

电机与拖动基础

第一章 电机的基本原理.....	1
第二章 电力拖动系统的动力学基础.....	6
第三章 直流电机原理.....	12
第四章 直流电机拖动基础.....	15
第五章 变压器.....	30
第六章 交流电机的旋转磁场理论.....	41
第七章 异步电机原理.....	43
第八章 同步电机原理.....	50
第九章 交流电机拖动基础.....	60
第十章 电力拖动系统电动机的选择.....	72

第一章 电机的基本原理

1-1 请说明电与磁存在哪些基本关系，并列出具基本物理规律与数学公式。

答：

电与磁存在三个基本关系，分别是

（1）电磁感应定律：如果在闭合磁路中磁通随时间而变化，那么将在线圈中感应出电动势。感应电动势的大小与磁通的变化率成正比，即

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

感应电动势的方向由右手螺旋定则确定，式中的负号表示感应电动势试图阻止闭合磁路中磁通的变化。

（2）导体在磁场中的感应电动势：如果磁场固定不变，而让导体在磁场中运动，这时相对于导体来说，磁场仍是变化的，同样会在导体中产生感应电动势。这种导体在磁场中运动产生的感应电动势的大小由下式给出

$$e = Blv$$

而感应电动势的方向由右手定则确定。

（3）载流导体在磁场中的电磁力：如果在固定磁场中放置一个通有电流的导体，则会在载流导体上产生一个电磁力。载流导体受力的大小与导体在磁场中的位置有关，当导体与磁力线方向垂直时，所受的力最大，这时电磁力 F 与磁通密度 B 、导体长度 l 以及通电电流 i 成正比，即

$$F = Bli$$

电磁力的方向可由左手定则确定。

1-2 通过电路与磁路的比较，总结两者之间哪些物理量具有相似的对应关系（如电阻与磁阻），请列表说明。

答：

磁路是指在电工设备中，用磁性材料做成一定形状的铁心，铁心的磁导率比其他物质的磁导率高得多，铁心线圈中的电流所产生的磁通绝大部分将经过铁心闭合，这种人为造成的磁通闭合路径就称为磁路。而电路是由金属导线和电气或电子部件组成的导电

回路，也可以说电路是电流所流经的路径。

磁路与电路之间有许多相似性，两者所遵循的基本定律相似，即 KCL：在任一节点处都遵守基尔霍夫第一定律约束；KVL：在任一回路中都遵守基尔霍夫第二定律；另外，磁路与电路都有各自的欧姆定律。两者之间相似的物理量主要有：电路中传输的是电流，磁路中相应的为磁通；电路中的电动势、电压与磁路中的磁动势、磁压降类似。电路中的电阻或电导与磁路中的磁阻或磁导相似。这些对应关系如下表所示：

磁路	磁通 Φ	磁动势 F_m （磁压降）	磁阻 R_m （磁导 G_m ）	磁通密度 B	磁导率 μ
电路	电流 I	电动势 E （电压 U ）	电阻 R （电导 G ）	电流密度 J	1/电阻率 ρ

当然两者之间也有一些不同之处，比如磁通只是描述磁场的物理量，并不像电流那样表示带电质点的运动，磁通通过磁阻时，也不像电流通过电阻那样要消耗功率，因而不存在与电路中的焦耳定律类似的磁路定律；分析电路时一般不涉及电场问题，不考虑漏电流，而分析磁路时离不开磁场的概念，要考虑漏磁现象；在电路中电动势为零时，电流也为零，但在磁路中往往有剩磁，磁动势为零时，磁通不一定为零；磁路的欧姆定律与电路的欧姆定律也只是形式上的相似，由于铁心的磁导率不是常数，它随励磁电流而变化，因而磁路计算不能应用叠加原理。

1-3 如何理解机电能量转换原理？根据这个原理可以解决什么问题？

答：

从能量转换的观点，可以把依靠电磁感应原理运行的机电设备看作是一类机电转换装置，比如，变压器是一种静止的电转换装置，而旋转电机是一种将机械能转换成电能（发电机）或将电能转换成机械能（电动机）的运动装置。因此，机电能量转换原理是学习和研究电机理论的一个重要工具。

根据这个原理，可以求得电机（发电机、电动机）和变压器中的关键物理量感应电动势和电磁转矩的大小，进而分析电机和变压器的运行特性。

1-4 旋转电机模型的基本结构由哪些部分组成，其各自有什么作用？气隙又有何作用？

答：

旋转电机模型的基本结构由定子、转子和气隙三个部分组成：定子是固定不动的，

转子是运动的，它们之间隔着一层薄薄的气隙。在定子和转子上分别按需要安装若干线圈，其目的是在气隙中产生磁场。往往要求气隙磁场按一定的形式分布，例如正弦分布磁场。电机作为一种机电能量转换装置，能够将电能转换为机械能，也能将机械能转换为电能。

由于机械系统和电气系统是两种不同的系统，其能量转换必须有一个中间媒介，这个任务就是由气隙构成的耦合磁场来完成的。

1-5 以两极原型电机作为旋转电机的物理模型，有何应用意义？

答：

两极原型电机结构简单，原理清晰，易于扩展，可作为旋转电机的物理模型。通过对该模型的研究和分析，便于学习和掌握一般旋转电机的基本原理。

1-6 通过模型电机，是如何建立电机的感应电动势和电磁转矩方程的？又怎样将两极电机的方程推广到多极电机？

答：

通过模型电机，根据电磁感应定律，可以求得旋转电机感应电动势的通用计算公式

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} \cos \omega t + N\Phi \omega \sin \omega t。利用该公式可以推导出具体电机的感应电动势，如$$

同步电机、异步电机或直流电机。

另外，根据机电能量转换的基本原理，可得两极电机的电磁转矩通用公式

$$T_e = \frac{\partial W'_f}{\partial \varphi_{sr}} = -\frac{\mu_0 \pi D l}{2g} F_s F_r \sin \varphi_s。由于电机的磁极总是成对设置的，常用极对数 n_p 来$$

$$\text{表示电机的磁极数，则多极电机的电磁转矩为 } T_e = -n_p \frac{\mu_0 \pi D l}{2g} F_s F_r \sin \varphi_{sr}。$$

1-7 电机中存在哪些能量损耗？有哪些因素会影响电机发热？电动机与发电机的功率传递有何不同？

答：

电机进行机电能量转换时总是存在能量损耗的，能量损耗将引起电机发热和效率降低。一般来说，电机的能量损耗可分为两大类：

（1）机械损耗：由电机的运动部件的机械摩擦和空气阻力产生的损耗，这类损耗与电机的机械构造和转速有关。

（2）电气损耗：主要包括导体损耗、电刷损耗和铁耗等。导体损耗是由于电机的线圈电阻产生的损耗，有时又称为铜耗，通常在电机的定子和转子上都会产生铜耗；电刷损耗是由于电刷的接触电压降引起的能量损耗；铁耗是由于电机铁磁材料的磁滞效应和涡流效应所产生的一种损耗，主要取决于磁通密度、转速和铁磁材料的特性。

电动机与发电机的功率传递过程如图 1-18 所示：电动机是将电能转换为机械能，而发电机是将机械能转换为电能。

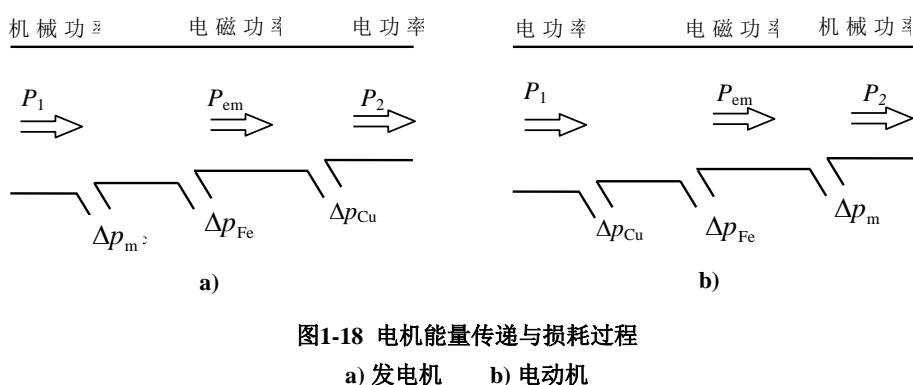


图1-18 电机能量传递与损耗过程

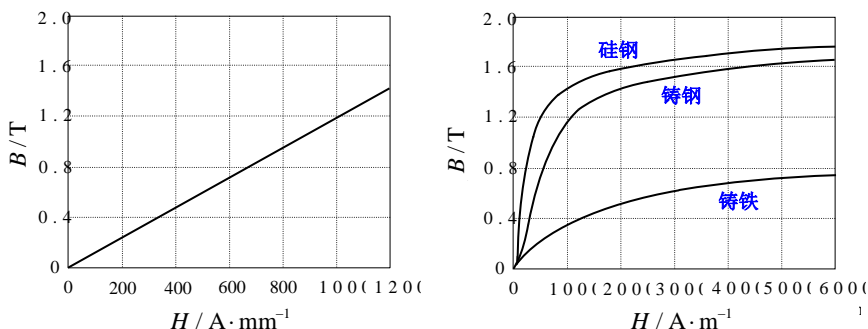
1-8 用硅钢作为导磁材料，现已知 $B = 1.6\text{T}$ ，试根据图 1-3 所示的 $B-H$ 曲线求取在此磁场条件下硅钢的磁导率 μ_r 。

解：

根据图 1-3 所示的硅钢 $B-H$ 曲线，查得 $B = 1.6\text{T}$ 时， $H = 2200\text{A/m}$

$$\mu = \frac{B}{H} = \frac{1.6}{2200} \approx 7.27 \times 10^{-4} (\text{H/m})$$

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = \frac{7.27 \times 10^{-4}}{4\pi \times 10^{-7}} \approx 578.8$$



1-9 有一导体，长度 $l = 3\text{m}$ ，通以电流 $i = 200\text{A}$ ，放在 $B = 0.5\text{T}$ 的磁场中，试求：

- 1) 导体与磁场方向垂直时的电磁力。
- 2) 导体与磁场方向平行时的电磁力。
- 3) 导体与磁场方向为 30° 时的电磁力。

解：

载流导体在磁场中电磁力的一般计算公式为

$$F = Bli \sin \theta$$

- 1) 导体与磁场方向垂直时， $\theta = 90^\circ$ ， $F = 0.5 \times 3 \times 200 = 300(\text{N})$
- 2) 导体与磁场方向平行时， $\theta = 0$ ， $F = 0$
- 3) 导体与磁场方向为 30° 时， $F = 0.5 \times 3 \times 200 \times \sin 30^\circ = 150(\text{N})$

1-10 有一磁路的铁心形状如图 1-20 所示，铁心各边的尺寸为：A、B 两边相等，长度为 17cm ，截面积为 7cm^2 ；C 边长 5.5cm ，截面积为 14cm^2 ；气隙长度 $g = 0.4\text{cm}$ 。两边各有一个线圈，其匝数为 $N_1 = N_2 = 100$ ，分别通以电流 i_1 和 i_2 ，所产生的磁动势由 A、B 两边汇入中间的 C 边，且方向一致。试求：在气隙中产生 $B = 1.2\text{T}$ 时所需的电流值，及此时气隙中储存的能量 W_f ，并计算电感 L 。

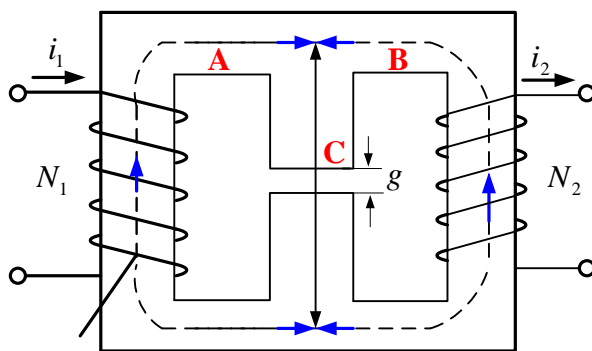


图1-20 习题1-10图

解：

$$\text{设 } i_1 = i_2 = i, \quad N_1 = N_2 = N = 100$$

$$\text{由 } F_{m1} + F_{m2} = \Phi_g R_{mg}, \text{ 得 } 2Ni = \Phi_g \cdot \frac{g}{\mu_0 S_c}$$

$$\text{所以, 所需的电流值 } i = \frac{\Phi_g g}{2N\mu_0 S_c} = \frac{Bg}{2N\mu_0} = \frac{1.2 \times 0.4 \times 10^{-2}}{2 \times 100 \times 4\pi \times 10^{-7}} \approx 19.1 \text{ (A)}$$

$$\text{气隙磁通 } \Phi_g = BS_c = 1.2 \times 14 \times 10^{-4} = 0.00168 \text{ (Wb)}$$

$$\text{根据电感的定义, } L = \frac{\psi}{i} = \frac{N\Phi}{i} = \frac{100 \times 0.5 \times 0.00168}{19.1} \approx 0.0044 \text{ (H)}$$

$$\text{气隙中储存的能量 } W_f = 2W_L = 2 \cdot \frac{1}{2} Li^2 = 0.0044 \times 19.1^2 \approx 1.61 \text{ (J)}$$

第二章 电力拖动系统的动力学基础

2-1 什么是电力拖动系统？它包括哪些部分？

答：

拖动就是由原动机带动生产机械产生运动，以电动机作为原动机拖动生产机械运动的拖动方式，称为电力拖动。如图 2-1 所示，电力拖动系统一般由电动机、生产机械的传动机构、工作机构、控制设备和电源组成，通常又把传动机构和工作机构称为电动机的机械负载。

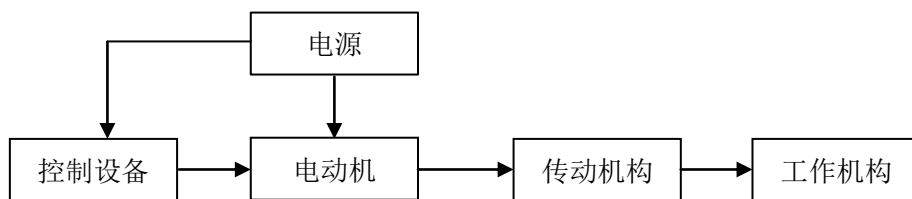


图2-1 电力拖动系统组成

2-2 电力拖动系统旋转运动方程式中各量的物理意义是什么？它们的正负号如何确定？

答：

电力拖动系统经过化简，都可视为如图 2-2a 所示的电动机转轴与生产机械的工作机构直接相连的单轴电力拖动系统，各物理量的方向（正负号）标示如图 2-2b 所示。

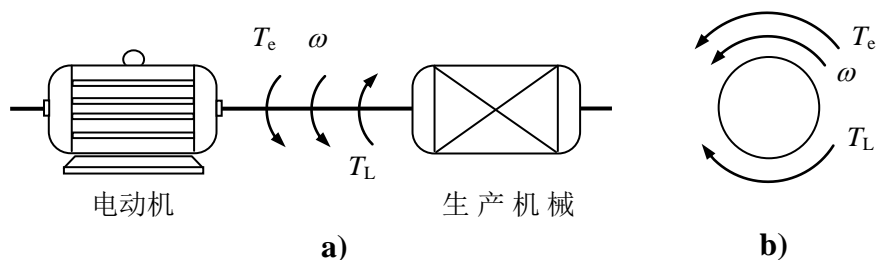


图2-2 单轴电力拖动系统

a) 单轴电力拖动系统 b) 系统各物理量的方向标示

根据牛顿力学定律，该系统的运动方程为

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega}{dt}$$

式中，各量的物理意义分别是： T_e ——电动机的电磁转矩（ $\text{N} \cdot \text{m}$ ）， T_L ——生产机械的阻转矩（ $\text{N} \cdot \text{m}$ ）， J ——电动机轴上的总转动惯量（ $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ）， ω ——电动机的角速度（ rad/s ）。

2-3 转矩的动态平衡关系与静态平衡关系有什么不同？

答：

转矩的静态平衡是指电力拖动系统稳定运行时，电动机的电磁转矩 T_e 与生产机械的阻转矩 T_L 相平衡，即 $T_e = T_L$ 。而转矩的动态平衡是指电力拖动系统在扰动作用下，从原来的平衡状态达到新的平衡状态的过渡过程中，电动机的电磁转矩 T_e 与生产机械的阻转矩 T_L 以及加速度转矩 $J \frac{d\omega}{dt}$ 相平衡，即 $T_e - T_L = J \frac{d\omega}{dt}$ 。由于过渡过程中转速 ω 是变化的，电磁转矩 T_e 也是随时变化的，以保持转矩的动态平衡关系。

2-4 拖动系统的飞轮惯量 GD^2 与转动惯量 J 是什么关系？

答：

在拖动系统的工程计算中，习惯用飞轮惯量 GD^2 代替转动惯量 J ， GD^2 与 J 的关系为

$$J = mr^2 = \frac{GD^2}{4g}$$

式中， m ——系统转动部分的质量（kg）， G ——系统转动部分的重力（N）， r ——系统转动部分的回转半径（m）， D ——系统转动部分的回转直径（m）， g ——重力加速度（可取 $g = 9.81\text{m/s}^2$ ）。

2-5 把多轴电力拖动系统简化为单轴电力拖动系统时，负载转矩的折算原则是什么？各轴飞轮惯量的折算原则是什么？

答：

对于一个复杂的多轴电力拖动系统，比较简单而且实用的分析方法是折算的方法把它等效成一个简单的单轴拖动系统来处理，并使两者的动力学性能保持不变，其基本思想是通过传动机构的力学折算把实际的多轴系统表示成等效的单轴系统。

在电力拖动系统中折算一般是把负载转矩和各轴飞轮惯量折算到电动机轴上，而中间传动机构的传动比在折算中就相当于变压器的匝数比。系统等效的原则是：保持两个系统传递的功率及储存的动能相同。

2-6 起重机提升和下放重物时，传动机构的损耗是由电动机还是重物负担？提升和下放同一重物时，传动机构损耗的大小是否相同？传动机构的效率是否相等？

答：

起重机提升重物时，传动机构的损耗由电动机负担；下放重物时，则由重物负担。

提升和下放同一重物时，可以认为传动机构的损耗是相同的，但其效率不相等。设提升重物时的效率为 η_c ，下放重物时的效率为 η'_c ，两者之间的关系为

$$\eta'_c = 2 - \frac{1}{\eta_c}$$

2-7 生产机械的负载转矩特性归纳起来，可以分为哪几种基本类型？

答：

生产机械的负载转矩特性归纳起来可以分为三种基本类型：

(1) 恒转矩负载特性：负载转矩 T_L 与转速 n 无关，当转速变化时，负载转矩 T_L 保

持常值。恒转矩负载特性又可分为反抗性负载特性和位能性负载特性两种，如下图所示。

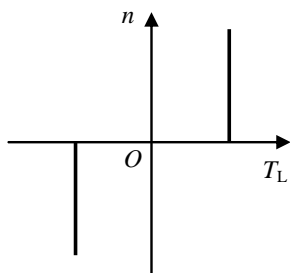


图2-3 反抗性恒转矩负载特性

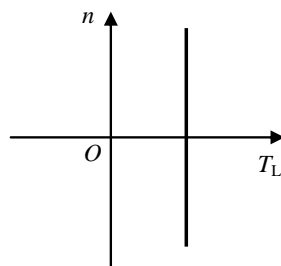


图2-4 位能性恒转矩负载特性

(2) 通风机负载特性：负载转矩 T_L 与转速 n 大小有关，基本上与转速 n 的平方成正比，即 $T_L = kn^2$ 。属于通风机负载的生产机械有通风机、水泵、油泵等，其中空气、水、油等介质对机器叶片的阻力基本上和转速的平方成正比，如下图所示。

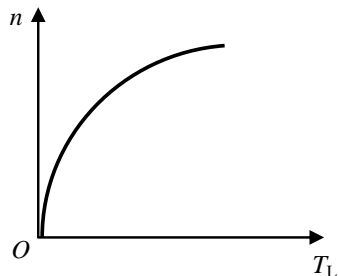


图2-5 通风机负载特性

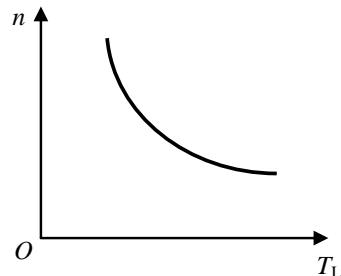


图2-6 恒功率负载特性

(3) 恒功率负载特性：有些生产机械（比如车床），在粗加工时，切削量大，切削阻力大，此时开低速；在精加工时，切削量小，切削阻力小，往往开高速。因此，在不同转速下，负载转矩 T_L 与基本上与转速 n 成反比，即 $T_L = \frac{k}{n}$ 。由于负载功率 $P_L = T_L \omega$ ，表明在不同转速下，电力拖动系统的功率保持不变，负载转矩 T_L 与转速 n 的特性曲线呈现恒功率的性质，如上图所示。

2-8 电力拖动系统稳定运行的条件是什么？请举例说明。

答：

对于一个电力拖动系统，稳定运行的充分必要条件是

$$\begin{cases} T_e - T_L = 0 \\ \frac{dT_e}{dn} - \frac{dT_L}{dn} < 0 \end{cases}$$

其中, $T_e - T_L = 0$ 表示电动机的机械特性与负载转矩特性必须存在交点, 是系统稳定运行的必要条件; 而 $\frac{dT_e}{dn} - \frac{dT_L}{dn} < 0$ 表示电动机机械特性的硬度必须小于负载转矩特性的硬度, 是系统稳定运行的充分条件。

例如, 对于带恒转矩负载的电力拖动系统, 只要电动机机械特性的硬度是负值, 系统就能稳定运行, 如图 2-9 所示。各类电动机机械特性的硬度大都是负值或具有负的区段, 因此在一定范围内电力拖动系统带恒转矩负载都能稳定运行。

