

船舶电气控制技术

薛士龙 刘以建 蔡志峰 编著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书分8章,主要内容有电力拖动基础,电动机自动控制基础,船舶的甲板机械电力拖动与控制,船舶机舱辅机自动控制,机舱辅机自动调节系统,船舶冷藏集装箱设备的自动控制,船舶舵机装置的自动控制系统,以及船舶电力推进系统。

本书可以作为高等院校电气自动化技术、电气工程及其自动化、测控技术与仪器、数控应用技术、机械设计制造及其自动化、材料成型及控制工程、机电一体化等专业相关课程的教材,也可作为电工技师和职工岗位培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

船舶电气控制技术/薛士龙,刘以建,蔡志峰编著.

—上海:上海交通大学出版社,2018

ISBN 978-7-313-20715-9

I. ①船… II. ①薛… ②刘… ③蔡… III. ①船用电
气设备—电气控制 IV. ①U665

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 294523 号

船舶电气控制技术

编 著:薛士龙 刘以建 蔡志峰

出版发行:上海交通大学出版社

地 址:上海市番禺路951号

邮政编码:200030

电 话:021-64071208

出 版 人:谈 毅

印 制:上海春秋印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:710 mm×1000 mm 1/16

印 张:15

字 数:240千字

版 次:2018年12月第1版

印 次:2018年12月第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-313-20715-9/U

定 价:45.00元

版权所有 侵权必究

告读者:如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话:021-33854186

前 言

本书从工程出发,结合教学需要,较系统地介绍了各种低压电器的工作原理及其在控制线路中的作用,并详细介绍了传统继电器接触器控制系统中应用的三相笼型异步电动机的一些基本控制规律,以及启动、调速、制动的典型控制线路,还有船舶电力拖动与控制系统的组成、工作原理及相关的自动控制技术。通过本课程的学习,使学生掌握电力拖动系统的运行性能和基本计算,熟悉船舶主要机电设备,拖动系统的线路与原理,船舶电气控制的原理和方法,培养学生分析和解决实际问题的能力,为今后从事电气工程领域的技术工作打下基础。

本书可以作为高等院校电气自动化技术、电气工程及其自动化、测控技术与仪器、数控应用技术、机械设计制造及其自动化、材料成型及控制工程、机电一体化等专业相关课程的教材,也可作为电工技师和职工岗位培训教材,也适合从事电气控制的工程技术人员学习使用。

本书由薛士龙、刘以建、蔡志峰编著。本书的编写得到了上海海事大学和上海海事大学附属职业技术学校各位同仁的指导与帮助,在此表示由衷的感谢和敬意。

由于水平有限,编写时间仓促,书中难免有错误或不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者

2018年3月

目 录

第 1 章	电力拖动基础	1
1.1	电力拖动系统运行的基本概念	1
1.2	三相异步电动机的起动、制动与调速	6
1.3	直流电动机的起动、制动与调速	21
第 2 章	电动机的自动控制基础	28
2.1	控制电器的结构原理和功能	28
2.2	电动机的基本保护环节	43
2.3	控制电路的基本控制环节	45
2.4	控制电路基本环节应用	50
第 3 章	船舶的甲板机械电力拖动与控制	59
3.1	船舶甲板机械的特点及驱动与控制方法	59
3.2	起货机的电力拖动与控制的基本要求	62
3.3	起货机的电力拖动控制线路	67
3.4	锚机和系缆设备的电力拖动与控制基本要求	88
第 4 章	船舶机舱辅机自动控制	94
4.1	泵浦的自动控制	94
4.2	空气压缩机自动控制	95
4.3	燃油辅锅炉自动控制	103
4.4	分油机的自动控制	121
4.5	油水分离器自动控制系统	132

第 5 章	机舱辅机自动调节系统	139
5.1	船舶冷藏装置自动控制	139
5.2	室内温度自动调节系统(空调)	144
第 6 章	船舶冷藏集装箱设备的自动控制	152
6.1	概述	152
6.2	制冷系统工作原理	154
6.3	电气控制系统的工作原理	155
6.4	电气控制系统的控制功能	157
6.5	运行过程中的管理	162
第 7 章	船舶舵机装置的自动控制系统	166
7.1	概述	166
7.2	操舵方式及基本工作原理	173
7.3	自动舵的基本类型及其调节规律	178
7.4	自动操舵系统基本要求和工作原理	181
第 8 章	船舶电力推进系统	193
8.1	概述	193
8.2	推进装置	199
8.3	船舶电力推进变频器	202
8.4	螺旋桨	220
8.5	船舶电力推进系统案例	224
	参考文献	232

