

课后答案网，用心为你服务！



[大学答案](#) --- [中学答案](#) --- [考研答案](#) --- [考试答案](#)

最全最多的课后习题参考答案，尽在课后答案网 ([www.khdaw.com](http://www.khdaw.com))！

Khdaw团队一直秉承用心为大家服务的宗旨，以关注学生的学习生活为出发点，  
旨在为广大学生朋友的自主学习提供一个分享和交流的平台。

爱校园 ([www.aixiaoyuan.com](http://www.aixiaoyuan.com)) 课后答案网 ([www.khdaw.com](http://www.khdaw.com)) 淘答案 ([www.taodaan.com](http://www.taodaan.com))

# 第一章 习题解答

## 思考题

1.1 电机中涉及到哪些基本电磁定律？试说明它们在电机中的主要作用。

答：电机与变压器中涉及到：（1）安培环路定律；（2）法拉第电磁感应定律；（3）电磁力定律；（4）磁路的欧姆定律。其中，安培环路定律反映了一定磁势（或安匝数）所产生磁场的强弱。在电机中，磁场在机电能量转换过程中起到了媒介的作用；法拉第电磁感应定律反映了交变的磁场所产生电势的情况。在电机中，电磁感应定律体现了机电能量转换过程中所转换为电能的大小；电磁力定律反映了通电导体在磁场中的受力情况，它体现了机电能量转换过程中所转换为机械能的大小；磁路的欧姆定律类似于电路的欧姆定律，它体现了一定磁势作用到磁路中所产生的磁通大小，亦即耦合磁场的大小。

1.2 永久磁铁与软磁材料的磁滞回线有何不同？其相应的铁耗有何差异？

答：永久磁铁又称为硬磁材料，其磁滞回线与软磁材料的不同主要体现在形状上。硬磁材料的磁滞回线较“肥胖”；而软磁材料则“瘦弱”。硬磁材料的面积反映了铁磁材料磁滞损耗的大小，因而软磁材料的铁耗较小。

1.3 什么是磁路饱和现象？磁路饱和对磁路的等效电感有何影响？

答：当励磁安匝（或磁势）较小时，随着磁势的增加，磁路中所产生的磁通也线性增加；当磁势增加到一定程度时，随着磁势的增加，磁路中所产生的磁通增加较小，甚至不再增加，这一现象称为磁路的饱和。与磁路线性时相比，磁路饱和后的磁导率和等效电感有所减小。

1.4 铁心中的磁滞损耗与涡流损耗是如何产生的？它们与哪些因素有关？

答：铁心中的磁滞损耗是由铁磁材料在交变磁场作用下的磁化过程中，内部的磁畴相互摩擦所引起的铁心发热造成的；而涡流损耗则是由于交变的磁场在铁心中感应电势并产生涡流，从而引起铁心发热。由  $p_h = K_h f \oint H dB = C_h f B_m^2 V$  可见，磁滞损耗正比于磁场交变的频率、磁密的平方以及铁心的体积；由  $p_e = C_e f^2 B_m^2 \Delta^2 V$  可见，涡流损耗正比于磁场交变频率的平方、磁密的平方以及铁磁材料的厚度。

1.5 实际的电机和变压器的铁心中，一般不是采用整块铸钢或矽钢组成，而是采用矽钢片叠压而成，为什么？

答：涡流损耗反映了铁磁材料的导电性能，它与铁磁材料的厚度成正比。因此，为减小铁磁材料的导电性能及涡流损耗，交流电机或变压器的铁心多采用矽钢片叠压而成。

1.6 如果感应电势的正方向与磁通的正方向符合左手螺旋关系，则电磁感应定律应写成  $e = N \frac{d\Phi}{dt}$ ，试说明原因。

答：现对图 1.7 所示铁心线圈进行分析。

感应电势和磁通的假定正方向如图所示，即符合左手螺旋关系。

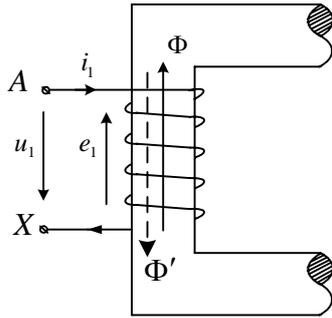


图 1.7 磁通与其感应电势的正方向假定

当磁通  $\Phi$  增加即  $\frac{d\Phi}{dt} > 0$  时，由  $e = N \frac{d\Phi}{dt}$  可知， $e > 0$ ，即  $e$  的实际方向与假定正方向一致；又由楞次定律可知，线圈中所感应电势以及相应的电流所产生的磁通（图中用  $\Phi'$  表示）应阻碍磁通  $\Phi$  的增加。很显然，上述正方向与关系式符合楞次定律。亦即，当感应电势与磁通符合左手螺旋关系时，只有采用  $e = N \frac{d\Phi}{dt}$  才能使实际情况与楞次定律一致。至于当磁通  $\Phi$  减少即  $\frac{d\Phi}{dt} < 0$  时，则与此类似，只不过线圈中所感应电势以及相应的电流所产生的磁通将有助于磁通  $\Phi$  的增加，具体过程略。

1.7 电磁感应定律有时写成  $e = -\frac{d\Psi}{dt} = -N \frac{d\Phi}{dt}$ ，有时又写成  $e = -L \frac{di}{dt}$ ，有时又写成  $e = Blv$ 。这三种表达式有何区别？分别适应于什么条件？

答：当电磁感应定律写成  $e = -\frac{d\Psi}{dt} = -N \frac{d\Phi}{dt}$  时，它反映了绕组所感应电势的大小与磁链的变化率（或导数）成正比；若磁路为线性，对单个线圈则磁链为： $\Psi = L(\theta)i(t)$ 。将其代入上式得： $e = -\frac{d\Psi}{dt} = -\frac{\partial L}{\partial \theta} \omega i - L \frac{di}{dt}$ 。由此可见，绕组所感应的电势是由两部分组成：一部分是速度电势，即通常的表达式  $e = blv$ ；另一部分为： $e = -L \frac{di}{dt}$ ，它反映的是绕组中所感应的自感电势，或变压器电势。因此，上述表达式中， $e = -\frac{d\Psi}{dt}$  为一般表达式；当磁通与全部绕组匝数相匝链，则  $e = -N \frac{d\Phi}{dt}$ ；当磁路为线性，且  $L$  为常数时， $e = -L \frac{di}{dt}$ 。

1.8 在图 1.8 所示变压器磁路中，当在  $N_1$  中施加正弦电压  $u_1$  时，为什么会在  $N_1$ 、 $N_2$  两个线圈中均会感应电势？当流过线圈  $N_1$  中的电流  $i_1$  增加时，试标出  $N_1$ 、 $N_2$  两个线圈中所感应电势的实际方向与输出电压的方向，并计算两个线圈感应电势之间的关系。

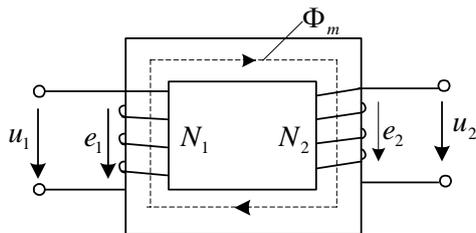


图 1.8 习题 1.8 图

答：尽管图 1.8 所示变压器的两个绕组没有直接电的联系，但由于两个绕组共同匝链同一磁通  $\Phi_m$ 。若该磁通交变，便会在分别在绕组  $N_1$ 、 $N_2$  中感应电势  $e_1$ 、 $e_2$ ，即： $e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt}$ ， $e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt}$ ，且匝数较多的绕组所感应电势的有效值较大。图 1.7 中，线圈  $N_1$ 、 $N_2$  的同名端均为上端。当流过线圈  $N_1$  中的电流  $i_1$  增加时，磁路中的磁通  $\Phi$  增加，则实际感应电势的方向均为上负下正，即由同名端指向非同名端。考虑到  $e_2$  的实际方向，输出电压  $u_2$  的实际方向为下正上负。两个线圈感应电势的有效值之间满足： $E_1 / E_2 = N_1 / N_2$ 。

### 练习题

1.1 如下表格包含了磁性钢的试样，50Hz，对称磁滞回线上半部分的数据：

B(T)	0	0.2	0.4	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	0.95	0.9	0.8	0.7	0.6	0.4	0.2	0
H(A/m)	48	52	58	73	85	103	135	193	80	42	2	-18	-29	-40	-45	-48

利用 MATLAB 绘出 (a) 该磁滞回线；(b) 计算磁滞回线的面积。

解：参考题 1.29

1.2 图 1.9a 所示磁路由电工钢片叠成，其磁化曲线如图 1.19b 所示。图中尺寸单位是 mm，励磁线圈的匝数为 1000 匝。试求当铁心中的磁通为  $1 \times 10^{-3} \text{ Wb}$  时，励磁线圈的电流应为多少？

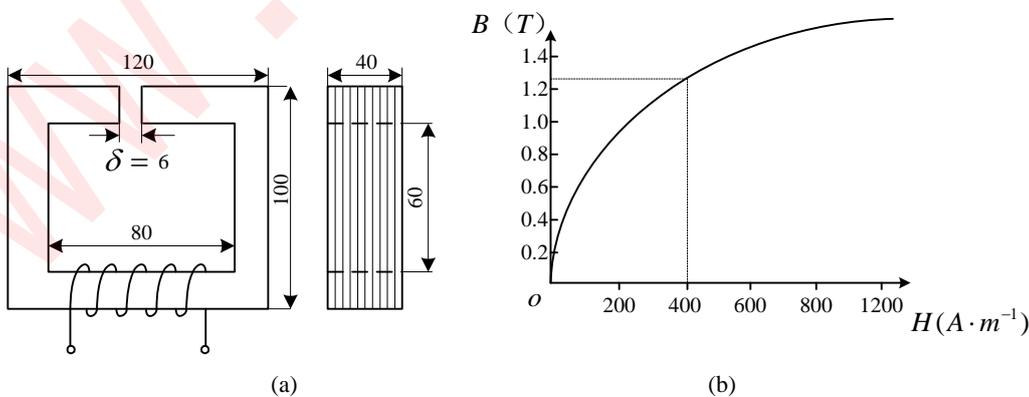


图 1.9 习题 1.2 图

解：忽略铁心的叠片系数，则铁心的截面积为

$$A = 20 \times 10^{-3} \times 40 \times 10^{-3} = 0.8 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

铁心磁路的平均长度为

$$l = [2 \times (100 + 80) - 6] = 354 \text{ mm} = 0.354 \text{ m}$$

铁心内部的平均磁密为:

$$B_{av} = \frac{\Phi}{A} = \frac{1 \times 10^{-3}}{0.8 \times 10^{-3}} = 1.25 \text{ T}$$

查图 1.9 所示的磁化曲线得相应的磁场强度为:  $H = 400 \text{ A/m}$ , 于是可得磁路所需的励磁安匝为

$$F_i = Hl = 400 \times 0.354 = 141.6 \text{ A}$$

忽略气隙处的边缘效应, 则气隙内的磁通与铁心相同, 于是有:

$$B_\delta = \frac{\Phi}{A_\delta} = \frac{1 \times 10^{-3}}{20 \times 10^{-3} \times 40 \times 10^{-3}} = 1.25 \text{ T}$$

$$H_\delta = \frac{B_\delta}{\mu_0} = \frac{1.25}{4\pi \times 10^{-7}} = 9.947 \times 10^5 \text{ A/m}$$

$$F_\delta = H_\delta \delta = 9.947 \times 10^5 \times 6 \times 10^{-3} = 5968.2 \text{ A}$$

该磁路所需总的磁势为

$$F_f = F_i + F_\delta = 141.6 + 5968.2 = 6109.8 \text{ A}$$

励磁线圈中所需的励磁电流为

$$I_f = \frac{F_f}{N} = \frac{6109.8}{1000} = 6.11 \text{ A}$$

由上述数值可见,  $F_\delta \gg F_i$ , 即大部分磁势集中在气隙中。在计算电机磁路时, 即使忽略铁心内部的损耗, 也不会带来多大误差。

1.3 图 1.10 的对称磁路有三个绕组。绕组 A 和 B 的匝数均为 N, 绕在底部的两个铁心柱上, 铁心尺寸如图所示。

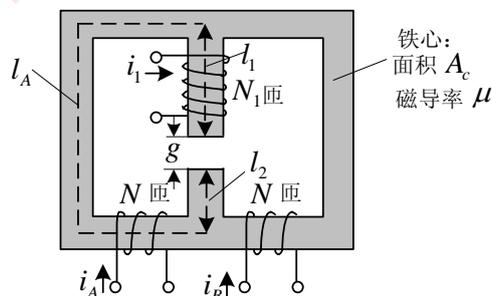


图 1.10 习题 1.3 图

- (1) 画出该磁路的类比等效电路图;
- (2) 求出每个绕组的自感;
- (3) 求出三对绕组间的互感;

(4) 求出由绕组 A 和 B 中的时变电流  $i_A(t)$  和  $i_B(t)$  在绕组 1 中所感应的电压。说明这一结构可用于测量两个同频率正弦交流不平衡的工作原理。

解：(1) 对于图 1.10 所示磁路，绘出其类比等效电路如图 1.11 所示。

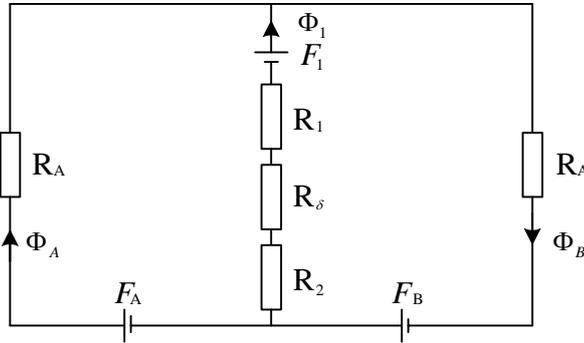


图 1.11 图 1.10 的类比等效电路

(2) 图 1.11 中，考虑到各段磁路的磁阻分别为

$$R_A = \frac{l_A}{\mu A_c}, R_1 = \frac{l_1}{\mu A_c}, R_2 = \frac{l_2}{\mu A_c}, R_\delta = \frac{\delta}{\mu_0 A_c}$$

于是得各个线圈的自感分别为

$$L_{11} = \frac{N_1^2}{R_1 + R_2 + R_\delta + R_A/2} = \frac{N_1^2 \mu A_c}{l_1 + l_2 + \delta(\mu/\mu_0) + l_A/2}$$

$$L_{AA} = L_{BB} = \frac{N^2 (R_A/2)(R_1 + R_2 + R_\delta)}{R_A/2 + R_1 + R_2 + R_\delta} = \frac{N^2 \mu A_c (l_1 + l_2 + \delta(\mu/\mu_0))}{l_A [l_A + 2(l_1 + l_2 + \delta(\mu/\mu_0))]}$$

(3) 各个线圈的互感分别为

$$L_{A1} = L_{1A} = -L_{B1} = -L_{1B} = \frac{-NN_1(R_A/2)}{R_A/2 + R_1 + R_2 + R_\delta} = \frac{-NN_1 \mu A_c}{l_A + 2(l_1 + l_2 + \delta(\mu/\mu_0))}$$

(4) 由绕组 A 和 B 中的时变电流  $i_A(t)$  和  $i_B(t)$  在绕组 1 中所感应的电压为

$$v_1 = \frac{d}{dt}(L_{A1}i_A + L_{B1}i_B) = L_{A1} \frac{d}{dt}(i_A - i_B)$$

由上式可见，对于同频率的两个正弦交流  $i_A(t)$  和  $i_B(t)$ ，若两者不平衡，即  $i_A(t) \neq i_B(t)$ ，则绕组  $N_1$  中感应电压。这样，通过测量绕组  $N_1$  中感应电压的有无，便可以确定绕组 A 和 B 是否不平衡。

## 第 2 章 习题解答

### 思考题

2.1 直流电机电刷内的电枢绕组中所流过的电流是交流还是直流？若是交流，其交变频率是多少？

答：直流电机电刷内的电枢绕组中所流过的电流是交流，而电刷外部为直流。电刷与换向器组合实现了外部直流与内部交流的转换（或换流）。内部电枢绕组所感应电势或电流的频率为： $f = p \frac{n}{60} \text{Hz}$ ，即内部电流的方向每转交变  $p$  次（ $p$  为电机的极对数）。

2.2 为什么直流电动机必须采用电刷和换向器把外加直流电源转变交流然后再给电枢绕组供电，而不是直接采用直流电源供电？

答：对于直流电动机，若不采用电刷或换向器将直流转换为内部交流，而是直接采用直流供电，则当电枢绕组的某一导体边转至  $N$  极下时，假定电流为流入的，电磁转矩沿顺时针方向。则当该导体边转至  $S$  极下时，电流仍为流入的，则所产生的电磁转矩必为逆时针方向。这样，在一个周期内，电机的转子（或电枢）不可能产生有效的电磁转矩。故此，必须采用机械式换流器完成直流到交流的转换。

2.3 直流电机铭牌上所给出的额定功率是指输出功率还是输入功率？是电功率还是机械功率？

答：电机铭牌上的额定功率均指输出功率。对于电动机，其额定功率是指机械输出功率；对于发电机，其额定功率是指电枢绕组的输出电功率。

2.4 为什么说直流电机的绕组是闭合绕组？

答：直流电机的线圈之间是通过换向片依次相联的，每一个换向片均与不同线圈的两个导体边相连，由此构成的电枢绕组自然是闭合绕组。

2.5 如果将传统永磁直流电动机的定子和转子颠倒，即定子侧为电枢绕组而转子采用永久磁钢产生励磁，试分析这样一台反装式直流电动机其电刷应该是静止还是旋转的？说明理由。

答：传统永磁直流电动机的磁极位于定子，而电枢绕组位于转子，其换向器随电枢绕组一同旋转，而电刷则固定在定子侧，只有这样才能产生有效的电磁转矩。换句话说，直流电机的电刷必须相对主极是静止不动的，才能产生有效的电磁转矩。因此，当传统直流电动机反装，亦即电枢绕组位于定子，而主极位于转子时，其电刷应随主极一同旋转。

2.6 直流电动机总共有几种励磁方式？不同励磁方式下，其线路电流  $I_1$ 、电枢电流  $I_a$  以及励磁电流  $I_f$  之间存在什么关系？

答：直流电动机的励磁方式可分为他励和自励两大类。其中，自励又包括：并励、串励和复励三种形式。在采用他励时，直流电动机的励磁绕组采用单独的励磁电源供电，而电枢绕组则采用另一电源供电。而对于自励方式的直流电机，其励磁绕组与电枢绕组采用同一电源供电。根据接线的不同（参考教材图 2.14），其线路电流  $I_1$ 、电枢电流  $I_a$  以及励磁电流  $I_f$  之间的关系式也不尽相同。对于并励直流电动机， $I_1 = I_a + I_f$ ；对于串励直流电动机， $I_1 = I_a = I_f$ ；对于复励直流电

动机， $I_1 = I_a + I_f$ 。

2.7 直流电动机负载后，气隙中共存在着几种类型的磁场？它们分别是由哪些励磁磁势产生的？

答：负载后，直流电机内部存在两种类型的磁场：一种是由定子励磁绕组磁势所产生的主磁场；另一种是由电枢绕组磁势所产生的电枢反应磁场。两者合成既是电机内部的气隙合成磁场。

2.8 何为电枢反应？它对主磁场有何影响？对发电机与电动机最终的运行性能各有何影响？

答：空载时，直流电机内部的磁场是由定子励磁绕组所产生的主磁场。负载后，除了主磁场之外，由电枢绕组中流过的电枢电流所产生的电枢磁势也要产生磁场，从而对主磁场造成一定影响。通常把电枢磁势对主磁场的影响称为电枢反应。电枢磁势对主磁场的影响结果造成：（1）气隙磁场发生畸变；（2）主磁场削弱，电枢反应呈去磁作用。对于直流发电机，上述结果造成电刷两端所感应的电势以及端部电压降低；对于直流电动机，上述结果造成转子转速上升。

这一磁场对主磁场要

2.9 对于直流电动机，转子所产生的电磁转矩是驱动性的（与转速方向相同）还是制动性的（与转速方向相反）？对于直流发电机又有何不同？

答：对于直流电动机，由电枢绕组输入电能，通过电机内部的磁场将输入的电能转变为机械能输出，所产生的电磁转矩为驱动性的，由其拖动机械负载一同旋转；对于直流发电机，由原动机拖动转子旋转，所产生的电磁转矩为制动性的。正是由于原动机克服制动性的电磁转矩，才将输入电机的机械能转变为电能输出。

2.10 在一定励磁的条件下，为什么负载后直流发电机输出的电压要比空载时的输出电压低？

答：由基本方程式： $U_2 = E_a - R_a I_a$  可见，直流发电机负载后，有两个因素造成输出电压降低：（1）电枢反应的去磁作用造成  $E_a = C_e n \Phi$  降低；（2）负载后电枢电流  $I_a$  的增加造成电枢电压下降。

2.11 在一定励磁的条件下，为什么负载后直流电动机转子的转速要比空载时的转子转速略低？

答：由  $n = \frac{U_1 - R_a I_a}{C_e \Phi}$  可见，直流电动机负载后，影响转子转速的因素有两个：（1）

电枢电流  $I_a$  造成电枢电压下降；（2）电枢反应的去磁作用造成  $\Phi$  的减少；前者引起转速下降；后者引起转速升高；轻载时由于电枢反应的去磁作用较小，前者占主要因素，故转子转速有所下降。当重载时，则电枢反应的去磁作用增大，相应的由其引起的转速升高变为主要因素，因此，此时转子转速将有所升高。

