



北京市高等教育精品教材立项项目

电力拖动控制系统 (运动控制系统)

电气工程
与自动化专业

李华德 主编



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

内 容 简 介

本书全面、系统地介绍了现代电力拖动控制系统的基本组成、基本原理、基本控制方法,以及对系统的静、动态特性分析和数字化设计。

第一篇主要内容:依据直流电动机的广义数学模型,建立了直流电动机的闭环控制结构及相应的控制系统;分析了闭环直流调速系统的静、动态特性;介绍了直流调速系统可逆运行的方法;给出了电力拖动控制系统的数字控制设计方法。

第二篇主要内容:从建立交流电动机数学模型入手,讲述现代交流电动机变压变频调速系统的基本原理,以及静、动态特性分析。本篇的重点内容是,恒压频比控制的异步电动机变压变频调速系统;异步电动机矢量控制系统和直接转矩控制系统;同步电动机自控式变压变频调速系统、同步电动机矢量控制系统,以及永磁同步电动机矢量控制系统;在第10章还介绍了交流位置随动(伺服)系统的组成、基本特点,以及工作原理。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

电力拖动控制系统. 运动控制系统/李华德主编. —北京:电子工业出版社,2006.12

北京市高等教育精品教材立项项目

ISBN 7-121-03228-7

I. 电… II. 李… III. 电力传动—控制系统—高等学校—教材 IV. TM921.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第119166号

责任编辑:陈晓莉 特约编辑:李双庆

印 刷:北京市通州大中印刷厂

装 订:三河市鹏成印业有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本:787×980 1/16 印张:25.25 字数:563千字

印 次:2006年12月第1次印刷

印 数:5000册 定价:34.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系电话:(010)68279077;邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

前 言

进入 21 世纪以来,《电力拖动控制系统》一书所涉及的科学技术又有新的发展,因此,本书内容和体系也必须不断更新,力争做到与科技发展同步。

现代电力拖动控制系统是电机学、电力电子学、微电子学、计算机科学、自动控制理论等多种学科的有机结合与交叉。但是同其他任何自动控制系统一样,其根本的理论基础是自动控制理论。为此,本书运用自动控制理论着重于对电力拖动控制系统的分析与设计。

本书题材来源于工程实际,具有前沿性和先进性。遵循了深入浅出,循序渐进的写作思想及理论联系实际的原则。为了防止体系上的混乱和篇幅上的膨胀,凡是本书的前续课程(电力电子技术,计算机控制技术等)的相关内容,都不再专门列入。虽然实际的电力拖动控制系统都已经数字化,但是由于连续(模拟)系统物理概念清晰,为了使读者便于理解和掌握,所以控制系统的基本理论和控制方法仍按连续系统进行讲述,而控制系统的设计和实际实现则按数字控制系统进行。

本书体系上分为直流电力拖动控制系统和交流电力拖动控制系统。第一篇为本书的基础,第二篇为本书的重点,需要指出,本课程是一门实践性很强的课程,实验是学好本课程必不可少的重要环节。

本书 1 至 5 章由李擎、张勇军、郝春辉、李晓理编写,第 6、7、8、10 章由李华德编写,第 9 章由张遇杰、陈书锦、刘慧博编写,8.5 节、8.7 节由冉正云编写,7.4 节、8.6 节及附录由杨立永编写。李华德负责全书的统一规划、审查、删改和补充。刘刚、杨立永、陈书锦、冉正云、张伟参加了本书的录入及校对工作。

本书由李正熙、白晶主审;孙昌国对“位置随动系统”的编写提出了修改意见,在此谨表谢意。

本书可供高等院校工业自动化专业本科生、研究生作为教材使用,也可供科研院所、厂矿企业中从事电气传动的科技工作者参考使用。

由于本书作者学识水平有限,虽然尽力而为,但仍难免有错误和不足之处,敬请广大读者批评指正,并给予谅解。

作 者
2006 年 8 月

反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396；(010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市万寿路 173 信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