第 1 章 电力拖动基础

电力拖动基础主要包括电力拖动系统运行、三相异步电动机的拖动与控制、直流电动机的原理与应用等方面的知识。

1.1 电力拖动系统运行的基本概念

在电动机问世以前,人类生产多以风力、水力或蒸汽机作为动力来源。19 世纪 30 年代出现了直流电动机,俄国物理学家 Б.С.雅科比首次以蓄电池供电给直流电动机,作为快艇螺旋桨的动力装置,以推动快艇航行。此后,以电动机作为原动机的拖动方式开始被人们所关注。到 80 年代,由于三相交流电传输更方便、结构简单,以及三相交流异步电动机的发明,使电力拖动得到了发展。20 世纪,随着社会的进步,为提高生产率和改善产品质量,工业部门对机械设备不断提出新的、更高的技术要求。如要求有较宽的速度调节范围、有较高的调速精度、能快速地进行可逆运行以及对位置、加速度、张力、转矩等物理量的可控性能的要求等。以蒸汽机、柴油机等作为原动机的拖动装置很难,甚至不可能达到标准,而应用电力拖动则能很好地满足上述技术要求。因此,电力拖动被广泛用于冶金、石油、交通、纺织、机械、煤炭、轻工、国防和农业生产等部门,在国民经济中占有重要地位,是社会生产不可缺少的一种传动方式。

最简单的电力拖动系统是电动机与生产机械直接联轴,如通风机,离心泵等机械,被称为单轴电力拖动系统;而在更多的场合中,电动机是经传动机构与生产机械相联的,如起重机等,被称为多轴系统。生产机械所拖动的负载具有旋转、直线和往复等不同的运动形式。无论系统为单轴还是多轴、负载的运动形式为直线还是旋转,为了分析的方便,通常都把实际多轴传动的拖动系统

通过折算的方法等效成单轴系统,对于电动机而言,负载最终是以阻转矩的形式作用于电动机转轴上,而这一阻转矩被称为负载转矩。

电力拖动系统有两种运行状态:一是相对稳定状态,此时电动机为恒速旋转或静止不动;二是过渡状态,如电动机起动、制动及转向改变时的转速处于加速或减速的显著变动状态。决定这两种运行状态的因素是电动机的电磁转矩 T 和施加于电动机轴上的负载转矩 T_L 。因此,分析、研究电力拖动系统运行状态的主要依据是:① 电动机的机械特性 $n=f(T)$,即电动机的转速与电磁转矩变化的规律;② 生产机械的负载转矩特性 $n=f(T_L)$,即生产机械的转速与负载转矩之间的关系。

1.1.1 生产机械的负载转矩特性

电动机拖动生产机械运行时,它所产生的电磁转矩 T 必须克服生产机械施加在它的轴上的负载转矩 T_L 。生产机械作用在电动机轴上的负载转矩就其性质(转矩方向)而言,可分为反抗性负载转矩和位能性负载转矩。

反抗性负载转矩的特点,不论电动机的运转是正向还是反向,它总是起着阻碍电动机旋转的作用。当电动机改变旋转方向时,反抗性负载转矩的方向也随之改变。各类泵、通风机等均属于这一类。

位能性负载转矩的特点,负载转矩总是保持一个固定的作用方向,而与电动机旋转方向的改变无关。因此,若当电动机以正向旋转时,它起着阻碍电动机运动的作用,而电动机以反向旋转时,则推助电动机转动。起货机、起锚机等属于这一类负载。

当生产机械的转速变化时,它施加在电动机轴上的负载转矩的大小也会按一定规律变化,即 $n=f(T_L)$ 或 $T_L=f(n)$ 。生产机械的负载转矩一般可分为三种主要类型:

1. 恒转矩负载特性

恒转矩负载特性中,负载转矩与转速无关,即 $T_L = \text{定值}$ 。恒转矩负载特性具有反抗性,例如机床的平移机构;也有位能性的,如起重机械等。特性曲线如图 1-1 所示。