2.12 一台并励直流发电机不能正常发电，试分析其可能的原因，并说明解决办法。

答：要保证一台并励直流发电机正常发电，需具备三个条件：（1）主磁路存在剩磁；（2）励磁回路与电枢回路之间的接线要正确；（3）磁场总电阻不能超过临界

值。因此，若并励直流发电机不能正常发电，需检查剩磁，方法是用蓄电池给定子励磁绕组通一次电；若发电机仍发不出电压，则将励磁绕组与电枢绕组之间的相对接线颠倒。最后，再减小励磁回路的外串电阻，则并励直流发电机便可以正常发电。

2.13 直流电动机在运行中，励磁绕组突然开路，将发生什么现象？试分析之。

答：由  $n = \frac{U_1 - R_a I_a}{C_e \Phi}$  可见，直流电动机在正常运行过程中，若励磁绕组突然开路，

即  $I_f = 0$ ，则  $\Phi$  则减小为只有剩磁通，因此，转子转速将迅速升高，引起所谓的“飞车”现象。

2.14 并励直流电动机若端部的供电电源极性改变，其转向是否改变？串励直流电动机呢？

答：对于并励直流电动机，若仅改变端部的供电电压极性，励磁绕组的接线不变，则电枢电流和励磁电流将同时反向，则电磁转矩  $T_{em} = C_T \Phi I_a$  仍保持原来方向，故转子转向将不会改变。而对于串励直流电动机，情况如此相同，转子转向将保持不变。他励直流电动机则会例外。

2.15 什么是直流电机的换向？换向不正常会带来什么后果？

答：直流电机的换向是指对于某一电枢元件而言，当其经过电刷前后，内部电枢电流方向将发生改变，这一现象称为换向。换向不良会造成换向火花，严重时，会引起环火，造成电刷和换向器表面烧坏，并危及电枢绕组。

### 练习题

2.1 一台四极并励直流电机接在 220V 的电网上运行，已知电枢表面的总导体数  $N = 372$  根， $n = 1500 r/min$ ， $\Phi = 1.1 \times 10^{-2} Wb$ ，单波绕组，电枢回路的总电阻  $R_a = 0.208 \Omega$ ， $p_{Fe} = 362 W$ ， $p_{mec} = 240 W$ ，试问：

- (1) 此电机是发电机还是电动机？
- (2) 电磁转矩与输出功率各为多少？

解：(1) 要判断直流电机是工作在发电机还是电动机运行状态，只需比较一下端部电压  $U$  和电刷两端感应电势  $E_a$  的大小即可。当  $E_a > U$  时，直流电机工作在发电机状态；当  $E_a < U$  时，直流电机工作在电动机状态。

考虑到单波  $a = 1$ ，根据题意，

$$E_a = \frac{Np}{60a} n \Phi = \frac{372 \times 2}{60 \times 1} \times 1500 \times 1.1 \times 10^{-2} = 204.6 V < U = 220 V$$

显然，该电机运行在电动机状态。

(2) 根据直流电动机的电压平衡方程式，得：

$$I_a = \frac{U_1 - E_a}{R_a} = \frac{220 - 204.6}{0.208} = 74.04 A$$

于是:

$$\text{电磁转矩: } T_{em} = C_T \Phi I_a = \frac{Np}{2\pi a} \Phi I_a = \frac{372 \times 2}{2\pi \times 1} \times 1.1 \times 10^{-2} \times 74.04 = 96.44 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$\text{电磁功率: } P_{em} = E_a I_a = 204.6 \times 74.04 = 15148.75 \text{ W}$$

$$\text{输出功率: } P_2 = P_{em} - p_{Fe} - p_{mec} = 15148.75 - 362 - 240 = 14546.75 \text{ W}$$

2.2 一台 96kW 的并励直流电动机, 额定电压为 440V, 额定电流为 255A, 额定励磁电流为 5A, 额定转速为 500r/min, 电枢回路的总电阻为 0.078Ω, 不计电枢反应, 试求:

- (1) 电动机的额定输出转矩;
- (2) 额定电流时的电磁转矩;
- (3) 电动机的空载转速。

解: 并励直流电动机的接线如图 2.52 所示。

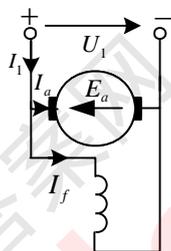


图 2.52 题 2.2 图

(1) 额定角速度为:

$$\Omega_N = \frac{2\pi n}{60} = \frac{2\pi \times 500}{60} = 52.36 \text{ rad/s}$$

额定输出转矩

$$T_2 = \frac{P_N}{\Omega_N} = \frac{96000}{52.36} = 1833.46 \text{ N} \cdot \text{m}$$

(2) 根据图 2.52 可得:

额定电枢电流

$$I_{aN} = I_N - I_{fN} = 255 - 5 = 250 \text{ A}$$

由直流电动机的电压平衡方程式得

$$E_a = U_1 - R_a I_{aN} = 440 - 0.078 \times 250 = 420.5 \text{ V}$$

电磁转矩

$$T_{em} = \frac{E_a I_a}{\Omega_N} = \frac{420.5 \times 250}{52.36} = 2007.73 \text{ N} \cdot \text{m}$$

(3) 根据电压平衡方程得

$$C_e \Phi_N = \frac{U_1 - R_a I_{aN}}{n_N} = \frac{440 - 0.078 \times 250}{500} = 0.841$$

于是，理想空载转速为

$$n_0 = \frac{U_1}{C_e \Phi_N} = \frac{440}{0.841} = 523.19 r/min$$

至于直流电动机的实际空载转速，将比  $n_0$  略下一点，计算如下：

空载电流

$$I_{a0} = \frac{T_0}{C_T \Phi_N} = \frac{T_{em} - T_2}{9.55 C_e \Phi_N} = \frac{2007.73 - 1833.46}{9.55 \times 0.841} = 21.70 A$$

实际空载转速

$$n'_0 = \frac{U_1 - R_a I_{a0}}{C_e \Phi_N} = \frac{440 - 0.078 \times 21.70}{0.841} = 521.17 r/min$$

2.3 某台他励直流电动机的铭牌数据为： $P_N = 22kW$ ， $U_N = 220V$ ，

$I_{aN} = 115A$ ， $n_N = 1500r/min$ ，电枢回路的总电阻为  $0.1\Omega$ ，忽略空载转矩，电动机带额定负载运行时，要求转速降到  $1000r/min$ 。问：

(1) 采用电枢回路串电阻降速时应串入多大的电阻值？

(2) 采用降低电源电压降速时，外加电压应降为多少？

(3) 上述两种情况下，电动机的输入功率与输出功率各为多少？（不计励磁回路的功率）

解：根据电压平衡方程式得

$$C_e \Phi_N = \frac{U_1 - R_a I_{aN}}{n_N} = \frac{220 - 0.1 \times 115}{1500} = 0.139$$

(1) 当采用电枢回路外串电阻降速时，由于负载转矩保持（额定）不变，根据  $T_{em} = C_T \Phi I_a$  可知，此时电枢电流  $I_a = I_{aN}$ 。于是根据电压平衡方程式有

$$R_a + R_\Omega = \frac{U_1 - E_a}{I_a} = \frac{U_1 - C_e \Phi_N n'}{I_{aN}} = \frac{220 - 0.139 \times 1000}{115} = 0.704 \Omega$$

于是电枢回路的外串电阻应为

$$R_\Omega = 0.704 - 0.1 = 0.604 \Omega$$

(2) 当采用降压降速时，同样，由于负载转矩保持不变， $I'_a = I_{aN}$ 。于是根据电压平衡方程式有

$$U' = E'_a + R_a I_a = C_e \Phi_N n' + R_a I_{aN} = 0.139 \times 1000 + 0.1 \times 115 = 150.5V$$

(3) 当采用电枢回路外串电阻降速时，电动机的输入与输出功率分别为

$$P_1 = U_N I_a = 220 \times 115 = 25300W = 25.3kW$$

由于忽略空载转矩即忽略空载损耗，于是有

$$P_2 = P_{em} = E_a I_a = C_e \Phi_N n' I_{aN} = 0.139 \times 1000 \times 115 = 15985W = 15.985kW$$

同样，当采用降压降速时，电动机的输入与输出功率分别为

$$P_1 = U I_a = 150.5 \times 115 = 17307.5W = 17.308kW$$

$$P_2' = P_{em}' = E_a' I_a = C_e \Phi_N n' I_{aN} = 0.139 \times 1000 \times 115 = 15985W = 15.985kW$$

或直接根据电磁转矩与转速相同，故  $P_2' = P_2 = 15.985kW$ 。

可见，降压降速可以比电枢回路外串电阻降速具有较少的输入功率，即其效率较高。

2.4 一台并励直流电动机在一定负载转矩下的转速为 1000r/min，电枢电流为 40A，电枢回路的总电阻为  $0.045\Omega$ ，电网电压为 110V。当负载转矩增大到原来的 4 倍时，电枢电流及转速各为多少？（忽略电枢反应）

解：由于忽略电枢反应的作用，则每极磁通  $\Phi$  保持不变。不计空载转矩时，电磁转矩等于负载转矩。于是，当负载转矩增大至原来的 4 倍时，电枢电流变为：

$$I_a' = 4I_a = 4 \times 40 = 160A$$

原来的电枢电势为

$$E_a = U_N - R_a I_a = 110 - 0.045 \times 40 = 108.2V$$

负载增加后，电枢电势变为

$$E_a' = U_N - R_a I_a' = 110 - 0.045 \times 160 = 102.8V$$

于是，转速变为

$$n' = \frac{E_a'}{E_a} n = \frac{102.8}{108.2} \times 1000 = 950r/min$$

2.5 一台 5.5kW 的并励直流发电机，电枢回路的总电阻  $R_a = 0.5\Omega$ ，当角速度为  $100rad/s$  时，其空载特性为：

$I_f(A)$	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
$E_a(V)$	95	167	218	248	256

在此角速度下调节励磁回路中的电阻，使发电机空载端电压为 250V，试决定：

- (1) 电枢电流为 20A 时，发电机的端电压为多少（不计电枢反应）？
- (2) 当角速度从  $100rad/s$  降为  $80rad/s$  时，要保持电枢电流为 10A，端电压为 200V，励磁电流必须增加到多少（不计电枢反应）？
- (3) 采用 MATLAB 计算重新计算该题。

解：(1) 不计电枢反应，当电枢电流为 20A 时，根据电压平衡方程式得端电压为

$$U_2 = E_a - R_a I_a = 250 - 0.5 \times 20 = 240V$$

(2) 当角速度由  $100rad/s$  降为  $80rad/s$  时，空载端电压变为

$$E_a' = U_2 + R_a I_a = 200 + 0.5 \times 10 = 205V$$

又根据  $E_a = C_e \Phi n$  可知:  $E_a'' = \frac{n'}{n} E_a = \frac{80}{100} E_a$ , 于是, 角速度改变后的空载特性变为:

$I_f$ (A)	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
$E_a''$ (V)	76	133.6	174.4	198.4	207.2

根据  $E_a' = 205V$  和上述空载特性, 利用内插值法得励磁电流为

$$I_f = 2.0 + \frac{(2.5 - 2.0)}{(207.2 - 198.4)} \times (205 - 198.4) = 2.375A$$

(3)

2.6 一台 17kW、220V 的并励直流电动机, 电枢电阻  $R_a = 0.1\Omega$ , 在额定电压下电枢电流为 100A, 转速为 1450r/min, 一变阻器与并励绕组串联限制励磁电流为 4.3A。当变阻器短路时, 励磁电流为 9.0A, 转速降低到 850r/min, 电动机带恒转矩负载, 机械耗等不计。试计算:

- (1) 励磁绕组的电阻和变阻器的电阻;
- (2) 变阻器短路后的稳态电枢电流;
- (3) 负载转矩。

解: (1) 由已知条件知励磁绕组的电阻为

$$r_f = \frac{U}{I_f} = \frac{220}{9.0} = 24.44\Omega$$

励磁回路的外串电阻为

$$R_f = \frac{220}{4.3} - r_f = 26.72\Omega$$

(2) 由电压平衡方程式得

$$C_e \Phi_N = \frac{U_N - R_a I_{aN}}{n_N}$$

$$C_e \Phi = \frac{U_N - R_a I_a}{n}$$

考虑到变阻器短路前后负载转矩 (或电磁转矩) 保持不变, 根据  $T_{em} = C_T \Phi I_a$  有

$$\frac{I_a}{I_{aN}} = \frac{C_e \Phi_N}{C_e \Phi} = \frac{U_N - R_a I_{aN}}{U_N - R_a I_a} \frac{n}{n_N}$$

即

$$\frac{I_a}{100} = \frac{220 - 0.1 \times 100}{220 - 0.1 I_a} \frac{850}{1450}$$

由此求得变阻器短路后的稳态电枢电流为

$$I_a = 57.5A$$

(3) 忽略机械耗和铁耗，则负载转矩为

$$\begin{aligned} T_L = T_{em} &= C_T \Phi_N I_{aN} = 9.55 C_e \Phi_N I_{aN} = 9.55 \frac{U_N - R_a I_{aN}}{n_N} I_{aN} \\ &= 9.55 \times \frac{220 - 0.1 \times 100}{1450} \times 100 = 138.28 N \cdot m \end{aligned}$$

2.7 他励直流电动机的铭牌数据： $P_N = 1.75kW$ ， $U_N = 110V$ ， $I_{aN} = 20.1A$ ，

$n_N = 1450r/min$ ，试用 MATLAB 计算并绘出：

- (1) 固有机械特性；
- (2) 50%额定负载时的转速；
- (3) 转速为 1500r/min 时的电枢电流。

解：参考清华 11-3 结果

2.8 他励直流电动机的数据如下： $P_N = 10kW$ ， $U_N = 220V$ ， $I_{aN} = 53.7A$ ，

$n_N = 3000r/min$ ，试用 MATLAB 计算并绘出下列机械特性：

- (1) 固有机械特性；
- (2) 当电枢回路的总电阻为 50% $R_N$ 时的人为机械特性；
- (3) 当电枢回路的端电压  $U_1 = 50\%U_N$  的人为机械特性；
- (4) 当  $\Phi = 80\%\Phi_N$  时的人为机械特性。

解：

2.9 某并励直流电动机  $P_N = 10kW$ ， $U_N = 220V$ ， $I_N = 54A$ ， $n_N = 1000r/min$ ，

$I_{fN} = 1.6A$ ，电枢回路的总电阻为  $0.393\Omega$ 。保持额定负载转矩不变。不计电枢反应和电感的影响。

- (1) 若电枢回路突然串入  $R_\Omega = 1.3\Omega$  的调节电阻，求  $R_\Omega$  加入瞬间时的电枢电流以及进入新稳态后的电枢电流与转速；
- (2) 若仅在励磁回路中串入电阻，使磁通减少 10%，试计算磁通突然减少瞬间的电枢电流以及进入新稳态后的电枢电流与转速。

解：(1) 若电枢回路突然串入电阻  $R_\Omega$ ，则由于机械惯性，转速来不及变化，因而感应电势未发生变化，即

$$E_a = E_{aN} = U_N - R_a I_{aN} = 220 - 0.393 \times 52.4 = 199.4V$$

其中，额定电枢电流  $I_{aN} = I_N - I_{fN} = 54 - 1.6 = 52.4A$ 。

$R_{\Omega}$  加入瞬间时的电枢电流最小，其数值为

$$I_{a\min} = \frac{U_N - E_a}{R_a + R_{\Omega}} = \frac{220 - 199.4}{0.393 + 1.3} = 12.17A$$

由于进入稳态后负载转矩保持不变，因此，稳态电枢电流不变，即

$$I'_a = I_{aN} = 52.4A$$

进入稳态后的转速可通过下式计算

$$n' = \frac{E'_a}{E_{aN}} n_N = \frac{U_N - (R_a + R_{\Omega})I'_a}{U_N - R_a I_{aN}} n_N = \frac{220 - (0.393 + 1.3) \times 52.4}{199.4} \times 1000 = 658.4r/min$$

(2) 若使磁通减少 10%，则在磁通突然减少瞬间，由于机械惯性，转速来不及变化，根据  $E_a = C_e \Phi n$  可知，感应电势与磁通成正比，即

$$E''_a = \frac{\Phi''}{\Phi_N} E_{aN} = \frac{0.9}{1} \times 199.4 = 179.46V$$

磁通突然减少瞬间的电枢电流最大，其数值为

$$I_{a\max} = \frac{U_N - E''_a}{R_a} = \frac{220 - 179.46}{0.393} = 103.16A$$

由于进入稳态后负载转矩保持不变，故稳态电枢电流为

$$I''_a = \frac{\Phi_N}{\Phi} I_{aN} = \frac{1}{0.9} \times 52.4 = 58.22A$$

进入稳态后的感应电势为

$$E'''_a = U_N - R_a I''_a = 220 - 0.393 \times 58.22 = 197.12V$$

进入稳态后的转速可通过下式计算

$$n'' = \frac{E'''_a}{E_{aN}} \frac{\Phi_N}{\Phi''} n_N = \frac{197.12}{199.4} \times \frac{1}{0.9} \times 1000 = 1098.4r/min$$

2.10 两台完全相同的并励直流电机，它们的转轴通过联轴器联结在一起，而电枢均并联在 230V 的直流电网上，转轴上不带任何负载。已知直流电机在 1000r/min 时的空载特性如下表所示：

$I_f(A)$	1.3	1.4
$E_a(V)$	186.7	195.9

电枢回路的总电阻为  $0.1\Omega$ 。机组运行在 1200r/min 时，甲台电机的励磁电流为 1.4A，乙台电机的励磁电流为 1.3A，问：

- (1) 此时哪台电机为发电机，哪台为电动机？
- (2) 总的机械耗和铁耗（即空载损耗）为多少？

解：(1) 由于甲台电机的励磁电流为 1.4A，从 1000r/min 时的空载特性上可得该转速下的感应电势为 195.9V。当转速上升至 1200r/min 时，感应电势变为

$$E_{aA} = 195.9 \times \frac{1200}{1000} = 235.08V$$

同理，可得乙台电机在转速为 1200r/min 时的感应电势为

$$E_{aB} = 186.7 \times \frac{1200}{1000} = 224.04V$$

由于  $E_{aA} > U$ ，而  $E_{aB} < U$ ，因此，甲运行在发电机状态，而乙则运行在电动机状态。

(2) 根据直流电机的功率流程图，两台电机总的机械耗和铁耗等于电动机的电磁功率减去发电机的电磁功率。

对于电动机而言，其电枢电流为

$$I_{aB} = \frac{U - E_{aB}}{R_a} = \frac{230 - 224.06}{0.1} = 59.4A$$

电磁功率为

$$P_{emB} = E_{aB} I_{aB} = 224.04 \times 59.4 = 13308W$$

对于发电机而言，其电枢电流为

$$I_{aA} = \frac{E_{aA} - U}{R_a} = \frac{235.08 - 230}{0.1} = 50.8A$$

电磁功率为

$$P_{emA} = E_{aA} I_{aA} = 235.08 \times 50.8 = 11942W$$

两台电机总的机械耗和铁耗为

$$P_{emB} - P_{emA} = 13308 - 11942 = 1366W$$

### 第3章 习题解答

#### 思考题

3.1 下图中箭头表示转矩与转速的实际方向，试利用电力拖动系统的动力学方程式说明在附图所示的几种情况下，系统可能的运行状态(加速、减速或匀速)。

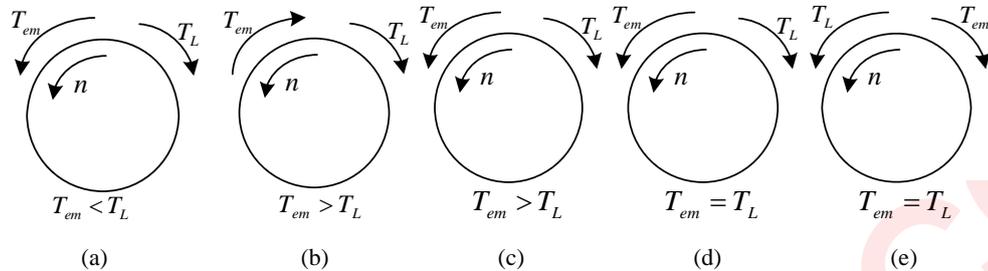


图 3.50 题 3.1 图

答：

3.2 在起重机提升重物与下放重物过程中，传动机构的损耗分别是由电动机承担还是由重物势能承担？提升与下放同一重物时其传动机构的效率一样高吗？

答：

3.3 试指出附图中电动机的电磁转矩与负载转矩的实际方向（设顺时针方向为转速  $n$  的正方向）。

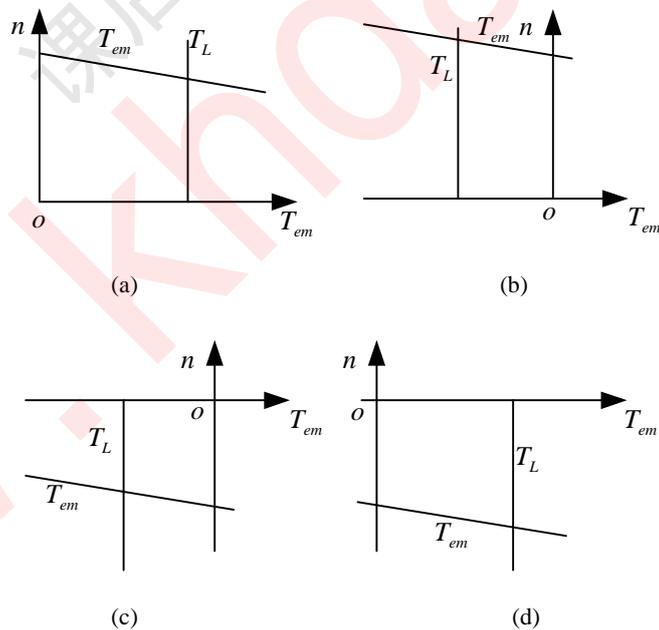


图 3.51 题 3.3 图

答：

3.4 根据电力拖动系统的稳定运行条件，试判断图 3.52 中 A、B、C 三点是否为稳定运行点？

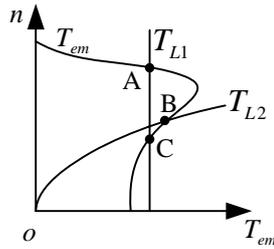


图 3.52 题 3.4 图

答：根据电力拖动系统的稳定运行条件： $\frac{\partial T_{em}}{\partial n} < \frac{\partial T_L}{\partial n}$  可以得出：

