

电机学复习资料

第1章 基本电磁定律和磁路

电机的基本工作原理是建立在电磁感应定律、全电流定律、电路定律、磁路定律和电磁力定律等定律的基础上的，掌握这些基本定律，是研究电机基本理论的基础。

▲全电流定律

$$\oint_l H dl = \sum I$$

全电流定律

式中，当电流方向与积分路径方向符合右手螺旋关系时，电流取正号。

在电机和变压器的磁路计算中，上式可简化为

$$\sum Hl = \sum Ni$$

▲电磁感应定律

①电磁感应定律

$$e = - \frac{d\psi}{dt} = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

式中，感应电动势方向与磁通方向应符合右手螺旋关系。

②变压器电动势

磁场与导体间无相对运动，由于磁通的变化而感应的电势称为变压器电动势。电机中的磁通 Φ 通常是随时间按正弦规律变化的，线圈中感应电动势的有效值为

$$E = 4.44 f N \Phi_m$$

③运动电动势

$$e = Blv$$

④自感电动势

$$e_L = -L \frac{di}{dt}$$

⑤互感电动势

$$e_{M1} = - \frac{di_2}{dt} \quad e_{M2} = - \frac{di_1}{dt}$$

▲电磁力定律

$$f = Bli$$

▲磁路基本定律

1 磁路欧姆定律

$$\Phi = \frac{Ni}{\frac{l}{\mu A}} = \frac{F}{R_m} = \Lambda_m F$$

式中， $F = Ni$ ——磁动势，单位为A；

$$R_m = \frac{l}{\mu A} \text{——磁阻，单位为 } H^{-1}；$$

$$\Lambda_m = \frac{1}{R_m} = \frac{\mu A}{l} \text{——磁导，单位为 } H。$$

2 磁路的基尔霍夫第一定律

$$\oint B ds = 0$$

上式表明，穿入（或穿出）任一封闭面的磁通等于零。

3 磁路的基尔霍夫第二定律

$$\sum F = \sum Hl = \sum \Phi R_m$$

上式表明，在磁路中，沿任何闭合磁路，磁动势的代数和等于次压降的代数和。
磁路和电路的比较

电路	磁路
电流I[A]	磁通Φ[Wb]
电流密度J[A/m ²]	磁通密度B[T=Wb/m ²]
电动势E[V]	磁动势F[A]
$R = \rho \frac{l}{s}$	$R_m = \frac{l}{\mu S}$
电阻 [Ω]	磁阻 [1/H]
$G = \frac{1}{R}$	$\Lambda_m = \frac{1}{R_m}$
电导 [S]	磁导 [H]
基尔霍夫第一定律 $\sum i = 0$	磁路节点定律 $\sum \phi = 0$
基尔霍夫第二定律 $\sum u = \sum e$	全电流定律 $\sum HI = \sum N I$
$I = \frac{E}{R}$	磁路欧姆定律 $\phi = \frac{F}{R_m}$
电路欧姆定律	

第2章 直流电动机

一、直流电机的磁路、电枢绕组和电枢反应

▲磁场是电机中机电能量转换的媒介。穿过气隙而同时与定、转子绕组交链的磁通为主磁通；仅交链一侧绕组的磁通为漏磁通。直流电机空载时的气隙磁场是由励磁磁动势建立的。空载时，主磁通Φ₀与励磁磁动势F₀的关系曲线Φ₀=f (F₀) 为电机的磁化曲线。从磁化曲线可以看出电机的饱和程度，饱和程度对电机的性能有很大的影响。

▲电机的磁化曲线仅和电机的几何尺寸及所用的材料有关，而与电机的励磁方式无关。电机的运行特性与磁化曲线密切相关。设计电机时，一般使额定工作点位于磁化曲线开始弯曲的部分，这样既可保证一定的可调节度，又不至于浪费材料。

▲直流电机电枢绕组各元件间通过换向器连接，构成一个闭合回路，回路内各元件的电动势互相抵消，从而不产生环流。元件内的电动势和电流均为交变量，通过换向器和电刷间的相对运动实现直流转换。电刷的放置原则是：空载时正、负电刷之间获得最大的电动势，这时被电刷短路的元件的电动势为零。因此，电刷应放在换向器的几何中性线上。对端接对称的元件，换向器的几何中性线应与主极轴线重合。

▲不同型式的电枢绕组均有①S=K=Z；②y₁=Z₁/2p [ε=整数]；③y=y₁+y₂。其中，S为元件数，K为换向片数，Z₁为虚槽数，p为极对数，y₁为第一节距，y₂为第二节距，y为合成节距，ε为小于1的分数，用来把y₁凑成整数。对单叠绕组，y=±1，y₂小于0，并联支路对数a=p，即每极下元件串联构成一条支路。对单波绕组，y₂大于零，a=1，即所有同极性下元件串联构成一条支路。

▲当电枢绕组中通过电流时，产生电枢磁动势，此时气隙磁场由励磁磁动势和电枢磁动势共同建立。电枢磁动势对主极磁场的影响称为电枢反应。直流电机电枢磁动势是空间分布固定的三角波，其幅值位于电枢表面导体电流改变方向处。当电刷安装在换向器的几何中性线上时，只存在交轴电枢磁动势F_{aq}。F_{aq}对气隙磁场的影响称为交轴电枢反应，它使①气隙磁场发生畸变；②物理中性线偏离几何中性线一个角度，③不饱和时，每极磁通量不变，饱和时，有去磁作用。当电刷偏离几何中性线时，除了F_{aq}外，还存在直轴电枢磁动势F_{ad}。F_{ad}对气隙磁场的影响称为直轴电枢反应，当F_{ad}与励磁磁动势同方向时，起助磁作用；当F_{ad}与励磁磁动势反方向时，起去磁作用。

当电刷在几何中性线上时，交轴电枢反应磁动势的大小为

$$F_{aq} = \frac{1}{2} A \tau \quad (\text{A} \cdot \text{极})$$

$$A = \frac{N i_a}{\pi D_a}$$

式中，A=πD_a ——线负荷 (A/m) ；

$$\tau = \frac{\pi D_a}{2p}$$

——极距 (m) ;

N——电枢圆周总导体数;

D_a ——电枢外径 (m)

I_a ——支路电流 (A)

当电刷从几何中性线上移开机械角度时, β 交直流电枢磁动势分别为

$$F_{aq} = A \left(\frac{\tau}{2} - b_\beta \right) \quad (\text{A/极})$$

$$F_{ad} = A b_\beta \quad (\text{A/极})$$

$$\text{式中, } b_\beta = \frac{\beta}{360^\circ} \pi D_a \quad \text{——电刷在电枢表面移过的弧长 (m) 。}$$

▲ 电枢绕组感应电动势E是指正、负电刷间的电动势, 即一条支路的电动势。电磁转矩 T_{em} 是指电枢电流和气隙合成磁场相互作用产生的。感应电动势和电磁转矩公式是直流电动机的两个重要的计算公式

$$E = C_e \Phi \omega \quad (\text{V})$$

$$T_e = C_T \Phi I_a \quad (\text{Nm})$$

式中, Φ ——每极磁通量;

n——电机转速;

I_a ——电枢电流;

C_e 、 C_T ——与电机结构有关的常数。其中 $C_e = \frac{pN}{60a}$, 称为电动势常数; $C_T = \frac{pN}{2\pi a}$, 称为转矩常数;

$$C_T = 9.55 C_e$$

▲ 直流电机的励磁方式共有四种: 他励、并励、串励、复励。电机端电流I、电枢电流 I_a 、励磁电流 I_f 的关系如下

表: 不同励磁方式电机各绕组之间的关系

	发电机	电动机
他励	$I = I_a$, I_f 与 I_a 无关	$I = I_a$, I_f 与 I_a 无关
并励	$I = I_a + I_f$	$I = I_a + I_f$
串励	$I = I_a = I_f$	$I = I_a = I_f$
复励	$I = I_a + I_f$, $I_s = I_a$	$I = I_a + I_f$, $I_s = I_a$

● 对于复励电机, I_s 为串励绕组电流, I_f 为并励绕组电流。

▲ 对于发电机: $E > U$, I_a 与E同方向, T_e 与n反方向, 将机械能转化为电能; 对于电动机: $E < U$, I_a 与E反方向, T_e 与n同方向, 将电能转化为机械能。

▲ 直流电机的基本方程式

	发电机	电动机
电动势平衡方程式	$U = E - I_a R_a$	$U = E + I_a R_a$
转矩平衡方程式	$T_1 = T_e + T_0$	$T_e = T_2 + T_0$
功率平衡方程式	$P_1 = P_e + P_0$ $P_2 = P_e - p_{Cu} - p_{Cuf}$	$P_1 = P_e + p_{Cua} + p_{Cuf}$ $P_2 = P_e - P_0$

▲ 直流发电机空载特性曲线 $U_0 = f(I_f)$; 外特性 $U = f(I)$; 调整特性 $I = f(I)$

▲ 并励发电机的自励必须满足三个条件。

▲ 直流电动机的工作特性有: 速率特性 $n = f(P_2)$; 转矩特性 $T_{em} = f(P_2)$; 效率特性

$\eta = f(P_2)$ 。当输出功率 P_2 增加时, 输入功率 P_1 必须增加, 在端电压不变的条件下, I_a 必须增加。因此 I_a 随 P_1 的增加而增加。不同励磁方式的直流电动机的工作特性有很大差异。并励电动机的速率特性是一条略微下降的曲线, 其转矩特性近似为直线。串励电动机的转速随着 P_2 的增加而迅速下降, 转矩则随着 P_2 的增加而迅速上升。直流电动机使用时应注意, 并励电动机励磁回路不允许开路, 串励电动机不允许空载或轻载运行。

▲ 电动机的转速与电磁转矩之间的关系曲线称为机械特性。当电枢回路不串入调节电阻时的机械特性叫做自然机械特性, 串入电阻叫做人工机械特性。

第3章 变压器

▲ 变压器是一种静止电磁装置, 一次绕组和二次绕组通过交变磁场联系起来, 利用电磁感应关系实现电能转变。根据变压器内部磁场的实际分布和所起作用的不同, 把磁场分成主磁通和漏磁通两部分。主磁通沿铁心闭合, 起能量传递的媒介作用, 所经磁路是非线性的; 漏磁通主要沿非铁磁物质闭合、仅起电抗压降的作用, 所经磁路是线性的。

在变压器中, 既有磁路的问题, 又有电路问题。为了把电磁场问题转化成电路问题, 引入了电路参数: 励磁阻抗 Z_m , 漏电抗 $X_{1\sigma}$ 、 $X_{2\sigma}$ 。 $Z_m = R_m + jX_m$ 。励磁电阻 R_m 不是一个实际存在的电阻, 它只是一个代表铁耗的电阻, 其上消耗的功率等于铁耗。励磁电抗 X_m 与主磁通 Φ_m 对应, $X_{1\sigma}$ 和 $X_{2\sigma}$ 分别与一次绕组和二次绕组的漏磁通 $\Phi_{1\sigma}$ 和 $\Phi_{2\sigma}$ 对应, 它们分别与电源频率、匝数的平方、对应磁通所经磁路的磁导成正比, 既

$$X_m = 2\pi f N_1^2 \Lambda_m \propto f N_1^2 \Lambda_m$$

$$X_{1\sigma} = 2\pi f N_1^2 \Lambda_{1\sigma} \propto f N_1^2 \Lambda_{1\sigma}$$

$$X_{2\sigma} = 2\pi f N_2^2 \Lambda_{2\sigma} \propto f N_2^2 \Lambda_{2\sigma}$$

式中, f ——电源频率; N_1 ——一次绕组匝数

Λ_m —— Φ_m 所经磁路的磁导 N_2 ——二次绕组匝数

$\Lambda_{1\sigma}$ —— $\Phi_{1\sigma}$ 所经磁路的磁导 $\Lambda_{2\sigma}$ —— $\Phi_{2\sigma}$ 所经磁路的磁导

由于 Φ_m 经铁心闭和, 受铁心饱和的影响, 故 X_m 不是常数, 随着铁心饱和程度的提高, X_m 变小。 $\Phi_{1\sigma}$ 和 $\Phi_{2\sigma}$ 主要经非铁磁物质闭和, 基本不受铁心饱和程度的影响, 故 $X_{1\sigma}$ 和 $X_{2\sigma}$ 基本上是常数。另外由于 $\mu_{Fe} \gg \mu_0$, 因此 $X_m \gg X_{1\sigma}$ 、 $X_{2\sigma}$ 。

▲ 为了简化定量计算和得出变压器一次、二次测有电的联系的等效电路, 引入了折算法。折算的方法是用一个匝数和一次绕组相同的绕组代替二次绕组。折算的原则是: 保持折算前后二次绕组的磁动势的大小及空间分布不变, 从而使得一次绕组的各种物理量在折算前后保持不变。

▲ 主磁通 Φ_m 在一次、二次绕组的感应电动势 \dot{E}_1 、 \dot{E}_2 的大小分别为

$$E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m$$

$$E_2 = 4.44 f N_2 \Phi_m$$

在相位上, \dot{E}_1 、 \dot{E}_2 均滞后于 $\dot{\Phi}_m$ 90° 。

▲ 变比 k 定义为 E_1 和 E_2 之比。 k 可以通过几个途径计算。其计算式为

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_{1N\phi}}{U_{2N\phi}}$$

式中, $U_{1N\phi}$ 、 $U_{2N\phi}$ ——三相变压器一次绕组和二次绕组的额定相电压。对于单相变压器,

$$k = U_{1N} / U_{2N}$$

▲ 在铁心饱和时, 为了得到正弦形变化的磁通, 励磁电流必然为非正弦。励磁电流除基波外,

主要包含三次谐波分量。空载时，变压器主磁通由空载电流建立，因此，空载电流就是励磁电流。负载时，主磁通有一次和二次绕组共同建立。

- ▲ 基本方程式、等效电路和相量图是分析变压器问题的三种方法，三者是完全一致的，知道其中一种就可以推导出其他两种。在实际工作中，可根据具体情况灵活运用。
变压器负载时的基本方程式为