2. 通风机负载特性

通风机类型的负载转矩大致与转速的二次方成正比,即 $T_L = kn^2$ 。式中 k 为比例系数,它的特性曲线是一抛物线。通风机负载特性一般都是反抗性

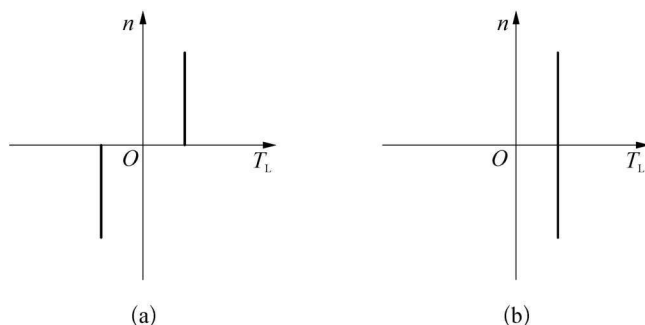


图 1-1 恒转矩负载特性

(a) 反抗性 (b) 位能性

的,如图 1-2 所示。其第 3 象限内的曲线(反转时)与第 1 象限的曲线是对称的。通风机、离心泵、螺旋桨等生产机械都具有这类特性。

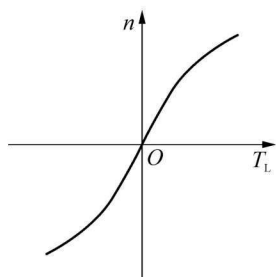


图 1-2 通风机负载特性

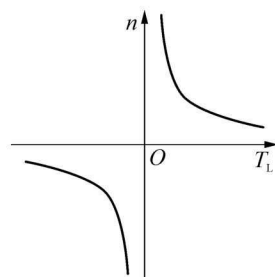


图 1-3 恒功率负载特性

3. 恒功率负载特性

恒功率负载特性的负载转矩与其角速度的乘积基本保持不变,即 $T_L n = \text{定值}$

或
$$T_L = \frac{k}{n}$$

式中, k 为比例系数,其特性曲线是一双曲线,如图 1-3 所示。工程救捞拖轮上的“自动收缆机”具有这种特性。收缆时,缆绳的张力与线速度的乘积基本保持不变。

1.1.2 电动机的工作状态及电力拖动系统运行方程式

1. 电动机的工作状态

电动机的运行状态根据其电磁转矩与转速方向的关系,分为电动运行和

制动运行状态。电动机的电磁转矩方向与转速方向相同时,电磁转矩为克服其轴上的负载转矩而驱动转轴旋转的动力矩,电动机为电动运行状态;而当电动机的电磁转矩方向与转速方向相反时,电磁转矩为阻止其轴上负载运动的阻转矩,电动机处于制动运行状态。

就机械特性曲线而言,当电动机处于电动运行状态时, n 与 T 同为正值或同为负值,曲线位于 $n-T$ 坐标平面的第 1、3 象限;而制动运行时, n 总与 T 的方向相反,曲线位于第 2 与第 4 象限。

对于由电动机及生产机械构成的电力拖动系统,通常将电动机的机械特性曲线与生产机械的负载特性曲线放在同一 $n-T$ 坐标平面上。由于生产机械与电动机同轴旋转,当设定电动机的转速和转矩以逆时针转向为正值时,则生产机械的负载转矩为顺时针方向取正值。因此,对于反抗性负载,因负载转矩总与转速的方向相反,故负载特性曲线在坐标的 1、3 象限;而对于位能性负载,则特性曲线也可能出现在第 2 或第 4 象限。

2. 电力拖动系统运动方程式

根据刚体运动定律,电力拖动系统运行时的任何瞬间,作用于电动机轴上的转矩必须保持平衡,即

$$T - T_L = J \frac{d\Omega}{dt} = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \quad (1-1)$$

式中, J 是拖动系统中折算到电动机轴上的总转动惯量,而 $J \frac{d\Omega}{dt}$ 则是系统的转动惯量储存的动能所产生的加速转矩(或称动态转矩);而 $\frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt}$ 则是以飞轮矩 GD^2 来作为系统转动惯量的量度时的加速转矩的另一种表达式。若以 ΔT 简单表示加速转矩,则电力拖动系统的运动方程式为

$$T - T_L = \Delta T \quad (1-2)$$

式中 T 及 T_L 的正负取值由它们与设定转速的正方向关系来决定。即当假定 n 以逆时针方向为正方向时,则电动机的电磁转矩 T 逆时针方向时取正,顺时针方向取负;而负载转矩 T_L 逆时针方向取负,顺时针方向取正。加速转矩 ΔT 的正负则由 T 和 T_L 的代数和来确定。