系统在 A 点、B 点是稳定的；C 点是不稳定运行点。

3.5 一般他励直流电动机为什么不能直接起动？采用什么样的起动方法最好？

答：

3.6 他励直流电动机拖动恒转矩负载调速，其机械特性和负载转矩特性如图 3.53 所示，试分析当工作点由 A1 向 A 点运行过程中，电动机经过哪些不同的运行状态？

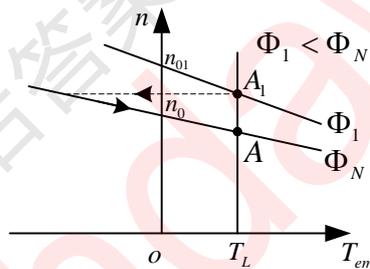


图 3.53 题 3.6 图

答：

3.7 他励直流电动机弱磁升速时，其拖动系统的机电时间常数是否保持不变？说明理由。

答：

3.8 一台他励直流电动机拖动卷扬机运行，当电枢回路外接电源电压为额定电压、且电枢回路外串电阻拖动重物匀速上升时，突然将外加电源电压的极性颠倒，电动机将最终稳定运行在什么状态？重物是提升还是下放？画出相应的机械特性曲线，并说明期间所经历的运行状态。

答：

3.9 采用弱磁升速的他励直流电动机，为什么在负载转矩较大时不但不能实现弱磁升速，而且还出现弱磁降速的现象，试说明理由。

答：根据他励直流电动机改变励磁时的人工机械特性

$$n = \frac{U_N}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e C_T \Phi^2} T_{em}$$

绘出弱磁时他励直流电动机典型的人工机械特性曲线如图 3.54 所示。

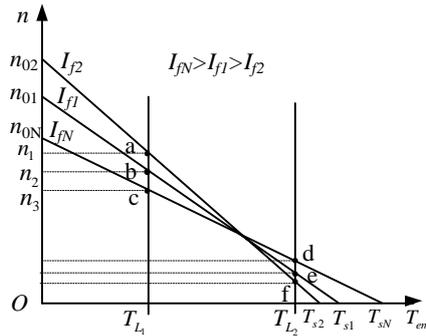


图 3.54 思考题 3.9 图

由图 3.54 可见，一般情况下，即负载转矩低于一定程度（如图中的  $T_{L1}$ ）时，随着励磁电流的减小，转速升高，即弱磁升速。但当负载转矩大于一定程度（如图中的  $T_{L2}$ ）时，则随着励磁电流的减小，转速不但不升高，反而降低。

### 练习题

3.1 由电动机与卷扬机组成的拖动系统如图 3.4 所示。设重物  $G = 4900N$ ，当电动机的转速为  $n = 980r/min$  时，重物的上升速度为  $V = 1.5m/s$ ，电动机转子的转动惯量为  $J = 2kg \cdot m^2$ ，卷筒直径  $D_F = 0.4m$ ，卷筒的转动惯量  $J_F = 1.9kg \cdot m^2$ ，减速机构的转动惯量和钢绳质量可以忽略不计，传动机构的效率  $\eta_c = 0.95$ 。试求：

- (1) 使重物匀速上升时电动机转子轴上的输出转矩；
- (2) 整个系统折算到电动机转子轴上的总飞轮矩  $GD_{\Sigma}^2$ ；
- (3) 使重物以  $1m/s^2$  的加速度上升时电动机转子轴上的输出转矩。

解：(1) 当电动机拖动重物匀速上升时，电机轴上的输出转矩与负载折算至电机轴上的转矩相等。

按照功率的传递方向，于是有

$$T_L \Omega \eta_c = GV$$

即

$$T_L = \frac{60GV}{2\pi n \eta_c} = \frac{60 \times 4900 \times 1.5}{2 \times \pi \times 980 \times 0.95} = 75.39N$$

(2) 根据题意，卷筒的转速为

$$n_F = \frac{60V}{\pi D_F} = \frac{60 \times 1.5}{\pi \times 0.4} = 71.62r/min$$

按照折算前后储存的动能不变的原则，有

$$\frac{1}{2} J_{\Sigma} \Omega^2 = \frac{1}{2} J \Omega^2 + \frac{1}{2} J_F \Omega_F^2 + \frac{1}{2} m_L V^2$$

即

$$\begin{aligned} J_{\Sigma} &= J + J_F \left(\frac{n_F}{n}\right)^2 + \frac{G}{g} \left(\frac{60V}{2\pi n}\right)^2 \\ &= 2 + 1.9 \times \left(\frac{71.62}{980}\right)^2 + \frac{4900}{9.8} \times \left(\frac{60 \times 1.5}{2\pi \times 980}\right)^2 = 2.1169 \text{kg} \cdot \text{m}^2 \end{aligned}$$

又

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

于是转子轴上的总飞轮矩为

$$GD_{\Sigma}^2 = 2.1169 \times 4 \times 9.8 = 82.98 \text{N} \cdot \text{m}^2$$

(3) 考虑到电动机的转速与重物的提升速度之间的关系

$$n = n_F j = \frac{60V}{\pi D_F} j$$

于是得电动机的加速度与重物的提升加速度之间满足

$$\frac{dn}{dt} = \frac{60}{\pi D_F} j a_L$$

其中

$$j = \frac{\pi \times 0.4 \times 980}{60 \times 1.5} = 13.683$$

因此, 当重物以  $a_L = 1 \text{m/s}^2$  的加速度上升时, 电动机的加速度为

$$T = T_L + \frac{GD_{\Sigma}^2}{375} \frac{dn}{dt} = 75.39 + \frac{82.98}{375} \times \frac{60}{\pi \times 0.4} \times 13.683 \times 1 = 219.95 \text{N} \cdot \text{m}$$

3.2 某他励直流电动机的额定数据为:  $P_N = 3 \text{kW}$ ,  $U_N = 220 \text{V}$ ,  $I_N = 18 \text{A}$ ,

$n_N = 1000 \text{r/min}$ 。电枢回路的总电阻为  $0.8 \Omega$ 。试求:

(1) 为使拖动系统在额定状态下能够能耗制动停机, 要求最大制动电流不超过  $2I_N$ , 求制动电阻值;

(2) 若制动电阻与 (1) 相同, 位能性负载转矩为  $T_L = 0.8T_N$ , 求拖动系统能耗制动后的稳定转速;

解: 求解此类题目时, 最好首先根据以知条件绘出相应运行状态的机械特性与运行点, 然后再根据解析几何知识求解所需的物理量或参数。通过这种方法可将电机与拖动的问题转换为解析几何的求解问题。

(1) 根据题意, 绘出直流电机的机械特性如图 3.54 所示。

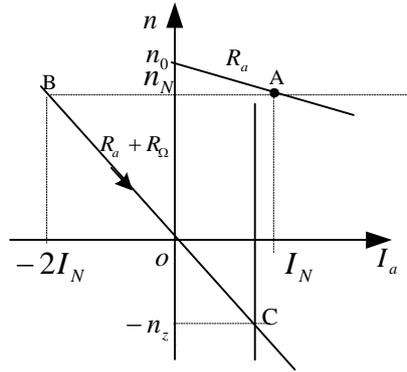


图 3.54 题 3.2 图

根据额定负载时的数据得

$$C_e \Phi_N = \frac{U_N - R_a I_N}{n_N} = \frac{220 - 0.8 \times 18}{1000} = 0.2056$$

能耗制动时的机械特性(或转速特性)为

$$n = \frac{U - (R_a + R_\Omega) I_a}{C_e \Phi} = \frac{0 - (R_a + R_\Omega) I_a}{C_e \Phi_N}$$

将图 3.54 中 B 点的数据代入上式得

$$R_\Omega = -\frac{C_e \Phi_N n_N}{(-2I_N)} - R_a = \frac{0.2056 \times 1000}{2 \times 18} - 0.8 = 4.91 \Omega$$

(2) 对于位能性负载, 根据题意, 所求稳态转速即是图 3.54 中 C 点的转速。

根据  $T_{em} = C_T \Phi I_a$  以及  $T_L = 0.8 T_N$  得电枢电流为

$$I'_a = 0.8 I_N。$$

这样, 将 C 点的数据代入能耗制动时的机械特性得稳态转速为

$$n_z = \frac{-(0.8 + 4.91) \times 0.8 \times 18}{0.2056} = -400 r/min$$

3.3 某他励直流电动机,  $U_N = 220V$ , 电枢回路的总电阻为  $0.032 \Omega$ , 由该电机拖动起重机。当重物上升时,  $U = U_N$ ,  $I_a = 350A$ ,  $n_N = 795r/min$ 。若希望将同一重物以  $n_N = 300r/min$  的转速下放, 保持电枢电压和励磁电流不变, 问此时电枢回路应串入多大的电阻?

解: 根据题意, 绘出直流电机的机械特性如图 3.55 所示。很显然, 转速的反转是通过转速反向的反接制动来实现的。

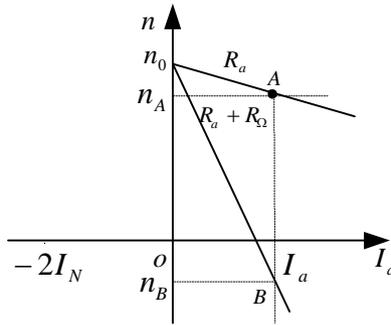


图 3.55 题 3.3 图

由电压平衡方程式可得

$$C_e \Phi_N = \frac{U_N - R_a I_N}{n_N} = \frac{220 - 0.032 \times 350}{795} = 0.2626$$

当电枢回路串电阻实现转速反向的反接制动时，相应的机械特性为

$$n = \frac{U_N - (R_a + R_\Omega) I_a}{C_e \Phi_N}$$

考虑到负载转矩不变，由  $T_{em} = C_T \Phi I_a$  可得： $I_{aB} = I_a = 350A$ 。

于是

$$\frac{220 - (0.032 + R_\Omega) \times 350}{0.2626} = -300$$

即

$$R_\Omega = 0.822\Omega$$

3.4 一台他励直流电动机的额定数据如下： $P_N = 30kW$ ， $U_N = 440V$ ，

$I_N = 75A$ ， $n_N = 1100r/min$ ，电枢回路的总电阻为  $0.3\Omega$ 。

(1) 电动机拖动一位能性负载在反接时作回馈制动下放， $I_a = 50A$ ，下放转速为  $1200rpm$ ，问电枢回路应串联多大的电阻？

(2) 若串联同 (1) 一样的电阻，电动机拖动反抗性负载，负载电流如 (1) 相同，求反接制动时，其下放的稳定速度为多少？

(3) 对位能性负载，采用能耗制动，要确保最大制动电流不超过  $2I_N$ ，制动电阻应选多大？转速为零时，若让拖动继续反转，其下放的稳定转速为多少？

解：根据题意，绘出直流电机的机械特性如图 3.56 所示。

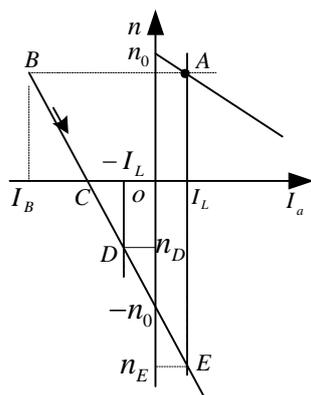


图 3.56 题 3.4 图

由电压平衡方程式可得

$$C_e \Phi_N = \frac{U_N - R_a I_N}{n_N} = \frac{440 - 0.3 \times 75}{1100} = 0.3795$$

(1) 当电动机拖动位能性负载作反接回馈下放，即拖动系统运行在图 3.56 中的 E 点时，相应的机械特性为

$$n = \frac{-U_N - (R_a + R_\Omega) I_a}{C_e \Phi_N} = \frac{-440 - (0.3 + R_\Omega) \times 50}{0.3795} = -1200$$

于是得电枢回路应串联的电阻为

$$R_\Omega = 0.008 \Omega$$

(2) 当电动机拖动反抗性负载，且采用反接制动时，系统稳定下放的速度为

$$n = \frac{-U_N - (R_a + R_\Omega)(-I_a)}{C_e \Phi_N} = \frac{-440 - (0.3 + 0.008) \times (-50)}{0.3795} = -1118.8 r/min$$

(3) 对于位能性负载，若采用能耗制动，其机械特性如图 3.57 所示。

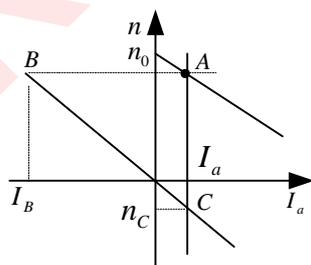


图 3.57 题 3.4 图

图 3.57 中，现已知 B 点的数值为： $(-2I_N, n_A)$ 。其中，A 点的转速为

$$n_A = \frac{U_N - R_a I_a}{C_e \Phi_N} = \frac{440 - 0.3 \times 50}{0.3795} = 1120 r/min$$

对应于能耗制动时的机械特性为

$$n = \frac{0 - (R_a + R_\Omega) I_a}{C_e \Phi_N}$$

将  $B$  点的数值代入上式得

$$1120 = \frac{-(0.3 + R_{\Omega}) \times (-2 \times 75)}{0.3795}$$

即

$$R_{\Omega} = 2.5336\Omega$$

若系统反转，则下放的稳定转速为

$$n_c = \frac{-(0.3 + 2.5336) \times 50}{0.3795} = 373.3r/\text{min}$$

3.5 某他励直流电动机的额定数据如下： $P_N = 18.5kW$ ， $U_N = 220V$ ， $I_N = 103A$ ， $n_N = 500r/\text{min}$ ，电枢回路的总电阻为  $0.18\Omega$ ，最高转速应限制在  $n_{\max} = 1500r/\text{min}$ 。电动机拖动生产机械，采用弱磁调速。试分析：

(1) 若拖动系统运行在恒转矩负载 ( $T_L = T_N$ ) 区，当磁通减少至  $\Phi = \frac{1}{3}\Phi_N$  时，求电动机稳态运行的转速和电枢电流，并说明电动机能否长期运行？

(2) 若拖动系统运行在恒功率负载 ( $P_L = P_N$ ) 区，当磁通减少至  $\Phi = \frac{1}{3}\Phi_N$  时，求电动机稳态运行的转速和电枢电流，并说明电动机能否长期运行？

解：(1) 若直流电机拖动恒转矩负载， $T_L = T_N$ ，当  $\Phi = \frac{1}{3}\Phi_N$  时，

$$C_e \Phi = \frac{1}{3} C_e \Phi_N = \frac{1}{3} \times \frac{U_N - R_a I_N}{n_N} = \frac{1}{3} \times \frac{220 - 0.18 \times 103}{500} = 0.1343$$

考虑到转矩不变，并根据  $T_{em} = C_T \Phi I_a$  可得

$$I_a = \frac{\Phi_N}{\Phi} I_{aN} = 3I_{aN} = 3 \times 103 = 309A$$

则稳态运行的转速为

$$n = \frac{U_N - R_a I_a}{C_e \Phi} = \frac{220 - 0.18 \times 309}{0.1343} = 1224r/\text{min}$$

由于  $I_a > I_N$ ，则电机容易发热，故不能长期运行。

(2) 若直流电机拖动恒功率负载， $P_L = P_N$ ，考虑到电磁功率为：

$$P_{em} = U_N I_a - I_a^2 R_a,$$

由此可见，若忽略空载损耗，则恒功率负载弱磁升速时电枢电流保持不变，即

$$I'_a = I_{aN} = 103A$$

根据电压平衡方程式以及  $\Phi = \frac{1}{3}\Phi_N$ ，于是得稳态转速为

$$n = \frac{U_N - R_a I'_a}{C_e \Phi} = 3 \times \frac{(U_N - R_a I_{aN})}{C_e \Phi_N} = 3n_N = 1500 \text{ r/min}$$

由于  $I_a = I_N$ ，因此电动机可以长期运行。

3.6 他励直流电动机的数据为： $P_N = 29 \text{ kW}$ ， $U_N = 440 \text{ V}$ ， $I_N = 76 \text{ A}$ ， $n_N = 1000 \text{ r/min}$ ，电枢回路的总电阻为  $0.376 \Omega$ ，忽略空载转矩。

(1) 电动机以转速  $500 \text{ r/min}$  吊起  $T_L = 0.8T_N$  的重物，求此时电枢回路应外串的电阻值；

(2) 采用哪几种方法可使负载  $T_L = 0.8T_N$  以  $500 \text{ r/min}$  的速度下放？求每种方法电枢回路应串入的电阻值；

(3) 在负载  $T_L = 0.8T_N$  以  $500 \text{ r/min}$  吊起时，突然将电枢反接，并使电枢电流不超过额定电流，求系统最终稳定的下放速度。

(4) 试用 MATLAB 绘出上述各种情况下直流电动机的机械特性。

解：由电压平衡方程式可得

$$C_e \Phi_N = \frac{U_N - R_a I_{aN}}{n_N} = \frac{440 - 0.376 \times 76}{1000} = 0.4114$$

根据  $T_L = 0.8T_N$  和  $T_{em} = C_T \Phi I_a$  可知， $I_a = 0.8I_N = 0.8 \times 76 = 60.8 \text{ A}$

根据题意，绘出直流电机的机械特性如图 3.58 所示。

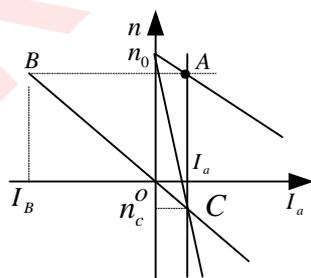


图 3.58 题 3.6 图

(1) 他励直流电动机吊起重物上升时的机械特性为

$$n = \frac{U_N - (R_a + R_\Omega) I_a}{C_e \Phi_N} = \frac{440 - (0.376 + R_\Omega) \times 60.8}{0.4114} = 500$$

由此得电枢回路的外串电阻为

$$R_\Omega = 3.48 \Omega$$

(2) 可采用下列两种方法使重物下放：

a. 若采用转速反向的反接制动，则直流电动机的机械特性为

$$n = \frac{U_N - (R_a + R_\Omega)I_a}{C_e \Phi_N} = \frac{440 - (0.376 + R_\Omega) \times 60.8}{0.4114} = -500$$

由此得电枢回路的外串电阻为

$$R_\Omega = 10.24\Omega$$

b. 若采用能耗制动，则直流电动机的机械特性为

$$n = \frac{0 - (R_a + R_\Omega)I_a}{C_e \Phi_N} = \frac{-(0.376 + R_\Omega) \times 60.8}{0.4114} = -500$$

由此得电枢回路的外串电阻为

$$R_\Omega = 3.00\Omega$$

(3) 根据题意，绘出直流电机的机械特性如图 3.59 所示。

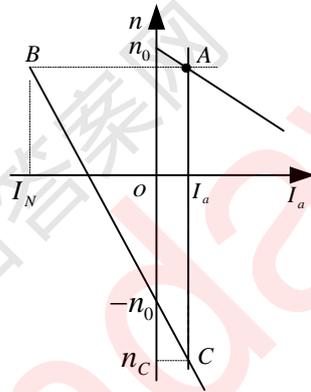


图 3.59 题 3.6 图

图 3.59 中，已知  $B$  点的数据为  $(I_N, n_B)$ ，其中， $n_B = n_A = 500r/min$ 。

写出直流电机的机械特性表达式为

$$n = \frac{-U_N - (R_a + R_\Omega)(-I_N)}{C_e \Phi_N}$$

将  $B$  点的数据代入上式得

$$500 = \frac{-440 - (0.376 + R_\Omega) \times (-76)}{0.4114}$$

由此得反接制动时电枢回路的外串电阻为

$$R_\Omega = 8.12\Omega$$

系统最终稳定的下放速度为

$$n = \frac{-U_N - (R_a + R_\Omega)(0.8I_N)}{C_e \Phi_N} = \frac{-440 - (0.376 + 8.12) \times 60.8}{0.4114} = -2325r/min$$

(5)

