



第1章 导论

1.1 电机和变压器的磁路常采用什么材料制成？这些材料各有哪些主要特性？

解：磁路：硅钢片。特点：导磁率高。

电路：紫铜线。特点：导电性能好，电阻损耗小。

电机：热轧硅钢片，永磁材料 $\left\{ \begin{array}{l} \text{铁氧体} \\ \text{稀土钴} \\ \text{钕铁硼} \end{array} \right.$

变压器：冷轧硅钢片。

1.2 磁滞损耗和涡流损耗是什么原因引起的？它们的大小与哪些因素有关？

解：磁滞损耗：铁磁材料在交变磁场作用下反复磁化，磁畴会不停转动，相互间产生摩擦，消耗能量，产生功率损耗。与磁场交变频率 f ，磁通密度 B ，材料，体积，厚度有关。

涡流损耗：由电磁感应定律，硅钢片中有围绕磁通呈涡旋状的感应电动势和电流产生叫涡流，涡流在其流通路径上的等效电阻中产生的损耗叫涡流损耗。与磁场交变频率 f ，磁通密度，材料，体积，厚度有关。

1.3 变压器电动势、运动电动势产生的原因有什么不同？其大小与哪些因素有关？

解：变压器电势：磁通随时间变化而在线圈中产生的感应电动势 $E = 4.44 f N \phi_m$ 。

运动电势：线圈与磁场间的相对运动而产生的 e_f 与磁密 B ，运动速度 v ，导体长度 l ，匝数 N 有关。

1.6 自感系数的大小与哪些因素有关？有两个匝数相等的线圈，一个绕在闭合铁心上，一个绕在木质材料上，哪一个自感系数大？哪一个自感系数是常数？哪一个自感系数是变数，随什么原因变化？

解：自感电势：由于电流本身随时间变化而在线圈内感应的电势叫自感电势。 $e_L = -\frac{d\Psi_L}{dt}$

对空心线圈： $\Psi_L = Li$ 所以 $e_L = -L \frac{di}{dt}$

自感： $L = \frac{\Psi_L}{i} = \frac{N\phi_L}{i} = \frac{N}{i} Ni \wedge_m = N^2 \wedge_m \wedge_m = \frac{\mu A}{l}$

所以， L 的大小与匝数平方、磁导率 μ 、磁路截面积 A 、磁路平均长度 l 有关。

闭合铁心 $\mu \gg \mu_0$ ，所以闭合铁心的自感系数远大于木质材料。因为 μ_0 是常数，所以木质材料的自感系数是常数，铁心材料的自感系数是随磁通密度而变化。

1.7 在图 1.30 中，若一次绕组外加正弦电压 u_1 、绕组电阻 R_1 、电流 i_1 时，问

- (1) 绕组内为什么会感应出电动势？
- (2) 标出磁通、一次绕组的自感电动势、二次绕组的互感电动势的正方向；
- (3) 写出一次侧电压平衡方程式；
- (4) 当电流 i_1 增加或减小时，分别标出两侧绕组的感应电动势的实际方向。

解：(1) $\because u_1$ 为正弦电压， \therefore 电流 i_1 也随时间变化，由 i_1 产生的磁通随时间变化，由电磁感应定律知 $e = -N \frac{d\Phi}{dt}$ 产生感应电动势。

(2) 磁通方向：右手螺旋定则，全电流定律 \mathcal{E}_1 方向：阻止线圈中磁链的变化，符合右手螺旋定则：四指指向电势方向，拇指为磁通方向。

$$(3) \mathcal{U}_1 = R_1 \dot{I}_1 + N_1 \frac{d\Phi}{dt}$$

(4) \dot{I}_1 增加, 如右图。 \dot{I}_1 减小

1.8 在图 1.30 中, 如果电流 I_1 在铁心中建立的磁通是 $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$, 二次绕组的匝数是 N_2 , 试求二次绕组内感应电动势有效值的计算公式, 并写出感应电动势与磁通量关系的复数表示式。

$$\text{解: (1)} E_2 = \sqrt{2}\pi f N_2 \Phi_m = \sqrt{2}\pi \frac{\omega}{2\pi} N_2 \Phi_m = \frac{\sqrt{2}}{2} \omega N_2 \Phi_m$$

$$(2) \dot{E}_2 = E_2 |90^\circ = -0.707 \omega N_2 \Phi_m |90^\circ$$

1.9 有一单匝矩形线圈与一无限长导体在同一平面上, 如图 1.31 所示, 试分别求出下列条件下线圈内的感应电动势:

(1) 导体中通以直流电流 I , 线圈以线速度 v 从左向右移动;

(2) 导体中通以电流 $i = I_m \sin \omega t$, 线圈不动;

(3) 导体中通以电流 $i = I_m \sin \omega t$, 线圈以线速度 v 从左向右移动。

解: 关键求磁通 $\Phi = BA$

$$(1) \because \Phi = b \int_{a+v t}^{a+c+v t} B_x dx \quad \therefore e_v = -b [B(a+c+v t) - B(a+v t)]v$$

$$B(a+c+v t) = \mu_0 H(a+c+v t) = \mu_0 \frac{I}{2\pi(a+c+v t)}$$

$$\therefore I = \oint H l = H(a+c+v t) \cdot 2\pi(a+c+v t)$$

同理 $a+v t$ 处的 B 值

$$B_{a+v t} = \mu_0 H_{(a+v t)} = \mu_0 \frac{I}{2\pi(a+v t)}$$

$$\therefore e = \frac{\mu_0 I b v}{2\pi} \left(\frac{1}{a+v t} - \frac{1}{a+c+v t} \right) = \frac{\mu_0 b I}{2\pi} \frac{vc}{(a+v t)(a+c+v t)}$$

(2) 只有变压器电势

$$e_T = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

$$\Phi = BA = b \int_a^{a+c} B_x dx \quad \oint H_x l = NI \quad N=1 \quad \therefore H_x \cdot 2\pi(a+c) = i$$

$$B_x = \mu_0 H \quad B_x = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{i}{a+x} = \frac{\mu_0}{2\pi} I_m \sin \omega t \frac{1}{a+x}$$

\therefore

$$\Phi = \frac{\mu_0 I_m b}{2\pi} \sin \omega t \int_a^{a+c} \frac{1}{a+x} dx = \frac{\mu_0 I_m b}{2\pi} \sin \omega t \ln(a+x) \Big|_{a}^{a+c} = \frac{\mu_0 b}{2\pi} I_m \sin \omega t \ln \frac{a+c}{a}$$

$$\therefore e_T = -\frac{\mu_0 b \omega}{2\pi} \ln \frac{a+c}{a} \cos \omega t$$

(3) 运动电势 e_v 变为:

$$e_v = \frac{\mu_0 b I_m}{2\pi} \frac{vc \sin \omega t}{(a+v t)(a+c+v t)} \quad (\text{把 (1) 中的 } I \text{ 用 } I_m \sin \omega t \text{ 代})$$

变压器电势变为:

$$\Phi = b \int_{a+\nu t}^{a+c+\nu t} B_x dt = \frac{\mu_0 I_m b}{2\pi} \sin \omega t \ln \frac{a+c+\nu t}{a+\nu t}$$

$$e_T = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{\mu_0 b \omega}{2\pi} \ln \frac{a+c+\nu t}{a+\nu t} \cos \omega t$$

$$\text{线圈中感应电势 } e = e_v + e_T$$

1.10 在图 1.32 所示的磁路中, 两个线圈都接在直流电源上, 已知 I_1 、 I_2 、 N_1 、 N_2 , 回答下列问题:

- (1) 总磁动势 F 是多少?
- (2) 若 I_2 反向, 总磁动势 F 又是多少?
- (3) 电流方向仍如图所示, 若在 a 、 b 出切开形成一空气隙 δ , 总磁动势 F 是多少? 此时铁心磁压降大还是空气隙磁压降大?
- (4) 在铁心截面积均匀和不计漏磁的情况下, 比较 (3) 中铁心和气隙中 B 、 H 的大小。
- (5) 比较 (1) 和 (3) 中两种情况下铁心中的 B 、 H 的大小。

(1) $F = N_1 I_1 - N_2 I_2$ 有右手螺旋定则判断可知, 两个磁势产生的磁通方向相反。

$$(2) F = N_1 I_1 + N_2 I_2$$

$$(3) \text{ 总的磁势不变仍为 } F = N_1 I_1 - N_2 I_2$$

$$\because \text{磁压降 } k_m \Phi \text{ 铁心 } R_m = \frac{1}{\mu A} \text{ 空气隙 } R_{m0} = \frac{\delta}{\mu_0 A}$$

$$\text{虽然 } 1 > \delta \text{ 但 } \because \mu \gg \mu_0 \quad \therefore R_m \ll R_{m0}$$

$$\therefore \text{空气隙的磁压降大}$$

$$(4) \because \text{忽略漏磁} \quad \therefore \Phi_{\delta} = \Phi_{Fe} \text{ 而截面积相等}$$

$$\therefore B_{\delta} = B_{Fe} \quad \because \mu_0 \ll \mu \quad \therefore H_{\delta} > H_{Fe}$$

$$(5) \because \text{第一种情况} \Phi_{(1)} \text{ 大} \quad \therefore B_{(1)} > B_{(3)}$$

$$\text{同理 } H_{(1)} > H_{(3)}$$

1. 9 一个带有气隙的铁心线圈 (参考图 1.14), 若线圈电阻为 R , 接到电压为 U 的直流电源上, 如果改变气隙的大小, 问铁心内的磁通 Φ 和线圈中的电流 I 将如何变化? 若线圈电阻可忽略不计, 但线圈接到电压有效值为 U 的工频交流电源上, 如果改变气隙大小, 问铁心内磁通和线圈中电流是否变化?

如气隙 δ 增大磁阻 R_m 增大, 如磁势不变, 则 Φ 减小

$$\because u = Ri + e = Ri + \frac{d\phi}{dt}$$

$$\therefore \Phi \text{ 在减小} \quad \therefore \frac{d\phi}{dt} < 0 \quad \therefore i \text{ 增大}$$

$$\text{接在交流电源上, 同上 直流电源: } \because \frac{d\phi}{dt} = 0 \quad \therefore i \text{ 不变}$$

但 Φ 仍然减小。

1. 10 一个有铁心的线圈, 电阻为 2Ω 。当将其接入 $110V$ 的交流电源时, 测得输入功率为 $90W$, 电流为 $2.5A$, 试求此铁心的铁心损耗。

电功率平衡可知 (或能量守恒), 输入的功率一部分消耗在线圈电阻上, 一部分为铁耗

$$\therefore P_{Fe} = P_{\lambda} - I^2 R = 90 - 2.5^2 \times 2 = 77.5 W$$

1. 11 对于图 1.14, 如果铁心用 D23 硅钢片叠成, 截面积 $A=12.25 \times 10^{-4} m^2$, 铁心的平均长度 $l=0.4 m$, 空气隙 $\delta=0.5 \times 10^{-3} m$ 绕组的匝数为 600 匝, 试求产生磁通 $\Phi=10.9 \times 10^{-4} Wb$ 时所需的励磁磁动势和励磁电流。

$$\text{磁密 } B = \frac{\Phi}{A} = \frac{10.9 \times 10^{-4}}{12.25 \times 10^{-4}} = 0.89(T)$$

查磁化曲线 $H_{Fe} = 299(A/m)$

$$\text{气隙: } H_{\delta} = 0.89 / 4\pi \times 10^{-7} = 7.08599 \times 10^{-5} (A/m)$$

$$\begin{aligned} \text{磁动势: } F &= H_{Fe}l + H_{\delta}\delta \\ &= 299 \times 0.4 + 7.08599 \times 10^5 \times 0.5 \times 10^{-3} \\ &= 473.9(A) \end{aligned}$$

$$\because F=NI \quad \therefore I=F / N=473.9 / 600=0.79(A)$$

1. 12 设 1. 11 题的励磁绕组的电阻为 120Ω , 接于 $110V$ 的直流电源上, 问铁心磁通是多少?

先求出磁势: \because 是直流电源 $\therefore \phi$ 不变, $e=-\frac{d\phi}{dt}=0$

$$\therefore I=\frac{U}{R}=\frac{110}{120} \quad \therefore F=NI=600 \times \frac{110}{120}=550(A)$$

然后根据误差进行迭代 设 $\phi'=12.56 \times 10^{-4} Wb$ 则

$$B_{Fe} = B_{\delta} = \Phi/A = 1(T)$$

$$\therefore H_{Fe} = 383(A/m) \quad H\delta = 1 / 4\pi \times 10^{-7}$$

$$\therefore H\delta = 1 / 4\pi \times 10^{-7}$$

\therefore

$$\begin{aligned} F' &= H_{Fe}l + H_{\delta}\delta = 383 \times 0.4 + 1 / 4\pi \times 10^{-7} \times 0.5 \times 10^{-3} \\ &= 551.3(A) \end{aligned}$$

$$\Delta F=551.3-550=1.3 \text{ 很小, } \therefore \text{假设正确}$$

1. 13 设 1. 12 题的励磁绕组的电阻可忽略不计, 接于 $50Hz$ 的正弦电压 $110V$ (有效值) 上, 问铁心磁通最大值是多少?

$$\because e=u \quad \therefore E=110V$$

$$E=4.44fN\Phi_m$$

$$\therefore \Phi_m = 11 / 4.44 \times 50 \times 600 = 8.258 \times 10^{-4} (Wb)$$

1. 14 图 1-4 中直流磁路由 D23 硅钢片叠成, 磁路各截面的净面积相等, 为 $A=2.5 \times 10^{-3} m^2$, 磁路平均长 $l_1=0.5 m$, $l_2=0.2 m$, $l_3=0.5 m$ (包括气隙 δ), $\delta=0.2 \times 10^{-2} m$ 。已知空气隙中的磁通量 $\Phi=4.6 \times 10^{-3} Wb$, 又 $N_2 I_2=10300 A$, 求另外两支路中的 Φ_1 、 Φ_2 及 $N_1 I_1$ 。

$$B_3 = \frac{\Phi}{A} = \frac{4.6 \times 10^{-3}}{2.5 \times 10^{-3}} = 1.84(T)$$

$$H_{\delta} = \frac{B_3}{u_0} = 1.84 / 4\pi \times 10^{-7} = 1.464968 \times 10^{-6} (A/m)$$

$$H_{Fe} = 14600(A/m) \text{ (查表得到的)}$$

由右侧回路可求:

$$\begin{aligned}
H_2 I_2 &= N_2 I_2 - (H_{Fe} I_3 + H_\delta \delta) \\
&= 10300 - (14600 \times 0.5 + 1.464968 \times 10^6 \times 0.2 \times 10^{-2}) \\
&= 10300 - (7300 + 2929.94) = 70A \\
\therefore H_2 &= 70/0.5 = 140 (\text{A/m}) \quad B_2 = 0.41(T) \\
\therefore \Phi_2 &= B_2 A = 0.41 \times 2.5 \times 10^{-3} = 1.025 \times 10^{-3} (\text{Wb}) \\
\Phi_1 &= \Phi_3 - \Phi_2 = (4.6 - 1.025) \times 10^{-3} = 3.575 \times 10^{-3} (\text{Wb}) \quad B_1 = \Phi_1 / A = 1.43(T) \\
H_1 &= 1420 (\text{A/m}) \\
\therefore N_1 &= H_1 I_1 - H_2 I_2 = 1420 \times 0.5 - 140 \times 0.2 = 640 (\text{A})
\end{aligned}$$

第二章 直流电机

2. 1 为什么直流发电机能发出直流电流？如果没有换向器，电机能不能发出直流电流？

换向器与电刷共同把电枢导体中的交流电流，“换向”成直流电，如果没有换向器，电机不能发出直流电。

2. 2 试判断下列情况下，电刷两端电压性质

- (1) 磁极固定，电刷与电枢同时旋转；
- (2) 电枢固定，电刷与磁极同时旋转。

(1) 交流 \because 电刷与电枢间相对静止， \therefore 电刷两端的电压性质与电枢的相同。

(2) 直流 电刷与磁极相对静止， \therefore 电刷总是引出某一极性下的电枢电压，而电枢不动，磁场方向不变 \therefore 是直流。

2. 3 在直流发电机中，为了把交流电动势转变成直流电压而采用了换向器装置；但在直流电动机中，加在电刷两端的电压已是直流电压，那么换向器有什么呢？

直流电动机中，换向法把电刷两端的直流电压转换为电枢内的交流电，以使电枢无论旋转到N极下，还是S极下，都能产生同一方向的电磁转矩

2. 4 直流电机结构的主要部件有哪几个？它们是用什么材料制成的，为什么？这些部件的功能是什么？

有7个 主磁极 换向极，机座 电刷 电枢铁心，电枢绕组，换向器 见备课笔记

2. 5 从原理上看，直流电机电枢绕组可以只有一个线圈做成，单实际的直流电机用很多线圈串联组成，为什么？是不是线圈愈多愈好？

一个线圈产生的直流脉动太大，且感应电势或电磁力太小，线圈愈多，脉动愈小，但线圈也不能太多，因为电枢铁心表面不能开太多的槽， \therefore 线圈太多，无处嵌放。

2. 6 何谓主磁通？何谓漏磁通？漏磁通的大小与哪些因素有关？

主磁通：从主极铁心经气隙，电枢，再经过相邻主极下的气隙和主极铁心，最后经定子绕组磁轭闭合，同时交链励磁绕组和电枢绕组，在电枢中感应电动势，实现机电能量转换。

漏磁通：有一小部分不穿过气隙进入电枢，而是经主极间的空气隙钉子磁轭闭合，不参与机电能量转换， Φ_δ 与饱和系数有关。

2. 7 什么是直流电机的磁化曲线？为什么电机的额定工作点一般设计在磁化曲线开始弯曲的所谓“膝点”附近？

磁化曲线： $\Phi_0 = f(F_0)$ Φ_0 -主磁通， F_0 -励磁磁动势

设计在低于“膝点”，则没有充分利用铁磁材料，即 同样的磁势产生较小的磁通 Φ_0 ，如交于“膝点”，则磁路饱和，浪费磁势，即使有较大的 F_0 ，若磁通 Φ_0 基本不变了，而我的需要是 Φ_0 （根据 E 和 I_m 公式）选在膝点附近好处：①材料利用较充分②可调性好③稳定性较好。

电机额定点选在不饱和段有两个缺点：①材料利用不充分②磁场容易受到励磁电流的干扰而不易稳定。

选在饱和点有三个缺点：①励磁功率大增②磁场调节困难③电枢反应敏感

2. 8 为什么直流电机的电枢绕组必须是闭合绕组？

直流电机电枢绕组是闭合的，为了换向的需要，如果不闭合，换向器旋转，电刷不动，无法保证正常换向。

2. 9 何谓电枢上的几何中性线？何谓换向器上的几何中性线？换向器上的几何中性线由

什么决定？它在实际电机中的位置在何处？

①电枢上几何中性线：相临两点极间的中性线

②换向器上几何中性线：电动势为零的元件所接两换向片间的中心线

③由元件结构决定，不对称元件：与电枢上的几何中性线重合。对称元件：与极轴轴线重合。

④实际电机中。

2. 10 单叠绕组与单波绕组在绕法上、节距上、并联支路数上的主要区别是什么？

绕法上：单叠：任意两个串联元件都是后一个叠在前一个上面 $y_k = 1$

单波：相临两串联元件对应边的距离约为 2τ 形成波浪型

节距上： $y_1 = \frac{Z_i}{2P} \pm \varepsilon$

$$y = \pm 1 \text{ (单叠)} \quad y = \frac{k+1}{P} = \frac{Z_i \pm 1}{P} \quad y_k = y$$

$$y_2 = y - y_1$$

并联支路数 $2a=2p$ (单叠) $2a=z$ (单波)

2. 11 直流发电机的感应电动势与哪些因素有关？若一台直流发电机的额定空载电动势是 230V，试问在下列情况下电动势的变化如何？

(1) 磁通减少 10%；

(2) 励磁电流减少 10%；

(3) 磁通不变，速度增加 20%；

(4) 磁通减少 10%，同时速度增加 20%。

$$\text{直发: } E = C_E \Phi n = \frac{PN_a}{60a} \Phi n$$

(1) ϕ 减少 10%，则 $\phi' = 0.9\phi$

$$\text{即 } \frac{E'}{E} = \frac{C_E \Phi n}{C_E \Phi' n} = \frac{1}{0.9} \quad \therefore E' = 0.9E = 0.9 \times 230 = 207(V)$$

(2) 励磁电流减少 10%，如果饱和，则 ϕ 不变， E 也不变，如没有饱和，则 ϕ 也减少 10%， $E' = 207(V)$

$$\therefore 207 < E < 230V$$

$$(3) \frac{E'}{E} = \frac{n'}{n} = \frac{n}{1.2n} \quad \therefore E' = 1.2E = 276(V)$$

$$(4) \frac{E'}{E} = \frac{\Phi n'}{\Phi n} = \frac{\Phi n}{0.9\Phi 1.2n}$$

$$E' = 0.9 \times 1.2 \times 230 = 2484(V)$$

2. 12 一台 4 极单叠绕组的直流电机，问：

(1) 如果取出相邻的两组电刷，只用剩下的另外两组电刷是否可以？对电机的性能有何影响？端电压有何变化？此时发电机能供给多大的负载（用额定功率的百分比表示）？

(2) 如有一元件断线，电刷间的电压有何变化？此时发电机能供给多大的负载？

(3) 若只用相对的两组电刷是否能够运行？

(4) 若有一极失磁，将会产生什么后果？

(1) 取出相临的两组电刷，电机能够工作，此时，电枢感应电动势不受影响，但电机容量会减小；设原来每条支路电流为 I ，4 条支路总电流为 $4I$ ，现在两条支路并联，一条支路

电阻为另一条支路的 3 倍，因此两条并联总电流为 $I + \frac{1}{3}I = \frac{4}{3}I$ ，现在电流与原来电流之比为

$\frac{4}{3} I$: $4I = \frac{1}{3}$ ，因此容量减为原来容量的 $\frac{1}{3}$

(2) 只有一个元件断线时，电动势不受影响，元件断线的那条支路为零，因此现在相当于三条支路并联，总电流为原来的 $\frac{3}{4}$

(3) 若只用相对的两组电刷，由于两路电刷间的电压为零，所以电机无法运行。

(4) 单叠：由于电刷不动，若有一磁极失磁，则有一条支路无电势， \therefore 电刷间无感应电动势，电机内部产生环流，电机不能运行。

2. 13 如果是单波绕组，问 2. 12 题的结果如何？

(1) 只用相邻两只电刷，电机能工作，对感应电势和电机容量均无影响，仅取一只电刷时，因仍是两条支路并联，所以电机还能工作，对电动势和电机容量均无影响。

(2) 一个元件断线，对电动势无影响，由于仅剩下一条支路有电流，电流为原来的 $\frac{1}{2}$ ，容量减为原来的 $\frac{1}{2}$

(3) 只用相对的两只电刷时，由于两只电刷为等电位，电压为零，因此电机无法运行。

(4) 单波失去一个磁极，感应电动势减小 $\frac{1}{2}$ ，容量减小 $\frac{1}{2}$ 且内部产生环流。

2. 14 何谓电枢反应？电枢反应对气隙磁场有何影响？直流发电机和直流电动机的电枢反应有哪些共同点？又有哪些主要区别？

电枢反应：电枢磁场对励磁磁场的作用

交轴电枢反应影响：① 物理中性线偏离几何中性线

② 发生畸变

③ 计及饱和时，交轴有去磁作用，

直轴可能去磁，也可能增磁。

④ 使支路中各元件上的感应电动势不均。

发电机：物理中性线顺电机旋转方向移过一个不大的 α 角

电动机：物理中性线逆电机旋转方向移过一个不大的 α 角

直轴电枢反应影响：电动机：电刷顺电枢转向偏移，助磁，反之去磁

2. 15 直流电机空载和负责运行时，气隙磁场各由什么磁动势建立？负载时电枢回路中的电动势应由什么样的磁通进行计算？

空载： B_δ 仅由励磁磁动势 $2N_f I_f$ 建立， $F_0 = 2I_f N_f$

负载：由 $2N_f I_f$ 和 Ax 共同建立： $F_0 + F_a$ 由每极合成磁通计算，即负载磁通计算， \therefore 负载时，导体切割的是负载磁通（即合成磁通）

2. 16 一台直流电动机，磁路是饱和的，当电机带负载以后，电刷逆着电枢旋转方向移动了一个角度，试问此时电枢反应对气隙磁场有什么影响？

电动机电刷逆电枢转向移动，直轴电枢反应去磁，交轴电枢反应总是去磁的

2. 17 直流电机有哪几种励磁方式？分别对不同励磁方式的发电机、电动机列出电流 I 、 I_a 、 I_f 的关系式。

四种励磁方式：他励，并励，串励，复励

电动机：他励： $I = I_a$

并励: $I = I_a + I_f$

串励: $I = I_a = I_f$

复励: $I = I_a + I_f = I_f$ 短复励

$I_a = I_f$, $I = I_a + I_f$ 长复励

发电机: 他励: $I = I_a$

并励: $I = I_a + I_f$

串励: $I = I_a = I_f$

复励: $I = I_a + I_f = I_f$ 短复励

2.18 如何判别直流电机是运行于发电机状态还是运行于电动机状态? 它们的 T_{em} 、 n 、 E 、 U 、 I_a 的方向有何不同? 能量转换关系如何?

如所受电磁力的方向与电枢转向相同即为电动机状态, 反之为发电机状态。

电动机: T_{em} 与 n 方向相同, 是驱动转矩, E_a 与 U 方向相反, 是反电动势, I_a 方向流向电枢, E_a 与 I_a 方向相反。 $E_a I_a = T_{em} \Omega$

只有输入电能, 克服反电势, 才能产生电枢电流, 进而产生电磁转矩。

发电机: T_{em} 与 n 方向相反, 是阻力转矩, E 与 U 方向相同, E_a 与 I_a 方向相同, 发出电功率, 为克服阻力转矩 T_{em} , 不断输入机械能, 才能维持发电机以转 n 旋转, 发出电能。

2.19 为什么电机的效率随输出功率不同而变化? 负载时直流电机中有哪些损耗? 是什么原因引起的? 为什么铁耗和机械损耗可看成是不变损耗?

\because 电机铜耗随输出功率变化, 所以效率随输出功率变化, 负载时有: 铜耗, 铁耗, 机械损耗。

铜耗: 电枢绕组铜耗和励磁绕组铜耗。 $I_a^2 R_a$, UI_f

铁耗: 交变磁场引起涡流损耗和磁滞损耗

机械能: 抽水, 电刷摩擦损耗

\because 铁耗和机械耗和附加损耗与负载电流无关 \therefore 认为是不变损耗

2.20 直流发电机中电枢绕组元件内的电动势和电流是交流的还是直流的? 若是交流的, 为什么计算稳态电动势 $E = U + I_a R_a$ 时不考虑元件的电感?

都是交流的

\because 通过电刷引出的感应电动势是直流, \therefore 不考虑元件电感

2.21 他励直流发电机由空载到额定负载, 端电压为什么会下降? 并励发电机与他励发电机相比, 哪一个的电压变化率大?