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2$$

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

$$\dot{E}_1 = -\dot{E}_2 \quad \text{系}$$

$$-\dot{E}_1 = \dot{I}_m Z_m$$

$$\dot{U}_2 = \dot{I}_2 Z_L$$

- ▲ 变压器的电压调整率的实用计算公式为

$$\Delta U = \beta (R_K^* \cos \Phi_2 + X_K^* \sin \Phi_2)$$

三相变压器

- ▲ 三相变压器的一次绕组和二次绕组主要有两种连接法：星形联接和三角形联接。表示变压器一次、二次绕组联结法的组合称为联结组，共有四种：①Yy ②Yd ③Dy ④Dd；其中Y或y表示星形联结，D或d表示三角形联结；Y和D表示高压绕组，y和d表示低压绕组。

- ▲ 三相变压器一、二次绕组对应线电动势或线电压的相位差与绕组的绕向、首末端标志和联结组有关，各种联结组的这种相位差都是30°的正倍数，用时钟的时数表示，称为联结组标号。联结组标号等于低压绕组线电动势或线电压滞后于高压绕组的对应的线电动势或线电压的相位差除以30°。Yy和Dd联结组标号为偶数，Yd和Dy联结组标号为奇数。

- ▲ 三相变压器的磁路系统可分成各相磁路彼此无关的三相变压器组和三相磁路彼此相关的三相心式变压器两种。不同磁路系统和绕组联结法对空载电动势波形有很大影响。当空载电流为正弦形时，产生的主磁通为平顶波（主要包含三次谐波分量），从而感应电动势为非正弦；当空载电流为尖顶波（主要包含三次谐波分量）时，产生的主磁通为正弦波，从而感应电动势为正弦波。在三相变压器中，三相空载电流的三次谐波同大小同相位，能否流通与绕组的联结法有关。三相三次谐波磁通也是同大小同相位，能否流通能否沿铁心闭合则与三相磁路系统有关。

- ▲ Yy联结的三相变压器，三次谐波电流不能流通，空载电流接近于正弦波，主磁通为平顶波。对Yy联结的三相变压器组，由于三相磁路彼此无关，三次谐波磁通能沿铁心闭合，铁心磁阻小，故三次谐波磁通较强，因此，相电动势畸变为尖顶波，其中包含较强的三次谐波电动势。对于Yy联结的三相心式变压器，由于三相磁路彼此相关，三次谐波磁通不能沿铁心

闭合，只能借油、油箱壁等形成闭合回路，对应的磁路磁阻大，故三次谐波磁通很小，因此主磁通任接近于正弦波，从而相电动势也接近于正弦波。故三相变压器组不能采用Yy联结，而三相心式变压器则可以采用Yy联结。

- ▲ Dy联结的三相变压器，一次侧空载电流中的三次谐波电流可以流通，故主磁通及感应电动势为正弦波。Yd联结的三相变压器，虽然一次侧空载电流中的三次谐波电流不能流通，主磁通和相电动势中都含有三次谐波，但因二次侧闭合三角形绕组中的三次谐波环流同样起励磁作用（去磁），故相电动势的波形也接近于正弦形。
- ▲ 为了达到变压器最理想的并联运行情况，各台并联变压器必须具备三个条件：① 联结组标号相同；② 线电压比相等；③ 短路阻抗标么值相等，且短路电阻与短路电抗之比相等。其中第①条必须严格满足，不同标号的变压器绝对不能并联运行，否则会产生很大的环流，可能烧坏变压器。满足第②条可保证空载时不产生环流，满足第③条则保证各变压器按额定容量成正比的关系分担负载，从而使装机容量得到充分利用。
- ▲ 变比不相等的变压器并联运行时会在变压器内部产生环流。环流的大小按下式计算

$$I_c = \frac{\frac{U_1}{k_1} - \frac{U_1}{k_2}}{Z_{K1} + Z_{K2}}$$

式中， I_c —— 两台变压器二次侧之间的环流；

k_1 、 k_2 —— 变压器1和变压器2的变比；

Z_{K1} 、 Z_{K2} —— 变压器1和变压器2折算到二次侧的短路阻抗。

- ▲ 短路阻抗标么值不相等的变压器并联运行时，各台变压器按与短路阻抗标么值成反比的关系分配负载，短路阻抗标么值小的变压器先达到满载。
- ▲ 电压互感器和电流互感器的工作原理与变压器相同。电压互感器的运行情况相当于变压器的空载运行，电流互感器的运行情况相当于变压器的短路运行。电压互感器运行时二次侧绝对不能短路，电流互感器运行时二次侧绝对不能开路。为了确保安全，它们的二次绕组必须可靠接地。设计时，为了减小相角误差和电压比误差，提高测量精度，应尽可能减小励磁电流和绕组漏阻抗。

第4章 交流绕组及其电动势

▲ 交流电机绕组与磁场产生周期性相对运动时，在交流电机绕组中就会感应出交流电动势其频率 $f=pn/60$ ， p 为磁场极对数， n 为交流绕组与磁场的相对运动速度。多相绕组产生多相电动势，多相电动势存在大小、波形、频率、对称性等四个问题。

▲ 三相绕组的构成原则是：(1)力求获得较大的基波电动势；(2)保证三相电动势对称；(3)尽量削弱谐波电动势，力求波形接近正弦波；(4)考虑节省材料和工艺方便。

▲ 交流绕组通常分为双层绕组和单层绕组两大类。双层绕组又分为叠绕组和波绕组两种。双层绕组的特点是可灵活地设计成各种短距来削弱谐波，对于叠绕组，采用短距还可以节省端部材料。单层绕组的特点是制造工艺简单，但它不能向双层绕组那样设计成短距以削弱谐波。

▲ 在正弦波磁场下，交流绕组相电动势的计算公式为

$$E_{\phi 1} = 4.44 f N k_{w1} \phi_{11}$$

式中， N ——每相每条支路串联匝数；

Φ ——每相磁通量；

K_{w1} ——绕组系数。

N 和 k_{w1} 的计算公式如下：

$$N = \frac{2pqN_c}{a} \text{ (匝)}$$

$$N = \frac{PqN_c}{a} \text{ (匝)}$$

$k_{w1} = k_{y1} * k_{q1}$ —— 绕组系数

$$k_{y1} = \sin \frac{y_1}{\tau} 90^\circ \text{--- 叠}$$

$$k_{q1} = \frac{\sin \frac{q\alpha_1}{2}}{q \sin \frac{\alpha_1}{2}} \text{--- 叠}$$

$$q = \frac{Z_1}{2mp} \text{--- 叠}$$

$$\alpha_1 = \frac{p \times 360^\circ}{Z} \text{--- 叠}$$

在上述各式中, N_c 为每线圈匝数, a 为每相并联支路数, y_1 为线圈节距, τ 为极距, Z 为槽数, m 为相数。

▲线圈为整距时, ($y_1 = \tau$), 线圈的两个边在任何时刻的感应电动势的大小相等, 方向相反 (相位差为 180°), 因此线圈总的电动势为每个边的电动势的两倍。线圈为短距时, 线圈的两个边的电动势相位差小于 180° , 因此线圈总的电动势比整距时小。故短距系数 k_{y1} 表示了短距线圈同整距线圈相比其电动势的减小程度, $k_{y1} \leq 1$ 。

当 q 个线圈集中放置时, 每个线圈的电动势同相位, q 个线圈串联后的总电动势为单个线圈电动势的 q 倍。当 q 个线圈分布放置时, 相邻线圈电动势存在相位差, 合成电动势比集中放置时小。故分布系数表示了分布绕组同集中绕组相比其电动势的减小程度, $k_{q1} \leq 1$ 。

▲当磁极磁场沿空间不按正弦规律分布时, 磁场中的高次谐波将在绕组内感应出相应的谐波电动势。 v 次谐波电动势计算公式为 $E_v = 4.44 f_v N k_{wv} \Phi_v$; 注意在三相对称绕组中, 无论是 Y 接还是 Δ 接, 均不存在 3 及 3 的倍数次谐波。

▲削弱谐波电动势的方法有: ①采用不均匀气隙, 改善气隙磁场分布, 使之接近正弦波形; ②采用短距绕组; ③采用分布绕组。

第5章 感应电机的运行原理、功率和转矩

▲异步电机的重要物理量: 转差率

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad , \text{ 当 } s, n_1 \text{ 已知时, 可算出 } n = (1 - s)n_1$$

当转子不转 (启动瞬间), $n = 0$, 则 $s = 1$; 当转速接近同步转速时, $n \approx n_1$, 则 $s \approx 0$ 。正常运行时, s 仅在 $0.01 \sim 0.06$ 之间。

转差率是异步电机的一个重要物理量, 它反映了转子转速的快慢或负载的大小。根据转差率的大小和正负, 可判定异步电机的三种运行状态: 电动机状态; 电磁制动状态; 发电机状态。

▲额定值

电动机的额定功率 P_N 是指在额定状况下, 转轴上输出的机械功率。

$$\text{对于三相异步电机: } P_N = \sqrt{3} U_N I_N \cos \varphi_N \eta_N \times 10^{-3}$$

▲感应电机的定子和转子之间只有磁的联系, 没有电的直接联系。为了得到等效电路, 要进行频率和绕组折算。与变压器相比, 变压器是静止元件, 不需要进行频率折算, 变压器是集中绕组, 其绕组系数等于 1。感应电机一般是短距分布绕组, 绕组系数小于 1。

▲在任何转速下, 感应电机转子磁动势与定子磁动势相对静止。定、转子磁动势相对静止是一切电机能正常运行的必要条件。

▲基本方程、相量图和等效电路是分析感应电机运行时内部电磁关系的三种不同方法, 它们之间是统一的。

▲掌握异步电机电磁平衡方程式及等效电路。

▲功率平衡方程式

$$\text{输入功率 } P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1 = p_{Cu1} + p_{Fe} + P_{em}$$

$$P_1 = m_1 E_2' I_2' \cos \varphi_2 = m_1 I_2' \frac{r_2'}{S} = P_{Cu2} + P_{mec}$$

电磁功率

$$P_{Cu1} = m_1 I_1^2 r_1$$

$$P_{Fe} = m_1 I_m^2 r_m$$

$$P_{Cu2} = m_1 I_2'^2 r_2' = S P_{em}$$

$$P_{MEC} = m_1 I_2'^2 \frac{1-S}{S} r_2' = (1-S) P_{em} = \frac{1-S}{S} P_{Cu2}$$

$$P_2 = P_{MEC} - P_{mec} - P_{ad}$$

P_N 是感应电机的额定功率，是指电动机在额定情况下运行时由轴端输出的机械功率。只有在额定情况下， $P_2 = P_N$ 。

▲ 电磁转矩方程式

掌握电动机电磁转矩的物理表达式、参数表达式。掌握最大转矩、起动转矩、临界转差率与参数的关系。

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega_1} = \frac{P_{MEC}}{\Omega}$$

电磁转矩与电磁功率、机械功率的关系

$$T_{em} = T_2 + T_0 \quad T_2 = \frac{P_2}{\Omega} \quad T_0 = \frac{P_{mec} + P_{ad}}{\Omega}$$

电磁转矩平衡方程式 $T_{em} = T_2 + T_0$ 。式中负载转矩

掌握异步电动机空载试验中铁耗的分离办法。

第6章 三相异步电动机是电力拖动

主要内容有：（1）三相异步电动机的电磁转矩的物理表达式、参数表达式和实用表达式，固有机械特性和人为机械特性（2）三相笼型异步电动机的直接启动和降压启动方法，三相绕线式异步电动机的转子串电阻启动方法及分级启动电阻的计算（3）三相异步电动机的能耗制动，反接制动及回馈制动方法及制动过程分析。（4）三相异步电动机的变极调速、变频调速、降压调速、绕线转子电动机转子串电阻调速及串级调速方法等。

第一部分变压器

一、填空题：

- 1、电部机的铁耗包括 磁滞损耗 和 涡流损耗 两部分。
- 2、变压器负载运行时，当负载电流增大时，铜损耗会 增大，铁损耗会 基本不变。
- 3、在本课程中，电机包括：直流电机、变压器、异步电机、和 同步电动机。
- 4、变压器中的磁通包含主磁通和 漏磁通，前者（主磁通）的路径为：铁心，后者的路径为 空气及变压器油。
- 5、变压器主磁通的性质和作用 与原、副边绕组相交链，是变压器实现能量转换和传递的主要因素，漏磁通的性质和作用 仅与原边绕组或副边绕组相交链，不传递能量，但起到电压平衡作用。
- 6、一台单相双绕组变压器，额定容量 $S_N = 250 \text{KVA}$ ，额定电压 $U_{1N}/U_{2N} = 10/0.4 \text{KV}$ ，试求一次、二次侧的额定电流 $I_{1N} = 25 \text{A}$ ， $I_{2N} = 625 \text{A}$ 。
- 7、一台三相变压器，额定容量 $S_N = 5000 \text{kVA}$ ，额定电压 $U_{1N}/U_{2N} = 10/6.3 \text{KV}$ ，Y，d 联结（即 Y/△ 联结），试求：
 - （1）一次、二次侧的额定电流； $I_{1N} = 288.68 \text{A}$ ， $I_{2N} = 458.21 \text{A}$
 - （2）一次、二次侧的额定相电压和相电流 $U_{1N} = 5.77 \text{KV}$ ， $U_{2N} = 6.3 \text{KV}$ ； $I_{1N} = 288.68 \text{A}$ ， $I_{2N} = 264.55 \text{A}$ 。
- 8、铁心的作用是 为了提高磁路的导磁率。为什么要用厚度为 0.35mm 且表面土有绝缘漆的硅钢片叠制成铁心 为了减小铁心内的涡流损耗。
- 9、一台单相变压器在铁心叠装时，由于硅钢片剪裁不当，叠装时接缝处留有较大的缝隙，那么

此台变压器的空载电流将②。(选填：①减少；②增加；③不变)

10、一台单相变压器，额定电压为220/110V现将原边接在电压为250V的电源上，变压器等效电路中的励磁电抗则③。(选填：①不变；②变大；③变小；)

11、一台变比 $k=10$ 的变压器，从低压侧做空载试验求得励磁阻抗为 16Ω ，那么高压边的励磁阻抗值是②。(选填①16；②1600；③0.16)

12、一台单相变压器进行空载试验，当高压侧加额定电压进行测量，或低压侧加额定电压进行测量，所测得损耗③。(选填①不相等且相差较大；②折算后相等；③相等)

13、变压器的短路损耗为③。(选填①全部为铜耗；②全部为铁耗；③主要为铜耗)

14、若电源电压不变，变压器产生的主磁通 Φ ，在空载和负载时，其值②。

(选填①完全相等；②基本不变；③根本不同；)