当 $T = T_L$ 时, $\Delta T = 0$, ($dn/dt = 0$) 则 $n = 0$ 或 $n = \text{定值}$, 拖动系统处于静止

状态或恒速运行,为稳定运行状态;

当 $T > T_L$ 时, $\Delta T > 0$, $(dn/dt > 0)$ 拖动系统处于加速的过渡过程中;

当 $T < T_L$ 时, $\Delta T < 0$, $(dn/dt < 0)$ 拖动系统处于减速的过渡过程中。

3. 电力拖动系统维持稳定运行的条件

当电力拖动系统由于受到外界干扰(如生产机械负载的变化或电动机外加电压的波动等)时,系统的转速将发生变化而离开原来平衡状态。当干扰消失以后,若系统能自动回复到原来的工作点上,则系统就具备维持稳定运行的条件。

如图 1-4(a)所示的是置于同一 $n-T$ 坐标平面上异步电动机的机械特性曲线和恒转矩负载特性曲线的配合,即电动机带一转矩值为 T_L 的恒转矩负载运行。两条曲线有一交点 A ,在 A 点上, $T = T_L$ 。由电力拖动系统运动方程式可知,动态转矩 $\Delta T = 0$,所以在 A 点上该系统能保持一个恒定的转速 n_1 运行,是系统的一个静态工作点。但系统能否在 A 点维持稳定运行,则需作进一步的分析。

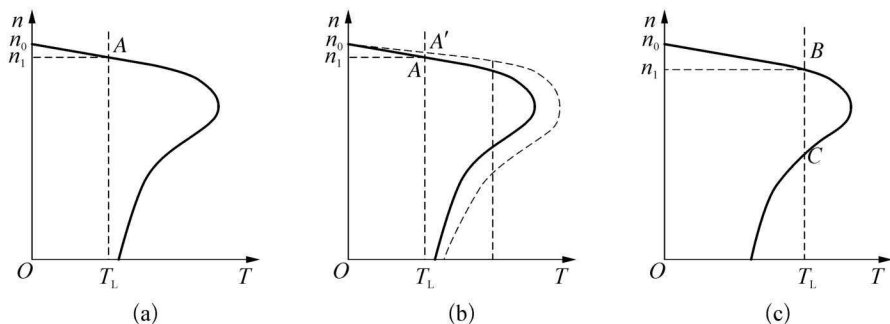


图 1-4 电力拖动系统工作点的稳定性判别

如图 1-4(b)所示,若拖动系统原来运行在 A 点上,突然出现瞬时扰动,比如电动机端电压升高,则电动机的电磁转矩 T 瞬时增大,故 $T > T_L$, $\Delta T > 0$ 从而使系统加速,在转速上升过程中,电动机转矩随之减小。到达 A' 点后,电磁转矩和负载转矩又达到新的平衡,系统以新的恒定转速 n'_1 运行。当扰动消除后, $T < T_L$ 时,转速下降,系统回复到原来的工作点上。同理,如瞬时扰动引起转速稍有降低,当扰动消失后,则由于 $T > T_L$ 将使转速回复到原来的数值。因此系统在 A 点具备维持稳定运行的条件。图 1-4(c)所示的是异步电动机带一较重的恒转矩负载,使特性曲线出现两个交点 B 和 C 。如果系统

运行在 B 点上,显然它能够维持稳定工作(判别跟前面 A 点讨论的情况一样)。但如果系统在 C 点上运行,当突然出现瞬时扰动(如端电压增大)时,电磁转矩 T 瞬时增大,使电动机加速, n 的上升又导致 T 进一步的增大,使电动机进一步加速,直到 B 点为止才能进入恒速运行($T = T_L$)。反之,如果端电压瞬时下降,导致 $T < T_L$ 时,电动机将从 C 点减速,转速的降低又使 T 下降,进一步使电动机减速,直到转速 $n = 0$ 为止。所以在 C 点上,拖动系统不具备维持稳定运行的条件。