3.7 试用 MATLAB 重新计算例题 3.2 的结果，并绘出相应的机械特性和转速曲线。

解：

3.8 一台并励直流电动机的数据为： $P_N = 2.2kW$ ， $U_N = 220V$ ， $n_N = 1500r/min$ ， $\eta_N = 81\%$ ，电枢回路的总电阻为  $1.813\Omega$ ，额定励磁电流  $I_{fN} = 0.414A$ 。当电动机运行在  $1200r/min$  时，系统转入能耗制动状态自动停车。

(1) 试问若保证起始制动电流不超过  $2I_N$ ，电枢回路应串入的电阻值为多少？

(2) 当负载为位能性负载，若负载的总阻力转矩为额定转矩的 0.9 倍。现采用能耗制动方法使电动机以  $n = 220r/min$  的转速匀速下放重物，试问所需制动电阻为多少？

解：(1) 额定电流

$$I_N = \frac{P_N}{U_N \eta_N} = \frac{2200}{220 \times 0.81} = 12.35A$$

额定电枢电流

$$I_{aN} = I_N - I_{fN} = 12.35 - 0.414 = 11.94A$$

由电压平衡方程式可得

$$C_e \Phi_N = \frac{U_N - R_a I_{aN}}{n_N} = \frac{220 - 1.813 \times 11.94}{1500} = 0.1322$$

根据题意，绘出直流电机的机械特性如图 3.58 所示。

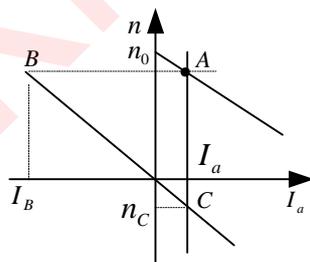


图 3.58 题 3.8 图

图 3.58 中，现已知 B 点的数值为： $(-2I_N, n_A)$ 。其中， $n_A = 1200r/min$ 。

将 B 点的数据代入能耗制动时的机械特性

$$n = \frac{0 - (R_a + R_\Omega) I_{aB}}{C_e \Phi_N}$$

得

$$1200 = \frac{-(1.813 + R_\Omega) \times (-2 \times 11.94)}{0.1322}$$

即

$$R_{\Omega} = 4.83\Omega$$

(2) 当拖动位能性负载时，由题意知： $T_L = 0.9T_N$

又根据  $T_{em} = C_T \Phi I_a$  得：

$$I_a = 0.9I_{aN} = 0.9 \times 11.94 = 10.746A$$

根据能耗制动时的机械特性得

$$-220 = \frac{0 - (1.813 + R_{\Omega}) \times 10.746}{0.1322}$$

于是得能耗制动时所需制动电阻为：

$$R_{\Omega} = 0.893\Omega$$

## 第4章 习题解答

### 思考题

4.1 电流断续时 T-D 系统的机械特性与电流连续时相同吗？为什么？

答：

4.2 对于由相控变流器供电的直流电动机系统，采取什么措施可以减小其电流断续的区域？

答：

4.3 具有四象限运行的 T-D 系统，试说明当系统由正转到反转运行时直流电机和相控变流器各自运行状态的变化情况。

答：

4.4 由单组相控变流器给直流电机供电，可以实现正转到正转回馈制动吗？由单组斩波器供电的直流电动机情况又如何？试说明之。

答：

4.5 由直流斩波器给直流电机供电，直流电机的电枢电压可以通过哪几种方式进行调节？各有何优缺点？

答：

4.6 对于由 PWM 变换器供电的直流电动机系统，对其稳态机械特性的分析通常采用哪些方法，各有何特点？

答：

4.7 对于由 PWM 变换器供电的直流电动机系统，采取什么措施可以减小其电流断续的区域？

答：

### 练习题

4.1 T-D 系统中，已知他励直流电动机的额定数据为： $P_N = 10kW$ ， $U_N = 220V$ ， $n_N = 1500r/min$ ， $\eta_N = 85\%$ ， $r_a = 0.3\Omega$ 。由三相桥式相控变流器供电。整流器二次侧的线电压为 220V。设  $I_{a\min} = 10\%I_N$  为电流连续与断续的分界点。试绘出

(1) 当  $\alpha = \frac{\pi}{6}$  时，他励直流电动机的完整机械特性，要求标出理想的空载转速点以及电流连续与断续分界点的具体数值。

(2) 当  $\beta = \frac{\pi}{6}$  时，重复 (1) 的过程。

(3) 试采用 MATLAB 绘出 (1)、(2) 两种情况下他励直流电动机的机械特性。  
解：他励直流电动机的额定电流为

$$I_N = \frac{P_N}{U_N \eta_N} = \frac{10 \times 10^3}{220 \times 0.85} = 53.48A$$

由他励直流电动机的电压平衡方程式得

$$C_e \Phi_N = \frac{U_N - r_a I_{aN}}{n_N} = \frac{220 - 0.3 \times 53.84}{1500} = 0.135$$

(1) 当  $\alpha = \frac{\pi}{6}$  时,

(i) 若电流连续, 则  $T-D$  系统的机械特性为

$$\begin{aligned} n &= \frac{1.35U_{2l} \cos \alpha}{C_e \Phi_N} - \frac{r_a I_a}{C_e \Phi_N} \\ &= \frac{1.35 \times 220 \times \cos \alpha}{0.135} - \frac{0.3I_a}{0.135} \\ &= 2200 \cos \alpha - 2.22I_a \end{aligned}$$

(ii) 若电流断续, 则  $\alpha = \frac{\pi}{6}$  时的理想空载转速为

$$n_0 = \frac{\sqrt{2}U_{2l}}{C_e \Phi_N} = \frac{\sqrt{2} \times 220}{0.135} = 2305 r/\text{min}$$

当  $I_a = 10\%I_N$  时, 分界点处的转速为

$$n = 2200 \cos \alpha - 2.22I_a = 2200 \times \cos \frac{\pi}{6} - 2.22 \times 0.1 \times 53.48 = 1893 r/\text{min}$$

根据上述结果, 绘出此时的机械特性如图 4. a 所示.

(a) (b)

图 4.

(2) 当  $\beta = \frac{\pi}{6}$  时,

(i) 若电流连续, 则  $T-D$  系统的机械特性为

$$\begin{aligned} n &= \frac{1.35U_{2l} \cos(180^\circ - \beta)}{C_e \Phi_N} - \frac{r_a I_a}{C_e \Phi_N} \\ &= -\frac{1.35 \times 220 \times \cos \beta}{0.135} - \frac{0.3I_a}{0.135} \\ &= -2200 \cos \beta - 2.22I_a \end{aligned}$$

(ii) 若电流断续, 则  $\beta = \frac{\pi}{6}$  时的理想空载转速为

$$n_0 = \frac{\sqrt{2}U_{2l} \sin(\frac{\pi}{6} + \alpha)}{C_e \Phi_N}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\sqrt{2}U_{2l} \sin(\frac{\pi}{6} + \pi - \beta)}{C_e \Phi_N} \\
 &= \frac{\sqrt{2} \times 220 \times \sin \pi}{0.135} = 0
 \end{aligned}$$

当  $I_a = 10\%I_N$  时，分界点处的转速为

$$n = -2200 \cos \beta - 2.22I_a = -2200 \times \cos \frac{\pi}{6} - 2.22 \times 0.1 \times 53.48 = -1917 r / \min$$

根据上述结果，绘出此时的机械特性如图 4. b 所示。

(3)

4.2 斩波器控制直流电动机的数据如下： $I_N = 6.3A$ ， $U_N = 220V$ ，

$n_N = 1000r / \min$ ， $R_\Sigma = 4\Omega$ ， $L_a = 0.018H$ 。斩波器的开关频率为  $f_s = 500Hz$ ，

电源电压为  $U_d = 300V$ 。试计算：

(1) 当占空比为 0.2、0.4、0.6 以及 0.8 时，直流电动机处于正向电动机运行状态时的机械特性；

(2) 应用平均和瞬时稳态电流分析方法，计算当转速为 500r/min 时的平均电流；

(3) 当电枢回路外部串联电感为 20mH 和外部无串联电感时的临界占空比与转速。

解：

## 第5章 习题解答

### 练习题

5.1 有一台三相变压器，额定容量为  $S_N = 5000\text{kVA}$ ，额定电压为  $U_{1N}/U_{2N} = 10\text{kV}/6.3\text{kV}$ ，Y，d联结，试求：

- (1) 一、二侧绕组的额定电流；
- (2) 一、二侧绕组的相电压与相电流。

解：(1) 对于三相变压器，由于  $S_N = \sqrt{3}U_{1N}I_{1N} = \sqrt{3}U_{2N}I_{2N}$ ，于是得一次侧的额定电流为

$$I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}} = \frac{5000 \times 1000}{\sqrt{3} \times 10 \times 1000} = 288.68\text{A}$$

二次侧的额定电流为

$$I_{2N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{2N}} = \frac{5000 \times 1000}{\sqrt{3} \times 6.3 \times 1000} = 458.21\text{A}$$

- (2) 根据一、二次侧三相绕组的联结方式有一次侧的相电压、相电流分别为

$$U_{1N\phi} = \frac{U_{1N}}{\sqrt{3}} = \frac{10}{\sqrt{3}} = 5.77\text{kV}$$

$$I_{1N\phi} = I_{1N} = 288.68\text{A}$$

二次侧的相电压、相电流分别为

$$U_{2N\phi} = U_{2N} = 6.3\text{kV}$$

$$I_{2N\phi} = \frac{I_{2N}}{\sqrt{3}} = \frac{458.21}{\sqrt{3}} = 264.55\text{kV}$$

5.2 单相变压器的额定电压为  $220\text{V}/110\text{V}$ ，如图 5.42 所示。设高压侧外加  $220\text{V}$  的电压，励磁电流为  $I_m$ ，主磁通为  $\Phi_m$ 。若 X 与 x 连接在一起，在 Ax 端外加  $330\text{V}$  的电压，此时励磁电流、主磁通各为多少？若 X 与 x 连接在一起，Aa 端外加  $110\text{V}$  的电压，则励磁电流、主磁通又各为多少？

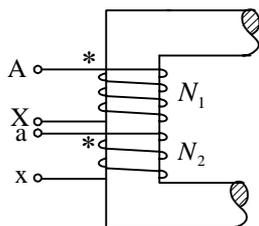


图 5.42 习题 5.2 图

解：根据题意

$$\frac{U_{1N}}{U_{2N}} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{220}{110} = 2$$

即

$$N_2 = \frac{1}{2} N_1$$

当高压侧加 220V 的电压时，由电磁感应定律得

$$U_{AX} = 220 = 4.44 f_1 N_1 \Phi_m$$

(1) 当将 X 与 x 连接在一起，在 Ax 端外加 330V 的电压时，根据两个线圈的同名端有

$$U_{Ax} = U_{AX} + U_{ax} = 330$$

即

$$4.44 f_1 N_1 \Phi'_m + 4.44 f_1 N_2 \Phi'_m = 330$$

于是

$$\Phi'_m = \frac{330}{4.44 f_1 (N_1 + N_2)} = \frac{330 \times 2}{3 \times 4.44 f_1 N_1} = \Phi_m$$

由于磁通不变，根据同名端得下列磁势平衡方程式为

$$N_1 I'_0 + N_2 I'_0 = N_1 I_m$$

从而有

$$I'_0 = \frac{N_1 I_m}{(N_1 + N_2)} = \frac{2}{3} I_m$$

(2) 当将 X 与 x 连接在一起，Aa 端外加 110V 的电压时，根据两个线圈的同名端有

$$U_{Ax} = U_{AX} - U_{ax} = 110$$

即

$$4.44 f_1 N_1 \Phi''_m - 4.44 f_1 N_2 \Phi''_m = 110$$

于是

$$\Phi''_m = \frac{110}{4.44 f_1 (N_1 - N_2)} = \frac{110 \times 2}{4.44 f_1 N_1} = \Phi_m$$

由于磁通不变，根据同名端得下列磁势平衡方程式为

$$N_1 I''_0 - N_2 I''_0 = N_1 I_m$$

从而有

$$I_0'' = \frac{N_1 I_m}{(N_1 - N_2)} = 2I_m$$

5.3 变压器出厂前要进行“极性”实验，其接线如图 5.43 所示。在 AX 端外加电压，若将 X-x 相连，用电压表测量 Aa 之间的电压。设变压器的额定电压为 220/110V，若 A、a 为同名端（或同极性端），电压表的读数为多少？若两者不为同名端，电压表的读数又为多少？

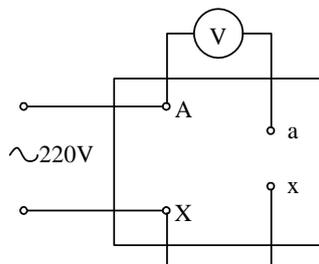


图 5.43 题 5.3 图

解：(1) 若 A、a 为同名端，则一次侧线圈 AX 与二次侧线圈 ax 反向串联，则电压表的读数为

$$U_{Aa} = U_{AX} - U_{ax} = 220 - 110 = 110V$$

(2) 若 A、a 为非同名端，则一次侧线圈 AX 与二次侧线圈 ax 顺向串联，则电压表的读数为

$$U_{Aa} = U_{AX} + U_{ax} = 220 + 110 = 330V$$

5.4 有一台 Y, d11 联结的三相变压器， $S_N = 8000kVA$ ， $f_N = 50Hz$ ， $U_{1N}/U_{2N} = 121kV/6.3kV$ 。空载试验在低压侧进行，当外加电压为额定值时，空载电流为  $I_0 = 8.06A$ ，空载损耗为  $p_0 = 11.6kW$ ；短路试验在高压侧进行，当短路电流为额定值时，短路电压  $U_k = 12705V$ ，短路损耗  $p_k = 64kW$ 。设折算到同一侧后，高、低压绕组的电阻和漏抗分别相等。试求：

- (1) 变压器参数的实际值；
- (2) 满载且  $\cos \varphi_2 = 0.8$ （滞后）时的电压变化率和效率。

(3) 试编写 MATLAB 程序，绘出  $\cos \varphi_2 = 0.8$ （滞后）以及  $\cos \varphi_2 = 0.8$ （超前）时该变压器的外特性和效率曲线。

解：额定电流

$$I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}} = \frac{8000 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 121 \times 10^3} = 38.17A$$

$$I_{2N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{2N}} = \frac{8000 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 6.3 \times 10^3} = 733.14A$$

额定相电流

$$I_{1N\phi} = I_{1N} = 38.17A$$

$$I_{2N\phi} = \frac{I_{2N}}{\sqrt{3}} = \frac{733.14}{\sqrt{3}} = 423.28A$$

额定相电压

$$U_{1N\phi} = \frac{121 \times 10^3}{\sqrt{3}} = 68.86kV$$

$$U_{2N\phi} = U_{2N} = 6.3kV$$

变压器的变比

$$k = \frac{U_{1N\phi}}{U_{2N\phi}} = \frac{68.86}{6.3} = 10.93$$

(1) 折算到一次侧的参数为:

每相的空载损耗

$$P_{0\phi} = \frac{11.6}{3} = 3.87kW$$

每相的空载电流

$$I_{20\phi} = \frac{8.06}{\sqrt{3}} = 4.65A$$

激磁参数为:

$$z'_m = \frac{U_{2N\phi}}{I_{20\phi}} = \frac{6300}{4.65} = 1354.84\Omega$$

$$r'_m = \frac{P_{0\phi}}{I_{20\phi}^2} = \frac{3.87 \times 10^3}{4.65^2} = 178.98\Omega$$

$$x'_m = \sqrt{z_m'^2 - r_m'^2} = \sqrt{1354.84^2 - 178.98^2} = 1342.97\Omega$$

折算到一次侧的激磁参数

$$z_m = k^2 z'_m = 10.93^2 \times 1354.84 = 161855.83\Omega$$

$$r_m = k^2 r'_m = 10.93^2 \times 178.98 = 21381.83\Omega$$

$$x_m = k^2 x'_m = 10.93^2 \times 1342.97 = 160437.77\Omega$$

短路相电压

$$U_{k\phi} = \frac{12705}{\sqrt{3}} = 7335.24V$$

每相的短路损耗

$$p_{k\phi} = \frac{64 \times 10^3}{3} = 21.33 \text{ kW}$$

短路参数

$$z_k = \frac{U_{k\phi}}{I_{k\phi}} = \frac{7335.24}{38.17} = 192.17 \Omega$$

$$r_k = \frac{p_{k\phi}}{I_{kN}^2} = \frac{21.33 \times 10^3}{38.17^2} = 14.64 \Omega$$

$$x_k = \sqrt{192.17^2 - 14.64^2} = 191.61 \Omega$$

一次、二次侧绕组的电阻

$$r_1 = r_2' = \frac{r_k}{2} = \frac{14.64}{2} = 7.32 \Omega$$

一次、二次侧绕组的漏电抗

$$x_1 = x_2' = \frac{x_k}{2} = \frac{191.61}{2} = 95.81 \Omega$$

(2) 当额定负载且  $\cos \varphi_2 = 0.8$  (滞后) 时:

电压变化率

$$\begin{aligned} \Delta u &= \beta \left( \frac{I_{1N\phi} r_k \cos \varphi_2 + I_{1N\phi} x_k \sin \varphi_2}{U_{1N\phi}} \right) \times 100\% \\ &= 1 \times \left( \frac{38.17 \times 14.64 \times 0.8 + 38.17 \times 191.61 \times 0.6}{68.86 \times 10^3} \right) \times 100\% \\ &= 7.02\% \end{aligned}$$

效率

$$\begin{aligned} \eta &= \left( 1 - \frac{p_0 + \beta^2 p_{kN}}{\beta S_N \cos \varphi_2 + p_0 + \beta^2 p_{kN}} \right) \times 100\% \\ &= \left( 1 - \frac{11.6 \times 10^3 + 1^2 \times 64 \times 10^3}{1 \times 8000 \times 10^3 \times 0.8 + 11.6 \times 10^3 + 1^2 \times 64 \times 10^3} \right) \times 100\% \\ &= 98.83\% \end{aligned}$$

(3)

5.5 三相变压器的额定值为 1800kVA,  $U_{1N}/U_{2N} = 6300\text{V}/3150\text{V}$ , Y, d11

联结, 空载损耗  $p_0 = 6.6\text{kW}$ , 短路损耗  $p_k = 21.2\text{kW}$ 。求:

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

(2) 效率最大时的负载系数  $\beta_m$ 。

解: (1) 输出电流  $I_2 = I_{2N}$ , 即负载系数  $\beta = 1$ 。

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

$$\begin{aligned} \eta &= \left(1 - \frac{p_0 + \beta^2 p_{kN}}{\beta S_N \cos \varphi_2 + p_0 + \beta^2 p_{kN}}\right) \times 100\% \\ &= \left(1 - \frac{6.6 \times 10^3 + 1^2 \times 21.2 \times 10^3}{1 \times 1800 \times 10^3 \times 0.8 + 6.6 \times 10^3 + 1^2 \times 21.2 \times 10^3}\right) \times 100\% \\ &= 98.1\% \end{aligned}$$

(2) 效率最大时的负载系数为

$$\beta_m = \sqrt{\frac{p_0}{p_{kN}}} = \sqrt{\frac{6.6}{21.2}} = 0.558$$

5.6 已知三相变压器的联结组号分别为 (1) Y, d3; (2) D, y1。试画出其绕组联结图。

解: 首先画出这两种联结组的相量图, 然后根据相量图画出相应的接线图。

Y, d3 和 D, y1 的相量图如图 5.44 所示, 则相应的接线图如图 5.45 所示。

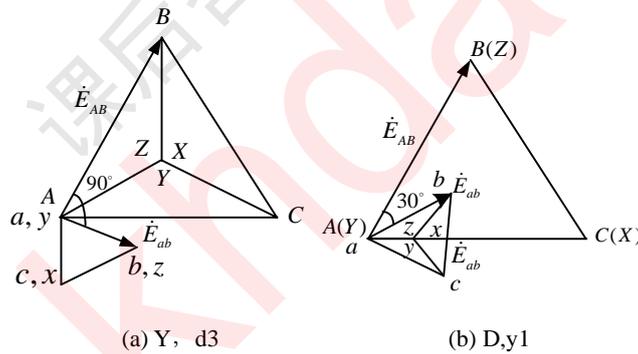


图 5.44 Y, d3 和 D, y1 的相量图

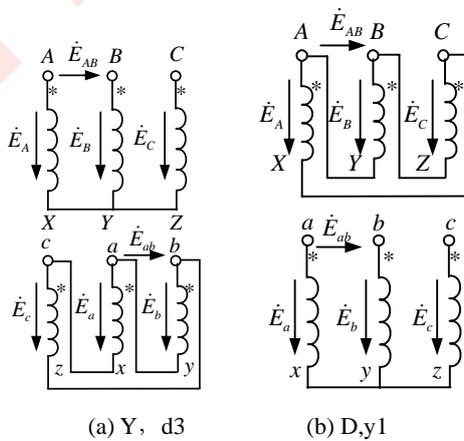


图 5.45 Y, d3 和 D, y1 的接线图

5.7 设有一台 Y, d5 联结的三相心式变压器, 原方线电压与副方线电压之比为

$k$ 。若把原线圈 A 点与副线圈的 a 点连在一起，然后加上电源。试证明：

$$U_{Bb} = U_{ab} \sqrt{1 + \sqrt{3}k + k^2}$$

证明：画出 Y,d5 的相量图如图 5.46 所示。

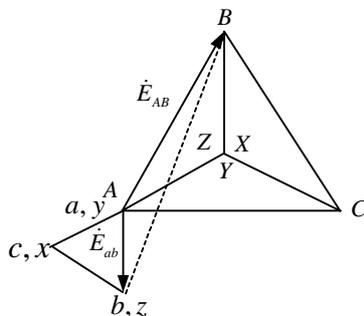


图 5.46 题 5.7 图

由题意得

$$k = \frac{E_{AB}}{E_{ab}}$$

利用相量图,并根据余弦定理得

$$\begin{aligned} U_{Bb}^2 &= U_{AB}^2 + U_{ab}^2 - 2U_{AB}U_{ab} \cos 150^\circ \\ &= (kU_{ab})^2 + U_{ab}^2 + 2kU_{ab}^2 \frac{\sqrt{3}}{2} \end{aligned}$$