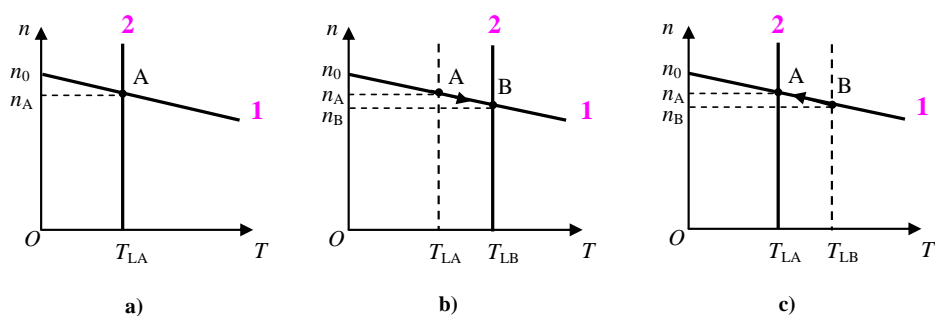


图2-9 系统稳定运行状态

a) 稳定工作点A b) 新稳定工作点B c) 系统恢复到平衡点A

2-9 在图 2-16 所示的电力拖动系统中, 已知飞轮惯量 $GD_e^2 = 15\text{N} \cdot \text{m}^2$, $GD_1^2 = 16\text{N} \cdot \text{m}^2$, $GD_L^2 = 100\text{N} \cdot \text{m}^2$, 传动效率 $\eta_{c1} = 0.9$, $\eta_{c2} = 0.8$, 负载转矩 $T_L' = 72\text{N} \cdot \text{m}$, 转速 $n = 1500\text{r/min}$, $n_1 = 750\text{r/min}$, $n_L = 150\text{r/min}$ 。试求: 折算到电动机轴上的系统总飞轮惯量 GD^2 和负载转矩 T_L 。

解:

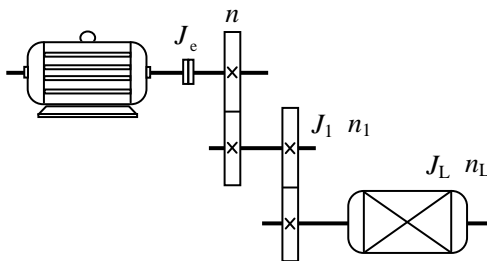


图2-16 三轴拖动系统

折算到电动机轴上的系统总飞轮惯量为

$$\begin{aligned}
 GD^2 &= GD_e^2 + \left(\frac{n_1}{n_e}\right)^2 GD_1^2 + \left(\frac{n_L}{n_e}\right)^2 GD_L^2 \\
 &= 15 + \left(\frac{750}{1500}\right)^2 \times 16 + \left(\frac{150}{1500}\right)^2 \times 100 \\
 &= 20 (\text{N} \cdot \text{m}^2)
 \end{aligned}$$

折算到电动机轴上的负载转矩为

$$T_L = \frac{T'_L}{j\eta_c} = \frac{T'_L}{j_1 j_L \eta_{c1} \eta_{c2}} = \frac{72}{\frac{1500}{750} \times \frac{1500}{150} \times 0.9 \times 0.8} = 5 (\text{N} \cdot \text{m})$$

2-10 有一起重机的电力拖动系统如图 2-18 所示，电动机转速 1000r/min ，齿轮减速箱的传动比 $j_1 = j_2 = 2$ ；卷筒直径 $D = 0.2\text{m}$ ；滑轮的减速比 $j_3 = 5$ ；空钩重量 $G_0 = 100\text{N}$ ；起重负荷 $G = 1500\text{N}$ ；电动机的飞轮惯量 $GD_e^2 = 10\text{N} \cdot \text{m}^2$ ，传动系统的总传动效率 $\eta_c = 0.8$ ，放大系数 $\delta = 1.2$ 。试求提升速度 v_L 和折算到电动机轴上的静转矩 T_L 以及折算到电动机轴上整个拖动系统的飞轮惯量 GD^2 。

解：

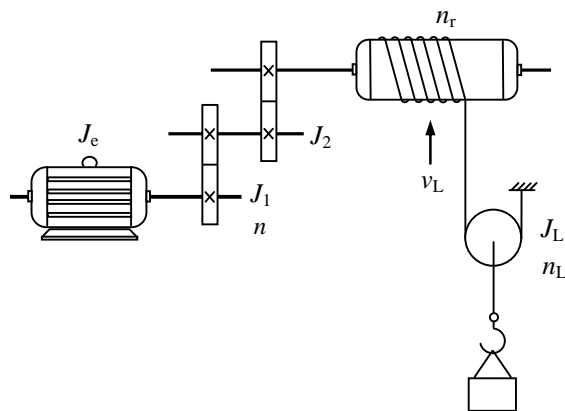


图2-18 提升机构

(1) 提升速度 v_L

依照电动机转速 n 经过三级减速后，再转换成直线速度的关系，得

$$\begin{aligned}
 \frac{n}{n_L} &= j, \quad j = j_1 j_2 j_3, \quad n_L = \frac{n}{j} = \frac{n}{j_1 j_2 j_3} \\
 v_L &= \pi D n_L \\
 v_L &= \pi D n_L = \frac{\pi D}{j_1 j_2 j_3} n = \frac{3.14 \times 0.2 \times 1000}{2 \times 2 \times 5} = 31.4 (\text{m/min})
 \end{aligned}$$

(2) 折算到电动机轴上的静转矩 T_L

根据功率平衡原则，折算到电动机轴上的静转矩为

$$T_L = \frac{F_L v_L}{\omega \eta_c}$$

这里， $F_L = G_L = G + G_0$ ， $v_L = \frac{\pi D}{j} \frac{n}{60}$ ， $\omega = \frac{2\pi n}{60}$ ，所以

$$T_L = \frac{(G + G_0) \frac{D}{2}}{j \eta_c} = \frac{(1500 + 100) \times 0.1}{2 \times 2 \times 5 \times 0.8} = 10 \text{ (N} \cdot \text{m)}$$

(3) 折算到电动机轴上整个拖动系统的飞轮惯量 GD^2

题中未给出系统中间传动轴和卷筒的飞轮惯量，可用放大系数 δ 近似估计。今取 $\delta = 1.2$ ，则折算到电动机轴上整个拖动系统的飞轮惯量为

$$\begin{aligned} GD^2 &= \delta \cdot GD_e^2 + 365(G + G_0) \left(\frac{v_L}{n} \right)^2 \\ &= 1.2 \times 10 + 365 \times (1500 + 100) \times \left(\frac{31.4}{60 \times 1000} \right)^2 \\ &\approx 12.16 \text{ (N} \cdot \text{m}^2) \end{aligned}$$

第三章 直流电机原理

3-1 直流电机电枢绕组导体中的电流是直流的，还是交流的？为什么？

答：

直流电机电枢绕组导体中的电流是交流的，因为无论是直流电动机还是直流发电机，电枢绕组中的各导体交替地在不同定子磁极下运动，当某导体处于定子同一磁极（如 N 极）下时，导体中的电流必然是某一方向；而当该导体处于定子另一磁极（如 S 极）下时，导体中的电流必然是相反方向，这样才能产生恒定方向的电磁转矩（对电动机而言）或恒定方向的感应电动势（对发电机而言）。

3-2 换向器和电刷在直流电机中起什么作用？

答：

换向器和电刷是直流电机最重要的部件，对于直流发电机，其作用是将电枢绕组元件中的交变电动势转换为电刷间的直流电动势；对于直流电动机，则是将输入的直流电

流转换为电枢绕组元件中的交变电流，以产生恒定方向的电磁转矩。

3-3 直流电机的主磁通既链着电枢绕组又链着励磁绕组，为什么却只在电枢绕组里感应电动势？

答：

因为直流电机的主磁通是由定子励磁绕组通入直流励磁电流而产生，是一恒定的磁场，它与励磁绕组间没有相对运动，所以只在转子电枢绕组里感应电动势。

3-4 他励直流电动机的电磁功率指的是什么？

答：

他励直流电动机的电磁功率 P_{em} 是指借助气隙磁场传入转子方的功率，可以由输入转子电枢的电功率 P_1 扣除定子铜耗 Δp_{Cua} 来计算，也可以由转子方的输出机械功率 P_2 加上铁心损耗 Δp_{Fe} 、机械摩擦损耗 Δp_m 和附加损耗 Δp_{add} 来计算，即

$$P_{em} = P_1 - \Delta p_{Cua} = P_2 + \Delta p_{Fe} + \Delta p_m + \Delta p_{add}$$

3-5 直流电机的铁心损耗是存在于定子中，还是存在于转子中？为什么？

答：

直流电机的铁心损耗是存在于转子中，因为直流电机的定子铁心相对于定子主磁场是静止的，没有铁心损耗；而转子相对于主磁场是运动的，转子铁心中存在变化的磁场。

3-6 说明下列情况下空载电动势的变化：（1）每极磁通减少 10%，其他不变；（2）励磁电流增大 10%，其他不变；（3）电机转速增加 20%，其他不变。

答：

根据直流电机感应电动势（即空载电动势）的基本计算公式

$$E_a = C_e \Phi n$$

（1）若每极磁通 Φ 减少 10%，则空载电动势 E_a 减小 10%；

（2）若励磁电流 I_f 增大 10%，因电机磁路存在非线性的磁饱和效应，空载电动势

E_a 将增大，但低于 10%；

(3) 如电机转速 n 增加 20%，则空载电动势 E_a 增大 20%。

3-7 他励直流电动机运行在额定状态，负载为恒转矩负载，如果减小磁通，电枢电流是增大、减小还是不变？

答：

根据他励直流电动机的电压平衡方程和转矩平衡方程

$$U_a = E_a + I_a R_a = C_e \Phi n + I_a R_a, \quad T_e = T_L = C_T \Phi I_a$$

如果减小磁通 Φ ，则感应电动势 E_a 减小，电枢电流 I_a 将增大，以保持转矩 $T_e = T_L$ 的平衡关系。

3-8 一台他励直流电动机的额定数据为： $P_N = 17\text{kW}$ ， $U_N = 220\text{V}$ ， $n_N = 1500\text{r/min}$ ， $\eta_N = 83\%$ 。计算额定电枢电流 I_N 、额定转矩 T_N 和额定负载时的输入电功率 P_1 。

解：

额定负载时的输入电功率

$$P_1 = \frac{P_N}{\eta} = \frac{17}{0.83} \approx 20.48 \text{ (kW)}$$

额定电枢电流

$$I_N = \frac{P_1}{U_N} = \frac{20.48 \times 10^3}{220} \approx 93.09 \text{ (A)}$$

额定转矩

$$T_N = 9.55 \frac{P_N}{n_N} = 9.55 \times \frac{17 \times 10^3}{1500} \approx 108.23 \text{ (N} \cdot \text{m)}$$

3-9 一台他励直流电动机的额定数据为： $P_N = 5\text{kW}$ ， $U_N = 220\text{V}$ ， $n_N = 1000\text{r/min}$ ， $\Delta p_{\text{Cua}} = 500\text{W}$ ， $\Delta p_0 = 395\text{W}$ 。计算额定运行时电动机的 T_e ， T_L ， T_0 ， P_1 ， η_N ， R_a 。

解：

$$\text{负载转矩 } T_L = 9.55 \frac{P_N}{n_N} = 9.55 \times \frac{5 \times 10^3}{1000} = 47.75 \text{ (N} \cdot \text{m)}$$

$$\text{空载转矩 } T_0 = 9.55 \frac{\Delta p_0}{n_N} = 9.55 \times \frac{395}{1000} \approx 3.77 \text{ (N} \cdot \text{m)}$$

$$\text{电磁转矩 } T_e = T_L + T_0 = 47.75 + 3.77 = 51.52 \text{ (N} \cdot \text{m)}$$

$$\text{输入功率 } P_1 = P_{\text{em}} + \Delta p_{\text{Cua}} = P_N + \Delta p_0 + \Delta p_{\text{Cua}} = 5 + 0.395 + 0.5 = 5.895 \text{ (kW)}$$

$$\text{额定效率 } \eta_N = \frac{P_N}{P_1} \times 100\% = \frac{5}{5.895} \times 100\% \approx 84.8\%$$

$$\text{电枢电阻 } R_a = \frac{\Delta p_{\text{Cua}}}{I_N^2} = \frac{\Delta p_{\text{Cua}}}{\left(\frac{P_1}{U_N}\right)^2} = \frac{500}{\left(\frac{5895}{220}\right)^2} \approx 0.696 \text{ (}\Omega\text{)}$$

3-10 一台他励直流发电机的额定数据为： $P_N = 46\text{kW}$ ， $U_N = 230\text{V}$ ， $n_N = 1000\text{r/min}$ ，

$R_a = 0.1\Omega$ ，已知 $\Delta p_0 = 1\text{kW}$ ， $\Delta p_{\text{add}} = 0.01P_N$ 。求额定负载下的 P_1 、 P_{em} 及 η_N 。

解：

$$\text{电枢电流 } I_N = \frac{P_N}{U_N} = \frac{46 \times 10^3}{230} = 200 \text{ (A)}$$

$$\text{定子铜耗 } \Delta p_{\text{Cua}} = I_N^2 R_a = 200^2 \times 0.1 = 4 \text{ (kW)}$$

$$\text{输入功率 } P_1 = P_N + \Delta p_{\text{Cua}} + \Delta p_0 + \Delta p_{\text{add}} = 46 + 4 + 1 + 0.01 \times 46 = 51.46 \text{ (kW)}$$

$$\text{电磁功率 } P_{\text{em}} = P_N + \Delta p_{\text{Cua}} = 46 + 4 = 50 \text{ (kW)}$$

$$\text{效率 } \eta_N = \frac{P_N}{P_1} \times 100\% = \frac{46}{51.46} \times 100\% \approx 89.4\%$$

第四章 直流电机拖动基础

4-1 为什么直流电动机一般不允许直接起动？采用什么方法起动比较好？

答：

所谓起动就是指电动机接通电源后，由静止状态加速到某一稳态转速的过程。他励直流电动机起动时，必须先加额定励磁电流建立磁场，然后再加电枢电压。他励直流电动机当忽略电枢电感时，电枢电流为

$$I_a = \frac{U_N - E_a}{R_a}$$

在起动瞬间，电动机的转速 $n=0$ ，感应电动势 $E_a = C_e \Phi_N n = 0$ ，电枢回路只有电枢绕组电阻 R_a ，此时电枢电流为起动电流 I_{st} ，对应的电磁转矩为起动转矩 T_{st} ，并有

$$I_{st} = \frac{U_N}{R_a}, \quad T_{st} = C_T \Phi_N I_{st}$$

由于电枢绕组电阻 R_a 很小，因此起动电流 $I_{st} \gg I_N$ ，约为 $(10 \sim 20) I_N$ ，这么大的起动电流使电机换向困难，在换向片表面产生强烈的火花，甚至形成环火；同时电枢绕组也会因过热而损坏；另外，由于大电流产生的转矩过大，将损坏拖动系统的传动机构，这都是不允许的。因此除了微型直流电动机由于 R_a 较大、惯量较小可以直接起动外，一般直流电动机都不允许直接起动。

这样，就需要增加起动设备和采取措施来控制电机的起动过程。由 $I_{st} = U_N / R_a$ 可知，限制起动电流的措施有两个：一是增加电枢回路电阻，二是降低电源电压，即直流电动机的起动方法有电枢串电阻和降压两种。串电阻起动操作较简单、可靠，但起动电阻要消耗大量电能，效率较低。因此，目前已较少使用，只在应用串电阻调速的电力拖动系统中才使用这种起动方法；降压起动需要可调的直流电源，可采用基于电力电子器件的可控整流器向直流电机供电。采用降压起动方法，可使整个起动过程既快又平稳，同时能量损耗也小。此外，可控直流电源还可用于调速，因而在电机拖动系统中得到广泛应用。

4-2 为什么要考虑调速方法与负载类型的配合？怎样配合才合理？试分析恒转矩调速拖动恒功率负载，以及恒功率调速拖动恒转矩负载两种情况的机械特性。

答：

为了使电机得到充分利用，根据不同的负载，应选用相应的调速方式。通常，恒转矩负载应采用恒转矩调速方式，恒功率负载应采用恒功率调速方式，这样可使调速方式与负载类型相匹配，电动机可以被充分利用。

例如初轧机主传动机构，在转速比较低时，压下量较大，即负载转矩大，可采用恒转矩调速方式；转速高时，压下量减小，即负载转矩随转速的升高而减小，为恒功率负载，因此，要与恒功率调速方式相配合。所以，在采用他励直流电动机拖动的初轧机主传动系统中，在额定转速 n_N 以下一般用改变供电电压调速，在 n_N 以上用弱磁调

速，这样的配合较恰当。如图 4-13 所示。

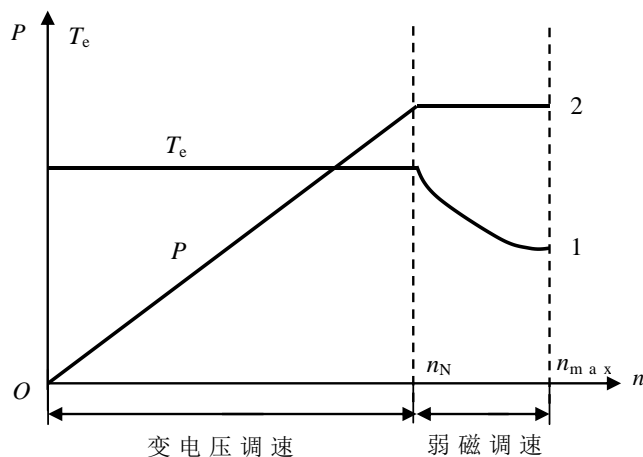
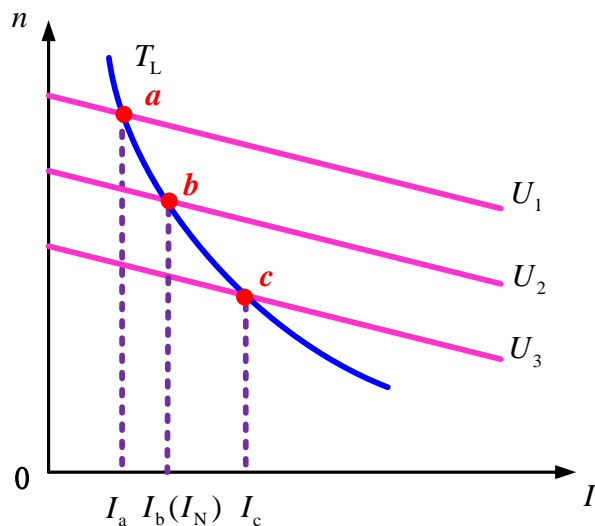


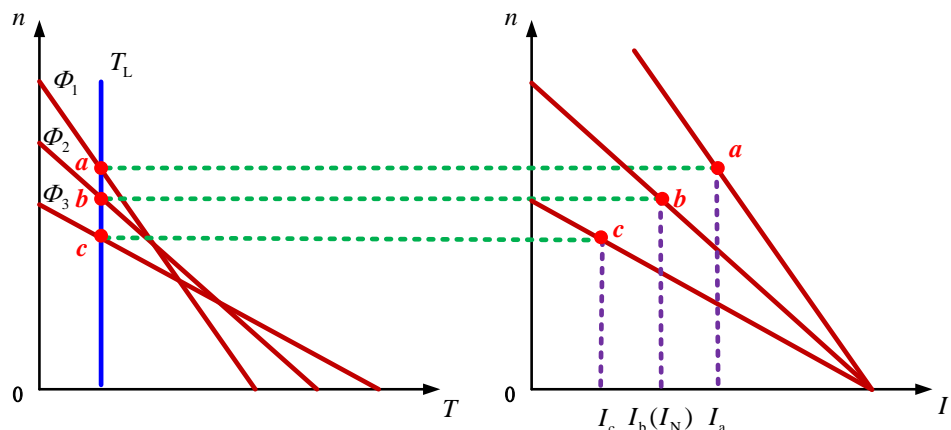
图4-13 他励直流电动机调速时的容许输出转矩和功率

反之，假如恒转矩负载采用恒功率调速方式，或者恒功率负载采用恒转矩调速方式，则调速方式与负载类型就不匹配，电动机或者过载、过热，或者不能被充分利用。

例如用恒转矩调速方法去拖动恒功率负载（如下图），因调速时负载转矩 T_L 在 $T_a \sim T_c$ 范围内变化，故电机的电磁转矩也相应地变化。由于励磁磁通并不变，那么电枢电流就随之在 $I_a \sim I_c$ 范围内变化。如果令 $I_b = I_N$ ，则低速时 $I_c > I_N$ ，电机过载、过热；高速时， $I_a < I_N$ ，电机为轻载，没被充分利用。



又如用恒功率调速方法去拖动恒转矩负载（如下图），因为调速时负载转矩 T_L 为常值，所以电机的电磁转矩 T_e 也为常值，从电磁转矩公式 $T_e = C_T \Phi I$ 可知，随着磁通 Φ 的减小，电枢电流 I 一定会变大。如果令 $I_b = I_N$ ，则弱磁高速时 $I_a > I_N$ ，电机过载、过热；强磁低速时， $I_c < I_N$ ，电机没被充分利用。



4-3 如何区别电动机是处于电动状态还是制动状态？

答：

直流电动机的运行状态主要分为电动状态和制动状态两大类。

电动状态是电动机运行时的基本工作状态。电动状态运行时，电动机的电磁转矩 T_e 与转速 n 方向相同，此时 T_e 为拖动转矩，电机从电源吸收电功率，向负载传递机械功率。

电动机电动状态运行时的机械特性如图 4-14 所示。

电动机在制动状态运行时，其电磁转矩 T_e 与转速 n 方向相反，此时 T_e 为制动性阻转矩，电动机吸收机械能并转化为电能，该电能或消耗在电阻上，或回馈电网。电动机制动状态的机械特性处在第二、四象限。