空载时: 他励发电机端电压 $U = E = C_e \Phi n$

负载时: $U = E - I_a R_a$ \therefore 电压下降

并励下降大， \because 随着电压下降， Φ 减小， $\therefore E_a$ 下降，端电压更加下降

2. 22 若把直流发电机的转速升高 20%，问在他励方式下运行和并励方式下运行时，哪一种运行方式下空载电压升高的较多？

空载电压 $U_0 \approx E = C_e \Phi n$ 他励时， n 升 20%， E 升 20%

并励时， $\because n$ 增加 $\therefore E$ 增加， I_f 增加， Φ 增加， $\therefore E$ 除 n 增大外， Φ 也增大， \therefore 并励时，空载电压升较多。

2. 23 并励发电机正转时能自励，反转时还能自励吗？

2. 24 要想改变并励电动机、串励电动机及复励电动机的旋转方向，应该怎样处理？

2. 25 并励电动机正在运行时励磁绕组突然断开，试问在电机有剩磁或没有剩磁的情况下有什么后果？若起动时就断了线又有何后果？

2. 26 一台正在运行的并励直流电动机，转速为 1450r/min。现将它停下来，用改变励磁绕组的极性来改变转向后（其它均未变），当电枢电流的大小与正转时相同时，发现转速为 1500r/min，试问这可能是什么原因引起的？

2. 27 对于一台并励直流电动机，如果电源电压和励磁电流保持不变，制动转矩为恒定值。试分析在电枢回路串入电阻 R_J 后，对电动机的电枢电流、转速、输入功率、铜耗、铁耗及效率有何影响？为什么？

2. 28 电磁换向理论是在什么基础上分析问题的？主要结论是什么？在研究真实换向过程应如何补充修正？

2. 29 换向元件在换向过程中可能出现哪些电动势？是什么原因引起的？它们对换向各有什么影响？

2. 30 换向极的作用是什么？它装在哪里？它的绕组怎么连接？如果将已调整好换向极的直流电机的换向极绕组的极性接反，那么运行时会出现什么现象？

2. 31 一台直流电机，轻载运行时换向良好，当带上额定负载时，后刷边出现火花。问应如何调整换向极下气隙或换向极绕组的匝数，才能改善换向？

2. 32 接在电网上运行的并励电动机，如用改变电枢端的极性来改变旋转方向，换向极绕组不改换，换向情况有没有变化？

2. 33 小容量 2 极直流电机，只装了一个换向极，是否会造成一电刷换向好另一电刷换向不好？

2. 34 没有换向极的直流电动机往往标明旋转方向，如果旋转方向反了会出现什么后果？如果将这台电动机改为发电机运行，又不改动电刷位置，问它的旋转方向是否与原来所标明的方向一样？

2. 35 环火是怎样引起的？补偿绕组的作用是什么？安置在哪里？如何连接？

2. 36 选择电刷时应考虑哪些因素？如果一台直流电机，原来采用碳-石墨电刷，额定负载时换向良好。后因电刷磨坏，改换成铜-石墨电刷，额定负载时电刷下火花很大，这是为什么？

2. 44 电机的冷却方式和通风系统有哪些种类？一台已制成的电机被加强冷却后，容量可否提高？

2. 45 已知某直流电动机铭牌数据如下：额定功率 $P_N = 75kW$ ，额定电压 $U_N = 220V$ ，额定转速 $n_N = 1500r/min$ ，额定效率 $\eta_N = 88.5\%$ 。试求该电机的额定电流。

$$\text{解: } P_1 = \frac{P_N}{\eta_N} = \frac{75000}{0.885} = 84.75 \times 10^3 W \quad I_N = \frac{P_1}{U_N} = 385.2 (A)$$

2. 46 已知直流发电机的额定功率 $P_N = 240kW$ ，额定电压 $U_N = 460V$ ，额定转速

$n_N = 600r/min$ ，试求电机的额定电流。

2. 47 一台直流发电机的数据: $2p = 6$, 总导体数 $N_a = 780$, 并联支路数 $2a = 6$, 运行角速度是 $\Omega = 40\pi rad/s$, 每极磁通 $\Phi = 0.0392Wb$ 。试计算

- (1) 发电机的感应电动势;
- (2) 当转速 $n = 900r/min$, 但磁通不变时发电机的感应电动势;
- (3) 当磁通变为 $0.0435Wb$, $n = 900r/min$ 时发电机的感应电动势。

解: (1) $C_E = \frac{PN_a}{60a} = \frac{3 \times 780}{60 \times 3} = 13$ $E = C_E \Phi n = C_E \Phi \frac{60\Omega}{2\pi}$
 $= 13 \times 0.0392 \times \frac{60 \times 40\pi}{2\pi} = 611.5V$

(2) $E = C_E \Phi n = 13 \times 0.0392 \times 900 = 458.6V$

(3) $E = 13 \times 0.0435 \times 900 = 509V$

2. 48 一台 4 极、 $82kW$ 、 $230V$ 、 $970r/min$ 的他励直流发电机, 如果每极的合成磁通等于空载额定转速下具有额定电压时每极的磁通, 试求当电机输出额定电流时的电磁转矩。

解: $I_N = \frac{P_N}{U_N} = \frac{82 \times 10^3}{230} = 356.52(A)$

$$E = C_E \Phi n_N = \frac{PN_a}{60a} \Phi U_N$$
$$T_{em} = C_T \Phi I_N = \frac{PN_a}{2\pi a} \Phi I_N$$
$$\therefore \frac{E}{T_{em}} = \frac{2\pi}{60} \frac{n_N}{I_N}$$
$$\therefore T_{em} = \frac{60I_N E}{2\pi n_N} = \frac{30 \times 356.52 \times 230}{2\pi \times 970} = 807.7 N \cdot m$$

2. 50 试计算下列绕组的节距 y_1 , y_2 , y 和 y_K , 绘制绕组展开图, 安放主极及电刷, 求并联支路对数。

- (1) 右行短距单叠绕组: $2p = 4$, $Z = S = 22$;
- (2) 右行整距单叠绕组: $2p = 4$, $Z = S = 20$;
- (3) 左行单波绕组: $2p = 4$, $Z = S = 19$;
- (4) 左行单波绕组: $2p = 4$, $Z = S = 21$ 。

2. 51 一台直流发电机, $2p = 4$, $2a = 2$, $S = 21$, 每元件匝数 $N_y = 3$, 当 $\Phi_0 = 1.825 \times 10^{-2} Wb$ 、 $n = 1500r/min$ 时试求正负刷间的电动势。

解: $N_a = 2N_y S = 2 \times 21 \times 3 = 126$

$$C_E = \frac{PN_a}{60a} = \frac{2 \times 126}{60 \times 1} = 8.4 \div 2 = 4.2$$

$$E = C_E \Phi n = \frac{8.4}{2} \times 1.825 \times 10^{-2} \times 1500 = 115V$$

2. 52 一台直流发电机 $2p = 8$, 当 $n = 600r/min$, 每极磁通 $\Phi = 4 \times 10^{-3} Wb$ 时, $E = 230V$, 试求:

- (1) 若为单叠绕组, 则电枢绕组应有多少导体?
- (2) 若为单波绕组, 则电枢绕组应有多少导体?

解: (1) $E = C_E \Phi n$ $\therefore C_E = \frac{E}{\Phi n} = \frac{230}{4 \times 10^{-3} \times 600} = 95.83$

$$C_E = \frac{PN_a}{60a} \quad \text{单叠 } a=4$$

$$\therefore N_a = \frac{60a}{P} C_E = \frac{60 \times 4}{4} \times 95.83 = 5750 \text{ 根}$$

(2) 单波: $a=1$

$$N_a = \frac{60 \times 1}{4} \times 95.83 = 1438 \text{ 根}$$

2. 53 一台直流电机, $2p=4$, $S=120$, 每元件电阻为 0.2Ω , 当转速 $n=1000r/\text{min}$ 时, 每元件的平均电动势为 10V 。问当电枢绕组为单叠或单波时, 电枢端的电压和电枢绕组的电阻 R_a 各为多少?

解: 单叠绕组: 每支路元件数: $\frac{120}{4} = 30$

\therefore 电刷端电压 $U=30 \times 10=300\text{V}$

电枢绕组电阻 $R_a = \frac{0.2 \times 30}{4} = 1.5\Omega$ 单波绕组: 每支路元件数:

$\frac{120}{2} = 60$ 电刷端电压: $U=10 \times 60=600\text{V}$

电枢绕组电阻: $R_a = \frac{0.2 \times 60}{2} = 6\Omega$

2. 54 一台 2 极发电机, 空载时每极磁通为 0.3Wb , 每极励磁磁动势为 3000A 。现设电枢圆周上共有电流 8400A 并作均匀分布, 已知电枢外径为 0.42m 。若电刷自几何中性线前移 20° 机械角度, 试求:

(1) 每极的交轴电枢磁动势和直轴电枢磁动势各为多少?

(2) 当略去交轴电枢反应的去磁作用和假定磁路不饱和时, 试求每极的净有磁动势及每极下的合成磁通。

2. 55 有一直流发电机, $2p=4$, $S=95$, 每个元件的串联匝数 $N_y=3$, $D_a=0.162\text{m}$,

$I_N=36\text{A}$, $a=1$, 电刷在几何中性线上, 试计算额定负载时的线负荷 A 及交轴电枢磁动势 F_{aq} 。

2. 56 一台并励直流发电机, $P_N=26\text{kW}$, $U_N=230\text{V}$, $n_N=960r/\text{min}$, $2p=4$, 单波绕组, 电枢导体总数 $N_a=444$ 根, 额定励磁电流 $I_{fN}=2.592\text{A}$, 空载额定电压时的磁通 $\Phi_0=0.0174\text{Wb}$ 。电刷安放在几何中性线上, 忽略交轴电枢反应的去磁作用, 试求额定负载时的电磁转矩及电磁功率。

$$\text{解: } C_T = \frac{PN}{2\pi a} = \frac{26 \times 444}{2 \times \pi \times 1} = 141.4 \quad T_{em} = C_T \Phi I_a$$

$$I_N = \frac{P_N}{U_N} = \frac{26 \times 10^{-3}}{230} = 113.043(\text{A})$$

$$\therefore T_{em} = 141.4 \times 0.0174 \times 113.043 = 284.5(\text{N} \cdot \text{m})$$

$$I_a = I_N + I_{fN} = 113.043 + 2.592 = 115.64(\text{A})$$

$$\Omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{2\pi \times 960}{60} = 100.48 \text{ rad/s}$$

$$P_{em} = T_{em} \cdot \Omega = 284.5 \times 100.48 = 28.59\text{kW}$$

2. 57 一台并励直流发电机, $P_N=19\text{kW}$, $U_N=230\text{V}$, $n_N=1450r/\text{min}$, 电枢电路各绕组总电阻 $r_a=0.183\Omega$, $2\Delta U_b=2\text{V}$, 励磁绕组每极匝数 $N_f=880$ 匝, $I_{fN}=2.79\text{A}$, 励磁绕组电阻 $R_f=81.1\Omega$ 。当转速为 $1450r/\text{min}$ 时, 测得电机的空载特性如下表:

U_0/V	44	104	160	210	230	248	276
I_f/A	0. 37	0. 91	1. 45	2. 00	2. 23	2. 51	3. 35

试求: (1) 欲使空载产生额定电压, 励磁回路应串入多大电阻?

(2) 电机的电压调整率 ΔU :

(3) 在额定运行情况下电枢反应的等效去磁磁动势 F_{fa} 。

2. 59 一台 4 极并励电动机, $P_N = 14kW$, $U_N = 220V$, $r_a = 0.0814\Omega$, $2\Delta U_b = 2V$, 主极绕组每极 2800 匝, 总励磁电阻 $R_f = 248\Omega$ 。电机在 $1800r/min$ 时的空载特性如下:

I _f /A	0. 2	0. 3	0. 4	0. 5	0. 6	0. 7	0. 8	0. 9	1. 0
U ₀ /V	75	110	140	168	188	204	218	231	240

当额定负载时, 电枢电流为 76A, 此时电枢反应的去磁磁动势用并励绕组的电流表示时为 $0.1A$, 试求:

(1) 额定负载下的转速;

(2) 若在此电机中的每个主极装设 3.5 匝的串励绕组 (积复励或差复励两种情况), 这时电枢电路的总电阻 $r_a = 0.089\Omega$, 试求额定负载下的转速。`

2. 60 两台完全相同的并励直流电机, 机械上用同一轴联在一起, 并联于 230V 的电网上运行, 轴上不带其它负载。在 $1000r/min$ 时空载特性如下:

I _f /A	1. 3	1. 4
U ₀ /V	186. 7	195. 9

现在, 电机甲的励磁电流为 $1.4A$, 电机乙的为 $1.3A$, 转速为 $1200r/min$, 电枢回路总电阻 (包括电刷接触电阻) 均为 0.1Ω , 若忽略电枢反应的影响, 试问:

(1) 哪一台是发电机? 哪一台为电动机?

(2) 总的机械损耗和铁耗是多少

(3) 只调节励磁电流能否改变两机的运行状态 (保持转速不变)?

(4) 是否可以在 $1200r/min$ 时两台电机都从电网吸取功率或向电网送出功率?

解: (1) ∵ 甲台电机在 $1000r/min$ 时的电动势为 $195.9V$,

乙台电机在 $1000r/min$ 时的电动势为 $186.7V$,

∴ 甲台电机在 $1200r/min$ 时电动势

$$E_{\text{甲}} = 195.9 \times \frac{1200}{1000} = 235(V) \quad (\because \frac{E_{\text{甲}}}{E_0} = \frac{n}{n_0})$$

乙台电机在 $1200r/min$ 时电动势:

$$E_{\text{乙}} = 186.7 \times \frac{1200}{1000} = 224(V) \quad E_{\text{甲}} > 230V \quad E_{\text{乙}} < 230V$$

∴ 甲为发电机, 乙为电动机。

$$(2) \text{ 电动机: } P_{emn} - P_{om} = P_{2m}$$

$$\text{发电机: } P_2 - P_{oG} = P_{emG}$$

∴ 两台电机总的机械耗和铁耗为:

$$P_{om} - P_{oG} = P_{emM} - P_{emG}$$

$$\text{电动机: } I_{aM} = \frac{U - E_M}{R_a} = \frac{230 - 224}{0.1} = 60(A)$$

$$P_{emM} = E_M I_{aM} = 224 \times 60 = 13440(W)$$

$$\text{发电机: } I_{aG} = \frac{E_G - U}{R_a} = \frac{235 - 220}{0.1} = 50(A)$$

$$P_{emG} = E_G I_{aG} = 235 \times 50 = 11750(W) \text{ 总的机械耗和铁耗:}$$

$$P_{emo} - P_{emG} = 13440 - 11750 = 1690(W)$$

(3) 要改变两台电机运行状态并保持转速不变, 应减小甲台电机的励磁电流, 同时增加乙台电机的励磁电流, 当两台电机的励磁电流相同时, 两台电机都是电动机, 最后乙为发电机。

甲为电动机。

(4)都可以通过从电网吸收电功率成为电动机，但不能都成为发电机，因为没有原动机，即没有输入机械能，无法输出电能。

2. 61 一直流电机并联于 $U=220V$ 电网上运行，已知 $\alpha=1$ ， $p=2$ ， $N_a=398$ 根， $n_N=1500r/min$ ， $\Phi=0.0103Wb$ ，电枢回路总电阻（包括电刷接触电阻） $R_a=0.17\Omega$ ， $I_N=1.83A$ ， $P_{Fe}=276W$ ， $P_{mec}=379W$ ，杂散损耗 $P_{ad}=0.86P_1\%$ ，试问：此直流电机是发电机还是电动机运行？计算电磁转矩 T_{em} 和效率。

$$\text{解：(1)} \quad E = C_E \Phi n = \frac{PN_a}{60\alpha} \Phi n = \frac{2 \times 398}{60 \times 1} \times 0.0103 \times 1500 = 205 \text{ (V)} < 220V$$

∴总电动机运行。

$$(2) \quad I_a = \frac{U-E}{R_a} = \frac{220-205}{0.17} = 88.24(A)$$

$$\therefore T_{em} = C_T \Phi I_a = \frac{PN_a}{2\pi\alpha} \Phi I_a = \frac{2 \times 398}{2\pi \times 1} \times 0.0103 \times 88.24 = 115.15(N \cdot m)$$

$$(3) \quad I = I_a + I_f = 88.24 + 1.83 = 90.07(A)$$

$$P_1 = UI = 220 \times 90.07 = 19815.4(W)$$

$$P_2 = P_M - P_{Fe} - P_{mec} - P_{ad} = EI_a - (P_{Fe} + P_{mec} + P_{ad}) = 205 \times 88.24 - 276 - 379 - 0.86 \times \frac{19815.4}{100} = 17263.79(W)$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \frac{17263.79}{19815.4} \times 100\% = 87.12\% \text{ 或者：}$$

$$P_{cua} = I_a^2 R_a = 88.24^2 \times 0.17 = 1323.67(W)$$

$$P_{cuf} = I_f U = 1.83 \times 220 = 402.6(W)$$

$$P_{ad} = 0.86\% \times 19815.4 = 170.41(W)$$

$$P_2 = P_1 - \sum P = 19815.4 - P_{cua} - P_{cuf} - P_{Fe} - P_{mec} - P_{ad} = 17263.7(W)$$

2. 62 一台 $15kW$ 、 $220V$ 的并励电动机，额定效率 $\eta_N=85.3\%$ ，电枢回路的总电阻（包括电刷接触电阻） $R_a=0.2\Omega$ ，并励回路电阻 $R_f=44\Omega$ 。今欲使起动电流限制为额定电流的 1.5 倍，试求起动变阻器电阻应为多少？若起动时不接起动电阻则起动电流为额定电流的多少倍？

2. 63 一台并励电动机， $P_N=5.5kW$ ， $U_N=110V$ ， $I_N=58A$ ， $n_N=1470r/min$ ， $R_f=138\Omega$ ， $R_a=0.15\Omega$ （包括电刷接触电阻）。在额定负载时突然在电枢回路中串入 0.5Ω 电阻，若不计电枢回路中的电感和略去电枢反应的影响，试计算此瞬间的下列项目：

(1) 电枢反电动势；

(2) 电枢电流；

(3) 电磁转矩；

(4) 若总制动转矩不变，求达到稳定状态的转速。

$$(1) \quad I_f = \frac{U_f}{R_f} = \frac{U_N}{R_f} = \frac{110}{138} = 0.797(A)$$

$$I_{aN} = I_N - I_f = 58 - 0.797 = 57.2(A)$$

$\therefore E_N = U_N - I_{aN} R_a = 110 - 57.2 \times 0.15 = 101.42V$ 在电枢串入电阻的瞬间， Φ 和 n

不变, \therefore 电动势不变 $\therefore E' = 101.42(V)$

$\therefore I_f$ 不变, $\therefore \Phi$ 不变, 由于惯性, n 不变 (加讲串电阻调速过程)

$$(2) I_a' = \frac{U - E'}{R_a + R_\Omega} = \frac{110 - 101.42}{0.15 + 0.5} = 13.2(A)$$

$$(3) \frac{T_{em}'}{T_{em}} = \frac{C_E \Phi I_a'}{C_E \Phi I_a} = \frac{I_a'}{I_a} \quad \therefore T_{em}' = T_{em} \cdot \frac{I_a'}{I_a} \quad T_{em} = 9.55 C_E \Phi I_a$$

或者: $\therefore C_E \Phi$ 不变

$$T_{em}' = 9.55 C_E \Phi I_a' = 9.55 \cdot \frac{E_N}{n_N} I_a' = 9.55 \times \frac{101.4}{1470} \times 13.2 = 8.7(N \cdot m)$$

(4) \therefore 总制动转矩不变, $\therefore T_{em}$ 不变。

\therefore 电枢电流 $I_a = 57.2(A)$ 不变

$$\therefore E = U - I_a (R_a + R_\Omega) = 110 - 57.2 \times (0.15 + 0.5) = 72.82(V)$$

$$\therefore \frac{E_N}{E} = \frac{n_N}{n} \quad \therefore n = n_N \frac{E}{E_N} = 1470 \times \frac{72.82}{101.42} = 1055.5(r/min)$$

2.64 并励电动机的 $P_N = 96kW$, $U_N = 440V$, $I_N = 255A$, $I_{fN} = 5A$, $n_N = 500r/min$ 。

已知电枢电阻为 0.078Ω , 试求:

- (1) 电动机的额定输出转矩;
- (2) 在额定电流时的电磁转矩;
- (3) 电机的空载转速;
- (4) 在总制动转矩不变的情况下, 当电枢回路串入 0.1Ω 电阻后的稳定转速。

$$\text{解: (1)} \quad T_{2n} = \frac{P_2}{\Omega_N} = \frac{96 \times 10^3 \times 60}{2\pi \times 500} = 1833.5(N \cdot m)$$

$$(2) \quad E_{aN} = U - I_a R_a = 440 - 250 \times 0.078 = 420.5(V)$$

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega_N} = \frac{E_{aN} I_{aN}}{\Omega_N} = \frac{420.5 \times 250 \times 60}{2\pi \times 500} = 2007.74(N \cdot m)$$

$$I_{aN} = I_N - I_f = 255 - 5 = 250(A)$$

$$(3) \quad C_E \Phi = \frac{E_{aN}}{n_N} = \frac{420.5}{500} = 0.841 = 523.2(r/min)$$

$$\text{空载转速 } n_0 = \frac{U}{C_E \Phi} = \frac{440 \times 500}{420.5} = 523.2(r/min)$$

(4) 总制动转矩不变, T_{em} 不变, $I_\infty = I_{aN} = 250A$

$$E_\infty = U_N - I_\infty (R_a + R_j) = 440 - 250 \times 0.178 = 395.5(V)$$

$$\therefore n_\infty = \frac{E_\infty}{E_N} n_N = \frac{395.5}{420.5} \times 500 = 470.3(r/min)$$

2. 65 一台并励电动机, $P_N = 7.2kW$, $U_N = 110V$, $n_N = 900r/min$, $\eta_N = 85\%$,

$R_a = 0.08\Omega$ (包括电刷接触电阻), $I_{fN} = 2A$ 。若总制动转矩不变, 在电枢回路串入一电阻使转速降低到 $450r/min$, 试求串入电阻的数值、输出功率和效率 (假设 $P_0 \propto n$)。

$$\text{解: } I_N = \frac{P_2}{U_N} = \frac{P_N}{\eta_N U_N} = \frac{7.2 \times 10^3}{0.85 \times 110} = 77(A)$$

$$E_{aN} = U_N - I_{aN} R_a = 110 - (77 - 2) \times 0.08 = 104(V)$$

$$(1) \quad C_E \Phi = \frac{E_{aN}}{n_N} = \frac{104}{900} = 0.1156 \quad E_a' = C_E \Phi n' = U_N - I_{aN} (R_a + R_j) \text{ 即}$$

0. $1156 \times 450 = 110 - 75 \times (0.08 + R_f)$ 求解得 $R_f = 0.693 \Omega$

2. 66 串励电动机 $U_N = 220V$, $I_N = 40A$, $n_N = 1000r/min$, 电枢回路各绕组电阻 $r_a = 0.5\Omega$, 一对电刷接触压降 $2\Delta U_b = 2V$ 。若制动总转矩为额定值, 外施电压减到 150V, 试求此时电枢电流 I_a 及转速 n (假设电机不饱和)。

解: (1) ∵是串励 ∴ $I_a = I_f$ 又 ∵ 总制动转矩保持为额定值

$$\therefore T_{em} = T_{em} \quad T_{em} = C_T \Phi I_a = C_T k_f I_a^2 \quad C_T k_f \text{ 为常数,}$$

$$\therefore I_a = I_a = 40(A)$$

$$(2) E_N = U_N - I_N r_a - 2\Delta U_b = 220 - 40 \times 0.5 - 2 = 198(V)$$

$$E = U - I_a r_a - 2\Delta U_b = 150 - 40 \times 0.5 - 2 = 128(V)$$

$$\frac{E_N}{E} = \frac{n_N}{n} \text{ (条件 } I_a \text{ 不变) 否则: } \frac{E_N}{E} = \frac{I_a n_N}{T_a n}$$

$$\therefore n = n_N \frac{E}{E_N} = 1000 \times \frac{128}{198} = 646.5(r/min)$$

2. 67 某串励电动机, $P_N = 14.7kW$, $U_N = 220V$, $I_N = 78.5A$, $n_N = 585r/min$, $R_a = 0.26\Omega$ (包括电刷接触电阻), 欲在负载制动转矩不变条件下把转速降到 350r/min, 需串入多大电阻?

$$\text{解: } E = U - I_N R_a = 220 - 78.5 \times 0.26 = 199.59(V)$$

∴ 总制动转矩不变 ∴ I_a 不变, ∴ Φ 不变

$$\therefore \frac{E}{E} = \frac{C_E \Phi n}{C_E \Phi n} = \frac{n}{n}$$

$$\therefore E = E \frac{n}{n} = 199.59 \times \frac{350}{585} = 119.41(V)$$

$$R_\Omega = \frac{U - E}{I_a} - R_a = \frac{220 - 119.41}{78.5} - 0.26 = 1.021(\Omega)$$

2. 68 已知他励直流电动机 $P_N = 12kW$, $U_N = 220V$, $I_N = 62A$, $n_N = 1340r/min$, $R_a = 0.25\Omega$, 试求:

(1) 拖动额定负载在电动机状态下运行时, 采用电源反接制动, 允许的最大制动力矩为 $2T_N$, 那么此时应串入的制动电阻为多大?

(2) 电源反接后转速下降到 $0.2n_N$ 时, 再切换到能耗制动, 使其准确停车。当允许的最大力矩也为 $2T_N$ 时, 应串入的制动电阻为多大?