由此可见,电动机机械特性曲线与负载特性曲线的交点是系统的一个平衡点。系统维持稳定运行的条件为:在该交点所对应的转速之上 $T < T_L$,而在交点所对应的转速之下 $T > T_L$ 。

但是,两条特性曲线的交点并非都是系统的稳定工作点。如图 1-4(c)所示为异步电动机驱动较重的恒转矩负载,此时特性曲线出现两个交点 B 和 C 。如果系统运行在 B 点上,显然它能够稳定工作(稳定性判别跟前面 A 点讨论的情况一样)。如果系统在 C 点上运行,当突然出现瞬时扰动(如端电压增大)时,电磁转矩 T 瞬时增大,使电动机加速, n 的上升导致 T 进一步的增大,又使电动机进一步加速,直到 B 点为止才能进入恒速运行($T = T_L$)。反之,如果端电压瞬时下降,导致 $T < T_L$ 时,电动机将从 C 点减速,转速的降低又使 T 下降,进一步使电动机减速,直到转速 $n = 0$ 为止。所以选择在 C 点上工作,拖动系统没有自动回复稳定运行的能力,即 C 点是系统运行的不稳定工作点。由此可见,对恒转矩负载来说,异步电动机机械特性曲线在临界转差率以下部分为不稳定工作区。

以上的分析可以推广到一般情况下电力拖动系统的稳定性判别:系统在电动机机械特性曲线与负载特性曲线的交点能保持恒速运行;如果在该交点所对应的转速之上 $T < T_L$,而在交点所对应的转速之下 $T > T_L$ 。那么系统就具有恢复稳定工作的能力,该点即为稳定工作点,反之为不稳定工作点。

1.2 三相异步电动机的起动、制动与调速

1.2.1 异步电动机的起动

电动机的起动,是指电动机接通电源后,转速由零上升到稳定转速的整个动态过程。电动机起动时的电磁转矩 T 必须大于生产机械加在电动机轴

上的负载转矩 T_L , 否则电动机将无法起动, 甚至可能反被生产机械的负载转矩所倒拉, 导致反转(见图 1-5)。

电动机起动过程的时间不长, 但对电机本身和电力系统的影响却很大。特别是船舶电站的容量有限, 船上有些辅机拖动系统所采用的电动机的功率接近电站发电机的单机功率, 若直接起动, 其起动电流将引起电网电压的较大波动, 从而影响其他用电设备的正常运行。所以对起动频繁和大容量电动机的起动, 必须设法缩短起动时间, 减小或限制起动电流。

实际生产过程中, 对异步电动机的起动有一定的要求。为了缩短起动时间、提高生产效率, 一般要求异步电动机有足够大的起动转矩, 但起动转矩的加大, 必然导致起动电流增大; 为了保证电动机以及生产机械的安全运行以及减小对电网的冲击, 通常又要求限制起动电流以及起动转矩。所以电动机的起动必须根据拖动系统的具体情况统筹兼顾这两方面的因素。实际应用中异步电动机有着多种启动方法。

1. 鼠笼式三相交流异步电动机全电压直接起动

全电压直接起动就是将电动机的定子绕组经开关设备直接与三相额定电源电压接通。电动机直接起动具有设备简单、操作方便等优点。

图 1-5 所示为一台鼠笼式三相异步电动机带一通风机电机的特性曲线。起动时电动机的电磁转矩 $T = T_{st}$, $T_L = T_{Lst}$, 根据拖动系统运动方程式, 此时 $\Delta T > 0$, 拖动系统由静止开始加速起动。在加速过程中, T 的变化规律是从 a 点沿曲线①变化到 b 点, T_L 的变化规律是从 C 点沿曲线②变化到 b 点。在转速从零加速到 n_b 的过程中, T 始终大于 T_L 直到 b 点, $T = T_L$, $\Delta T = 0$, 起动过程结束, 拖动系统以转速 n_b 稳定运行于 b 点。

在全电压直接起动时, 电动机定子绕组接通电源瞬间, 转子由于惯性不能立即转动, 此时转子电势和电流较大, 因而定子电流也较大, 通常起动电流 $I_{st} = (5 \sim 8)I_N$ 。由于鼠笼式异步电动机的结构简单, 过载能力较强, 且一般起动过程时间都较短, 起动电流一般不会对电动机造成直接的损害, 因此就电动机本身来说, 是允许直接起动的。但另一方面, 对于大容量的鼠笼式电动机直接起动, 由于起动电流大和功率因数低, 会引起较大的船舶电网电压降落,

