电机当气隙加大时，同步电抗将：

①增加； ②不变； ③减小。

0③

3 5、同步电机当励磁绕组匝数增加时，同步电抗将：

- ①增加； ②不变； ③减小。

0②

3 6、隐极同步发电机的电枢电流 I_a 落后于空载电势 E_0 30° 时间相位角，电枢旋转磁场与转子旋转磁场的空间相位角为：

- ① 30° ； ② 60° ； ③ 120° ； ④ 90° 。

0③

3 7、为改善远距离用户的功率因数，须添置一台调相机，此机应装在：

- ①发电厂内； ②用户附近。

0②

3 8、对同步电机电磁转矩最大值起主要影响的电抗是：

- ①定子绕组漏抗 X_s ； ②同步电抗 X_c ；
③直轴同步电抗 X_d 。

0②

3 9、一台旋转电枢式三相同步发电机，电枢以转速 n 逆时针方向旋转，对称负载运行时，电枢反应磁势相对定子上主磁极的转速为：

- ① n ； ②零； ③同步速 n_1 。

0②