即

$$U_{Bb} = U_{ab} \sqrt{1 + \sqrt{3}k + k^2}$$

### 5.8 用相量图判别图 5.44 所示三相变压器的联结组号。

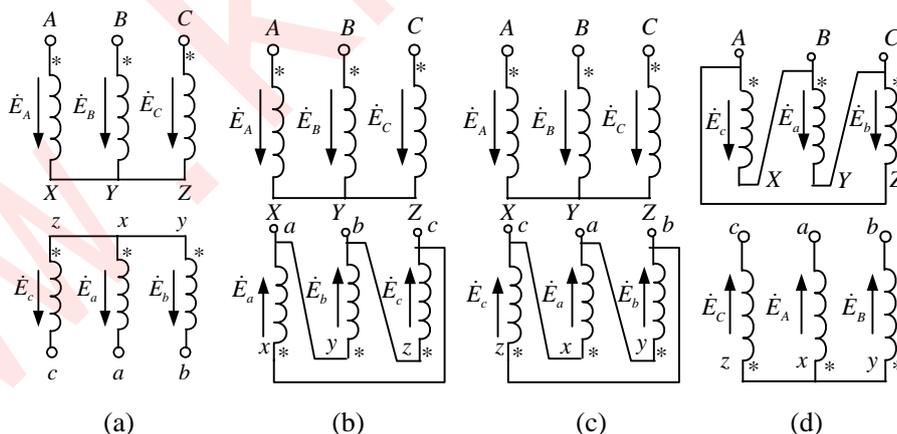
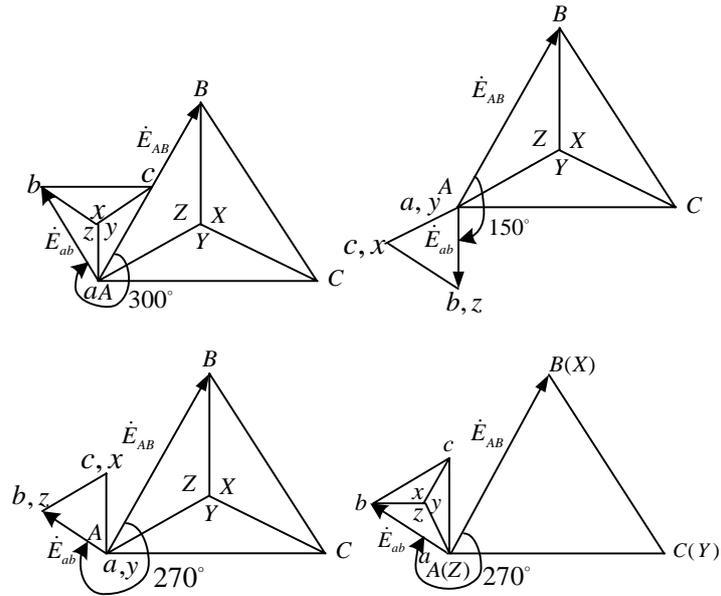


图 5.44 习题 5.8 图

解：画出对应于图 5.44(a)、(b)、(c)、(d)的相量图分别如图 5.45(a)、(b)、(c)、(d)所示。



(a) Y,y10 (b) Y,d5 (c) Y,d9 (d) D,y9

图 5.45 习题 5.8 图

5.9 一台单相自耦变压器的数据为： $U_1 = 220V$ ， $U_2 = 180V$ ， $I_2 = 180A$ ，忽略各种损耗和漏抗压降，试求：

(1) 自耦变压器的输入电流  $I_1$  和公共绕组电流  $I_{12}$ ；

(2) 输入输出功率、绕组的电磁功率、传导功率各为多少？

解：绘出自耦变压器的假定正方向和实际方向如图 5.45 所示。

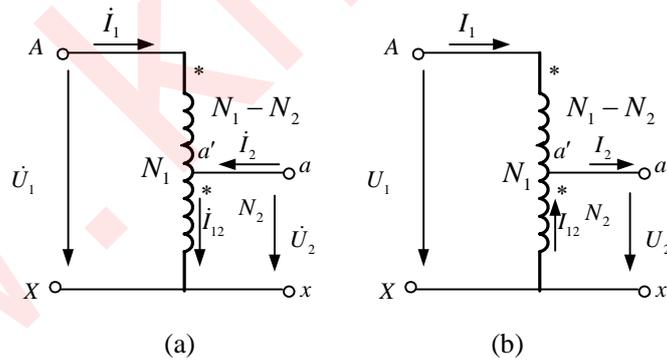


图 5.45 题 5.9 图

自耦变压器的变比为

$$K_A = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{220}{180} = 1.222$$

(1) 忽略励磁电流，则根据磁势平衡方程式有

$$(N_1 - N_2)I_1 + N_2I_{12} = 0 \quad (1)$$

又根据 KCL 得

$$\dot{I}_{12} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 \quad (2)$$

将 (2) 代入 (1) 得自耦变压器的输入电流为

$$\dot{I}_1 = -\frac{1}{K_A} \dot{I}_2 \quad (3)$$

其大小为

$$I_1 = \frac{1}{K_A} I_2 = \frac{1}{1.222} \times 180 = 147.3 \text{ A}$$

将 (3) 代入 (2) 得自耦变压器的公共绕组电流为

$$\dot{I}_{12} = \left(1 - \frac{1}{K_A}\right) \dot{I}_2$$

其大小为

$$I_{12} = \left(1 - \frac{1}{K_A}\right) I_2 = \left(1 - \frac{1}{1.222}\right) \times 180 = 32.7 \text{ A}$$

(2) 忽略损耗, 自耦变压器的输入功率为

$$S_1 = U_1 I_1 = 220 \times 147.3 = 32406 \text{ W}$$

输出功率为

$$S_2 = U_2 I_2 = 180 \times 180 = 32400 \text{ W}$$

绕组的电磁功率为

$$S_{em} = U_2 I_1 = 180 \times 147.3 = 26514 \text{ W}$$

绕组的传导功率为

$$S_c = U_2 I_{12} = 180 \times 32.7 = 5886 \text{ W}$$

## 第6章 习题解答

### 练习题

6.1 已知交流电机定子槽内分别放置了空间互差 $90^\circ$ 电角度、且匝数彼此相等的两相对称绕组 AX、BY，分别对其通以两相对称电流： $i_A = \sqrt{2}I \cos \omega t$  和  $i_B = \sqrt{2}I \cos(\omega t - 90^\circ)$ ，试求：

- (1) 两相对称绕组所产生的合成基波磁势的性质、转速与转向；
- (2) 两相对称绕组所产生的合成三次谐波磁势的性质、转速与转向；
- (3) 若保持 A 相绕组中的电流不变，B 相绕组中的电流变为：

$i_B = \sqrt{2}I \cos(\omega t + 90^\circ)$ ，上述结论将发生怎样的变化？

解：(1) 将 A 相绕组的轴线定义为空间坐标轴的原点，则两相对称绕组各自产生的基波磁势分别为

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

$$f_{B1}(\theta, t) = F_{\phi 1} \cos(\theta - 90^\circ) \cos(\omega t - 90^\circ)$$

式中， $F_{\phi 1} = 0.9 \frac{N_1 k_{w1}}{p} I$  为一相绕组所产生的基波磁势的幅值。

两相绕组所产生的基波合成磁势为

$$\begin{aligned} f_1(\theta, t) &= f_{A1}(\theta, t) + f_{B1}(\theta, t) \\ &= \frac{F_{\phi 1}}{2} \cos(\omega t + \theta) + \frac{F_{\phi 1}}{2} \cos(\omega t - \theta) + \frac{F_{\phi 1}}{2} \cos(\omega t + \theta - 180^\circ) + \frac{F_{\phi 1}}{2} \cos(\omega t - \theta) \\ &= F_{\phi} \cos(\omega t - \theta) \end{aligned}$$

由此可见，基波合成磁势的性质为：圆形旋转磁势；转速为同步速  $n_1 = \frac{60f_1}{p}$ ，

其中， $f_1 = \frac{\omega}{2\pi}$ ；转向为由 A 相轴线转向 B 相轴线。

(2) 两相对称绕组各自产生的三次谐波磁势分别为

$$f_{A3}(\theta, t) = F_{\phi 3} \cos 3\theta \cos \omega t$$

$$f_{B3}(\theta, t) = F_{\phi 3} \cos 3(\theta - 90^\circ) \cos(\omega t - 90^\circ)$$

式中， $F_{\phi 3} = \frac{1}{3} \times 0.9 \frac{N_1 k_{w3}}{p} I$  为一相绕组所产生的三次谐波磁势的幅值。

两相绕组所产生的基波合成磁势为

$$\begin{aligned}
f_3(\theta, t) &= f_{A3}(\theta, t) + f_{B3}(\theta, t) \\
&= \frac{F_{\phi_3}}{2} \cos(\omega t + 3\theta) + \frac{F_{\phi_3}}{2} \cos(\omega t - 3\theta) + \frac{F_{\phi_3}}{2} \cos(\omega t + 3\theta) + \frac{F_{\phi_1}}{2} \cos(\omega t - 3\theta - 180^\circ) \\
&= F_\phi \cos(\omega t + 3\theta)
\end{aligned}$$

由此可见，三次谐波合成磁势的性质为：圆形旋转磁势；转速为同步速

$$n_3 = -\frac{1}{3}n_1 = -\frac{60f_1}{3p}, \text{ 负号表示其转向与基波磁势相反, 即由 B 相轴线转向 A 相}$$

轴线。

(3) 若 A 相绕组中的电流保持不变, B 相绕组中的电流变为:

$$i_B = \sqrt{2}I \cos(\omega t + 90^\circ), \text{ 则}$$

两相对称绕组各自产生的基波磁势分别为

$$f'_{A1}(\theta, t) = F_{\phi_1} \cos \theta \cos \omega t$$

$$f'_{B1}(\theta, t) = F_{\phi_1} \cos(\theta - 90^\circ) \cos(\omega t + 90^\circ)$$

两相绕组所产生的基波合成磁势为

$$\begin{aligned}
f'_1(\theta, t) &= f'_{A1}(\theta, t) + f'_{B1}(\theta, t) \\
&= \frac{F_{\phi_1}}{2} \cos(\omega t + \theta) + \frac{F_{\phi_1}}{2} \cos(\omega t - \theta) + \frac{F_{\phi_1}}{2} \cos(\omega t + \theta) + \frac{F_{\phi_1}}{2} \cos(\omega t - \theta + 180^\circ) \\
&= F_\phi \cos(\omega t + \theta)
\end{aligned}$$

由此可见，基波合成磁势的性质为：圆形旋转磁势；转速为同步速

$$n_1 = -\frac{60f_1}{p}, \text{ 其中, } f_1 = \frac{\omega}{2\pi}; \text{ 负号表示其转向为由 B 相轴线转向 A 相轴线。}$$

两相对称绕组各自产生的三次谐波磁势分别为

$$f'_{A3}(\theta, t) = F_{\phi_3} \cos 3\theta \cos \omega t$$

$$f'_{B3}(\theta, t) = F_{\phi_3} \cos 3(\theta - 90^\circ) \cos(\omega t + 90^\circ)$$

两相绕组所产生的基波合成磁势为

$$\begin{aligned}
f'_3(\theta, t) &= f'_{A3}(\theta, t) + f'_{B3}(\theta, t) \\
&= \frac{F_{\phi_3}}{2} \cos(\omega t + 3\theta) + \frac{F_{\phi_3}}{2} \cos(\omega t - 3\theta) + \frac{F_{\phi_3}}{2} \cos(\omega t + 3\theta - 180^\circ) + \frac{F_{\phi_1}}{2} \cos(\omega t - 3\theta) \\
&= F_\phi \cos(\omega t - 3\theta)
\end{aligned}$$

由此可见，三次谐波合成磁势的性质为：圆形旋转磁势；转速为同步速

$$n_3 = \frac{1}{3}n_1 = \frac{60f_1}{3p}, \text{ 其转向与基波磁势相同, 即由 A 相轴线转向 B 相轴线。}$$

综上所述，当 B 相绕组中的电流在时间相位上改变 $180^\circ$ 时，其基波合成磁势

和三次谐波合成磁势的转向均发生改变。

6.2 一台三相六极异步电动机，额定数据为： $P_N = 7.5kW$ ， $U_N = 380V$ ， $n_N = 962r/min$ ，定子绕组采用 $\Delta$ 接， $50Hz$ ， $\cos\varphi_N = 0.827$ ， $p_{Cu1} = 470W$ ， $p_{Fe} = 234W$ ， $p_{mec} = 45W$ ， $p_{\Delta} = 80W$ 。试求额定负载时的（1）转差率；（2）转子电流的频率；（3）转子铜耗；（4）效率；（5）定子电流。  
解：（1）同步速为

$$n_1 = \frac{60f_1}{p} = \frac{60 \times 50}{3} = 1000r/min$$

额定转差率为

$$s_N = \frac{n_1 - n_N}{n_1} = \frac{1000 - 962}{1000} = 0.038$$

（2）转子电流的频率为转差频率，即

$$f_2 = sf_1 = 0.038 \times 50 = 1.9Hz$$

（3）由功率流程图得

$$\begin{aligned} P_{em} &= P_N + p_{\Delta} + p_{mec} + p_{Cu2} \\ &= P_N + p_{\Delta} + p_{mec} + s_N P_{em} \end{aligned}$$

于是

$$P_{em} = \frac{P_N + p_{\Delta} + p_{mec}}{(1 - s_N)} = \frac{7.5 \times 10^3 + 80 + 45}{(1 - 0.038)} = 7926.2W$$

转子铜耗为

$$p_{Cu2} = s_N P_{em} = 0.038 \times 7926.2 = 301.2W$$

（4）输入电功率为

$$P_1 = P_{em} + p_{Fe} + p_{Cu1} = 7926.2 + 234 + 470 = 8630.2W$$

于是，电动机的效率为

$$\eta_N = \frac{P_N}{P_1} \times 100\% = \frac{7.5 \times 10^3}{8630.2} \times 100\% = 86.9\%$$

（5）根据  $P_N = \sqrt{3}U_N I_{1N} \cos\varphi_N \eta_N$  得定子电流为

$$I_{1N} = \frac{P_N}{\sqrt{3}U_N \cos\varphi_N \eta_N} = \frac{7.5 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 380 \times 0.827 \times 0.869} = 15.86A$$

定子相电流为

$$I_{1N\phi} = \frac{I_{1N}}{\sqrt{3}} = \frac{15.86}{\sqrt{3}} = 9.16A$$

6.3 一台三相四极异步电动机的额定数据为：  $P_N = 10kW$ ，  $U_N = 380V$ ，  $I_N = 19.8A$ ， 定子绕组为 Y 接，  $r_1 = 0.5\Omega$ 。空载试验数据为：  $U_1 = 380V$ ，  $P_0 = 0.425kW$ ，  $I_0 = 5.4A$ ， 机械损耗  $p_{mec} = 0.08kW$ ， 忽略附加损耗。短路试验的数据为：  $U_k = 120V$ ，  $P_k = 0.92kW$ ，  $I_k = 18.1A$ ， 且假定  $x_1 = x'_2$ 。试借助于 MATLAB 编程

(1) 计算三相异步电动机的参数  $r'_2$ 、  $x_{1\sigma}$ 、  $x'_{2\sigma}$ 、  $r_m$  和  $x_m$ ；

(2) 绘出三相异步电动机的固有机械特性。

解：

6.4 某三相、四极、定子绕组采用 Y 接的绕线式异步电动机数据为： $P_N = 150kW$ ，  $U_N = 380V$ ，  $n_N = 1460r/min$ ， 过载能力  $\lambda_M = 3.1$ 。试求：(1) 额定转差率；(2) 临界转差率；(3) 额定转矩；(4) 最大电磁转矩；(5) 试采用实用公式并借助于 MATLAB， 绘制电动机的固有机械特性。

解：(1) 额定转差率

$$s_N = \frac{n_1 - n_N}{n_1} = \frac{1500 - 1460}{1500} = 0.027$$

(2) 根据三相异步电动机机械特性的实用公式

$$\frac{T_{em}}{T_{e\max}} = \frac{2}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s}}$$

得

$$\frac{T_{emN}}{T_{e\max}} = \frac{1}{\lambda_M} = \frac{2}{\frac{s_N}{s_m} + \frac{s_m}{s_N}}$$

于是，临界转差率

$$\begin{aligned} s_m &= s_N (\lambda_M \pm \sqrt{\lambda_M^2 - 1}) \\ &= 0.027 \times (3.1 \pm \sqrt{3.1^2 - 1}) \\ &= \begin{cases} 0.163 \\ 0.0045(\text{舍去}) \end{cases} \end{aligned}$$

(3) 额定转矩

$$T_N = \frac{T_{em}}{\Omega_N} = \frac{60}{2\pi} \times 1000 \frac{P_N}{n_N} = 9550 \frac{P_N}{n_N} = 9550 \times \frac{150}{1460} = 981.16 \text{ Nm}$$

(5) 最大电磁转矩

$$T_{e\max} = \lambda_M T_N = 3.1 \times 981.16 = 3041.60 \text{ N}$$

(6)

6.5 有一台绕线式三相异步电动机,  $f_N = 50\text{Hz}$ ,  $2p = 4$ ,  $n_N = 1450\text{r/min}$ ,

$r_2 = 0.02\Omega$ 。若负载转矩保持不变, 转子转速下降至  $1000\text{r/min}$ 。试求:

(1) 转子回路应外串的电阻值;

(2) 外串电阻后转子电流是原来的多少倍?

解: 额定转差率为

$$s_N = \frac{n_1 - n_N}{n_1} = \frac{1500 - 1450}{1500} = 0.033$$

转速为  $1000\text{r/min}$  时的转差率为

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{1500 - 1000}{1500} = 0.333$$

(1) 根据三相异步电动机机械特性的参数表达式

$$T_{em} = \frac{m_1 p}{2\pi f_1} \frac{U_1^2 \frac{r_2'}{s}}{[(r_1 + \frac{r_2'}{s})^2 + (x_{1\sigma} + x_{2\sigma}')^2]}$$

当电机稳态运行时, 若负载转矩保持不变, 则电磁转矩不变。改变转子电阻, 则只有  $r_2'/s$  保持不变, 才能满足  $T_{em}$  不变。于是有

$$\frac{r_2}{s_N} = \frac{r_2 + R_\Omega}{s}$$

转子回路应外串的电阻为

$$R_\Omega = (\frac{s}{s_N} - 1)r_2 = (\frac{0.333}{0.033} - 1) \times 0.02 = 0.182\Omega$$

(2) 根据

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega_1} = \frac{m_1 I_2'^2 \frac{r_2'}{s}}{2\pi n_1 / 60}$$

转子回路外串的电阻时, 电磁转矩保持不变, 又  $\frac{r_2}{s_N} = \frac{r_2 + R_\Omega}{s}$ , 因此, 转子

电流保持不变，即转子电流与原来数值相等。

课后答案网  
www.khdaw.com

## 第7章 习题解答

### 练习题

7.1 某三相鼠笼式异步电动机的额定数据如下： $P_N = 300\text{kW}$ ， $U_N = 380\text{V}$ ，

$I_N = 527\text{A}$ ， $n_N = 1450\text{r/min}$ ，起动电流倍数 $K_{st} = 6.7$ （定义为起动电流与额定电流之比），起动转矩倍数 $\lambda_{st} = 1.5$ ，过载能力 $\lambda_M = 2.5$ 。定子绕组采用 $\Delta$ 接法。

试求：

(1) 直接起动时的电流与转矩；

(2) 如果采用 $Y-\Delta$ 起动，能带动 $1000\text{Nm}$ 的恒转矩负载起动吗？为什么？

(3) 为使得起动时的最大电流不超过 $1800\text{A}$ 且起动转矩不超过 $1000\text{Nm}$ ，采用自耦变压降压起动。已知起动用自耦变压器的抽头分别为 $55\%$ 、 $64\%$ 、 $73\%$ 三档；试问应取哪一档抽头电压？在所取的这一档抽头电压下起动时的起动转矩和起动电流各为多少？

解：(1) 直接起动时定子绕组中的电流为

$$I_{st} = K_{st} I_N = 6.7 \times 527 = 3530.9\text{A}$$

额定转矩为

$$T_N = 9550 \frac{P_N}{n_N} = 9550 \times \frac{300}{1450} = 1975.86\text{Nm}$$

直接起动时的起动转矩为

$$T_{st} = \lambda_{st} T_N = 1.5 \times 1975.86 = 2963.79\text{Nm}$$

(2) 若采用 $Y-\Delta$ 起动，则起动转矩为

$$T'_{st} = \frac{1}{3} T_{st} = \frac{1}{3} \times 2963.79 = 987.93\text{Nm} < 1000\text{Nm}$$