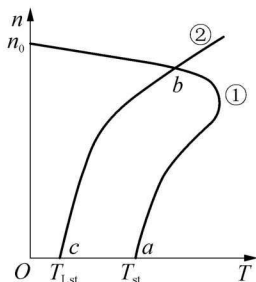


图 1-5 三相交流异步电动机的起动过程

影响其他用电设备的正常工作。因此,从我国《钢质海船建造入级规范》(以下简称《入级规范》)所限定的电网电压降的范围来确定船舶上的鼠笼式异步电动机能否直接起动。目前的交流船舶电站容量较大,并装有性能良好的自动电压调整器,机舱中各类容量在发电机单机容量 60% 以下的鼠笼式异步电动机几乎都采用全电压直接起动。

2. 改善起动性能的特殊三相异步电动机

普通鼠笼式异步电动机虽然起动时电流很大,但起动时功率因数较低,起动转矩并不大。异步电动机可通过采用如图 1-6 所示的双鼠笼式或如图 1-7 所示的深槽式等特殊结构的转子,以改善全电压直接起动的性能。这两种类型的异步电动机特点是起动转矩大,而起动电流较小。

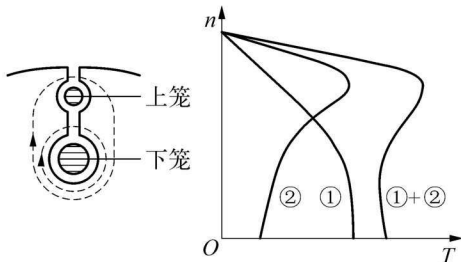


图 1-6 双鼠笼式异步电动机的转子槽形及机械特性

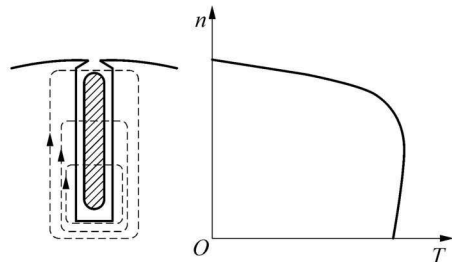


图 1-7 深槽式异步电动机的转子槽形及机械特性

双鼠笼式异步电动机的转子上有两套笼型导条,分上笼与下笼。两笼间由狭长的缝隙隔开。与下笼相较链的漏磁通(也即下笼的漏抗)比上笼的大得多。上笼通常用电阻系数较大的黄铜或铝青铜制成,且导条截面较小,故电阻较大;下笼导条截面较大,用紫铜等电阻系数较小的材料制成,故电阻较小;而深槽式转子的槽形窄而深,深槽中的导条可以看作是很多根导线并联嵌在槽内。槽漏磁的分布在槽底较密,而在槽口较疏,因此导条靠近槽底部分的漏电抗要比槽口部分的漏电抗大。起动时,转子电流的频率较高,电流的“趋肤效应”使转子电流大部分集中在双鼠笼式的上笼,或深槽式转子的槽口部分,使得转子绕组呈现出较大的电阻值,而相比普通电动机具有较大的起动转矩;起动过程结束,电动机进入正常运行后,转子电流的频率变得很小,电流的“趋肤效应”消失,转子绕组所呈现的电阻值与普通电动机相仿。因此,双鼠笼式和深槽式异步电动机既有转子电阻增大所带来的起

动转矩增大、起动电流减小的优点,又可避免正常运行时因转子电阻增大而导致电动机的特性曲线变软。

3. 鼠笼式三相交流异步电动机的降压起动

异步电动机采用降低电源电压起动是限制起动电流的一种常用方法。船舶上通常用于大容量异步电动机的起动。异步电动机在电源电压频率以及其他参数不变的情况下,其电磁转矩与外施电压的平方成正比,所以降压起动时起动转矩大大减小,起动时间较长,它一般用在轻载起动的场合。

