

电气与控制实验科学技术

王科俊 主编

电力推进原理与实践

DIANLI TUIJI YUANLI YU SHI JIAN

张敬南 姚绪梁 编著

黑龙江人民出版社

· 电气与控制实验科学技术 · 王科俊 主编

电力推进原理与实践

张敬南 姚绪梁 编著



黑龙江人民出版社

图书在版编目(CIP)数据

电气与控制实验科学技术/王科俊 主编. —哈尔滨:黑龙江人民出版社,2008.7

ISBN 978 - 7 - 207 - 07885 - 8

I. 电… II. 王… III. 电气控制—实验—研究 IV. TM921.5

中国版本图书馆 CIP 数据字(2008)第 110906 号

责任编辑:李荣焕

装帧设计:李若聃

电力推进原理与实践

张敬南 姚绪梁 编著

出版发行 黑龙江人民出版社
通讯地址 哈尔滨市南岗区宣庆小区 1 号楼
邮 编 150008
网 址 www.longpress.com
电子邮箱 hljrmchs@yeah.net
印 刷 哈尔滨太平洋彩印有限公司
开 本 16 开
印 张 135 印张
字 数 355 万字
印 数 2000 套
版 次 2008 年 8 月第 1 版 2008 年 8 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978 - 7 - 207 - 07885 - 8/TP · 14
定 价 350.00 元(全套 14 本)

(如发现本书有印制质量问题,印刷厂负责调换)

本社常年法律顾问:北京市大成律师事务所哈尔滨分所律师赵学利、赵景波

前 言

进入 21 世纪以来,电力推进由于其广泛的应用前景而倍受关注,尤其是船舶电力推进的研究受到各大科研院所和高等院校研究人员的青睐。电力推进系统是电机学、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,是电气工程专业重要的研究方向之一。为了突出理论与实践相结合,本书在理论知识的基础上,引入了仿真分析的方法和系统实现的实践案例。本书内容源于工程实际,具有前沿性和先进性,除了电力推进系统的原理,本书作者还结合科研经验和实验室条件融入了机械负载模拟的原理和实践方法,尤其针对船舶电力推进中螺旋桨负载模拟装置的实现作了一定的介绍,这是其它教学或实验教材中所不具备的。本书遵循深入浅出,循序渐进的写作思想及理论联系实际的原则进行内容安排,以理论为基础,以实验为重点。介绍了电力推进系统原理和设计方法、交流电源和三相异步电动机电力推进系统原理、螺旋桨负载原理和船桨模型;结合机械负载模拟的原理设计螺旋桨负载模拟装置;设置了交直流电力推进控制系统及船舶电力推进系统的仿真实验和电力推进系统及机械负载模拟的装置实验。

本书前续理论包括电机及拖动基础、电力电子技术和自动控制原理。可供高等院校工业自动化专业、电气工程及其自动化专业本科生、研究生作为专业课实验教材使用,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。

本书的撰写得到了丛望、罗耀华、刘宏达等同志的积极协助,也得到了哈尔滨工程大学自动化学院王科俊、彭秀艳等同志的大力支持,谨此致谢。

由于编著者学识所限,难免有错误和不当之处,敬请读者批评指正。

内 容 简 介

本书主要讲述交直流电力推进系统控制原理和实验方法,内容包括直流电力推进系统原理、交流电源和三相异步电动机电力推进系统原理、螺旋桨负载原理和船桨模型、机械负载模拟的原理;设置交直流电力推进控制系统的仿真实验、船舶电力推进系统的仿真实验;结合具体的电力推进系统和机械负载模拟装置进行硬件设计与实践。

本书适用于高等院校工业自动化专业、电气工程及其自动化专业本科生、研究生作为专业课实验教材使用,也可供有关科技人员参考。

目 录

| | |
|----------------------|-----|
| 绪 论 | (1) |
| 0.1 电力推进意义与发展 | (1) |
| 0.2 船舶电力推进研究概况 | (2) |
| 0.3 机械负载模拟的现状 | (2) |
| 0.4 本书主要内容 | (4) |

第一篇 基本原理

| | |
|---------------------------------|------|
| 第 1 章 直流电力推进控制系统原理 | (5) |
| 1.1 可控直流电源 | (5) |
| 1.1.1 旋转变流机组 | (5) |
| 1.1.2 静止可控整流器 | (6) |
| 1.1.3 直流斩波器或脉宽调制变换器 | (7) |
| 1.2 晶闸管—电动机系统 | (8) |
| 1.2.1 触发脉冲相位控制 | (8) |
| 1.2.2 电流脉动与平波电抗器 | (9) |
| 1.2.3 晶闸管—电动机系统的四象限运行 | (10) |
| 1.3 直流脉宽变换器—电动机系统 | (12) |
| 1.3.1 不可逆 PWM 变换器 | (12) |
| 1.3.2 有制动的不可逆 PWM 变换器 | (14) |
| 1.3.3 可逆 PWM 变换器 | (14) |
| 1.4 典型系统 | (15) |
| 1.4.1 典型 I 型系统 | (16) |
| 1.4.2 典型 II 型系统 | (16) |
| 1.4.3 典型 I 型系统参数和性能指标的关系 | (17) |
| 1.4.4 典型 II 型系统参数和性能指标的关系 | (21) |
| 1.5 双闭环直流电动机控制系统 | (25) |