目 录

绪论	(1)
0.1 电力拖动及其自动控制系统	(1)
0.2 电力拖动控制系统的发展概况与趋势	(2)
0.2.1 电力拖动调速系统的发展概况和趋势	(2)
0.2.2 电力拖动伺服系统的发展概况和趋势	(10)
0.2.3 电力拖动自动控制系统的网络控制	(13)
第一篇 直流电力拖动控制系统	(17)
第1章 直流电动机的数学模型及其闭环控制结构	(19)
1.1 闭环直流调速系统被控对象的数学模型及其动态结构图	(19)
1.1.1 旋转枢系统的数学模型及其动态结构图	(19)
1.1.2 他励直流电动机励磁回路的数学模型及其动态结构图	(28)
1.2 直流调速系统的闭环控制结构及其相应的闭环直流调速系统	(30)
1.2.1 转速单闭环的控制结构	(30)
1.2.2 转速、电流双闭环控制结构及相应的控制系统	(32)
1.2.3 他励直流电动机闭环励磁控制系统的动态结构及相应的控制系统	(34)
1.2.4 直流电动机双域闭环控制调速系统(先升压后弱磁调速系统)	(35)
第2章 闭环控制直流调速系统的稳态分析	(39)
2.1 直流调速系统的静态调速指标及开环系统存在的问题	(39)
2.1.1 生产工艺对转速控制的要求和调速指标	(39)
2.1.2 开环调速系统存在的问题	(41)
2.2 单闭环直流调速系统的稳态分析	(42)
2.2.1 ASR 为比例调节器时的转速单闭环直流调速系统稳态分析与计算	(42)
2.2.2 ASR 采用 PI 调节器的转速单闭环直流调速系统	(47)
2.2.3 带电流截止负反馈的转速单闭环直流调速系统稳态分析	(48)
2.3 转速、电流双闭环调速系统稳态分析及计算	(52)
习题及思考题	(55)
第3章 闭环直流调速系统的动态分析	(58)
3.1 单闭环直流调速系统的动态分析	(58)
3.1.1 ASR 为比例调节器的单闭环直流调速系统的动态分析	(58)
3.1.2 ASR 采用 PI 调节器的单闭环直流调速系统动态分析	(60)
3.2 转速、电流双闭环直流调速系统的动态分析	(69)
3.2.1 快速系统与最佳过渡过程的概念	(69)

3.2.2	转速、电流双闭环直流调速系统的动态特性分析	(72)
3.3	闭环直流调速系统的自适应控制	(77)
3.3.1	电流自适应调节器	(77)
3.3.2	转速自适应调速器	(81)
3.4	闭环电力拖动控制系统的动态性能指标及动态校正——调节器设计	(84)
3.4.1	闭环控制系统的动态性能指标	(84)
3.4.2	动态校正——调节器设计	(86)
	习题及思考题	(86)
第4章	可逆直流调速系统	(88)
4.1	晶闸管—电动机可逆调速系统(V-M可逆系统)	(88)
4.1.1	晶闸管—电动机可逆调速系统的基本结构	(88)
4.1.2	电枢可逆系统中的环流	(89)
4.1.3	有环流可逆调速系统	(91)
4.1.4	无环流可逆调速系统	(97)
4.2	可逆直流脉宽调速系统(PWM可逆系统)	(101)
	习题及思考题	(104)
第5章	数字(计算机)控制的电力拖动系统	(106)
5.1	数字电力拖动控制系统的硬件系统	(106)
5.1.1	数字控制器(计算机系统)	(107)
5.1.2	常用(微)处理器和控制芯片	(110)
5.2	电力拖动自动控制系统的数字化设计	(111)
5.2.1	电力拖动自动控制系统的数字化设计内容、原则与步骤	(111)
5.2.2	直流双闭环调速系统全数字化设计	(112)
5.3	数字(计算机)控制的直流位置随动(伺服)系统	(125)
5.3.1	数字控制直流位置随动系统的基本组成及控制结构	(126)
5.3.2	位置控制的基本要求和理想定位过程的控制算法	(127)
5.3.3	程序的组成	(134)
	习题及思考题	(135)
第二篇	交流电力拖动控制系统	(137)
第6章	基于稳态数学模型的异步电动机变压变频调速系统	(139)
6.1	基于异步电动机稳态数学模型的变压变频调速系统控制方式	(139)
6.1.1	电压—频率协调控制方式	(140)
6.1.2	转差频率控制方式	(145)
6.2	电力电子变频调速装置及其电源特性	(148)
6.3	电压源型转速开环恒压频比控制的异步电动机变压变频调速系统	(152)
6.4	电流源型转速开环恒压频比控制的异步电动机变压变频调速系统	(156)
6.5	异步电动机转差频率控制(SF)变压变频调速系统	(158)