2. 69 一台并励电动机, $P_N = 10kW$, $U_N = 220V$, $n_N = 1500r/min$, $\eta_N = 84.5\%$, $I_{fN} = 1.178A$, $R_a = 0.354\Omega$, 试求下列制动方式制动时, 进入制动状态瞬间的电枢回路的损耗和电磁制动转矩。

(1) 电动机在恒转矩负载在额定状态下运行时, 电枢回路串电阻使转速下降到 $n = 200r/min$ 时稳定运行, 然后采用反接制动;

(2) 采用能耗制动, 制动前的运行状态同 (1);

(3) 电动机带位能性负载作回馈制动运行, 当 $n = 2000r/min$ 时。

第三章 变压器

3. 1 变压器有哪几个主要部件？各部件的功能是什么？

变压器的主要部件：

铁心：磁路，包括芯柱和铁轭两部分

绕组：电路

油箱：加强散热，提高绝缘强度

套管：使高压引线和接地的油箱绝缘

3. 2 变压器铁心的作用是什么？为什么要用厚 0.35mm、表面涂绝缘漆的硅钢片制造铁心？

变压器铁心的作用是磁路。铁心中交变的磁通会在铁心中引起铁耗，用涂绝缘漆的薄硅钢片叠成铁心，可以大大减小铁耗。

3. 3 为什么变压器的铁心和绕组通常浸在变压器油中？

因变压器油绝缘性质比空气好，所以将铁心和绕组浸在变压器油中可加强散热和提高绝缘强度。

3. 4 变压器有哪些主要额定值？一次、二次侧额定电压的含义是什么？

额定值 $I_{1N}, I_{2N}, U_{1N}, U_{2N}, S_N, f_N$

U_{1N} ：一次绕组端子间电压保证值

U_{2N} ：空载时，一次侧加额定电压，二次侧测量得到的电压

3. 5 变压器中主磁通与漏磁通的作用有什么不同？在等效电路中是怎样反映它们的作用的？

主磁通：同时交链一次，二次绕组，但是能量从一次侧传递到二侧的媒介，使 $E_1/E_2 = N_1/N_2 = k$ ，实现变压功能

漏磁通：只交链自身绕组，作用是在绕组电路中产生电压降，负载时影响主磁通， E_1 和二次电压 U_2 的变化，以及限制二次绕组短路时短路电流的大小，在等效电路中用 Z_m 反应磁通的作用，用 $x_{1\delta}, x_{2\delta}$ 反应漏磁通的作用

3. 6 电抗 $X_{1\sigma}$ 、 X_k 、 X_m 的物理概念如何？它们的数据在空载试验、短路试验及正常负载运行时是否相等？为什么定量计算可认为 Z_k 和 Z_m 是不变的？ Z_k^* 的大小对变压器的运行性能有什么影响？在类变压器 Z_k^* 的范围如何？

$x_{1\delta}$ ：对应一次绕组的漏磁通，磁路的磁阻很大，因此 $x_{1\delta}$ 很小，因为空气的磁导率为常数，

$\therefore x_{1\delta}$ 为常数

$x_k = x_{1\delta} + x_{2\delta}$ 叫短路电抗

x_m : 对应于主磁通, 主磁通所走的磁路是闭合铁心, 其磁阻很小, 而电抗与磁阻成反比, 因此

x_m 很大. 另外, 铁心的磁导率不是常数, 它随磁通密度的增加而变小, 磁阻与磁导率成反比, 所以励磁电抗和铁心磁导率成正比

由于短路时电压低, 主磁通小, 而 负载试验时加额定电压, 主磁通大, 所以短路试验时 x_m 比空载试验时的 x_m 大. 正常负载运行时加额定电压, 所以主磁通和空载试验时基本相同, 即负载运行时的励磁电抗与空载试验时基本相等, $x_{1\delta}, x_k$ 在空载试验, 断路试验和负载运行时, 数值相等,

$Z_k = \frac{U_k}{I_k}$ 叫短路阻抗 $Z_k = R_k + jX_k = (R_1 + R_2) + j(x_{1\delta} + x_{2\delta})$ 是常数 \therefore 不变 (R_1, R_2 随温度变化)

$$Z_m = \frac{E_1}{I_0} = \frac{4.44 \sqrt{N_1} \Phi_m}{\sqrt{2} I_0 N_1} = \frac{2 \pi f N_1^2}{R_m}$$
 (见背面)

3. 7 为了得到正弦感应电动势, 当铁心不饱和与饱和时, 空载电流应各呈何种波形? 为什么?

铁心不饱和时, 空载电流 Φ 与 I_0 成正比, 如感应电势成正弦, 则 Φ 也为正弦变化, $\therefore i_0$ 也为正弦

铁心饱和时: i_0 为尖顶波, 见 P_{123} 图 3.8

3. 8 试说明磁动势平衡的概念及其在分析变压器中的作用?

一次电流 \dot{I}_1 产生的磁动势 \dot{F}_1 和二次电流 \dot{I}_2 产生的磁动势 \dot{F}_2 共同作用在磁路上, 等于磁通乘磁阻, 即 $\dot{F}_1 + \dot{F}_2 = \dot{\Phi}_m R_m \alpha$

其中 α 是考虑铁心的磁滞和涡流损耗时磁动势超前磁通的一个小角度, 实际铁心的 R_m 很小, 而 $R_m \approx 0$, 则 $\dot{F}_1 + \dot{F}_2 = 0$, 即 $\dot{F}_1 = -\dot{F}_2$ 这就叫磁动势平衡, 即一二次磁动势相量的大小相等, 方向相反, 二次电流增大时, 一次电流随之增大.

当仅考虑数量关系时, 有 $N_1 I_1 = N_2 I_2$ 即 $k I_1 = I_2$ 或 $I_1 = \frac{I_2}{k}$

\therefore 利用磁动势平衡的概念来定性分析变压器运行时, 可立即得出结论, 一, 二次电流之比和它们的匝数成反比.

3. 9 为什么变压器的空载损耗可以近似地看成是铁耗，短路损耗可以近似地看成是铜耗？
负载时变压器真正的铁耗和铜耗与空载损耗和短路损耗有无差别，为什么？

解： $P_0 \approx P_{Fe}$ ∵空载损耗 $P_0 = mI_0^2 R_1 + P_{Fe}$ 空载时 I_0 很小， \therefore

$mI_0^2 R_1$ 可忽略 $\therefore P_0 \approx P_{Fe}$

$P_k \approx P_{cu}$ ∵ $P_k = P_{cu} + P_{Fe}$ ∵短路试验时外施电压 U_k 很小，

$\therefore \Phi$ 很小， I_0 很小 \therefore 铁耗很小，可忽略铁耗， $P_k \approx P_{cu}$

负载时 P_{Fe} ：与空载时无差别，这是因为当 f 不变时， $P_{Fe} \propto B^2 \propto \Phi^2 \propto E^2 \propto U^2$ 负载与空载时一次绕组侧施加的电压基本不变， $\therefore P_{Fe}$ 基本不变，则不变损耗，严格说，空载时，漏抗压降大 \therefore 磁密略低，铁耗略少些

P_{cu} ：如果是同一电流，则无差别。如果考虑到短路损耗包含少量的铁耗的话，负载真正的铜耗比短路时略小。

3. 10 变压器的其它条件不变，仅将一、二次绕组匝数变化 $\pm 10\%$ ，对 $X_{1\sigma}$ ， 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？

解：①一、二次绕组匝数变比 $\pm 10\%$ 。

$X_{1\delta}$ ：如 $N'_1 = N_1 + 10\% = 1.1 N_1$ $\therefore X_{1\delta} = \omega N_1^2 \Lambda_{1\delta}$ $\Lambda_{1\delta}$ —漏磁路的漏磁导，为常数

$\therefore X'_{1\delta} = 1.1^2 X_{1\delta} = 1.21 X_{1\delta}$ 即 $X_{1\delta}$ 增加 21%

如 $N'_1 = N_1 - 10\% = 0.9 N_1$ 则 $X'_{1\delta} = 0.9^2 X_{1\delta} = 0.811 X_{1\delta}$ 即 $X_{1\delta}$ 减少 19% ，二次绕组匝数变化对 $X_{1\delta}$ 无影响

X_m ： $X_m = 2\pi f \mathcal{L}_m = 2\pi f N_1^2 \Lambda_m = 2\pi f N_1^2 \frac{\mu A}{l}$ N_1 增加， I_0 减少 \therefore u 增大 $\therefore X_m < -19\%$ 。

②外施电压变比 $\pm 10\%$ ， $X_{1\delta}$ 不变，

$U \approx E_1$ 由磁化曲线知， I_0 比 Φ_m 变化快 $\therefore \Phi \propto U \therefore U \uparrow I_0 \downarrow X_m \uparrow$

③ $X_{1\delta}$ ： $X_{1\delta} = 2\pi f N_1^2 \Lambda_{1\delta}$ $\Lambda_{1\delta}$ 为漏磁路的漏磁导 $\therefore \Lambda_{1\delta}$ 为常数

$\therefore f$ 变化 $\pm 10\%$ ， $X_{1\delta}$ 变化 $\pm 10\%$ 。

x_m : x_m 除与 f 成正比外, 还与 U_{Fe} 成正比

$$\therefore E = 4.44 f N \Phi \quad \therefore f \text{ 变化} \pm 10\%, E \text{ 不变}$$

$$\therefore \Phi \text{ 变化} \pm 10\%,$$

如 f 增加 10%, 则 Φ 减小 10%, U_{Fe} 增大, $\therefore x_m$ 的增加大于 10%。

f 减小 10%, 则 Φ 增加 10%, U_{Fe} 减小, $\therefore x_m$ 的减小小于 10%。

3. 11 分析变压器有哪几种方法? 它们之间有无联系? 为什么?

解: 分析变压器有三种方法: 基本方程式, 等效电路和相量图, 三者有联系, 他们的物理本质是一样, 都反映了变压器内部的电磁关系, 在进行定量计算时, 宜采用等效电路和方程式, 定性的给各物理量间关系时, 可用相量图。

3. 12 一台变压器, 原设计的额定频率为 50Hz, 现将它接到 60Hz 的电网上运行, 额定电压不变, 试问对励磁电流、铁耗、漏抗、电压变化率等有何影响?

解: f 由 50 Hz 变为 60 Hz, 额定电压不变。

$$\textcircled{1} U_1 \approx E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m \quad f \text{ 变为原来的 } \frac{6}{5}, \text{ 则 } \Phi_m \text{ 变为原来的 } \frac{5}{6}$$

\therefore 励磁电流减小, 即 $I_0 \downarrow$, I_0 为原来的 $\frac{5}{6}$

$$\textcircled{2} P_{Fe} = P_{Fe} \left(\frac{f}{50} \right)^\beta B_m \quad \beta = 1.2 \sim 1.6$$

虽然频率变为原来的 $\frac{6}{5}$ 倍, 但频率的 1.6 次方与铁耗成正比

但 Φ_m 减小 $\frac{5}{6}$ 倍, $\therefore B_m$ 减小 $\frac{5}{6}$ 倍, 但 B_m 的平方与 P_{Fe} 成正比

\therefore 最终仍是铁耗减小, 即 $P_{Fe} \downarrow$

$$\textcircled{3} \text{ 励磁电抗 } x_m = 2\pi f N_1^2 \Lambda_m = 2\pi f N_1^2 \frac{\mu A}{l} \quad f \uparrow, \text{ 饱和程度降低, } \mu \uparrow \therefore x_m \uparrow$$

$$\textcircled{4} \text{ 漏电抗: } x_{1\delta} = 2\pi f N_1^2 \Lambda_{1\delta} \quad \Lambda_{1\delta} \text{ 为漏磁路磁导可认为是常数}$$

$\therefore x_{1\delta}$ 随频率增大而增大。

$$\textcircled{5} \text{ 电压变化率 } \Delta U \% = \beta (R_k^* \cos \phi_2 + x_k^* \sin \phi_2) \therefore x_k^* \uparrow, \therefore \Delta U \text{ 增大}$$

3. 13 一台额定频率为 50Hz 的电力变压器, 接到频率为 60Hz、电压为额定电压 5/6 倍的电网上运行, 问此时变压器的空载电流、励磁电抗、漏电抗及铁耗等将如何变化? 为什么?

解: 原来 $U_{1N} = 4.44 f N_1 \Phi_m$ 现在 $\frac{5}{6} U_{1N} = 4.44 \times \frac{6}{5} f N_1 \Phi_m$

$\therefore \Phi_{m2} = \frac{25}{36} \Phi_m$ 与 3.12 一样

如改为 60Hz 电力变压器, 接到 50Hz 电网上, 电压为 $\frac{5}{6}$ 倍, 则现在 $\frac{5}{6} U_{1N} = 4.44 \times \frac{5}{6} f N_1 \Phi_{m2}$

$\therefore \Phi_{m1} = \Phi_{m2}$

(1) \because 磁通未变 $\therefore I_0$ 不变

(2) $\because \Phi$ 不变 \therefore 饱和程度不变 $\therefore u_{Fe}$ 不变 故 $x_m \propto f$ $\therefore x_m$ 减小为原来的 $\frac{5}{6}$ 倍

(3) $x_{1\delta} \propto f$ $\therefore x_{1\delta}$ 也减小为原来的 $\frac{5}{6}$ 倍, 副方电抗 $x_{2\delta}$ 也一样,

(4) $P_{Fe} \propto B_m^2 f^\beta$ $\beta = 1.3 \sim 1.6$ B_m 不变 $\therefore P_{Fe}$ 随 f 的减小而减小。

3. 14 在变压器高压方和低压方分别加额定电压进行空载试验, 所测得的铁耗是否一样?

计算出来的励磁阻抗有何差别?

在高压方和低压方做空载试验, 只要都加额定电压, 由于 $U_{1N} = k U_{2N}$ 这两种情况下主磁通是相等的; 原因是

$$\Phi_{m1} = \frac{U_{1N}}{4.44 f N_1} \quad \Phi_{m2} = \frac{U_{2N}}{4.44 f N_2} = \frac{k U_{2N}}{4.44 f N_2 k} = \frac{U_{1N}}{4.44 f N_1} = \Phi_{m1} \therefore \text{铁损相等}$$

在高压方做: $Z_{m1} = \frac{U_1}{I_{01}}$ U_1 为电压, I_{01} 为在高压侧测得的空载电流。

在低压方做: $Z_{m2} = \frac{U_2}{I_{02}}$ U_2 I_{02} 为低压方做空载试验时所测得的电压, 电流。

\therefore 无论在高压做还是低压做磁通不变, 相同

\therefore 电压之比等于匝数之比, 即 $U_1 = k U_2$

又 \because 磁通相等, \therefore 两种情况磁势相同, $\therefore N_1 I_{01} = N_2 I_{02}$

$$\therefore I_{01} = k I_{02} \quad \therefore \frac{Z_{m1}}{Z_{m2}} = \frac{U_1}{U_2} \frac{I_{02}}{I_{01}} = k \frac{1}{\frac{1}{k}} = k^2$$

3. 15 在分析变压器时, 为何要进行折算? 折算的条件是什么? 如何进行具体折算? 若用标么值时是否还需要折算?

(1) \because 变压器一, 二次绕组无直接电联系, 且一, 二次绕组匝数不等, 用设有经过折算的基本解公司无法画出等效电路, \therefore 要折算。

(2) 如果将二次绕组折算到一次侧, 因为二次绕组通过其磁动势 \dot{F}_2 对一起绕组起作用, \therefore

只要保持 \dot{F}_2 不变, 就不会影响一次绕组的各个量

(3) 具体方法是将二次绕组的匝数折合到与一次绕组相同的匝数, 即 $\dot{F}_2 = N_2 \dot{I}_2 = N_1 \dot{I}_1 \therefore$

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{I}_2}{k}, \quad \dot{E}_2 = k\dot{E}_2, \quad \dot{U}_2 = k\dot{U}_2$$

$$\dot{R}_2 = k^2 R_2, \quad \dot{x}_{2\sigma} = k^2 x_{2\sigma}, \quad \dot{R}_L = k^2 R_L, \quad \dot{X}_L = k^2 X_L$$

(4) 若用标么值时不需要折算, 因为用标么值表示时折算前后数值相等例

$$\dot{I}_2^* = \frac{\dot{I}_2}{I_{2N}} = \frac{\dot{I}_2}{kI_{1N}} = \frac{\dot{I}_2}{I_{1N}} = I_2^*$$

3. 16 一台单相变压器, 各物理量的正方向如图 3.1 所示, 试求:

(1) 写出电动势和磁动势平衡方程式;

(2) 绘出 $\cos \varphi_2 = 1$ 时的相量图。

$$(1) \quad \dot{U}_1 = \dot{E}_1 + \dot{E}_{1\delta} + \dot{I}_1 R_1 \quad \dot{U}_2 = \dot{E}_2 + \dot{E}_{2\delta} + \dot{I}_2 R_2$$

$$\dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2 = \Phi_m R_m | \alpha = N_1 \dot{I}_0 \quad (\text{要注意 } \dot{I}_2 \text{ 方向, 如与图中相反, 则为: } \dot{I}_1 N_1 - \dot{I}_2 N_2 = N_1 \dot{I}_0)$$

$$\text{令 } \dot{E}_1 = \dot{I}_0 Z_m, \quad \dot{E}_{1\delta} = j\dot{I}_1 x_{1\delta} \quad \dot{E}_{2\delta} = j\dot{I}_2 x_{2\delta}$$

$$\dot{E}_2 = j4.44 f N_2 \Phi_m \quad (\text{没有 “-” 号}) \quad \dot{E}_1 = j4.44 f N_1 \Phi_m \quad (\text{没有 “-” 号})$$

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_1 + \dot{I}_1 R_1 + j\dot{I}_1 x_{1\sigma}, \quad \dot{U}_2 = \dot{E}_2 + \dot{I}_2 R_2 + j\dot{I}_2 x_{2\sigma} \quad \dot{I}_1 + \frac{1}{k} \dot{I}_2 = \dot{I}_0$$

$$\frac{\dot{E}_1}{\dot{E}_2} = k \quad \dot{E}_1 = \dot{I}_0 Z_m \quad \dot{U}_2 = -\dot{I}_2 Z_L$$

(2) $\cos \varphi_2 = 1$ 时相量图

3. 17 如何确定联接组? 试说明为什么三相变压器组不能采用 Yy 联接组, 而三相心式变压器又可以呢? 为什么三相变压器中常希望一次侧或者二次侧有一方的三相绕组接成三角形联接?

3. 18 一台 Yd 联接的三相变压器, 一次侧加额定电压空载运行。此时将二次侧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电流, 试问当此三相变压器是三相变压器组或三相心式变压器时, 所测得的数值有无不同? 为什么?

3. 19 有一台 Yd 联接的三相变压器, 一次侧 (高压方) 加上对称正弦电压, 试分析:

- (1) 一次侧电流中有无 3 次谐波?
- (2) 二次侧相电流和线电流中有无 3 次谐波?
- (3) 主磁通中有无 3 次谐波?
- (4) 一次侧相电压和线电压中有无 3 次谐波?
- (5) 二次侧相电压和线电压中有无 3 次谐波?

3. 20 并联运行的理想条件是什么? 要达到理想情况, 并联运行的各变压器需满足什么条件?

3. 21 并联运行的变压器若短路阻抗的标么值或变比不相等时会出现什么现象? 如果各变压器的容量不相等, 则以上两量对容量大的变压器是大些好呢还是小些好呢? 为什么?

3. 22 试说明变压器的正序、负序和零序阻抗的物理概念。为什么变压器的正序、负序阻抗相等？变压器零序阻抗的大小与什么因素有关？
3. 23 为什么三相变压器组不宜采用 Yyn 联接？而三相心式变压器又可以用 Yyn 联接呢？
3. 24 如何测定变压器的零序电抗？试分析 Yyn 联接的三相变压器组和三相心式变压器零序电抗的大小。
3. 25 试画出 Yny、Dyn 和 Yy 联接变压器的零序电流流通路径及所对应的等效电路，写出零序阻抗的表达式。
3. 26 如果磁路不饱和，变压器空载合闸电流的最大值是多少？
3. 27 在什么情况下突然短路电流最大？大致是额定电流的多少倍？对变压器有什么危害性？
3. 28 变压器突然短路电流值与短路阻抗 Z_k 有什么关系？为什么大容量的变压器把 Z_k 设计得大些？
3. 29 三绕组变压器中，为什么其中一个二次绕组的负载变化时对另一个二次绕组的端电压发生影响？对于升压变压器为什么把低压绕组摆在高压与中压绕组之间时可减小这种影响？
3. 30 三绕组变压器的等效电抗与两绕组变压器的漏电抗在概念上有什么不同？
3. 31 自耦变压器的绕组容量（即计算容量）为什么小于变压器的额定容量？一、二次侧的功率是如何传递的？这种变压器最合适的电压比范围是多大？
3. 32 同普通两绕组变压器比较，自耦变压器的主要特点是什么？
3. 33 电流互感器二次侧为什么不允许开路？电压互感器二次侧为什么不允许短路？
3. 34 产生电流互感器和电压互感器误差的主要原因是什么？为什么它们的二次侧所接仪表不能过多？
3. 35 有一台单相变压器，额定容量 $S_N = 250kVA$ ，额定电压 $U_{1N} / U_{2N} = 10 / 0.4kV$ ，试求一、二次侧的额定电流。

$$I_{1N} = \frac{S_N}{U_{1N}} = \frac{250}{10} = 25(A) \quad I_{2N} = \frac{S_N}{U_{2N}} = \frac{250}{0.4} = 625(A)$$

3. 36 有一台三相变压器，额定容量 $S_N = 5000kVA$ ，额定电压 $U_{1N} / U_{2N} = 10 / 6.3kV$ ，Yd 联接，试求：

- (1) 一、二次侧的额定电流；
 (2) 一、二次侧的额定相电压和相电流。

$$(1) I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}} = \frac{5000}{\sqrt{3} \times 10} = 288.7(A)$$

$$I_{2N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{2N}} = \frac{5000}{\sqrt{3} \times 6.3} = 458.2(A)$$

$$(2) U_{1\Phi N} = \frac{U_{1N}}{\sqrt{3}} = \frac{10}{\sqrt{3}} = 5.774(kV)$$

$$U_{2\Phi N} = U_{1N} = 6.3(kV)$$

$$I_{1\Phi N} = I_{1N} = 288.7(A) \quad I_{2\Phi N} = \frac{I_{2N}}{\sqrt{3}} = \frac{458.2}{\sqrt{3}} = 264.5(A)$$

3. 37 有一台三相变压器，额定容量 $S_N = 100kVA$ ，额定电压 $U_{1N} / U_{2N} = 10 / 0.4kV$ ，

Yyn 联接，试求：

- (1) 一、二次侧的额定电流；
- (2) 一、二次侧的额定相电压和相电流。

$$(1) I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}} = \frac{100}{\sqrt{3} \times 10} = 5.77(A)$$

$$I_{2N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{2N}} = \frac{100}{\sqrt{3} \times 0.4} = 144.3(A)$$

$$(2) U_{1\Phi N} = \frac{10}{\sqrt{3}} = 5.77(kV) \quad I_{1\Phi N} = 5.77(A)$$

$$U_{2\Phi N} = \frac{0.4}{\sqrt{3}} = 0.231(kV) \quad I_{2\Phi N} = 144.3(A)$$

3. 38 两台单相变压器 $U_{1N} / U_{2N} = 220 / 110V$ ，一次侧的匝数相等，但空载电流

$I_{0I} = 2I_{0II}$ 。今将两变压器的一次侧绕组顺极性串联起来，一次侧加 440V 电压问两变压器二次侧的空载电压是否相等？

$\because I_{0I} = 2I_{0II}$ 且一次侧匝数相等

$\therefore F_{0I} = 2F_{0II}$ 而 $F_{0I} = \Phi_{mI}R_{mI}$ $F_{0II} = \Phi_{mII}R_{mII}$ 且电压和匝数相等 $\therefore \Phi_{mI} = \Phi_{mII} \therefore$

$R_{mI} = 2R_{mII}$ 现将两台的一次绕组顺极性串联起来，则 $I'_{0I} = I'_{0II}$ 即 $F'_{0I} = F'_{0II}$ 由于变压器 I 的磁阻为变压器 II 的 2 倍。

\therefore I 的主磁通是 II 的 $\frac{1}{2}$ ，即 $\Phi_{mI} = \frac{1}{2}\Phi_{mII}$ $\therefore U_{1I} = \frac{1}{2}U_{1II}$ 而

$$U_{1I} + U_{1II} = 440V \quad \therefore U_{1I} = 146.7V \quad U_{1II} = 293.3V \quad U_{20I} = 73.3V$$

$$U_{20II} = 146.1V$$

3. 39 有一台单相变压器， $U_{1N} / U_{2N} = 220 / 110V$ 当在高压侧加 220V 电压时，空载电流

为 I_0 ，主磁通为 Φ_0 。今将 X、a 端联在一起，Ax 端加 330V 电压，此时空载电流

和主磁通为多少？若将 X、x 端联接在一起，在 Aa 端加 110V 电压，则空载电流和主磁通又为多少？

解：(1) 设高压绕组为 N_1 匝，低压绕组为 N_2 匝

$$\text{则 } \frac{N_1}{N_2} = \frac{220}{110} = 2$$

$$\text{原来主磁通: } \Phi_0 = \frac{U_{1N}}{4.44N_1} = \frac{220}{4.44N_1}$$

现在匝数为 $N_1 + N_1' = 1.5N_1$ (Z, a 端连在一起)

$$\therefore \Phi_0' = \frac{330}{4.44f1.5N_1} \quad \therefore \frac{\Phi_0'}{\Phi_0} = \frac{330}{1.5} \cdot \frac{1}{220} = 1 \quad \therefore \text{主磁通没变, } \therefore \text{励磁磁势}$$

$$F_0' = F_0 \text{ 而 } I_0' \cdot 1.5N_1 = I_0 \cdot N_1 \quad \therefore I_0' = \frac{I_0}{1.5} = \frac{2}{3}I_0$$

(2) 若将 Z, x 连在一起, 则匝数为: $N_1 - \frac{1}{2}N_1' = \frac{1}{2}N_1$

$$\text{现在的主磁通 } \Phi_0' = \frac{U_{Am}}{4.44f\frac{1}{2}N_1} = \frac{110 \times 2}{4.44fN_1} = \Phi_m \quad \text{不变}$$

$$\therefore \text{励磁磁势不变 } F_0' = F_0 \text{ 而 } F_0' = I_0' \cdot \frac{1}{2}N_1 \quad \therefore I_0' \cdot \frac{1}{2}N_1 = I_0 \cdot N_1$$

$$F_0 = I_0 N_1 \quad \therefore I_0' = 2I_0$$

3. 40 有一台单相变压器, 额定容量 $S_N = 5000kVA$, 高、低压侧额定电压

$$U_{1N} / U_{2N} = 35 / 6.6kV。铁柱有效截面积为 1120cm^2, 铁柱中磁通密度的最大值$$

$$B_m = 1.45T, \text{ 试求高、低压绕组的匝数及该变压器的变比。}$$

$$\text{解: } \Phi_m = B_m A = 1.45 \times 1120 \times 10^{-4} = 0.1624(Wb)$$

$$N_1 = \frac{U_{1N}}{4.44f\Phi_m} = \frac{35 \times 10^3}{4.44 \times 50 \times 0.1624} = 971(\text{匝})$$

$$N_2 = \frac{U_{2N}}{4.44f\Phi_m} = \frac{6.6 \times 10^3}{4.44 \times 50 \times 0.1624} = 183(\text{匝})$$

$$k = \frac{U_{1N}}{U_{2N}} = \frac{35}{6.6} = 5.303$$

3. 41 有一台单相变压器, 额定容量为 5kVA, 高、低压侧均由两个绕组组成, 一次侧每个绕组的额定电压为 $U_{1N} = 1100V$, 二次侧每个绕组的额定电压为 $U_{2N} = 110V$, 用这个变压器进行不同的联接, 问可得几种不同的变比? 每种联接时的一、二次侧额定电流为多少?