(1) 星形—三角形(Y— Δ)换接降压起动。此方法适用于正常运行时电动机定子绕组为三角形联接(即定子每相绕组额定电压为电网线电压)的异步电动机,且负载为轻载或空载起动的拖动系统。起动时先将电动机的定子绕组星形联接后与电源接通,待电动机转速升高、电流减小后,再通过继电器等开关装置将绕组改为三角形联接,进入正常运行。图 1-8 所示为星形—三角形两种方式的联接原理图。

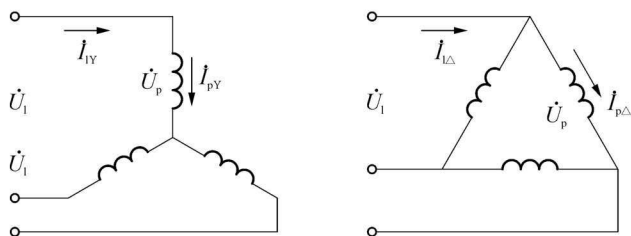


图 1-8 定子绕组 Y 形联接和 Δ 形联接时电压、电流的比较

设电源线电压为 U_l ,电动机每相绕组的等效阻抗为 z 。比较星形联接和三角形联接时定子每相绕组上的电压、绕组中的电流以及电动机的线电流可得

Y 形联接降压起动时

$$\left. \begin{aligned} U_Y = U_p &= \frac{1}{\sqrt{3}} U_l \\ I_{pY} &= \frac{U_p}{z} = \frac{U_l}{\sqrt{3} z} \\ I_{LY} &= I_{pY} = \frac{U_l}{\sqrt{3} z} \end{aligned} \right\}$$

△形联接直接起动时

$$\left. \begin{aligned} U_{\Delta} &= U_1 \\ I_{p\Delta} &= \frac{U_{\Delta}}{z} = \frac{U_1}{z} \\ I_{L\Delta} &= \sqrt{3} I_{p\Delta} = \sqrt{3} \frac{U_1}{z} \end{aligned} \right\}$$

由此可得

$$U_Y = \frac{1}{\sqrt{3}} U_{\Delta} \quad (1-3)$$

$$I_{LY} = \frac{1}{3} I_{L\Delta} \quad (1-4)$$

因此,采用 Y 形联接降压起动,定子每相绕组上电压降低为△联接直接起动时的 $\frac{1}{\sqrt{3}}$ 倍;而电动机的线电流为直接起动时的 $\frac{1}{3}$ 倍。另一方面,由于异步电

动机的起动转矩与电源电压的平方成正比,所以在定子绕组降压 $\frac{1}{\sqrt{3}}$ 倍的情况

下起动,电动机的起动转矩也将减小为直接起动时的 $\frac{1}{3}$ 倍。

(2) 自耦变压器降压起动。正常运行时星形联接的大容量异步电动机,可采用自耦变压器实现降压起动。起动时三相自耦变压器的原边绕组接电源,而副边与电动机的定子绕组相联,电动机在经过变压器降压的电压下起动。其降压幅度为变压器的变比 K 。若设电动机全电压直接起动时的电流(即电网提供的线电流)为 I_{st} ,则降压起动时电动机的起动电流为 I_{st}/K ,该电流也是变压器副边绕组中的电流;而此时电网提供的线电流,即变压器原边绕组中的电流为:

$$I'_{st} = \frac{1}{K} \frac{I_{st}}{K} = \frac{I_{st}}{K^2} \quad (1-5)$$

由此可见,对采用变比为 K 的自耦变压器降压起动,起动时电网提供的电流是直接起动时的 $1/K^2$ 倍。同理,由于降压 K 倍起动,起动转矩将为直接

起动时的 $1/K^2$ 倍。实际应用中,自耦变压器的副边绕组一般有三个不同变比的抽头(如 $K=0.55、0.64、0.73$ 等)以满足不同负载对不同降压幅度的起动要求。

4. 绕线式异步电动机转子串电阻起动

绕线式异步电动机转子串电阻不仅可以增大起动转矩,同时还可以减小起动电流,这是改善电动机起动性能的一种有效方法。起动时,转子回路中串入三相对称电阻,随着转速的升高,通过继电器接触器或频敏变阻器等自动装置逐级切除外部串接电阻,进入正常运行后应将所串电阻全部切除。