6.5.1 电流源型转差频率控制的异步电动机变压变频调速系统构成及工作原理	(158)
6.5.2 电压源型转差频率控制(SF)的异步电动机变压变频调速系统	(160)
习题及思考题	(161)
第7章 基于动态数学模型的异步电动机矢量控制变压变频调速系统	(162)
7.1 矢量控制的基本概念	(162)
7.1.1 直流电动机和异步电动机的电磁转矩	(162)
7.1.2 矢量控制的基本思想	(166)
7.2 异步电动机在不同坐标系上的数学模型	(168)
7.2.1 交流电动机的坐标系与空间矢量的概念	(169)
7.2.2 异步电动机在静止坐标系上的数学模型	(170)
7.2.3 坐标变换及变换矩阵	(177)
7.2.4 异步电动机在二相静止坐标系上的数学模型	(189)
7.2.5 异步电动机在任意二相旋转坐标系上的数学模型	(195)
7.2.6 异步电动机在二相同步旋转坐标系上的数学模型	(197)
7.2.7 异步电动机在二相坐标系上的状态方程	(198)
7.3 磁场定向和矢量控制的基本控制结构	(200)
7.3.1 转子磁场定向的异步电动机矢量控制结构	(201)
7.3.2 异步电动机其他两种磁场定向方法	(204)
7.4 转子磁链观测器	(207)
7.4.1 开环方式转子磁链观测器	(207)
7.4.2 闭环方式转子磁链观测器	(210)
7.5 异步电动机矢量控制系统	(215)
7.5.1 具有转矩内环的转速、磁链闭环异步电动机直接矢量控制系统	(215)
7.5.2 转差型异步电动机间接矢量控制系统	(218)
7.5.3 无速度传感器矢量控制系统	(222)
7.6 具有双PWM变流器的矢量控制系统	(226)
7.7 绕线式异步电动机双馈矢量控制系统	(227)
7.7.1 绕线式异步电动机双馈调速系统	(227)
7.7.2 绕线式异步电动机双馈矢量控制系统	(228)
7.7.3 双馈电动机矢量控制的其他方案	(234)
7.8 数字化异步电动机矢量控制系统设计	(235)
7.8.1 以DSP为控制核心的数字异步电动机矢量控制系统的硬件系统	(235)
7.8.2 软件设计(运算程序和控制算法)	(237)
习题及思考题	(247)
第8章 异步电动机直接转矩控制变压变频调速系统	(249)
8.1 异步电动机直接转矩控制系统的基本理论	(249)
8.1.1 直接转矩控制的理论依据	(249)

8.1.2	异步电动机定子轴系的数学模型	(250)
8.1.3	逆变器的8种开关状态和逆变器的电压状态	(255)
8.1.4	电压空间矢量的概念	(258)
8.1.5	电压空间矢量与磁链空间矢量的关系	(261)
8.1.6	电压空间矢量对电动机转矩的影响	(262)
8.1.7	电压空间矢量的正确选择	(263)
8.1.8	异步电动机直接转矩控制的基本结构	(266)
8.2	异步电动机直接转矩控制系统的基本组成及工作原理	(270)
8.2.1	磁链自控	(271)
8.2.2	转矩调节	(279)
8.2.3	磁链调节	(286)
8.2.4	电压状态的选择	(289)
8.2.5	最小开关持续时间	(294)
8.2.6	逆变器的开关频率调节	(298)
8.3	在低速范围内直接转矩控制系统的转矩控制与调节方法	(299)
8.3.1	在低速范围内直接转矩控制系统的结构特点	(299)
8.3.2	区段的电压状态选择	(301)
8.3.3	低速范围内转矩与磁链调节的协调	(304)
8.3.4	使用 -120° 电压的磁链调节	(306)
8.4	在弱磁范围内直接转矩控制系统的转矩控制及恒功率调节	(307)
8.4.1	弱磁范围内直接转矩控制系统的结构特点	(307)
8.4.2	弱磁范围内的转矩控制与调节	(308)
8.4.3	弱磁范围内的功率调节	(309)
8.5	圆形磁链轨迹的直接转矩控制系统	(312)
8.5.1	圆形磁链控制	(312)
8.5.2	电磁转矩控制	(314)
8.6	异步电动机间接转矩控制(ISC)系统	(317)
8.7	直接转矩控制系统的特点——本章结论	(319)
	习题及思考题	(320)
第9章	同步电动机变压变频调速系统	(322)
9.1	同步电动机变压变频调速的特点及基本类型	(322)
9.2	同步电动机变压变频调速系统主电路晶闸管换流原理及其方法	(323)
9.2.1	同步电动机交-直-交型变压变频调速系统逆变器中晶闸管的换流	(323)
9.2.2	交-交变频同步电动机调速系统主电路晶闸管的换流	(328)
9.3	他控变频同步电动机调速系统	(330)
9.3.1	转速开环恒压频比控制的同步电动机调速系统	(330)
9.3.2	交-直-交型他控变频同步电动机调速系统	(330)