共有 4 种:

1: 两高压绕组串联, 两低压绕组串联

$$k_1 = \frac{(1100+1100)}{110+110} = 10$$

$$I_{1N} = \frac{S_N}{U_{1N}} = \frac{5000}{1100+1100} = 2.273(A) \quad I_{2N} = \frac{S_N}{U_{2N}} = \frac{5000}{110+110} = 22.73(A)$$

2: 两高压绕组串联, 两低压绕组并联

$$k_2 = \frac{U_1}{U_2} = \frac{2200}{110} = 20$$

$$I_{1N} = 2.273(A) \quad I_{2N} = \frac{500}{110} = 45.45(A)$$

3: 两高压绕组并联, 两低压绕组串联

$$k_3 = \frac{1100}{220} = 5 \quad I_{1N} = \frac{5000}{1100} = 4.545(A) \quad I_{2N} = 22.73(A)$$

4: 两高压绕组并联, 两低压绕组并联

$$k_4 = \frac{1100}{110} = 10, \quad I_{1N} = 4.545(A) \quad I_{2N} = 45.45(A)$$

3. 42 将一台 1000 匝的铁心线圈接到 110V、50Hz 的交流电源上, 由安培表和瓦特表的读数得知 $I_1 = 0.5A$ 、 $P_1 = 10W$, 把铁心取出后电流和功率就变为 100A 和 10Kw。设不计漏磁, 试求:

- (1) 两种情况下的参数、等效电路;
- (2) 两种情况下的最大值。

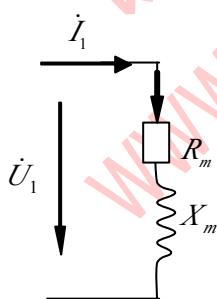
$$(1) \text{ 有铁心时: } Z_m = \frac{U}{I} = \frac{110}{0.5} = 220(\Omega) \quad P_1 = I_1^2 R_m$$

$$R_m = \frac{R}{I_1^2} = \frac{10}{0.5^2} = 40(\Omega) \quad X_m = \sqrt{Z_m^2 - R_m^2} = 216.3(\Omega)$$

$$\text{无铁心时: } Z_{m0} = \frac{U}{I} = \frac{110}{100} = 1.1(\Omega)$$

$$R_{m0} = \frac{R}{I_0^2} = \frac{10000}{100^2} = 1(\Omega)$$

$$X_m = \sqrt{1.1^2 - 1} = 0.4583(\Omega)$$



$$(2) \quad E \approx U = 110 \quad E = 4.44fN\Phi_m$$

$$\therefore \Phi_m = \frac{E}{4.44fN} = \frac{110}{4.44 \times 50 \times 1000} = 4.955 \times 10^{-4} \text{ Wb}$$

3. 43 有一台单相变压器，额定容量 $S_N = 100 \text{ kVA}$ ，额定电压 $U_{1N} / U_{2N} = 6000 / 230 \text{ V}$ ，

$f = 50 \text{ Hz}$ 。一二次侧绕组的电阻和漏电抗的数值为： $R_1 = 4.32 \Omega$ ； $R_2 = 0.0063 \Omega$ ；

$$X_{1\sigma} = 8.9 \Omega; \quad X_{2\sigma} = 0.013 \Omega, \text{ 试求：}$$

(1) 折算到高压侧的短路电阻 R_k 、短路电抗 X_k 及短路阻抗 Z_k ；

(2) 折算到低压侧的短路电阻 R'_k 、短路电抗 X'_k 及短路阻抗 Z'_k

(3) 将上面的参数用标么值表示；

(4) 计算变压器的阻抗电压及各分量；

(5) 求满载及 $\cos \varphi_2 = 1$ 、 $\cos \varphi_2 = 0.8$ (滞后) 及 $\cos \varphi_2 = 0.8$ (超前) 等三种情况下的 ΔU ，并对结果进行讨论。

$$(1) \quad R'_2 = k^2 R_2 = \left(\frac{6000}{230}\right)^2 \times 0.0063 = 4.287 \Omega \quad k = 26.1$$

$$x'_{2\sigma} = k^2 x_{2\sigma} = 26.1^2 \times 0.013 = 8.855 \Omega$$

$$\therefore R_k = R_1 + R'_2 = 4.32 + 4.287 = 8.607 \Omega$$

$$x_k = x_{1\sigma} + x_{2\sigma} = 8.9 + 8.855 = 17.457 \Omega$$

$$Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2} = \sqrt{8.607^2 + 17.457^2} = 19.467 \Omega$$

(2) 折算到低压侧：

$$R'_1 = \frac{R_1}{k^2} = \frac{4.32}{26.1^2} = 0.0063 \Omega \quad x'_{1\sigma} = \frac{x_{1\sigma}}{k^2} = \frac{8.9}{26.1^2} = 0.0131 \Omega$$

$$\therefore R'_k = R'_1 + R'_2 = 0.0063 + 0.0063 = 0.0126 \Omega$$

$$x'_k = x'_{1\sigma} + x'_{2\sigma} = 0.0131 + 0.013 = 0.026 \Omega$$

$$Z'_k = \sqrt{R'_k^2 + X'_k^2} = \sqrt{0.0126^2 + 0.026^2} = 0.029 \Omega$$

(3) 阻抗标么值：

$$Z_b = \frac{U_{1N}}{I_{1N}} = \frac{U_{1N}}{S_N / U_{1N}} = \frac{6000 \times 6000}{100 \times 10^3} = 360 \Omega$$

$$R_1^* = \frac{4.32}{360} = 0.012 \quad R_2^* = \frac{4.287}{360} = 0.01191 \quad x_{1\delta}^* = \frac{8.9}{360} = 0.0247$$

$$x_{2\delta}^* = \frac{8.8557}{360} = 0.0246 \quad R_k^* = \frac{8.607}{360} = 0.0239 \quad x_k^* = \frac{17.457}{360} = 0.0485$$

$$Z_k^* = \frac{19.467}{360} = 0.05408$$

$$(4) \quad \dot{U}_k = Z_k \dot{I}_{1N} = (8.607 + j17.457) \times 16.667 = 143.33 + j290.95$$

$$I_{1N} = \frac{S_N}{U_{1N}} = \frac{100}{6} = 16.667 A$$

$$U_k^* = \frac{\dot{U}_k}{6000} = \frac{143.33 + j290.95}{6000} \text{ 也可以, 但麻烦。}$$

$$\therefore U_k^* = Z_k^* \quad \therefore U_k^* = 5.4\% \quad U_{kr}^* = R_k^* = 2.39\% \quad U_{kx}^* = X_k^* = 4.85\%$$

$$(5) \quad \Delta U = \beta(R_k^* \cos \varphi_2 + X_k^* \sin \varphi_2) \quad \because \text{是满载} \quad \therefore \beta = 1$$

$$(a) \cos \varphi_2 = 1 \quad \sin \varphi_2 = 0 \quad \Delta U = 0.0239 \times 1 = 2.39\%$$

$$(b) \cos \varphi_2 = 0.8 \text{ (滞后)} \quad \sin \varphi_2 = 0.6$$

$$\Delta U = 1 \times (0.0239 \times 0.8 + 0.0485 \times 0.6) = 4.822\%$$

$$(c) \cos \varphi_2 = 0.8 \text{ (超前)} \quad \sin \varphi_2 = -0.6$$

$$\Delta U = 1 \times (0.0239 \times 0.8 - 0.0485 \times 0.6) = -0.968\%$$

说明: 电阻性和感性负载电压变化率是正的, 即负载电压低于空载电压, 容性负载可能是负载电压高于空载电压。

3. 44 有一台单相变压器, 已知: $R_1 = 2.19\Omega$, $X_{1\sigma} = 15.4\Omega$, $R_2 = 0.15\Omega$,

$$X_{2\sigma} = 0.964\Omega, \quad R_m = 1250\Omega, \quad X_m = 12600\Omega, \quad N_1 = 876 \text{ 匝}, \quad N_2 = 260 \text{ 匝};$$

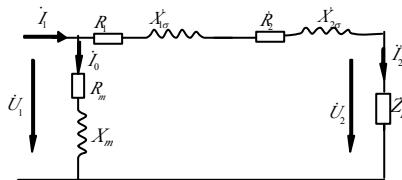
当 $\cos \varphi_2 = 0.8$ (滞后) 时, 二次侧电流 $I_2 = 180A$, $U_2 = 6000V$, 试求:

(1) 用近似 “ Γ ” 型等效电路和简化等效电路求 \dot{U}_1 及 \dot{I}_1 , 并将结果进行比较;

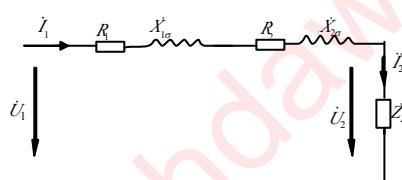
(2) 画出折算后的相量图和 “T” 型等效电路。

$$(1) \quad k = \frac{N_1}{N_2} = \frac{876}{260} = 3.37 \quad k' = R_2 k^2 = 3.37^2 \times 0.15 = 1.7035(\Omega)$$

$$x_{2\sigma}' = 3.37^2 \times 0.964 = 10.948(\Omega)$$



P型等效电路



简化等效电路

P型：设 $\dot{U}_2' = U_2[0^\circ]$ 则 $\dot{U}_2' = k\dot{U}_2[0^\circ] = 3.37 \times 6000[0^\circ] = 20220[0^\circ]$ (V)

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_2'}{R} = \frac{180}{3.37}[-36.87^\circ] = 53.41[-36.87^\circ] = 42.728 - j32.046$$

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 + (R_1 + R_2' + jX_{1\sigma} + jX_{2\sigma}') \dot{I}_2$$

$$= 20200 + (2.19 + 1.7035 + j15.4 + j0.948) \times 53.41[-36.87^\circ]$$

$$= 20220 + (3.8935 + j26.348) \times 53.41[-36.87^\circ]$$

$$= 20220 + 1422.52[44.72^\circ] = 20220 + 1010.78 + j1000.95$$

$$= 20220 + 1422.52[44.72^\circ] = 20220 + 1010.78 + j1000.95$$

$$= 21230.78 + j1000.95 = 21254.36[2.699^\circ]$$

$$\dot{I}_0 = \frac{\dot{U}_1}{Z_m} = \frac{21254.36[2.699^\circ]}{1250 + j12600} = \frac{\dot{U}_1}{12661.85[84.33^\circ]} = 1.6786[-81.63^\circ] = 0.2443 - j1.6607$$

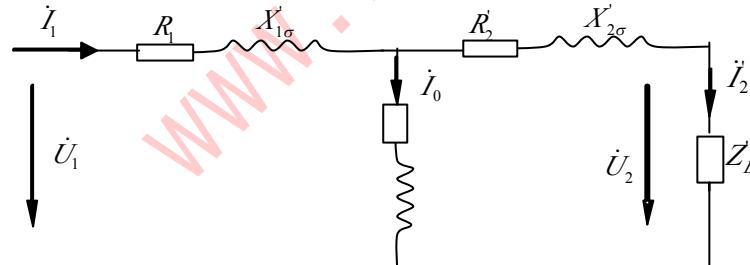
$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \dot{I}_2 = 0.2443 - j1.6607 + 42.728 - j32.046 = 42.9723 - j33.7067 = 54.615[-38.12^\circ]$$

$$\therefore U_1 = 21254(V) \quad I_1 = 54.615(A)$$

用简化等效电路：

$$U_1 = 21254(V) \text{ (不变)} \quad I_1 = I_2 = 53.41(A)$$

比较结果发现，电压不变，电流相差2.2%，但用简化等效电路求简单。



T型等效电路

3. 45 一台三相变压器，Yd11接法， $R_1 = 2.19\Omega$ ， $X_{1\sigma} = 15.4\Omega$ ， $R_2 = 0.15\Omega$ ， $X_{2\sigma} = 0.964\Omega$ ，变比 $k = 3.37$ 。忽略励磁电流，当带有 $\cos \varphi_2 = 0.8$ (滞后) 的负载时，

$U_2 = 6000V$ ， $I_2 = 312A$ ，求 U_1 、 I_1 、 $\cos \varphi_1$ 。

设 $\dot{U}_2' = 20220[0^\circ]$ 则 $\dot{I}_{2\phi} = \frac{312[-36.87^\circ]}{\sqrt{3}k} = 53.41[-36.87^\circ]$

$\therefore \dot{U}_{1\phi} = 21254[2.699^\circ]$ (见上题) $\therefore U_1 = \sqrt{3}U_{1\phi} = 36812(V)$ $I_1 = I_{1\phi} = 53.43A$

$$\varphi_1 = 2.699^\circ - (-36.87^\circ) = 40.82^\circ \quad \cos \varphi_1 = 0.76 \text{ (滞后)}$$

3. 46 一台三相电力变压器，额定数据为： $S_N = 1000kVA$, $U_{1N} = 10kV$, $U_{2N} = 400V$,

Yy 接法。在高压方加电压进行短路试验， $U_k = 400V$, $I_k = 57.7A$ $P_k = 11.6kW$.

试求：

(1) 短路参数 R_k 、 X_k 、 Z_k ；

(2) 当此变压器带 $I_2 = 1155A$, $\cos \varphi_2 = 0.8$ (滞后) 负载时，低压方电压 U_2 。

(1) 求出一相的物理量及参数，在高压侧做试验，不必折算

$$k = \frac{U_{1N\phi}}{U_{2N\phi}} = \frac{10\sqrt{3}}{400} = 25 \quad U_{k\Phi} = 400\sqrt{3} = 230.95(V) \quad I_{k\Phi} = 57.74(A)$$

$$P_{k\Phi} = \frac{P_k}{\sqrt{3}} = 3.867(kW) \quad Z_k = \frac{U_{k\Phi}}{I_{k\Phi}} = \frac{230.95}{57.74} = 4(\Omega)$$

$$R_k = \frac{P_{k\Phi}}{I_{k\Phi}^2} = \frac{3.867}{57.74^2} = 1.16(\Omega) \quad x_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = \sqrt{4^2 - 1.16^2} = 3.83(\Omega)$$

(2) 方法一：

$$\beta = \frac{I_2}{I_{2N}} \quad I_{2N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{2N}} = \frac{1000}{\sqrt{3} \times 10} = 1443.42(A) \therefore \beta = \frac{1152}{1443.42} = 0.8$$

$$Z_b = \frac{U_{1N\phi}}{I_{1N\phi}} \quad I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}} = \frac{1000}{\sqrt{3} \times 10} = 57.74(A) = I_{1N\Phi}$$

$$\therefore Z_b = \frac{1000}{57.74} = 99.99 \approx 100 \quad \therefore R_k^* = \frac{R_k}{Z_b} = 0.0116$$

$$x_k^* = \frac{x_k}{Z_b} = 0.0383 \quad \sin \varphi_2 = 0.6$$

∴

$$\Delta U = \beta(R_k^* \cos \varphi_2 + X_k^* \sin \varphi_2) = 0.8 \times (0.0116 \times 0.8 + 0.0383 \times 0.6) = 0.02581$$

$$\Delta U = 1 - \frac{U_{2\phi}}{U_{2N}} \quad \therefore U_{2\phi} = (1 - \Delta U)U_{2N\Phi}$$

$$U_{2N\Phi} = \frac{U_{2N}}{\sqrt{3}} = \frac{400}{\sqrt{3}} = 230.947(V)$$

$$\therefore U_{2\phi} = (1 - 0.02581) \times 230.947 = 225(V)$$

$$\therefore U_2 = \sqrt{3}U_{2\phi} = \sqrt{3} \times 225 = 389.7(V)$$

方法二：利用简化等效电路

$$I_{2\Phi} = \frac{I_{2\phi}}{k} = \frac{1155}{25} = 46.2(A) \text{ 设 } \dot{U}_2 = U_2 | 0^\circ \text{ 则 } \dot{I}_{2\Phi} = 46.2 | -36.87^\circ$$

$$\dot{U}_{1N\Phi} = \dot{I}_{2\Phi}(R_k + jX_k) + \dot{U}_{2\Phi} \quad \dot{U}_{1N\Phi} = \frac{1000}{\sqrt{3}} | 0^\circ = 5773.67 | 0^\circ$$

$$\therefore 5773.67 \cos \theta + j5773.67 \sin \theta = 46.2 \angle -36.87^\circ \times 4 \angle 73.15^\circ + U_{2\Phi}$$

$$= 184.8 \angle 36.28^\circ + U_{2\Phi} = 149.16 + j109.35 + U_{2\Phi}$$

$$5773.67 \cos \theta = 149.16 + U_{2\Phi}'$$

$$5773.67 \sin \theta = 109.35$$

$$\text{解得: } U_{2\Phi}' = 5623.5(V)$$

$$\therefore U_{2\Phi} = \frac{U_{2\Phi}'}{k} = 224.9 \quad \therefore U_2 = \sqrt{3} \times 225 = 389.7 \text{ (V)}$$

3. 47 一台三相电力变压器的名牌数据为: $S_N = 20000kVA$, $U_{1N}/U_{2N} = 110/10.5kV$,

Yd11 接法, $f = 50Hz$, $Z_k^* = 0.105$, $I_0^* = 0.65\%$, $P_0 = 23.7kW$,

$P_k = 10.4kW$ 。试求:

- (1) Γ 型等效电路的参数, 并画出 Γ 型等效电路;
- (2) 该变压器高压方接入 $110kV$ 电网, 低压方接一对称负载, 每相负载阻抗为 $16.37 + j7.93\Omega$, 求低压方电流、电压、高压方电流。

答案 与 P_{138} 例 3.5 一样

3. 48 一台三相变压器, $S_N = 5600kVA$, $U_{1N}/U_{2N} = 10/6.3kV$, Yd11 接法。在低压

侧加额定电压 U_{2N} 作空载试验, 测得, $P_0 = 6720W$, $I_0 = 8.2A$ 。在高压侧作短路试验, 短路电流 $I_k = I_{1N}$, $P_k = 17920W$, $U_k = 550V$, 试求:

- (1) 用标么值表示的励磁参数和短路参数;
- (2) 电压变化率 $\Delta U = 0$ 时负载的性质和功率因数 $\cos \varphi_2$;
- (3) 电压变化率 ΔU 最大时的功率因数和 ΔU 值;
- (4) $\cos \varphi_2 = 0.9$ (滞后) 时的最大效率。

先求出一相的物理量

$$I_{1N\Phi} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}} = \frac{5600}{\sqrt{3} \times 10} = 323.35 \text{ (A)} \quad U_{1N\Phi} = \frac{1000}{\sqrt{3}} = 5773.67(V)$$

$$U_{2N\Phi} = 6.3kV \quad I_{2N\Phi} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{2N}} = \frac{5600}{\sqrt{3} \times 6.3} = 296.3(A)$$

$$P_{0\Phi} = \frac{6720}{3} = 2240(W) \quad I_{0\Phi} = \frac{8.2}{\sqrt{3}} = 4.73(A)$$

$$P_{k\Phi} = \frac{17920}{3} = 5973.33(W) \quad I_{k\Phi} = I_{1N\Phi} = 323.35(A)$$

$$U_{k\Phi} = \frac{U_k}{\sqrt{3}} = \frac{550}{\sqrt{3}} = 317.55(V)$$

$$k = \frac{U_{1\Lambda\Phi}}{U_{2\Lambda\Phi}} = \frac{5773.6}{6300} = 0.916 \quad Z_b = \frac{U_{1\Lambda\Phi}}{I_{1\Lambda\Phi}} = \frac{5773.6}{323.35} = 17.856(\Omega)$$

$$Z_m' = \frac{U_{2\Lambda\Phi}}{I_{0\Phi}} = \frac{6.3 \times 10^3}{4.73} = 1331.92(\Omega)$$

$$R_m' = \frac{R_{0\Phi}}{I_{0\Phi}} = \frac{2240}{4.73^2} = 100.12(\Omega) \quad X_m' = \sqrt{Z_m'^2 - R_m'^2} = \sqrt{1331.92^2 - 93.42^2} = 1328.64\Omega$$

折算到高压侧：

$$Z_m = k^2 Z_m' = 0.916^2 \times 1331.92 = 1117.6(\Omega)$$

$$Z_m^* = \frac{Z_m}{Z\sigma} = \frac{1117.6}{17.856} = 62.59 \quad R_m = 0.916^2 \times 100.12 = 84(\Omega) \quad R_m^* = \frac{84}{17.856} = 4.7$$

$$X_m = 0.916^2 \times 1328.64 = 1114.8(\Omega) \quad X_m^* = \frac{1114.8}{17.856} = 62.43$$

短路参数：

$$Z_k = \frac{U_{k\Phi}}{I_{k\Phi}} = \frac{317.55}{323.35} = 0.982(\Omega) \quad Z_k^* = \frac{0.982}{17.856} = 0.055$$

$$R_k = \frac{R_{k\Phi}}{I_{k\Phi}^2} = \frac{5973.32}{323.35^2} = 0.057 \quad R_k^* = \frac{0.057}{17.856} = 0.0032$$

$$X_k^* = \sqrt{Z_k^{*2} - R_k^{*2}} = \sqrt{0.055^2 - 0.0032^2} = 0.0549$$

$$(2) \quad \beta = 1 \quad \Delta U = 0 = R_k^* \cos \varphi_2 + X_k^* \sin \varphi_2 \quad \therefore \tan \varphi_2 = -\frac{R_k^*}{X_k^*} = -\frac{0.0032}{0.0549} = -0.05829$$

$$\therefore \varphi_2 = -3.3359^\circ \quad \therefore \text{是容性负载} \quad \cos \varphi_2 = 0.998 \quad (\text{超前})$$

$$(3) \quad \beta = 1 \quad \frac{d\Delta U}{d\varphi_2} = -R_k^* \sin \varphi_2 + X_k^* \cos \varphi_2 = 0$$

$$\therefore \tan \varphi_2 = \frac{X_k^*}{R_k^*} = \frac{0.0549}{0.0032} = 17.156 \quad \varphi_2 = 86.66^\circ \quad (\text{感性}) \quad \cos \varphi_2 = 0.0583 \quad (\text{滞后})$$

$$\Delta U_{\max} = 0.0032 \times 0.0583 + 0.0549 \times \sin 86.66 = 0.055$$

$$(4) \quad \beta_m = \sqrt{\frac{P_0}{P_{kN}}} \quad (\text{即 } P_0 = \beta_m^2 P_{kN} \text{ 时效率最大}) = \sqrt{\frac{2240 \times 3}{5973.3 \times 3}} = 0.06124$$

$$\eta_{\max} = 1 - \frac{P_0 + \beta_m^2 P_{kN}}{\beta_m S_N \cos \varphi_2 + P_0 + \beta_m P_{kN}} = 1 - \frac{6720 + 0.06124 \times 17920}{0.06124 \times 5600 \times 0.9 + 6720 + 0.06124 \times 17920} = 1 - \frac{5623.22 \times 17319.68}{2981.16 \times 10^3 \times 5623.22} = 99.6\%$$

3. 49 有一台三相变压器， $S_N = 5600 \text{ kVA}$ ， $U_{1N}/U_{2N} = 10/6.3 \text{ kV}$ ， Yd11 联接组。变

压器的空载及短路试验数据为：

试验名称	线电压 U_1/V	线电流 I_1/A	三相功率 P/W	备注
空载	6300	7. 4	6800	电压加在低压侧
短路	550	323. 3	18000	电压加在高压

					侧
--	--	--	--	--	---

试求：

- (1) 变压器参数的实际值及标么值；
- (2) 求满载 $\cos \varphi_2 = 0.8$ (滞后) 时, 电压调整率 ΔU 及二次侧

电压 U_2 和效率；

- (3) 求 $\cos \varphi_2 = 0.8$ (滞后) 时的最大效率。

$$\text{解: } U_{1N\phi} = \frac{10}{\sqrt{3}} \times 10^3 = 5773.67(V) \quad I_{1N\phi} = \frac{5600 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 10 \times 10^3} = 323.35(A)$$

$$U_{2N\phi} = 6300(V) \quad I_{2N\phi} = \frac{5600}{\sqrt{3} \times 6300} = 296.3(A)$$

$$\text{空载低压侧 } P_{0\phi} = \frac{6800}{3} = 2266.7(W) \quad I_{0\phi} = \frac{7.4}{\sqrt{3}} = 4.27(A)$$

$$\therefore Z_m' = \frac{U_{2N\phi}}{I_{0\phi}} = \frac{6300}{4.27} = 1475.4(\Omega) \quad R_m' = \frac{R_{0\phi}}{I_{0\phi}^2} = \frac{2266.7}{4.27^2} = 124.32(\Omega)$$

$$X_m' = \sqrt{1475.4^2 - 124.32^2} = 1470.15(\Omega) \text{ 变比 } k = \frac{U_{1N\phi}}{U_{2N\phi}} = \frac{5773.67}{6300} = 0.916$$

$$Z_m = k^2 Z_m' = 0.916^2 \times 1475.4 = 1238(\Omega) \quad R_m = 0.916^2 \times 124.32 = 104.3(\Omega)$$

$$x_m = 0.916^2 \times 1470.15 = 1233.5(\Omega)$$

$$\text{短路参数计算: } U_{k\phi} = \frac{550}{\sqrt{3}} = 317.55(V) \quad I_{k\phi} = 323.3(A)$$

$$P_{k\phi} = \frac{1800}{3} = 6000(W) \quad Z_k = \frac{U_{k\phi}}{I_{k\phi}} = \frac{317.55}{323.3} = 0.9822(\Omega) \quad R_k = \frac{R_{0\phi}}{I_{0\phi}^2} = \frac{6000}{323.3^2} = 0.0574(\Omega)$$

$$X_k = \sqrt{0.9822^2 - 0.0574^2} = 0.9805(\Omega) \quad Z_b = \frac{U_{1N\phi}}{I_{1N\phi}} = \frac{5773.67}{323.35} = 17.86$$

$$Z_m^* = \frac{1238}{17.86} = 69.32 \quad R_m^* = \frac{104}{17.86} = 5.84 \quad X_m^* = \sqrt{69.32^2 - 5.84^2} = 69.07$$

$$Z_k^* = \frac{0.9822}{17.86} = 0.055 \quad R_k^* = \frac{0.0574}{17.86} = 0.003214 \quad X_k^* = \frac{0.9805}{17.86} = 0.0549$$

$$(2) \quad \Delta U = \beta(R_k^* \cos \varphi_2 + X_k^* \sin \varphi_2) = 1 \times (0.003214 \times 0.8 + 0.0549 \times 0.6) = 3.55\%$$

$$\Delta U = 1 - \frac{U_2}{U_{2N}} \quad \therefore U_{2\phi} = (1 - \Delta U) U_{2N\phi} = (1 - 0.0355) \times 6300 = 6076.3(V)$$

$$\eta = 1 - \frac{R_0 + \beta^2 R_{kN}}{\beta S_N \cos \varphi_2 + R_0 + \beta^2 R_{kN}} = 1 - \frac{6800 + 1 \times 18000}{1 \times 5600 \times 10^3 \times 0.8 + 6800 + 18000} = 99.45\%$$

$$(3) \quad \beta_m = \sqrt{\frac{R_0}{R_{kN}}} = \sqrt{\frac{6800}{18000}} = 0.61464$$

$$\eta = 1 - \frac{6800 + 0.61464^2 \times 18000}{0.61464^2 \times 5600 \times 10^3 \times 0.8 + 6800 + 0.61464 \times 18000} = 99.51\%$$

3. 50 一台三相变压器 $S_N = 750kVA$, $U_{1N}/U_{2N} = 10000/400V$, Yy 联接, 短路阻抗

$$Z_k = 1.40 + j6.48\Omega, \text{ 负载阻抗 } Z_L = 0.20 + j0.07\Omega, \text{ 试求:}$$

(1) 一次侧加额定电压时, 一二次侧电流和二次侧电压;

(2) 输入、输出功率及效率。

$$k = \frac{U_{1N\Phi}}{U_{2N\Phi}} = \frac{10000}{400\sqrt{3}} = 25$$

$$Z_L' = k^2 Z_L = 25^2 \times (0.20 + j0.07) = 125 + j43.75 = 132.435 \angle 19.29^\circ$$

$$(1) \quad U_{1N\Phi} = \frac{10000}{\sqrt{3}} = 5773.67(V) \quad \text{设 } U_{1N\Phi} = 5773.67 \angle 0^\circ$$

$$\therefore Z = Z_k + Z_L' = 1.4 + j6.48 + 125 + j43.75 = 126.4 + j50.23 = 136 \angle 21.67^\circ (\Omega)$$

$$\therefore I_1 = \frac{U_{1N\Phi}}{Z} = \frac{5773.67 \angle 0^\circ}{136 \angle 21.67^\circ} = 42.45 \angle -21.67^\circ (A)$$

$$U_2' = I_1 Z_L' = 42.45 \angle -21.67^\circ \times 132.435 \angle 19.29^\circ (V) = 5621.9 \angle -2.38^\circ$$