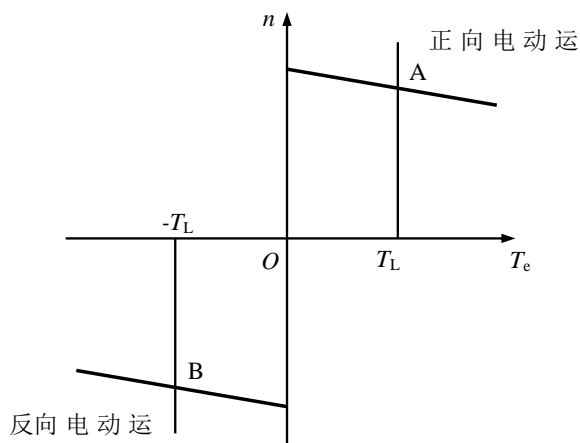


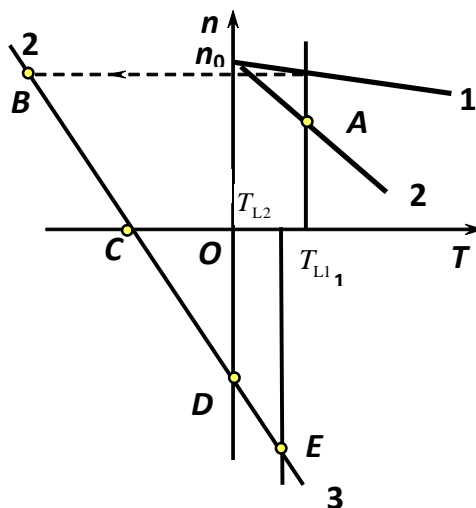
图4-14 他励直流电动机的电动运行状态

4-4 一台他励直流电动机拖动的卷扬机，当电枢所接电源电压为额定电压、电枢回路串入电阻时拖动着重物匀速上升，若把电源电压突然倒换极性，电动机最后稳定运行于什

么状态？重物提升还是下放？画出机械特性图，并说明中间经过了什么运行状态？

答：

电机开始运行于正向电动状态。若把电源电压突然倒换极性，电动机最后稳定运行于反向回馈制动状态，重物匀速下放，其机械特性如下图所示。



图中曲线 1 为固有机特性，曲线 2 为电枢电压等于额定值、电枢回路串电阻的人为机械特性，曲线 3 为电枢电压反接后电枢回路串电阻的人为机械特性。反接电压之前，匀速提升重物的工作点为 A，反接后稳定运行的工作点为 E。从 A 到 E 中间经过：

- 1) B—C，反接制动过程；
- 2) C—D，反向升速，属反向电动运行状态；
- 3) D—E，继续反向升速，属反向回馈制动运行状态。

4-5 一台他励直流电动机拖动一台电动车行驶，前进时电动机转速为正。当电动车行驶在斜坡上时，负载的摩擦转矩比位能性转矩小，电动车在斜坡上前进和后退时电动机可能工作在什么运行状态？请在机械特性上标出工作点。

答：

如图 4-22 所示，当电动车在斜坡上前进时，负载转矩 T_{L1} 为摩擦转矩与位能性转矩之和，此时电动机电磁转矩 T_e 克服负载转矩 T_{L1} ，使电动车前进，电动机工作在第一象限的正向电动运行状态，如图中的 A 点。当电动车在斜坡上后退时，负载转矩 T_{L2} 为摩擦转矩与位能性转矩之差，由于摩擦转矩比位能性转矩小，所以 T_{L2} 与转速 n 方向相同，

T_{L2} 实质上成为驱动转矩，而电动机电磁转矩 T_e 与 n 方向相反，为制动转矩，抑制电动机后退速度，同时将电能回馈给电网，电动机工作在第二象限的正向回馈制动运行状态，如图中的 B 点。

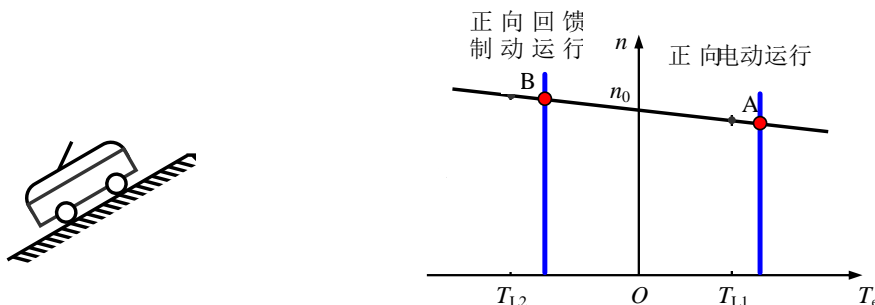


图4-22 正向回馈制动运行

4-6 有一他励直流电动机的额定数据为： $P_N = 60\text{kW}$ ， $U_N = 220\text{V}$ ， $I_N = 305\text{A}$ ， $n_N = 1000\text{r/min}$ ，估算额定运行时的 E_{aN} ， $C_e\Phi_N$ ， T_N ， n_0 ，最后画出固有机械特性。

解：

认为额定运行时电枢铜耗近似等于总损耗的 50%，即

$$I_N^2 R_a = 0.5(U_N I_N - P_N)$$

这样电枢电阻

$$R_a = 0.5 \frac{U_N I_N - P_N}{I_N^2} = 0.5 \times \frac{220 \times 305 - 60 \times 10^3}{305^2} \approx 0.038 (\Omega)$$

$$E_{aN} = U_N - I_N R_a = 220 - 305 \times 0.038 = 208.41 (\text{V})$$

$$C_e \Phi_N = \frac{E_{aN}}{n_N} = \frac{208.41}{1000} \approx 0.208 (\text{V} \cdot \text{min/r})$$

$$T_N = 9.55 \frac{P_N}{n_N} = 9.55 \times \frac{60 \times 10^3}{1000} = 573 (\text{N} \cdot \text{m})$$

$$n_0 = \frac{U_N}{C_e \Phi_N} = \frac{220}{0.208} \approx 1057.7 (\text{r/min})$$

固有机械特性方程为

$$n = n_0 - \frac{R_a}{C_e \Phi_N} I_a = 1057.7 - \frac{0.038}{0.208} I_a \approx 1057.7 - 0.1827 I_a$$

因为 $C_T \Phi_N = 9.55 C_e \Phi_N = 9.55 \times 0.208 \approx 1.986 (\text{N} \cdot \text{m/A})$ ，所以该方程又可写成

$$n = n_0 - \frac{R_a}{C_e \Phi_N} \frac{T_e}{C_T \Phi_N} = 1057.7 - \frac{0.1827}{1.986} T_e \approx 1057.7 - 0.092 T_e$$

由此可画出固有机械特性，如下图所示

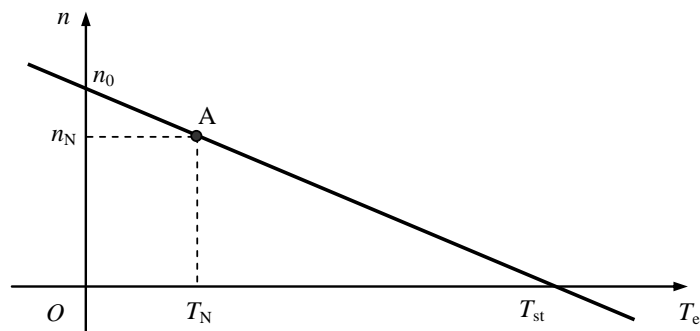


图4-2 他励电动机固有机特性

4-7 画出上题电动机电枢回路串入 $R=0.1R_a$ 电阻和电枢电压降到 150V 的两条人为机械特性。

解：

电枢回路串入 $R=0.1R_a$ 电阻的人为机械特性方程为（空载转速不变）

$$n = n_0 - \frac{R_a + R}{C_e \Phi_N} \frac{T_e}{C_T \Phi_N} = 1057.7 - \frac{1.1 \times 0.038}{0.208 \times 1.986} T_e \approx 1057.7 - 0.101 T_e$$

电枢电压降到 150V 的人为机械特性方程为（特性斜率不变）

$$n = \frac{U}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a}{C_e \Phi_N} \frac{T_e}{C_T \Phi_N} = \frac{150}{0.208} - 0.092 T_e \approx 721.2 - 0.092 T_e$$

由此可画出这两条人为机械特性，如下图所示

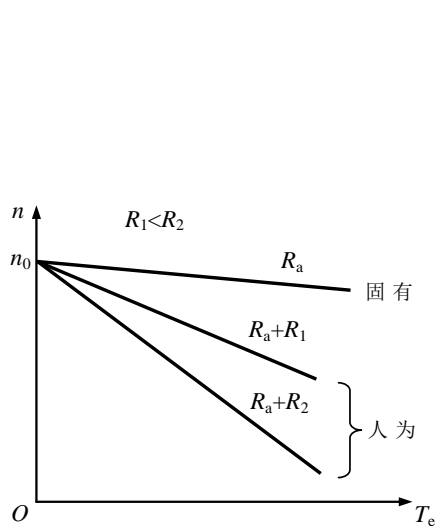


图4-5 改变电枢电阻的人为机械

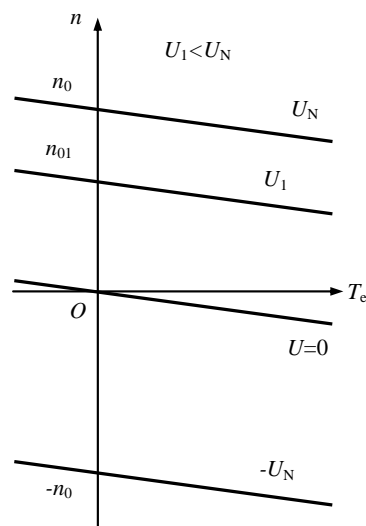


图4-3 改变电枢电压的人为的机械特性

4-8 有一他励直流电动机的额定数据为： $P_N = 7.5\text{kW}$ ， $U_N = 220\text{V}$ ， $I_N = 40\text{A}$ ，

$n_N = 1000 \text{ r/min}$, $R_a = 0.5 \Omega$, $T_L = 0.5 T_N$, 求电动机的转速和电枢电流。

解:

额定运行时

$$C_e \Phi_N = \frac{U_N - I_N R_a}{n_N} = \frac{220 - 40 \times 0.5}{1000} = 0.2 \text{ (V} \cdot \text{min/r)}$$

$$T_{eN} = 9.55 C_e \Phi_N I_N = 9.55 \times 0.2 \times 40 = 76.4 \text{ (N} \cdot \text{m)}$$

$$T_N = 9.55 \frac{P_N}{n_N} = 9.55 \times \frac{7.5 \times 10^3}{1000} = 71.625 \text{ (N} \cdot \text{m)}$$

空载转矩和空载损耗为

$$T_0 = T_{eN} - T_N = 76.4 - 71.625 = 4.775 \text{ (N} \cdot \text{m)}$$

$$P_0 = \frac{T_0 n_N}{9.55} = \frac{4.775 \times 1000}{9.55} = 500 \text{ (W)}$$

负载运行时, 认为空载损耗保持不变, 即有如下关系

$$T_e = T_L + 9.55 \frac{P_0}{n} = 0.5 T_N + 9.55 \frac{P_0}{n}$$

$$C_e \Phi_N n = U_N - I_a R_a$$

$$T_e = C_T \Phi_N I_a = 9.55 C_e \Phi_N I_a$$

求解上面的三个方程, 可得电动机的转速和电枢电流

$$n \approx 1047.3 \text{ (r/min)}$$

$$I_a \approx 21.1 \text{ (A)}$$

4-9 一台他励直流电动机的额定数据为: $P_N = 10 \text{ kW}$, $U_N = 220 \text{ V}$, $I_N = 53.8 \text{ A}$,

$n_N = 1500 \text{ r/min}$, $R_a = 0.29 \Omega$, 试计算:

(1) 直接起动时的起动电流;

(2) 限制起动电流不超过 $2I_N$, 采用电枢串电阻起动时, 应串入多大的电阻值; 若采用降压起动, 电压应降到多大?

解:

(1) 直接起动时的起动电流

$$I_{st} = \frac{U_N}{R_a} = \frac{220}{0.29} \approx 758.6 \text{ (A)}$$

(2) 采用电枢串电阻起动时, 应串入多大的电阻值

$$R_\Omega = \frac{U_N}{2I_N} - R_a = \frac{220}{2 \times 53.8} - 0.29 \approx 1.75 \text{ (A)}$$

若采用降压起动, 电压应降到

$$U_N = 2I_N R_a = 2 \times 53.8 \times 0.29 \approx 31.2 \text{ (V)}$$

4-10 一台他励直流电动机的额定数据为: $P_N = 7.5\text{kW}$, $U_N = 220\text{V}$, $I_N = 41\text{A}$, $n_N = 1500\text{r/min}$,

$R_a = 0.376\Omega$, 拖动恒转矩额定负载运行, 现把电源电压降至 150V , 问:

(1) 电源电压降低的瞬间转速来不及变化, 电动机的电枢电流及电磁转矩各是多大?

(2) 稳定运行转速是多少?

解:

(1) 额定运行时

$$C_e \Phi_N = \frac{U_N - I_N R_a}{n_N} = \frac{220 - 41 \times 0.376}{1500} \approx 0.136 \text{ (V} \cdot \text{min/r)}$$

电源电压降至 150V 的瞬间, 转速来不及变化, 则电动机的电枢电流

$$I_a = \frac{U - C_e \Phi_N n_N}{R_a} = \frac{150 - 0.136 \times 1500}{0.376} \approx -143.6 \text{ (A)}$$

此时的电磁转矩

$$T_e = C_T \Phi_N I_a = 9.55 C_e \Phi_N I_a = 9.55 \times 0.136 \times (-143.6) \approx -186.5 \text{ (N} \cdot \text{m)}$$

(2) 因为是恒转矩负载, 稳定运行时电枢电流为额定值 $I_N = 41\text{A}$, 所以转速

$$n = \frac{U - I_N R_a}{C_e \Phi_N} = \frac{150 - 41 \times 0.376}{0.136} \approx 989.6 \text{ (r/min)}$$

4-11 一台他励直流电动机, $P_N = 21\text{kW}$, $U_N = 220\text{V}$, $I_N = 115\text{A}$, $n_N = 980\text{r/min}$, $R_a = 0.1\Omega$,

拖动恒转矩负载运行(不计空载转矩), $T_L = 80\%T_N$ 。弱磁调速时, Φ 从 Φ_N 调至 $80\%\Phi_N$,

问:

(1) 调速瞬间电枢电流是多少?

(2) 调速前后的稳态转速各为多少?

解:

(1) 额定运行时

$$C_e \Phi_N = \frac{U_N - I_N R_a}{n_N} = \frac{220 - 115 \times 0.1}{980} \approx 0.213 \text{ (V} \cdot \text{min/r)}$$

不计空载转矩, $T_L = 80\%T_N$ 恒转矩负载运行时的电枢电流为 $0.8I_N$, 转速为

$$n = \frac{U_N - 0.8I_N R_a}{C_e \Phi_N} = \frac{220 - 0.8 \times 115 \times 0.1}{0.213} \approx 989.7 \text{ (r/min)}$$

弱磁调速瞬间, 转速来不及变化, 电枢电流为

$$I_a = \frac{U_N - 0.8C_e\Phi_N n}{R_a} = \frac{220 - 0.8 \times 0.213 \times 989.7}{0.1} \approx 513.55 \text{ (A)}$$

(2) 调速前的稳态转速

$$n_1 = n = 989.7 \text{ (r/min)}$$

因为是恒转矩负载运行，调速后稳态运行时 $0.8T_N = 0.8C_T\Phi_N I_2$ ，此时电枢电流 $I_2 = I_N$ ，所以调速后的稳态转速

$$n_2 = \frac{U_N - I_2 R_a}{0.8C_e\Phi_N} = \frac{220 - 115 \times 0.1}{0.8 \times 0.213} \approx 1223.6 \text{ (r/min)}$$

4-12 一台他励直流电动机的 $P_N = 17\text{kW}$ ， $U_N = 110\text{V}$ ， $I_N = 185\text{A}$ ， $n_N = 1000\text{r/min}$ ， $R_a = 0.036\Omega$ ，已知电动机最大允许电流 $I_{\text{amax}} = 1.8I_N$ ，电动机拖动 $T_L = 0.8T_N$ 负载电动运行。问：

- (1) 若采用能耗制动停车，电枢应串入多大的电阻？
- (2) 制动开始瞬间及制动结束时的电磁转矩各为多大？
- (3) 若负载为位能性恒转矩负载，采用能耗制动使负载以 120r/min 转速匀速下放重物，此时电枢回路应串入多大的电阻？

解：

(1) 额定运行时

$$C_e\Phi_N = \frac{U_N - I_N R_a}{n_N} = \frac{110 - 185 \times 0.036}{1000} \approx 0.103 \text{ (V} \cdot \text{min/r)}$$

不计空载转矩，拖动 $T_L = 0.8T_N$ 负载电动运行时的电枢电流为 $0.8I_N$ ，转速为

$$n = \frac{U_N - 0.8I_N R_a}{C_e\Phi_N} = \frac{110 - 0.8 \times 185 \times 0.036}{0.103} \approx 1016.2 \text{ (r/min)}$$

能耗制动前电枢电动势为

$$E_a = C_e\Phi_N n = 0.103 \times 1016.2 \approx 104.7 \text{ (V)}$$

制动瞬间转速来不及变化，电枢电动势不变，电枢应串入的电阻值为

$$R_\Omega = \frac{E_a}{I_{\text{amax}}} - R_a = \frac{104.7}{1.8 \times 185} - 0.036 \approx 0.278 \text{ (}\Omega\text{)}$$

(2) 制动开始瞬间的电枢电流 $I_1 = -I_{\text{amax}} = -1.8I_N$ ，电磁转矩

$$T_{e1} = -C_T\Phi_N \cdot 1.8I_N = -9.55C_e\Phi_N \cdot 1.8I_N = -1.8 \times 9.55 \times 0.103 \times 185 \approx -327.56 \text{ (N} \cdot \text{m)}$$

制动结束时的电磁转矩 $T_{e2} = 0$

(3) 因为负载是位能性恒转矩负载，重物下放时的负载转矩仍为 $T_L = 0.8T_N$ ，电枢电流 $I_3 = 0.8I_N$ ，电枢回路应串入的电阻值

$$R_{\Omega} = \frac{-E_{a3}}{I_3} - R_a = \frac{-C_e \Phi_N n_3}{I_3} - R_a = \frac{-0.103 \times (-120)}{0.8 \times 185} - 0.036 \approx 0.0475 (\Omega)$$

4-13 一台他励直流电动机的 $P_N = 10\text{kW}$ ， $U_N = 110\text{V}$ ， $I_N = 112\text{A}$ ， $n_N = 750\text{r/min}$ ， $R_a = 0.1\Omega$ ，

已知电动机的过载能力 $\lambda = 2.2$ ，电动机带反抗性恒转矩负载处于额定运行。求：

(1) 采用反接制动停车，电枢回路应串入多大的电阻？

(2) 如制动结束时，不切断电源，电动机是否会反转？若能反转，试求稳态转速，并说明电动机工作在什么状态？

解：

(1) 额定运行时

$$C_e \Phi_N = \frac{U_N - I_N R_a}{n_N} = \frac{110 - 112 \times 0.1}{750} \approx 0.132 (\text{V} \cdot \text{min/r})$$

$$T_L = T_{eN} = 9.55 C_e \Phi_N I_N = 9.55 \times 0.132 \times 112 \approx 141.2 (\text{N} \cdot \text{m})$$

由于反接制动时电枢电流不超过 λI_N ，电枢回路应串入的电阻为

$$R_{\Omega} = \frac{-U_N - C_e \Phi_N n_N}{\lambda(-I_N)} - R_a = \frac{-110 - 0.132 \times 750}{2.2 \times (-112)} - 0.1 \approx 0.75 (\Omega)$$

(2) 如制动结束时，不切断电源，当 $n = 0$ 时的电磁转矩

$$T_{e0} = 9.55 C_e \Phi_N \frac{-U_N}{R_{\Omega} + R_a} = 9.55 \times 0.132 \times \frac{-110}{0.75 + 0.1} \approx -163.1 (\text{N} \cdot \text{m})$$

由于 $|T_{e0}| > |T_L|$ ，电动机将会反转，最后稳定运行在反向电动状态，其稳态转速为

$$n_2 = \frac{-U_N}{C_e \Phi_N} - \frac{R_{\Omega} + R_a}{9.55 (C_e \Phi_N)^2} (-T_L) = \frac{-110}{0.132} + \frac{0.75 + 0.1}{9.55 \times 0.132^2} \times 141.2 \approx -112.1 (\text{r/min})$$

4-14 一台他励直流电动机的 $P_N = 29\text{kW}$ ， $U_N = 440\text{V}$ ， $I_N = 76.2\text{A}$ ， $n_N = 1050\text{r/min}$ ，

$R_a = 0.393\Omega$ 。

(1) 电动机以反向回馈制动运行下放重物，设 $I_a = 60\text{A}$ ，电枢回路不串电阻，求电动机的转速与负载转矩各为多少？回馈电源的电功率多大？

(2) 若采用能耗制动运行下放同一重物，要求电动机转速 $n = -300\text{r/min}$ ，问电枢回路串入多大的电阻？该电阻上消耗的电功率是多大？

(3) 若采用倒拉反转下放同一重物，要求电动机转速 $n = -850\text{r/min}$ ，问电枢回路串入多大的电阻？该电阻上消耗的电功率是多大？电源送入电动机的电功率多大？

解：

(1) 额定运行时

$$C_e \Phi_N = \frac{U_N - I_N R_a}{n_N} = \frac{440 - 76.2 \times 0.393}{1050} \approx 0.3905 \text{ (V} \cdot \text{min/r)}$$

反向回馈制动运行下放重物时，电动机的转速为

$$n = \frac{-U_N - I_a R_a}{C_e \Phi_N} = \frac{-440 - 60 \times 0.393}{0.3905} \approx -1187 \text{ (r/min)}$$

不计空载转矩，负载转矩为

$$T_L = T_e = 9.55 C_e \Phi_N I_a = 9.55 \times 0.3905 \times 60 \approx 223.8 \text{ (N} \cdot \text{m)}$$

回馈电源的电功率为

$$P_1 = -U_N I_a = -440 \times 60 = -26.4 \text{ (kW)}$$

(2) 能耗制动运行下放重物时，电枢回路串入的电阻值

$$R_{\Omega 2} = \frac{-C_e \Phi_N n}{I_a} - R_a = \frac{-0.3905 \times (-300)}{60} - 0.393 \approx 1.56 \text{ (}\Omega\text{)}$$

该电阻上消耗的电功率为

$$P_{\Omega 2} = I_a^2 R_{\Omega 2} = 60^2 \times 1.56 = 5.616 \text{ (kW)}$$

(3) 倒拉反转下放重物时，电枢回路串入的电阻值

$$R_{\Omega 3} = \frac{(U_N - C_e \Phi_N n)}{I_a} - R_a = \frac{440 - 0.3905 \times (-850)}{60} - 0.393 \approx 12.47 \text{ (}\Omega\text{)}$$

该电阻上消耗的电功率为

$$P_{\Omega 3} = I_a^2 R_{\Omega 3} = 60^2 \times 12.47 = 44.892 \text{ (kW)}$$

电源送入电动机的电功率为

$$P_1 = U_N I_a = 440 \times 60 = 26.4 \text{ (kW)}$$

4-15 一台他励直流电动机的 $P_N = 29 \text{ kW}$ ， $U_N = 440 \text{ V}$ ， $I_N = 76 \text{ A}$ ， $n_N = 1000 \text{ r/min}$ ， $R_a = 0.377 \Omega$ 。负载转矩 $T_L = 0.8 T_N$ 。求当该电动机拖动位能负载时，用哪几种方法可使电动机以 500 r/min 的速度下放负载，每种方法电枢回路中所串电阻为多少？画出相应的机械特性，标出从稳态提升重物到以 500 r/min 速度下放重物的转换过程。