15、一台单相变压器，当一次侧电压降至额定电压一半时，变压器等效电路中的励磁电抗②。(选填：①不变；②变大；③变小)

16、一台变压器的额定频率为50Hz，如果接到60Hz的电源上，且额定电压的数值相等，则此变压器铁心中的磁通①。(选填：①减少；②不变；③增加)

17、变压器在空载时，线路电压增加，铁心损耗将①。(选填：①增加；②不变；③减少)

18、Y/Y联接的三相变压器组，在空载运行时，由于②③，使相电压增大，有害于变压器的正常运行。(选填：①有三次谐波电流通过；②有三次谐波磁通通过；③有三次谐波感应电势)

19、消除三相心式变压器中的三次谐波磁通的主要方法是②③。(选填：①采用Y/Y联接；②采用Y/ Δ 联接；③采用 Δ/Δ 联接)

20、Y/Y联接的组式变压器，相电势的波形是②。(选填：①正弦波；②尖顶波；③平顶波)

21、变压器并联运行，变比相等是为了无环流；短路电压标么值相等是为了负载分配合理；连接组别相同是为了不因过大的环流而烧毁变压器绕组；短路阻抗角相等是为了变压器副边绕组的电流同相位，使在负载电流一定时每台变压器承担的电流最小。

22、通过 和 实验可求取变压器的参数。

答：空载和短路。

23、一台接到电源频率固定的变压器，在忽略漏阻抗压降条件下，其主磁通的大小决定于 的大小，而与磁路的 基本无关，其主磁通与励磁电流成 关系。(外加电压；材质和几何尺寸；非线性)

24、变压器铁心导磁性能越好，其励磁电抗越 ，励磁电流越 。(越大；越小)

25、变压器带负载运行时，若负载增大，其铁损耗将 ，铜损耗将 (忽略漏阻抗压降的影响)。(不变；增加)

26、当变压器负载($\varphi_2 > 0^\circ$)一定，电源电压下降，则空载电流 I_0 ，铁损耗 P_{Fe} 。(减小；减小)

27、一台2kV·A、400/100V的单相变压器，低压侧加100V，高压侧开路测得 $I_0=2A$ ； $P_0=20W$ ；当高压侧加400V，低压侧开路，测得 $I_0=$ A， $P_0=$ W。(0.5；20)

28、变压器短路阻抗越大，其电压变化率就 ，短路电流就 。(大；小)

29、变压器等效电路中的 x_m 是对应于 电抗， r_m 是表示 电阻。(主磁通的；铁心损耗的等效)

30、两台变压器并联运行，第一台先达满载，说明第一台变压器短路阻抗标么值比第二台 。(小)

31、三相变压器的联结组别不仅与绕组的 和 有关，而且还与三相绕组的 有关。(绕向；首末端标记；联结方式)

32、变压器空载运行时功率因数很低，这是由于 。(空载时建立主、漏磁场所需无功远大于供给铁损耗和空载时铜损耗所需的有功功率)

二、判断下列说法是否正确：

1. 变压器的激磁阻抗 Z_m 随外加电压的增大而增大。×

2. 变压器从空载到负载主磁通将随负载电流的增加而变大。×

3. 变压器变比的定义是初级和次级绕组的负载电压之比。×

4. 变压器短路实验常在高压侧进行，测取外加电压为额定电压时的电流。×

5. 变压器次级电流折算到初级要除以变比 k 。×

6. 短路电压 u_k 越大，则变压器随负载变化时，输出电压波动越大，且在变压器故障短路情况下，短路电流较小。○

7. 按国家标准，实验测出的电阻值和电抗值应换算到基准工作温度(75°C)时的数值。×

$$Z_m = \frac{U_1}{I_o}$$

- 8、变压器空载实验时， $Z_m = \frac{U_1}{I_o}$ ，为了使测出的参数能符合变压器的实际运行，应选取额定电压时的数据来计算激磁阻抗。○
- 9、变压器的空载损耗可近似看成铁损耗，短路损耗可近似看成铜损耗。○
- 10、变压器带感性负载时，输出电压有可能比空载电压还高。×
- 11、标么值是实际值与该物理量所选定的同单位基值之比的形式表示。○
- 12、变压器次级电阻的标么值与次级电阻折算到初级后的的标么值具有不同的值×
- 13、变压器带额定负载时变压器的效率最高。×
- 14、三相心式变压器三相磁路长度不同，当外加三相对称电压时，三相激磁电流不完全对称，中间铁心柱的一相磁路较短，激磁电流较大。×
- 15、绕组的同名端只决定于绕组的绕向，与绕组的首末端标志无关。○
- 16、联接组号为Y/Y-4的变压器次级绕组的线电动势超前初级绕组的线电动势120°×
- 17、在三相变压器中，总希望在初级或次级绕组中有一个接成三角形，以保证相电动势接近正弦波，从而避免相电动势波形发生畸变。○
- 18、磁路彼此相关的三相组式变压器如采用Y/Y联结会使相电动势畸变成为尖顶波，可能危及绕组绝缘安全，故不允许采用Y/Y联结。×
- 19、电流互感器不允许短路运行。×
- 20、单相变压器额定容量 $S_N=2\text{KVA}$ ，原，副方额定电压 $U_{1N}/U_{2N}=220/110\text{V}$ ，今在原方施以22V的直流电压时，副方的电压为11V。×
- 21、仪用电压互感器在工作时绝对不允许副方短路。○
- 22、变压器中的磁通按正弦规律变化时，激磁电流波形也按正弦规律变化。×
- 23、不论变压器带什么性质的负载，其负载电压总比空载电压低。×
- 24、变压器低压侧电压折算到高压侧时，低压侧电压乘以变比K。○
- 25、一台变压器原边电压 U_1 不变，副边接电阻性负载或接电感性负载，如负载电流相等，则两种情况下，副边电压也相等（ ）。(F)
- 26、变压器在原边外加额定电压不变的条件下，副边电流大，导致原边电流也大，因此变压器的主要磁通也大（ ）。(F)
- 27、变压器的漏抗是个常数，而其励磁电抗却随磁路的饱和而减少（ ）。(T)
- 28、自耦变压器由于存在传导功率，因此其设计容量小于铭牌的额定容量（ ）。(T)
- 29、使用电压互感器时其二次侧不允许短路，而使用电流互感器时二次侧则不允许开路（ ）。(T)

三、选择题

- 1、变压器的空载损耗为：(B)
- A、主要为铜耗 B、主要为铁耗 C、全部为铁耗 D、全部为铜耗
- 2、变压器空载电流小的原因是：(A)
- A、变压器的励磁阻抗大 B、一次绕组匝数多，电阻大 C、一次绕组漏抗大
- 3、当一次侧接额定电压并维持不变时，变压器由空载转为满载运行时，其主磁通将会 (C)
- A、增大 B、减小 C、基本不变
- 4、一台一次侧额定电压为220V的单相变压器，接220V交流电源时，空载电流为1A；如果不慎错误地接到380V的交流电源，则空载电流为 (C)
- A、1.727A； B、1.0A； C、大于1.727A
- 5、下列哪种形式的变压器在电力系统中不宜采用 (D)
- A、Y,d接法的芯式变压器； B、D,y接法的组式变压器；
- C、Y,y接法的芯式变压器； D、Y,y接法的组式变压器
- 6、一台三相变压器， $S_N=200\text{kVA}$ ， $U_{1N}/U_{2N}=1000/400\text{V}$ ，Y/Δ接法，当此变压器额定运行时，二次绕组中流过的电流值为 (C)
- A、500A； B、288.7A； C、166.7A； D、115.5A。
- 7、一台变压器设计的频率为50Hz，现在将它接到60Hz的电网上运行，当额定电压不变时，铁心中的磁通将 (C)

- A、增加；B、不变；C、减小；D、为零不能运行。
- 8、一台变压器在高压侧做空载实验求得的参数与在低压侧做实验求得的参数相比 (A)
- A、大 K^2 倍；B、大 K 倍；C、相同；D、小 K^2 倍；
- 9、一台变压器原边接在额定电压的电源上，当副边带纯电阻负载时，则从原边输入的功率：③
- ①只包含有功功率；②只包含无功功率；③既有有功功率，又有无功功率；④为零。
- 10、变压器中，不考虑漏阻抗压降和饱和的影响，若原边电压不变，铁心不变，而将匝数增加，则励磁电流：②
- ①增加；②减少；③不变；④基本不变。
- 11、一台变压器在 () 时效率最高。③
- ① $\beta=1$ ；② P_0/P_S =常数；③ $P_{Cu}=P_{Fe}$ ；④ $S=S_N$

四、问答题

- 1、电流互感器二次绕组为什么不许开路？电压互感器二次绕组为什么不许短路？

答：电流互感器正常运行时，相当于变压器工作在短路状态，一、二次磁动势处于平衡状态，磁场很弱。若二次侧开路，一次侧电流完全用于励磁，磁场变得很强，将在二次侧感应出很高的电压，将绝缘击穿，危及人身及设备安全。因此，电流互感器二次侧不得开路。

电压互感器正常运行时，负载接电压表，阻抗很大，接近于空载运行。若二次绕组短路，则变成短路运行，电流从空载电流变成短路电流，一、二次侧电流均变得很大，造成互感器绕组过热而烧坏。

- 2、为什么三相变压器组不能采用Yy联结？而三相心式变压器又可采用Yy联结？

答：Yy联结的三相变压器，一、二次绕组中都不能流通3次谐波电流，励磁电流基本接近正弦波。由于磁路饱和的原因，铁心中主磁通基本为平顶波，其中含较强的3次谐波磁通。对于三相变压器组，各相磁路彼此独立，3次谐波磁通沿铁心闭合。由于铁心磁阻很小，故3次谐波磁通较大，加上3次谐波磁通的频率为基波频率的3倍，所以，由它所感应的3次谐波相电势相当大，在数值上可达基波幅值的45%-60%，甚至更大，结果使相电势波形畸变，最大值升高很多，可能使绕组绝缘击穿，故不能采用Yy联结。

对于三相心式变压器，由于三相磁路彼此相关，三次谐波磁通又彼此同相位、同大小，不能沿铁心闭合，只能借油、油箱壁等形成闭合。由于这些磁路的磁阻很大，故3次谐波磁通很小，主磁通基本接近正弦波，因此可以采用Yy联结。但由于3次谐波磁通通过油箱壁闭合，引起附加涡流损耗，因此对容量较大、电压较高的三相心式变压器，也不宜采用Yy联结。

- 3、变压器并联运行的最理想情况有那些？怎样才能达到最理想的情况？

答：变压器并联运行的最理想情况是

- (1) 空载时并联的变压器之间无环流；(2) 负载时能按照各台变压器的容量合理地分担负载；(3) 负载时各变压器分担的电流应为同相。

为了达到上述并联运行的理想情况，各台变压器必须具备下列三个条件

- (1) 各台变压器的一次侧额定电压和二次侧额定电压应分别相等。此时，各台变压器的一次侧与二次侧电压之比相等；(2) 各台变压器的二次侧线电压对一次侧线电压的相位差相等，即各台变压器应属于相同的连接组；(3) 各台变压器用标么值表示的短路阻抗应相等，短路电抗和短路电阻之比也应相等。

- 4、为什么变压器一、二次绕组电流与匝数成反比，只有在满载或接近满载时才成立，空载时不成立？

答：因为空载时，二次绕组的电流 I_2 等于零，因此不存在电流比的关系。因而满载和接近满载时，一、二次绕组的电流远大于空载电流，在磁动势平衡方程式中，忽略空载电流才能得到

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{K} \text{ 这一关系。}$$

- 5、变压器空载运行时，原线圈加额定电压，这时原线圈电阻 r_1 很小，为什么空载电流 I_0 不大？

如将它接在同电压（仍为额定值）的直流电源上，会如何？

答：因为存在感应电动势 E_1 ，根据电动势方程：

$$U_1 = -E_1 - I_1 r_1 + j I_1 X_{1\sigma} = -E_1 - I_1 r_1 + j I_1 X_{1\sigma} + I_1 r_1 + j I_1 X_{1\sigma}$$
 可知，尽管 r_1 很小，但由于励磁阻抗 Z_m 很大，所以 I_0 不大。如果接直流电源，由于磁通恒定不变，绕组中不感应电动势，即 $E_1 = 0$ ， $E_{1\sigma} = 0$ ，因此电压全部降在电阻上，即有 $I = U_1 / r_1$ ，因为 r_1 很

小，所以电流很大。

6、为什么变压器的空载损耗可近似看成铁损耗，而短路损耗可近似看成为铜损耗？

答 变压器铁损耗的大小决定于铁心中磁通密度的大小，铜损耗的大小决定于绕组中电流的大小。

变压器空载和短路时，输出功率都为零。输入功率全部变为变压器的损耗。即铜损耗与铁损耗之和。空载时，电源电压为额定值，铁心中磁通密度达到正常运行的数值，铁损耗也为正常运行时的数值。而此时二次绕组中的电流为零，没有铜损耗，一次绕组中电流仅为励磁电流，远小于正常运行的数值，它产生的铜损耗相对于这时的铁损耗可以忽略不计，因而空载损耗可近似看成为铁损耗。短路试验时，输入功率为短路损耗。此时一次、二次绕组电流均为额定值，铜损耗也达到正常运行时的数值，而电压大大低于额定电压，铁心中磁通密度也大大低于正常运行时的数值，此时铁损耗与铜损耗相比可忽略不计。因此短路损耗可近似看成为铜损耗。

7、电源频率降低，其他各量不变，试分析变压器铁心饱和程度、励磁电流、励磁电抗、漏抗的变化情况。

答 据 $U_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m$ 可知，当 f 降低时， Φ_m (B_m) 增加，铁心饱和程度增加，励磁电流增加，励磁电抗减小。