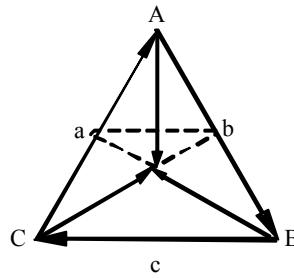
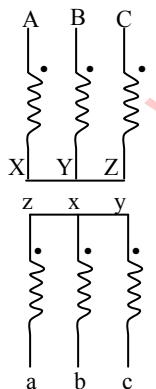
$$\therefore I_1 = I_2' = 42.45(A) \quad I_2 = kI_1 = 1061(A) \quad U_2 = \sqrt{3} \frac{U_2'}{Z_L} = 5621.9 \times \sqrt{3} \angle 25^\circ = 389.5(V)$$

$$(2) \quad P_1 = 3U_1 I_1 \cos \varphi_1 = 3 \times 5773.67 \times 42.45 \times \cos 21.67^\circ = 683.3(kW)$$

$$P_2 = \sqrt{3} U_2 I_2 \cos \varphi_2 = \sqrt{3} \times 389.5 \times 1061 \times \cos(\varphi_u - \varphi_1) = \cos(-2.38 + 21.67) = 675.6(kW)$$

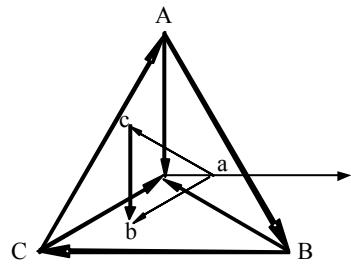
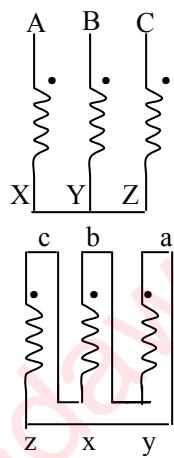
$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \frac{675.6}{683.3} \times 100\% = 98.87\%$$

3. 51 (a)



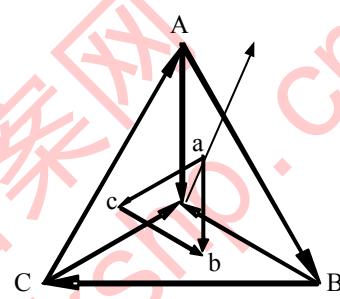
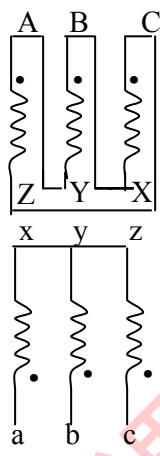
联结组别为: Yy10

(b)



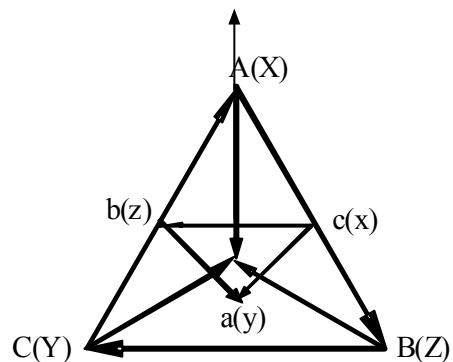
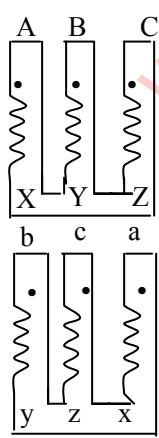
联结组别: Yd3

(c)



联结组别: Dy1

(4)



联结组别: Dd6

第四章 交流电机绕组的基本理论

4. 1 交流绕组与直流绕组的根本区别是什么？

交流绕组：一个线圈组彼此串联

直流绕组：一个元件的两端分别与两个换向片相联

4. 2 何谓相带？在三相电机中为什么常用 60° 相带绕组而不用 120° 相带绕组？

相带：每个极下属于一相的槽所分的区域叫相带，在三相电机中常用 60° 相带而不用 120° 相带是因为： 60° 相带所分成的电动势大于 120° 相带所分成的相电势。

4. 3 双层绕组和单层绕组的最大并联支路数与极对数有什么关系？

双层绕组： $a_{\max} = 2P$ 单层绕组： $a_{\max} = P$

4. 4 试比较单层绕组和双层绕组的优缺点及它们的应用范围？

单层绕组：简单，下线方便，同心式端部交叉少，但不能做成短匝，串联匝数 N 小（同样槽数），适用于 $< 10kW$ 异步机。

双层绕组：可以通过短距节省端部用铜（叠绕组）或减少线圈但之间的连线（波绕），更重要的是可同时采用分布和短距来改善电动势和磁动势的波形，因此现代交流电机大多采用双层绕组。

4. 5 为什么采用短距和分布绕组能削弱谐波电动势？为了消除 5 次或 7 次谐波电动势，节距应选择多大？若要同时削弱 5 次和 7 次谐波电动势，节距应选择多大？

绕组短距后，一个线圈的两个线圈边中的基波和谐波（奇次）电动势都不在相差 180° ，因此，基波和谐波电动势都比整距时减小；对基波，同短距而减小的空间电角度较小， \therefore 基波电动势减小得很少；但对 V 次谐波，短距减小的则是一个较大的角度（是基波的 V 倍），因此，总体而言，两个线圈中谐波电动势相量和的大小就比整距时的要小得多，因此谐波电动势减小的幅度大于基波电动势减小的幅度 \therefore 可改善电动势波形。绕组分布后，一个线圈组中相邻两个线圈的基波和 v 次谐波电动势的相位差分别是 α_1 和 $v\alpha_1$ (α_1 槽距角)，这时，线圈组的电动势为各串联线圈电动势的相量和，因此一相绕组的基波和谐波电动势都比集中绕组时的小，但由于谐波电动势的相位差较大，因此，总的来说，一相绕组的谐波电动势所减小的幅度要大于基波电动势减小的幅度，使电动势波形得到改善。

要完全消除 v 次谐波，只要取 $\gamma = (1 - \frac{1}{v})\tau$ 即可。5 次， $\gamma_1 = \frac{4}{5}\tau$ ，消除 7 次 $\gamma_1 = \frac{6}{7}\tau$ ，要消除 5 次和 7 次取 $\gamma_1 = \frac{5}{6}\tau$

4. 6 为什么对称三相绕组线电动势中不存在 3 及 3 的倍数次谐波？为什么同步发电机三相绕组多采用 Y 型接法而不采用 Δ 接法？

\because 三相电动势中的 3 次谐波在相位上彼此相差 $3 \times 120^\circ = 360^\circ$ ，即同大小，同相位，故星形

联结时，有 $\dot{E}_{AB3} = \dot{E}_{A3} - \dot{E}_{B3} = 0$ ，即线电势中的三次谐波被互相抵消，同理，接成 Δ 形时，线电势中依然不会存在三次谐波，但却会在三角形回路中产生的 3 次谐波环境 \dot{I}_3 ，在各绕组中产生短路压降，相当于短路，引起附加损耗。 \therefore 同时多采用 Y 形联接。

4. 7 为什么说交流绕组产生的磁动势既是时间的函数，又是空间的函数，试以三相绕组合成磁动势的基波来说明。

三相绕组合成磁动势的基波： $F_1 = \frac{3}{2} F_{\phi 1} \cos(\omega t - \theta)$

在某一瞬间，它在空间成正弦波分布，是空间的函数，随着时间的变化，该正弦波沿电流相序旋转，所以，它既是时间的函数，也是空间的函数。

4. 8 脉振磁动势和旋转磁动势各有哪些基本特性？产生脉振磁动势、圆形旋转磁动势和椭圆形旋转磁动势的条件有什么不同？

脉振磁动势：在空间呈矩形波分布，矩形波的振幅随时间以正弦电流的频率按正弦规律变化。

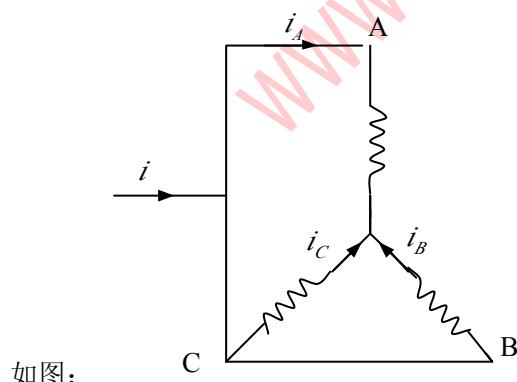
旋转磁动势：转速为同步速，方向从超前相电流绕组的轴线转向滞后相电流绕组的轴线，它的振幅稳定不变，等于一相磁势的 $\frac{3}{2}$ 倍。

条件：一相绕组通入正弦波电流时产生在空间分布的矩形脉振磁势波。

三相对称绕组通入三相对称电流（正弦分布）时产生旋转磁动势（图形）。

三相对称绕组通入三相不对称电流时，产生椭圆形旋转磁动势。

4. 9 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连在一起，再通以交流电流，则合成磁动势基波是多少？如将三相绕组依次串联起来后通以交流电流，则合成磁动势基波又是多少？可能存在哪些谐波合成磁动势？



如图：

$$i_A = i_B = i_C = i = \sqrt{2} I \cos \omega t$$

$$F_{A1} = 0.9 \frac{Nk_M}{P} I \cos \omega t \cos \theta \quad F_{B1} = F_{\phi 1} \cos \omega t \cos(\theta - 120^\circ)$$

$$F_{C1} = F_{\phi 1} \cos \omega t \cos(\theta - 240^\circ)$$

$$F_1 = F_A + F_B + F_C = F_{\phi 1} \cos \omega t [\cos \theta + \cos(\theta - 120^\circ) + \cos(\theta - 240^\circ)] = 0$$

如将三相绕组依次串联起来后通以交流电流 $F_1 = 0$, 可能存在 3 次及 3 次倍数的谐波: 3 次及 3 的倍数次谐波, 大小相等, 相位相同, 相加后不会抵消, 即:

$$F_3 = F_{A3} + F_{B3} + F_{C3} = F_{\phi 3} \cos \omega t [\cos 3\theta + \cos 3(\theta - 120^\circ) + \cos 3(\theta - 240^\circ)] \\ = 3F_{\phi 3} \cos \omega t \cos 3\theta$$

而其它次谐波 5 次, 7 次相互后为 0, \therefore 不存在其它次谐波

4. 10 一台三角形联接的定子绕组, 当绕组内有一相断线时, 产生的磁动势是什么磁动势?

Δ 联接的定子绕组, 内有一相断线时, 设 C 相断线, 即 $i_c = 0$

$$F_A = F_{\phi 1} \cos \omega t \cos \theta \quad F_B = F_{\phi 1} \cos(\omega t - 120^\circ) \cos(\theta - 120^\circ) \\ f_1(t, \theta) = F_A + F_B = \frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos(\omega t - \theta) + \frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos(\omega t + \theta) \\ = \frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos(\omega t - \theta) + \frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos(\omega t + \theta + 240^\circ) \\ = F_{\phi 1} \cos(\omega t - \theta) + \frac{1}{2} F_{\phi 1} [\cos(\omega t + \theta) + \cos(\omega t + \theta - 120^\circ)] \\ = f_{1+}(t, \theta) + f_{1-}(t, \theta) \quad \text{是相同图形旋转磁场 (可参考教材 } P_{204} \sim P_{205} \text{)}$$

4. 11 把三相感应电动机接到电源的三个接线头对调两根后, 电动机的转向是否会改变? 为什么?

改变, 由于三相绕组产生的合成旋转磁动势方程的转向取决于电流的相序, 因此相序反了, 旋转磁场方向改变, 转向改变。

4. 12 试述三相绕组产生的高次谐波磁动势的极对数、转向、转速和幅值。它们所建立的磁场在定子绕组内的感应电动势的频率是多少?

$$P_v = vp$$

转向: 5 次谐波与基波转向相反, 7 次谐波相同

$$\text{转速: } n_v = \frac{1}{v} n_1 = \frac{1}{v} \frac{60f}{p} \quad \text{幅值: } F_v = \frac{3}{2} F_{\phi v} = \frac{1}{v} \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \frac{Nk_{av}}{p} I$$

$$\text{感应电动势的频率 } f = \frac{P_v n_v}{60} = \frac{vp \cdot \frac{n_1}{v}}{60} = \frac{pn_1}{60} \text{ 即等于产生磁场的定子电流频率 } f$$

4. 13 短距系数和分布系数的物理意义是什么? 试说明绕组系数在电动势和磁动势方面的统一性。

短距匝数: 绕组由整距改为短距时, 产生的电动势 (或磁动势) 所打的折扣。

分布匝数: 绕组由集中改为分布时产生的电动势 (或者磁动势) 所打的折扣

电动势的绕组系数与磁动势的绕组系数计算公式完全相同，表明电动势和磁动势具有相似性，时间波和空间波具有统一性

4.14 定子绕组磁场的转速与电流频率和极对数有什么关系？一台 50Hz 的三相电机，通入 60Hz 的三相对称电流，如电流的有效值不变，相序不变，试问三相合成磁动势基波的幅值、转速和转向是否会改变？

定子绕组磁场的转速 $n_1 = \frac{60f}{p}$ f —电流频率 P —极对数

合成磁动势基波幅值： $1.35 \frac{Nk_{N1}}{P} I$ 不变，转速 $n = \frac{60f}{P}$ 改变

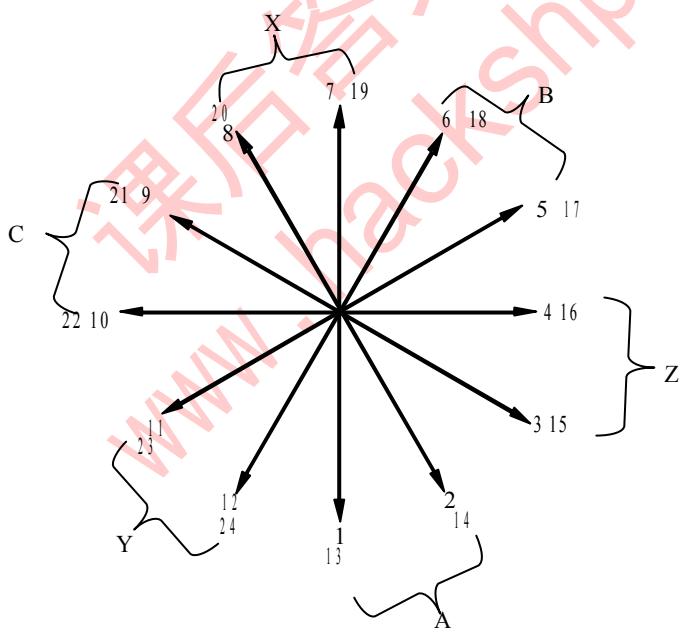
是原来的 $\frac{60}{50} = 1.2$ 倍 转向： \because 相序不变， \therefore 转向不变

4.15 有一双层三相绕组， $Z=24$ ， $2P=4$ ， $\alpha=2$ ，试绘出：

(1) 槽电动势星形图；

(2) 叠绕组展开图。

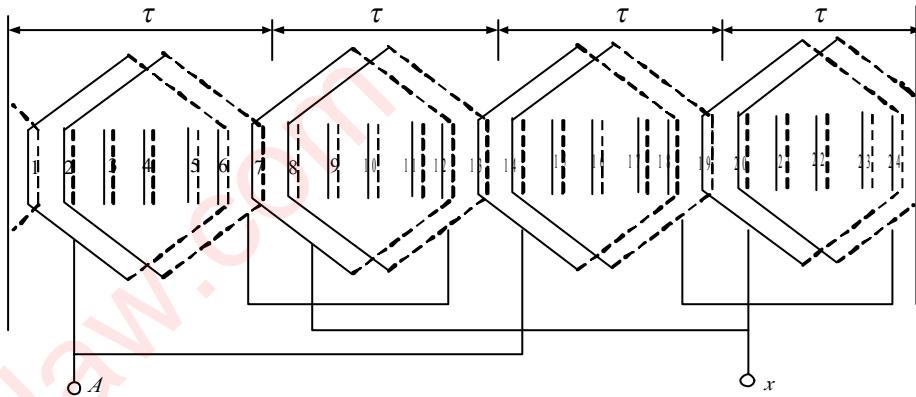
(1) 槽电动势星形图



$$q = \frac{Z}{2mp} = \frac{24}{3 \times 4} = 2 \quad \alpha_1 = \frac{P \times 360}{Z} = \frac{2 \times 360}{24} = 30^\circ \quad \tau = \frac{Z}{2p} = \frac{24}{4} = 6$$

$$y_1 = \frac{5}{6} \tau = \frac{5}{6} \times 6 = 5$$

只画一相：



首—首，尾—尾连接

4. 16 已知 $Z=24$, $2p=4$, $\alpha=1$, 试绘制三相单层同心式绕组展开图。

解: ①画槽电动势星形图

$$\alpha_1 = \frac{P360}{Z} = \frac{2 \times 360}{24} = 30^\circ \quad q = \frac{Z}{2mp} = \frac{24}{2 \times 3 \times 2} = 2 \quad \tau = \frac{Z}{2p} = \frac{24}{4} = 6$$

槽电势星形图见 4.15

4. 17 一台三相同步发电机, $f=50\text{Hz}$, $n_N=1500\text{r/min}$, 定子采用双层短距分布绕组, $q=3$, $\gamma_1/\tau=8/9$, 每相串联匝数 $N=108$, Y 联接, 每极磁通量 $\Phi_1=1.015 \times 10^{-2}\text{Wb}$, $\Phi_3=0.66 \times 10^{-2}\text{Wb}$, $\Phi_5=0.24 \times 10^{-2}\text{Wb}$, $\Phi_7=0.09 \times 10^{-2}\text{Wb}$, 试求:

- (1) 电机的极数;
- (2) 定子槽数;
- (3) 绕组系数 k_{N1} 、 k_{N3} 、 k_{N5} 、 k_{N7} ;
- (4) 相电动势 E_1 、 E_3 、 E_5 、 E_7 及合成相电动势 E_ϕ 和线电动势 E_l 。

$$(1) \quad \therefore P = \frac{60f}{n_N} = \frac{60 \times 50}{1500} = 2 \\ \therefore 2P = 4$$

$$\because q = \frac{z}{2mp}$$

$$(2) \therefore z = 2mpq = 2 \times 3 \times 2 \times 3 = 36$$

$$(3) k_{y1} = \sin\left(\frac{\gamma_1}{\tau} \cdot 90\right) = \sin\left(\frac{8}{9} \cdot 90\right) = 0.9848$$

$$k_{q1} = \frac{\sin \frac{q\alpha_1}{2}}{q \sin \frac{\alpha_1}{2}} = \frac{\sin \frac{3 \cdot 20}{2}}{3 \cdot \sin \frac{20}{2}} = 0.9598$$

$$\alpha_1 = \frac{P \cdot 360}{z} = \frac{2 \cdot 360}{36} = 20^\circ$$

$$k_{N1} = k_{y1} \cdot k_{q1} = 0.9452$$

$$k_{y3} = \sin\left(\frac{3\gamma_1}{2} \cdot 90^\circ\right) = \sin(3 \cdot 80^\circ) = -0.866$$

$$k_{q3} = \frac{\sin \frac{3q\alpha_1}{2}}{q \sin \frac{3\alpha_1}{2}} = \frac{\sin \frac{3 \cdot 3 \cdot 20}{2}}{3 \cdot \sin \frac{3 \cdot 20}{2}} = 0.6667$$

$$k_{N3} = k_{q3} k_{y3} = -0.667 \cdot 0.866 = -0.5774$$

$$k_{y5} = \sin(5 \cdot 80^\circ) = 0.6428$$

$$k_{q5} = \frac{\sin \frac{5 \cdot 3 \cdot 20}{2}}{3 \cdot \sin \frac{5 \cdot 20}{2}} = 0.2176$$

$$k_{N5} = 0.6428 \cdot 0.2176 = 0.1399$$

$$k_{y7} = \sin(7 \cdot 80^\circ) = -0.342$$

$$k_{q7} = \frac{\sin \frac{7 \cdot 3 \cdot 20}{2}}{3 \cdot \sin \frac{7 \cdot 20}{2}} = -0.1774$$

$$k_{N7} = (-0.342) \cdot (-0.1774) = 0.0607$$

$$(4) E_1 = 4.44 f N k_{N1} \phi_1 = 4.44 \cdot 50 \cdot 108 \cdot 0.9452 \cdot 1.015 \cdot 10^{-2} = 230.03(V)$$

$$E_3 = 4.44 \cdot 3 f N k_{N3} \phi_3 = 4.44 \cdot 3 \cdot 50 \cdot 108 \cdot (-0.5774) \cdot 0.66 \cdot 10^{-2} = 274.10(V)$$

$$E_5 = 4.44 \cdot 5 f N k_{N5} \phi_5 = 4.44 \cdot 5 \cdot 50 \cdot 108 \cdot 0.1399 \cdot 0.24 \cdot 10^{-2} = 40.25(V)$$

$$E_7 = 4.44 \cdot 7 f N k_{N7} \phi_7 = 9.17107$$

$$E_\phi = \sqrt{E_1^2 + E_3^2 + E_5^2 + E_7^2 + \dots} = 360.19(V)$$

$$E_L = \sqrt{3} E_\phi = 405(V)$$

4. 18 一台汽轮发电机，2极，50Hz，定子54槽每槽内两根导体， $a=1$ ， $\gamma_1=22$ 槽，Y联接。已知空载线电压 $U_0=6300V$ ，求每极基波磁通量 Φ_1 。

$$\because V_0 = 6300(V) \therefore V_{\phi 0} = \frac{V_0}{\sqrt{3}} = \frac{6300}{1.732} = 3637.41(V)$$

$$E_1 = 4.44fNk_M\phi$$

$$N = \frac{2pq}{a} N_c = \frac{2 \cdot 1 \cdot \frac{54}{2}}{1} = 18$$

$$k_{y1} = \sin\left(\frac{y_1}{\tau} \cdot 90\right) = \sin\left(\frac{22}{27} \cdot 90\right) = 0.9580$$

$$k_{q1} = \frac{\sin \frac{q\alpha_1}{2}}{q \sin \frac{\alpha_1}{2}} = 0.9555$$

$$q = \frac{z}{2mp} = \frac{54}{2 \cdot 3 \cdot 1} = 9$$

$$\alpha_1 = \frac{1 \cdot 360}{4} = 166.7^\circ$$

$$k_{N1} = k_{y1} \cdot k_{q1} = 0.9580 \cdot 0.9555 = 0.9153$$

$$\therefore \phi_1 = \frac{E_1}{4.44fNk_{N1}} = 0.9945$$

4. 19 三相双层短距绕组, $f=50\text{Hz}$, $2p=10$, $Z=180$, $y_1=15$, $N_c=3$, $a=1$, 每极基波磁通 $\phi_1=0.113\text{Wb}$, 磁通密度 $B= (\sin \theta + 0.3\sin 3\theta + 0.2\sin 5\theta) \text{T}$, 试求:

- (1) 导体电动势瞬时值表达式;
- (2) 线圈电动势瞬时值表达式;
- (3) 绕组的相电动势和线电动势的有效值。

$$(1) q = \frac{z}{2mp} = \frac{180}{2 \cdot 3 \cdot 5} = 6$$

$$\tau = \frac{z}{2p} = \frac{180}{10} = 18$$

$$\alpha_1 = \frac{P \cdot 360}{z} = \frac{5 \cdot 360}{180} = 10^\circ$$

$$N = \frac{2pq}{a} N_c = 180$$

$$k_{y1} = \sin\left(\frac{y_1}{\tau} \cdot 90\right) = \sin\left(\frac{15}{18} \cdot 90\right) = 0.9659$$

$$k_{q1} = \frac{\sin \frac{q\alpha_1}{2}}{q \sin \frac{\alpha_1}{2}} = \frac{\sin \frac{6 \cdot 10}{2}}{3 \cdot \sin \frac{10}{2}} = 0.9561$$

$$k_{N1} = k_{y1} \cdot k_{q1} = 0.9235$$

导体电动势有效值

最大值 $E_{c1} = 2.22f\phi_1 = 2.22 \cdot 50 \cdot 0.113 = 12.543$
 $E_{c1m} = \sqrt{3}E_{c1} = 17.74(V)$

$$\because \phi_1 = B_{a1}\tau l = \frac{2}{\pi} B_{m1}\tau l$$

$$\phi_3 = B_{a3}\tau l = \frac{2}{\pi} B_{m3}\tau l$$

$$\tau_3 = \frac{\tau}{3}$$

$$\therefore \frac{\phi_1}{\phi_3} = \frac{B_{m1}}{B_{m3}}$$

$$\therefore \phi_3 = \frac{B_{m3}}{3B_{m1}} \cdot \phi_1 = \frac{0.0339}{3}$$

$$\phi_5 = \frac{B_{m5}}{5B_{m1}} \cdot \phi_1 = \frac{0.2}{5} \cdot 0.113 = \frac{0.0226}{5}$$

$$\therefore E_{c3} = 2.22f\phi_3 = 2.22 \cdot 50 \cdot 0.0339 = 3.7629(V)$$

$$E_{c5} = 2.22f\phi_5 = 2.22 \cdot 50 \cdot 0.0226 = 2.5086$$

$$E_{c3m} = \sqrt{3}E_{c3} = 5.32(V)$$

$$E_{c5m} = \sqrt{3}E_{c5} = 3.547(V)$$

$$\therefore e_t = e_1 + e_3 + e_5 = 17.74 \sin \omega t + 5.32 \sin 3\omega t + 3.547 \sin 5\omega t(V)$$

$$\therefore \omega = 2\pi P \frac{n_1}{60}$$

设 $t=0$ 时 $\theta = 0$, $\therefore \theta = \omega t$

$$e_t = b(\theta)l\nu$$

(2) 线圈电动势:

$$E_{y1} = 4.44fN_c k_{y1} \phi_1 = 4.44 \cdot 50 \cdot 3 \cdot 0.9659 \cdot 0.113 \cdot 50 = 72.69(V)$$

$$E_{y1m} = \sqrt{2}E_{y1} = 1.414 \cdot 72.69 = 102.8$$

$$k_{y3} = \sin\left(\frac{3y_1}{\tau} \cdot 90\right) = \sin\left(\frac{3 \cdot 15}{18} \cdot 90\right) = -0.707$$

$$E_{y3} = 4.44fN_c k_{y3} \phi_3 = 4.44 \cdot 50 \cdot 3 \cdot (-0.707) \cdot 0.0339 \cdot 50 = -15.96(V)$$

$$E_{y3m} = \sqrt{2} \cdot 15.96 = -22.57$$

$$k_{y5} = \sin\left(\frac{5y_1}{\tau} \cdot 90\right) = \sin(5 \cdot 75) = 0.2588$$

$$E_{y5m} = 5.51(V)$$

$$\therefore e_y = 102.8 \sin \omega t - 22.57 \sin 3\omega t + 5.51 \sin 5\omega t$$