解：

额定运行时

$$C_e \Phi_N = \frac{U_N - I_N R_a}{n_N} = \frac{440 - 76 \times 0.377}{1000} \approx 0.4413 \text{ (V} \cdot \text{min/r)}$$

不计空载转矩，负载转矩 $T_L = 0.8 T_N$ 时的电枢电流为

$$I_a = 0.8I_N = 0.8 \times 76 = 60.8 \text{ (A)}$$

以 500r/min 速度稳态提升重物时的机械特性为

$$n = \frac{U_N - I_a(R_a + R_\Omega)}{C_e \Phi_N} = \frac{440 - 60.8 \times (0.377 + R_\Omega)}{0.4113} = 500$$

由此可求得电枢回路串入的电阻值

$$R_\Omega \approx 3.48 \text{ (}\Omega\text{)}$$

采用以下两种方法可使电动机以 500r/min 的速度下放负载：

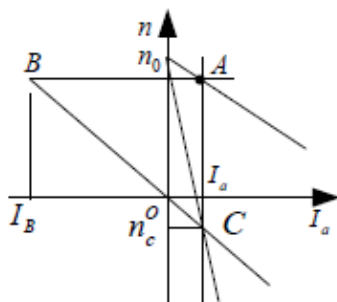
(1) 采用转速反向的反接制动，电动机的机械特性为

$$n = \frac{U_N - I_a(R_a + R_{\Omega 1})}{C_e \Phi_N} = \frac{440 - 60.8 \times (0.377 + R_{\Omega 1})}{0.4113} = -500$$

由此可求得电枢回路串入的电阻值

$$R_{\Omega 1} \approx 10.24 \text{ (}\Omega\text{)}$$

从稳态提升重物到以 500r/min 速度下放重物的转换过程如下图所示，



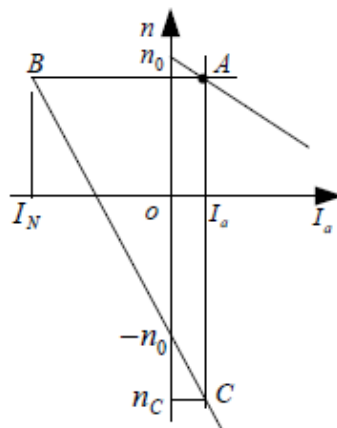
(2) 采用能耗制动，电动机的机械特性为

$$n = \frac{-I_a(R_a + R_{\Omega 2})}{C_e \Phi_N} = \frac{-60.8 \times (0.377 + R_{\Omega 2})}{0.4113} = -500$$

由此可求得电枢回路串入的电阻值

$$R_{\Omega 2} \approx 3.01 \text{ (}\Omega\text{)}$$

从稳态提升重物到以 500r/min 速度下放重物的转换过程如下图所示，



4-16 某他励直流电动机的数据为： $P_N = 17\text{kW}$ ， $U_N = 110\text{V}$ ， $I_N = 185\text{A}$ ， $n_N = 1000\text{r/min}$ ，

$R_a = 0.035\Omega$ ， $GD_e^2 = 30\text{N}\cdot\text{m}^2$ 。拖动恒转矩负载运行， $T_L = 0.85T_N$ 。采用能耗制动或反

接制动停车，最大允许电流为 $1.8I_N$ ，求两种停车方法各自最快的制动停车时间是多少

（取 $GD^2 = 1.25GD_e^2$ ）？

解：

基本数据计算：

额定运行时电动机的 $C_e\Phi_N$

$$C_e\Phi_N = \frac{U_N - I_N R_a}{n_N} = \frac{110 - 185 \times 0.035}{1000} \approx 0.104 \text{ (V}\cdot\text{min/r)}$$

$T_L = 0.85T_N$ 负载正向运行时的感应电动势

$$E_a = U_N - I_a R_a = 110 - 0.85 \times 185 \times 0.035 \approx 104.5 \text{ (V)}$$

$T_L = 0.85T_N$ 负载正向运行时的稳态转速（即制动瞬时转速）

$$n_A = \frac{E_a}{C_e\Phi_N} = \frac{104.5}{0.104} \approx 1005 \text{ (r/min)}$$

（1）能耗制动计算：

电枢回路串入电阻后的总电阻

$$R_a + R_{\min} = \frac{E_a}{1.8I_N} = \frac{104.5}{1.8 \times 185} \approx 0.314 \text{ (}\Omega\text{)}$$

能耗制动时的稳态转速

$$n_C = 0 - \frac{I_a(R_a + R_{\min})}{C_e\Phi_N} = -\frac{0.85 \times 185 \times 0.314}{0.104} \approx -474.8 \text{ (r/min)}$$

能耗制动时的时间常数

$$T_M = \frac{GD^2}{375} \frac{R_a + R_{\min}}{9.55(C_e\Phi_N)^2} = \frac{1.25 \times 30}{375} \times \frac{0.314}{9.55 \times 0.104^2} \approx 0.304 \text{ (s)}$$

最快的制动停车时间

$$t_0 = T_M \ln \frac{n_A - n_C}{-n_C} = 0.304 \times \ln \frac{1005 + 474.8}{474.8} \approx 0.346 \text{ (s)}$$

（2）反接制动计算：

电枢回路串入电阻后的总电阻

$$R_a + R_{\min} = \frac{U_N + E_a}{1.8I_N} = \frac{110 + 104.5}{1.8 \times 185} \approx 0.644 \text{ (}\Omega\text{)}$$

能耗制动时的稳态转速

$$n_C = \frac{-U_N}{C_e \Phi_N} - \frac{I_a(R_a + R_{\min})}{C_e \Phi_N} = -\frac{110}{0.104} - \frac{0.85 \times 185 \times 0.644}{0.104} \approx -2031.4 \text{ (r/min)}$$

能耗制动时的时间常数

$$T_M = \frac{GD^2}{375} \frac{R_a + R_{\min}}{9.55(C_e \Phi_N)^2} = \frac{1.25 \times 30}{375} \times \frac{0.644}{9.55 \times 0.104^2} \approx 0.623 \text{ (s)}$$

最快的制动停车时间

$$t_0 = T_M \ln \frac{n_A - n_C}{-n_C} = 0.304 \times \ln \frac{1005 + 2031.4}{2031.4} \approx 0.25 \text{ (s)}$$

4-17 一台他励直流电动机的数据为： $P_N = 5.6\text{kW}$ ， $U_N = 220\text{V}$ ， $I_N = 31\text{A}$ ， $n_N = 1000\text{r/min}$ ，

$R_a = 0.45\Omega$ ，系统总飞轮惯量 $GD^2 = 9.8\text{N} \cdot \text{m}^2$ 。在转速为 n_N 时使电枢反接，反接制动的

起始电流为 $2I_N$ ，传动机构损耗转矩 $\Delta T = 0.11T_N$ 。试就反抗性恒转矩负载及位能性恒转矩负载两种情况求：反接制动使转速自 n_N 降到 0 的制动时间。

解：

基本数据计算：

额定运行时电动机的 $C_e \Phi_N$

$$C_e \Phi_N = \frac{U_N - I_N R_a}{n_N} = \frac{220 - 31 \times 0.45}{1000} \approx 0.206 \text{ (V} \cdot \text{min/r)}$$

额定负载正向运行时的感应电动势

$$E_{aN} = U_N - I_N R_a = 220 - 31 \times 0.45 \approx 206 \text{ (V)}$$

反接制动时电枢回路串入电阻后的总电阻

$$R_a + R_{\min} = \frac{U_N + E_a}{2I_N} = \frac{220 + 206}{2 \times 31} \approx 6.87 \text{ (}\Omega\text{)}$$

反接制动时的时间常数

$$T_M = \frac{GD^2}{375} \frac{R_a + R_{\min}}{9.55(C_e \Phi_N)^2} = \frac{9.8}{375} \times \frac{6.87}{9.55 \times 0.206^2} \approx 0.443 \text{ (s)}$$

(1) 反抗性恒转矩负载计算：

稳态转速

$$n_C = \frac{-U_N}{C_e \Phi_N} - \frac{I_N(R_a + R_{\min})}{C_e \Phi_N} = -\frac{220}{0.206} - \frac{31 \times 6.87}{0.206} \approx -2101.8 \text{ (r/min)}$$

制动时间

$$t_0 = T_M \ln \frac{n_N - n_C}{-n_C} = 0.443 \times \ln \frac{1000 + 2101.8}{2101.8} \approx 0.172 \text{ (s)}$$

(2) 位能性恒转矩负载计算：

稳态转速

$$n_c = \frac{-U_N}{C_e \Phi_N} - \frac{I_a (R_a + R_{\min})}{C_e \Phi_N} = -\frac{220}{0.206} - \frac{(1-0.22) \times 31 \times 6.87}{0.206} \approx -1874.4 \text{ (r/min)}$$

制动时间

$$t_0 = T_M \ln \frac{n_A - n_c}{-n_c} = 0.443 \times \ln \frac{1000 + 1874.4}{1874.4} \approx 0.189 \text{ (s)}$$

第五章 变压器

- 5-1 在研究变压器时，对按正弦规律变化的电压、电流、感应电动势和磁通等为什么要规定正方向？这些物理量的正方向又是如何规定的？

答：

由于变压器中电压、电流、感应电动势和磁通等的大小和方向都随时间作周期性变化，为了能正确表明各量之间的关系，要规定它们的正方向。一般采用电工惯例来规定其正方向（假定正方向）：

- 1) 同一条支路中，电压 u 的正方向与电流 i 的正方向一致；
- 2) 由电流 i 产生的磁动势所建立的磁通 Φ 其二者的正方向符合右手螺旋法则；
- 3) 由磁通 Φ 产生的感应电动势 e ，其正方向与产生该磁通的电流 i 的正方向一致，

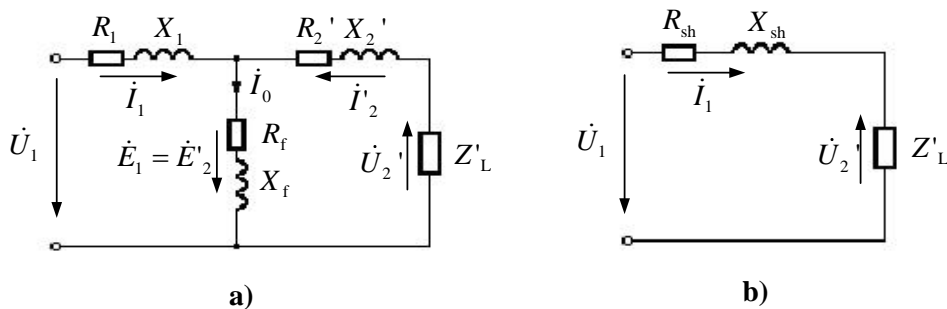
则有 $e = -N d\Phi / dt$ 。

- 5-2 变压器的等效电路模型是如何建立的？其简化等效电路的依据是什么？

答：

由于变压器一、二次绕组的匝数并不相等，甚至相差很大，感应电动势 \dot{E}_1 和 \dot{E}_2 两端的电位不相等，一、二次侧的电路无法建立直接的联系，使得计算变得较为繁琐。为了简化分析与计算，可以建立变压器的“纯电路模型”，即采用绕组折算的方法来规避一、二次侧的电磁耦合，从而建立一种简化的等效电路。绕组折算就是将变压器的一、二次绕组折算成相同匝数，通常是将二次绕组折算到一次绕组，即取 $N'_2 = N_1$ ，则 E_2 变为 E'_2 ，可使 $E'_2 = E_1$ 。折算仅是一种数学手段，它不改变折算前后的电磁关系，即折算前后的磁动势平衡、功率传递及损耗等均应保持不变。下图a所示就是变压器的T形等效电路。

T形等效电路虽然正确反映了变压器内部的电磁关系，但它属于混联电路，进行相量的复数运算比较麻烦。由于变压器运行时，空载电流（励磁电流） I_0 一般都是很小的，仅占（2%~10%） I_{1N} ，从工程计算的角度来看，可以把 I_0 略去不计，即去掉励磁支路，得到一个更简单的一、二次绕组阻抗相串联的简化等效电路，如下图b所示。



5-3 变压器中主磁通和漏磁通的性质和作用有什么不同？在等效电路中如何反映它们的作用？

答：

当一次绕组加上交流电源电压 u_1 时，一次绕组中就有电流产生，由于变压器为空载运行，此时称一次绕组中的电流为空载电流 i_0 。由 i_0 产生空载磁动势 $F_0 = N_1 i_0$ ，并建立空载时的磁场。由于铁心的磁导率比空气（或油）的磁导率大得多，所以绝大部分磁通通过铁心闭合，同时交链一、二次绕组，并产生感应电动势 e_1 和 e_2 ，如果二次绕组与负载接通，则在电动势作用下向负载输出电功率，所以这部分磁通起着传递能量的媒介作用，因此称之为主磁通 Φ ；另有一小部分磁通（约为主磁通的0.25%左右）主要经非磁性材料（空气或变压器油等）形成闭路，只与一次绕组交链，不参予能量传递，称之为一次绕组的漏磁通 $\Phi_{1\sigma}$ ，它在一次绕组中产生漏磁电动势 $e_{1\sigma}$ 。

在变压器等效电路中，主磁通的作用通过它所产生的感应电动势来表征，即一、二次绕组感应电动势 \dot{E}_1 、 \dot{E}_2 的大小与电源频率 f_1 、绕组匝数 N_1 、 N_2 及铁心中主磁通的最大值 Φ 成正比，而在相位上比产生感应电动势的主磁通滞后 90° 。而等效电路中的漏电抗反映了漏磁通对电路的电磁效应。由于漏磁通的主要路径是非铁磁性物质，漏磁路不会饱和，是线性的，其磁导是常数，因此对已制成的变压器，漏电感 $L_{1\sigma}$ 为一常数，当电源频率 f_1 一定时，漏电抗也是常数 $X_1 = \omega L_{1\sigma}$ 。

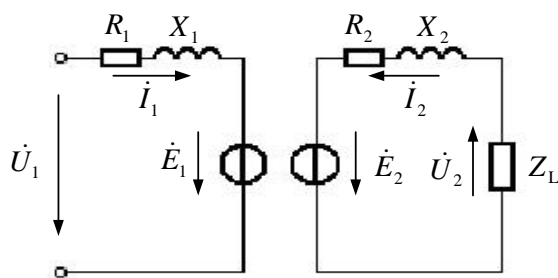


图5-8 变压器负载运行时的等效电路

- 5-4 变压器空载运行时，一次侧绕组的电流为什么很小？为什么变压器的空载电流又可以称为励磁电流？

答：

变压器主磁通的路径完全是通过铁心闭合的，主磁路的磁阻很小，只需要很小的励磁电流就能产生较大的主磁通，并产生足以平衡一次侧额定电压的感应电动势，所以变压器空载运行时，即使一次侧加额定电压，一次侧绕组的电流（空载电流 I_0 ）也很小。

变压器负载运行时，一次电流 \dot{I}_1 由两个分量组成，一个是空载电流 \dot{I}_0 ，用于建立主磁通 Φ ；另一个是供给负载的负载电流分量（ $\dot{I}_{1L} = -\dot{I}_2 / k$ ），用以抵消二次绕组磁动势的去磁作用，保持主磁通基本不变。因此，变压器的空载电流 I_0 又可以称为励磁电流。

- 5-5 变压器的损耗包括哪几种？可以分别采用什么方法来尽量减小这些损耗？

答：

变压器在能量传递的过程中会产生损耗，由于变压器是静止的电磁装置，其损耗只有铜损耗 Δp_{Cu} 和铁心损耗 Δp_{Fe} 两种：

（1）铜耗：变压器的绕组都有一定的电阻，当电流流过绕组时就要产生绕组损耗，称之为铜损耗，即铜耗 Δp_{Cu} 。铜耗的大小取决于负载电流和绕组电阻的大小，因而是随负载的变化而变化的，故称之为可变损耗。

减小铜耗的方法主要包括：采用低损低阻导线，限制漏磁引起的附加损耗，采用先进的绝缘结构等。

(2) 铁耗：由于铁心中的磁通是交变的，在铁心和金属结构件中会产生磁滞损耗和涡流损耗，统称为铁心损耗，即铁耗 Δp_{Fe} 。当电源电压 U_1 一定时，铁心中的磁通基本上是不变的，铁耗基本上可认为是恒定的，故称之为不变损耗，它与负载电流的大小和性质无关。

减小铁耗的方法主要包括：减小铁心总量，减小铁心单位损耗（采用高导磁材料），减小工艺系数等。

5-6 一台单相变压器，额定电压为220V/110V，如果不慎将低压侧误接到220V的电源上，对变压器有何影响？

答：

这是一台降压变压器，低压绕组匝数 N_2 少。由公式 $U_{1N} \approx 4.44f_1N_2\Phi_m$ 可知，主磁通 Φ 要增加很多才能平衡端电压 U_{1N} ，磁通的增加又因磁路非线性引起励磁电流增加很多，电流过大就可能烧坏低压绕组。

5-7 一台用于50Hz电源的单相变压器，如果接在60Hz电网上运行，如果额定电压不变，则空载电流、铁心损耗、漏电抗、励磁电抗及电压调整率等有何变化？

答：

根据变压器一次侧的电压平衡方程

$$U_{1N} \approx E_1 = 4.44f_1N_1\Phi_m$$

$$f_1 = 50 \text{ Hz 时, } \Phi_{m50} = \frac{U_{1N}}{4.44 \times 50 N_1}; \quad f_1 = 60 \text{ Hz 时, } \Phi_{m60} = \frac{U_{1N}}{4.44 \times 60 N_1}, \text{ 所以}$$

$$\frac{\Phi_{m60}}{\Phi_{m50}} = \frac{5}{6}$$

即主磁通为原来的5/6。若不考虑磁路的饱和效应，主磁通与空载电流（励磁电流）成正比，空载电流将减小。

铁心损耗的近似计算公式为

$$\Delta p_{Fe60} = C_{Fe} f_{60}^{1.3} B_{m60}^2 G = C_{Fe} \left(\frac{6}{5}\right)^{1.3} f_{50}^{1.3} \left(\frac{5}{6}\right)^2 B_{m50}^2 G = \left(\frac{5}{6}\right)^{0.7} \Delta p_{Fe50}$$

所以，铁心损耗将减小。

漏磁路的磁阻不变，漏电感不变，所以漏电抗随着频率的增加而变大。在不考虑磁路饱和的情况下，励磁电抗也随着频率的增加而变大。而漏电抗的变大意味着短路

电抗的变大，所以电压调整率也变大。

5-8 变压器为什么需要并联运行？实现正常并联运行的条件有哪些？哪些条件需要严格遵守？

答：

所谓并联运行，就是将两台或两台以上的变压器的一、二次绕组分别并联到公共母线上，同时对负载供电。变压器之所以要并联运行，是因为并联运行时很多的优点：

1) 提高供电的可靠性。并联运行的某台变压器发生故障或需要检修时，可以将它从电网上切除，而电网仍能继续供电；

2) 提高运行的经济性。当负载有较大的变化时，可以调整并联运行的变压器台数，以提高运行的效率；

3) 可以减小总的备用容量，并可随着用电量的增加而分批增加新的变压器。

并联运行的条件有以下三条，都必须严格遵守：

1) 并联运行的各台变压器的额定电压应相等，即各台变压器的电压比应相等；

2) 并联运行的各台变压器的联结组号必须相同；

3) 并联运行的各台变压器的短路阻抗（或阻抗电压）的相对值要相等。

5-9 与普通双绕组变压器相比，自耦变压器有哪些优缺点？

答：

自耦变压器与普通双绕组变压器相比，在相同的额定容量下，由于自耦变压器的计算容量小于额定容量，因此自耦变压器的结构尺寸小，节省有效材料（铜线和硅钢片）和结构材料（钢材），降低了成本。同时有效材料的减少还可减小损耗，从而提高自耦变压器的效率。

由于自耦变压器的一次侧和二次侧之间有电的直接联系，所以高压侧的电气故障会波及到低压侧，因此在低压侧使用的电气设备同样要有高压保护设备，以防止过电压。另外，自耦变压器的短路阻抗小，短路电流比普通双绕组变压器的大，因此必须加强保护。

5-10 电压互感器和电流互感器的功能是什么？使用时必须注意什么？

答：

电压互感器实质上就是一个降压变压器，原理和结构与普通双绕组变压器基本相同，其功能就是安全地测量高电压。使用电压互感器时，应注意以下几点：

1) 电压互感器在运行时二次绕组绝对不允许短路，因为如果二次侧发生短路，则短路电流很大，会烧坏互感器。因此，使用时在一、二次侧电路中应串接熔断器作短路保护。

2) 电压互感器的铁心和二次绕组的一端必须可靠接地，以防止高压绕组绝缘损坏时，铁心和二次绕组带上高电压而造成的事故。

3) 电压互感器有一定的额定容量，使用时二次侧不宜接过多的仪表，以免影响电压互感器的准确度。

电流互感器类似于一个升压变压器，其功能就是安全地测量大电流。使用电流互感器时，应注意以下几点：

1) 电流互感器在运行时二次绕组绝对不允许开路。如果二次绕组开路，电流互感器就成为空载运行状态，被测线路的大电流就全部成为励磁电流，铁心中的磁通密度就会猛增，磁路严重饱和，一方面造成铁心过热而毁坏绕组绝缘，另一方面二次绕组将会感应产生很高的电压，可能使绝缘击穿，危及仪表及操作人员的安全。

2) 电流互感器的铁心和二次绕组的一端必须可靠接地，以免绝缘损坏时，高电压传到低压侧，危及仪表及人身安全。

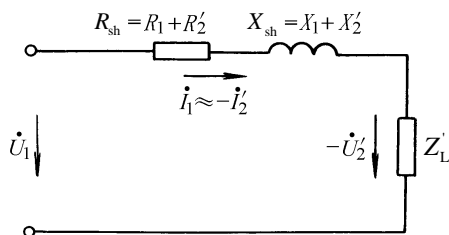
3) 电流表的内阻抗必须很小，否则会影响测量精度。

5-11 有一台单相变压器，已知 $R_1 = 2.19\Omega$ ， $X_1 = 15.4\Omega$ ， $R_2 = 0.15\Omega$ ， $X_2 = 0.964\Omega$ ， $R_f = 1250\Omega$ ， $X_f = 12600\Omega$ ， $N_1 = 876$ 匝， $N_2 = 260$ 匝， $U_2 = 6000\text{V}$ ， $I_2 = 180\text{A}$ ， $\cos\varphi_2 = 0.8$ （滞后），试用简化等效电路求电压 U_1 和电流 I_1 。