9.3.3 交-交型他控变频同步电动机调速系统	(332)
9.4 自控变频同步电动机(无换向器电动机)调速系统	(332)
9.4.1 自控变频同步电动机(无换向器电动机)调速原理及特性	(332)
9.4.2 自控变频同步电动机调速系统	(341)
9.5 按气隙磁场定向的普通三相同步电动机矢量控制系统	(345)
9.5.1 普通三相同步电动机的多变量数学模型	(345)
9.5.2 按气隙磁场定向的绕组励磁式普通三相同步电动机交-直-交变频矢量控制系统	(347)
9.6 正弦波永磁同步电动机变压变频调速系统	(351)
9.7 梯形波永磁同步电动机变压变频调速系统	(354)
习题及思考题	(358)
第 10 章 交流位置随动(伺服)系统	(360)
10.1 以 DSP 为核心的交流位置随动系统	(361)
10.2 基于 PC(或 PLC)的交流位置随动系统及基于现场总线的交流位置随动系统	(361)
10.3 数控机床及其插补算法	(363)
附录 A 电力拖动控制系统中的检测技术	(372)
A.1 位置检测	(372)
A.1.1 光电编码器	(372)
A.2 速度(转速)测量	(377)
A.2.1 数字测速法	(378)
A.3 电压、电流检测	(381)
A.3.1 直接检测式霍尔传感器	(382)
A.3.2 磁平衡式(或称磁补偿式)霍尔传感器	(382)
附录 B 常用符号表	(385)
B.1 元件和装置用的文字符号(按国家标准 GB/T7159-1987)	(385)
B.2 参数和物理量文字符号	(386)
B.3 常用下角标	(388)
B.4 常用缩写符号	(389)
参考文献	(391)

绪 论

0.1 电力拖动及其自动控制系统

采用动力设备(或称原动机)带动工作机械作形式不同的运动称为“拖动”,采用电动机作为动力设备的拖动方式称为“电力拖动”,在工业生产中电力拖动是最主要的拖动方式。

具有自动控制和调节工作机械的速度或位移的电力拖动系统称为“电力拖动控制系统”,实际上工作机械的速度控制或位移控制是通过控制和调节电动机的转速和转角来实现的。电力拖动控制系统中除了电动机、传动机构,以及工作机械外,还有在电源与电动机之间配置的电动机自动控制装置,如图 0-1 所示。电动机在系统中担负着电能转换任务,把输入的电能转换为机械能;机械传动机构是将机械能传递给工作机械;控制装置由电力电子变换器、控制器,以及反馈信息检测装置等组成,用来完成对电动机的转矩、转速及工作机械位移的自动控制,以满足生产工艺的要求。

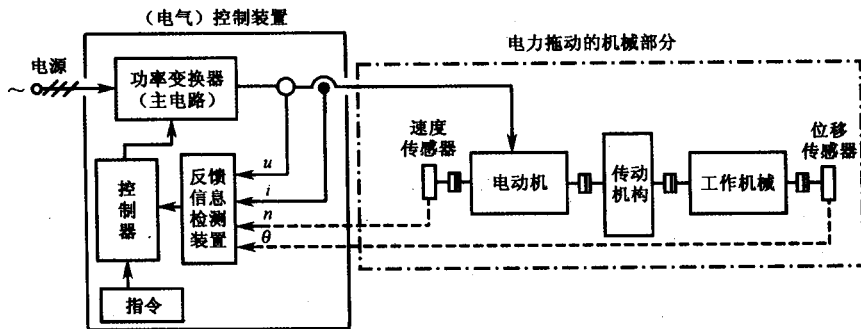


图 0-1 电力拖动自动控制系统的基本组成情况

从电能的转换及传递(传输)角度来看,把电力拖动称为电力传动,把电力拖动控制系统称为电力传动控制系统。由于这类系统的基本任务是通过控制和调节电动机的旋转速度或转角来实现工作机械对速度或位移的要求,因此把电力拖动控制系统又称为运动控制系统。

电力拖动控制系统按被控制量的不同分为两大类:以电动机的转速为被控制量的系统叫做调速系统;以工作机械的角位移或直线位移为被控制量的系统叫做位置伺服系统,又叫做位

置随动系统。除此以外,电力拖动控制系统还有其他多种类型,如张力控制系统,多电动机同步控制系统等。虽然电力拖动控制系统种类很多,但是,各种电力拖动控制系统都是通过控制电动机转速来工作的,因此,调速系统是最基本的电力拖动控制系统。

0.2 电力拖动控制系统的发展概况与趋势

19世纪70年代前后相继诞生了直流电动机和交流电动机,从此人类社会进入了以电动机为动力设备的时代。以电动机作为动力机械,为人类社会的发展和进步、工业生产的现代化起到了巨大的推动作用。

在用电系统中,电动机作为主要的动力设备而广泛地应用于工农业生产、国防、科技及社会生活等各个方面。电动机负荷约占总发电量的70%,成为用电量最多的电气设备。

根据采用的电流制式不同,电动机分为直流电动机和交流电动机两大类,其中交流电动机拥有量最多,提供给工业生产的电量多半是通过交流电动机加以利用的。经过一百二十多年的发展,至今已经制造了型式多样、用途各异的各种容量、各种品种的交流电动机;20世纪80年代以来,开关磁阻电动机、永磁无刷直流电动机(梯形波永磁同步电动机)、正弦波永磁同步电动机等新型交流电动机得到了很快的发展和运用。交流电动机分为同步电动机和异步(感应)电动机两大类:电动机的转子转速与定子电流的频率保持严格不变的关系,即是同步电动机;反之,若不保持这种关系,即是异步电动机。根据统计,交流电动机用电量占电动机总用电量的85%左右,可见交流电动机应用的广泛性及其在国民经济中的重要地位。