(3)

$$k_{q3} = \frac{\sin \frac{3 \cdot 6 \cdot 10}{2}}{6 \cdot \sin \frac{30}{2}} = 0.6440$$

$$k_{q5} = \frac{\sin \frac{5 \cdot 6 \cdot 10}{2}}{6 \cdot \sin \frac{50}{2}} = 0.1972$$

$$k_{N3} = k_{y3} \cdot k_{q3} = -0.4553$$

$$k_{N5} = k_{y5} \cdot k_{q5} = 0.051$$

$$\therefore E_1 = 4.44 f N_c k_{N1} \phi_1 = 4.44 \cdot 50 \cdot 180 \cdot 0.9235 \cdot 0.113 = 4170(V)$$

$$E_3 = 616.77(V)$$

$$E_5 = 46.06(V)$$

$$\therefore E_\phi = \sqrt{E_1^2 + E_3^2 + E_5^2} = 421.56(V)$$

$$E_I = \sqrt{3} \sqrt{E_1^2 + E_3^2} = 7223(V)$$

线圈中无三次谐波 故 $E_I = \sqrt{3} \sqrt{E_1^2 + E_3^2}$

4. 20 一台三相同步发电机，定子为三相双层叠绕组，Y 联接， $2p=4$ ， $Z=36$ 槽， $y_1=7 \tau/9$ ，每槽导体数为 6， $\alpha=1$ ，基波磁通量 $\Phi_1=0.75Wb$ ，基波电动势频率 $f=50Hz$ ，试求：

(1) 绕组的基波相电动势；

(2) 若气隙中还存在三次谐波磁通， $\Phi_3=0.1Wb$ ，求合成相电动势和线电动势。

$$(1) \alpha_1 = \frac{p \cdot 360}{z} = \frac{2 \cdot 360}{36} = 20^\circ$$

$$q = \frac{z}{2mp} = \frac{36}{2 \cdot 3 \cdot 2} = 3$$

$$\tau = \frac{z}{2p} = \frac{36}{4} = 9$$

$$k_{y1} = \sin\left(\frac{y_1}{\tau} \cdot 90^\circ\right) = \sin\left(\frac{7}{9} \cdot 90^\circ\right) = 0.9397$$

$$k_{q1} = \frac{\sin \frac{q\alpha_1}{2}}{q \sin \frac{\alpha_1}{2}} = \frac{\sin \frac{3 \cdot 20}{2}}{3 \cdot \sin \frac{20}{2}} = 0.9598$$

$$k_{N1} = k_{y1} \cdot k_{q1} = 0.9019$$

$$N = \frac{2pq}{\alpha} N_c = \frac{4 \cdot 3}{1} \cdot 3 = 36$$

$$E_1 = 4.44 f N_c k_{N1} \phi_1 = 4.44 \cdot 50 \cdot 36 \cdot 0.9019 \cdot 0.75 = 5406(V)$$

$$(2) k_{y3} = \sin(3 \cdot 70) = -0.5$$

$$k_{q3} = \frac{\sin \frac{3 \cdot 3 \cdot 20}{2}}{3 \cdot \sin \frac{3 \cdot 20}{2}} = 0.6667$$

$$k_{N3} = k_{y3} \cdot k_{q3} = -0.3333$$

$$E_3 = 4.44 f N k_{N3} \phi_3 = 4.44 \cdot 50 \cdot 36 \cdot 0.3333 \cdot 0.1 \cdot 3 = 799.11(V)$$

$$E_\phi = \sqrt{E_1^2 + E_3^2} = 5462(V)$$

$$E_7 = \sqrt{3} E_1 = 9363(V)$$

注：因为星接，故线电势中无三次谐波

4. 21 JO2-82-4 三相感应电动机， $P_N=40kW$ ， $U_N=38V$ ， $I_N=75A$ ，定子绕组采用三角形联接，双层叠绕组，4极，48槽， $y_1=10$ 槽，每极导体数为22， $a=2$ ，试求：

- (1) 计算脉振磁动势基波和3、5、7等次谐波的振幅，并写出各相基波脉振磁动势的表达式；
- (2) 当B相电流为最大值时，写出各相基波磁动势的表达式；
- (3) 计算三相合成磁动势基波及5、7、11次谐波的幅值，并说明各次谐波的转向、极对数和转速；
- (4) 写出三相合成磁动势的基波及5、7、11次谐波的表达式；
- (5) 分析基波和5、7、11次谐波的绕组系数值，说明采用短距和分布绕组对磁动势波形有什么影响。

$$(1) I_\phi = \frac{I_N}{\sqrt{3}} = \frac{75}{\sqrt{3}} = 43.3(A)$$

$$\alpha_1 = \frac{p \cdot 360}{z} = \frac{2 \cdot 360}{48} = 15^\circ$$

$$q = \frac{48}{4 \cdot 3} = 4$$

$$\tau = \frac{48}{4} = 12$$

$$k_{y1} = \sin\left(\frac{y_1}{\tau} \cdot 90^\circ\right) = \sin\left(\frac{10}{12} \cdot 90^\circ\right) = 0.9659$$

$$k_{q1} = \frac{\sin \frac{q\alpha_1}{2}}{q \sin \frac{\alpha_1}{2}} = \frac{\sin \frac{4 \cdot 15}{2}}{4 \cdot \sin \frac{15}{2}} = 0.9577$$

$$k_{N1} = k_{y1} \cdot k_{q1} = 0.925$$

$$N = \frac{2pq}{a} N_c = \frac{4 \cdot 4}{2} \cdot 11 = 88$$

$$F_{\phi 1} = 0.9 \frac{Nk_{N1}}{P} I_{\phi} = 0.9 \cdot \frac{88 \cdot 0.925}{2} \cdot 43.3 = 1586.1$$

$$k_{N3} = k_{y3} \cdot k_{q3} = -0.4619$$

$$k_{N5} = k_{y5} \cdot k_{q5} = 0.05314$$

$$k_{N7} = k_{y7} \cdot k_{q7} = -0.040776$$

$$F_{\phi 3} = 0.9 \cdot \frac{88 \cdot (-0.4619)}{2 \cdot 3} \cdot 43.3 = -264$$

$$F_{\phi 5} = 0.9 \cdot \frac{88 \cdot 0.05314}{5 \cdot 2} \cdot 43.3 = 18.24$$

$$F_{\phi 7} = 0.9 \cdot \frac{88 \cdot (-0.040776)}{7 \cdot 2} \cdot 43.3 = -9.99$$

(2)

$$F_{A1} = 1586.1 \cos wt \cos \theta$$

$$F_{B1} = 1586.1 \cos(wt - 120^\circ) \cos(\theta - 120^\circ)$$

$$F_{C1} = 1586.1 \cos(wt - 240^\circ) \cos(\theta - 240^\circ)$$

$$(3) \quad F_1 = 1.35 \frac{Nk_{N1}}{P} I_{\phi} = \frac{3}{2} \cdot 1586.1 = 2379.2$$

$$\text{基波: 正转, } n_1 = \frac{60f}{P} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500 \text{ rpm, } p = 2$$

$$5 \text{ 次谐波: } F_5 = \frac{3}{2} F_{\phi 5} = 1.5 \cdot 18.24 = 27.36$$

$$\text{反转, } n_5 = \frac{n_1}{5} = 300 \text{ rpm, } p_v = vp = 10 \text{ 对极}$$

$$7 \text{ 次谐波: } F_7 = \frac{3}{2} F_{\phi 7} = 1.5 \cdot (-9.99) = -15$$

$$\text{正转, } n_7 = \frac{1500}{7} = 214.3 \text{ rpm, } p_v = vp = 14$$

$$k_{N11} = \sin 11 \cdot 75^\circ \cdot \frac{\sin(11 \cdot 30^\circ)}{4 \cdot \sin(11 \cdot 7.5)} = 0.9659 \cdot \frac{-0.5}{3.9658} = -0.1218$$

$$F_{\phi 11} = 0.9 \cdot \frac{88 \cdot (-0.1218)}{11 \cdot 2} \cdot 43.3 = -18.98$$

$$F_{11} = \frac{3}{2} F_{\phi 11} = 1.5 \cdot (-18.98) = -28.47$$

$$\text{反转, } p_{11} = 11 \cdot 2 = 22 \text{ 对极} \quad n_{11} = \frac{1500}{11} = 136.36 \text{ rpm}$$

$$(4) \quad f_1(t, \theta) = F_1 \cos(wt - \theta) = 2379.2 \cos(wt - \theta)$$

$$f_5(t, \theta) = 27.36 \cos(wt + 5\theta)$$

$$f_7(t, \theta) = -15 \cos(wt - 7\theta)$$

$$f_{11}(t, \theta) = -28.47 \cos(wt + 11\theta)$$

$$(15) |k_{N1}|:|k_{N5}|:|k_{N7}|:|k_{N11}| = 1:0.0574:0.0441:0.1317$$

采用短距分布后，5，7次谐波幅大为减少

4.22 一台 50000 kW 的 2 极汽轮发电机，50Hz，三相， $U_N=10.5$ kV 星形联接， $\cos \phi_N=0.85$ ，定子为双层叠绕组， $Z=72$ 槽，每个线圈一匝， $y_1=7$ ， $\alpha=2$ ，试求当定子电流为额定值时，三相合成磁动势的基波，3、5、7 次谐波的幅值和转速，并说明转向。

$$I_\phi = \frac{P_N}{\sqrt{3}U_N \cos \phi_N} = \frac{5000}{\sqrt{3} \cdot 10.5 \cdot 0.85} = 3234.55(A)$$

$$\alpha_1 = \frac{p \cdot 360}{z} = \frac{2 \cdot 360}{72} = 5^\circ$$

$$q = \frac{72}{2 \cdot 3} = 12$$

$$\tau = \frac{72}{2} = 36$$

$$k_{N1} = k_{y1} \cdot k_{q1} = \sin\left(\frac{y_1}{\tau} \cdot 90^\circ\right) \frac{\sin \frac{q\alpha_1}{2}}{q \sin \frac{\alpha_1}{2}} = 0.8976$$

$$k_{N5} = \sin 5 \cdot 70^\circ \cdot \frac{\sin(5 \cdot 30^\circ)}{12 \cdot \sin(5 \cdot 2.5)} = -0.03342$$

$$k_{N7} = \sin 4 \cdot 90^\circ \cdot \frac{\sin(21^\circ)}{12 \cdot \sin(7 \cdot 2.5)} = -0.1061$$

$$N = \frac{2pq}{\alpha} N_c = \frac{2 \cdot 12}{2} \cdot 1 = 12$$

$$F_1 = 1.35 \frac{Nk_{N1}}{P} I_\phi = 52399.71 \cdot 0.8976 = 47034 \quad (\text{A/极})$$

$$n_1 = \frac{60f}{P} = 3000 rpm \quad \text{反转}$$

三次谐波：0

$$F_5 = 1.35 \frac{Nk_{N5}}{5P} I_\phi = \frac{52399.11}{5} \cdot 0.03342 = 350 \quad (\text{A/极})$$

$$n_5 = \frac{3500}{5} = 600 rpm \quad \text{反转}$$

$$F_7 = \frac{52399.71}{7} \cdot 0.03342 = 250.2 \quad (\text{A/极})$$

$$n_7 = \frac{3000}{7} = 428.6 rpm \quad \text{反转}$$

4.23 (1) 图 a 中通入正序电流：含产生旋转磁场，从超前相 A 相绕组轴线转向滞后相 B 相绕组轴线即 A-B-C，所以为逆时针方向。

图 a 中通入负序电流：含产生旋转磁场，为顺时针方向

图 b 中通入正序电流：会产生旋转磁场，为顺时针方向

图 b 中通入负序电流：会产生旋转磁场，为逆时针方向

(2) a 图：

$$f_{A1} = F_{\phi A1} \cos \omega t \cos \theta$$

$$f_{B1} = F_{\phi B1} \cos(\omega t - 110^\circ) \cos(\theta - 120^\circ)$$

$$f_{C1} = F_{\phi C1} \cos(\omega t - 250^\circ) \cos(\theta - 240^\circ)$$

$$F_{\phi A1} = 0.9 \frac{Nk_{N1}}{P} I_A = 100F$$

$$F_{\phi B1} = 80F$$

$$F_{\phi C1} = 90F$$

$$\begin{aligned} f = f_{A1} + f_{B1} + f_{C1} &= 50F[\cos(\omega t - \theta) + \cos(\omega t + \theta)] \\ &+ 40F[\cos(\omega t - \theta + 10^\circ) + \cos(\omega t + \theta - 230^\circ)] + \\ &45F[\cos(\omega t - \theta - 10^\circ) + \cos(\omega t + \theta - 49^\circ)] \\ &= 50F[\cos(\omega t - \theta) + \cos(\omega t + \theta)] \end{aligned}$$

4.24 在对称的两相绕组(空间差 90° 电角度)内通以对称的两相电流(时间上差 90°), 试分析所产生的合成磁动势基波, 并由此论证“一旋转磁动势可以用两个脉振磁动势来代表”。

设 A 绕组通入的电流为:

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

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

$$\begin{aligned} \text{则 } f_{A1} &= F_{\phi 1} \cos \omega t \cos \theta \\ f_{B1} &= F_{\phi 1} \cos(\omega t - 90^\circ) \cos(\theta - 90^\circ) \end{aligned}$$

因为两相绕组对称, 两相电流又对称, 所以 A 相 B 相产生的磁势幅值相等

$$\begin{aligned} f = f_{A1} + f_{B1} &= \frac{F_{\phi 1}}{2} \cos(\omega t - \theta) + \frac{F_{\phi 1}}{2} \cos(\omega t + \theta) \\ &+ \frac{F_{\phi 1}}{2} \cos(\omega t - \theta) + \frac{F_{\phi 1}}{2} \cos(\omega t + \theta - 180^\circ) \quad \text{为旋转磁势} \\ &= F_{\phi 1} \cos(\omega t - \theta) \end{aligned}$$

$$\omega t - \theta = 0 \therefore \frac{d\theta}{dt} = \omega$$

$$\begin{aligned} \text{转速: 令 } \Omega &= \frac{1}{P} \frac{d\theta}{dt} = \frac{2\pi n_1}{60} = \frac{\omega}{P} \\ \therefore n_1 &= \frac{60f}{P} \end{aligned}$$

方向: 从超前相电流所在相位转到滞后相 B 相即: A-B

可见旋转磁势可分解为空间和时间相位上都差 90° 的两个脉振磁势

4.25 (1)

$$\begin{aligned}f_{A1} &= F_{\phi 1} \sin \omega t \cos \theta \\f_{B1} &= -F_{\phi 1} \sin \omega t \cos(\theta - 240^\circ) \\f_{C1} &= 0\end{aligned}$$

(2)

$$\begin{aligned}f &= f_{A1} + f_{B1} + f_{C1} = F_{\phi 1} \sin \omega t \cos \theta - F_{\phi 1} \sin \omega t (\cos \theta \cos 240^\circ + \sin \theta \sin 240^\circ) \\&= F_{\phi 1} \sin \omega t (\cos \theta + \frac{1}{2} \cos \theta - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \theta) \\&= F_{\phi 1} \sin \omega t (\frac{3}{2} \cos \theta - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \theta) \\&= \sqrt{3} F_{\phi 1} \sin \omega t \cos(\theta + 30^\circ)\end{aligned}$$

4. 26 一台三相四极交流电机，定子三相对称绕组 A、B、C 分别通以三相对称电流 $i_A = 10 \sin \omega t A$ 、 $i_B = 10 \sin(\omega t - 120^\circ) A$ 、 $i_C = 10 \sin(\omega t - 240^\circ) A$ ，求：

(1) 当 $i_A = 10A$ 时，写出各相基波磁动势的表达式以及三相合成磁动势基波的表达式，用磁动势矢量表示出基波合成磁动势的空间位置；

(2) 当 i_A 由 10A 降至 5A 时，基波合成磁动势矢量在空间上转过了多少个圆周？

$$F_{\phi A1} = 0.9 \frac{Nk_{M1}}{P} I_p = 9 \frac{Nk_{M1}}{P}$$

$$(1) f_{A1} = F_{\phi 1} \sin \omega t \cos \theta$$

$$f_{B1} = F_{\phi 1} \sin(\omega t - 120^\circ) \cos(\theta - 120^\circ)$$

$$f_{C1} = F_{\phi 1} \sin(\omega t - 240^\circ) \cos(\theta - 240^\circ)$$

$$\text{当 } i_A = 10A \quad \omega t = \frac{\pi}{2}$$

$$\therefore f_{A1} = F_{\phi 1} \cos \theta$$

$$f_{B1} = -\frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos(\theta - 120^\circ)$$

$$f_{C1} = -\frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos(\theta - 240^\circ)$$

三相合成：

$$\therefore f_1 = \frac{3}{2} F_{\phi 1} \sin(\omega t - \theta) = \frac{3}{2} F_{\phi 1} \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) = \frac{3}{2} F_{\phi 1} \cos \theta$$

(2) 当 i_A 从 10A 降至 5A 时，在时间上经过 60° 电角度

$$\text{即 } wt = \frac{\pi}{3} \quad \therefore t = \frac{\pi}{3w} = \frac{1}{300}$$

\therefore 四极电机转速为 $n_1 = 1500 \text{ rmp}$

$$\therefore \frac{1}{300} \text{ 秒转 } \frac{1500}{300 \cdot 60} = \frac{1}{12} \text{ 圆周}$$

第五章 异步电机

5. 1 什么叫转差率？如何根据转差率来判断异步机的运行状态？

转差率为转子转速 n 与同步转速 n_1 之差对同步转速 n_1 之比值 $s = \frac{n_1 - n}{n_1}$ $s < 0$

为发电机状态。 $0 < s < 1$ 为电动机状态， $s > 1$ 为电磁制动状态。

5. 2 异步电机作发电机运行和作电磁制动运行时，电磁转矩和转子转向之间的关系是否一样？怎样区分这两种运行状态？

发电机运行和电磁制动运行时，电磁转矩方向都与转向相反，是制动转矩；但发电机的转向与旋转磁场转向相同，转子转速大于同步速，电磁制动运行时，转子转向与旋转磁场转向相反。

5. 3 有一绕线转子感应电动机，定子绕组短路，在转子绕组中通入三相交流电流，其频率为 f_1 ，旋转磁场相对于转子以 $n_1 = 60f_1/p$ (p 为定、转子绕组极对数) 沿顺时针方向旋转，问此时转子转向如何？转差率如何计算？

假如定子是可转动的，那么定子应为顺时针旋转（与旋转磁场方向相同）但因定子固定不动不能旋转，所以转子为逆时针旋转。 $s = \frac{n_1 + n}{n_1}$ (n 为转子转速)

5. 4 为什么三相异步电动机励磁电流的标么值比变压器的大得多？

在额定电压时异步机空载电流标么值为 30% 左右，而变压器的空载电流标么值为 50% 左右。这是因为异步机在定子和转子之间必须有空隙，使转子能在定子内圆内自动转动，这样异步机的磁路磁阻就较大，而变压器磁路中没有气隙，磁阻小，因此，相对变压器而言，异步电动机所需励磁磁动势大，励磁电流大。

5. 5 三相异步电机的极对数 p 、同步转速 n_1 、转子转速 n 、定子频率 f_1 、转子频率 f_2 、

转差率 s 及转子磁动势 F_2 相对于转子的转速 n_2 之间的相互关系如何？试填写下表中的空格。

p	$n_1 / r \cdot \text{min}^{-1}$	$n / r \cdot \text{min}^{-1}$	f_1 / Hz	f_2 / Hz	s	$n_2 / r \cdot \text{min}^{-1}$
1			50		0.03	
2		1000	50			
	1800		60	3		
5	600	-500				
3	1000				-0.2	
4			50		1	

$$n_1 = \frac{60f_1}{p} \quad s = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad f_2 = sf_1$$

$$\dot{F}_2 \text{ 相对于转子的转速 } n_2 = n_1 - n \quad \dot{F}_2 \text{ 相对于定子的转速 } n_1$$

5. 6 试证明转子磁动势相对于定子的转速为同步速度 n_1 。

转子磁势是由转子三相（或多相）对称绕组感应的三相（或多相）对称电流产生的一个旋转磁势，这个磁势相对转子的转速由转子电流的频率决定，当转子的转速为 \dot{F}_2 相对于转子的转速 n ，转差率为 s 时，转子电流的频率 $f_2 = sf_1$ ，则这个磁动势相对转子的转速为 sn_1 ，它相对定子的转向永远相同，相对定子的转速为 $sn_1 + n = \frac{n_1 - n}{n_1} n_1 + n = n_1$ ，即永远为同步速。

5. 7 试说明转子绕组折算和频率折算的意义，折算是在什么条件下进行的？

绕组折算：将异步电机转子绕组折算成一个相数为 m_1 ，匝数为 N_1 ，绕组系数为 k_{N1} 的等效转子绕组来替代原来的转子绕组，保持极对数不变。

频率折算：用一个等效的静止转子来代替原来的旋转的转子，在该静止转子回路中串入一个 $\frac{1-s}{s} R_2$ 的模拟电阻，而定子方各物理量不变。

折算的条件：保持转子磁动势不变，及转子上有功，无功率不变。

5. 8 异步电动机定子绕组与转子绕组没有直接联系，为什么负载增加时，定子电流和输入功率会自动增加，试说明其物理过程。从空载到满载，电机主磁通有无变化？

电磁势平衡方程式：知 $\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \dot{I}_{1Z}$ 当负载时，定子电流只有一个分量 \dot{I}_0 ，用以产生磁时来抵消转子磁势的作用， \therefore 虽然定转子无直接电联系，定子电流会自动增加的原因。

从空载到满载，由电势平衡方程式 $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 \because \dot{U}_1$ 基本不变， $\dot{I}_1 \uparrow$ ， $I_1 Z_1$ 略有 $\uparrow \therefore \dot{E}_1$ 略有下降，故主磁通 Φ_m 略为下降。

5. 9 异步电动机的等效电路有哪几种？等效电路中的 $[(1-s)/s]R'_2$ 代表什么意义？能否用电感或电容代替？

等效电路 
 T 形等效电路
 Γ 形 准确 Γ 形等效电路 (σ 为复数)
 换准确 Γ 形等效电路 (σ 为实数)
 简化 Γ 形等效电路 ($\sigma = 1$)

消耗在 $\frac{1-s}{s} R'_2$ 上的电功率就是电动机所产生的机械功率 P_{mec} ，它是有功功率，不能用电容或电感代替。

5. 10 异步电动机带额定负载运行时，若电源电压下降过多，会产生什么严重后果？试说明其原因。如果电源电压下降，对感应电动机的 T_{max} 、 T_{st} 、 Φ_m 、 I_2 、 s 有何影响？

$\because T_{em} = T_2 + T_0$ 负载不变 $\therefore T_{em}$ 不变 $T_{em} = C_M \Phi_m I_2 \cos \varphi_2$ 如电压下降过多 $\Phi_m \downarrow$ ，
 为保持 T_{em} 不变， $I_2 \uparrow \rightarrow I_1 \uparrow$ 易烧毁电机。

$$T_{\max} = \frac{1}{\Omega_1} \frac{m_1 U_1^2}{2(R_1 + \sqrt{R_1^2 + (x_{1\sigma} + x_{2\sigma}^*)^2})^2} \quad \therefore U_1 \downarrow \quad T_{\max} \downarrow \quad T_{\max} \propto U_1^2$$

$$T_{st} = \frac{1}{\Omega_1} \frac{m_1 U_1^2 R_2}{(R_1 + R_2)^2 + (x_{1\sigma} + x_{2\sigma}^*)^2} \quad \therefore U_1 \downarrow \quad T_{st} \downarrow \quad T_{st} \propto U_1^2 \quad \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1$$

$$\therefore E_1 \approx U_1 \quad E_1 = 4.44 f_1 N_1 k_{N1} \Phi_m \quad \therefore U_1 \downarrow \Phi_m \downarrow$$

$$\text{转矩 } T_{em} = C_M \Phi_m I_2 \cos \varphi_2 \text{ 不变, } \Phi_m \downarrow I_2 \uparrow \quad \therefore T_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega_1} \quad \Omega_1 \text{ 为常数 } T_{em} \text{ 不变}$$

$$R_{em} \text{ 不变 } \quad S = \frac{P_{cu2}}{P_{em}} \quad \therefore P_{cu2} = m_1 I_2^2 R_2 \quad \therefore I_2 \uparrow \quad \therefore P_{cu2} \uparrow \quad \therefore S \uparrow \quad (\text{或者 } U_1 \downarrow, \quad T_{em} \text{ 成平})$$

方下降, 而负载转矩不变: $n \downarrow S \uparrow$)

5. 11 漏电抗大小对异步电动机的运行性能, 包括起动电流、起动转矩、最大转矩、功率因数等有何影响? 为什么?

$$I_{st} = \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + R_2)^2 + (X_{1r} + X_{2\sigma}^*)^2}} \quad T_{st} = \frac{1}{\Omega_1} \frac{m_1 U_1^2 R_2}{(R_1 + R_2)^2 + (X_{1\sigma} + X_{2\sigma}^*)^2}$$

$$T_{\max} = \frac{1}{\Omega_1} \frac{m_1 U_1^2}{2[R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + X_{2\sigma}^*)^2}]} \quad \cos \varphi_1 \approx \frac{x_{1\sigma} \cdot x_{2\sigma}^*}{R_1 + R_2 / S}$$

\therefore 漏电抗与 I_{st} , T_{st} , T_{\max} 成反比, 与 $\cos \varphi_1$ 成正比

5. 12 某绕线转子异步电动机, 如果 (1) 转子电阻增加一倍; (2) 转子漏电抗增加一倍; (3) 定子电压的大小不变, 而频率由 50Hz 变为 60Hz, 各对最大转矩和起动转矩有何影响?

(1) R_2 增加一倍, T_{st} 增加, T_{\max} 不变

(2) $x_{\sigma} + x_{2\sigma}^*$ 增加一倍, T_{st} 减小, T_{\max} 减小

(3) f_1 由 50Hz 变为 60Hz, 相当于 $x_{\sigma} + x_{2\sigma}^*$ 增加, 且分母增大了 $\therefore T_{st}$, T_{\max} 减小

5. 13 一台笼型异步电动机, 原来转子是插铜条的, 后因损坏改为铸铝的, 在输出同样转矩的情况下, 下列物理量将如何变化?