因此，采用 $Y-\Delta$ 起动不能带动 $1000\text{Nm}$ 的恒转矩负载起动。

(3) 若采用自耦变压器起动，则电网侧的起动电流和起动转矩分别为

$$I_1 = \left(\frac{U_x}{U_{1N}}\right)^2 I_{st}$$

$$T_x = \left(\frac{U_x}{U_{1N}}\right)^2 T_{st}$$

当抽头为 $55\%$ 时，

$$I_1 = 0.55^2 \times 3530.9 = 1068.10\text{A} < 1800\text{A}$$

$$T_x = 0.55^2 \times 2963.79 = 896.55\text{Nm} < 1000\text{Nm}$$

当抽头为 $64\%$ 时，

$$I_1' = 0.64^2 \times 3530.9 = 1446.26A < 1800A$$

$$T_x' = 0.64^2 \times 2963.79 = 1213.97Nm > 1000Nm$$

当抽头为 73%时，

$$I_1'' = 0.73^2 \times 3530.9 = 1881.52A > 1800A$$

$$T_x'' = 0.73^2 \times 2963.79 = 1579.40Nm > 1000Nm$$

由此可见，只有抽头为 64%时的一档才能满足要求。此档的起动电流为 1446.26A，起动转矩为 1213.97 Nm。

7.2 某三相绕线式异步电动机的额定数据如下： $P_N = 30kW$ ， $U_N = 380V$ ，

$n_N = 720r/min$ ， $r_2' = 0.15\Omega$ ， $k_e = k_i = 1.5\Omega$ 。现用转子回路串电阻的方法使

$T_L = T_N$ 时的转速降为  $n = 500r/min$ 。试求：

- (1) 试求应在每相转子绕组内串入的电阻值；
- (2) 定子每相绕组的电流（忽略激磁电流）为多少？
- (3) 试计算电磁功率以及总机械功率。

(4) 试用 MATLAB 编程，绘出异步电动机转子绕组串入电阻前、后的固有机械特性和人工机械特性。

解：(1) 额定转差率为

$$s_N = \frac{n_1 - n_N}{n_1} = \frac{750 - 720}{750} = 0.04$$

转速为 500r/min 时的转差率为

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{750 - 500}{750} = 0.333$$

(1) 根据三相异步电动机机械特性的参数表达式

$$T_{em} = \frac{m_1 p}{2\pi f_1} \frac{U_1^2 \frac{r_2'}{s}}{[(r_1 + \frac{r_2'}{s})^2 + (x_{1\sigma} + x_{2\sigma}')^2]}$$

由于电磁转矩保持额定不变，因此，只有  $r_2'/s$  保持不变，才能满足要求。于是有

$$\frac{r_2}{s_N} = \frac{r_2 + R_\Omega}{s}$$

转子回路外串电阻折算到定子侧的值为

$$R_\Omega' = (\frac{s}{s_N} - 1)r_2' = (\frac{0.333}{0.04} - 1) \times 0.15 = 1.1\Omega$$

外串电阻的实际值为

$$R_{\Omega} = \frac{R'_{\Omega}}{k_e k_i} = \frac{1.1}{1.5 \times 1.5} = 0.489 \Omega$$

(2) 额定转矩为

$$T_N = 9550 \frac{P_N}{n_N} = 9550 \times \frac{30}{720} = 397.92 \text{ Nm}$$

忽略激磁电流, 则  $I_1 = I'_2$ 。又根据

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega_1} = \frac{m_1 I_1'^2 \frac{r'_2}{s}}{2\pi m_1 / 60} = \frac{m_1 I_1'^2 \frac{r'_2}{s}}{2\pi m_1 / 60}$$

由于  $T_L = T_N$ , 且  $\frac{r_2}{s_N} = \frac{r_2 + R_{\Omega}}{s}$ , 因而, 定子电流为

$$I_1 = I_{1N} = \sqrt{T_N \frac{2\pi m_1}{60} \frac{s_N}{m_1 r'_2}} = \sqrt{397.92 \times \frac{2\pi \times 750}{60} \times \frac{0.04}{3 \times 0.15}} = 52.70 \text{ A}$$

(3) 此时电磁功率为

$$P_{em} = m_1 I_{1N}^2 \frac{r'_2}{s_N} = 3 \times 52.70^2 \times \frac{0.15}{0.04} = 31245 \text{ W}$$

总机械功率为:

$$P_{mec} = P_{em} - p_{Cu2} = (1-s)P_{em} = (1-0.333) \times 31244.51 = 20840 \text{ W}$$

(4)

7.3 一台三相绕线式异步电动机, 转子绕组为 Y 接, 其额定数据为:  $P_N = 75 \text{ kW}$ ,  $U_N = 380 \text{ V}$ ,  $n_N = 720 \text{ r/min}$ ,  $I_{1N} = 148 \text{ A}$ ,  $E_{2N} = 213 \text{ V}$ ,  $I_{2N} = 220 \text{ A}$ , 过载能力  $\lambda_M = 2.4$ , 拖动恒转矩负载  $T_L = 0.8T_N$  时, 要求电动机在  $n = 540 \text{ r/min}$  下运行。

(1) 若采用转子串接电阻调速, 试求每相应串入的电阻值;

(2) 若采用改变定子电压调速, 可行吗?

(3) 若采用变频调速, 保持  $U/f = \text{常数}$ , 试求定子绕组所需的频率与电压。

(4) 试用 MATLAB 编程, 绘出 (3) 条件下三相异步电动机的固有机械特性和人工机械特性。

(提示: 转子电阻可根据  $r_2 = \frac{s_N E_{2N}}{\sqrt{3} I_{2N}}$  (转子为 Y 接) 计算)

解: 额定转差率为

$$s_N = \frac{n_1 - n_N}{n_1} = \frac{750 - 720}{750} = 0.04$$

产生最大电磁转矩时的临界转差率可通过下列过程获得。  
根据三相异步电动机机械特性的实用公式

$$\frac{T_{em}}{T_{e\max}} = \frac{2}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s}}$$

得

$$\frac{T_{emN}}{T_{e\max}} = \frac{1}{\lambda_M} = \frac{2}{\frac{s_N}{s_m} + \frac{s_m}{s_N}}$$

于是，转子回路未串任何电阻时的临界转差率为

$$\begin{aligned} s_m &= s_N (\lambda_M \pm \sqrt{\lambda_M^2 - 1}) \\ &= 0.04 \times (2.4 \pm \sqrt{2.4^2 - 1}) \\ &= \begin{cases} 0.183 \\ 0.0087(\text{舍去}) \end{cases} \end{aligned}$$

转子每相的电阻为

$$r_2 = \frac{s_N E_{2N}}{\sqrt{3} I_{2N}} = \frac{0.04 \times 213}{\sqrt{3} \times 220} = 0.0224 \Omega$$

转速为 540r/min 时的转差率为

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{750 - 540}{750} = 0.28$$

解此类题目时，最好首先绘出三相异步电动机相应运行状态的机械特性，然后，将电机拖动问题转换为解析几何问题，由此再求解所要求的物理参数或控制量。

(1) 若采用转子串电阻调速，相应的机械特性如图 7.45 所示。

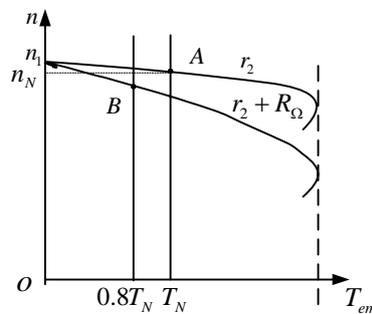


图 7.45 练习题 7.3 图

很显然，根据题意，本题旨在求解图 7.45 中通过 B 点时的机械特性所对应的转子电阻。由于机械特性改变，相应的临界转差率自然发生改变，其数值可根据

实用公式获得。于是

$$\frac{T_{em}}{T_{e\max}} = \frac{2}{\frac{s'_m}{s} + \frac{s}{s'_m}}$$

将  $B$  点的数据代入上式得

$$\frac{0.8T_N}{T_{e\max}} = \frac{0.8}{\lambda_M} = \frac{2}{\frac{s'_m}{s} + \frac{s}{s'_m}}$$

于是得转子串电阻后的临界转差率为

$$\begin{aligned} s'_m &= s \left( \frac{\lambda_M}{0.8} \pm \sqrt{\left( \frac{\lambda_M}{0.8} \right)^2 - 1} \right) \\ &= 0.28 \times \left( \frac{2.4}{0.8} \pm \sqrt{\left( \frac{2.4}{0.8} \right)^2 - 1} \right) \\ &= \begin{cases} 1.632 \\ 0.048(\text{舍去}) \end{cases} \end{aligned}$$

根据

$$s'_m = \frac{r'_2}{\sqrt{r_1^2 + (x_{1\sigma} + x'_{2\sigma})^2}} \propto r'_2 \propto r_2$$

有

$$\frac{s'_m}{s_m} = \frac{r_2 + R_\Omega}{r_2}$$

于是，转子回路应串入的电阻为

$$R_\Omega = \left( \frac{s'_m}{s_m} - 1 \right) r_2 = \left( \frac{1.632}{0.183} - 1 \right) \times 0.0224 = 0.177 \Omega$$

(2) 由  $s'_m = \frac{r'_2}{\sqrt{r_1^2 + (x_{1\sigma} + x'_{2\sigma})^2}}$  可见，当定子电压改变时，临界转差率  $s'_m$  不发生

变化。鉴于  $s = 0.28 > s'_m = 0.183$ ，因此，仅改变定子电压调速不可行。

(3) 若采用变频调速，且保持  $U/f = \text{常数}$ ，相应的机械特性如图 7.46 所示。

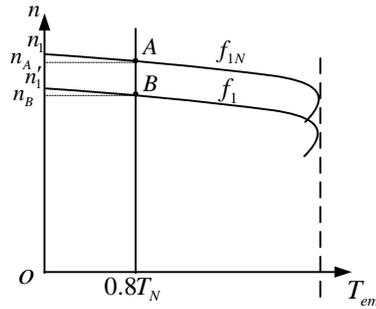


图 7.46 练习题 7.3 图

首先求出在额定频率下运行，且  $T_L = 0.8T_N$  时的转速  $n_A$ 。由实用公式得

$$\frac{0.8T_N}{T_{e \max}} = \frac{0.8}{\lambda_M} = \frac{2}{\frac{s_m}{s_A} + \frac{s_A}{s_m}}$$

于是

$$\begin{aligned} s_A &= s_m \left( \frac{\lambda_M}{0.8} \pm \sqrt{\left( \frac{\lambda_M}{0.8} \right)^2 - 1} \right) \\ &= 0.183 \times \left( \frac{2.4}{0.8} \pm \sqrt{\left( \frac{2.4}{0.8} \right)^2 - 1} \right) \\ &= \begin{cases} 0.0314 \\ 1.067(\text{舍去}) \end{cases} \end{aligned}$$

A 点的转速降为

$$\Delta n_A = n_1 - n_A = s n_1 = 0.0314 \times 750 = 24 r / \min$$

考虑到采用  $U/f = \text{常数}$  的变频调速时，两条机械特性平行即转速降相等，故

$$\Delta n_B = \Delta n_A = 24 r / \min$$

于是，变频后的同步速为

$$n'_1 = n_B + \Delta n_B = 540 + 24 = 564 r / \min$$

相应的频率为

$$f_1 = p \frac{n'_1}{60} = 4 \times \frac{564}{60} = 37.6 \text{ Hz}$$

变频后的定子电压为

$$U'_1 = \frac{f_1}{f_{1N}} U_{1N} = \frac{37.6}{50} \times 380 = 285.76 \text{ V}$$

7.4 一台三相绕线式异步电动机，其额定数据为： $P_N = 22 \text{ kW}$ ， $U_N = 380 \text{ V}$ ，

$n_N = 723 r / \min$ ， $r_2 = 0.058 \Omega$ 。现要求在  $T_L = 196 \text{ Nm}$  时，使电动机以  $n = 806 r / \min$

的速度在回馈制动状态下运行，求转子每相应串入的外加电阻值。

解：根据题意，绘出对应于回馈制动状态下三相异步电动机的机械特性如图 7.47 所示。

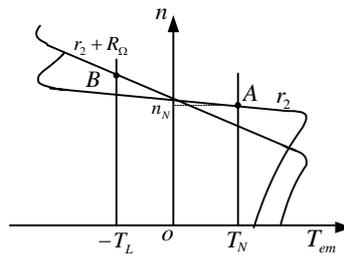


图 7.47 练习题 7.4 图

额定转差率为

$$s_N = \frac{n_1 - n_N}{n_1} = \frac{750 - 723}{750} = 0.036$$

额定电磁转矩为

$$T_N = 9550 \frac{P_N}{n_N} = 9550 \times \frac{22}{723} = 290.59 \text{ Nm}$$

根据 A 点  $(T_N, s_N)$  的数据以及机械特性的实用公式得

$$T_N = \frac{2T_{e \max}}{\frac{s_m}{s_N} + \frac{s_N}{s_m}} \quad (1)$$

考虑到转子串电阻后，最大电磁转矩保持不变，根据 B 点  $(T_L, s_B)$  的数据以及机械特性的实用公式得

$$T_L = \frac{2T_{e \max}}{\frac{s'_m}{s_B} + \frac{s_B}{s'_m}} \quad (2)$$

其中，B 点的转差率为

$$s_B = \frac{n_1 - n_B}{n_1} = \frac{750 - 806}{750} = -0.075$$

由于 A、B 两点均接近同步速，亦即  $\frac{s_N}{s_m} \ll \frac{s_m}{s_N}$ ， $\frac{s_B}{s'_m} \ll \frac{s'_m}{s_B}$ （机械特性可采用近似直线表达式），于是 (1)/(2) 得

$$\frac{T_N}{T_L} = \frac{s'_m / s_B}{s_m / s_N} \quad (3)$$

考虑到  $s_m = \frac{r_2'}{\sqrt{r_1'^2 + (x_{1\sigma} + x_{2\sigma}')^2}} \propto r_2' \propto r_2$ ，则式 (3) 变为

$$\frac{T_N}{T_L} = \frac{s_m' / s_B}{s_m / s_N} = \frac{r_2 + R_\Omega}{r_2} \frac{s_N}{|s_B|}$$

转子每相应串入的外加电阻值为

$$R_\Omega = \left( \frac{T_N |s_B|}{T_L s_N} - 1 \right) r_2 = \left( \frac{290.59}{196} \times \frac{0.075}{0.036} - 1 \right) \times 0.058 = 0.12 \Omega$$

7.5 一台三相绕线式异步电动机，其额定数据为： $P_N = 75\text{kW}$ ， $U_N = 380\text{V}$ ， $n_N = 720\text{r/min}$ ， $I_{1N} = 148\text{A}$ ， $E_{2N} = 213\text{V}$ ， $I_{2N} = 220\text{A}$ ，定子绕组采用 Y 接，过载能力  $\lambda_M = 2.4$ 。

(1) 用该电动机拖动位能性负载，要求负载的下放速度为  $n = 300\text{r/min}$ ，负载转矩等于额定转矩，转子应串入多大的电阻？

(2) 电动机在额定状态下运行，拖动系统采用反接制动停车，若要求制动转矩在起始时为额定转矩的 2 倍，求转子每相应串入的外加电阻值。

(提示：转子电阻可根据  $r_2 = \frac{s_N E_{2N}}{\sqrt{3} I_{2N}}$  (转子为 Y 接) 计算)

解：额定转差率为

$$s_N = \frac{n_1 - n_N}{n_1} = \frac{750 - 720}{750} = 0.04$$

根据三相异步电动机机械特性的实用公式得

$$\frac{T_{emN}}{T_{e\max}} = \frac{1}{\lambda_M} = \frac{2}{\frac{s_N}{s_m} + \frac{s_m}{s_N}}$$

于是，转子回路未串任何电阻时的临界转差率为

$$\begin{aligned} s_m &= s_N (\lambda_M \pm \sqrt{\lambda_M^2 - 1}) \\ &= 0.04 \times (2.4 \pm \sqrt{2.4^2 - 1}) \\ &= \begin{cases} 0.183 \\ 0.0087 (\text{舍去}) \end{cases} \end{aligned}$$

转子每相的电阻为

$$r_2 = \frac{s_N E_{2N}}{\sqrt{3} I_{2N}} = \frac{0.04 \times 213}{\sqrt{3} \times 220} = 0.0224 \Omega$$

(1) 根据题意，绘出三相异步电动机的机械特性如图 7.48 所示。

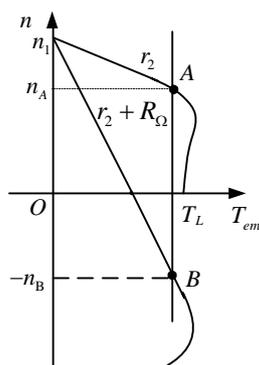


图 7.48 练习题 7.5 图

$B$  点的转差率为

$$s_B = \frac{n_1 - n_B}{n_1} = \frac{750 - (-300)}{750} = 1.4$$

根据  $B$  点的数据并利用机械特性的实用公式得

$$\frac{T_{emN}}{T_{e\max}} = \frac{1}{\lambda_M} = \frac{2}{\frac{s_B}{s'_m} + \frac{s'_m}{s_B}}$$

相应的转子串电阻后的临界转差率为

$$\begin{aligned} s'_m &= s_B (\lambda_M \pm \sqrt{\lambda_M^2 - 1}) \\ &= 1.4 \times (2.4 \pm \sqrt{2.4^2 - 1}) \\ &= \begin{cases} 6.415 \\ 0.305(\text{舍去}) \end{cases} \end{aligned}$$

考虑到  $s_m = \frac{r'_2}{\sqrt{r_1^2 + (x_{1\sigma} + x'_{2\sigma})^2}} \propto r'_2 \propto r_2$ ，于是有

$$\frac{s'_m}{s_m} = \frac{r_2 + R_\Omega}{r_2}$$

于是，转子回路应串入的电阻为

$$R_\Omega = \left(\frac{s'_m}{s_m} - 1\right)r_2 = \left(\frac{6.415}{0.183} - 1\right) \times 0.0224 = 0.763\Omega$$

(2) 根据题意，绘出三相异步电动机的机械特性如图 7.49 所示。

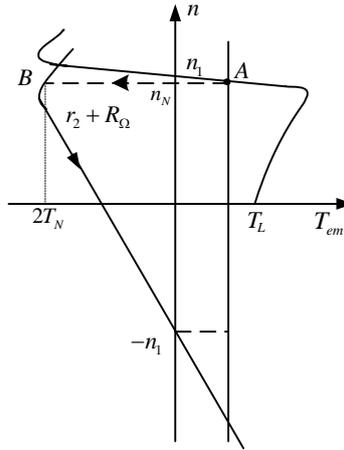


图 7.49 练习题 7.5 图

对应于  $B$  点的转差率为

$$s_B = \frac{-n_1 - n_N}{-n_1} = \frac{-750 - 720}{-750} = 1.96$$

利用  $B$  点的数据并利用机械特性的实用公式得

$$\frac{2T_{emN}}{T_{e\max}} = \frac{2}{\lambda_M} = \frac{2}{\frac{s_B}{s'_m} + \frac{s''_m}{s_B}}$$

相应的反接制动时的临界转差率为

$$\begin{aligned} s''_m &= s_B \left( \frac{\lambda_M}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\lambda_M}{2}\right)^2 - 1} \right) \\ &= 1.96 \times \left( \frac{2.4}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{2.4}{2}\right)^2 - 1} \right) \\ &= \begin{cases} 3.651 \\ 1.053 \end{cases} \end{aligned}$$

根据 (1) 的结论有

当  $s''_m = 3.651$  时, 转子回路应串入的电阻为

$$R_\Omega = \left( \frac{s''_m}{s_m} - 1 \right) r_2 = \left( \frac{3.651}{0.183} - 1 \right) \times 0.0224 = 0.424 \Omega$$

当  $s''_m = 1.053$  时, 转子回路应串入的电阻为

$$R_\Omega = \left( \frac{s''_m}{s_m} - 1 \right) r_2 = \left( \frac{1.053}{0.183} - 1 \right) \times 0.0224 = 0.106 \Omega$$

7.6 某三相绕线式异步电动机的额定数据如下:  $P_N = 55 \text{ kW}$ ,  $U_N = 380 \text{ V}$ ,

$n_N = 580 \text{ r/min}$ ,  $I_{1N} = 121.1 \text{ A}$ ,  $E_{2N} = 212 \text{ V}$ ,  $I_{2N} = 159 \text{ A}$ , 过载能力  $\lambda_M = 2.3$ ,

定子绕组采用 Y 接。试求：

(1) 该电动机用于拖动起重机负载，设转子每转过 35.4 转，则主钩上升 1m。若要求额定负载下，重物以 8m/min 的速度上升，求转子回路应串入的电阻值；

(2) 为了减小起动时的机械冲击，转子回路一般串入预备级电阻。若要求串入预备级电阻后，电动机的起动转矩为额定转矩的 0.4 倍，求预备级电阻值。

(3) 用反接制动使位能性负载下放，若负载的转矩为  $T_L = 0.8T_N$ ，并利用预备级电阻值作为制动电阻，求负载下放时电动机的转速。

(提示：转子电阻可根据  $r_2 = \frac{s_N E_{2N}}{\sqrt{3} I_{2N}}$  (转子为 Y 接) 计算)