8、变压器的原、副边额定电压都是如何定义的？

答 原边额定电压是指规定加在一次侧的电压。副边额定电压是指当一次侧加上额定电压时，二次侧的开路电压。

五、计算题

1、有一台630KVA、35/6.6KV、50Hz的单相变压器，空载实验与稳态短路实验数据如下所示：

实验名称	电压加于	电压	电流	功率
空载实验	低压侧	6.6KV	5.1A	3.8KW
短路实验	高压侧	2.27KV	17.2A	9.5KW

求(1)归算到高压侧的励磁阻抗及短路阻抗；

(2)假定 $R_1 = R'_2$, $X_{10} = X'_{20}$ ，绘出T型等效电路；

(3) 当低压侧接负载 $Z_L = 57 + j43.5$ 时，利用T型等效电路求高压侧电流及其功率因数。

$$Z_m = \frac{U_o}{I_o} = \frac{6600}{5.1} = 1294\Omega$$

解：(1) 励磁阻抗

$$R_m = \frac{P_o}{I_o^2} = \frac{3800}{5.1^2} = 146\Omega$$

励磁电阻

$$X_m = \sqrt{Z_m^2 - R_m^2} = \sqrt{1294^2 - 146^2} = 1285\Omega$$

励磁电抗

$$K = \frac{U_{10}}{U_{20}} = \frac{35}{6.6} = 5.3$$

变压比

归算到高压侧

$$Z_m' = K^2 \cdot Z_m = 5.3^2 \times 1294 = 36348\Omega$$

$$X_m' = K^2 \cdot X_m = 5.3^2 \times 1285 = 36095\Omega$$

$$R_m' = K^2 \cdot R_m = 5.3^2 \times 146 = 4100\Omega$$

利用稳态短路实验数据计算可得：

$$Z_k = \frac{U_k}{I_k} = \frac{2270}{17.2} = 132\Omega$$

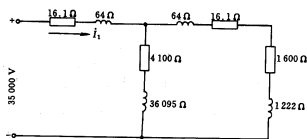
$$R_k = \frac{P_k}{I_k^2} = \frac{9500}{17.2^2} = 32.2\Omega$$

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = \sqrt{132^2 - 32.2^2} = 128\Omega$$

$$X_{1s} = X_{2s}' = \frac{1}{2} \times 128 = 64\Omega \quad (2)$$

$$R_1 = R_2' = \frac{1}{2} R_k = \frac{1}{2} \times 32.2 = 16.1\Omega$$

T型等效电路如图所示：



(3) 略。自己验算

2、一铁心线圈，加上12V直流电压时，电流为1A；加上110V交流电压时，电流为2A，消耗的功率为88W，求后一情况下线圈的铜损耗、铁损耗和功率因数。

解 本题目的是为了复习铁心线圈电路中的功率关系

由线圈加直流电压时的电压和电流值可得线圈的电阻为

$$R = \frac{U}{I} = \frac{12}{1} = 12\Omega$$

由线圈加交流电压时的数据求得交流铁心线圈电路中的铜损耗、铁损耗和功率因数分别为

$$P_{cu} = RI^2 = 12 \times 2^2 = 48W$$

$$P_{Fe} = P - P_{cu} = 88 - 48 = 40W$$

$$\lambda = \frac{P}{UI} = \frac{88}{110 \times 2} = 0.4$$

3、一交流铁心线圈电路，线圈电压 $U = 380V$ ，电流 $I = 1A$ ，功率因数 $\lambda = \cos\varphi = 0.6$ ，

频率 $f = 50Hz$ ，匝数 $N = 8650$ 。电阻 $R = 0.4\Omega$ ，漏电抗 $X = 0.6\Omega$ 。求线圈的电动势和主磁通最大值。

解 本题目的是为了复习交流铁心线圈电路中的电磁关系。

选择电压为参考相量，即 $\dot{U} = 380\angle 0^\circ$ ，电压与电流的相位差 $\varphi = \arccos\varphi = \arccos 0.6 = 53.1^\circ$

由交流铁心线圈电路的电动势平衡方程求得

$$\dot{E} = -\dot{U} + (R + jX)\dot{I} = -380\angle 0^\circ + (0.4 + j0.6) \times 1\angle -53.1^\circ = 379\angle 0.006^\circ V$$

由此求得

$$\phi = \frac{E}{4.44Nf} = \frac{379}{4.44 \times 8650 \times 50} = 0.0002 \text{ Wb}$$

- 4、一单相变压器， $S_N = 50 \text{ KVA}$ ， $U_{1N}/U_{2N} = 10000/230 \text{ V}$ ， $S_N = 50 \text{ KVA}$ ， $R_1 = 40 \Omega$ ， $X_1 = 60 \Omega$ ， $R_2 = 0.02 \Omega$ ， $X_2 = 0.04 \Omega$ ， $R_m = 2400 \Omega$ ， $X_m = 12000 \Omega$ 。当该变压器作降压变压器向外供电时，二次电压 $U_2 = 215 \text{ V}$ ， $I_2 = 180 \text{ A}$ ，功率因数 $\lambda_2 = 0.8$ （电感性）。试用基本方程式求该变压器的 I_0 、 I_1 和 U_1 。

$$\text{解 } k = \frac{U_{1N}}{U_{2N}} = \frac{10000}{230} = 43.48$$

$$\dot{E}_2 = \dot{U}_2 + Z_2 \dot{I}_2 = 215 \angle 0^\circ + (0.02 + j0.04) \times 180 \angle -36.87^\circ = 222.23 \angle 0.93^\circ \text{ V}$$

$$\dot{E}_1 = k \dot{E}_2 = 43.48 \times 222.23 \angle 0.93^\circ = 9662.56 \angle 0.93^\circ \text{ V}$$

$$\dot{I}_0 = -\frac{\dot{E}_1}{Z_m} = -\frac{9662.56 \angle 0.93^\circ}{2400 + j12000} = 0.79 \angle 102.24^\circ \text{ A}$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 - \frac{\dot{I}_2}{k} = (0.79 \angle 102.24^\circ - \frac{180 \angle -36.87^\circ}{43.48}) = 4.76 \angle 136.96^\circ \text{ A}$$

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + Z_1 \dot{I}_1 = -9662.56 \angle 0.93^\circ + (40 + j60) \times 4.76 \angle -136.96^\circ = 9998 \angle -178.65^\circ \text{ V}$$

- 5、单相铜线变压器， $S_N = 20000 \text{ KVA}$ ， $U_{1N}/U_{2N} = 127/11 \text{ KV}$ ， $I_{1N}/I_{2N} = 157.5/1818 \text{ A}$ ， $f_N = 50 \text{ Hz}$ ，室温 $\theta = 15^\circ \text{ C}$ 。在低压侧做空载试验，测得 $U_1 = 11 \text{ KV}$ ， $I_0 = 45.5 \text{ A}$ ， $P_0 = 47 \text{ KW}$ ；在高压侧做短路试验，测得 $U_s = 9.24 \text{ KV}$ ， $I_1 = 157.5 \text{ A}$ ， $P_s = 129 \text{ KW}$ 。设 $R_1 = R_2'$ ， $X_1 = X_2'$ 。求折算至高压侧 75° C 时的T形等效电路中的各参数。

$$Z_m = \frac{U_1}{I_0} = \frac{11 \times 10^3}{45.5} = 241.76 \Omega$$

解：（1）励磁阻抗

$$R_m = \frac{P_0}{I_0^2} = \frac{47 \times 10^3}{45.5^2} = 22.7 \Omega$$

励磁电阻

$$\text{励磁电抗 } X_m = \sqrt{Z_m^2 - R_m^2} = \sqrt{241.76^2 - 22.7^2} = 240.69 \Omega$$

$$K = \frac{U_{1N}}{U_{2N}} = \frac{127}{11} = 11.55$$

变压比

归算到高压侧

$$Z_m' = K^2 \cdot Z_m = 11.55^2 \times 241.76 = 32251.39 \Omega$$

$$R_m' = K^2 \cdot R_m = 11.55^2 \times 22.7 = 3028 \Omega$$

$$X_m' = K^2 \cdot X_m = 11.55^2 \times 240.69 = 32110 \Omega$$

（2）利用稳态短路实验数据计算可得：

$$Z_s = \frac{U_s}{I_1} = \frac{9.24 \times 10^3}{157.5} = 58.67 \Omega$$

$$R_s = \frac{P_s}{I_1^2} = \frac{129 \times 10^3}{157.5^2} = 5.2 \Omega$$

$$X_s = \sqrt{Z_s^2 - R_s^2} = \sqrt{58.67^2 - 5.2^2} = 58.44 \Omega$$

(3) 折算至 75°C ，则

$$R_s = \frac{234.5 + 75}{234.5 + 15} \times 5.2 = 6.45 \Omega$$

$$R_1 = R_2' = \frac{1}{2} R_s = \frac{1}{2} \times 6.45 = 3.225 \Omega$$

$$X_1 = X_2' = \frac{1}{2} X_s = \frac{1}{2} \times 58.44 = 29.22 \Omega$$

6、SCL-1 600/10型三相铝线变压器，D,yn联结。 $S_N = 1600\text{KVA}$ ， $U_{1N}/U_{2N} = 10/0.4\text{KV}$ ， $I_{1N}/I_{2N} = 92.5/2312\text{A}$ 。在低压侧做空载试验，测得 $U_{1L} = 400\text{V}$ ， $I_{0L} = 104\text{A}$ ， $P_0 = 3950\text{W}$ ；在高压侧做短路试验，测得 $U_{sL} = 600\text{V}$ ， $I_{sL} = 92.5\text{A}$ ， $P_s = 13300\text{W}$ 。实验时室温为 $\theta = 20^\circ\text{C}$ 。求折算至高压侧 75°C 时的 R_m 、 X_m 、 Z_m 和 R_s 、 X_s 、 Z_s 。

解：三相变压器空载实验和短路实验测得的电压为线电压，电流为线电流，功率为三相功率。在参数计算时，应用相电压、相电流和每相功率。

$$(1) \text{ 励磁阻抗 } Z_m = \frac{U_{1L}}{I_0} = \frac{U_{1L}/\sqrt{3}}{I_{0L}} = \frac{400}{1.73 \times 104} = 2.223 \Omega$$

$$\text{励磁电阻 } R_m = \frac{P_0}{3I_0^2} = \frac{3950}{3 \times 104^2} = 0.122 \Omega$$

$$\text{励磁电抗 } X_m = \sqrt{Z_m^2 - R_m^2} = \sqrt{2.223^2 - 0.122^2} = 2.22 \Omega$$

$$\text{变压比 } K = \frac{U_{1Np}}{U_{2Np}} = \frac{U_{1N}}{U_{2N}/\sqrt{3}} = \frac{10}{0.4/1.73} = 43.25$$

归算到高压侧

$$Z_m' = K^2 \cdot Z_m = 43.25^2 \times 2.223 = 4158.26 \Omega$$

$$R_m' = K^2 \cdot R_m = 43.25^2 \times 0.122 = 228.21 \Omega$$

$$X_m' = K^2 \cdot X_m = 43.25^2 \times 2.22 = 4152.65 \Omega$$

(2) 利用稳态短路实验数据计算可得：

$$Z_s = \frac{U_s}{I_1} = \frac{U_s L}{\pi L / \sqrt{3}} = \frac{600}{92.5 / 1.73} = 11.22 \Omega$$

$$R_s = \frac{P_s}{3I_1^2} = \frac{P_s}{3(I_{1L} / \sqrt{3})^2} = \frac{P_s}{I_{1L}^2} = \frac{13300}{92.5^2} = 1.55 \Omega$$

$$X_s = \sqrt{Z_s^2 - R_s^2} = \sqrt{11.22^2 - 1.55^2} = 11.11 \Omega$$

(3) 折算至 75°C ，则

$$R_s = \frac{234.5 + 75}{234.5 + 20} \times 1.55 = 1.89 \Omega$$

$$X_s = 11.11 \Omega$$

$$Z_s = \sqrt{R_s^2 + X_s^2} = \sqrt{1.89^2 + 11.11^2} = 11.27$$

7、三相变压器额定容量为 $20\text{kV}\cdot\text{A}$ ，额定电压为 $10/0.4\text{ kV}$ ，额定频率为 50Hz ，Y，y0 联结，高压绕组匝数为 3300。试求：（1）变压器高压侧和低压侧的额定电流；（2）高压和低压绕组的额定电压；（3）画出变压器 Y，y0 的接线图。

$$I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}} = 1.16\text{ A}$$

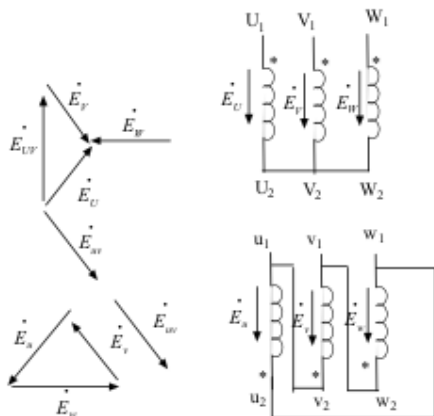
解：（1）

$$I_{2N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{2N}} = 28.87\text{ A}$$

$$U_{1NP} = \frac{U_{1N}}{\sqrt{3}} = 5.774\text{ kV}$$

$$U_{2NP} = \frac{U_{2N}}{\sqrt{3}} = 0.231\text{ kV}$$

8、判断下列连接组别



(连接组为Yd5的连接组。)

(图略,组别Y,d11)

第二部分直流电机

一、填空题:

- 1、一台他励调速直流电动机,当励磁电流减小时,将使该电机的转速升高。
- 2、直流电机以励磁方式来分类,有他励, 并励, 串励 和 复励 四类。
- 3、直流电动机常用的制动方式有 能耗制动、反接制动、回馈制动。
- 4、直流发电机的输出电压随负载电流的增大而 降低、其中串励和他励发电机相比,电压降更大的是 串励电机。
- 5、并励直流发电机自励电压的建立满足 电机中要有剩磁、励磁绕组并接到电枢绕组两端的极性要正确、使励磁电流产生的磁通与剩磁同方向、励磁回路的电阻值要小于建立临界电阻值三个条件。
- 6、串励电动机电动机空载运行时会出现的现象是 飞车现象。
- 7、直流电动机恒功率调速应采用的方法是 调励磁电流调速。
- 8、直流并励电动机的输出功率等于 Δ 。(选填: ① $U_N I_N \eta_N$; ② $U_N I_N - I_f$; ③ $U_N I_N$)
- 9、直流发电机电枢导体中的电流是 B。(选填: ①直流电; ②交流电; ③脉动的直流)
- 10、要改变并励直流电动机的转向,可以 C。(选填: ①增大励磁; ②改变电源极性; ③改变励磁绕组)
- 11、直流发电机的电磁转矩与转速的方向 B。(选填: ①相同; ②相反; ③无关)
- 12、一台并励直流发电机,在500rpm时建立空载电压120V,若把转速提高到1000rpm,则该电机空载电压 B。(因为 $E=C_e \Phi n$, Φ 在变)
- A: 等于240V B: 大于240V C: 大于120V但小于240V D: 无法判断
- 13、一台串励直流电动机,若把电刷顺旋转方向偏离几何中心线一个角度,设电机的电枢电流保持不变,此时电动机的转速将 A。(选填: ①降低; ②升高; ③保持不变)
- 14、一台直流发电机,由额定运行状态转速下降为原来的30%,而励磁电流及电枢电流均不变,则 A。(选填: ①E下降30%; ② T_{em} 下降30%; ③E和 T_{em} 都下降30%)
- 15、直流发电机的电磁转矩是 制动 转矩,而直流电动机的电磁转矩是 驱动 转矩。
- 16、如果把直流发电机的电刷顺电枢旋转方向移动一个角度,负载时的电枢反应是 去磁 性的;如果把电枢反方向旋转,负载时的电枢反应是 助 磁性的。