解：

$$\text{电压比 } k = \frac{N_1}{N_2} = \frac{876}{260} \approx 3.37$$

简化等效电路如下图所示，将相关参数折算到高压侧来计算



$$R_2' = k^2 R_2 = 3.37^2 \times 0.15 \approx 1.70 (\Omega)$$

$$X_2' = k^2 X_2 = 3.37^2 \times 0.964 \approx 10.95 (\Omega)$$

$$R_{sh} = R_1 + R_2' = 2.19 + 1.70 = 3.89 (\Omega)$$

$$X_{sh} = X_1 + X_2' = 15.4 + 10.95 = 26.35 (\Omega)$$

$$Z_{sh} = R_{sh} + jX_{sh} = 3.89 + j26.35 = 26.64 \angle 81.6^\circ (\Omega)$$

以 \dot{U}_2' 为参考向量，设 $\dot{U}_2' = 6000 \angle 0^\circ = 20220 \angle 0^\circ (V)$ ，则

$$\dot{I}_2' = \frac{\dot{I}_2}{k} = \frac{180 \angle -36.87^\circ}{3.37} \approx 53.41 \angle -36.87^\circ (A)$$

$$\dot{I}_1 = -\dot{I}_2' = -53.41 \angle -36.87^\circ = 53.41 \angle 143.13^\circ (A)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{U}_2' + \dot{I}_1 Z_{sh} \\ &= -20220 \angle 0^\circ + (-53.41 \angle -36.87^\circ \times 26.64 \angle 81.6^\circ) \\ &= -20220 - 1422.84 \angle 44.72^\circ \\ &= -21254.59 \angle 2.7^\circ (V) \end{aligned}$$

5-12 有一台单相变压器， $S_N = 100 \text{ kV} \cdot \text{A}$ ， $U_{1N}/U_{2N} = 6000 \text{ V}/230 \text{ V}$ ， $f_1 = 50 \text{ Hz}$ ，绕组参数为 $R_1 = 4.32 \Omega$ ， $R_2 = 0.00631 \Omega$ ， $X_1 = 8.9 \Omega$ ， $X_2 = 0.013 \Omega$ 。试求：

(1) 归算到高压侧的短路参数 R_{sh} 、 X_{sh} 、 Z_{sh} ；

(2) 求满载时，当 $\cos \varphi_2 = 1$ 、 $\cos \varphi_2 = 0.8$ （滞后）和 $\cos \varphi_2 = 0.8$ （超前）三种情况下的电压调整率 $\Delta U\%$ ，并对结果进行分析。

解：

(1) 归算到高压侧的短路参数

$$\text{变比 } k = \frac{U_{1N}}{U_{2N}} = \frac{6000}{230} \approx 26.1$$

$$R_{sh} = R_1 + R_2' = R_1 + k^2 R_2 = 4.32 + 26.1^2 \times 0.00631 \approx 8.62 (\Omega)$$

$$X_{sh} = X_1 + X_2' = X_1 + k^2 X_2 = 8.9 + 26.1^2 \times 0.013 \approx 17.76 (\Omega)$$

$$Z_{sh} = \sqrt{R_{sh}^2 + X_{sh}^2} = \sqrt{8.62^2 + 17.76^2} \approx 19.74 (\Omega)$$

$$(2) \text{ 满载时， } \beta = 1。 \text{ 另外， } I_{1N} = \frac{S_N}{U_{1N}} = \frac{100 \times 10^3}{6000} \approx 16.67 (A)$$

当 $\cos \varphi_2 = 1$ 时, $\sin \varphi_2 = 0$,

$$\begin{aligned}\Delta U\% &= \beta \frac{I_{1N}}{U_{1N}} (R_{sh} \cos \varphi_2 + X_{sh} \sin \varphi_2) \times 100\% \\ &= \frac{16.67}{6000} \times 8.62 \times 1 \times 100\% \\ &\approx 2.39\%\end{aligned}$$

当 $\cos \varphi_2 = 0.8$ (滞后) 时, $\sin \varphi_2 = 0.6$,

$$\begin{aligned}\Delta U\% &= \beta \frac{I_{1N}}{U_{1N}} (R_{sh} \cos \varphi_2 + X_{sh} \sin \varphi_2) \times 100\% \\ &= \frac{16.67}{6000} \times (8.62 \times 0.8 + 17.76 \times 0.6) \times 100\% \\ &\approx 4.88\%\end{aligned}$$

当 $\cos \varphi_2 = 0.8$ (超前) 时, $\sin \varphi_2 = -0.6$,

$$\begin{aligned}\Delta U\% &= \beta \frac{I_{1N}}{U_{1N}} (R_{sh} \cos \varphi_2 + X_{sh} \sin \varphi_2) \times 100\% \\ &= \frac{16.67}{6000} \times (8.62 \times 0.8 - 17.76 \times 0.6) \times 100\% \\ &\approx -1.04\%\end{aligned}$$

由于在电力变压器中, 一般 R_{sh} 和 X_{sh} 都比较小, 因此在纯电阻负载, 即 $\cos \varphi_2 = 1$ 时, $\Delta U\%$ 很小, 说明负载变化时 U_2 下降得很小; 在感性负载, 即 $\varphi_2 > 0$ 时, $\cos \varphi_2$ 和 $\sin \varphi_2$ 均为正值, $\Delta U\%$ 也为正值且较大, 说明 U_2 随负载电流 I_2 的增大而下降, 而且在相同负载电流 I_2 下, 感性负载时 U_2 的下降比纯电阻负载时 U_2 的下降来得大; 在容性负载, 即 $\varphi_2 < 0$ 时, $\cos \varphi_2 > 0$, 而 $\sin \varphi_2 < 0$, 若 $I_2 R_{sh} \cos \varphi_2 < |I_2 X_{sh} \sin \varphi_2|$, 则 $\Delta U\%$ 为负值, 这表明负载时二次侧端电压比空载时高, 即 U_2 随 I_2 的增大而升高。

5-13 一台单相变压器, $S_N = 1000 \text{ kV} \cdot \text{A}$, $U_{1N} / U_{2N} = 60 \text{ kV} / 6.3 \text{ kV}$, $f_1 = 50 \text{ Hz}$, 空载及短路试验的结果如下 (25℃时):

试验名称	电压/V	电流/A	功率/W	电源加在
空载	6300	10.1	5000	低压侧
短路	3240	16.67	14000	高压侧

试计算：

- (1) 归算到高压侧的参数；
- (2) 满载及 $\cos \varphi_2 = 0.8$ （滞后）时的电压调整率 $\Delta U\%$ 、电压 U_2 及效率 η ；
- (3) 最大效率 η_{\max} 。

解：

- (1) 归算到高压侧的参数

$$I_{1N} / I_{2N} = 16.67 \text{ A} / 158.73 \text{ A}$$

$$k = \frac{U_{1N}}{U_{2N}} = \frac{60}{6.3} \approx 9.52$$

由空载试验数据，先求低压侧的励磁参数

$$Z_f' \approx Z_0 = \frac{U_2}{I_0} = \frac{6300}{10.1} \approx 623.76(\Omega)$$

$$R_f' = \frac{\Delta p_{Fe}}{I_0^2} \approx \frac{\Delta p_0}{I_0^2} = \frac{5000}{10.1^2} \approx 49.01(\Omega)$$

$$X_f' = \sqrt{Z_f'^2 - R_f'^2} = \sqrt{623.76^2 - 49.01^2} \approx 621.83(\Omega)$$

折算到高压侧的励磁参数为

$$Z_f = k^2 Z_f' = 9.52^2 \times 623.76 \approx 56531.6(\Omega)$$

$$R_f = k^2 R_f' = 9.52^2 \times 49.01 \approx 4441.8(\Omega)$$

$$X_f = k^2 X_f' = 9.52^2 \times 621.83 \approx 56356.7(\Omega)$$

由短路试验数据，计算高压侧室温下的短路参数

$$Z_{sh} = \frac{U_{sh}}{I_{sh}} = \frac{3240}{16.67} \approx 194.36(\Omega)$$

$$R_{sh} = \frac{\Delta p_{Cu}}{I_{sh}^2} \approx \frac{\Delta p_{sh}}{I_{1N}^2} = \frac{14000}{16.67^2} \approx 50.38(\Omega)$$

$$X_{sh} = \sqrt{Z_{sh}^2 - R_{sh}^2} = \sqrt{194.36^2 - 50.38^2} \approx 187.72(\Omega)$$

换算到基准工作温度 75°C 时的数值

$$R_{sh75^\circ\text{C}} = \frac{234.5 + 75}{234.5 + \theta} R_{sh} = \frac{234.5 + 75}{234.5 + 25} \times 50.38 \approx 60.1(\Omega)$$

$$Z_{\text{sh}75^{\circ}\text{C}} = \sqrt{R_{\text{sh}75^{\circ}\text{C}}^2 + X_{\text{sh}}^2} = \sqrt{60.1^2 + 187.72^2} \approx 197.1(\Omega)$$

额定短路损耗为

$$\Delta p_{\text{sh}75^{\circ}\text{C}} = I_{\text{IN}}^2 R_{\text{sh}75^{\circ}\text{C}} = 16.67^2 \times 60.1 = 16701.1(\text{W})$$

短路电压（阻抗电压）为

$$U_{\text{sh}75^{\circ}\text{C}} = I_{\text{IN}} \times Z_{\text{sh}75^{\circ}\text{C}} = 16.67 \times 197.1 \approx 3285.66(\text{V})$$

$$u_{\text{sh}} = \frac{U_{\text{sh}75^{\circ}\text{C}}}{U_{\text{IN}}} \times 100\% = \frac{3285.66}{60000} \times 100\% \approx 5.48\%$$

(2) 满载（ $\beta = 1$ ）及 $\cos \varphi_2 = 0.8$ （滞后）时

$$\begin{aligned} \Delta U\% &= \beta \frac{I_{\text{IN}}}{U_{\text{IN}}} (R_{\text{sh}75^{\circ}\text{C}} \cos \varphi_2 + X_{\text{sh}} \sin \varphi_2) \times 100\% \\ &= \frac{16.67}{60000} \times (60.1 \times 0.8 + 187.72 \times 0.6) \times 100\% \\ &\approx 4.47\% \end{aligned}$$

$$U_2 = (1 - \Delta U) U_{2\text{N}} = (1 - 4.47\%) \times 6.3 \approx 6.02(\text{kV})$$

$$\begin{aligned} \eta &= (1 - \frac{\Delta p_0 + \beta^2 \Delta p_{\text{sh}75^{\circ}\text{C}}}{\beta S_{\text{N}} \cos \varphi_2 + \Delta p_0 + \beta^2 \Delta p_{\text{sh}75^{\circ}\text{C}}}) \times 100\% \\ &= (1 - \frac{5000 + 16701.1}{1000 \times 10^3 \times 0.8 + 5000 + 16701.1}) \times 100\% \approx 97.4\% \end{aligned}$$

$$(3) \text{ 当 } \beta = \beta_{\text{m}} = \sqrt{\frac{\Delta p_0}{\Delta p_{\text{sh}75^{\circ}\text{C}}}} = \sqrt{\frac{5000}{16701.1}} \approx 0.55 \text{ 时}$$

$$\begin{aligned} \eta &= \eta_{\text{max}} = (1 - \frac{2\Delta p_0}{\beta S_{\text{N}} \cos \varphi_2 + 2\Delta p_0}) \times 100\% \\ &= (1 - \frac{2 \times 5000}{0.55 \times 1000 \times 10^3 \times 0.8 + 2 \times 5000}) \times 100\% \approx 97.8\% \end{aligned}$$

5-14 有一三相铝线变压器，已知 $S_{\text{N}} = 750\text{kV} \cdot \text{A}$ ， $U_{\text{IN}} / U_{2\text{N}} = 10000\text{V} / 400\text{V}$ ，Yy0 联结，空载及短路试验数（20℃）如下：

试验名称	电压/V	电流/A	功率/W	电源加在
空载	400	60	3800	低压侧
短路	440	43.3	10900	高压侧

试计算：

- (1) 归算到高压侧的参数；
- (2) 满载及 $\cos \varphi_2 = 0.8$ （滞后）时的电压调整率 $\Delta U\%$ 、电压 U_2 及效率 η ；
- (3) 最大效率 η_{\max} 。

解：

- (1) 归算到高压侧的参数

$$I_{1N} / I_{2N} = 43.3A / 1082.6A$$

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

由空载试验数据，先求低压侧的励磁参数

$$Z_f' \approx Z_0 = \frac{U_2}{I_0} = \frac{400}{\sqrt{3} \times 60} \approx 3.85(\Omega)$$

$$R_f' = \frac{\Delta p_{Fe}}{I_0^2} \approx \frac{\Delta p_0}{I_0^2} = \frac{3800}{3 \times 60^2} \approx 0.35(\Omega)$$

$$X_f' = \sqrt{Z_f'^2 - R_f'^2} = \sqrt{3.85^2 - 0.35^2} \approx 3.83(\Omega)$$

折算到高压侧的励磁参数为

$$Z_f = k^2 Z_f' = 25^2 \times 3.85 = 2406.25(\Omega)$$

$$R_f = k^2 R_f' = 25^2 \times 0.35 = 218.75(\Omega)$$

$$X_f = k^2 X_f' = 25^2 \times 3.83 = 2393.75(\Omega)$$

由短路试验数据，计算高压侧室温下的短路参数

$$Z_{sh} = \frac{U_{sh}}{I_{sh}} = \frac{440}{\sqrt{3} \times 43.3} \approx 5.87(\Omega)$$

$$R_{sh} = \frac{\Delta p_{Cu}}{I_{sh}^2} \approx \frac{\Delta p_{sh}}{I_{1N}^2} = \frac{10900}{3 \times 43.3^2} \approx 1.94(\Omega)$$

$$X_{sh} = \sqrt{Z_{sh}^2 - R_{sh}^2} = \sqrt{5.87^2 - 1.94^2} \approx 5.54(\Omega)$$

换算到基准工作温度 75°C 时的数值

$$R_{sh75^\circ\text{C}} = \frac{228 + 75}{228 + \theta} R_{sh} = \frac{228 + 75}{228 + 20} \times 1.94 \approx 2.37(\Omega)$$

$$Z_{\text{sh}75^{\circ}\text{C}} = \sqrt{R_{\text{sh}75^{\circ}\text{C}}^2 + X_{\text{sh}}^2} = \sqrt{2.37^2 + 5.54^2} \approx 6.03(\Omega)$$

额定短路损耗为

$$\Delta p_{\text{sh}75^{\circ}\text{C}} = 3I_{1\text{N}}^2 R_{\text{sh}75^{\circ}\text{C}} = 3 \times 43.3^2 \times 2.37 = 13330.5(\text{W})$$

短路电压（阻抗电压）为

$$U_{\text{sh}75^{\circ}\text{C}} = I_{1\text{N}} \times Z_{\text{sh}75^{\circ}\text{C}} = 43.3 \times 6.03 \approx 261.1(\text{V})$$

$$u_{\text{sh}} = \frac{U_{\text{sh}75^{\circ}\text{C}}}{U_{1\text{N}}} \times 100\% = \frac{261.1}{10000/\sqrt{3}} \times 100\% \approx 4.52\%$$

(2) 满载（ $\beta=1$ ）及 $\cos \varphi_2 = 0.8$ （滞后）时

$$\begin{aligned} \Delta U\% &= \beta \frac{I_{1\text{N}}}{U_{1\text{N}}} (R_{\text{sh}75^{\circ}\text{C}} \cos \varphi_2 + X_{\text{sh}} \sin \varphi_2) \times 100\% \\ &= \frac{43.3}{10000/\sqrt{3}} \times (2.37 \times 0.8 + 5.54 \times 0.6) \times 100\% \\ &\approx 3.91\% \end{aligned}$$

$$U_2 = (1 - \Delta U) U_{2\text{N}} = (1 - 3.91\%) \times 400 \approx 384.4(\text{V})$$

$$\begin{aligned} \eta &= (1 - \frac{\Delta p_0 + \beta^2 \Delta p_{\text{sh}75^{\circ}\text{C}}}{\beta S_{\text{N}} \cos \varphi_2 + \Delta p_0 + \beta^2 \Delta p_{\text{sh}75^{\circ}\text{C}}}) \times 100\% \\ &= (1 - \frac{3800 + 13330.5}{750 \times 10^3 \times 0.8 + 3800 + 13330.5}) \times 100\% \approx 97.2\% \end{aligned}$$

$$(3) \text{ 当 } \beta = \beta_{\text{m}} = \sqrt{\frac{\Delta p_0}{\Delta p_{\text{sh}75^{\circ}\text{C}}}} = \sqrt{\frac{3800}{13330.5}} \approx 0.53 \text{ 时}$$

$$\begin{aligned} \eta &= \eta_{\text{max}} = (1 - \frac{2\Delta p_0}{\beta S_{\text{N}} \cos \varphi_2 + 2\Delta p_0}) \times 100\% \\ &= (1 - \frac{2 \times 3800}{0.53 \times 750 \times 10^3 \times 0.8 + 2 \times 3800}) \times 100\% \approx 97.7\% \end{aligned}$$

第六章 交流电机的旋转磁场理论

6-1 电角度的含义是什么？它与机械角度之间的关系如何？

答：

电机每对极在定子内圆上所占的角度 $360^\circ/n_p$ 指的是实际的空间几何角度，这个角度被称为机械角度。在四极及以上极数的电机中常常把一对极所占的 360° 定义为电角度，这是因为绕组中感应电动势变化一个周期为 360° 。对于两极电机，其定子内圆所占电角度和机械角度相等，均为 360° ；而 n_p 对极电机，其定子内圆全部电角度为 $360^\circ \cdot n_p$ ，但机械角度却仍为 360° 。所以，二者存在以下关系：

$$\text{电角度} = \text{机械角度} \times \text{极对数}$$

6-2 单相绕组的磁动势具有什么性质？它的振幅是如何计算的？

答：

1) 单相绕组的磁动势是一种在空间位置固定、幅值随时间变化的脉振磁动势，可分为基波磁动势及高次谐波磁动势。

2) 基波磁动势幅值的位置与绕组的轴线相重合，基波及高次谐波磁动势分量的幅值在时间上都以绕组中电流变化的频率脉振。

3) 单相绕组脉振磁动势中基波磁动势的幅值为 $F_{m1} = 0.9 \frac{Nk_{w1}I}{n_p}$ ， ν 次谐波磁动势幅值 $F_{m\nu} = 0.9 \frac{Nk_{w\nu}I}{\nu n_p}$ ，谐波次数 ν 越高，其幅值就越小。

4) 绕组采取分布式和适当短距的措施可以减少谐波成分，使磁动势的波形近似正弦波。

6-3 从物理意义上解释为什么三相交流绕组产生的磁动势是旋转的？

答：

交流电机定、转子气隙中旋转磁场的产生有两个条件：① 三相绕组对称：互差 120° 空间电角度；② 三相电源对称：互差 120° 时间电角度。当三相交流绕组中通入三相电流时，交流绕组各自产生沿绕组轴向方向的脉振磁场，三相脉振磁场合成的结果就是气隙磁场。该气隙合成磁场的幅值保持不变，在时间上将按照 A-B-C 的相序移动。三相脉振磁场之间相差 120° ，交替起来就形成了气隙中的旋转磁场。

6-4 三相绕组接在三相电源上，如果有一相断路，则绕组所产生的磁动势具有怎样的性质？

答:

如果有一相断电,则只有两相绕组电流产生磁动势,空间相差 120° 电角度的两相脉振磁动势的合成无法满足对称条件,其合成磁动势应该是一个椭圆形的旋转磁场。

- 6-5 如果在三相对称绕组中通入时间上同相位的电流,则绕组所产生的磁动势具有怎样的性质?

答:

因为单相绕组产生的是沿轴向方向的脉振磁动势,如果在三相对称绕组中通入时间上同相位的电流,所产生的三相脉振磁动势幅值的变化就完全相同,其合成磁动势就为零,这种情况就如同Y形连接三相对称电路的中线电流为零。

第七章 异步电机原理

- 7-1 为什么异步电动机又称为感应电动机?