解：根据题意，绘出三相异步电动机的机械特性如图 7.50 所示。

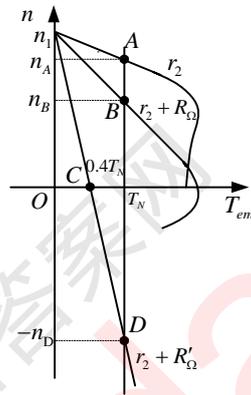


图 7.50 练习题 7.6 图

由  $n_N = 580r/\text{min}$  可知，三相异步电动机的同步速为： $n_1 = 600r/\text{min}$ 。

于是额定转差率为

$$s_N = \frac{n_1 - n_N}{n_1} = \frac{600 - 580}{600} = 0.033$$

转子每相的电阻为

$$r_2 = \frac{s_N E_{2N}}{\sqrt{3} I_{2N}} = \frac{0.033 \times 212}{\sqrt{3} \times 159} = 0.0254\Omega$$

根据机械特性的实用公式得

$$\frac{T_{emN}}{T_{e\max}} = \frac{1}{\lambda_M} = \frac{2}{\frac{s_N}{s_m} + \frac{s_m}{s_N}}$$

于是，转子回路未串任何电阻时的临界转差率为

$$\begin{aligned} s_m &= s_N (\lambda_M \pm \sqrt{\lambda_M^2 - 1}) \\ &= 0.033 \times (2.3 \pm \sqrt{2.3^2 - 1}) \\ &= \begin{cases} 0.144 \\ 0.0076(\text{舍去}) \end{cases} \end{aligned}$$

(1) 当重物以 8m/min 的速度上升时, 相应的转速为  $n = 8 \times 35.4 = 283.2 r/min$ 。于是得 B 点的转差率为

$$s_B = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{600 - 283.2}{600} = 0.528$$

由于转子串电阻前后额定负载转矩不变, 根据机械特性的参数表达式

$$T_{em} = \frac{m_1 p}{2\pi f_1} \frac{U_1^2 \frac{r_2'}{s}}{[(r_1 + \frac{r_2'}{s})^2 + (x_{1\sigma} + x_{2\sigma}')^2]}$$

当电机稳态运行时, 改变转子电阻, 只有  $r_2'/s$  保持不变, 才能满足  $T_{em}$  不变。于是有

$$\frac{r_2}{s_N} = \frac{r_2 + R_\Omega}{s_B}$$

转子回路应外串的电阻为

$$R_\Omega = (\frac{s_B}{s_N} - 1)r_2 = (\frac{0.528}{0.033} - 1) \times 0.0254 = 0.381 \Omega$$

(2) 转子回路串入预备级电阻后, 人工机械特性应经过 C(0.4 $T_N$ , 0) 点。据此, 并利用实用公式便可求出对应于该人工机械特性的临界转差率。过程如下:  
利用实用公式得

$$\frac{0.4T_N}{T_{e\max}} = \frac{0.4}{\lambda_M} = \frac{2}{\frac{s_c}{s_m'} + \frac{s_m'}{s_c}}$$

相应的转子串电阻后的临界转差率为

$$\begin{aligned} s_m' &= s_c \left( \frac{\lambda_M}{0.4} \pm \sqrt{\left(\frac{\lambda_M}{0.4}\right)^2 - 1} \right) \\ &= 1 \times \left( \frac{2.3}{0.4} \pm \sqrt{\left(\frac{2.3}{0.4}\right)^2 - 1} \right) \\ &= \begin{cases} 11.412 \\ 0.088(\text{舍去}) \end{cases} \end{aligned}$$

考虑到  $s_m = \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + (x_{1\sigma} + x_{2\sigma}')^2}} \propto r_2' \propto r_2$ , 于是有

$$\frac{s_m'}{s_m} = \frac{r_2 + R_\Omega}{r_2}$$

于是, 转子回路应串入的预备级电阻为

$$R_{\Omega} = \left(\frac{s'_m}{s_m} - 1\right)r_2 = \left(\frac{11.916}{0.144} - 1\right) \times 0.0254 = 2.076\Omega$$

(3) 对于位能性负载，采用转速反向的反接制动，转子串电阻后负载匀速下放，其人工机械特性必然经过  $D(0.8T_N, -n_D)$  点。考虑到转子回路串入预备级电阻，利用(2)中的结论知，此时的临界转差率为  $s'_m = 11.916$ 。于是，利用实用公式得

$$\frac{0.8T_N}{T_{e\max}} = \frac{0.8}{\lambda_M} = \frac{2}{\frac{s_D}{s'_m} + \frac{s'_m}{s_D}}$$

则

$$\begin{aligned} s_D &= s'_m \left( \frac{\lambda_M}{0.8} \pm \sqrt{\left(\frac{\lambda_M}{0.8}\right)^2 - 1} \right) \\ &= 11.412 \times \left( \frac{2.3}{0.8} \pm \sqrt{\left(\frac{2.3}{0.8}\right)^2 - 1} \right) \\ &= \begin{cases} 2.054 \\ 63.565(\text{舍去}) \end{cases} \end{aligned}$$

负载下放的转速（即  $D$  点）为

$$n_D = n_1(1-s) = 600 \times (1-2.054) = -632.4r/\text{min}$$

## 第8章 习题解答

### 练习题

8.1 有一台同步电动机在额定电压、额定频率、额定负载下运行时，其功率角  $\theta = 30^\circ$ ，设在励磁电流保持不变的情况下，运行情况发生了下述变化，问功率角如何变化？（忽略定子绕组电阻和凸极效应）

- (1) 供电电压下降 5%，负载转矩保持不变；
- (2) 供电频率下降 5%，负载功率保持不变；
- (3) 供电电压和频率均下降 5%，负载转矩保持不变。

解：(1) 当供电电压下降 5% 时，由于负载转矩保持不变，根据矩角特性，于是有

$$T_{em} = \frac{mE_0U_N}{x_t\Omega_1} \sin \theta = \frac{mE_0(0.95U_N)}{x_t\Omega_1} \sin \theta'$$

即

$$\sin \theta' = \frac{\sin \theta}{0.95} = \frac{\sin 30^\circ}{0.95} = 0.526$$

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

(2) 当供电频率下降 5% 时，根据  $E_0 = 4.44f_1N_1k_{w1}\Phi_0$ ，转子直流励磁磁势在定子绕组中的感应电势变为： $E'_0 = 0.95E_{0N}$ ；而根据  $x_t = 2\pi f_1L_c$ ，同步电抗变为：

$$x'_t = 0.95x_t。$$

考虑由于负载功率保持不变，根据功角特性，于是有

$$P_{em} = \frac{mE_0U_N}{x_t} \sin \theta = \frac{m(0.95E_0)U_N}{0.95x_t} \sin \theta'$$

即

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

(3) 当供电电压和频率均下降 5%，根据  $\Omega_1 = \frac{2\pi f_1}{p}$ ，同步角速度变为：

$$\Omega'_1 = 0.95\Omega_1。$$

由于负载功率保持不变，根据矩角特性有

$$T_{em} = \frac{mE_0U_N}{x_t\Omega_1} \sin \theta = \frac{m(0.95E_0)(0.95U_N)}{(0.95x_t)(0.95\Omega_1)} \sin \theta'$$

即

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

8.2 三相隐极式同步发电机的额定容量  $S_N = 60\text{kVA}$ ，Y 接，电网电压  $U_N = 380\text{V}$ ，同步电抗  $x_t = 1.55\Omega$ ，忽略定子绕组电阻。当转子过励， $\cos\varphi_1 = 0.8$ （滞后）， $S = 37.5\text{kVA}$  时，

(1) 画出相量图，求  $E_0$  与功率角  $\theta$ ；

(2) 移去原动机后，画出相量图，并求出定子电流（忽略各种损耗）；

(3) 作同步电动机运行，电磁功率同 (1)，转子直流励磁电流保持不变，画出相量图；

(4) 机械功率保持不变，电磁功率同 (1)，使  $\cos\varphi_1 = 1$ ，画出相量图；并计算此时的  $E_0$ 。

解：解此类题目需注意，在绘制相量图时，若同步电机作发电机运行，则  $\dot{E}_0$  应超前  $\dot{U}$  功率角  $\theta$ ；若同步电机作电动机运行，则  $\dot{E}_0$  应滞后  $\dot{U}$  功率角  $\theta$ 。

(1) 当  $S = 37.5\text{kVA}$  作发电机运行时，绘出相量图如图 8.34a 所示。

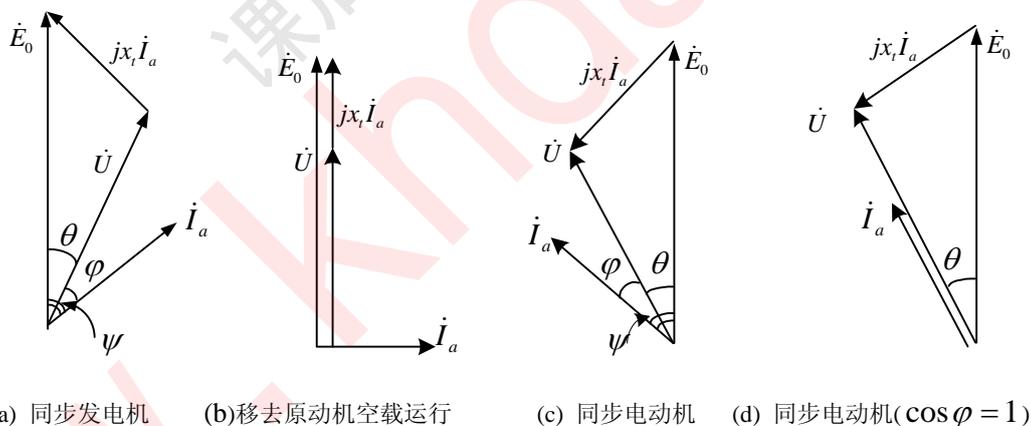


图 8.34 练习题 8.2

定子每相的电枢电流为

$$I_a = \frac{S}{\sqrt{3}U_N} = \frac{37.5 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 380} = 56.98\text{A}$$

由相量图图 8.34 可得定子每相绕组的感应电势为

$$\begin{aligned} E_0 &= \sqrt{(U_{N\phi} \cos\varphi)^2 + (U_{N\phi} \sin\varphi + x_t I_a)^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{380}{\sqrt{3}} \times 0.8\right)^2 + \left(\frac{380}{\sqrt{3}} \times 0.6 + 1.55 \times 56.98\right)^2} \\ &= 281.4\text{V} \end{aligned}$$

内功率因数角为

$$\begin{aligned}\Psi &= \arctan\left(\frac{U_{N\phi} \sin \varphi + x_t I_a}{U_{N\phi} \cos \varphi}\right) \\ &= \arctan\left(\frac{380/\sqrt{3} \times 0.6 + 1.55 \times 56.98}{380/\sqrt{3} \times 0.8}\right) \\ &= 51.38^\circ\end{aligned}$$

又功率因数角

$$\varphi = \arccos(0.8) = 36.87^\circ$$

故功率角为

$$\theta = \Psi - \varphi = 51.38^\circ - 36.78^\circ = 14.60^\circ$$

(2) 移去原动机后, 由于原动机的输入功率为零, 忽略各种损耗, 则  $P_{em} = 0$ 。

根据功角 (或矩角) 特性知,  $\theta = 0^\circ$ 。此时, 绘出相量图如图 8.34b 所示。由图 8.34b 可得

$$\begin{aligned}x_t I'_a &= E_0 - U_N \\ I'_a &= \frac{E_0 - U_{N\phi}}{x_t} = \frac{281.4 - 380/\sqrt{3}}{1.55} = 39.61\text{A}\end{aligned}$$

(3) 作电动机运行时, 绘出相量图如图 8.34c 所示。

考虑到电磁功率以及直流励磁电流与 (1) 相等, 且  $P_{em} = \frac{mE_0 U_1}{x_t} \sin \theta$ , 故此

时的功率角与 (1) 相等, 即  $\theta = 14.60^\circ$ 。若忽略各种损耗, 则  $P_1 = mU_{N\phi} I_a \cos \varphi = P_{em}$

因此, 定子电枢电流也与 (1) 相等, 即  $I_a'' = I_a = 56.98\text{A}$

(4) 当  $\cos \varphi_1 = 1$ , 作同步电动机运行时, 绘出相量图如图 8.34d 所示。

考虑到机械功率不变, 电磁功率与 (1) 相等, 忽略各种损耗, 于是有

$$P_1 = P_{em} = P_{mec} = P_2 = S \cos \varphi = 37.5 \times 0.8 = 30\text{kW}$$

根据  $P_1 = mU_{N\phi} I_1''' \cos \varphi_1 = P_{em}$  可得

$$I_1''' = \frac{P_1}{mU_{N\phi} \cos \varphi_1} = \frac{30 \times 10^3}{3 \times 380/\sqrt{3} \times 1} = 45.45\text{A}$$

由图 8.34d 可得

$$E_0 = \sqrt{U_{N\phi}^2 + (x_t I_1''')^2} = \sqrt{(380/\sqrt{3})^2 + (1.55 \times 45.45)^2} = 231V$$

此时，功率角为

$$\theta = \arctan\left(\frac{x_t I_1'''}{U_{N\phi}}\right) = \arctan\left(\frac{1.55 \times 45.45}{380/\sqrt{3}}\right) = 17.76^\circ$$

8.3 有一台凸极同步电动机接到无穷大电网上，电动机的端电压为额定电压，直轴与交轴同步电抗的标么值（其定义见 5.6 节）分别为： $x_d^* = 0.8$ ， $x_q^* = 0.5$ ，

额定负载时电动机的功率角  $\theta_N = 25^\circ$ 。试求：

- (1) 额定负载时的励磁磁势（标么值）；
- (2) 在额定励磁磁势下电动机的过载能力；
- (3) 若保持负载转矩为额定转矩不变，求电动机保持同步运行时的最低励磁磁势（标么值）；
- (4) 转子失去励磁时，电动机的最大输出功率（标么值）（忽略定子绕组电阻和所有损耗）。

解：凸极式同步电动机的相量图如图 8.35 所示。

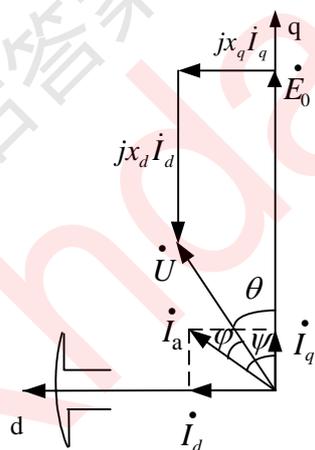


图 8.35 练习题 8.3 图

(1) 由相量图 8.35 得

$$I_q^* x_q^* = U^* \sin \theta$$

于是

$$I_q^* = \frac{U^* \sin \theta_N}{x_q^*} = \frac{1 \times \sin 25^\circ}{0.5} = 0.845$$

$$I_d^* = \sqrt{I^{*2} - I_q^{*2}} = \sqrt{1 - 0.845^2} = 0.535$$

励磁磁势为

$$E_0^* = U^* \cos \theta + x_d^* I_d^* = 1 \times \cos 25^\circ + 0.8 \times 0.535 = 1.334$$

(2) 根据矩角特性

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega_1} = \frac{mE_0U}{x_d\Omega_1} \sin \theta + \frac{1}{2} \frac{mU^2}{\Omega_1} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta$$

额定负载下的电磁转矩为

$$\begin{aligned} T_{emN}^* &= \frac{E_0^*U^*}{x_d^*} \sin \theta_N + \frac{U^{*2}}{2} \left( \frac{1}{x_q^*} - \frac{1}{x_d^*} \right) \sin 2\theta_N \\ &= \frac{1.334 \times 1}{0.8} \times \sin 25^\circ + \frac{1^2}{2} \times \left( \frac{1}{0.5} - \frac{1}{0.8} \right) \times \sin 50^\circ = 0.992 \end{aligned}$$

任意功率角下的矩角特性为

$$\begin{aligned} T_{em}^* &= \frac{E_0^*U^*}{x_d^*} \sin \theta + \frac{U^{*2}}{2} \left( \frac{1}{x_q^*} - \frac{1}{x_d^*} \right) \sin 2\theta_N \\ &= \frac{1.334 \times 1}{0.8} \times \sin \theta + \frac{1^2}{2} \times \left( \frac{1}{0.5} - \frac{1}{0.8} \right) \times \sin 2\theta \\ &= 1.668 \sin \theta + 0.375 \sin 2\theta \end{aligned}$$

上式对  $\theta$  求导数, 且令  $\frac{dT_{em}^*}{d\theta} = 0$  得

$$\frac{dT_{em}^*}{d\theta} = 1.668 \cos \theta + 2 \times 0.375 \cos 2\theta = 0$$

于是得

$$\theta_m = 69.9^\circ$$

最大电磁转矩为

$$T_{e\max}^* = 1.668 \times \sin 69.9^\circ + 0.375 \times \sin(2 \times 69.9^\circ) = 1.808$$

过载能力为

$$\lambda_M = \frac{T_{e\max}^*}{T_{emN}^*} = \frac{1.808}{0.992} = 1.823$$

(3) 当保持负载转矩为额定转矩不变时, 由矩角特性得

$$T_{em}^* = \frac{E_0^*U^*}{x_d^*} \sin \theta + \frac{U^{*2}}{2} \left( \frac{1}{x_q^*} - \frac{1}{x_d^*} \right) \sin 2\theta_N = T_{emN}^*$$

即

$$\frac{E_0^*}{0.8} \sin \theta + \frac{1}{2} \left( \frac{1}{0.5} - \frac{1}{0.8} \right) \sin 2\theta = 0.992$$

令  $\frac{dE_0^*}{d\theta} = 0$  得

$$\theta = 60.3^\circ$$

此时

$$E_0^* = 0.616$$

即电动机保持同步运行时的最低励磁磁势为 0.616。

(4) 当转子失去励磁时,  $E_0^* = 0$ 。此时,

$$P_{em}^* = \frac{U^{*2}}{2} \left( \frac{1}{x_q^*} - \frac{1}{x_d^*} \right) \sin 2\theta_N = \frac{1}{2} \times \left( \frac{1}{0.5} - \frac{1}{0.8} \right) \times \sin 2\theta = 0.375 \sin 2\theta$$

显然, 当  $\theta = 45^\circ$  时,  $P_{em}^*$  最大, 且  $P_{em\max}^* = 0.375$ 。

8.4 一台隐极式同步电动机, 额定负载时的功率角  $\theta = 20^\circ$ , 由于某种原因供电电压下降到  $80\%U_N$ , 试问: 为使功率角  $\theta$  保持在小于  $22^\circ$  范围内, 应加大转子直流励磁电流, 使  $E_0$  上升为原来的多少倍?