- 17、直流电机空载时损耗有 机械损耗、铁心损耗、励磁损耗，它们分别是由 机械摩擦、电枢铁心相对磁场运动、励磁绕组铜耗 引起的。
- 18、直流电机负载时损耗有 电枢回路电阻上的损耗及电刷与换向器表面的接触电阻的损耗；铁耗和机械损耗在 负载变化时 可看成是不变损耗。
- 19、一台直流发电机的转速由额定值下降为原来的50%，而励磁电流 I_f 、电枢电流 I_a 不变，则感应电势 下降50%，电磁转矩保持 不变。
- 20、他励直流电动机空载运行时，若不慎将励磁回路断开，电机转速将 △。（1、飞车 2、升至新的值稳定运行 3、减速直至停转）
- 21、直流电机电枢反应的定义是 ，当电刷在几何中线时，电动机产生 性质的电枢反应，其结果使 和 ，物理中性线朝 方向偏移。（电枢磁动势对励磁磁动势的作用；交磁；气隙磁场产生畸变；对主磁场起附加去磁作用；逆电机旋转）
- 22、交轴电枢反应对电机的影响是（1）使气隙磁场发直流电机的电磁转矩是由 和 共同作用产生的。（每极气隙磁通量；电枢电流）
生畸变；（2）使物理中性线偏移；（3）使每极磁通减少，具有去磁效应。
- 23、可用下列关系来判断直流电机的运行状态，当 时为电动机状态，当 时为发电电机状态。（ $E_a < U$ ； $E_a > U$ ）
- 24、直流电机的电磁转矩是由 和 共同作用产生的。（每极气隙磁通量；电枢电流）

二、判断下列说法是否正确：

1. 直流电机中电刷所短路的绕组的感应电动势为最大。×
2. 直流电机的电刷的实际位置是在电机的磁极中性线上。○
3. 单迭绕组的并联支路数等于该电机的极对数。○
4. 并励电动机的电枢电流 I_a ，励磁电流 I_f ，输入电流 I 的关系为： $I_a = I + I_f$ 。×
5. 复励电动机的每个主极铁心上不止有一套励磁绕组。○
6. 直流电动机中电枢电流为直流。×
7. 直流发电机的额定功率 P_N 是指输入功率。×
8. 直流电动机其它条件不变，减小励磁电流，电动机的转速会减小。×
9. 一般地，具有上升机械特性的电机带负载会稳定运行。×
10. 直流电动机改变电枢电压调速会使电动机的机械特性变软。×
11. 直流电动机调励磁电流调速是恒转矩调速。×
12. 直流测速电机实际是一个直流电动机。×
13. 要把一个重物以高于直流电动机理想空载转速 n_0 的速度匀速放下，可以采用能耗制动方式或电动势反向的反接制动方式。×
14. 欲使直流发电机的端电压保持恒定，其励磁电流随负载电流变化的关系曲线称为外特性曲线。×
15. 直流电动机带恒定负载工作时，若减小励磁电流，则电枢电流会增大。○
16. 直流发电机轴上输入的功率即为发电机的额定功率。×
17. 直流电动机启动时，若不考虑电枢反应的去磁作用，起动电流为额定电流5倍，起动转矩也为额定转矩的5倍。○
18. 一台并励直流发电机，正转能自励，若反转也能自励。（ ）×
19. 一台直流发电机，若把电枢固定，而电刷与磁极同时旋转，则在电刷两端仍能得到直流电压。（ ）（T）
20. 一台并励直流电动机，若改变电源极性，则电机转向也改变。（F）
21. 直流电动机的电磁转矩是驱动性质的，因此稳定运行时，大的电磁转矩对应的转速就高。（ ）（F）

三、选择题

1. 若并励直流发电机转速升高15%，则空载时发电机的端电压将升高 （B）
A、15% B、>15% C、<15%
2. 直流电动机降压调速稳定后，若磁场及负载转速不变，则 （C） 不变

- A、输入功率 B、输出功率 C、电枢电流
 3、直流发电机由主磁通感应的电动势存在于 A
 A、电枢绕组 B、电枢和励磁绕组 C、励磁绕组
 4、电源电压不变时，直流电动机的启动电流决定于 (B)
 A、负载转矩的大小 B、电枢回路的总电阻 C、励磁电流 D、由上述因素共同作用
 5、在直流电动机中，公式 $E_a = C_e \Phi n$ 和 $T = C_M \Phi I_a$ 中的 Φ 是 (B)
 A、主磁极每极磁通； B、每极合成磁通；
 C、每极电枢反应磁通； D、所有磁极的总磁通。
 6、直流并励电动机启动时，串联在励磁回路中的变阻器应处于的位置 (B)
 A、阻值最大； B、阻值最小； C、断开； D、任意。
 7、一台直流发电机，在额定状态下，拖动转速下降了30%，假设励磁电流及电枢电流不变，则 (C)
 A、电磁转矩 T 下降30%； B、端电压下降30%；
 C、感应电势 E_a 下降30%； D、 E_a 和 T 均下降30%
 8、直流发电机主磁极磁通产生感应电动势存在于 () 中。 (1)
 (1) 电枢绕组； (2) 励磁绕组； (3) 电枢绕组和励磁绕组
 9、直流发电机电刷在几何中线上，如果磁路不饱和，这时电枢反应是 () (3)
 (1) 去磁； (2) 助磁； (3) 不去磁也不助磁。

四、问答题

1、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，哪一个电压变化率大？

答：他励发电机由空载到额定负载，电枢电流 I_a 由0增加到额定值 I_{aN} ，电枢回路电阻压降 $I_a R_a$ 增加，且电枢反应的去磁作用使主磁通 Φ 下降，从而使感应电动势 E 下降。由公式 $U = E - I_a R_a$ 可知，端电压 U 随 I_a 的增加而下降。

对于并励发电机，除上面两个原因外，端电压下降，引起励磁电流 I_f 下降，使得 Φ 下降和 E 下降，从而引起 U 进一步降低，所以并励发电机的电压变化率比他励发电机的电压变化率要大些。

2、一台直流并励电动机，在维修后作负载实验，发现电动机转速很高，电流超过正常值，停机维修发现线路无误，电动机的励磁电流正常。试分析这一故障的可能原因并说明理由。

答：如果直流电动机的电刷不在几何中性线上，则在负载运行时，除了具有交轴电枢磁动势外，还存在直轴电枢磁动势。如果电刷位置是从几何中性线逆电机旋转方向移开的话，则直轴电枢磁动势是去磁的，即与主磁通方向相反。而当气隙磁通削弱时，便会使转速 $n =$

$$U - R_a I_a$$

$C_e \Phi$ 增高。同时在一定电磁转矩下，因为 $T_{em} = C_M \Phi I_a$ ，电枢电流会增加。如果电动机具有起稳定作用的串励绕组，则可能是串励绕组反接，而不是电枢位置不对，或者两种原因兼有。

3、为什么在供给相同的负载电流时，并励发电机的端电压下降比他励发电机的端电压大？

4、试述并励直流电动机的调速方法，并说明各种方法的特点。

答 并励直流电动机的调速方法有以下三种：

(1) 改变励磁电流调速。这种调速方法方便，在端电压一定时，只要调节励磁回路中的调节电阻便可改变转速。由于通过调节电阻中的励磁电流不大。故消耗的功率不大，转速变化平滑均匀，且范围宽广。接入并励回路中的调节电阻为零时的转速为最低转速，故只能“调高”，不能“调低”。改变励磁电流，机械特性的斜率发生变化并上下移动。为使电机在调速过程中得到充分利用，在不同转速下都能保持额定负载电流，此法适用于恒功率负载的调速。

(2) 改变电枢端电压调速。当励磁电流不变时，只要改变电枢端电压，即可改变电动机的转速，提高电枢端电压，转速升高。改变电枢端电压，机械特性上下移动，但斜率不变，即其硬度不变。此种调速方法的最缺点是是需要专用电源。在保持电枢电流为额定值时，可保持转矩不变，故此法适用于恒转矩的负载调速。

(3) 改变串入电枢回路的电阻调速。在端电压及励磁电流一定、接入电枢回路的电阻为零时，转速最高，增加电枢回路电阻转速降低，故转速只能“调低”不能“调高”。增加电枢电阻，机械特性斜率增大，即硬度变软，此种调速方法功率损耗大，效率低，如果串入电枢回路的调节电阻是分级的，则为有级调速，平滑性不高，此法适用于恒转矩的负载调速。

5、如何确定换向极的极性，换向极绕组为什么要与电枢绕组相串联？

答 使换向极产生的磁通与电枢反应磁通方向相反。对于直流发电机而言，换向极性和电枢要

进入的主磁极性相同；而对于直流电动机，则换向极极性和电枢要进入的主磁极性相反。

换向极绕组与电枢绕组相串联的原因是：使随着电枢磁场的变化，换向极磁场也随之变化，即任何负载情况下都能抵消电枢反应的影响。

6、试比较他励和并励直流发电机的外特性有何不同？并说明影响曲线形状的因素。

答 并励直流发电机的外特性比他励的软。

他励：影响因素有两个

(1)随着 I_a 增加， $I_a R_a$ 增加，使 U 下降；

(2)随着 I_a 增加，电枢反应附加去磁作用增强，使磁通 ϕ 减少，电枢电动势 E_a 减少，最后使 U 下降。

并励：影响因素有三个

(1)随着 I_a 增加， $I_a R_a$ 增加，使 U 下降；

(2)随着 I_a 增加，电枢反应附加去磁作用增强，使磁通 ϕ 减少，电枢电动势 E_a 减少，最后使端电压 U 下降。

(3)两端电压下降，磁通 ϕ 下降，电枢电动势 E_a 进一步减少，端电压 U 进一步下降。

7、一台并励直流发电机并联于电网上，若原动机停止供给机械能，将发电机过渡到电动机状态工作，此时电磁转矩方向是否变？旋转方向是否改变？

答 电磁转矩方向改变，电机旋转方向不变。

五、计算题

1、一并励直流发电机， $P_N=35\text{KW}$ ， $U_N=115\text{V}$ ， $n_N=1450\text{r/min}$ ，电枢电路各绕组总电阻 $r_a=0.0243\Omega$ ，一对电刷压降 $2\Delta U_b=2\text{V}$ ，并励电路电阻 $R_f=20.1\Omega$ 。求额定负载时的电磁转矩及电磁功率。

$$I_N = \frac{P_N}{U_N} = \frac{35 \times 103}{115} = 304.3\text{A}$$

解：额定电流：

$$I_{fN} = \frac{U_N}{R_f} = \frac{115}{20.1} = 5.72\text{A}$$

额定励磁电流：

$$I_{aN} = I_N + I_{fN} = 310\text{A}$$

$$E_N = U_N + I_{aN} r_a + 2U_{\Delta b} = 115 + 310 \times 0.0243 + 2 = 124.5\text{V}$$

$$P_{em} = E_N I_{aN} = 124.5 \times 310\text{W} = 38.6\text{KW}$$

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega} = \frac{E_N I_{aN}}{2\pi \frac{n}{60}} = \frac{38600}{2\pi \frac{1450}{60}} = 254.2\text{N.m}$$

电磁转矩：

2、一台并励直流发电机，励磁回路总电阻 $R_f=44\text{W}$ ，负载电阻 $R_L=4\text{W}$ ，电枢回路总电阻 $R_a=0.25\text{W}$ ，端电压 $U=220\text{V}$ ，使求：

(1) 励磁电流 I_f 和负载电流 I ；

(2) 电枢电流 I_a 和电枢电动势 E_a （忽略电刷接触压降）；

(3) 输出功率 P_2 和电磁功率 P_{em} 。

$$I_f = \frac{U}{R_f} = \frac{220}{44} = 5\text{A}$$

解：励磁电流

$$I = \frac{U}{R_L} = \frac{220}{4} = 55\text{A}$$

负载电流

$$I_a = I + I_f = 55 + 5 = 60\text{A}$$

(2) 电枢电流

$$E_a = U + I_a R_a = 220 + 60 \times 0.25 = 235\text{V}$$

电枢电动势

$$(3) \text{输出功率 } P_2 = UI = 220 \times 55 = 12100W$$

$$\text{电磁功率 } P_{em} = EaI_a = 235 \times 60 = 14100W$$

$$\text{或 } P_{em} = P_2 + I_a^2 R_a + I_f^2 R_f = 12100 + 60^2 \times 0.25 + 5^2 \times 44 = 14100W$$

3、一台他励发电机，额定电枢电压230V，额定电枢电流100A，电枢电阻0.2Ω。求（1）空载电压；（2）如果磁通减小10%，求满载时的输出电压。

$$\text{解 (1)} \quad U_0 = E_N = U_{aN} + R_a I_{aN} = 230 + 0.2 \times 100 = 250V$$

$$(2) \text{ 当 } \Phi \text{ 减小 } 10\% \text{ 时, } E = 0.9E_N = 0.9 \times 250 = 225V$$

$$\text{满载时 } U_a = E - R_a I_{aN} = 225 - 0.2 \times 100 = 205V$$

4、某直流发电机，已知 $P_{Cu} = 2000W$ ， $P_0 = 1200W$ ， $T = 210Nm$ ， $n = 1000rpm$ 。求该发电机的电磁功率、输出功率、输入功率 and 效率。