答:

异步电动机定子绕组接三相交流电源后,三相对称的定子电流便在气隙中产生圆形旋转磁场。该旋转磁场在转子绕组中产生感应电动势和电流,三相对称的转子电流也在气隙中产生圆形旋转磁场。定、转子磁场相互作用而产生电磁转矩 T_e ,从而带动转子转动。可见,异步电动机是由电磁感应而产生电磁转矩的,所以又称为感应电动机。

- 7-2 为什么说异步电机的工作原理与变压器的工作原理类似?试分析两者的异同点。

答:

异步电机和变压器在功能、外型特征和运行方式上很不相同,但它们在工作原理上有很大的相似性,都是通过电磁感应原理来工作的。异步电机的定子相当于变压器的一次侧,转子相当于变压器的二次侧,两者的基本方程式、等效电路和相量图都非常相似。尤其是当异步电机堵转时,转子上的感应电压与定子电压之间的关系,与变压器的情况完全一样。因此,异步电机又被形象地称为“旋转变压器”。

两者的不同之处主要表现在，同容量的异步电机和变压器相比，变压器的空载电流较小。空载电流是用于产生励磁磁场或主磁通的，变压器的磁通回路没有像异步电机定、转子间的气隙，完全由铁磁材料组成的主磁路磁阻很小，产生一定磁通所需的电流就很小。这样，变压器可以长期空载运行。

7-3 试说明异步电机频率折合和绕组折合的意义、折合条件及折合方法。

答：

转子绕组折合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、匝数和绕组因数都相同的等效绕组替换实际转子绕组，折合前后转子绕组的磁动势和各种功率及损耗不变，即从定子方看转子，一切未变。折合的方法就是将转子方的电压或电动势乘以异步电机的电压比 k_e ，将转子方的电流除以异步电机的电流比 k_i ，将转子方的阻抗乘以 $k_e k_i$ 。

频率折合就是用静止的转子替换旋转的转子，折合条件也是磁动势和各种功率及损耗不变。为此，只要将转子电阻 R_r' 用电阻 $\frac{1}{s} R_r'$ 来代替，或者说在转子回路串入一个实际上并不存在的虚拟电阻 $\frac{1-s}{s} R_r'$ 。

7-4 异步电动机的 T 形等效电路能否像变压器的 T 形等效电路那样进一步地简化？

答：

由于异步电动机的定、转子之间存在气隙，气隙的磁阻较大，产生一定的主磁通所需要的励磁电流就较大，也就是 T 形等效电路中的励磁电抗不会很大，所以不能像变压器的 T 型等效电路那样进一步地简化。

7-5 异步电动机在空载运行、额定负载运行及堵转三种情况下的等效电路有什么不同？当定子外加电压一定时，三种情况下的定、转子感应电动势大小、转子电流及转子功率因数角、定子电流及定子功率因数角有什么不同？

答：

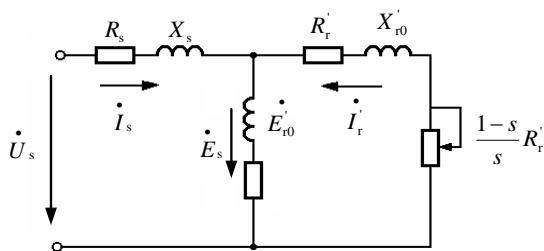


图7-13 异步电动机的T形等效电路

异步电动机在空载运行时，转子转速 n 接近同步转速 n_1 ，转差率 $s=0$ ，由异步电动机的T型等效电路可知，虚拟电阻 $\frac{1-s}{s}R_r'$ 为无穷大，转子电流为零，没有机械功输出。此时，定子电流（空载电流）也很小，定子感应电动势较大，定子功率因数较小。

异步电动机在堵转运行时，转子转速 $n=0$ ，转差率 $s=1$ ，虚拟电阻 $\frac{1-s}{s}R_r'$ 为零，转子电流很大，有可能烧毁电机。此时，定子电流较大，定子感应电动势较小，定子功率因数较大。

异步电动机额定负载运行的情况介于上述两者之间。

7-6 从物理概念上解释为什么异步电动机的功率因数总是滞后的？

答：

异步电动机的定子绕组由交流电源供电，而转子绕组电流由电磁感应作用而产生，这样建立气隙磁场的无功电流一定是由交流电源来提供，所以其功率因数总是滞后的。

7-7 从物理概念上解释为什么异步电动机的电磁转矩与外加电源电压的二次方成正比？

答：

电机的电磁转矩是定、转子磁场相互作用的结果，也是定、转子电流相互作用的结果。异步电动机的定子绕组由交流电源供电，定子电流正比于定子电压；而转子电流由定子电流所建立的磁场感应产生，可以认为转子电流也正比于定子电压，所以异步电动机的电磁转矩与外加电源电压的二次方成正比。

7-8 为什么异步电动机不宜在空载或轻载下长期运行？

答：

如果异步电动机空载或轻载运行，转子转速 n 就比较接近同步转速 n_1 ，转差率 s 很小，由等效电路可见，虚拟电阻 $\frac{1-s}{s}R_r'$ 将很大，定、转子电流都很小，定子感应电动势较大，定子

功率因数较小。这样，电动机的运行效率和功率因数都很低，电能使用效率低。所以，异步电动机不宜在空载或轻载下长期运行。

- 7-9 异步电动机运行时，若负载转矩不变而电源电压下降 10%，对电机的同步转速 n_1 、转子转速 n 、主磁通 Φ_m 、转子电流 I_r 、转子回路功率因数 $\cos \varphi_2$ 、定子电流 I_s 等有何影响？如果负载转矩为额定负载转矩，长期低压运行，会有何后果？

答：

首先，电机的同步转速 n_1 保持不变，主磁通 Φ_m 将减小。其次，根据电磁转矩的计算公式 $T_e = C_T \Phi_m I_r \cos \varphi_2$ ，因为负载转矩不变，转子转速 n 必然下降，以增大定、转子间的转差，使转子电流 I_r 增大，随之定子电流 I_s 也增大，以产生足够的电磁转矩来平衡负载转矩。最后，转子转速 n 的减小，使转子电流频率增大，转子回路的漏电抗增大，转子回路功率因数 $\cos \varphi_2$ 将减小。

由上分析可知，如果负载转矩为额定负载转矩，长期低压运行，异步电动机的功率因数很低，电能使用效率低，并且定、转子电流都偏大，有可能烧毁电机。

- 7-10 绕线转子异步电动机转子串电阻改善了功率因数，使起动转矩增加；笼型转子异步电动机起动时转矩小，如果把电阻串在定子绕组里以改善功率因数，起动转矩能否提高？为什么？

答：

把电阻串在定子绕组里虽然可以改善功率因数，但也起到了分压的作用，实际加在定子绕组的电压将减小，起动转矩不能提高。

- 7-11 一台额定频率为 50Hz 的三相异步电机，当定子绕组加额定电压，转子绕组开路时的每相感应电动势为 100V。设电机额定运行时的转速 $n=960\text{r/min}$ ，转子转向与旋转磁场相同，问：

- (1) 此时电机运行在什么状态？
- (2) 此时转子每相电动势 E_r 为多少？（忽略定子漏阻抗压降影响）
- (3) 转子参数 $R_r = 0.1\Omega$ ， $X_r = 0.5\Omega$ ，试求额定运行时转子电流 I_r 是多少？

解:

(1) 转差率 $s = \frac{1000 - 960}{1000} = 0.04$, $0 < s < 1$, 此时电机运行在正向电动状态。

(2) 此时转子每相电动势 $E_r = 100\text{V}$ 。

(3) 额定运行时转子电流

$$I_r = \frac{E_r}{\sqrt{(R_r/s)^2 + X_r^2}} = \frac{100}{\sqrt{(0.1/0.04)^2 + 0.5^2}} \approx 39.2 \text{ (A)}$$

7-12 一台三相异步电动机的数据为: $U_N = 380\text{V}$, $f_N = 50\text{Hz}$, $n_N = 1426\text{r/min}$, 定子绕组为 Δ 接法。已知该三相异步电动机一相的参数为: $R_s = 2.865\Omega$, $X_s = 7.71\Omega$, $R'_r = 2.82\Omega$, $X'_{r0} = 11.75\Omega$, $X_f = 202\Omega$, R_f 忽略不计。试求:

(1) 额定负载时的转差率和转子电流的频率。

(2) 作 T 型等效电路, 并计算额定负载时的定子电流 I_s 、转子电流折算值 I'_r 、输入功率 P_1 和功率因数 $\cos\varphi_1$ 。

解:

(1) 额定负载时的转差率

$$s = \frac{n_1 - n_N}{n_1} = \frac{1500 - 1426}{1500} \approx 0.0493$$

转子电流的频率

$$f_2 = sf_1 = 0.0493 \times 50 = 2.465 \text{ (Hz)}$$

(2) T 型等效电路为

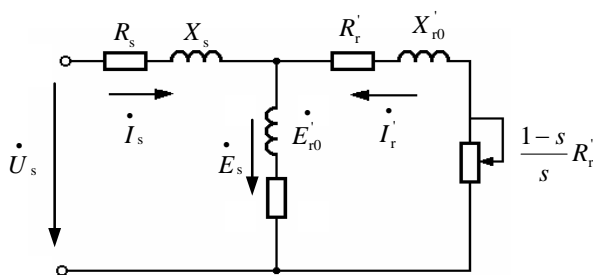


图7-13 异步电动机的T形等效电路

额定负载时的阻抗计算:

$$Z'_r = \frac{R'_r}{s} + jX'_{r0} = \frac{2.82}{0.0493} + j11.75 = 57.2 + j11.75 = 58.4 \angle 11.6^\circ$$

$$\begin{aligned} X_f \parallel Z_r' &= \frac{X_f \cdot Z_r'}{X_f + Z_r'} = \frac{j202 \times 58.4 \angle 11.6^\circ}{j202 + 57.2 + j11.25} = \frac{11796.8 \angle 101.6^\circ}{57.2 + j213.25} \\ &= \frac{11796.8 \angle 101.6^\circ}{221.27 \angle 75^\circ} = 53.31 \angle 26.6^\circ = 47.67 + j23.86 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z &= Z_s + X_f \parallel Z_r' = R_s + jX_s + X_f \parallel Z_r' \\ &= 2.865 + j7.71 + 47.67 + j23.86 \\ &= 50.535 + j31.57 = 59.59 \angle 31.99^\circ \end{aligned}$$

定子相电流

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1}{Z} = \frac{380}{59.59 \angle 31.99^\circ} = 6.38 \angle -31.99^\circ$$

定子线电流

$$\sqrt{3}I_1 = \sqrt{3} \times 6.38 \approx 11.04 \text{ (A)}$$

功率因数

$$\cos \varphi_1 = \cos(31.99^\circ) \approx 0.848 \text{ (滞后)}$$

输入功率

$$P_1 = \sqrt{3}U_1 I_1 \cos \varphi_1 = \sqrt{3} \times 380 \times 11.04 \times 0.848 = 6162.8 \text{ (W)}$$

感应电动势

$$\begin{aligned} \dot{E}_1 &= \dot{U}_1 - \dot{I}_1 Z_s = 380 - 6.38 \angle -31.99^\circ \cdot 8.225 \angle 69.62^\circ \\ &= 380 - 52.45 \angle 37.63^\circ = 380 - 41.54 - j32.02 \\ &= 338.46 - j32.02 = 339.97 \angle -5.4^\circ \end{aligned}$$

转子电流折算值

$$\dot{I}_2' = \frac{\dot{E}_1}{Z_r'} = \frac{339.97 \angle -5.4^\circ}{58.4 \angle 11.6^\circ} = 5.82 \angle -17.0^\circ \text{ (A)}$$

7-13 一台三相4极异步电动机，其额定功率 $P_N = 5.5 \text{ kW}$ ，额定频率 $f_N = 50 \text{ Hz}$ 。在额定负载运行情况下，由电源输入的功率为 6.32 kW ，定子铜耗为 341 W ，转子铜耗为 237.5 W ，铁损耗为 167.5 W ，机械损耗为 45 W 。

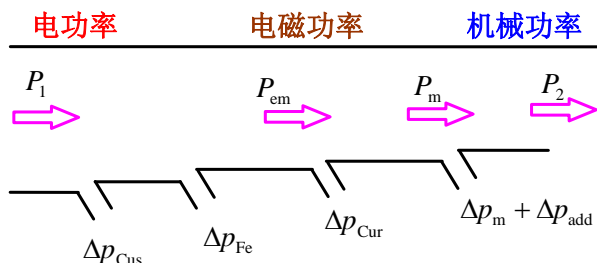
(1) 画出功率流程图，标明各功率及损耗。

(2) 在额定运行的情况下，求电动机的效率、转差率、转速，电磁转矩以及转轴上的

输出转矩各是多少？

解：

(1) 功率流程图如下：



$$P_1 = 6.32\text{kW}, \quad P_2 = 5.5\text{kW}$$

$$\Delta p_{Cus} = 341\text{W}, \quad \Delta p_{Fe} = 167.5\text{W}$$

$$\Delta p_{Cur} = 237.5\text{W}, \quad \Delta p_m = 45\text{W}, \quad \Delta p_{add} = 29\text{W}$$

(2) 效率

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \frac{5.5}{6.32} \times 100\% \approx 87.03\%$$

转差率

$$P_{em} = P_1 - \Delta p_{Cus} - \Delta p_{Fe} = 6320 - 341 - 167.5 = 5811.5(\text{W})$$

$$s = \frac{\Delta p_{Cur}}{P_{em}} = \frac{237.5}{5811.5} \approx 0.0409$$

转速

$$n_1 = \frac{60f_N}{n_p} = \frac{60 \times 50}{2} = 1500(\text{r/min})$$

$$n = (1-s)n_1 = (1-0.0409) \times 1500 = 1438.65(\text{r/min})$$

电磁转矩

$$T_e = \frac{P_{em}}{\omega_1} = \frac{P_{em}}{2\pi n_1 / 60} = \frac{5811.5}{2\pi \times 1500 / 60} = 37.0(\text{N} \cdot \text{m})$$

输出转矩

$$T_2 = \frac{P_2}{\omega} = \frac{P_2}{2\pi n / 60} = \frac{5500}{2\pi \times 1438.65 / 60} = 36.5(\text{N} \cdot \text{m})$$

7-14 一台三相 6 极异步电动机，其额定数据为： $P_N = 28\text{kW}$ ， $U_N = 380\text{V}$ （Y 形接法）， $n_N = 950\text{r/min}$ ， $f_N = 50\text{Hz}$ 。额定负载时定子边的功率因数 $\cos \varphi_{1N} = 0.88$ ，定子铜耗、铁耗共为 2.2kW ，机械损耗为 1.1kW ，忽略附加损耗。计算在额定负载时：（1）转差率；（2）转子铜耗；（3）效率；（4）定子电流；（5）转子电流的频率。

解：

（1）转差率

$$n_1 = \frac{60f_N}{n_p} = \frac{60 \times 50}{3} = 1000(\text{r/min})$$

$$s = \frac{n_1 - n_N}{n_1} = \frac{1000 - 950}{1000} = 0.05$$

（2）转子铜耗

由 $P_N = P_{\text{em}} - \Delta p_{\text{Cur}} - \Delta p_{\text{m}}$ ， $\Delta p_{\text{Cur}} = sP_{\text{em}}$ ，可得电磁功率和转子铜耗

$$P_{\text{em}} = \frac{P_N + \Delta p_{\text{m}}}{1 - s} = \frac{28 + 1.1}{1 - 0.05} \approx 30.63(\text{kW})$$

$$\Delta p_{\text{Cur}} = sP_{\text{em}} = 0.05 \times 30.63 \approx 1.53(\text{kW})$$

（3）效率

$$P_1 = P_{\text{em}} + \Delta p_{\text{Cus}} + \Delta p_{\text{Fe}} = 30.63 + 2.2 = 32.83(\text{kW})$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \frac{28}{32.83} \times 100\% \approx 85.3\%$$

（4）由 $P_1 = \sqrt{3}U_N I_N \cos \varphi_{1N}$ ，得定子电流（相电流，Y 接法）

$$I_N = \frac{P_1}{\sqrt{3}U_N \cos \varphi_{1N}} = \frac{32830}{\sqrt{3} \times 380 \times 0.88} \approx 56.7(\text{A})$$

（5）转子电流的频率

$$f_2 = sf_N = 0.05 \times 50 = 2.5(\text{Hz})$$

第八章 同步电机原理

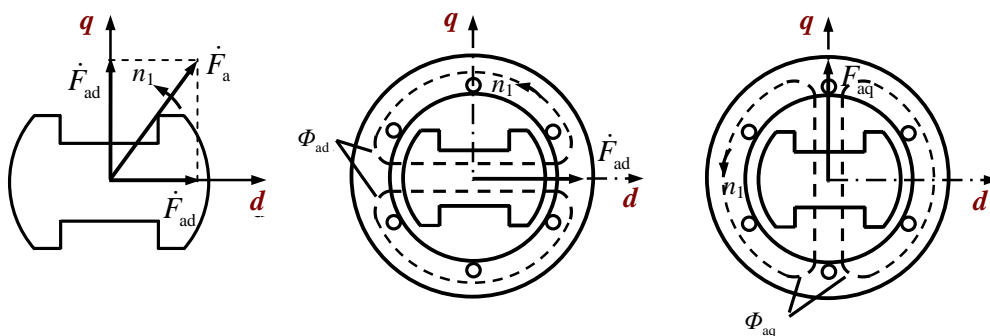
8-1 异步电动机与同步电动机在电磁转矩的形成上有什么相同之处？在凸极同步电动机中

为什么要把电枢反应磁动势分成直轴和交轴两个分量？

答：

相同之处在于，两者的电磁转矩都是定、转子磁场相互作用的结果，且稳态运行时定子旋转磁场与转子旋转磁场在空间保持相对静止或同步。

在凸极同步电动机中，定、转子间的气隙不均匀，但气隙磁阻分别沿直轴方向和交轴方向对称。对于电枢反应磁动势 \dot{F}_a 在电机主磁路中产生的磁通，可视为直轴电枢磁动势 \dot{F}_{ad} 与交轴电枢磁动势 \dot{F}_{aq} 在电机主磁路中分别产生磁通的叠加。因为 \dot{F}_{ad} 总是在直轴方向， \dot{F}_{aq} 总是在交轴方向，尽管气隙不均匀，但对直轴或交轴来说，都分别为对称磁路，这就给分析带来了方便。所以，在凸极同步电动机中要把电枢反应磁动势分成直轴和交轴两个分量。



8-2 同步电动机欠励运行时，从电网吸收什么性质的无功功率？过励时，从电网吸收什么性质的无功功率？

答：

同步电动机欠励运行时，励磁电流比正常励磁电流小，在这种情况下同步电动机除了从电网吸收有功功率以外，还要从电网吸收滞后的无功功率。这时同步电动机就像一个电阻电感性负载，需要电网提供滞后的无功功率，加重了电网的负担，所以同步电动机一般很少采用欠励运行方式。

同步电动机过励运行时，励磁电流比正常励磁电流大，在这种情况下同步电动机除了从电网吸收有功功率以外，还要从电网吸收超前的无功功率，相当于对电网输出滞后的无功功率。这时同步电动机就像一个电阻电容性负载，对改善电网的功率因数非常有益。

8-3 同步电动机带额定负载时 $\cos \varphi_1 = 1$ ，若保持励磁电流不变，而负载降为零时，功率因数是否会改变？

答：

当负载降为零，也就是空载运行时，同步电动机的有功功率降到最小（只维持自身的空载转矩），而电机内部感性无功并没有什么变化，这样有功减小，无功不变 功率因数会变小。

8-4 一台凸极同步电动机转子若不加励磁电流，它的功角特性和矩角特性是什么样的？

答：

根据凸极同步电动机电磁功率和电磁转矩的计算公式

$$P_{\text{em}} = 3 \frac{E_0 U_s}{X_d} \sin \theta + \frac{3U_s^2 (X_d - X_q)}{2X_d X_q} \sin 2\theta$$

$$T_e = 3 \frac{E_0 U_s}{\omega_1 X_d} \sin \theta + \frac{3U_s^2 (X_d - X_q)}{2\omega_1 X_d X_q} \sin 2\theta$$

若转子不加励磁电流，则感应电动势 $E_0 = 0$ ，电磁功率和电磁转矩为

$$P_{\text{em}} = \frac{3U_s^2 (X_d - X_q)}{2X_d X_q} \sin 2\theta$$

$$T_e = \frac{3U_s^2 (X_d - X_q)}{2\omega_1 X_d X_q} \sin 2\theta$$

相应的功角特性和矩角特性如下图的曲线 2 所示。

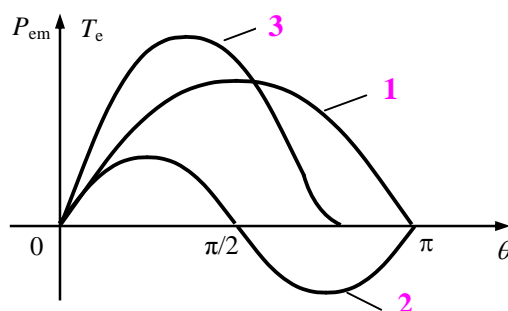


图 8-10 凸极同步电动机的功角特性

8-5 一台拖动恒转矩负载运行的同步电动机，忽略定子电阻，当功率因数为超前性的情况下，若减小励磁电流，电枢电流将怎样变化？

答：

根据同步电动机改变励磁电流时的相量图（图 8-15），在功率因数超前的情况下，若减小励磁电流，电枢电流将减小。

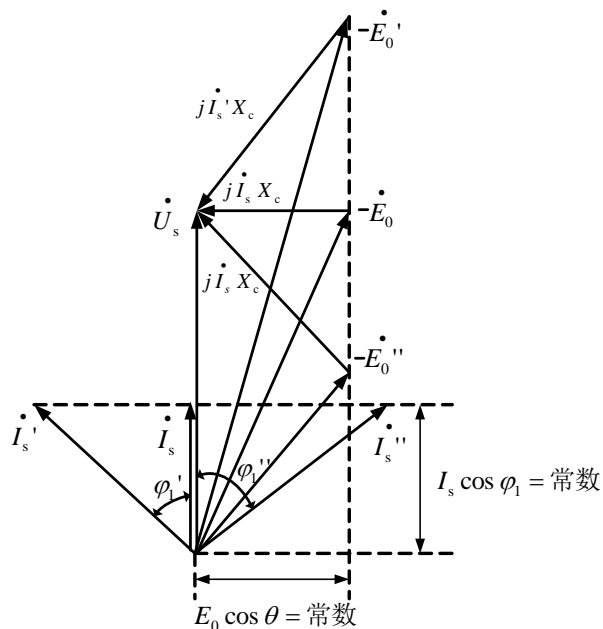
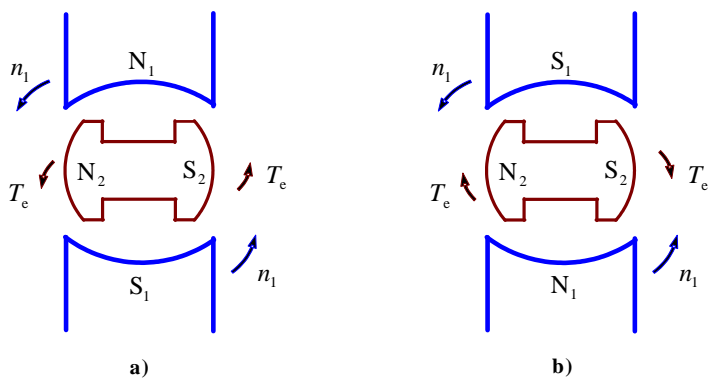


图8-15 同步电动机仅改变励磁电流时的相量图

8-6 同步电动机为什么没有起动转矩？一般如何使它起动？起动时应注意什么问题？

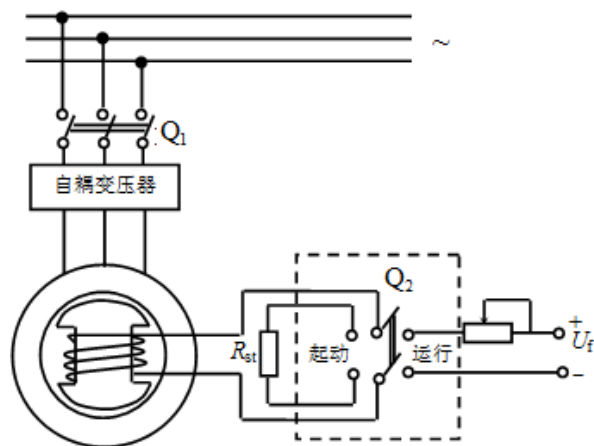
答：

同步电动机在电源频率恒定时，其转速是不能调节的，电动机能稳定运行要求其平均电磁转矩必须不为零。而起动时，转速从零到同步转速 n_1 ，这个过程中转速是变化的，产生的是脉动电磁转矩，转子受到一个忽正忽负的转矩作用（如下图所示），平均电磁转矩等于零，所以同步电动机没有起动转矩。