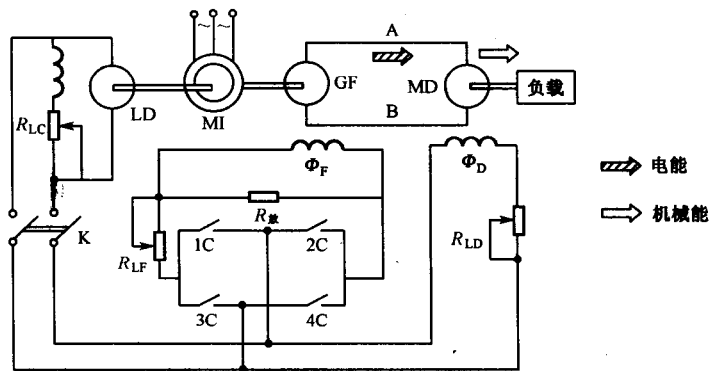
电动机作为把电能转换为机械能的设备,在实际应用中,一是要使电动机具有较高的机电能量转换效率;二是根据生产机械的工艺要求控制和调节电动机的旋转速度。电动机的调速性能如何对提高产品质量、提高劳动生产率和节省电能有着直接的决定性影响。以直流电动机作为控制对象的电力拖动自动控制系统称为直流调速系统;以交流电动机作为控制对象的电力拖动自动控制系统称为交流调速系统。根据交流电动机的分类,相应地有同步电动机调速系统和异步电动机调速系统。

0.2.1 电力拖动调速系统的发展概况和趋势

0.2.1.1 直流调速系统

20世纪60年代以前是以旋转变流机组供电的直流调速系统为主(见图0-2),还有一些静止式水银整流器供电的直流调速系统如图0-3所示(参见文献[5])。1957年美国通用电气公司的A. R. 约克制成了世界上第一只晶闸管(SCR),又称为可控硅整流元件(简称可控硅),这标志着电力电子时代的开始。20世纪60年代以后以晶闸管组成的直流供电系统逐步取代了

直流机组和水银整流器。20 世纪 80 年代末期全数字控制的直流调速系统迅速取代了模拟控制的直流调速系统。



图中：拖动机械负载的直流电动机 MD 由直流发电机 GF 直接供电；交流电动机 MI (或 MS) 拖动直流发电机 GF；励磁机 LD 为发电机 GF 和电动机 MD 励磁绕组提供直流电源。 Φ_F 为直流发电机励磁绕组； Φ_D 为直流电动机励磁绕组；1C~4C 为接触器触点。

图 0-2 直流发电机—直流电动机系统

由于直流电动机的转速容易控制和调节，在额定转速以下，保持励磁电流恒定，可用改变电枢电压的方法实现恒转矩调速；在额定转速以上，保持电枢电压恒定，可用改变励磁的方法实现恒功率调速。近代采用晶闸管供电的转速、电流双闭环直流调速系统可获得优良的静、动态调速特性。因此，长期以来（20 世纪 80 年代中期以前）在变速传动领域中，直流调速一直占据主导地位。然而，由于直流电动机本身存在机械式换向器和电刷这一固有的结构性缺陷，这给直流调速系统的发展带来了一系列限制，即：

① 机械式换向器表面线速度及换向电压、电流有一极限容许值，这就限制了单机的转速和功率（其极限容量与转速乘积被限制在 $10^6 \text{ kW} \cdot \text{r}/\text{min}$ ）。如果要超过极限容许值，则大大增加电动机制造的难度和成本以及调速系统的复杂性。因此，在工业生产中，对一些要求特高转速、特大功率的场合则根本无法采用直流调速方案。

② 为了使机械式换向器能够可靠工作，往往增大电枢和换向器直径，使得电动机体积增大，导致转动惯量大，对于要求快速响应的生产工艺，采用直流调速方案难以实现。

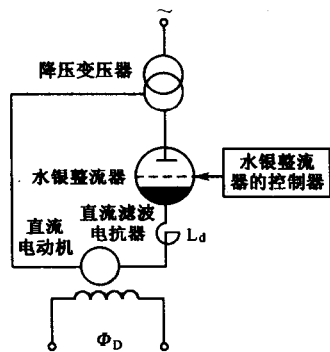


图 0-3 离子电力拖动的主回路

③ 机械式换向器必须经常检查和维修,电刷必须定期更换。这就表明了直流调速系统维护工作量大,维修费用高,同时停机检修和更换电刷也直接影响了正常生产。

④ 在一些易燃、易爆的生产场合,一些多粉尘、多腐蚀性气体的生产场合不能或不宜使用直流调速系统。

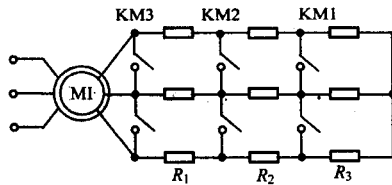
由于直流电动机在应用中存在着这样的一些限制,使得直流调速系统的发展也相应受到限制。但是目前工业生产中许多场合仍然沿用以往的直流电动机,因此在今后相当长的一个时期内直流调速和交流调速并存,直流调速系统还将继续使用。