解

$$P_{em} = T\Omega = \frac{2\pi}{60} Tn = \frac{2 \times 3.14}{60} \times 210 \times 1000 = 21980W$$

$$P_2 = P_{em} - P_{Cu} = 21980 - 2000 = 19980W$$

$$P_1 = P_{em} + P_0 = 21980 + 1200 = 23180W$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \frac{19980}{23180} \times 100\% = 86.19\%$$

5、一台并励直流电动机，额定功率 $P_N = 2.2KW$ ，额定电压 $U_N = 220V$ ，额定效率 $\eta_N = 80\%$ ，额定转速 $n_N = 750rpm$ ，电枢电路电阻 $R_a = 0.2\Omega$ ，励磁电路电阻 $R_f = 275\Omega$ 。求该电机在额定状态下运行时的输入电流I、励磁电流If、电枢电流Ia、电动势E和电磁转矩T。

$$\text{解} \quad I = \frac{P_N}{U_N \eta_N} = \frac{2.2 \times 10^3}{220 \times 0.8} = 12.5A$$

$$I_f = \frac{U_N}{R_f} = \frac{220}{275} = 0.8A$$

$$I_a = I - I_f = 12.5 - 0.8 = 11.7A$$

$$E = U - R_a I_a = 220 - 0.2 \times 11.7 = 217.66V$$

$$C_e \Phi = \frac{E}{n_N} = \frac{217.66}{750} = 0.29$$

$$C_f \Phi = \frac{60}{2\pi} C_e \Phi = \frac{60}{2 \times 3.14} \times 0.29 = 2.77$$

$$T = C_f \Phi I_a = 2.77 \times 11.7 = 32.44Nm$$

6、一台他励电动机，在 $T_L = 87Nm$ 时， $T_0 = 3Nm$ ， $n = 1500rpm$ ， $\eta = 80\%$ 。求该电机的输出功率P2、电磁功率Pe、输入功率P1、铜损耗PCu和空载损耗P0。

解

$$T_2 = T_L = 87Nm$$

$$T = T_2 + T_0 = 87 + 3 = 90Nm$$

$$P_2 = \frac{2\pi}{60} T_2 n = \frac{2 \times 3.14}{60} \times 87 \times 1500 = 13659W$$

$$P_e = \frac{2\pi}{60} T_n = \frac{2 \times 3.14}{60} \times 90 \times 1500 = 14130W$$

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta} = \frac{13659}{0.8} = 17073.75W$$

$$P_{C_{\Sigma}} = P_1 - P_e = 17073.75 - 14130 = 2945.75W$$

$$P_0 = P_e - P_2 = 14130 - 13659 = 471W$$

7、一台并励直流电动机,铭牌数据如下: $P_N=3.5kW$, $U_N=220V$, $I_N=20A$, $n_N=1000r/min$,电枢电阻 $R_a=1\Omega$, $\Delta U_b=1V$, 励磁回路电阻 $R_f=440\Omega$, 空载实验: 当 $U=220V, n=1000r/min$ 时, $I_0=2A$, 试计算当电枢电流 $I_a=10A$ 时,电机的效率(不计杂散损耗)。

$$I_f = \frac{U_f}{R_f} = \frac{220}{440} A = 0.5A$$

解: 励磁电流:

$$P_{C_{af}} = R_f I_f^2 = \frac{U_f^2}{R_f} = \frac{220^2}{440} = 110W$$

励磁损耗:

空载时:

$$\text{输入功率: } P_1 = UI_0 = 220 \times 2W = 440W$$

$$\text{励磁功率: } P_f = 110W$$

$$\text{电枢铜损耗: } P_{C_{ar}} = R_a I_a^2 = R_a (I_0 - I_f)^2 = 2.25W$$

$$\text{电刷接触损耗: } P_{C_{ab}} = 2\Delta U_b I_a^2 = 2 \times 1 \times 1.5W = 3.0W$$

$$\text{附加损耗: } P_{ad} = 0$$

$$\text{则: } P_{mec} + P_{Fe} = P_1 - P_f - P_{C_{ar}} - P_{C_{ab}} - P_{ad} = 324.75W$$

$$\text{当 } I_a = 10A \text{ 时, } I = I_a + I_f = 10.5A$$

$$\text{输入功率: } P_1 = UI = 220 \times 10.5W = 2310W$$

$$P_{C_{ar}} = R_a I_a^2 = 1 \times 10^2 W = 100W$$

$$P_f = 110W$$

$$P_{C_{ab}} = 2\Delta U_b I_a = 2 \times 1 \times 10W = 20W$$

$$\text{输出功率: } P_2 = P_1 - \Sigma P = P_1 - P_{C_{ar}} - P_f - P_{C_{ab}} - (P_{mec} + P_{Fe}) = 1755.25W$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = 75.98\%$$

效率:

8、一台并励直流发电机, 铭牌数据如下: $P_N=6kW$, $U_N=230V$, $n_N=1450r/min$, $R_a=0.57\Omega$ (包括电刷接触电阻), 励磁回路总电阻 $R_f=177\Omega$, 额定负载时的电枢铁损 $P_{Fe}=234W$, 机械损耗为 $P_{mec}=61W$, 求: (1) 额定负载时的电磁功率和电磁转矩。 (2) 额定负载时的效率。

$$\text{解: (1) } P_2 = P_N = 6kW$$

$$I_f = \frac{U_f}{R_f} = \frac{230}{177} A = 1.3A$$

$$P_f = R_f I_f^2 = 299W$$

$$I_N = \frac{P_N}{U_N} = \frac{6000}{230} A = 26.1 A$$

$$I_a = I_N + I_f = 27.4 A$$

$$P_{\text{Cua}} = R_a I_a^2 = 427.9 W$$

所以 $P_{\text{em}} = P_2 + P_{\text{Cua}} + P_f = 6726.9 W$

$$T_{\text{em}} = \frac{P_{\text{em}}}{\Omega} = \frac{6726.9}{\frac{2\pi \times 1450}{60}} N \cdot m = 44.3 N \cdot m$$

$$(2) P_1 = P_{\text{em}} + P_{\text{mec}} + P_{Fe} = 7021.9 W$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = 85.45\%$$

9、一台并励直流发电机，铭牌数据如下：P_N=23kW，U_N=230V，n_N=1500r/min，励磁回路电阻R_f=57.5Ω，电枢电阻R_a=0.1Ω，不计电枢反应磁路饱和。现将这台电机改为并励直流电动机运行，把电枢两端和励磁绕组两端都接到220V的直流电源：运行时维持电枢电流为原额定值。求（1）转速n；（2）电磁功率；（3）电磁转矩。

$$I_f = \frac{U_N}{R_f} = \frac{230}{57.5} A = 4 A$$

解：

$$I_N = \frac{P_N}{U_N} = \frac{23 \times 10^3}{230} A = 100 A$$

$$I_a = I_N + I_f = 104 A$$

$$P_{\text{Cua}} = R_a I_a^2 = 1081.6 W$$

$$(1) E_a = U_N + R_a I_a = 240.4 V$$

$$C_e \Phi = \frac{E_a}{n_N} = 0.1603$$

电动机运行： $E_a = U_N - R_a I_a = 209.6 V$

$$C_e \Phi' = \frac{220}{230} C_e \Phi = \frac{220}{230} \times 0.1603 = 0.1533$$

$$n = \frac{E_a}{C_e \Phi'} = 1367 r / \text{min}$$

$$(2) P_{\text{em}} = E_a I_a = 21.798 kW$$

$$(3) T_{\text{em}} = \frac{P_{\text{em}}}{\Omega} = \frac{21.798 \times 10^3}{\frac{2\pi \times 1367}{60}} N \cdot m = 152.27 N \cdot m$$

第四部分 异步电机

一、填空题：

- 1、异步电动机定子绕组采用的单层迭绕组是 整距 绕组，采用的双层迭绕组是 短距 绕组（选短距、整距、或长距）
- 2、三相绕组通以三相电流时，将产生 旋转 磁场，单相绕组通以三相电流时，将产生 脉振 磁场。

- 3、在电机中, 参数 r_m 称为 激磁电阻。 X_m 称为 激磁电抗。当电源电压升高时, X_m 会 下降。
- 4、某三相交流电机定子槽数为36, 极对数为3, 双层短距分布绕组相邻两槽内导体基波电动势的相位差 α 为 30° 。
- 5、产生圆形旋转磁动势的条件是 三相对称绕组通入三相对称电流, 若在 $p=1$ 的三相对称绕组里通入 $i_a=I_m \sin 3\omega t$, $i_b=I_m \sin (3\omega t + 120^\circ)$, $i_c=I_m \sin (3\omega t - 120^\circ)$ 的三相电流, $\omega=314$ 弧度/秒, 则产生的旋转磁动势的转速为 9000 rpm, 转向为 a-c-b, 当 $\omega t=70^\circ$ 瞬间, 磁动势幅值在 c绕组轴线上。
- 6、基波脉振磁势可以分解为两个 幅值相等、转向相反、转速相同的圆形旋转磁势。
- 7、一台三相6极50Hz的异步电动机, 其 $s=0.05$, 则转子转速为 950 rpm, 转子磁势相对于转子的转速为 50 rpm, 转子磁势相对于定子的转速为 1000 rpm, 定子磁动势相对于转子磁动势的转速为 0。
- 8、一台异步电动机的额定转差率为0.02, 由定子经气隙传递到转子侧的电磁功率 P_{em} 中的 2% 部分供给转子铜耗, 98% 部分供给总的机械功率。
- 9、当采用短距绕组组同时削弱定子绕组中的五次和七次波磁势, 下列哪一种绕组是我们应该选用的: ③; ①绕组跨距为 $(4/5)\tau$; ②绕组跨距为 $(6/7)\tau$; ③绕组跨距为 $(5/6)\tau$;
- 10、由三相定子绕组产生的五次空间磁势谐波, 它的转速是: ②; ①静止不动; ②是基波磁场转速的1/5; ③等于基波磁场转速; ④五倍于基波磁场转速;
- 11、由三相定子绕组产生的七次空间磁势谐波, 它产生的磁通切割定子绕组感应电势的频率是: ②; ①等于零; ②等于基波频率; ③等于基频的1/7; ④等于基频的7倍;
- 12、三相交流绕组每相感应电势公式 $E=4.44k_N\Phi_m$ 中的 Φ_m 是: ③; ①磁通随时间交变的最大值; ②一台电机的总磁通量; ③一个极的总磁通量。
- 13、异步电机定子表面在空间相距 α 电角度的两根导体, 它们的感应电势大小 相等, 相位 互差 α 电角度。
- 14、公式 $F=1.35(N_k/P)I$ 是指: ③; ①一相的磁势幅值; ②三相一对极的合成磁势幅值; ③三相一个极的合成磁势幅值;
- 15、异步电动机的频率折算, 就是用一个 静止 的等效转子来代替实际 旋转 的转子, 使转子电路的频率与定子电路的频率 相等。
- 16、380V星形连接的三相异步电动机, 电源电压为220V时才能接成三角形。380V三角形连接的电动机, 电源电压为660V时, 才能接成星形。
- 17、三相对称绕组的构成原则是: 磁势相等; 空间位置对称; 互差120度电角度。(各相绕组的结构相同; 阻抗相等; 空间位置对称 (互差120度电角度))
- 18、当 s 在 0~1 范围内, 三相异步电机运行于电动机状态, 此时电磁转矩性质为 驱动转矩; 在 0~1 范围内运行于发电机状态, 此时电磁转矩性质为 制动转矩。(0~1; 驱动转矩; $-\infty \sim 0$; 制动转矩)
- 19、三相异步电动机根据转子结构不同可分为 笼型异步电动机 和 绕线型异步电动机 两类。(笼型异步电动机和绕线型异步电动机)
- 20、一台6极三相异步电动机接于50Hz的三相对称电源; 其 $s=0.05$, 则此时转子转速为 950 r/min, 定子旋转磁势相对于转子的转速为 50 r/min。(950; 50)
- 21、三相异步电动机的电磁转矩是由 主磁通 和 转子电流的有功分量 共同作用产生的。(主磁通; 转子电流的有功分量)
- 22、三相异步电动机电源电压一定, 当负载转矩增加, 则转速 减小, 定子电流 增加。(减小; 增加)
- 23、三相异步电动机等效电路中的附加电阻是模拟 转子电阻 的等值电阻。(总机械功率)
- 24、三相异步电动机在额定负载运行时, 其转差率 s 一般在 0.01~0.06 范围内。(0.01~0.06)
- 25、如果感应电机运行时转差率为 s , 则电磁功率, 机械功率和转子铜耗之间的比例是 $P_e:P_{\Omega}:P_{Cu2} =$ 1:(1-s):s。 答 1:(1-s):s
- 26、当三相感应电动机定子绕组接于 50Hz 的电源上作电动机运行时, 定子电流的频率为 50Hz, 定子绕组感应电势的频率为 50Hz, 如转差率为 s , 此时转子绕组感应电势的频率 为 fs , 转子电流的频率为 为 fs 。
- 答 50Hz, 50Hz, 50sHz, 50sHz

- 27、感应电动机起动时，转差率 $s =$ __，此时转子电流 I_2 的值__， $\cos\varphi_2$ __主磁通比，正常运行时要__，因此起动转矩__。答 1，很大，很小，小一些，不大
- 28、一台三相八极感应电动机的电网频率 50Hz ，空载运行时转速为 735转/分 ，此时转差率为__，转子电势的频率为__。当转差率为 0.04 时，转子的转速为__，转子的电势频率为__。

答 0.02, 1Hz, 720r/min, 2Hz

- 29、三相感应电动机空载时运行时，电机内损耗包括__，__，__，和__，电动机空载输入功率 P_0 与这些损耗相平衡。

答 定子铜耗，定子铁耗，机械损耗，附加损耗

- 30、三相感应电机转速为 n ，定子旋转磁场的转速为 n_1 ，当 $n < n_1$ 时为__运行状态；当 $n > n_1$ 时为__运行状态；当 n 与 n_1 反向时为__运行状态。