同步电动机的起动问题

通常在同步电动机转子磁极上装有类似异步电动机转子笼型绕组的起动绕组，用于异步起动。需要注意的是，为防止励磁绕组出现高电压和大电流，起动时须在励磁绕组中外串一个较大阻值的电阻，并闭合励磁绕组，待转速接近同步转速 n_1 时，再切除串入的大电阻，通入正常的励磁电流。



同步电动机异步起动原理图

8-7 试从起动与运行诸方面对异步电动机与同步电动机的优缺点作综合性比较。

答：

1) 基本结构：同步电动机和异步电动机的定子绕组是相同的，主要区别在于转子结构。同步电动机的转子上有直流励磁绕组，需要外加励磁电源，通过滑环引入电流；而异步电动机的转子是短路绕组，靠电磁感应产生电流。

2) 工作原理：异步电动机定子通入交流电，产生旋转磁场，而转子受感应而产生磁场，两磁场相互作用，使转子跟着定子旋转磁场而转动。由于转子比定子旋转磁场慢，有个转差，不同步，所以称为异步电机；而同步电动机转子是人为加入直流电形成恒定磁场，这样转子就跟着定子旋转磁场一起旋转并保持同步，所以称为同步电机。

3) 起动能力：异步电动机定子接三相交流电后可以直接起动；而同步电动机转子磁极上必须装有专门的起动绕组，并且励磁绕组必须经一大电阻短接后，才可以正常起动。

4) 运行特性：同步电动机可以通过调节励磁电流来灵活控制功率因数，且效率较高，多用于工矿大型设备；而异步电动机的功率因数不可调，且功率因数和效率均偏低，因此在一些大的工厂，异步电动机应用较多时，可附加一台同步电机做调相机用，用来调节工厂与电网接口处的功率因数。

5) 使用维护：同步电动机因为有励磁绕组和滑环，维护工作量大，造价也较高；而异步电动机结构简单，成本低，且基本上可以免维护，易于安装、使用和维护。

8-8 已知一台隐极式同步电动机的数据为：额定电压 $U_N = 400\text{V}$ ，额定电流 $I_N = 23\text{A}$ ，额定功率因数 $\cos\varphi_N = 0.8$ （超前），定子绕组为 Y 联结，同步电抗 $X_c = 10.4\Omega$ ，忽略定子电阻。当这台电机在额定运行时，求：

- (1) 空载电动势 E_0 ；
- (2) 功率角 θ_N ；
- (3) 电磁功率 P_{em} ；
- (4) 过载倍数 λ 。

解：

$$\cos\varphi_N = 0.8 \Rightarrow \varphi_N = 36.9^\circ$$

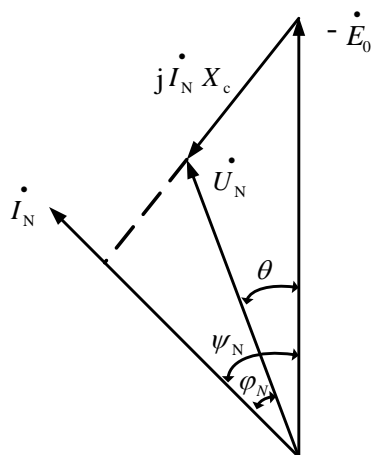


图8-14 相量图

由上图所示：

- (1) 空载电动势

$$\begin{aligned} E_0 &= \sqrt{(U_N \sin\varphi_N + I_N X_c)^2 + (U_N \cos\varphi_N)^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{400}{\sqrt{3}} \times \sin 36.9^\circ + 23 \times 10.4\right)^2 + \left(\frac{400}{\sqrt{3}} \times 0.8\right)^2} \\ &\approx 420.5(\text{V}) \end{aligned}$$

- (2) 功率角

$$\begin{aligned} \tan\psi &= \frac{U_N \sin\varphi_N + I_N X_c}{U_N \cos\varphi_N} = 2.04 \Rightarrow \psi = 63.9^\circ \\ \theta_N &= \psi - \varphi_N = 27^\circ \end{aligned}$$

(3) 电磁功率

$$P_{\text{em}} = \frac{3U_N E_0}{X_c} \sin \theta_N = \frac{3 \times \frac{400}{\sqrt{3}} \times 420.5}{10.4} \times \sin 27^\circ = 12.717(\text{kW})$$

(4) 过载倍数

$$\lambda = \frac{1}{\sin \theta_N} = 2.2$$

8-9 一台三相凸极式同步电动机，定子绕组为 Y 联结，额定电压为 380V，直轴同步电抗 $X_d = 6.06\Omega$ ，交轴同步电抗 $X_q = 3.43\Omega$ 。运行时电动势 $E_0 = 250\text{V}$ （相值）， $\theta = 28^\circ$ ，求电磁功率 P_{em} 。

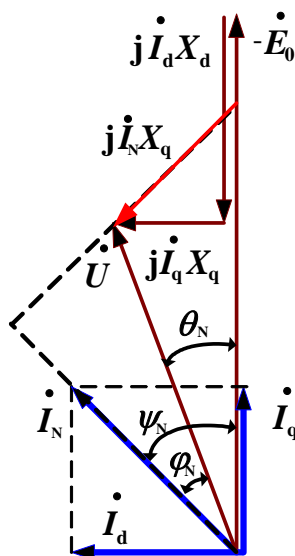
解：

$$\begin{aligned} P_{\text{em}} &= 3 \frac{E_0 U_s}{X_d} \sin \theta + \frac{3U_s^2 (X_d - X_q)}{2X_d X_q} \sin 2\theta \\ &= 3 \times \frac{250 \times 220}{6.06} \sin 28^\circ + \frac{3 \times 220^2 (6.06 - 3.43)}{2 \times 6.06 \times 3.43} \sin(2 \times 28^\circ) \\ &\approx 20.398(\text{kW}) \end{aligned}$$

8-10 一台同步电动机在额定电压下运行且从电网吸收一功率因数为 0.8（超前）的额定电流，该机的同步电抗标么值为 $X_d^* = 1.0$ ， $X_q^* = 0.6$ ，试求空载电动势 E_0 和功率角 θ 。

解：

$$\cos \varphi_N = 0.8 \Rightarrow \varphi_N = 36.9^\circ, \quad \sin \varphi_N = 0.6$$



根据上面所示的相量图，得

$$\psi_N = \arctan \frac{I_N^* X_q^* + U_N^* \sin \varphi_N}{U_N^* \cos \varphi_N} = \arctan \frac{1 \times 0.6 + 1 \times 0.6}{1 \times 0.8} \approx 56.3^\circ$$

功率角

$$\theta = \psi_N - \varphi_N = 56.3^\circ - 36.9^\circ = 19.4^\circ$$

空载电动势（标么值）

$$I_d^* = I_N^* \sin \psi_N = 1 \times \sin 56.3^\circ \approx 0.832$$

$$E_0^* = U_N^* \cos \theta_N + I_d^* X_d^* = 1 \times \cos 19.4^\circ + 0.832 \times 1.0 \approx 1.775$$

8-11 一台三相、Y 联结，400V、50Hz、80kVA、1000r/min 同步电动机，同步电抗的标么值为 $X_d^* = 1.106$ ， $X_q^* = 0.76$ ，忽略定子电阻。外部的负载情况要求该机发出的电磁转矩为 $600\text{N}\cdot\text{m}$ 。试求：

- (1) 当 $U^* = 1.0$ ， $E_0^* = 1.2$ 时的输入电流标么值及功率因数；
- (2) 当 $U^* = 1.0$ ， $E_0^* = 1.4$ 时的输入电流标么值及功率因数；
- (3) 当 $U^* = 1.0$ ， $E_0^* = 0.9$ 时的输入电流标么值及功率因数。

解：

额定电流为

$$I_N = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_N} = \frac{80 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 400} \approx 115.47 \text{ (A)}$$

电磁功率为

$$P_{\text{em}} = T_e \cdot \Omega_1 = T_L \cdot \frac{2\pi n_1}{60} = 600 \times \frac{2\pi \times 1000}{60} = 62800 \text{ (W)}$$

$$P_{\text{em}}^* = \frac{P_{\text{em}}}{S_N} = \frac{62800}{80 \times 10^3} = 0.785$$

- (1) 根据凸极同步电动机的功角特性

$$P_{\text{em}}^* = \frac{E_0^* U^*}{X_d^*} \sin \theta + \frac{1}{2} U^* \left(\frac{1}{X_q^*} - \frac{1}{X_d^*} \right) \sin 2\theta$$

$$0.785 = \frac{1.2 \times 1}{1.106} \sin \theta + \frac{1}{2} \times 1 \times \left(\frac{1}{0.76} - \frac{1}{1.106} \right) \sin 2\theta$$

求得 $\theta = 33.2^\circ$

根据凸极同步电动机的相量图，得输入电流（标么值）

$$I_d^* = \frac{E_0^* - U^* \cos \theta}{X_d^*} = \frac{1.2 - 1 \times \cos 33.2^\circ}{1.106} \approx 0.328$$

$$I_q^* = \frac{U^* \sin \theta}{X_q^*} = \frac{1 \times \sin 33.2^\circ}{0.76} \approx 0.72$$

$$I^* = \sqrt{I_d^{*2} + I_q^{*2}} = \sqrt{0.328^2 + 0.72^2} \approx 0.791$$

功率因数

$$\psi = \arctan \frac{I_d^*}{I_q^*} = \arctan \frac{0.328}{0.72} \approx 24.49^\circ$$

$$\varphi = \psi - \theta = 24.49^\circ - 33.2^\circ = -8.71^\circ$$

$$\cos \varphi = \cos(-8.71^\circ) \approx 0.988 \quad (\text{滞后})$$

(2) 根据凸极同步电动机的功角特性

$$P_{em}^* = \frac{E_0^* U^*}{X_d^*} \sin \theta + \frac{1}{2} U^* \left(\frac{1}{X_q^*} - \frac{1}{X_d^*} \right) \sin 2\theta$$

$$0.785 = \frac{1.4 \times 1}{1.106} \sin \theta + \frac{1}{2} \times 1 \times \left(\frac{1}{0.76} - \frac{1}{1.106} \right) \sin 2\theta$$

求得 $\theta = 28.9^\circ$

根据凸极同步电动机的相量图，得输入电流（标么值）

$$I_d^* = \frac{E_0^* - U^* \cos \theta}{X_d^*} = \frac{1.4 - 1 \times \cos 28.9^\circ}{1.106} \approx 0.474$$

$$I_q^* = \frac{U^* \sin \theta}{X_q^*} = \frac{1 \times \sin 28.9^\circ}{0.76} \approx 0.721$$

$$I^* = \sqrt{I_d^{*2} + I_q^{*2}} = \sqrt{0.474^2 + 0.721^2} \approx 0.863$$

功率因数

$$\psi = \arctan \frac{I_d^*}{I_q^*} = \arctan \frac{0.474}{0.721} \approx 33.32^\circ$$

$$\varphi = \psi - \theta = 33.32^\circ - 28.9^\circ = 4.42^\circ$$

$$\cos \varphi = \cos 4.42^\circ \approx 0.997 \quad (\text{超前})$$

(3) 根据凸极同步电动机的功角特性

$$P_{\text{em}}^* = \frac{E_0^* U^*}{X_d^*} \sin \theta + \frac{1}{2} U^* \left(\frac{1}{X_q^*} - \frac{1}{X_d^*} \right) \sin 2\theta$$

$$0.785 = \frac{0.9 \times 1}{1.106} \sin \theta + \frac{1}{2} \times 1 \times \left(\frac{1}{0.76} - \frac{1}{1.106} \right) \sin 2\theta$$

求得 $\theta = 45.4^\circ$

根据凸极同步电动机的相量图，得输入电流（标么值）

$$I_d^* = \frac{E_0^* - U^* \cos \theta}{X_d^*} = \frac{0.9 - 1 \times \cos 45.4^\circ}{1.106} \approx 0.179$$

$$I_q^* = \frac{U^* \sin \theta}{X_q^*} = \frac{1 \times \sin 45.4^\circ}{0.76} \approx 0.937$$

$$I^* = \sqrt{I_d^{*2} + I_q^{*2}} = \sqrt{0.179^2 + 0.937^2} \approx 0.954$$

功率因数

$$\psi = \arctan \frac{I_d^*}{I_q^*} = \arctan \frac{0.179}{0.937} \approx 10.8^\circ$$

$$\varphi = \psi - \theta = 10.8^\circ - 45.4^\circ = -34.6^\circ$$

$$\cos \varphi = \cos(-34.6^\circ) \approx 0.823 \quad (\text{滞后})$$

8-12 一台接在 $U = U_N$ 大电网上运行的凸极式同步电动机，其标么值参数为 $X_d^* = 0.8$ ，

$X_q^* = 0.5$ ，忽略定子电阻。额定负载时电动机的功率角为 $\theta_N = 25^\circ$ 。试求：

- (1) 额定负载时的空载电动势标么值。
- (2) 在上述空载电动势情况下的过载能力。
- (3) 在负载保持额定的情况下，求该电动机能保持同步运行的最低空载电动势标么值。
- (4) 当转子失磁时，电动机可能输出的最大功率标么值。

解：

(1) 根据凸极同步电动机的矩角特性

$$T_e^* = \frac{E_{0N}^* U_N^*}{X_d^*} \sin \theta_N + \frac{1}{2} U_N^* \left(\frac{1}{X_q^*} - \frac{1}{X_d^*} \right) \sin 2\theta_N$$

$$1 = \frac{E_{0N}^* \times 1}{0.8} \sin 25^\circ + \frac{1}{2} \times 1 \times \left(\frac{1}{0.5} - \frac{1}{0.8} \right) \sin(2 \times 25^\circ)$$

额定负载时的空载电动势标么值为

$$E_{0N}^* = 1.349$$

(2) 在上述空载电动势情况下, 根据矩角特性

$$T_e^* = \frac{1.349 \times 1}{0.8} \sin \theta + \frac{1}{2} \times 1 \times \left(\frac{1}{0.5} - \frac{1}{0.8} \right) \sin 2\theta$$

$$T_e^* = 1.686 \sin \theta + 0.375 \sin 2\theta$$

通过求极值, 可得 $\theta = 70^\circ$ 时, $T_{em}^* = 1.825$, 即此时电动机的过载能力为 $\lambda = 1.825$ 。

(3) 在负载保持额定的情况下, $T_e^* = 1$, 根据矩角特性

$$1 = \frac{E_0^*}{0.8} \sin \theta + 0.375 \sin 2\theta$$

$$E_0^* = \frac{0.8 - 0.3 \sin 2\theta}{\sin \theta}$$

通过求极值, 可得 $\theta = 60^\circ$ 时, $E_{0m}^* = 0.624$, 电动机能保持同步运行的最低空载电动势标么值为 0.624。

(4) 当转子失磁时, 即 $E_0^* = 0$, 根据功角特性

$$P_{em}^* = \frac{1}{2} U_N^* \left(\frac{1}{X_q^*} - \frac{1}{X_d^*} \right) \sin 2\theta$$

显然, 当 $\theta = 45^\circ$ 时, P_{em}^* 取最大值 0.375, 即电动机可能输出的最大功率标么值为 0.375。

第九章 交流电机拖动基础

9-1 异步电动机的最大电磁转矩 T_{em} 的大小与转子电阻 R_r 有无关系?

答:

根据异步电动机的最大电磁转矩 T_{em} 的计算公式,

$$T_{em} = \frac{1}{2} \frac{3n_p U_s^2}{2\pi f_1 \left[R_s + \sqrt{R_s^2 + (X_s + X_{r0}')^2} \right]}$$

可知 T_{em} 的大小与转子电阻 R_r 没有关系。

9-2 已知异步电动机电磁转矩 T_e 与转子电流 I_r 成正比, 为什么异步电动机在额定电压下起动

时，起动电流倍数很大而起动转矩倍数并不大？

答：

普通的异步电动机如不采取任何措施而直接接入电网起动时，往往起动电流 I_{st} 很大，而起动转矩 T_{st} 不足。其原因可以根据下列异步电动机的转矩公式来分析：

$$T_e = C_T \Phi_m I_r \cos \varphi_2$$

$$\text{其中， } I_r = \frac{sE_{r0}}{\sqrt{R_r^2 + (sX_{r0})^2}}, \quad \cos \varphi_2 = \frac{R_r}{\sqrt{R_r^2 + (sX_{r0})^2}}。$$

在起动初始，异步电动机转速为 $n=0$ ，转差率 $s=1$ ，转子电流的频率 $f_2 = sf_1$ ，转子绕组的电动势值 $sE_{r0} = E_{r0}$ ，比正常运行时（ $s=0.01\sim 0.05$ ）的电动势值大 20 倍以上，此时转子电流 I_r 很大，定子电流的负载分量也随之急剧增大，使得定子电流（即起动电流）很大；其次，由于转子频率很高（ $f_2 = sf_1 \approx 50\text{Hz}$ ），转子绕组漏电抗应为 $sX_{r0} = X_{r0} \gg R_r$ ，使得转子的内功率因数 $\cos \varphi_2$ 很小，所以尽管起动时转子电流 I_r 很大，但其有功分量 $I_r \cos \varphi_2$ 并不大，而且，由于起动电流很大，定子绕组的漏阻抗压降增大，使得感应电动势 E_s 和与之成正比的主磁通 Φ_m 减小，因此起动转矩 T_{st} 并不大。

- 9-3 异步电动机电磁转矩与电源电压大小有什么关系？如果电源电压比额定电压下降 30%，电动机的最大转矩 T_{em} 和起动转矩 T_{st} 将变为多大？若电动机拖动额定负载转矩不变，则电压下降后电机的转速 n 、定子电流 I_s 、转子电流 I_r 和主磁通 Φ_m 将有什么变化？

答：

异步电动机的电磁转矩 T_e 与电源电压 U_s 的平方成正比，即 $T_e \propto U_s^2$ 。若 $U_s = 0.7U_N$ ，则 $T_{em} = 0.49T_{emN}$ ， $T_{st} = 0.49T_{stN}$ 。

若电动机拖动额定负载转矩不变，则电压下降后电机的转速 n 减小，定子电流 I_1 增大，转子电流 I_r 增大，主磁通 Φ_m 减小。

- 9-4 笼型转子异步电动机在什么条件下可以直接起动？不能直接起动时，为什么可以采用减压起动？减压起动对起动转矩有什么影响？

答：

现代设计的笼型转子异步电动机，本身都允许直接起动。因此，对于笼型转子异步电动机而言，直接起动方法的应用主要受电网容量的限制。

在一般情况下，小容量电动机轻载时可以允许直接起动。只要直接起动时的起动电流在电网中引起的电压降不超过 10%~15%（对经常起动的电动机取 10%，对不经常起动的电动机取 15%），就允许直接起动。按国家标准 GB755-2000 规定，三相异步电动机的最大转矩应不低于 1.6 倍额定转矩，当电网电压降到额定电压的 85% 时，最大转矩至少仍然有额定转矩的 1.156 倍（ $1.6 \times 0.85^2 T_N$ ），因此接在同一电网上的其他异步电动机不至于因为转矩下降太多而停转。具体来说，如果异步电动机满足如下要求，就可以允许直接起动：

$$K_I = \frac{I_{1st}}{I_{IN}} \leq \frac{1}{4} \left[3 + \frac{\text{电源总容量 (kV} \cdot \text{A)}}{\text{起动电动机容量 (kV} \cdot \text{A)}} \right]$$

如果不能满足上述要求，则必须采用减压起动方法，以限制起动电流，当然此时起动转矩会有所减小。

9-5 采用自耦变压器减压起动时，起动电流与起动转矩降低的数值与自耦变压器一、二次侧匝比有什么关系？

答：

采用自耦变压器减压起动时，电动机端电压 $U_s = U_2$ 降到 $(N_2 / N_1) U_1$ ，定子电流 $I_s = I_2$ 也降到 $(N_2 / N_1) I_{st}$ ，通过自耦变压器，又使从电网上吸取的电流 I_1 降低为全电压起动电流 I_{st} 的 $(N_2 / N_1)^2$ 。此外，由于 $U_s = (N_2 / N_1) U_1$ ，而异步电机的电磁转矩 $T_e \propto U_s^2$ ，所以利用自耦变压器后，起动转矩也降到 $(N_2 / N_1)^2 T_{st}$ （ T_{st} 为全电压 U_1 时的起动转矩），即起动转矩与起动电流降低同样的倍数。

9-6 当电源线电压为 380V 时，若要采用 Y-Δ 换接起动，只有定子绕组额定电压为 660/380V 的三相异步电动机才能使用，为什么？

答：

Y-Δ 换接起动方法只适用于正常运行时定子绕组接成三角形的电动机，其每相绕组均引出两个出线端，三相共引出六个出线端。在起动时将定子绕组接成星形，起动完毕后再换接成三角形。这样，在起动时就把定子每相绕组上的电压降到正常工作电压的 $1/\sqrt{3}$ 。定子绕组额定电压为 660/380V 的三相异步电动机，660V 指的是星形联结时的

额定线电压（额定相电压为 380V），380V 指的是三角形联结时的额定线电压（也就是额定相电压），所以当电源线电压为 380V 时，可以采用 Y-Δ 换接起动。

9-7 深槽式异步电动机和双笼型转子异步电动机的起动转矩较大，其原因是什么？

答：

这两种异步电动机都是利用转子电流的集肤效应来改善起动性能的。所谓集肤效应，就是当导体中有交流电或者交变电磁场时，导体内部的电流分布不均匀，且电流集中在导体的“皮肤”部分的一种现象。此时，导线内部实际电流变小，电流集中在导线外表的薄层，导致导线的电阻增加。深槽式异步电动机和双笼型转子异步电动机起动时，转子电阻因集肤效应而增加，有利于提高起动转矩。

9-8 为什么绕线转子异步电动机转子串入起动电阻后，起动电流减小而起动转矩反而能够增大？是否串入的电阻越大越好？频敏变阻器是电感线圈，为何转子电路串接频敏变阻器能降低起动电流和增大起动转矩？