解: 由于负载转矩保持不变, 根据  $T_{em} = \frac{mE_0U_1}{x_t\Omega_1} \sin \theta$  可得

$$T_{em} = \frac{mE_0U_{N\phi}}{x_t\Omega_1} \sin 20^\circ = \frac{mE'_0(0.8U_{N\phi})}{x_t\Omega_1} \sin 22^\circ$$

于是有

$$E'_0 = \frac{E_0 \sin 20^\circ}{0.8 \times \sin 22^\circ} = 1.14E_0$$

即应加大转子直流励磁电流, 使  $E_0$  上升为原来的 1.14 倍。

8.5 试画出凸极同步电动机的相量图, 并证明:

$$\tan \psi = \frac{U \sin \varphi + I_a x_q}{U \cos \varphi - I_a r_a}$$

证明: 根据双反应理论, 将凸极同步电动机的电压平衡方程式变形得

$$\begin{aligned} \dot{U} &= \dot{E}_0 + r_a \dot{I}_a + jx_d \dot{I}_d + jx_q \dot{I}_q \\ &= \dot{E}_0 + r_a \dot{I}_a + jx_q \dot{I}_a + j(x_d - x_q) \dot{I}_d \end{aligned}$$

由此画出的相量图如图 8.36 所示。图中,

$$\dot{E}_q = \dot{U} - r_a \dot{I}_a - jx_q \dot{I}_a = \dot{E}_0 + j(x_d - x_q) \dot{I}_d$$

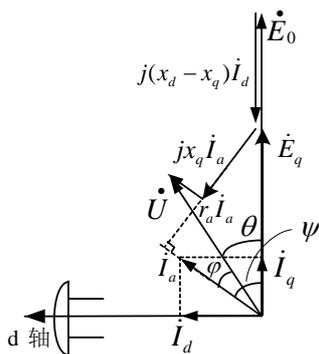


图 8.36 练习题 8.5 图

根据图 8.36 可得

$$\tan \Psi = \frac{U \sin \varphi + x_q I_a}{U \cos \varphi - r_a I_a}$$

8.6 一台三相 Y 接的凸极同步电动机， $U_N = 6000V$ ， $f = 50Hz$ ， $n_N = 750r/min$ ， $I_N = 72.2A$ ， $\cos \varphi_N = 0.8$ （超前）， $x_d = 50.4\Omega$ ， $x_q = 31.5\Omega$ ，忽略定子绕组电阻。试求额定负载下的励磁电势  $E_0$ 、功率角  $\theta$ 、电磁功率和电磁转矩。

解：忽略定子绕组电阻，则凸极同步电动机的相量图如图 8.37 所示。

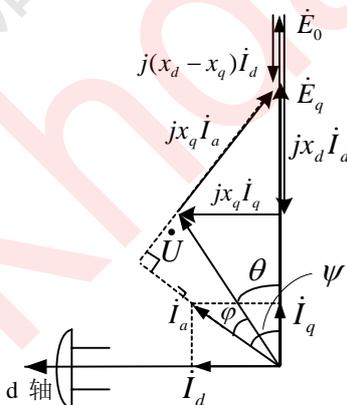


图 8.37 练习题 8.6 图

图中，功率因数角为

$$\varphi = \arccos(0.8) = 36.87^\circ$$

由图 8.37 可得

$$\Psi = \arctan\left(\frac{U_{N\phi} \sin \varphi + x_q I_a}{U_{N\phi} \cos \varphi}\right) = \arctan\left\{\frac{(6000/\sqrt{3}) \times 0.6 + 31.5 \times 72.2}{(6000/\sqrt{3}) \times 0.8}\right\} = 57.52^\circ$$

功率角为

$$\theta = \Psi - \varphi = 57.52^\circ - 36.87^\circ = 20.65^\circ$$

交、直轴电流为

$$I_q = I_a \cos \Psi = 72.2 \times \cos 57.52^\circ = 38.77 A$$

$$I_d = I_a \sin \Psi = 72.2 \times \sin 57.52^\circ = 60.91 A$$

励磁磁势为

$$E_0 = U_{N\phi} \cos \theta + x_d I_d = (6000 / \sqrt{3}) \times \cos 20.65^\circ + 50.4 \times 60.91 = 6311.50 V$$

电磁功率为

$$\begin{aligned} P_{em} &= \frac{mE_0 U_{N\phi}}{x_d} \sin \theta + \frac{1}{2} m U_{N\phi}^2 \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta \\ &= \frac{3 \times 6311.50 \times (6000 / \sqrt{3})}{50.4} \times \sin 20.65^\circ + \frac{1}{2} \times 3 \times (6000 / \sqrt{3})^2 \times \left( \frac{1}{31.5} - \frac{1}{50.4} \right) \times \sin(2 \times 20.65^\circ) \\ &= 600395 W = 600.395 kW \end{aligned}$$

电磁转矩为

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega_1} = \frac{600.395 \times 10^3 \times 60}{2\pi \times 750} = 7648.34 Nm$$

8.7 设有一台凸极同步电动机在额定电压下运行，且自电网吸收功率因数为 0.8(超前)的额定电流，同步电抗的标么值为  $x_d^* = 1.0$ ， $x_q^* = 0.6$ 。试求励磁电势的标么值  $E_0^*$  和功率角  $\theta$ ，并指出该同步电动机是工作在过励状态还是欠励状态？

解：绘出凸极同步电动机的相量图如图 8.38 所示。

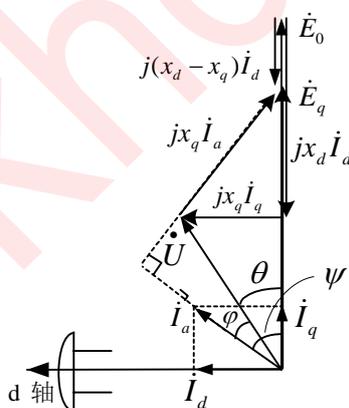


图 8.38 练习题 8.7 图

图中，功率因数角为

$$\varphi = \arccos(0.8) = 36.87^\circ$$

由图 8.37 可得

$$\Psi = \arctan\left(\frac{U_{N\phi}^* \sin \varphi + x_q^* I_a^*}{U_{N\phi}^* \cos \varphi}\right) = \arctan\left\{\frac{1 \times 0.6 + 0.6 \times 1}{1 \times 0.8}\right\} = 56.31^\circ$$

功率角为

$$\theta = \Psi - \varphi = 56.31^\circ - 36.87^\circ = 19.44^\circ$$

直轴电流为

$$I_d^* = I_{aN}^* \sin \Psi = 1 \times \sin 56.31^\circ = 0.832$$

励磁磁势为

$$E_0^* = U_{N\phi}^* \cos \theta + x_d^* I_d^* = 1 \times \cos 19.44^\circ + 1.0 \times 0.832 = 1.775 > 1$$

可见，该同步电动机工作在过励状态。

8.8 设有一三相，Y 接，400V，50Hz，80kVA，1000r/min 的凸极同步电动机。其同步电抗的标幺值为  $x_d^* = 1.106$ ， $x_q^* = 0.76$ 。电枢绕组的电阻忽略不计。

负载转矩为  $600N \cdot m$ 。试求：

- (1) 当  $U^* = 1.0$ ， $E_0^* = 1.2$  时的输入电流标幺值以及功率因数；
- (2) 当  $U^* = 1.0$ ， $E_0^* = 1.4$  时的输入电流标幺值以及功率因数；
- (3) 当  $U^* = 1.0$ ， $E_0^* = 0.9$  时的输入电流标幺值以及功率因数；
- (4) 试用 MATLAB 编程，绘出一般情况下凸极同步电动机的 V 形曲线；
- (5) 试用 MATLAB 编程，绘出上述三种励磁条件下同步电动机的矩角特性。

解：凸极式同步电动机的相量图如图 8.39 所示。

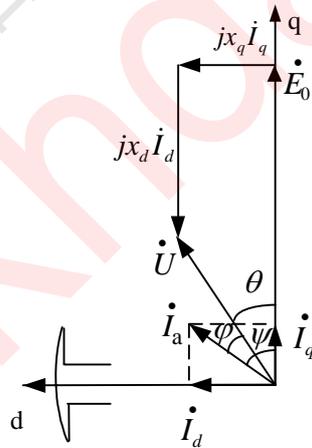


图 8.39 练习题 8.8 图

额定电流为

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

电磁功率为

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

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

(1) 根据功角特性

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

得

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

得功率角为

$$\theta = 33.2^\circ$$

由相量图图 8.39 得

$$I_q^* = \frac{U^* \sin \theta_N}{x_q^*} = \frac{1 \times \sin 33.2^\circ}{0.76} = 0.72$$

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

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

$$\Psi = \arctan\left(\frac{I_d^*}{I_q^*}\right) = \arctan\left(\frac{0.328}{0.72}\right) = 24.49^\circ$$

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

可见, 功率因数为

$$\cos \varphi = \cos(-8.71^\circ) = 0.99 \quad (\text{滞后})$$

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

即

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

得功率角为

$$\theta = 28.9^\circ$$

由相量图图 8.39 得

$$I_q^* = \frac{U^* \sin \theta_N}{x_q^*} = \frac{1 \times \sin 28.9^\circ}{0.76} = 0.721$$

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

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

$$\Psi = \arctan\left(\frac{I_d^*}{I_q^*}\right) = \arctan\left(\frac{0.474}{0.721}\right) = 33.3^\circ$$

$$\varphi = \Psi - \theta = 33.3^\circ - 28.9^\circ = 4.42^\circ$$

可见，功率因数为

$$\cos \varphi = \cos 4.42^\circ = 0.99 \quad (\text{超前})$$

$$(3) \quad P_{em}^* = \frac{E_0^* U^*}{x_d^*} \sin \theta + \frac{1}{2} U^* \left( \frac{1}{x_q^*} - \frac{1}{x_d^*} \right) \sin 2\theta$$

即

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

得功率角为

$$\theta = 45.4^\circ$$

由相量图图 8.39 得

$$I_q^* = \frac{U^* \sin \theta_N}{x_q^*} = \frac{1 \times \sin 45.4^\circ}{0.76} = 0.937$$

$$I_d^* = \frac{E_0^* - U^* \cos \theta_N}{x_d^*} = \frac{1.4 - 1 \times \cos 45.4^\circ}{1.106} = 0.179$$

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

$$\Psi = \arctan\left(\frac{I_d^*}{I_q^*}\right) = \arctan\left(\frac{0.179}{0.937}\right) = 10.8^\circ$$

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

可见，功率因数为

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

8.9 三相隐极式同步电动机，过载能力为 2，该电动机拖动额定负载。忽略电枢电阻，并保持额定励磁不变，试问当外加电压降至多少时，电动机开始失步？

解：额定电磁转矩

$$T_N = \frac{m E_0 U_N}{x_t \Omega_1} \sin \theta_N$$

最大电磁转矩

$$T_{e\max} = \frac{mE_0U_N}{x_t\Omega_1}$$

过载能力

$$\lambda_T = \frac{T_{e\max}}{T_N} = \frac{1}{\sin\theta_N} = 2$$

于是

$$\theta_N = 30^\circ$$

当端电压下降时，最大电磁转矩也将随着下降。设电压下降至 $U'$ 时，最大电磁转矩与额定电磁转矩相等，则同步电动机开始失步。于是有

$$\frac{mE_0U'}{x_t\Omega_1} = \frac{mE_0U_N}{x_t\Omega_1} \sin\theta_N$$

即

$$U' = U_N \sin\theta_N = \frac{1}{2}U_N$$

由此可见，当电压下降至额定电压的一半时，同步电动机开始失步。

8.10 试利用 MATLAB 编程，重新计算例题 8-1，并根据所提供的参数绘出隐极式同步电动机的矩角特性。

解：

## 第 13 章 习题解答

### 练习题

13.1 某连续工作制电动机的额定功率  $P_N = 11kW$ ，采用 B 级绝缘，不变损耗与可变损耗之比为  $k = 0.75$ ，试问当环境温度分别为  $\theta_0 = 50^\circ C$  和  $\theta_0 = 30^\circ C$  时该电动机所能带动恒定连续负载的最大功率为多少？

解：标准环境温度为  $\theta_0 = 40^\circ C$  时，B 级绝缘材料的最高允许温度为  $\theta_m = 130^\circ C$ 。

(1) 当  $\theta = 50^\circ$  时，额定功率应按下式修订

$$\begin{aligned} P'_N &= P_N \sqrt{\frac{\theta_m - \theta_0}{\theta_m - 40^\circ C} (k + 1) - k} \\ &= 11 \times \sqrt{\frac{130 - 50}{130 - 40} \times (0.75 + 1) - 0.75} \\ &= 9.87kW \end{aligned}$$

即该电动机所能带动恒定连续负载的最大功率为  $9.87kW$ 。

(2) 当  $\theta = 30^\circ$  时，额定功率应按下式修订

$$\begin{aligned} P'_N &= P_N \sqrt{\frac{\theta_m - \theta_0}{\theta_m - 40^\circ C} (k + 1) - k} \\ &= 11 \times \sqrt{\frac{130 - 30}{130 - 40} \times (0.75 + 1) - 0.75} \\ &= 12.02kW \end{aligned}$$

即该电动机所能带动恒定连续负载的最大功率为  $12.02kW$ 。

13.2 某绕线式异步电动机用于起重机负载，以  $v = 150m/min$  的速度提升重物  $G = 20000N$  至高度为  $H = 20m$ ，然后将空钩  $G_0 = 1000N$  下放。提升与下放速度相等。提升后停止  $t_0 = 20s$  后再下放，而下放后也停止  $t'_0 = 20s$  后再提升。提升与下放时传动机构的损耗相等，各为提升时有功功率的 5%，电动机允许的过载能力为  $\lambda_m = 2$ ，试求：标准负载持续率时断续周期工作制电动机的功率。

解：重物提升时的负载功率为

$$P_{L1} = \frac{(G + G_0)v}{\eta} = \frac{(20000 + 1000) \times 150 / 60}{(1 - 0.05) / 1} = 55263W = 55.263kW$$

重物提升时间为

$$t_1 = \frac{H}{v} = \frac{20}{150 / 60} = 8s$$

空钩下放时的负载功率为：

$$\begin{aligned} P_{L2} &= -G_0 v + (G + G_0) v \times 5\% \\ &= -1000 \times 150 / 60 + (20000 + 1000) \times 150 / 60 \times 0.05 \\ &= 125W = 0.125kW \end{aligned}$$

考虑到重物提升与下放时的速度相等，故时间自然也相等，即

$$t_2 = t_1 = 8s$$

等效负载功率为

$$P'_{eq} = \sqrt{\frac{P_{L1}^2 t_1 + P_{L2}^2 t_2}{t_1 + t_2}} = \sqrt{\frac{55.263^2 \times 8 + 0.125^2 \times 8}{8 + 8}} = 39.077kW$$

实际负载持续率为

$$ZC\% = \frac{t_1 + t_2}{t_1 + t_0 + t_2 + t'_0} = \frac{8 + 8}{8 + 20 + 8 + 20} = 28.57\%$$

将等效负载功率折算至 25%（最接近）标准负载持续率为

$$P_{eq} = P'_{eq} \sqrt{\frac{ZC}{ZC_b}} = 39.077 \times \sqrt{\frac{28.57}{25}} = 41.774kW$$

选取标准负载持续率为 25%、额定功率为  $P_N = 42kW$  的电动机，其过载能力为

$$\lambda = \frac{P_{L1}}{P_N} = \frac{55.263}{42} = 1.32 < \lambda_M = 2$$

满足要求。

13.3 一台直流电动机，额定功率为  $P_N = 20kW$ ，过载能力  $\lambda_m = 2$ ，发热时间常数  $T_\theta = 30min$ ，额定负载时铁耗与铜耗之比  $k = 1$ 。试校核下列两种情况下能否使用这台电动机：

(1) 短时负载， $P_L = 20kW$ ， $t_g = 20min$ ；

(2) 短时负载， $P_L = 44kW$ ， $t_g = 20min$ ；

解：(1) 将所给出的短时负载折算成连续工作方式下的负载功率为

$$P'_L = P_L \sqrt{\frac{1 - e^{-\frac{t_g}{T_\theta}}}{1 + ke^{-\frac{t_g}{T_\theta}}}} = 20 \times \sqrt{\frac{1 - e^{-\frac{20}{30}}}{1 + 1 \times e^{-\frac{20}{30}}}} = 11.34kW$$

由于

$$P_N = 20kW > P'_L$$

发热校验通过。

实际过载倍数为

$$\lambda'_M = \frac{P_L}{P_N} = \frac{20}{20} = 1 < \lambda_M = 2$$

故这种情况下可以使用该台电动机。

(2) 将所给出的短时负载折算成连续工作方式下的负载功率为

$$P'_L = P_L \sqrt{\frac{1 - e^{-\frac{t_g}{T_\theta}}}{1 + ke^{-\frac{t_g}{T_\theta}}}} = 44 \times \sqrt{\frac{1 - e^{-\frac{20}{30}}}{1 + 1 \times e^{-\frac{20}{30}}}} = 24.95kW$$

由于

$$P_N = 20kW < P'_L$$

发热校验通不过，故这种情况下不能使用该台电动机。

13.4 有一台电动机拟用其拖动一短时工作制负载，负载功率为  $P_L = 18kW$ ，

现有下列两台电动机可供选择：

(1)  $P_N = 10kW$ ， $n_N = 1460r/min$ ， $\lambda_M = 2.5$ ， $\lambda_{st} = 2$ ；

(2)  $P_N = 14kW$ ， $n_N = 1460r/min$ ， $\lambda_M = 2.8$ ， $\lambda_{st} = 2$ ；

试校验过载能力和起动能力，以决定哪一台电动机合适（校验时应考虑电网电压可能下降 10%）。

解：对于电机 1，校验过载能力是否满足

$$P_N > \frac{P_L}{\lambda_M}$$

若满足，则过载能力通过。

考虑到  $\lambda_M$  与  $\lambda_{st}$  皆与电压的平方  $U_1^2$  成正比，因此有

$$\frac{P_L}{\lambda_M} = \frac{18}{0.9^2 \times 2.5} = 8.89kW$$

可见， $P_N = 10kW > \frac{P_L}{\lambda_M} = 8.89kW$ ，故过载能力通过。

对于起动能力，由于电动机所能输出的起动功率为

$$P_{st} = \lambda_{st} P_N = 0.9^2 \times 2 \times 10 = 16.2kW$$

因此， $P_{st} < P_L = 18kW$ ，起动能力不能通过。

对于电机 2：

$$\frac{P_L}{\lambda_M} = \frac{18}{0.9^2 \times 2.8} = 7.94kW$$

可见,  $P_N = 14kW > \frac{P_L}{\lambda_M} = 7.94kW$ , 故过载能力校验通过。

而电动机所能输出的起动功率为

$$P_{st} = \lambda_{st} P_N = 0.9^2 \times 2 \times 14 = 22.68kW$$

因此,  $P_{st} > P_L = 18kW$ , 起动能力可通过, 故第二台电动机合适。

13.5 某电力拖动系统选用三相 4 极绕线式异步电动机来拖动, 其额定数据为:  $P_N = 20kW$ ,  $n_N = 1420r/min$ , 过载能力为  $\lambda_m = 2$ 。已知该电动机在连续周期性变化负载下工作。每一个周期共分为五段: 第一段为起动阶段, 持续时间为  $t_1 = 6s$ , 转矩为  $T_1 = 200Nm$ ; 第二、三阶段是负载值不同的稳速段, 持续时间为  $t_2 = 40s$ ,  $T_2 = 120Nm$ , 而  $t_3 = 50s$ ,  $T_3 = 100Nm$ ; 第四段为制动过程,  $t_4 = 10s$ ,  $T_4 = -100Nm$ ; 第五阶段为停歇段, 其持续时间  $t_5 = 10s$ 。试校验该电动机的温升与过载能力是否合格。

解: 校验温升:

设感应电动机在起、制动时间内的散热恶化系数为  $\alpha = 0.75$ , 在停歇时间内的散热恶化系数  $\beta = 0.25$ , 则等效负载转矩为

$$\begin{aligned} T_{eq} &= \sqrt{\frac{T_1^2 t_1 + T_2^2 t_2 + T_3^2 t_3 + T_4^2 t_4}{\alpha t_1 + t_2 + t_3 + \alpha t_4 + \beta t_5}} \\ &= \sqrt{\frac{200^2 \times 6 + 120^2 \times 40 + 100^2 \times 50 + (-100)^2 \times 10}{0.5 \times 6 + 40 + 50 + 0.5 \times 10 + 0.25 \times 10}} \\ &= 118.7N \cdot m \end{aligned}$$

额定转矩为

$$T_N = 9550 \frac{P_N}{n_N} = 9550 \times \frac{20}{1420} = 134.51N \cdot m$$

可见,  $T_N > T_{eq}$ , 温升校验合格。

过载能力校验:

运行过程中的最大负载转矩为

$$T_{Lmax} = T_1 = 200N \cdot m$$

考虑到  $\lambda_M$  与电压的平方  $U_1^2$  成正比, 且电压下降 10%, 于是电动机所能提供的最大电磁转矩为

$$T_{e\max} = \lambda_M T_N = 0.9^2 \times 2 \times 134.51 = 217.91N \cdot m$$

可见,  $T_{e\max} > T_{L\max}$ , 过载能力校验合格。

13.6 预选一台周期性断续工作方式的他励直流电动机, 其负载持续率为  $ZC\% = 60\%$ , 额定转矩  $T_N = 45Nm$ 。拖动生产机械时, 电动机的转矩曲线  $T = f(t)$  及转速曲线  $n = f(t)$  如图 13.13 所示。其中,  $t_1 = 4s$  段为起动过程;  $t_2 = 21s$  段为额定转速运行段;  $t_3 = 8s$  段为弱磁升速运行段, 转速为  $1.2n_N$ ;  $t_4 = 4s$  段为额定转速运行段;  $t_5 = 2s$  段为停车过程;  $t_6 = 36s$  为停歇段。试校验该电动机冷却方式分别为他扇式和自扇式时发热是否通过。

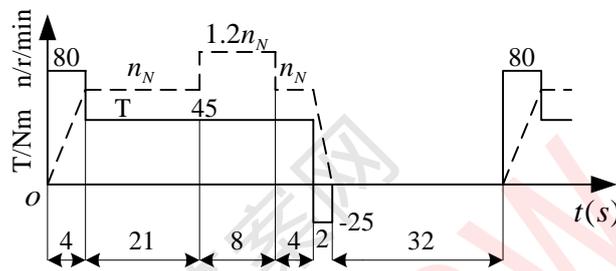


图 13.13 题 13.6 图

解: 实际负载持续率为

$$ZC\% = \frac{t_g}{t_g + t_0} = \frac{4 + 21 + 8 + 4 + 2}{4 + 21 + 8 + 4 + 2 + 32} = 54.93\%$$

$t_3 = 8s$  段为弱磁升速段, 需折算至额定转速  $n_N$ , 折算后的数值为

$$T'_3 = \frac{n}{n_N} T_3 = \frac{1.2n_N}{n_N} \times 45 = 54N \cdot m$$

若采用他扇式电动机, 则等效负载转矩为

$$\begin{aligned} T'_{eq} &= \sqrt{\frac{T_1^2 t_1 + T_2^2 t_2 + T_3'^2 t_3 + T_4^2 t_4 + T_5^2 t_5}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5}} \\ &= \sqrt{\frac{80^2 \times 4 + 45^2 \times 21 + 54^2 \times 8 + 45^2 \times 4 + (-25)^2 \times 2}{4 + 21 + 8 + 4 + 2}} \\ &= 50.84N \cdot m \end{aligned}$$

将等效负载转矩折算至 60% 的标准负载持续率为

$$T_{eq} = T'_{eq} \sqrt{\frac{ZC}{ZC_b}} = 50.84 \sqrt{\frac{54.93}{60}} = 48.64N \cdot m$$

由于  $T_N = 45N \cdot m < T_{eq} = 48.64N \cdot m$ , 故发热通不过。

若采用自扇式电动机, 起、制动时间还需乘以系数  $\alpha = 0.75$  后再计算等效转

矩，则  $T_{eq}$  更大，发热更通不过。

课后答案网  
www.khdaw.com