1.2.2 异步电动机的制动

如图 1-9 所示,当电动机在运行过程中,若其电磁转矩的方向与转子转速的方向相反,则为电动机的制动运行状态。对电力拖动系统而言,此时电磁转矩成了制动转矩,其产生的制动作用称为电气制动。与机械制动相比,电气制动具有无机械磨损、制动平稳、容易实现自动控制等优点。电气制动可用于拖动系统减速或加速停车、起货机等位能性负载的匀速下降等场合。

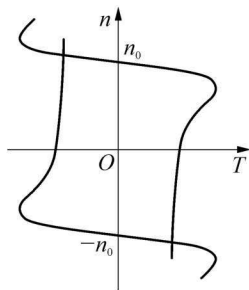


图 1-9 三相交流异步电动机运行和制动运行时的机械特性

从能量转换观点看,处于制动状态的电动机,其作用是将拖动系统的机械能转变为电能消耗在电动机内部或反馈至电网。

如果把电动机的正转电动运行 ($n > 0, T > 0$) 和反转电动运行 ($n < 0, T < 0$) 时的机械特性曲线分别定义在 $n-T$ 坐标平面的第 1、3 象限,则特性曲线向 2、4 象限的延伸部分分别为电动机的正转制动运行 ($n > 0, T < 0$) 和反转制动运行 ($n < 0, T > 0$)。图 1-9 展示了三相交流异步电动机运行和制动运行时的机械特性。

电气制动根据其产生的条件和方法的不同,可分为反接制动、能耗制动和回馈制动等三种。

1. 反接制动

异步电动机反接制动分为电源反接制动和倒拉反接制动两种。反接制动时,转子的转向与定子旋转磁场的转向相反,即 n 与 n_0 的符号相反,因此电动机分别运行于正转电动特性曲线向第 4 象限的延伸段或反转电动特性曲线向

第 2 象限的延伸段。

(1) 电源反接制动。当交流异步电动机运行在电动状态时 ($n < n_0$, $0 < s < 1$),

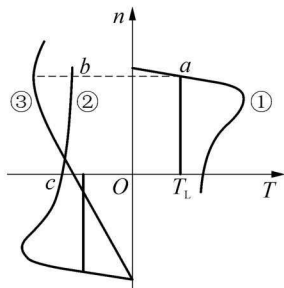


图 1-10 交流异步电动机的电源反接制动

将电动机三相电源的任意两相对调使其相序改变,气隙旋转磁场的方向随即改变,而转子因惯性仍保持着原来的转向不变。结果使转子绕组切割气隙磁场的方向改变,从而转子中感应电势和电流的相位变反,产生的电磁转矩 T 方向亦变反,成为制动转矩。图 1-10 的曲线 ② 是鼠笼式异步电动机的反接制动特性,曲线 ③ 为绕线式异步电动机转子串制动电阻时的反接制动特性。

设鼠笼式异步电动机带一负载 T_L 在 a 点上正向稳定运行。现将三相电源的任意两相对调,则电动机所运行的机械特性将由曲线 ① 变为曲线 ②。由于转子的惯性作用,其转速不能突变,因此电动机将由曲线 ① 的 a 点切换到曲线 ② 的 b 点运行。此时电动机的电磁转矩 T 因旋转磁场的方向变反而变为负值,成为制动转矩。根据拖动系统运动方程式,此时 $T - T_L = \Delta T < 0$,电动机在 T 和 T_L 的共同作用下,沿曲线 ② 迅速减速,直到 c 点 ($n=0$)。如果制动的目的是为了使电动机迅速反转,则到 c 点后,电动机会自行反向起动(因为在 c 点处,电磁转矩 T 不为零,而等于反向运行时的起动转矩);如果制动的目的是为了迅速停机,则在接近 c 点时,应立即切断电动机的电源,以防止电动机反向起动。

在电源反接制动时,电动机的转差率为:

$$s = \frac{-n_0 - n}{-n_0} = \frac{n_0 + n}{n_0} > 1 \quad (1-6)$$

此时转子感应电势 $E_{2s} = sE_2$ 很大,因而电流转子及定子电流也很大(比起动时还大)。故对绕线式异步电动机,在电源反接制动时,必须在转子回路中串入足够大的制动电阻,以限制冲击电流,同时也产生增大制动转矩的效果。而对于大容量或频繁起动的鼠笼式异步电动机,应避免其运行于电源反接制动状态。

(2) 倒拉反接制动。电动机因外力矩作用而形成转子的转向与旋转磁场