(1) 转速 n ;

$$R_2 \uparrow T_{em} = \frac{1}{\Omega_1} \frac{m_1 U_1^2 R_2 / S}{(R_1 + R_2 / S)^2 + (X_{1\sigma} + X_{2\sigma}^*)^2} \quad T_{em} \downarrow \quad \text{而负载转矩不变, } \therefore n \text{ 下降}$$

(2) 转子电流 I_2 ;

负载转矩不变, T_{em} 基本不变, $\therefore T_{em} = C_m \Phi_m I_2 \cos \varphi_2 \therefore I_2$ 基本不变。

(3) 定子电流 I_1 ;

$I_1 = I_2 \therefore I_1$ 基本不变。

(4) 定子功率因数 $\cos \varphi_1$;

(5) 输入功率 P_1 ;

T_2 基本不变 $\therefore P_1$ 基本不变。

(6) 输出功率 P_2 ;

$P_2 \downarrow$ ($\because R_2 \uparrow P_{cu2}$ 增大)

(7) 效率 η ;

$\eta \downarrow$ \because 损耗减小

(8) 起动转矩 T_{st} ;

$T_{st} \uparrow$

(9) 最大电磁转矩 T_{max} 。

T_{max} 不变

5. 14 绕线式三相异步电动机转子回路串入适当的电阻可以增大起动转矩，串入适当的电抗时，是否也有相似的效果？

转子侧串入电抗，不能增大起动转矩 \because 串入电抗后 $I_2 \downarrow$ 虽然 Φ_m 增大了，但 $\cos \varphi_2$ 下降 \therefore 总起来起动转矩 $T_{st} = C_m \Phi_m I_2 \cos \varphi_2$ 仍然不能增大。

5. 15 普通笼型异步电动机在额定电压下起动时，为什么起动电流很大而起动转矩不大？但深槽式或双笼电动机在额定电压下起动时，起动电流较小而起动转矩较大，为什么？

I_{st} 大的原因是：在刚启动时，转子处于静止状态，旋转磁场以较大的转速切割转子导环，在转子中产生较大的电势，因而产生较大的电流，由磁势平衡关系，定子中也将流过较大的电流。

T_{st} 不大的原因是：在刚起动时， $n=0, s=1$ ，转子频率较高，转子电抗较大，转子边的功率因数很低，由 $T_{em} = C_m \Phi_m I_2 \cos \varphi_2$ $E_2 \approx \frac{1}{2} U_1$ $\Phi_{mst} = \frac{1}{2} \Phi_m$ 知，最初起动时，虽然 I_2 较大，但因 $\cos \varphi_2$ 很低， $\therefore T_{st}$ 仍然不大。

对深槽和双鼠笼异步电动机在起动时 $f_2 = f_1$ ，有明显的集肤效应，即转子电流在转子导体表面流动，相等于转子导体截面变小，电阻增大，即相等于转子回路串电阻，使 $I_{st} \downarrow, T_{st} \uparrow$ 当起动完毕后， $f_2 = sf_1$ 很小，没有集肤效应，转子电流流过的导体截面积增大，电阻减小，相当于起动时转子回路所串电阻去掉，减小了转子铜损耗。

提高了电机的效率。

5. 16 绕线转子异步电动机在转子回路中串入电阻起动时，为什么既能降低起动电流又能增大起动转矩？试分析比较串入电阻前后起动时的 Φ_m 、 I_2 、 $\cos \varphi_2$ 、 T_{st} 是如何变化的？串入的电阻越大是否起动转矩越大？为什么？

绕线式转子串入电阻 R_Ω 后，转子电流减小，定子电流也减小，但起动转矩增大，这是因为：在起动时， $s=1$ ，虽然串入 R_Ω 导致 I_2 减小，但却使得 $E_1 \approx U_1$ 且串电阻前

由于 $R_1 \approx R_2$ ， $x_{1\sigma} \approx x_{2\sigma} \therefore E_1 \approx \frac{1}{2}U_1$

② Φ_m 较大，接近正常运行时的主磁通，转子回路功率因数

③ $\cos \varphi_2 = \frac{R_2 + R_\Omega}{\sqrt{(R_2 + R_\Omega)^2 + x_{2\sigma}^2}}$ 增大，综合三个因素， $T_{st} \uparrow$

一般情况下，串入电阻后， I_2 和 I_1 将变小， Φ_m 基本不变，严格地讲，随 I_1 变小， Φ_m 会大一点 ($\because -\dot{E}_1 = \dot{U}_1 - \dot{I}_1 Z_1$ 变小， $\Phi_m \uparrow$)， $\cos \varphi_2$ 将明显提高 T_{st} 明显增加， $I_{st} \downarrow$ 因为 $\cos \varphi_2$ 最大为 1，接近 1 时变化不大了，相反，电阻率大了，电流明显减小， T_{st} 反而会变小， \therefore 并不是串电阻越大，起动转矩越大。

5. 17 两台同样的笼型异步电动机共轴连接，拖动一个负载。如果起动时将它们的定子绕组串联以后接至电网上，起动完毕后再改接为并联。试问这样的起动方法，对起动电流和转矩的影响怎样？

通过串联起动，使每台电动机定子绕组电压为并联起动时候的 $\frac{1}{2}$ 因此 T_{st} 为并联时的 $\frac{1}{4}$ ， I_{st} 为并联起动时的 $\frac{1}{2}$ ，而电网供给的起动电流为并联时的 $\frac{1}{4}$ (\because 电网供给的电流并联是一台起动电流的 2 倍)

5. 18 绕线式三相异步电动机拖动恒转矩负载运行，试定性分析转子回路突然串入电阻后降速的电磁过程。

5. 19 绕线式三相异步电动机拖动恒转矩负载运行，在转子回路接入一个与转子绕组感应电动势同频率、同相位的外加电动势，试分析电动机的转速将如何变化？

5. 20 单绕组变极调速的基本原理是什么？一台四极异步电动机，采用单绕组变极方法变为两极电机时，若外加电源电压的相序不变，电动机的转向将会这样？

5. 21 为什么在变频恒转矩调速时要求电源电压随频率成正比变化？若电源的频率降低，而电压的大小不变，会出现什么后果。

5. 22 如果电网的三相电压显著不对称，三相异步电动机能否带额定负载长期运行？为什么？

5. 23 已知某一台三相异步电动机在额定电压下直接起动时，起动电流等于额定电流的 6 倍，试计算当电网三相电压不对称、负序电压分量的大小等于额定电压 10%、电机带额定负载运行时，定子相电流可能出现的最大值是额定电流的多少倍？这样的运行情况是否允许？为什么？

5. 24 三相异步电动机在运行时有一相断线，能否继续运行？当电机停转之后，能否再起动？
5. 25 怎样改变单相电容电动机的旋转方向？对罩极式电动机，如不改变其内部结构，它的旋转方向能改变吗？
5. 26 试画出三相笼型异步电动机由单相电网供电、当作单相电动机应用时的接线原理图。
5. 27 感应调压器与自耦变压器相比，有何优缺点？
5. 28 已知一台型号为 J02-82-4 的三相异步电动机的额定功率为 55kW，额定电压为 380V，额定功率因数为 0.89，额定效率为 91.5%，试求该电动机的额定电流

$$P_N = \sqrt{3}U_N I_N \cos \varphi_N \eta_N \therefore I_N = \frac{P_N}{\sqrt{3}U_N \cos \varphi_N \eta_N} = \frac{55 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 380 \times 0.89 \times 91.5\%} = 102.62(A)$$

5. 29 已知某异步电动机的额定频率为 50Hz，额定转速为 970r/min，问该电机的极数是多少？额定转差率是多少？

$$\therefore n_N = 970 \text{ r/min} \quad n_1 = 1000 \text{ r/min} \quad n_1 = \frac{60f}{P} \quad \therefore P = \frac{60 \times 50}{1000} = 3 \text{ 极数为 6 极。}$$

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{1000 - 970}{1000} = 0.3$$

5. 30 一台 50Hz 三相绕线式异步电动机，定子绕组 Y 联接，在定子上加额定电压。当转子开路时，其滑环上测得电压为 72V，转子每相电阻 $R_2 = 0.6\Omega$ ，每相漏抗

$X_{2\sigma} = 4\Omega$ 。忽略定子漏阻抗压降，试求额定运行 $s_N = 0.04$ ，时，

(1) 转子电流的频率；

$$\text{转子电流的频率 } f_2 = s_N f_1 = 0.04 \times 50 = 2(\text{Hz})$$

(2) 转子电流的大小；

滑环上测得电压为 72V，这是线电压，相电压为 $\frac{72}{\sqrt{3}}$ \because 转子开路，且忽略定子漏阻

抗压降，说明转子上的电压为 $V_2 = \frac{72}{\sqrt{3}}$ $R_2' = k_e k_r R_2 \quad X_{2\sigma}' = k_e k_r X_{2\sigma}$

$$\therefore I_2' = \frac{U_2'}{\sqrt{(\frac{R_2'}{s})^2 + (X_{2\sigma}')^2}} = \frac{k_e U_2}{k_e k_r \sqrt{(\frac{R_2}{s})^2 + X_{2\sigma}^2}} = \frac{\frac{72}{\sqrt{3}}}{k_r \sqrt{(\frac{0.6}{0.04})^2 + 4^2}} = 2.68 \quad \therefore I_2 = k_r I_2' = 2.68(A)$$

(3) 转子每相电动势的大小；

\because 转子开路时测得的转子感应电势为 $E_2 = \frac{72}{\sqrt{3}} = 41.57(V)$ 此时转子不转，即

$$S = 1, \text{ 当 } S_N = 0.04 \text{ 时 } E_{2s} = S E_2 = 0.04 \times 41.57 = 1.66(V)$$

(4) 电机总机械功率。

$$P_{mec} = m_1 \frac{1-s}{s} R_2' I_2' = m_2 I_2'^2 \frac{1-s}{s} R_2 = 3 \times 2.68^2 \times \frac{1-0.04}{0.04} \times 0.6 = 310.3(V)$$

5. 31 已知一台三相异步电动机的数据为： $U_N = 380V$ ，定子 Δ 联接，50Hz，额定转速

$$n_N = 1426 \text{ r/min}, \quad R_1 = 2.865\Omega, \quad X_{1\sigma} = 7.71\Omega, \quad R_2' = 2.82\Omega, \quad X_{2\sigma}' = 11.75\Omega,$$

R_m 忽略不计， $X_m = 202\Omega$ 。试求：

(1) 极数;

解: $\because n_N = 1426 \text{ r/min} \quad \therefore n_1 = 1500 \text{ r/min} \quad \therefore P=2$, 即 $2P=4$

(2) 同步转速;

$$n_1 = 1500 \text{ r/min}$$

(3) 额定负载时的转差率和转子频率;

$$s = \frac{n_1 - n_N}{n_1} = \frac{1500 - 1426}{1500} = 0.0493 \quad f_2 = sf_1 = 0.0493 \times 50 = 2.467(\text{Hz})$$

(4) 绘出 T 型等效电路并计算额定负载时的 I_1 、 P_1 、 $\cos \varphi_1$ 和 I_2' 。

$$Z_2' = \frac{R_2'}{s} + jX_{2\sigma}' = \frac{2.82}{0.0493} + j11.75 = 57.2 + j11.75 = 58.4 \angle 11.61^\circ$$

$$X_m \parallel Z_2' = \frac{X_m \cdot Z_2'}{X_m + Z_2'} = \frac{j202 \times 58.4 \angle 11.61}{j202 + 57.2 + j11.75} = \frac{11796 \angle 101.61}{57.2 + j213.75} = \frac{11796 \angle 101.61}{221.2 \angle 75} = 53.31 \angle 26.59^\circ$$

$$\begin{aligned} Z &= R_1 + jX_{1\sigma} + X_m \parallel Z_2' = 2.865 + j7.71 + 47.67 + j23.86 = 50.535 + j31.57 \\ &= 59.59 \angle 31.99^\circ \end{aligned}$$

$$\therefore I_1 = \frac{U_1}{Z} = \frac{380 \angle 0}{59.59 \angle 31.99} = 6.337 \angle -31.99^\circ \text{ 定子电流为 } \sqrt{3} I_1 = 11.04(A)$$

$$P_1 = \sqrt{3} U_1 I_1 \cos \varphi_1 = \sqrt{3} \times 380 \times 11.04 \times \cos(-31.99^\circ) = 6162.7(W)$$

$$\cos \varphi_1 = \cos(-31.99^\circ) = 0.848 \text{ (滞后)}$$

$$\dot{E}_1 = U_1 - I_1 Z_1 = 380 - 6.337 \angle -31.99^\circ \cdot 8.225 \angle 69.62^\circ = 380 - 52.45 \angle 37.63^\circ$$

$$= 380 - 41.54 - j32.02 = 338.46 - j32.02 = 339.97 \angle -5.404^\circ$$

$$\therefore I_2' = \frac{\dot{E}_1}{Z_2'} = \frac{339.97 \angle -5.404}{58.4 \angle 11.61} = 5.82 \angle -17.014^\circ (A)$$

5. 32 已知 JO2-92-4 三相异步电动机的数据为: $P_2 = 75kW$, $U_N = 380V$ (定子 Δ 联接),

$$n_N = 1480 \text{ r/min}, \quad R_1 = 0.088\Omega, \quad X_{1\sigma} = 0.404\Omega, \quad R_2' = 0.073\Omega, \quad X_{2\sigma}' = 0.77\Omega,$$

$R_m = 2.75\Omega$, $X_m = 26\Omega$, 机械损耗 $P_{mec} = 1.1kW$ 。试用 T 型、较准确 Γ 型和简化 Γ 型三种等效电路计算额定负载时的定子电流、功率因数和效率, 并对计算结果进行分析比较。

T 型等效电路:

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{1500 - 1480}{1500} = 0.01333$$

$$Z_2' = \frac{R_2'}{s} + jX_{2\sigma}' = \frac{0.073}{0.01333} + j0.77 = 5.475 + j0.77 = 5.529 \angle 8^\circ$$

$$Z_m = R_m + jX_m = 2.75 + j26 = 26.145 \angle 83.96^\circ (\Omega)$$

$$Z_m \parallel Z_2 = \frac{Z_m \cdot Z_2}{Z_m + Z_2} = \frac{26.145 \cdot 83.69 \cdot 5.52 \cdot 1.8}{28 \cdot 72.92} = 5.163 \angle 19.04^\circ (\Omega)$$

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1}{Z} = \frac{380 \angle 0^\circ}{5.38 \angle 22.8^\circ} = 70.514 \angle -22.8^\circ (A) \text{ 即 } I_1 = 70.514(A) \quad \cos \varphi_1 = 0.9219 \text{ (滞后) 为了求}$$

功率，要计算 I_2 , I_m

$$\begin{aligned} \dot{E}_1 &= \dot{E}_2 = \dot{U}_1 - \dot{I}_1 Z_1 = 380 - 70.5 \angle 22.8 \times 0.413 \angle 77.71 = 380 + 5.312 - j28.63 \\ &= 386.37 \angle -4.249(A) \end{aligned}$$

$$\therefore I_2 = \frac{386.37}{|Z_2|} = \frac{386.37}{5.529} = 69.9(A) \quad I_m = \frac{E_1}{|Z_m|} = \frac{386.37}{26.145} = 14.78(A)$$

$$\therefore P_{cu1} = 3I_1^2 R_1 = 3 \times 70.5^2 \times 0.088 = 1312(W) \quad P_{cu2} = 3I_2^2 R_2 = 3 \times 69.9^2 \times 0.073 = 1073(W)$$

$$P_{Fe} = 3I_m^2 R_m = 3 \times 14.78^2 \times 2.75 = 1802(W) \quad P_{mec} = 1100(W) \quad P_{ad} \text{ 忽略。}$$

$$\eta = 1 - \frac{\Sigma P}{P_1} = 1 - \frac{1312 + 1073 + 1802 - 1100}{3U_1 I_1 \cos \varphi_1} = \left(1 - \frac{5287}{74101}\right) = 92.9\%$$

较准确 P 型电路

5. 33 某三相异步电动机, $P_N = 10kW$, $U_N = 380V$ (线电压), $I_N = 19.8A$, 4 极,

Y 联接, $R_1 = 0.5\Omega$ 。空载试验数据为: $U_1 = 380V$ (线电压), $I_0 = 5.4A$, $P_0 = 0.425kW$,

机械损耗 $P_{mec} = 0.08kW$ 。短路试验中的一点为: $U_k = 120V$ (线电压), $I_k = 18.1A$,

$P_k = 0.92kW$ 。试计算出忽略空载附加损耗和认为 $X_{1\sigma} = X_{2\sigma}$ 时的参数 R'_2 、 $X_{1\sigma}$ 、 R_m 和

X_m 。

$$\text{空载试验: } Z_0 = \frac{U_0}{I_0} = \frac{380}{5.4} = 40.63(\Omega) \text{ 忽略 } P_{ad}$$

$$P_{Fe} = P_0 - m_1 I_0^2 R_1 - P_{mec} = 425 - 3 \times 5.4^2 \times 0.5 - 80 = 301.26(W)$$

$$R_m = \frac{P_{Fe}}{m_1 I_0^2} = \frac{301.26}{3 \times 5.4^2} = 3.444(\Omega) \text{ 或者 } k_m = \frac{425 - 80}{3 \times 5.4^2} - 0.5$$

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - k_0^2} = \sqrt{40.63^2 - 4.858^2} = 40.34(\Omega)$$

短路试验:

$$Z_k = \frac{U_k}{I_k} = \frac{120}{18.1} = 3.828(\Omega) \quad R_k = \frac{P_k}{m_1 I_k^2} = \frac{920}{3 \times 18.1^2} = 0.936(\Omega)$$

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = \sqrt{3.828^2 - 0.936^2} = 3.712(\Omega)$$

$$R'_2 = (R_k - R_1) \frac{X_0}{X_0 - X_k} = (0.936 - 0.5) \times \frac{40.34}{40.34 - 3.712} = 0.48\Omega$$

$$X_{1\sigma} = X_{2\sigma} = X_0 - \sqrt{\frac{X_0 - X_K}{X_0}} (R_2^2 + X_0^2) = 40.34 - \sqrt{\frac{40.34 - 3.712}{40.34}} \times (0.48^2 + 40.34^2) = 1.9(\Omega)$$

$$X_m = X_0 - X_{1\sigma} = 40.34 - 1.9 = 38.44(\Omega)$$

5. 34 一台三相异步电动机的输入功率为 10.7kW, 定子铜耗为 450W, 铁耗为 200W, 转差率为 $s=0.029$, 试计算电动机的电磁功率、转子铜耗及总机械功率。

$$P_{em} = P_1 - P_{cu1} - P_{Fe} = 10700 - 450 - 200 = 10050(W) \text{ 电磁功率}$$

$$P_{CU2} = SP_{em} = 0.029 \times 10050 = 291.45W$$

$$P_{mec} = (1 - S)P_{em} = 10050 - 291.45 = 9758.55W$$

5. 35 一台 JO2-52-6 异步电动机, 额定电压为 380V, 定子 Δ 联接, 频率 50Hz, 额定功率 7.5kW, 额定转速 960r/min, 额定负载时 $\cos\varphi_1 = 0.824$, 定子铜耗 474W, 铁耗 231W,

机械损耗 45W, 附加损耗 37.5W, 试计算额定负载时,

- (1) 转差率;
- (2) 转子电流的频率;
- (3) 转子铜耗;
- (4) 效率;
- (5) 定子电流。

$$(1) \quad n_1 = \frac{60f}{p} = \frac{3000}{3} = 1000 \text{ r/min}$$

$$\therefore S = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{1000 - 960}{1000} = 0.04$$

$$(2) \quad f_2 = Sf_1 = 0.04 \times 50 = 2 \text{ Hz}$$

$$(3) \quad P_{mec} = P_2 + P_{mec} + P_{ad} = 7500 + 45 + 37.5 = 7582.5 \text{ W}$$

$$P_{mec} = (1 - S)P_{em}$$

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega_1} = \frac{206.82 \times 103 \times 60}{2\pi \times 1500} = 1317 \text{ N.M}$$

$$P_{CU2} = SP_{em} = S \times \frac{P_{mec}}{1 - S} = 0.04 \times \frac{7582.5}{1 - 0.04} = 316 \text{ W}$$

$$(4) \quad \sum P = P_{CU} + P_{CU2} + P_{Fe} + P_{mec} + P_{ad} = 474 + 316 + 213 + 45 + 37.5 = 1103.5 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \sum P} = \frac{7500}{7500 + 1103.5} = 87.17\%$$

$$(5) \quad P_1 = \sqrt{3} U_1 I_1 \cos\varphi_1 = \sqrt{3} \times 380 I_1 \times 0.824$$

$$\therefore I_1 = \frac{7500 + 1103.5}{\sqrt{3} \times 380 \times 0.824} = 15.86 A$$

5. 36 一台 4 极中型异步电动机, $P_N = 200kW$, $U_N = 380V$, 定子 Δ 联接, 定子额定

电流 $I_N = 385A$, 频率 50Hz, 定子铜耗 $P_{Cu2} = 5.12kW$, 转子铜耗 $P_{Cu2} = 2.85kW$,

铁耗 $P_{Fe} = 3.8kW$, 机械损耗 $P_{mec} = 0.98kW$, 附加损耗 $P_{ad} = 3kW$,

$R_1 = 0.0345\Omega$, $X_m = 5.9\Omega$ 。正常运行时 $X_{1\sigma} = 0.202\Omega$, $R'_2 = 0.022\Omega$,

$X'_{2\sigma} = 0.195\Omega$; 起动时, 由于磁路饱和与趋肤效应的影响, $X_{1\sigma} = 0.1375\Omega$,

$R'_2 = 0.0715\Omega$, $X'_{2\sigma} = 0.11\Omega$ 。试求:

- (1) 额定负载下的转速、电磁转矩和效率;
- (2) 最大转矩倍数 (即过载能力) 和起动转矩倍数。

解: (1) $P_{mec} = P_2 + P_{mec} + P_{ad} = 200 + 0.98 + 3 = 203.98kW$

$$P_{Cu2} = SP_{em}$$

$$P_{mec} = (1 - S)P_{em}$$

$$\therefore \frac{P_{Cu2}}{P_{mec}} = \frac{S}{1 - S} \quad \text{即} \quad \frac{2.85}{203.98} = \frac{S}{1 - S}$$

$$S = 0.01378$$

$$n = (1 - S)n_1 = (1 - 0.01378) \times 1500 = 1479 \text{ r/min}$$

$$P_{em} = \frac{P_{Cu2}}{S} = \frac{2.85}{0.01378} = 206.82kW$$

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega_1} = \frac{206.82 \times 103 \times 60}{2\pi \times 1500} = 1317 \text{ N.M}$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \sum P} = \frac{200}{200 + 5.12 + 2.85 + 3.8 + 0.98 + 3} = 92.7\%$$

$$(2) T_{max} = \frac{1}{\Omega_1} \frac{m_1 u_1^2}{2(R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + X'_{2\sigma})^2})}$$

$$= \frac{60}{2\pi \times 1500} \times \frac{3 \times 380^2}{2 \times (0.0345 + \sqrt{0.0345^2 + (0.202 + 0.195)^2})} = 3186 \text{ N.m}$$

$$T_N = \frac{P_N}{\Omega} = \frac{200 \times 10^3 \times 60}{2\pi \times 1479} = 1291.97 \text{ N.m}$$

$$k_m = \frac{T_{\max}}{T_N} = \frac{3186}{1292} = 2.466$$

$$\begin{aligned}
 T_{st} &= \frac{m_1 P U_1^2 R_2'}{2\pi f_1 \left[(R_1 + R_2')^2 + (X_{1\sigma} + X_{2\sigma}')^2 \right]} \\
 &= 3 \times \frac{1 - 0.04}{0.04} \times 0.34 \times 20.5^2 = 10287.72W \\
 &= \frac{3 \times 2 \times 380^2 \times 0.0715}{2\pi \times 50 \times \left[(0.0345 + 0.0715)^2 + (0.1375 + 0.11)^2 \right]} = 2721.5 \text{ N.m} \\
 k_{st} &= \frac{T_{st}}{T_N} = \frac{2721.5}{1292} = 2.11
 \end{aligned}$$

5. 37 一台三相 8 极异步电动机的数据为: $P_N = 200kW$, $U_N = 380V$, $f = 50Hz$,

$n_N = 722r/min$, 过载能力 $k_M = 2.13$ 。试求:

- (1) 产生最大电磁转矩时的转差率;
- (2) $s=0.02$ 时的电磁转矩。

(1)

$$S_m = S_N (k_m + \sqrt{k_m^2 - 1})$$

$$\text{推倒如下: } \frac{T_N}{T_{\max}} = \frac{2}{\frac{S_N}{S_m} + \frac{S_m}{S_N}} = \frac{1}{k_m} \quad (\text{即 } T_{em} = T_N \text{ 时})$$

$$S_m^2 - 2k_m S_N S_m + \sigma_N^2 = 0 \quad \text{求一元二次方程即可}$$

$$S_N = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{750 - 722}{750} = 0.03733$$

$$S_m = 0.03733 \times (2.13 + \sqrt{2.13^2 - 1}) = 0.1497$$

(2)

$$T_N = \frac{P_N}{\Omega} = \frac{200 \times 10^3 \times 60}{2\pi \times 722} = 2646.6 \text{ N.m}$$

$$T_{\max} = k_m T_N = 2.13 \times 2646.6 = 5637.2 \text{ N.m}$$

$$\frac{T_{em}}{T_{\max}} = \frac{2}{\frac{S_m}{S} + \frac{S}{S_m}}$$

$$\frac{T_{em}}{5637.2} = \frac{2}{\frac{0.1497}{0.02} + \frac{0.02}{0.1497}} = \frac{2}{7.485 + 0.1336} = 0.2625$$

$$T_{em} = 5637.2 \times 0.2625 = 1480 \text{ N.m}$$

5. 38 一台三相 4 极异步电动机额定功率为 28kW, $U_N = 380V$, $\eta_N = 90\%$,

$\cos \varphi = 0.88$, 定子为三角形联接。在额定电压下直接起动时, 起动电流为额定电流的 6 倍, 试求用 Y-Δ 起动时, 起动电流是多少?

解:

$$I_N = \frac{P_N}{\sqrt{3}U_N \cos \varphi \eta} = \frac{28 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 380 \times 0.85 \times 0.9} = 53.72 \text{ A}$$

直接起动时的起动电流:

$$I_{st} = 6I_N = 6 \times 53.72 = 322.3 \text{ A}$$

用 Y-Δ 起动时:

$$I'_{st} = \frac{I_{st}}{3} = 107.4 \text{ A}$$

5. 39 一台三相绕线转子异步电动机, $P_N = 155 \text{ kW}$, $I_N = 294 \text{ A}$, $2p = 4$, $U_N = 380V$,

Y 联接。其参数为 $R_1 = R'_2 = 0.012 \Omega$, $X_{1\sigma} = X'_{2\sigma} = 0.06 \Omega$, $\sigma_1 \approx 1$, 电动势及电

流的变比 $k_e = k_i = 1.2$ 。现要求把起动电流限制为 3 倍额定电流, 试计算应在转子回路每相中接入多大的起动电阻? 这时的起动转矩为多少?

解:

$$I_{st} = 3I_N = 3 \times 294 = 882 \text{ A}$$

起动时阻抗:

$$|E_{st}| = \frac{U_N}{\sqrt{3}I_{st}} = \frac{380}{\sqrt{3} \times 882} = 0.249 \Omega$$

$$E_{st} = \sqrt{(R_1 + R'_2 + R'_{st})^2 + (X_{1\sigma} + X'_{2\sigma})^2}$$

$$\therefore R_1 + R'_2 + R'_{st} = \sqrt{0.249^2 + 0.06^2} = 0.218 \Omega$$

$$\therefore R'_{st} = 0.218 - 0.012 \times 2 = 0.194 \Omega$$

∴ 每相接入的起动电阻为:

$$R_{st} = \frac{R'_{st}}{k_e k_i} = \frac{0.194}{1.2^2} = 0.1347 \Omega$$

$$T_{st} = \frac{m_1 p u_1^2 (R'_2 + R'_{st})}{2\pi f_1 [(R_1 + R'_2 + R'_{st})^2 + (X_{1\sigma} + X'_{2\sigma})^2]}$$

$$= \frac{3 \times 2 \times \frac{380^2}{\sqrt{3}} \times (0.218 - 0.012)}{2 \times 3.14 \times 50 \times (0.218^2 + 0.12^2)} = 3059.7 \text{ N.m}$$

5. 40 一台 4 极绕线型异步电动机, 50Hz, 转子每相电阻 $R_2 = 0.02 \Omega$, 额定负载时

$n_N = 1480 \text{ r/min}$, 若负载转矩不变, 要求把转速降到 1100r/min, 问应在转子每相串入多大的电阻?