答 电动机，发电机，电磁制动

二、判断下列说法是否正确：

1. 异步电动机与直流电动机相比，前者具有较大的启动转矩。×
2. 异步电动机 $n_n = 1470\text{rpm}$ ，则其转差率 S 为 0.01 。×
3. 两相对称绕组，通入两相对称交流电流，其合成磁通势为旋转磁通势。（ ）(T)
4. 改变电流相序，可以改变三相旋转磁通势的转向。（ ）(T)
5. 不管异步电机转子是旋转还是静止，定、转子磁通势都是相对静止的。（ ）(T)
6. 三相异步电动机转子不动时，经由空气隙传递到转子侧的电磁功率全部转化为转子铜损耗。（ ）(T)
7. 通常三相笼型异步电动机定子绕组和转子绕组的相数不相等，而三相绕线转子异步电动机的定、转子相数则相等。（ ）(T)
8. 三相异步电机当转子不动时，转子绕组电流的频率与定子电流的频率相同。（ ）(T)
9. 三相感应电动机转子为任意转数时，定、转子合成基波磁势转速不变。（ ）

答 对

10. 三相感应电动机的功率因数 $\cos\varphi_1$ 总是滞后的。（ ）答 对
11. 感应电动机运行时，总要从电源吸收一个滞后的无功电流。（ ）答 对
12. 只要电源电压不变，感应电动机的定子铁耗和转子铁耗基本不变。（ ）答 错
13. 感应电动机的负载转矩在任何时候都绝不可能大于额定转矩。（ ）答 错
14. 在机械和工艺容许的条件下，感应电机的气隙越小越好。（ ）答 对
15. 定、转子磁通势相对静止是一切电机能正常运行的必要条件。（ ）答 对
16. 感应电动机空载运行时的功率因数很高。（ ）答 错

三、选择题

1. 异步电动机空载电流比同容量变压器大的原因是 (C)
- A、异步电动机的输出机械功率大 B、异步电动机的电磁功率大 C、异步电动机有气隙
2. 三相异步电动机空载时气隙磁通的大小取决于 (A)
- A、电源电压 B、电机铁心材质 C、气隙大小

$$P_2 \cdot \frac{1-s}{s}$$

3. 异步电动机等效电阻中附加电阻 $\frac{P_2 \cdot (1-s)}{s}$ 上消耗的功率为 (B)
- A、电磁功率 B、总机械功率 C、输入功率
4. 电源频率不变而三相异步电动机的转速降低时，转子绕组产生的磁势在空间的转速将：(C)
- A、升高；B、降低；C、不变
5. 如果异步电动机的转差率 $s > 1$ ，则它的运行状态为 (C)
- A、发电机状态；B、电动机状态；C、制动状态
6. 空间按矩形分布的磁场以 n (r/min) 转速切割一短距线圈感应的电动势与切割整距线圈时相比，感应电势 (C)
- A、无变化；B、基波增加，谐波减小；
- C、基波略下降，谐波下降明显；D、基波与谐波按相同的比例下降。

7、一台三相感应电动机，额定电压为380V，在额定负载运行时，如果电网电压突然下降到320V，此时电动机将（C）

A、能继续安全运行； B、拖不动负载停止运转； C、过载易于烧坏； D、转速升高。

8、一台50 Hz 三相感应电动机的转速为 $n = 720r/min$ ，该电机的级数和同步转速为（ ）。

A 4极， $1500r/min$ ； B 6极， $1000r/min$ ；

C 8极， $750r/min$ ； D 10极， $600r/min$ 。

答 C

9、笼型三相感应电动机的额定状态转速下降10%，该电机转子电流产生的旋转磁场

相对于定子的转速（ ）。

A 上升 10%； B 下降10%；

C 上升 $1/(1+10\%)$ ； D 不变。

答 D

10、国产额定转速为 $1450r/min$ 的三相感应电动机为（ ）极电机。

A 2； B 4； C 6； D 8。

答 B

11、三相异步电动机气隙增大，其他条件不变，则空载电流（ ）。

A 增大； B 减小；

C 不变； D 不能确定。

答 A

12、三相感应电动机等效电路中的附加电阻 $\frac{(1-s)}{s} R_2'$ 上所消耗的电功率应等于（ ）：

A 输出功率 P_2 ； B 输入功率 P_1 ；

C 电磁功率 P_{em} ； D 总机械功率 P_{Ω} 。

答 D

13、国产额定转速为 $960r/min$ 的感应电动机为（ ）电机。

A 2极； B 4极； C 6极； D 8极。

答 C

14、如果有一台三相感应电动机运行在转差率为 $s = 0.25$ ，此时通过气隙传递的功率有（ ）。

A 25% 的转子铜耗； B 75% 是转子铜耗；

C 75% 是输出功率； D 75% 是机械损耗。

答 A

四、问答题

1、三相异步电动机空载运行时，电动机的功率因数为什么很低？

答 空载时， $\dot{I}_1 = \dot{I}_0$ ，而 $\dot{I}_0 = \dot{I}_{0a} + \dot{I}_{0r}$ ，其中， \dot{I}_{0a} 为有功分量电流，用来供给空载损耗； \dot{I}_{0r} 为无功分量电流，用来建立磁场。由于 $\dot{I}_{0a} \ll \dot{I}_{0r}$ ，所以空载电流基本上是一无功性质的电流，因而电动机的功率因数很低。

2、感应电机等效电路中的 $\frac{1-s}{s} R_2'$ 所消耗的功率在各种运行状态下有什么意义？

答： $\frac{1-s}{s} R_2'$ 称为模拟电阻，其消耗的功率等于总的机械功率。转差率s的大小说明了电机的运行状态。当 $0 < s < 1$ 时，电机处于电动机状态， $\frac{1-s}{s} R_2' > 0$ ， $P_{MEC} = m_1 \frac{1-s}{s} R_2' > 0$ ，电

机轴上输出机械功率；当 $s < 0$ 时，电机处于发电状态， $\frac{1-s}{s} R_2' < 0$ ， $P_{MEC} < 0$ ，电机从轴上吸

收机械功率；当 $s = 1$ 时，电机处于电磁制动状态， $\frac{1-s}{s} R_2' < 0$ ，电机从轴上吸收机械功率。

3、感应电动机运行时，定子电流的频率是多少？转子电流的频率是多少？由定子电流产生的旋转磁势基波以什么速度切割定子和转子？由转子电流产生的旋转磁势基波以什么速度切割定子和转子？两个基波磁势的相对速度多大？

答：定子电流的频率为 f_1 ，转子电流的频率为 $f_2 = S f_1$ ，定子磁势以 n_1 的速度切割定子，以 $(n_1 - n)$ 速度即 $S n_1$ 速度切割转子；转子磁势也以 n_1 的速度切割定子，以 $S n_1$ 速度切割转子。定、转子基波磁势同步旋转，相对静止。

4、有一台三相异步电动机，怎样根据其结构上的特点判断出它是笼型还是绕线型？

答：（1）笼型和绕线型异步电动机只是在转子上的结构不同，前者转子为鼠笼状，后者转子为三相绕组。（2）绕线型异步电动机转子每相绕组的首端与转轴上的三个滑环对应连接。通常从外观结构上看，具有三个滑环的必为绕线型，否则即为笼型。

5、异步电动机中的气隙为什么做得很小？

答 异步电动机气隙小的目的是为了减小其励磁电流（空载电流），从而提高电动机功率因数。因异步电动机的励磁电流是由电网供给的，故气隙越小，电网供给的励磁电流就小。而励磁电流有属于感性无功性质，故减小励磁电流，相应就能提高电机的功率因数。

6、说明三相异步电动机等效电路中，参数 $R_1, X_1, R_m, X_m, R_2', X_2'$ 以及 $\frac{1-s}{s} R_2'$ 各代表什么意义？

答 定子绕组电阻；定子绕组漏抗，表征定子绕组漏磁效应；激磁电阻，表征铁心损耗；激磁电抗，表征铁心磁化性能；归算到定子侧的转子绕组电阻；归算到定子侧的转子绕组漏抗；代表与转子所产生的机械功率相对应的等效电阻。

7、说明三相感应电动机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？

答 转子绕组折算就是用新绕组替换原绕组。为了导出等效电路，用一个与定子绕组的相数、匝数和绕组因数相同的等效绕组替换实际转子绕组，折算前后转子绕组的磁势和 各种功率及损耗不变，因而从定子边看转子，一切未变。频率折算即用静止的转子替换旋转的转子，折

算条件也是磁势和各种功率及损耗不变。为此，只要将转子电阻 R_2' 换成 R_2'/s 。

8、感应电动机定子绕组与转子绕组之间没有直接的联系，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？

答 负载增加时，电动机转速下降，转差率上升，转子绕组切割磁力线的速度增加，转子的感应电动势、感应电流相应增加，转子磁势也增加。由磁势平衡关系，定子磁势增加，定子电流上升，即从电网吸收的电功率增加。这一过程直到转子电流产生的转矩与负载转矩重新平衡为止。

在 U_1 不变的情况下， I_1 的增加导致 $I_1 Z_1$ 增加，使 E_1 减小，主磁通略有减小

五、计算题

1、已知一台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。

2、已知某异步电动机的额定频率为 $f = 50\text{Hz}$ ，额定转速为 $n_N = 970\text{r/min}$ ，该电机的极对数是多少，额定转差率是多少？

3、已知 Y100L1-4 型异步电动机的某些额定技术数据如下：

2.2KW 380V Y形联结

1420r/min $\cos \varphi = 0.82$ $\eta = 81\%$

试计算：（1）相电流和线电流的额定值及额定负载时的转矩；（2）额定转差率及额定负载时的转子电流频率。设电源频率为 50Hz 。

【解】（1）线电流额定值

$$I_N = \frac{P_N}{\sqrt{3} U_N \eta \cos \phi} = \frac{2.2 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 380 \times 0.81 \times 0.82} \text{ A} = 5.4$$

相电流额定值

$$I_{PN} = I_N = 5A$$

额定转矩

$$T_N = 9550 \frac{P_N}{n_N} = 9550 \times \frac{2.2}{1420} N \cdot m = 14.8 N \cdot m$$

(2) 额定转差率

$$s_N = \frac{n_s - n_N}{n_s} = \frac{1500 - 1420}{1500} = 0.053$$

转子电流频率

$$f_2 = s_N f_1 = 0.053 \times 50 H_z = 2.67 H_z$$

4、一台三相绕线式异步电动机， $U_N = 660V$ ，Y形连接。 $R_1 = 0.8\Omega$ ， $R_2' = 1\Omega$ ， $R_m = 6\Omega$ ， $X_1 = 1\Omega$ ， $X_2' = 4\Omega$ ， $X_m = 75\Omega$ 。试用T型等效电路求该电机在转子开路 and 转子堵转时的定子线电流。

解：(1) 转子开路时

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1}{Z_1 + Z_m} = \frac{380}{0.8 + j1 + 6 + j75} = 4.98 \angle -84.89^\circ \text{ A}$$

(2) 转子堵转时

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1}{Z_1 + \frac{Z_m Z_2'}{Z_m + Z_2'}} = \frac{380}{0.8 + j1 + \frac{(6 + j75)(1 + j4)}{6 + j75 + 1 + j4}} = 74.5 \angle -70.29^\circ \text{ A}$$

5、一台三相异步电动机的输入功率 $P_1=8.6\text{KW}$ ，定子铜耗 $p_{Cu1}=425\text{W}$ ，铁耗 $p_{Fe}=210\text{W}$ ，转差率 $s=0.034$ ，求：

(1) 电磁功率 P_{em} ；(2) 转子铜耗 p_{Cu2} ；(3) 总机械功率 P_{mec} 。

$$\text{解：(1) } P_{em} = P_1 - (p_{Cu1} + p_{Fe}) = 7965(W)$$

$$(2) p_{Cu} = SP_{em} = 271(W)$$

$$(3) P_{mec} = P_{em} - p_{Cu2} = 7654(W)$$

6、三相铝线感应电动机的数据为 $P_N = 10kW$ ， $U_N = 380V$ ，定子 Δ 接法， $I_N = 11.6\sqrt{3}A$ ， 50Hz ，定子铝耗 $(75^\circ\text{C}) p_{Cu1} = 557W$ ，转子铝耗 $(75^\circ\text{C}) p_{Cu2} = 314W$ ，铁耗 $p_{Fe} = 276W$ ，机械损耗 $p_\Omega = 77W$ ，附加损耗 $p_{ad} = 200W$ 。试计算此电动机的额定转速、负载制动转矩、空载的制动转矩和电磁转矩。

$$\text{解 同步转速为 } n_1 = \frac{60f}{p} = \frac{60 \times 50}{2} r/min = 1500 r/min$$

$$\text{全机械功率为 } P_\Omega = P_2 + p_\Omega + p_{ad} = (10 + 0.077 + 0.2)kW = 10.28kW$$

$$s_N = \frac{p_{Cu2}}{p_{em}} = \frac{p_{Cu2}}{P_\Omega + p_{Cu2}} = \frac{0.314}{10.59} = 0.02965$$

额定负载时的转差率

$$\text{额定转速 } n_N = (1 - s_N)n_1 = (1 - 0.02965) \times 1500 r/min = 1456 r/min$$

$$T_2 = \frac{P_2}{\Omega} = \frac{10 \times 10^3}{2\pi \times \frac{1456}{60}} N \cdot m = 65.61 N \cdot m$$

负载制动转矩

$$T_0 = \frac{P_0 + P_{ad}}{\Omega} = \frac{77 + 200}{2\pi \times \frac{1456}{60}} N \cdot m = 1.817 N \cdot m$$