0.2.1.2 交流调速系统

1. 交流调速系统发展概况

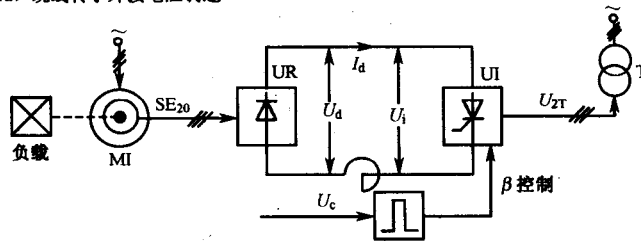
交流电动机,特别是鼠笼式异步电动机,具有结构简单、制造容易、价格便宜、坚固耐用、转动惯量小、运行可靠、很少维修、使用环境及结构发展不受限制等优点。但是,长期以来由于受科技发展的限制,把交流电动机作为调速电动机的困难问题未能得到较好的解决,在早期只有一些调速性能差、低效耗能的调速方法,如:

绕线式异步电动机转子外串电阻及电气串级调速方法(见图 0-4)(参见文献[3])。



(a) 绕线转子外接电阻调速

打开 KM3 闭合 KM2, R_1 接入转子绕组; 打开 KM3、KM2 闭合 KM1: R_1 、 R_2 接入转子绕组; KM1、KM2、KM3 全部打开, R_1 、 R_2 、 R_3 全部接入转子绕组。临界转差率与转子回路电阻成正比变化, 随着外接电阻的加大, 机械特性变软, 实现了调速。



(b) 机组式串级调速系统(早期)原理图

图 0-4 绕线式异步电动机转子外串电阻及电气串级调速方法原理图

鼠笼式异步电动机定子调压调速方法(利用自耦变压器变压调速;利用饱和电抗器变压调速;利用晶闸管交流调压器调压调速)如图 0-5 所示。还有变极对数调速方法(见图 0-6)及后来的电磁(转差离合器)调速方法(见图 0-7)等。

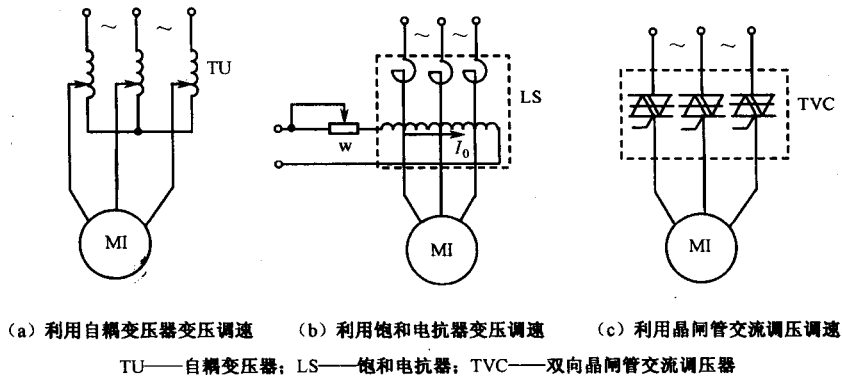


图 0-5 异步电动机变压调速系统

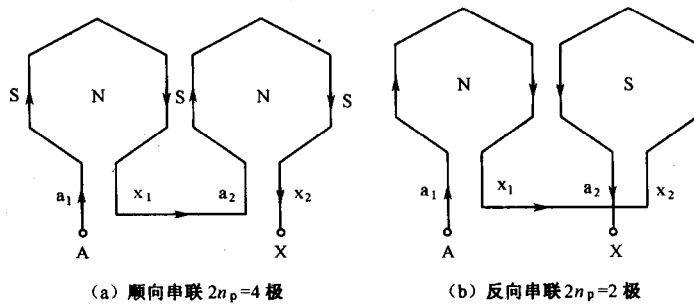


图 0-6 变极对数调速方法原理图

图 0-6(a)为一台 4 极电动机 A 相两个线圈连接示意图,每个线圈代表半个绕组。如果两个线圈处于首尾相连的顺向串联状态,根据电流方向可以确定出磁场的极性,显然为 4 极,如果将两个线圈改为图(b)所示反向串联状态,致使极数减半。