答：

异步电动机转子回路串联电阻有两种作用：一是由于转子回路的电阻增大，使转子阻抗增大，转子绕组的起动电流减小，因而定子的起动电流也相应减小；二是适当选择串入电阻的阻值，可使起动转矩增大，这时虽然转子电流减小，但转子的功率因数显著增大，主磁通也是增大的，所以起动转矩能够增大（ $T_e = C_T \Phi_m I_r \cos \varphi_2$ ）。但串入的电阻不宜过大，否则起动电流过分减小，电动机也无法起动。

频敏变阻器是一种静止无触点的变阻器，结构简单。电动机刚起动时，转子电流频率较高（ $f_2 = sf_1 \approx 50\text{Hz}$ ），此时频敏变阻器内的与频率平方成正比的涡流损耗较大，其等效电阻也因之较大，可以限制电动机的起动电流，并增大起动转矩。随着转速的升高，转子电流频率逐渐下降，铁心中的涡流损耗和等效电阻也随之逐渐减小，使电动机平滑起动。

9-9 异步电动机软起动的基本原理是什么？软起动与传统减压起动相比，具有哪些优点？

答：

异步电动机软起动就是采用一定的方法，在起动时使加在电机上的电源电压按一定规律从零平滑过渡到全电压，以控制起动电流和起动转矩，实现电动机平稳起动。

软起动与传统减压起动相比，具有以下优点：

- 1) 起动过程中引入电流负反馈，起动电流上升至设定值后，即维持恒定值，使电机起动平稳，对电网无冲击。
- 2) 不受电网电压波动的影响。
- 3) 针对不同负载对电机的要求，可以无级调整起动电流设定值，改变电机起动时间，实现最佳起动时间控制。
- 4) 可实现电机的软停止。停机时，控制晶闸管导通角以一定的规律逐步减小，使电机端电压逐渐下降至零，减缓了瞬间断电停机对机械负载的冲击。
- 5) 可实现电机的节能运行。

9-10 异步电动机有哪几种调速方法？各有什么特点？

答：

按照异步电动机的基本原理，从定子传入转子的电磁功率 P_{em} 可分成两部分：一部分 $P_2 = (1-s)P_{em}$ 为拖动负载的有效功率；另一部分是转差功率 $P_s = sP_{em}$ ，与转差率成正比。从能量转换的角度看，转差功率是否增大，是消耗掉还是回收，是评价调速系统效率的一个重要指标。据此，可把异步电动机的调速方法分为三类：

- 1) 转差功率消耗型——全部转差功率都转换成热能消耗掉。它是以增加转差功率的消耗来换取转速的降低，越向下调效率越低。这类调速方法的效率最低。
- 2) 转差功率回馈型——转差功率的一部分消耗掉，大部分则通过变流装置回馈电网或转化成机械能予以利用，转速越低时回收的功率越多，其效率比前者高。
- 3) 转差功率不变型——这类调速方法无论转速高低，转差率保持不变，而且其数值很小，所以转差功率的消耗也基本不变且很小，因此效率最高。

9-11 异步电动机变极调速时，若电源相序不变，电机的转子转向将怎样？

答：

异步电动机变极调速时，定子三相绕组的相序会发生改变。若电源相序不变，为保持电机的转向不变，在改变极对数的同时，必须改变定子三相绕组的相序，即任意互换定子三相绕组的两个出线端。否则，电机的转子转向将与原方向相反。

9-12 带恒转矩负载时，异步电动机仅用降低电源电压的方法来降速，有什么问题？

答：

异步电动机一般运行在接近同步转速附近，从异步电动机改变定子电压的人为机械特性可以看出，当带恒转矩负载时，若仅改变电源电压 U_s ，其调速范围很小，调速效果不明显。

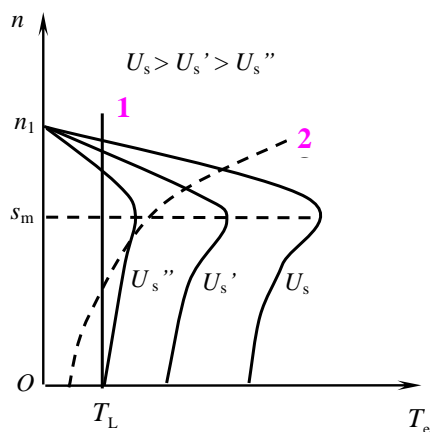


图9-14 改变定子电压调速的机械特性

9-13 异步电动机在带恒转矩负载时，若保持电源电压不变，要将频率升高到额定频率的 1.5 倍来实现高速运行（若机械强度允许），可行吗？为什么？若带恒功率负载，采用同样方法调速可行吗？

答：

根据异步电动机定子每相电动势有效值的计算公式

$$E_s = 4.4 f_1 N_1 k \Phi_1$$

如果略去定子漏阻抗压降，则有电源电压

$$U_s \approx E_s = 4.44 f_1 N_1 k_{w1} \Phi_m$$

上式表明，在变频调速时，若电源电压 U_s 不变，则随着频率 f_1 的升高，气隙磁通 Φ_m 将减小。又从电磁转矩计算公式

$$T_e = C_T \Phi_m I_r \cos \varphi$$

可知，在转子电流 I_r 相同的情况下， Φ_m 减小势必导致电动机输出转矩下降，使电动机的利用率恶化，同时，电动机的最大转矩也将减小，在负载转矩保持不变时有可能使电动机堵转。所以，在带恒转矩负载时，这种调速方法是不可行的。

若带恒功率负载，根据输出功率的计算公式

$$P_2 = T_L \cdot \omega_1$$

随着频率 f_1 ($\omega_1 = 2\pi f_1$) 的升高, 负载转矩 T_L 将减小, 此时可以采用升高频率的调速方法。

9-14 异步电动机串级调速时, 引入转子电路内的电动势, 其频率有什么特点? 若负载转矩不变, 欲使转速升高, 对附加电动势的相位有什么要求?

答:

异步电动机串级调速, 就是在绕线转子异步电动机的三相转子电路中串入一个电压和频率可控的交流附加电动势 \dot{E}_{add} , 通过控制使 \dot{E}_{add} 与转子电动势 \dot{E}_r 具有相同的频率, 其相位与 \dot{E}_r 相同或相反。

若负载转矩不变, 欲使转速升高, 要求附加电动势 \dot{E}_{add} 与转子电动势 \dot{E}_r 同相位, 此时转子电流 I_r 为

$$I_r = \frac{sE_{r0} + E_{\text{add}}}{\sqrt{R_r^2 + (sX_{r0})^2}}$$

随着附加电动势 E_{add} 的增加, 转子电流 I_r 增大, 电磁转矩 T_e 也增大, 使电动机加速。同时, 转差率 s 将减小。而随着 s 的减小, I_r 也减小, 最终达到转矩平衡 $T_e = T_L$ 。

9-15 异步电动机运行于回馈制动状态时, 是否可以把电动机的定子出线端从接在电源上改接到负载上?

答:

异步电动机运行于回馈制动状态时, 不可以把电动机的定子出线端从接在电源上改接到负载上。这是因为异步电动机回馈制动时, 转子电流的无功分量方向不变, 与电动状态时方向相同, 异步电动机的定子必须接到电网上, 并从电网吸取无功功率以建立电动机的磁场。

9-16 同步电动机异步起动时, 为什么励磁绕组既不能开路, 又不能短路?

答:

同步电动机异步起动时, 励磁绕组既不能开路, 又不能短路, 而是串联一个较大阻值的电阻, 形成闭合回路。这是因为闭合的励磁绕组回路可以看成类似于异步电动机的笼型绕组, 在起动过程中可产生异步起动转矩, 加快起动过程。但励磁绕组不能直接短

路，否则励磁绕组回路将由于电阻值较小而产生很大的感应电流，有可能烧毁绕组。当转子转速接近同步转速时，再切除串入的大电阻，通入正常的励磁电流。

9-17 同步电动机和异步电动机的转速各有什么特点？

答：

异步电动机是通过定子旋转磁场在转子绕组中产生感应电动势和感应电流，并产生电磁转矩，转子并不直接产生磁场。因此，转子的转速一定是小于定子旋转磁场的同步转速。没有这个转差值，也就没有转子感应电流，所以称为“异步电机”。而同步电动机转子本身产生固定方向的磁场（用直流电流或永磁体产生），定子旋转磁场“拖着”转子恒定磁场（也就是转子）转动，转子的转速一定等于同步转速，所以称为“同步电机”。

9-18 同步电动机调速系统有哪些类型？各有什么特点？

答：

同步电动机是以其转速 n 与供电电源频率 f_1 之间保持严格同步关系而命名的（ $n = n_1 = 60f_1 / n_p$ ），即只要电源频率 f_1 保持不变，同步电动机的转速就恒定不变而与负载大小无关。同步电动机的极对数 n_p 一般难以改变。因此，要改变同步电动机的转速，只有通过改变其供电电源的频率来达到，即采用变频调速的方法。

同步电动机变频调速系统有两种类型：

1) 他控式同步电动机变频调速系统：该系统结构简单，控制方便，只需一台变频器供电，成本低廉。既可用作变频起动装置，实现同步电机的软起动；也可用于多台同步电动机的群调速系统。但由于没有转速反馈，他控式变频调速方法虽然可以实现同步电动机的转速调节，但就像同步电动机接在工频电网上一样，存在转子振荡和失步的隐患，这是该系统的主要缺点，使之应用范围受到很大限制。

2) 自控式同步电动机变频调速系统：与他控式同步电动机变频调速相比，该系统的最大特点就是从根本上消除了同步电动机转子振荡和失步的隐患。因为自控式同步电动机变频调速系统在电动机轴端装有一台转子位置检测器，由它发出的信号控制给定子供电的变频装置电力电子器件的导通与关断，使定子旋转磁场转速和转子转速相等，始终保持同步，因此不会因负载冲击等造成失步现象，可适用于快速可逆运行和负载变化

剧烈的场合。

9-19 一台三相 8 极异步电动机额定值为：额定功率 $P_N = 260\text{kW}$ ，额定电压 $U_N = 380\text{V}$ ，额定频率 $f_N = 50\text{Hz}$ ，额定转速 $n_N = 722\text{r/min}$ ，过载能力 $\lambda = 2.13$ 。求：

- (1) 额定转差率；
- (2) 额定转矩；
- (3) 最大转矩；
- (4) 最大转矩对应的转差率；
- (5) $s = 0.02$ 时的电磁转矩。

解：

$$(1) \quad n_1 = \frac{60f_N}{p} = \frac{60 \times 50}{4} = 750 \text{ (r/min)}$$

$$s_N = \frac{n_1 - n_N}{n_1} = \frac{750 - 722}{750} \approx 0.0373$$

$$(2) \quad T_N = 9.55 \frac{P_N}{n_N} = 9.55 \times \frac{260}{722} \approx 3.44 \text{ (kN} \cdot \text{m)}$$

$$(3) \quad T_{em} = \lambda T_N = 2.13 \times 3.44 \approx 7.33 \text{ (kN} \cdot \text{m)}$$

$$(4) \quad s_m = s_N (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}) = 0.0373 \times (2.13 + \sqrt{2.13^2 - 1}) \approx 0.1496$$

$$(5) \quad T_e = \frac{2T_{em}}{s/s_m + s_m/s} = \frac{2 \times 7.33}{0.02/0.1496 + 0.1496/0.02} \approx 1.93 \text{ (kN} \cdot \text{m)}$$

9-20 一台三相 8 极异步电动机额定值为：额定功率 $P_N = 50\text{kW}$ ，额定电压 $U_N = 380\text{V}$ ，额定频率 $f_N = 50\text{Hz}$ ，额定负载时的转差率 $s = 0.025$ ，过载能力 $\lambda = 2$ 。

- (1) 用转矩的实用公式求最大转矩对应的转差率；
- (2) 求转子的转速。

解：

$$(1) \quad s_m = s_N (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}) = 0.025 \times (2 + \sqrt{2^2 - 1}) \approx 0.0933$$

$$(2) \quad n = (1 - s_N)n_1 = (1 - 0.025) \times 750 = 731.25 \text{ (r/min)}$$

9-21 某笼型转子异步电动机的额定参数为： $P_N = 40\text{kW}$ ， $U_N = 380\text{V}$ ， $n_N = 2930\text{r/min}$ ，

$\eta_N = 90\%$ ， $\cos \varphi_N = 0.91$ ， $\cos \varphi_{st} = 0.3$ ， $K_t = 5.5$ ， 定子 Y 形联结。用定子串电阻起动，要求使起动电流减到直接起动电流的 1/4，求所需串接电阻的阻值。（计算时可忽略励磁电流）

解：

首先根据电动机的额定参数可计算定子的额定电流

$$I_N = \frac{P_N}{\sqrt{3}U_N\eta_N\cos\varphi_N} = \frac{40 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 380 \times 0.9 \times 0.91} \approx 74.2 \text{ (A)}$$

定子绕组 Y 形联结时，起动时的等效阻抗

$$Z = \frac{U_N}{\sqrt{3}I_{st}} = \frac{U_N}{\sqrt{3}K_t I_N} = \frac{380}{\sqrt{3} \times 5.5 \times 74.2} \approx 0.538 \text{ (}\Omega\text{)}$$

起动时的等效电阻

$$R = Z \cos \varphi_{st} = 0.538 \times 0.3 \approx 0.161 \text{ (}\Omega\text{)}$$

起动时的等效电抗

$$X = Z \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{st}} = 0.538 \times \sqrt{1 - 0.3^2} \approx 0.513 \text{ (}\Omega\text{)}$$

按要求 $a = \frac{I_{st}}{I'_{st}} = 4$ ，则所需串接电阻的阻值

$$R_{st} = \sqrt{(a^2 - 1)X^2 + a^2 R^2} - R = \sqrt{(16 - 1) \times 0.513^2 + 16 \times 0.161^2} - 0.161 \\ \approx 2.089 - 0.161 = 1.928 \text{ (}\Omega\text{)}$$

9-22 一台三相笼型转子异步电动机的额定参数为：380V、50Hz、1455 r/min，定子 Δ 联结，

每相参数： $R_s = R'_r = 0.072\Omega$ ， $X_s = X'_{r0} = 0.2\Omega$ ，试求：

(1) 在额定电压下直接起动时，起动电流倍数、起动转矩倍数和功率因数。

(2) 应用 Y- Δ 换接起动时，起动电流倍数、起动转矩倍数和功率因数。

解：

额定转差率

$$s_N = \frac{n_1 - n_N}{n_1} = \frac{1500 - 1455}{1500} = 0.03$$

额定相电流（采用简化等效电路计算）

$$\begin{aligned}
 I_{\Phi N} &= \frac{U_N}{\sqrt{(R_s + R'_r / s_N)^2 + (X_s + X'_{r0})^2}} \\
 &= \frac{380}{\sqrt{(0.072 + 0.072 / 0.03)^2 + (0.2 + 0.2)^2}} \\
 &\approx 151.7 \text{ (A)}
 \end{aligned}$$

额定转矩

$$\begin{aligned}
 T_N &= \frac{3n_p U_N^2 R'_r / s_N}{2\pi f_1 \left[(R_s + R'_r / s_N)^2 + (X_s + X'_{r0})^2 \right]} \\
 &= \frac{3 \times 2 \times 380^2 \times 0.072 / 0.03}{2\pi \times 50 \left[(0.072 + 0.072 / 0.03)^2 + (0.2 + 0.2)^2 \right]} \\
 &\approx 1061.9 \text{ (N} \cdot \text{m)}
 \end{aligned}$$

(1) 在额定电压下直接起动时，起动电流

$$\begin{aligned}
 I_{st} &= \frac{U_N}{\sqrt{(R_s + R'_r)^2 + (X_s + X'_{r0})^2}} \\
 &= \frac{380}{\sqrt{(0.072 + 0.072)^2 + (0.2 + 0.2)^2}} \\
 &\approx 893.8 \text{ (A)}
 \end{aligned}$$

起动电流倍数

$$K_I = \frac{I_{st}}{I_{\Phi N}} = \frac{893.8}{151.7} \approx 5.89$$

起动转矩

$$\begin{aligned}
 T_N &= \frac{3n_p U_N^2 R'_r}{2\pi f_1 \left[(R_s + R'_r)^2 + (X_s + X'_{r0})^2 \right]} \\
 &= \frac{3 \times 2 \times 380^2 \times 0.072}{2\pi \times 50 \left[(0.072 + 0.072)^2 + (0.2 + 0.2)^2 \right]} \\
 &\approx 1105.3 \text{ (N} \cdot \text{m)}
 \end{aligned}$$

起动转矩倍数

$$K_T = \frac{T_{st}}{T_N} = \frac{1105.3}{1061.9} \approx 1.04$$

功率因数

$$\begin{aligned}
 \cos \varphi &= \frac{R_s + R'_r}{\sqrt{(R_s + R'_r)^2 + (X_s + X'_{r0})^2}} \\
 &= \frac{0.072 + 0.072}{\sqrt{(0.072 + 0.072)^2 + (0.2 + 0.2)^2}} \\
 &\approx 0.339
 \end{aligned}$$

(2) 应用 Y-Δ 换接起动时，起动电流倍数

$$K'_1 = \frac{1}{3} K_1 = \frac{1}{3} \times 5.89 \approx 1.96$$

起动转矩倍数

$$K'_T = \frac{1}{3} K_T = \frac{1}{3} \times 1.04 \approx 0.35$$

功率因数保持不变

$$\cos \varphi' = \cos \varphi = 0.339$$

9-23 有一台三相绕线转子异步电动机，额定参数为：50Hz、6极、980r/min，每相转子电阻 $R_r = 0.073\Omega$ ，负载转矩保持额定值不变，如转子中所串的调速电阻为 0.73Ω 和 1.7Ω 时，电机的转速各为多少？

解：

额定转差率

$$s_N = \frac{n_1 - n_N}{n_1} = \frac{1000 - 980}{1000} = 0.02$$

根据异步电动机转子串电阻调速的基本关系式

$$\frac{R_r}{s_N} = \frac{R_r + R_c}{s}$$

当 $R_c = 0.73\Omega$ 时，转差率和转速为

$$s = s_N \frac{R_r + R_c}{R_r} = 0.02 \times \frac{0.073 + 0.73}{0.073} = 0.22$$

$$n = (1 - s)n_N = (1 - 0.22) \times 1000 = 780 \text{ (r/min)}$$

当 $R_c = 1.7\Omega$ 时，转差率和转速为

$$s = s_N \frac{R_r + R_c}{R_r} = 0.02 \times \frac{0.073 + 1.7}{0.073} \approx 0.486$$

$$n = (1 - s)n_N = (1 - 0.486) \times 1000 \approx 514 \text{ (r/min)}$$

第十章 电力拖动系统电动机的选择

10-1 电力拖动系统中电动机的选择主要包括哪些内容？

答：

电力拖动系统中电动机的选择主要包括电流种类、结构形式、额定电压、额定转速和额定功率的选择等，其中以额定功率的选择为主要内容。确定电动机额定功率时主要考虑以下因素：一是电动机的发热及温升；二是电动机的短时过载能力。对于笼型异步电动机还应考虑起动能力。

10-2 电动机运行时允许温升的高低取决于什么？影响绝缘材料寿命的是温升还是温度？

答：

电动机运行时允许温升的高低取决于电动机所用绝缘材料的耐热程度，也就是绝缘等级。不同的绝缘材料，其最高容许温度是不同的，就是说影响绝缘材料寿命的是温度。

10-3 电动机的3种工作方式是如何划分的？电动机实际运行的工作方式和铭牌上标明的的工作方式可能有哪些区别？

答：

电动机工作时，负载持续时间的长短对电机的发热情况影响较大，对正确选择电动机的功率有影响。电动机的工作制就是对电动机承受负载情况的说明，包括起动、制动、空载、负载、正反转等过程，以及这些过程的持续时间和先后顺序。国家标准把电动机的工作制分为 $S_1 \sim S_9$ 9类。常见的3种工作制分别是：连续工作制、短时工作制、断续周期工作制。

电动机铭牌上标明的的工作方式应和电动机实际运行的工作方式相一致。但有时也可能不同，根据电动机的不同工作方式，按不同的变化负载的生产机械负载图，预选电机功率，在绘制电机负载图的基础上进行发热、过载能力及起动能力（笼型异步电动机）的校验。

10-4 选择电动机额定功率时，一般应校验哪三个方面？

答：

选择电动机额定功率时，一般应校验以下三个方面：

(1) 发热情况：电动机在运行时的实际最高工作温度应小于或等于电动机的允许最高工作温度。

(2) 过载能力：当决定电动机功率的主要因素不是发热而是电动机的过载能力时，所选电动机的最大转矩 T_{\max} 或最大电流 I_{\max} 必须大于运行过程中可能出现的最大负载转矩 $T_{L\max}$ 和最大负载电流 $I_{L\max}$ 。

(3) 起动能力：必须使电动机能可靠起动，即 $\lambda_{st} T_N > T_L$ (λ_{st} 为电动机的起动转矩倍数)。

10-5 电动机的额定功率是如何确定的？环境温度长期偏离标准环境温度 40°C 时，应如何修正？

答：

确定电动机额定功率时主要考虑以下因素：一是电动机的发热及温升；二是电动机的短时过载能力。对于笼型异步电动机还应考虑起动能力。确定电动机额定功率最基本的方法是依据机械负载变化的规律，绘制电动机的负载图（功率或转矩与时间的关系图），然后根据负载图计算电动机的发热和温升曲线，从而确定电动机的额定功率。

当环境温度长期偏离标准环境温度 40°C 时，应进行如下修正：即当环境温度低于 40°C 时，电动机可带高于额定值的负载；反之，当环境温度高于 40°C 时，所带负载应适当降低，以保证两种情况下电动机最终都不超过绝缘材料最高允许温度。

10-6 试比较 $FS=25\%$ 、 $P_N=30\text{kW}$ 的电动机与 $FS=40\%$ 、 $P_N=20\text{kW}$ 的电动机，哪一台的实际容量大？

解：

把 $FS=40\%$ 、 $P_N=20\text{kW}$ 的电动机换算成 $FS=25\%$ 的相对应的等效负载功率为

$$P = P_N \sqrt{\frac{40\%}{25\%}} = 20 \times \sqrt{\frac{40}{25}} \approx 25.3 (\text{kW})$$

可见， $FS=25\%$ 、 $P_N=30\text{kW}$ 的电动机实际容量大。