空载制动转矩

$$\text{电磁转矩 } T_{em} = T_2 + T_0 = (65.6 + 1.817) N \cdot m = 67.42 N \cdot m$$

或者： $T_{em} = \frac{P_0}{\Omega}$ ，亦可算出。

7、已知一台三相四极异步电动机的额定数据为： $P_N=10kW$ ， $U_N=380V$ ， $I_N=11.6A$ ，定子为Y联结，额定运行时，定子铜损耗 $P_{Cu1}=560W$ ，转子铜损耗 $P_{Cu2}=310W$ ，机械损耗 $P_{mec}=70W$ ，附加损耗 $P_{ad}=200W$ ，试计算该电动机在额定负载时的：（1）额定转速；（2）空载转矩；（3）转轴上的输出转矩；（4）电磁转矩。

$$\text{解：(1) } P_{em} = P_2 + P_{mec} + P_{ad} + P_{Cu2} = 10.58 kW$$

$$s_N = P_{Cu2} / P_{em} = 0.0293$$

$$n_N = (1 - s_N) n_1 = 1456 r / \min$$

$$(2) \quad T_0 = \frac{P_{mec} + P_{ad}}{\Omega} = 1.77 N \cdot m$$

$$(3) \quad T_2 = \frac{P_2}{\Omega_N} = 65.59 N \cdot m$$

$$(4) \quad T_{em} = T_2 + T_0 = 67.36 N \cdot m$$

第五部分异步电机的电力拖动

一、填空题：

- 1、正确选择电动机是保证电动机安全运行的重要一环。选择电动机考虑的内容通常包括 电动机的种类，电动机的额定功率，电动机的形式，电动机的额定电压，电动机的额定转速。
- 2、三相鼠笼式异步电动机直接启动时，启动电流很大，启动转矩不大。采用Y-△启动，启动电流为直接启动电流的1/3，启动转矩为直接启动的1/3。
- 3、异步电动机的调速方法有 变极、变频 和 变转差率 三类。变压调速和转子电路串电阻调速都属于 变转差调速。
- 4、一台三相异步电动机带恒转矩负载运行，若电源电压下降，则电动机的转速 ，定子电流 ，最大转矩 ，临界转差率 。（减小；增大；减小；不变）
- 5、对于绕线转子三相异步电动机，如果电源电压一定，转子回路电阻适当增大，则启动转矩 ，最大转矩 。（增大；不变）
- 6、三相异步电动机的过载能力是指 。（ T_m / T_N ）
- 7、星形—三角形降压启动时，启动电流和启动转矩各降为直接启动时的 倍。（三分之一）
- 8、三相异步电动机拖动恒转矩负载进行变频调速时，为了保证过载能力和主磁通不变，则 U / ω 应随 ω 按 规律调节。（正比）
- 9、要使三相单三拍运行的步进电动机步距角减小一半，应采用的通电方式为 三相单双六拍。
- 10、增加绕线式异步电动机启动转矩方法有 ， 。
答 转子串适当的电阻，转子串频敏变阻器
- 11、若感应电动机的漏抗增大，则其启动转矩 ，其最大转矩 。答 减小，减小
- 12、绕线型感应电动机转子串入适当的电阻，会使启动电流 ，启动转矩 。答 减小，增大

二、判断下列说法是否正确：

- 1、由公式 $T_{em} = C_T \Phi_m I_2 \cos\Phi_2$ 可知，电磁转矩与转子电流成正比，因为直接起动时的起动电流很大，所以起动转矩也很大。（ ） (F)
- 2、深槽式与双笼型三相异步电动机，起动时由于集肤效应而增大了转子电阻，因此具有较高的起动转矩倍数。（ ） (T)
- 3、三相绕线转子异步电动机转子回路串入电阻可以增大起动转矩，串入电阻值越大，起动转矩也越大。（ ） (F)
- 4、三相绕线转子异步电动机提升位能性恒转矩负载，当转子回路串接适当的电阻值时，重物将停在空中。（ ） (T)
- 5、三相异步电动机的变极调速只能用在笼型转子电动机上。（ ） (T)
- 6、三相异步电动机的最大电磁转矩 T_m 的大小与转子电阻 r_2 阻值无关（ ）。 (T)

$$Z_r = 2p(k \pm \frac{1}{m})$$

- 7、步进电动机转子齿数 Z_r 应满足公式：，式中 $2p$ 为定子极数， m 为相数， k 为正整数；以满足相邻相的磁极下定转子齿之间的错位要求。 \odot
- 8、三相绕线式感应电动机在转子回路中串电阻可增大起动转矩，所串电阻越大，起动转矩就越大。（ ） 答 错
- 9、绕线式感应电动机转子串电阻可以增大起动转矩；笼型感应电动机定子串电阻亦可以增大起动转矩。（ ） 答 错
- 10、三相感应电动机起动电流越大，起动转矩也越大。（ ） 答 错
- 11、三相绕线式感应电动机在转子回路中串电阻可增大起动转矩，所串电阻越大，起动电流就越小。（ ） 答 对
- 12、深槽型和双笼型感应电动机与普通笼型电动机相比，能减小起动电流的同时增大起动转矩。（ ） 答 对
- 13、三相感应电动机的起动电流和起动转矩都与电机所加的电源电压成正比。（ ） 答 错

三、选择题

- 1、与固有机械特性相比，人为机械特性上的最大电磁转矩减小，临界转差率没变，则该人为机械特性是异步电动机的：(3)
(1) 定子串接电阻的人为机械特性； (2) 转子串接电阻的人为机械特性； (3) 降低电压的人为机械特性。
- 2、一台三相笼型异步电动机的数据为 $P_N = 20kW$ ， $U_N = 380V$ ， $\lambda_1 = 1.15$ ， $k_1 = 6$ ，定子绕组为三角形联结。当拖动额定负载转矩起动时，若供电变压器允许起动电流不超过 $12I_N$ ，最好的起动方法是：(1)
(1) 直接起动； (2) Y—△降压起动； (3) 自耦变压器降压起动
- 3、在绕线式异步电动机的转子绕组中串入电抗器，则 (D)
A、起动电流增大；起动转矩增大；最大转矩不变；
B、起动电流减小；起动转矩增大；最大转矩增大；
C、起动电流减小；起动转矩减小；最大转矩不变；
D、起动电流减小；起动转矩减小；最大转矩减小。
- 4、绕线式三相感应电动机，转子串电阻起动时（ ）。
A 起动转矩增大，起动电流增大； B 起动转矩增大，起动电流减小；
C 起动转矩增大，起动电流不变； D 起动转矩减小，起动电流增大。
答 B
- 5、与普通三相感应电动机相比，深槽、双笼型三相感应电动机正常工作时，性能差一些，主要是（ ）。
A 由于 R_2 增大，增大了损耗； B 由于 X_2 减小，使无功电流增大；
C 由于 X_2 的增加，使 $\cos\Phi_2$ 下降； D 由于 R_2 减少，使输出功率减少。
答 C
- 6、适当增加三相绕线式感应电动机转子电阻 R_2 时，电动机的（ ）。
A I_{st} 减少， T_{st} 增加， T_{max} 不变， s_N 增加；

B I_N 增加, T_{st} 增加, T_{max} 不变, s_N 增加;

C I_N 减少, T_{st} 增加, T_{max} 增大, s_N 增加;

D I_N 增加, T_{st} 减少, T_{max} 不变, s_N 增加。

答 C

7、三相绕线转子异步电动机拖动起重机的钩, 提升重物时电动机运行于正向电动状态, 当在转子回路串入三相对称电阻下放重物时, 电动机运行状态是 (c)

A. 能耗制动运行 B. 反向回馈制动运行 C. 倒拉反转运行

四、问答题

1、额定电压为380V/660V, Y-Δ形连接的三相异步电动机, 试问当电源电压分别为380V和660V时各应采取什么连接方式? 它们的额定相电流、额定线电流是否相同? 若不同, 差多少倍?

答: 电源电压为380V时, 应采用Δ连接; 电源电压为660V时, 应采用Y形连接。

电源380V, Δ连接时

相电流: $\frac{380}{Z_k}$; 线电流: $\frac{380}{Z_k} \sqrt{3}$

电源660V, Y连接时

相电流: $\frac{660}{\frac{\sqrt{3}}{Z_k}} = \frac{380}{Z_k}$; 线电流等于相电流即: $\frac{380}{Z_k}$

结论: 它们的额定相电流相同, 额定线电流不同, 三角形连接时的线电流是星形连接时的 $\sqrt{3}$ 倍。

2、容量为几个千瓦时, 为什么直流电动机不能直接起动而三相笼型异步电动机却可以直接起动?

答 直流电动机的直接起动电流为 $I_N = U_N / R_a$, 由于 $U_N \gg R_a$, 无论功率大小, I_N 都将达到额定电流的十几倍, 甚至几十倍, 这是电动机本身所不能允许的, 所以直流电动机不能直接起动。三相异步电动机在设计时通常允许直接起动电流为额定电流的5-7倍, 加上供电变压器容量通常都能满足小功率三相异步电动机直接起动要求, 所以几个千瓦的三相异步电动机可以直接起动。

3、深槽与双笼型异步电动机为什么起动转矩大而效率并不低?

答 深槽式与双笼型异步电动机所以起动转矩大, 是因为起动时转子电动势、电流频率较高, 出现集肤效应造成了转子电阻增大所致。正常运行时集肤效应不显著, 转子电阻减小为正常值。因此运行时效率仍较高。

4、普通笼型感应电动机在额定电压下起动时, 为什么起动电流很大, 而起动转矩并不大?

答 起动时 $n=0$, $s=1$, 旋转磁场以同步速度切割转子, 在短路的转子绕组中感应很大的电动势和电流, 引起与它平衡的定子电流的负载分量急剧增加, 以致定子电流很大; 起 动时

$s=1$, R'_2/s 很小, 电动机的等效阻抗很小, 所以起动电流很大。由于 $T_{em} = C_T \Phi_m I_2 \cos \varphi_2$

, 当 $s=1$ 、 $f_2=f_1$ 时, 使转子功率因数角 $\varphi_2 = \arctan \frac{X_{2\sigma}}{R_2}$ 接近 90° , $\cos \varphi_2$ 很小,

$I_2 \cos \varphi_2$ 并不大; 另外, 因起动电流很大, 定子绕组漏抗压降大, 使感应电动势 E_1 减小, 与

之成正比的 Φ_m 也减小。起动时, Φ_m 减小, $I_2 \cos \varphi_2$ 并不大, 使得起动转矩并不大。

5、感应电动机带负载运行, 若电源电压下降过多, 会产生什么严重后果? 如果电源电压下降 20%, 对最大转矩、起动转矩、转子电流、气隙磁通、转差率有何影响 (设负载转矩不变)?

答 最大转矩和起动转矩与电压平方成正比。如果电源电压下降过多, 当起动转矩下降到小于负载转矩时, 电动机不能起动。当最大转矩下降到小于负载转矩时, 原来运行的电动机将停转。

电源电压下降 20%, 则最大转矩下降到原来的 64%, 起动转矩也下降到原来的 64%。磁通下降到原来的 20%, 不考虑饱和的影响时, 空载电流下降到原来的 20%。在负载转矩不变的情

况下, $I_2 \cos \varphi_2$ 上升 25%, 定子电流相应上升, 电动机的转速有所降低, s 增大, s_{∞} 不变。
6、感应电动机在轻载下运行时, 试分析其效率和功率因数都较额定负载时低的原因。如定子绕组为 Δ 联接的感应电动机改为 Y 联接运行, 在轻载下其结果如何? 此时所能负担的最大负载必须少于多少?

答 (1) 轻载时功率因数低的原因是由于轻载时定子负载电流小, 定子电流主要取决于无功的励磁电流, 而在感应电动机中, 由于空气隙的存在, 励磁电流较大, 一般为 $(0.2-0.5)I_{1N}$ 。
(2) 效率低的原因是由于轻载在输入的电功率中输出的有功功率小, 而不变损耗 (铁耗和机耗) 所占的分量较大, 因此效率低。

(3) 轻载时如将 Δ 接改为 Y 接, 由于相电压只为原来的 $1/\sqrt{3}$, 因此, 励磁电流及铁耗都大为减少, 功率因数及效率将显著改善。此时最大转矩必须小于 Δ 联接时电动机的最大电磁转矩的 $1/3$ 。

五、计算题

1、一台三相笼型异步电动机的数据为 $P_N=40\text{kW}$, $U_N=380\text{V}$, $n_N=2930\text{r/min}$, $\eta_N=0.9$, $\cos\phi_N=0.85$, $k_i=5.5$, $k_{st}=1.2$, 定子绕组为三角形联接, 供电变压器允许起动电流为 150A , 能否在下列情况下用 $Y-\Delta$ 降压起动?

(1) 负载转矩为 $0.25T_N$; (2) 负载转矩为 $0.5T_N$ 。

$$I_N = \frac{P_N}{\sqrt{3}U_N\eta_N\cos\phi_N} = \frac{40 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 380 \times 0.9 \times 0.85} \text{ A} = 79.44 \text{ A}$$

解: 额定电流

$$I_{st} = k_i I_N = 5.5 \times 79.44 \text{ A} = 437 \text{ A}$$

直接起动电流

$$I'_{st} = \frac{1}{3} I_{st} = \frac{1}{3} \times 437 \text{ A} = 145.7 \text{ A} \quad [?] 50 \text{ A}$$

起动电流:

$$T'_{st} = \frac{1}{3} T_{st} = \frac{1}{3} \times k_{st} T_N = \frac{1}{3} \times 1.2 T_N = 0.4 T_N$$

起动转矩:

可见: (1) 当 $T_L = 0.25T_N$ 时, 可以起动; (2) 当 $T_L = 0.5T_N$ 时, 不能起动。

2、一台 Y160M-4 型三相笼型异步电动机, Δ 形联接, 其额定数据如下: 11KW , 380V , 1455r/min , $\eta_N = 0.87$, $\cos\phi_N = 0.85$, $T_{st}/T_N = 1.9$, $T_{MAX}/T_N = 7$ 。试求: (1) 额定电流; (2) Δ 形联接时的起动电流和起动转矩; (启动电流是额定电流的 7 倍) (3) 采用 $Y-\Delta$ 联接起动时的起动电流和起动转矩; (4) 在 70% 额定负载时能否采用 $Y-\Delta$ 联接起动?

【解】 (1) 额定电流

$$I_N = \frac{P_N}{\sqrt{3}U_N\eta_N\cos\phi_N} = \frac{11 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 380 \times 0.87 \times 0.85} \text{ A} = 22.6 \text{ A}$$

(2) Δ 形联接起动时

$$T_N = 9500 \frac{P_N}{n_N} = 9500 \times \frac{11}{1455} \text{ N} \cdot \text{m} = 72.2 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$T_{st\Delta} = 1.9 T_N = 1.9 \times 72.2 \text{ N} \cdot \text{m} = 137.2 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$I_{st\Delta} = 7 I_N = 7 \times 22.6 \text{ A} = 158.2 \text{ A}$$

(3) 采用 $Y-\Delta$ 联接起动时

$$T_{STY} = \frac{1}{3}T_{STA} = \frac{137.2}{3} N \cdot m = 45.7 N \cdot m$$

$$I_{STY} = \frac{1}{3}I_{STA} = \frac{158.2}{3} A = 52.73 A$$

$$(4) \quad T_{STY} = \frac{1}{3} \times 1.9T_N = 0.63T_N < 0.7T_N$$

故不能在70%额定负载时采用Y-Δ换接起动。