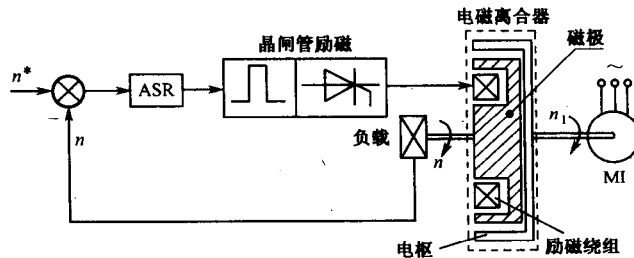


图 0-7 电磁转差离合器调速系统

在图 0-7 中,当励磁绕组通以直流电,电极为电动机所拖动以恒速定向旋转时,在电枢中

感应产生涡流,涡流与磁极的磁场作用产生电磁转矩,使磁极跟着电枢同方向旋转。改变励磁电流的大小就可以实现对负载的调速。

20世纪60年代以后,由于生产发展的需要和(由能源危机引起)节省电能的迫切要求,促使世界各国重视交流调速技术的研究与开发。尤其是20世纪80年代以后,科学技术的迅速发展为交流调速的发展创造了极为有利的技术条件和物质基础。从此,以变频调速技术为主要内容的现代交流调速系统沿着下述四个方面迅速发展。

(1) 电力电子器件的蓬勃发展和迅速换代推动了交流调速的迅速发展

电力电子器件是现代交流调速装置的支柱,其发展直接决定和影响交流调速的发展(参见文献[13])。20世纪80年代中期以前,变频调速装置功率回路主要采用晶闸管元件。装置的效率、可靠性、成本、体积均无法与同容量的直流调速装置相比。80年代中期以后采用第二代电力电子器件GTR(Giant Transistor)、GTO(Gate Turn Off thyristor)、VDMOS-IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)等功率器件制造的变频器在性能上与直流调速装置相当。90年代第三代电力电子器件问世,在这个时期,中、小功率的变频器(1~1000kW)主要采用IGBT器件,大功率的变频器采用GTO器件。20世纪90年代末至今,电力电子器件的发展进入了第四代,主要实用的器件有:

高压IGBT器件(SIEMENS公司HVIGBT) 沟槽式结构的绝缘栅晶体管IGBT问世,使IGBT器件的耐压水平由常规1200V提高到4500V,实用功率容量为3300V/1200A。这表明IGBT器件突破了耐压限制,进入到第四代高压IGBT阶段,与此相应的三电平IGBT中压(2300~4160V)大容量变频调速装置进入实用化阶段。

IGCT(Insulated Gate Controlled Transistor)器件 ABB公司把环形门极GTO器件外加MOSFET功能,研制成功全控型IGCT(ETO)器件,使其耐压及容量保持了GTO的水平,但门极控制功率却大大减小,仅为0.5~1W。目前实用化的IGCT功率容量为4500V/3000A,相应的变频器容量为(315~10000kW)/(6~10kV)。

IEGT(Injection Enhanced Gate Transistor)器件 东芝-GE公司研制的高压、大容量、全控型功率器件IEGT是把IGBT器件和GTO器件两者优点结合起来的注入增强栅晶体管。IEGT器件实用功率容量为4500V/1500A,相应的变频器容量达8~10MW。

SGCT(Symmetrical Gate Commutated Thyristor)器件 罗克威尔公司研制的高压、大容量、全控型功率器件SGCT也开始走向实用化阶段。

由于GTR、GTO器件本身存在的不可克服的缺陷,功率器件进入第四代以来,GTR器件已被淘汰不再使用,GTO器件也将被逐步淘汰。用第四代电力电子器件制造的变频器性能/价格比与直流调速装置相当。

第四代电力电子器件模块化更为成熟,如功率集成电路PIC、智能功率模块IPM等,模块化器件将是21世纪主宰器件。

(2) 脉宽调制(PWM)技术

1964年,德国学者 A. Schonung 和 H. Stemmler 提出将通信中的调制技术应用到电动机控制中,于是产生了脉冲宽度调制技术,简称脉宽调制(PWM)。脉宽调制技术的发展和應用优化了变频装置的性能,适用于各类调速系统。

脉宽调制(PWM)种类很多,并且还在不断发展。但基本上可分为四类,即等宽 PWM、正弦 PWM(SPWM)、磁链追踪型 PWM(SVPWM)及电流滞环跟踪型 PWM(CHBPWM)。PWM 技术的应用克服了相控方法的所有弊端,使交流电动机定子得到了接近正弦波的电压和电流,提高了电动机的功率因数和输出功率。现代 PWM 生成电路大多采用具有高速输出口(HSO)的单片机(如 80196)及高速数字信号处理器(DSP),通过软件编程生成 PWM。近年来,新型全数字化专用 PWM 生成芯片 HEF4752、SLE4520、MA818 等已实际应用。