解:

$$n_1 = \frac{60f}{p} = \frac{60 \times 50}{2} = 1500 \text{ r/min}$$

$$S_N = \frac{n_1 - n_N}{n_1} = \frac{1500 - 1480}{1500} = 0.01333$$

$$S = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{1500 - 1100}{1500} = 0.2667$$

\because 负载转矩不变 \therefore 电磁转矩不变

$$\frac{R_2}{S_N} = \frac{R_2 + R_\Omega}{S}$$

$$R_\Omega = \left(\frac{S}{S_N} - 1 \right) R_2 = \left(\frac{0.2667}{0.01333} - 1 \right) \times 0.02 = 0.38 \Omega$$

5. 41 一台三相 4 极异步电动机, $U_{1N} = 380V$, 定子 Y 接法, $\cos \varphi_N = 0.83$ (滞后), 设

$$I_{1N} = I'_{2N} = 20.5A, \text{ 试求:}$$

- (1) 额定运行时输出功率、电磁功率和输入功率;
- (2) 额定运行时的电磁转矩和输出转矩。

$$(1) 2P=4, \quad n_1 = 1500 \text{ r/min}$$

$$(2) S_N = \frac{n_1 - n_N}{n_1} = \frac{1500 - 1426}{1500} = 0.0493$$

$$f_2 = sf_1 = 0.0493 \times 50 = 2.47 \text{Hz}$$

与 5.31 一样

$$(4) P_{em} = sP_{cu2}$$

$$P_{cu2} = 3I_2'^2 R_2' = 3 \times 5.82^2 \times 2.82 = 286 \text{W}$$

$$\therefore P_{em} = \frac{P_{cu2}}{s} = \frac{286}{0.0493} = 5812.6 \text{W}$$

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega_1} = \frac{5812.6 - 60}{2\pi \times 1500} = 37 \text{N.m}$$

5. 42 一台三相 4 极绕线式异步电动机, $f_1 = 50 \text{Hz}$, 转子每相电阻 $R_2 = 0.015 \Omega$, 额定运行时转子相电流为 200A, 转速 $n_N = 1475 \text{r/min}$, 试求:

(1) 额定电磁转矩;

$$S_N = \frac{1500 - 1475}{1500} = 0.01667$$

$$P_{em} = m_2 I_2^2 \frac{R_2}{s} = 3 \times 200^2 \times \frac{0.015}{0.01667} = 10800 \text{W}$$

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega_1} = \frac{10800}{2\pi \times 1500} = 688 \text{N.m}$$

(2) 在转子回路串入电阻将转速降至 1120r/min, 求所串入的电阻值 (保持额定电磁转矩不变);

$$S_N = \frac{1500 - 1120}{1500} = 0.2533$$

$$\frac{R_2}{S_N} = \frac{R_2 + R_\Omega}{s}$$

$$R_\Omega = \left(\frac{s}{S_N} - 1\right) R_2 = \left(\frac{0.2533}{0.01667} - 1\right) \times 0.015 = 0.213 \Omega$$

(3) 转子串入电阻前后达到稳定时定子电流、输入功率是否变化, 为什么?

\because 保持电磁转矩 T_{em} 不变, 而 $T_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega_1} \therefore P_{em}$ 不变

$$P_{em} = P_1 - P_{cu1} - P_{Fe} \quad \text{电压不变} \quad \therefore P_{Fe} \text{不变}, \quad E_1 \text{不变} \quad (E_1 \approx U_1)$$

$$I_1 = \frac{U_1 - E_1}{R_1 + jX_{1\sigma}} \text{不变}, \quad \therefore P_{cu1} \text{不变}, \quad \therefore P_1 \text{不变}.$$

5. 43 一台三相 6 极笼型异步电机, $P_N = 3 \text{kW}$, $U_N = 380 \text{V}$, 定子绕组 Y 接法,

$$R_1 = 2.08 \Omega, \quad X_{1\sigma} = 3.12 \Omega, \quad R_2' = 1.525 \Omega, \quad X_{2\sigma}' = 4.25 \Omega, \quad R_m = 4.12 \Omega,$$

$X_m = 62\Omega$ 。当转差率 s 从 1 变化到 0 时, 假设电机参数不变, 试计算电磁转矩的大小并画出 $T_{em} = f(s)$ 曲线。

$$T_2 = \frac{P_2}{\Omega} = \frac{9999.72 \times 60}{2\pi \times 1440} = 66.3(N \cdot m) \quad \Omega = \frac{2\pi n}{60} \quad n = (1-s)n_1 = 1440(\text{r/min})$$

第六章 同步电机

6. 1 同步电机和异步电机在结构上有哪些区别？

同步电机：转子直流励磁，产生主磁场，包括隐极和凸极

异步电机：转子隐极，是对称绕组，短路，绕组是闭合的，定子两者都一样。

6. 2 什么叫同步电机？怎样由其极数决定它的转速？试问 75r/min、50Hz 的电机是几极的？

同步电机：频率与电机转速之比为恒定的交流电机 $n_1 = \frac{60f}{p}$, $P = \frac{60f}{n_1} = \frac{60 \times 50}{75} = 40$ (极)

6. 3 为什么现代的大容量同步电机都做成旋转磁极式？

因为励磁绕组电流相对较小，电压低，放在转子上引出较为方便，而电枢绕组电压高，电流大，放在转子上使结构复杂，引出不方便，故大容量电机将电枢绕组作为定子，磁极作为转子，称为旋转磁极式。

6. 4 汽轮发电机和水轮发电机的主要结构特点是什么？为什么有这样的特点？

汽轮发电机：转速高，一般为一对极， $n = 3000 \text{ r/min}$ ，考虑到转子受离心力的作用，为很好的固定励磁绕组，转子作成细而长的圆柱形，且为隐极式结构。转子铁心一般由高机械强度和磁导率较高的合金钢锻成器与转轴做成一个整体，铁心上开槽，放同心式励磁绕组。

水轮发电机： n 低， $2P$ 较多，直径大，扁平形，且为立式结构，为使转子结构和加工工艺简单，转子为凸极式，励磁绕组是集中绕组，套在磁极上，磁极的极靴上装有阻尼绕组。

6. 5 伞式和悬式水轮发电机的特点和优缺点如何？试比较之。

6. 6 为什么水轮发电机要用阻尼绕组，而汽轮发电机却可以不用？

水轮发电机一般为凸极结构，为使转子产生异步转矩，即能异步起动，加阻尼绕组。

汽轮发电机一般为隐极结构，它起动时的原理与异步机相同， \therefore 不必加起动绕组。

6. 7 一台转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，电枢反应磁动势对电枢的转速和转向如何？对定子的转速又是多少？

对电枢的转速为 n ，为定子的转速为 0，方向为顺时针。原因是：要想产生平均转矩，励磁磁势与电枢反应磁势必然相对静止，而现在励磁磁势不变。 \therefore 电枢反应磁势对定子也是相对静止的，而转子逆时针转， \therefore 它必须顺时针转，方能在空间静止。

6. 8 试分析在下列情况下电枢反应的性质。

(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) 纯电感性负载 $X_L^* = 0.7$ ；

(4) 纯电容性负载 $X_C^* = 1.2$ ，同步电抗 $X_t^* = 1.0$ 。

6. 9 三相同步发电机对称稳定运行时，在电枢电流滞后和超前于励磁电动势 E_0 的相

位差大于 90° 的两种情况下（即 $90^\circ < \psi < 180^\circ$ 和 $-90^\circ > \psi > -180^\circ$ ），

电枢磁动势两个分量 F_{ad} 和 F_{aq} 各起什么作用？

6. 10 在凸极同步电机中, 如果 ψ 为一任意锐角, 用双反应理论分析电枢反应磁通 $\dot{\Phi}_a$

和电枢反应磁动势 F_a 两个矢量是否还同相? $\dot{\Phi}_a$ 与它所感应的电动势 \dot{E}_a 是否还差 90° ?

6. 11 试述交轴和直轴同步电抗的意义。为什么同步电抗的数值一般较大, 不可能做得很小? 请分析下面几种情况对同步电抗有何影响?

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

X_d , X_q 表征了当对称三相直轴或交轴电流每相为 1A 时, 三相联合产生的总磁场(包括在气隙中的旋转电枢反应磁场和漏磁场)在电枢绕组中每相感应的电动势气隙大, 同步电抗大, 短路比大, 运行稳定性高, 但气隙大或同步电抗小, 转子铜量大, 成本增加, \therefore 同步电抗不能太小。 $X_d = X_{ad} + X_\sigma$ $X_q = X_{aq} + X_\sigma$

- (1) 电枢绕组匝数增加, 产生的直轴交轴电枢反应磁通增大, $\therefore X_d$, X_q 增加, ($\because E \propto N$ $\therefore E_{ad}, E_{aq} \uparrow$ 电流不变 $X_{ad}, X_{aq} \uparrow$)
- (2) 铁心饱和程度提高, $\mu \downarrow$ 磁阻增大, $\therefore X_d$, X_q 减小。
- (3) 气隙加大, 磁阻增大, X_d , X_q 减小。
- (4) 同步电抗反应的是电枢电流产生的磁场性质与励磁绕组无关, 不管什么电抗都有, $X = WN^2 \frac{\mu a}{l}$

6. 12 试根据不饱和时的电动势相量图证明下列关系式。

- (1) 隐极同步发电机

$$\tan \psi = \frac{IX_t + U \sin \varphi}{IR_a + U \cos \varphi}$$

$$E_0 = U \cos \theta + IR_a \cos \psi + IX_t \sin \psi$$

- (2) 凸极同步发电机

$$\tan \psi = \frac{IX_q + U \sin \varphi}{IR_a + U \cos \varphi}$$

$$E_0 = U \cos \theta + IR_a \cos \psi + IX_d \sin \psi$$

其中, φ 为 I 滞后于 \dot{U} 的夹角, 即功率因数角; ψ 为 I 滞后于 \dot{E}_0 的夹角; θ 为 \dot{U} 滞后于 \dot{E}_0 的夹角, 且有 $\theta = \psi - \varphi$ 。

6. 13 试证明不考虑饱和时 X_{ad} 和 X_{aq} 的公式为

$$X_{ad} = 4mf \frac{\mu_0 \tau l}{\pi k_\delta \delta} \frac{N^2 k_{N1}^2}{p} k_d$$

$$X_{aq} = 4mf \frac{\mu_0 \tau l}{\pi k_\delta \delta} \frac{N^2 k_{N1}^2}{p} k_q$$

6. 15 为什么 X_d 在正常运行时应采用饱和值，而在短路时却采用不饱和值？为什么 X_q 一般总只采用不饱和值？

正常运行时 d 轴是饱和的， \therefore 用 X_d 的饱和值，而在短路时，由于 I_d 的去磁作用，使 d 轴不饱和， \therefore 用不饱和值。

6. 16 测定同步发电机空载特性和短路特性时，如果转速降为 $0.95n_N$ ，对实验结果将有什么影响？如果转速降为 $0.5n_N$ ，则实验结果又将如何？

$\because E_0 \propto n$ ，当 $n = 0.95n_N$ ，则 $E_0' = 0.95E_0$ 同步电抗与频率成正比也降为 0.95 倍， \therefore 短路电流 $I_k = \frac{E_0}{X_d}$ 不变。当 $n = 0.5n_N$ 时， $\because E_0$ 和 X_d 都与转速成正比减小，而 R_a 与转速无关， $\therefore IR_a$ 在电动势方程中所占分量已较大，不能忽略。 \therefore 随 $n \downarrow$ ， $I_k \downarrow$

6. 17 为什么同步发电机三相对称稳态短路特性为一条直线？

\because 短路时，电极磁势基本上是一个纯去磁作用的直轴磁势，即 $F_\delta' = F_f - F_{ad}'$ 合成电动势 $\dot{E}_\sigma = j\dot{I}x_\sigma$ 所以起对应的气隙合成磁通很大，电机磁路不饱和，而 $F_\delta' \propto E_\delta \propto I$ $F_{ad} \propto I$ $\therefore F_f = F_\delta' + F_{ad}' \propto I$ $\therefore I_k = f(I_f)$ 是一条直线。

6. 18 什么叫短路比？它的大小与电机性能及成本的关系怎样？为什么允许汽轮发电机的短路比比水轮发电机的小一些？

同步发电机在额定转速下运行时，产生空载额定电压与产生额定稳态短路电流所需的励磁电流之比，它等于在产生空载额定电压的励磁电流下三相稳态短路电流的标么值，即 $k_c = \frac{I_{f0}(U_0=U_N)}{I_{f0}(I_k=I_N)} = \frac{I_{f0}}{I_N}$ k_c 小， ΔU 大，稳定度较差，但电机造价较便宜，增大气隙，可减小 X_d 使短路比增大，电机性能变好，但转子用铜量增大，造价高。

气轮机的 k_c 小一些，水轮机 $k_c = 0.8 \sim 1.8$ \because 水电站输电距离长，稳定问题较严重。

6. 19 一台同步发电机的气隙比正常气隙的长度偏大， X_d 和 ΔU 将如何变化？

$$\delta \uparrow \quad X_d \downarrow \quad \Delta U \downarrow$$

6. 20 同步发电机发生三相稳态短路时，它的短路电流为何不大？

同步稳态短路时，短路电流主要由直轴同步电抗 X_d 限制，而 X_d 值一般较大，即去磁作用的电枢反应磁动势较大，使气隙合成磁动势较小，气隙电动势较小， \therefore 短路电流不是很大。

6. 21 同步发电机供给一对称电阻负载，当负载电流上升时，怎样才能保持端电压不变？

电阻负载，说明输出为有功功率，要增大负载电流，端电压不变，而增大有功功率输出， \therefore 应增加原动机的输入功率。

6. 22 为什么从开路特性和短路特性不能测定交轴同步电抗？

凸极同步发电机的电势平衡方程式： $\dot{E}_0 = \dot{U} + \dot{I}R_a + j\dot{I}_d X_d + j\dot{I}_q X_q$ 当 $U = 0$ 时，

$R_a \ll X \therefore \dot{E}_0 = j\dot{I}_d X_d + j\dot{I}_q X_q$ 是纯感性的，即 $\Psi = 90^\circ \quad \dot{I}_q = 0 \quad \dot{I} = I_d$

$\therefore \dot{E}_0 = j\dot{I}_d X_d + j\dot{I} X_d \therefore$ 由空载特性测出 E_0 和短路特性测出 I 可求出直轴同步电抗 X_d (不饱和值)，而此时 $I_q = 0 \therefore$ 不能从空载和短路特性求出 X_q

6. 23 低转差法测量 X_d 和 X_q 的原理是什么？如果在实验时转差太大，对测量结果会造成什么影响？

6. 24 三相同步发电机投入并联运行的条件是什么？如果不满足条件会产生什么后果？

①相序一致②频率相同③电压大小相等，相位相同。如不满足条件，在发电机和电网间产生环流，导致发生电磁冲击和机械冲击。

6. 27 并联于无穷大电网的隐极同步发电机，当调节有功功率输出时欲保持无功功率输出不变，问此时 θ 角及励磁电流 I_f 是否改变，此时 I 和 E_0 各按什么轨迹变化？

6. 28 一台同步发电机单独供给一个对称负载 (R 及 L 一定) 且转速保持不变时，定子电流的功率因数 $\cos\varphi$ 由什么决定？当此发电机并联于无穷大电网时，定子电流的 $\cos\varphi$ 又由什么决定？还与负载性质有关吗？为什么？此时电网对发电机而言相当于怎样性质的电源？

6. 29 画出凸极同步发电机失去励磁 ($E_0 = 0$) 时的电动势相量图，并推导其功角特性，此时 θ 角代表什么意义？

6. 30 为何在隐极电机中定子电流和定子磁场不能相互作用产生转矩，但是在凸极电机中却可以产生？

6. 33 试证明在计及定子电阻时，隐极发电机的输出功率 P_2 、电磁功率 P_{em} 和功率角 θ 的关系式各为

$$P_2 = \frac{mE_0 U}{Z_t} \sin(\theta + \rho) - m \frac{U^2}{Z_t} \sin \rho$$

$$P_{em} = \frac{mE_0U}{Z_t} \sin(\theta - \rho) + m \frac{E_0^2}{Z_t} \sin \rho$$

式中, $\rho = \arctan \frac{R_a}{X_t}$; Z_t 为同步阻抗的模, 即 $Z_t = \sqrt{R_a^2 + X_t^2}$ 。

6. 37 同步电动机带额定负载时, 如 $\cos\varphi = 1$, 若在此励磁电流下空载运行, $\cos\varphi$ 如何变?

6. 38 从同步发电机过渡到电动机时, 功率角 θ 、电流 I 、电磁转矩 T_{em} 的大小和方向有何变化?

6. 39 为什么当 $\cos\varphi$ 滞后时电枢反应在发电机的运行里为去磁作用而在电动机中却为助磁作用?

6. 40 一水电厂供应一远距离用户, 为改善功率因数添置一台调相机, 此机应装在水电厂内还是在用户附近? 为什么?

6. 41 有一台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 5%, 负载转矩不变;
- (2) 电网频率下降 5%, 负载功率不变;
- (3) 电网电压和频率各下降 5%, 负载转矩不变。

6. 42 同步电动机为什么没有起动转矩? 其起动方法有哪些?

6. 43 为什么变压器的正、负序阻抗相同而同步电机的却不同? 同步电机的负序阻抗与感应电机相比有何特点?

6. 44 负序电抗 X_- 的物理意义如何? 它和装与不装阻尼绕组有何关系?

6. 45 有两台同步发电机, 定子完全一样, 但一个转子的磁极用钢板叠成, 另一个为实心磁极 (整块锻钢), 问哪台电机的负序阻抗要小些?

6. 46 为何单相同步发电机通常都在转子上装阻尼作用较强的阻尼绕组?

6. 55 步进电动机的原理是怎样的? 步进电动机的相数与极数有何联系?

6. 56 有一 $P_N = 25000kW$ 、 $U_N = 10.5kV$ 、Y 联接、 $\cos\varphi_N = 0.8$ (滞后) 的汽轮发电机, $X_t^* = 2.13$, 电枢电阻略去不计, 试求额定负载下发电机的励磁电动势 E_0 及 \dot{E}_0 与 \dot{I} 的夹角 ψ 。

6. 57 有一 $P_N = 72500kW$ 、 $U_N = 10.5kV$, Y 联接、 $\cos\varphi_N = 0.8$ (滞后) 的水轮发电机, $R_a^* \approx 0$, $X_d^* = 1$, $X_q^* = 0.554$, 试求额定负载下发电机的励磁电动势 E_0 及 \dot{E}_0 与 \dot{U} 的夹角。

6. 58 有一台三相 $1500kW$ 水轮发电机, 额定电压为 $6300V$, Y 联接, 额定功率因数 $\cos\varphi_N = 0.8$ (滞后), 已知它的参数 $X_d = 21.2\Omega$, $X_q = 13.7\Omega$, 电枢电阻可略去不计,

试绘相量图并计算发电机在额定运行状态时的励磁电动势 E_0 。

6. 60 某三相 72500kW 水轮发电机, $U_N = 10.5kV$, Y 联接, $\cos\varphi_N = 0.8$ (滞后),

$X_g^* = 0.554$ 。电机的空载、短路和零功率因数特性如下:

空载特性

U_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

I_k^*	0	1
I_f^*	0	0. 965

零功率因数特性 ($I = I_N$ 时)

U^*	1. 0
I_f^*	2. 115

设 $X_\sigma = 0.9 X_p$, 试求:

(1) X_d^* (不饱和值), X_d^* (饱和值), X_{ag}^* 和短路比;

(2) I_{fN}^* 和 ΔU 。

6. 61 一台 12000kW 的 2 极汽轮发电机, $U_N = 6300V$, Y 联接, $\cos\varphi_N = 0.8$ (滞后)。已知定子有 48 槽, 每槽两个导体, 绕组节距 $y_1 = 20$ 槽, 一条并联支路, 转子励磁绕组每极 240 匝。 R_a 略去不计, $k_f = 1.0$, 空载特性如下:

U_0 (线) /V	0	4500	5500	6000	6300	6500	7000	7500	8000	8400
I_f /A	0	60	80	92	102	111	130	160	200	240

短路特性为一过原点的直线。在 $I_k = I_N$ 时, $I_f = 127A$, 试求:

(1) 同步电抗 X_t (不饱和值);

(2) 额定负载运行时的励磁电流 I_{fN} 及电压调整率 ΔU 。

6. 64 一台汽轮发电机, $\cos\varphi = 0.8$ (滞后), $X_t^* = 1.0$, 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, 定子电流标么值 I^* 和功率因数 $\cos\varphi$ 各等于多少?

$$\text{解: 设 } U^* = 1[0^\circ] \quad I_N^* = 1[-36.87^\circ] \quad P_{emN}^* = 0.8$$

$$\dot{E}_{ON}^* = \dot{U}^* + jI_N^* X_t^* = 1 + j(0.8 - j0.6) = 1.6 + j0.8 = 1.79[26.56^\circ]$$

输出有功功率减半时, 有 $P_{em}^* = 0.8 \times \frac{1}{2} = 0.4$

$$\sin\theta = \frac{P_{em}^* X_t^*}{E_0^* U^*} = \frac{0.4 \times 1}{1.79 \times 1} = 0.223 \quad \theta = 12.89^\circ \therefore \dot{E}_0^* = 1.79[12.89^\circ]$$

$$\therefore I^* = \frac{\dot{E}_0^* - \dot{U}^*}{jX_t^*} = \frac{1.79 \times (\cos 12.89^\circ + j \sin 12.89^\circ) - 1}{j} = 0.399 - j0.754 = 0.845[61.83^\circ]$$

\therefore 定子电流标么值: $I^* = 0.845 \quad \varphi = 61.83^\circ \quad \cos\varphi = \cos 61.83^\circ = 0.472$

(2) 若输出有功功率仍为额定功率的一半, 逐渐减小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?

$$I_f = \frac{1}{2} I_{fN} \text{ 时, } \dot{E}_0^* = \frac{1}{2} \dot{E}_0^* = 0.895 \quad P_{em}^* = \frac{\dot{E}_0^* U^*}{X_t^*} \sin\theta' \quad \sin\theta' = \frac{0.4 \times 1}{0.895 \times 1} = 0.447$$

$$\theta' = 26.55^\circ < 90^\circ \text{ 能稳定运行} \quad I^* = \frac{\dot{E}_0^* - \dot{U}^*}{jX_t^*} = \frac{0.895[26.55^\circ] - 1}{j} = \frac{0.895 \times (0.895 + j0.447) - 1}{j} = \frac{0.8 + j0.4 - 1}{j}$$

$$= 0.4 + j0.2 = 0.447[26.57^\circ] \quad \cos\varphi = \cos 26.57^\circ = 0.894$$

6. 65 一台汽轮发电机并联于无穷大电网, 额定负载时功率角 $\theta = 20^\circ$, 现因外线发生故障, 电网电压降为 $60\%U_N$, 问: 为使 θ 角保持在 25° , 应加大励磁使 E_0 上升为原来的多少倍?

6. 67 一台 50000kW 、 13800V (Y 联接)、 $\cos\varphi_N = 0.8$ (滞后) 的水轮发电机并联于一无穷大电网, 其参数为 $R_a \approx 0$, $X_d^* = 1.15$, $X_q^* = 0.7$, 并假定其空载特性为一直线, 试求:

(1) 当输出功率为 10000kW 、 $\cos\varphi = 1.0$ 时发电机的励磁电流 I_f^* 及功率角 θ ;

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}U_N \cos\varphi} = \frac{10000 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 13800 \times 1}$$

$$I^* = \frac{I}{I_N^*} = \frac{I}{\frac{P_N}{\sqrt{3}U_N \cos\varphi_N}} = \frac{10000 \times 0.8}{50000 \times 1} = 0.16$$

$$\Psi = \arctg \frac{U^* \sin \varphi + I^* X_q^*}{U^* \cos \varphi} = \arctg \frac{1 \times 0 + 0.16 \times 0.7}{1 \times 1} = 6.39^\circ \quad \theta = \psi - \varphi = 6.39^\circ$$

$$E_0^* = U^* \cos \theta + I_d^* X_d^* = U^* \cos \theta + I^* \sin \psi X_d^* = 1 \times \cos 6.39^\circ + 0.16 \sin 6.39^\circ \times 1.15 = 1.014$$

$$I_f^* = \frac{I_f}{I_{fN}} = \frac{E_0}{E_{0N}} = 1.014 \quad \because \text{空载特性为一直线。}$$

(2) 若保持此输入有功功率不变, 当发电机失去励磁时 θ 等于多少? 发电机还能稳定运行吗? 此时定子电流 I 、 $\cos \varphi$ 各为多少?

$$\text{发电机失去励磁 } E_0 = 0 \text{ 则 } P_{em}^* = \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{X_q^*} - \frac{1}{X_d^*} \right) \sin 2\theta$$

$$P_{em}^* = \frac{P_{em}}{S_N} = \frac{10000}{\frac{P_N}{\cos \varphi_N}} = \frac{10000 \times 0.8}{5000} = 0.16 \quad \therefore \frac{1}{2} \times \left(\frac{1}{0.7} - \frac{1}{1.15} \right) \sin 2\theta = 0.16 \quad \theta = 17.46^\circ$$

$$\therefore \theta = 17.46^\circ \quad \therefore \text{发电机能稳定运行。}$$

$$\text{由相量图: } I_d^* X_d^* = U^* \cos \theta \quad I_d^* = \frac{U^* \cos \theta}{X_d^*} = \frac{1 \times \cos 17.46^\circ}{1.15} = 0.829$$

$$I_q^* X_q^* = U^* \sin \theta \quad I_q^* = \frac{U^* \sin \theta}{X_q^*} = \frac{1 \times \sin 17.46^\circ}{0.7} = 0.429$$

$$I^* = \sqrt{I_d^*{}^2 + I_q^*{}^2} = \sqrt{0.829^2 + 0.429^2} = 0.934$$

$$I = I^* I_N = 0.934 \times \frac{5000 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 13800 \times 0.8} = 2442.2(A)$$

$$\cos \varphi = \frac{P_{em}}{\sqrt{3} U_N I} = \frac{10000 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 13800 \times 2442.2} = 0.171 \quad (\text{超前})$$

6.69 三相隐极式同步发电机额定容量 $S_N = 60kVA$, Y 联接, $U_N = 380V$, $X_t = 1.55\Omega$,

$R_a \approx 0$ 。当电机过励, $\cos \varphi = 0.8$ (滞后), $S = 37.5kVA$ 时,

- (1) 作相量图, 求 E_0 , θ ;
- (2) 移去励磁机, 不计损耗, 作相量图, 求 I ;
- (3) 改作同步电动机运行, P_{em} 和 I_f 同第 (1) 项, 作相量图;
- (4) 机械负载不变, P_{em} 同第 (1) 项, 使 $\cos \varphi = 1$, 作相量图, 求此时的 E_0 。