(3) 矢量控制理论的诞生和发展奠定了现代交流调速系统高性能化的基础

1971年德国学者伯拉斯切克(F. Blaschke)提出了交流电动机矢量控制理论,这是实现高性能交流调速系统的一个重要突破。

矢量控制的基本思想是应用参数重构和状态重构的现代控制理论概念实现交流电动机定子电流的励磁分量和转矩分量之间的解耦,将交流电动机的控制过程等效为直流电动机的控制过程,从而交流调速系统的动态性能得到了显著的提高,这使交流调速最终取代直流调速成为可能。目前对调速特性要求较高的生产工艺已较多地采用了矢量控制型的变频调速装置。实践证明,采用矢量控制的交流调速系统的优越性高于直流调速系统。

针对电动机参数时变特点,在矢量控制系统中采用了自适应控制技术。毫无疑问,矢量控制在应用实践中将会更加完善,其控制性能将得到进一步提高。

继矢量控制技术之后,20世纪80年代中期德国鲁尔大学的德彭布罗克(Depenbrock)教授首先取得了直接转矩控制实际应用的成功。近十几年的实际应用表明,与矢量控制技术相比直接转矩控制可获得更大的瞬时转矩和极快的动态响应,因此,交流电动机直接转矩控制也是一种很有发展前途的控制技术,目前,采用直接转矩控制方式的 IGBT、IGCT 变频器已广泛应用于工业生产及交通运输部门中。

(4) 微型计算机控制技术的迅速发展和广泛应用

微机控制技术迅速发展和广泛应用为现代交流调速系统的成功应用提供了重要的技术手段和保证。近十几年来,由于微机控制技术,特别是以单片微机及数字信号处理器(DSP)为控制核心的微机控制技术的迅速发展和广泛应用,促使交流调速系统的控制回路由模拟控制迅速走向数字控制。当今模拟控制器已经被淘汰,全数字化的交流调速系统已普遍应用。

数字化使得控制器对信息处理能力大幅度提高,许多难以实现的复杂控制,如矢量控制中的坐标变换运算、解耦控制、滑模变结构控制、参数辨识的自适应控制等,采用微机控制器后便都迎刃而解了。此外,微机控制技术又给交流调速系统增加了多方面的功能,特别是故障诊断技术得到了完全的实现。

微机控制技术的应用提高了交流调速系统的可靠性和操作、设置的多样性及灵活性,降低了变频调速装置的成本和体积。以微处理器为核心的数字控制已成为现代交流调速系统的主要特征之一。

交流调速技术的发展过程表明,现代工业生产及社会发展的需要推动了交流调速的发展;现代控制理论的发展和应用、电力电子技术的发展和应用、微机控制技术及大规模集成电路的发展和应用为交流调速的发展创造了技术和物质条件。

20世纪90年代以来,电力传动领域面貌焕然一新。各种类型的异步电动机变频调速系统、各种类型的同步电动机变频调速系统覆盖了电力传动领域的方方面面。电压等级从110V到10000V,容量从数百瓦的伺服系统到数万千瓦的特大功率调速系统,从一般要求的调速传动到高精度、快速响应的高性能调速传动,从单机调速传动到多机协调调速传动,几乎无所不有。

2. 现代交流调速的发展趋势

交流调速取代直流调速已是不争的事实,21世纪必将是交流调速的时代。当前交流调速系统正朝着高电压、大容量、高性能、高效率、绿色化、网络化的方向发展,主要有:

- ① 高性能交流调速系统的进一步研究与技术开发;
- ② 新型拓扑结构功率变换器的研究与技术开发;
- ③ PWM模式的改进和优化;
- ④ 中压变频装置(我国称为高压变频装置)的开发研究。

(1) 控制理论与控制技术方面的研究与开发

十几年的应用实践表明,矢量控制理论及其他现代控制理论的应用尚待随着交流调速的发展而不断完善,从而进一步提高交流调速系统的控制性能。各种控制结构所依据的都是被控对象的数学模型,因此,为了建立交流调速系统的合理控制结构,仍需对交流电动机数学模型的性质、特点及内在规律作深入研究和探讨。

按转子磁链定向的异步电动机矢量控制系统实现了定子励磁电流和转矩电流的完全解耦,然而转子参数估计的不准确及参数变化造成定向坐标的偏移是矢量控制研究中必须解决的重要问题之一。

直接转矩控制技术在应用实践中不断完善和提高,其研究的主攻方向是进一步提高低速时的控制性能,以扩大调速范围。

实现无硬件测速传感器的系统已有许多应用,但是转速推算精度和控制的实时性有待于深入研究 with 开发。

近年来,为了进一步提高和改善交流调速系统的控制性能,国内外学者致力于将先进的控制策略引入到交流调速系统中来,如滑模变结构控制、非线性反馈线性化控制、Backstepping控制、自适应逆控制、内模控制、自抗扰控制、智能控制、间接转矩控制等,已经成为交流调速发