| | | |
|------------|------------------------|-------------|
| 1.5.1 | 双闭环直流电动机控制系统的基本结构 | (25) |
| 1.5.2 | 双闭环直流电力推进系统的工程设计 | (26) |
| 第2章 | 三相异步电动机电力推进控制系统 | (35) |
| 2.1 | 静止式变频装置 | (35) |
| 2.1.1 | 间接变频装置(交-直-交变频装置) | (35) |
| 2.1.2 | 直接变频装置(交-交-变频装置) | (36) |
| 2.1.3 | 电压源和电流源变频器 | (37) |
| 2.1.4 | 正弦波脉宽调制(SPWM)逆变器 | (38) |
| 2.1.5 | 电压空间矢量 PWM(SVPWM)控制技术 | (42) |
| 2.2 | 三相异步电动机的变频调速原理 | (48) |
| 2.2.1 | 交流变频调速系统的特点及其存在的问题 | (49) |
| 2.2.2 | 变频器控制策略和调速控制方式 | (49) |
| 2.2.3 | 变频器供电的异步电动机的机械特性 | (50) |
| 2.3 | 三相异步电动机矢量控制系统设计 | (55) |
| 2.3.1 | 矢量控制的基本思想 | (55) |
| 2.3.2 | 坐标变换和矢量变换 | (57) |
| 2.3.3 | 异步电动机的数学模型及矢量变换控制方程式 | (58) |
| 2.3.4 | 矢量变换控制系统的构成 | (63) |
| 第3章 | 机械负载与机械负载模拟 | (66) |
| 3.1 | 机械负载特性 | (66) |
| 3.1.1 | 电力推进系统的运动方程式 | (66) |
| 3.1.2 | 机械负载转矩特性 | (66) |
| 3.2 | 机械负载模拟的基本原理 | (67) |
| 3.2.1 | 机械负载模拟装置的构成 | (67) |
| 3.2.2 | 机械负载模拟装置的动态结构 | (68) |
| 3.2.3 | 机械负载模拟系统校正 | (69) |
| 3.3 | 螺旋桨推进器及负载模拟 | (71) |
| 3.3.1 | 螺旋桨的推力和转矩 | (71) |
| 3.3.2 | 螺旋桨与船体的相互作用 | (72) |
| 3.3.3 | 螺旋桨的转矩特性 | (72) |
| 3.3.4 | 船桨动态模型 | (74) |

第二篇 电力推进系统实验指导书

| | |
|-----------------------------------|-------|
| 第4章 电力推进系统实验概述 | (78) |
| 4.1 实验要求 | (78) |
| 4.1.1 预习要求 | (78) |
| 4.1.2 实验过程 | (78) |
| 4.1.3 实验报告 | (79) |
| 4.2 仿真软件及其开发环境 | (79) |
| 4.2.1 MATLAB 简介 | (80) |
| 4.2.2 Simulink 简介 | (81) |
| 4.2.3 Simulink 的模块库 | (85) |
| 4.2.4 Simulink 仿真的运行 | (82) |
| 4.3 电力推进系统实验平台 | (85) |
| 4.3.1 电力推进系统软件平台 | (85) |
| 4.3.2 电力推进电动机控制柜 | (85) |
| 4.3.3 机械负载模拟装置控制柜 | (87) |
| 4.3.4 螺旋桨模型软件模块实现 | (88) |
| 4.3.5 程序接口的处理 | (88) |
| 4.3.6 监控界面设计 | (89) |
| 4.3.7 数据库操作 | (90) |
| 第5章 电力推进系统仿真实验 | (91) |
| 实验一 直流电力推进系统的仿真实验 | (91) |
| 实验二 交-交变频控制三相异步电动机推进系统的仿真实验 | (95) |
| 实验三 异步电动机矢量控制系统仿真实验 | (99) |
| 实验四 船舶电力推进系统仿真实验 | (103) |
| 第6章 电力推进装置实验 | (106) |
| 实验五 电力推进装置实验 | (106) |
| 参考文献 | (113) |

绪 论

0.1 电力推进意义与发展

电力推进是电动机作为原动机推动运动装置按照一定规律进行运动的推进方式。电力推进系统是电机学、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,是电气工程专业非常重要的研究方向之一。

电力推进系统的主要优点包括:

(1) 机动性能好。由于电动机的控制性能优于传统的热力机械,电力推进船舶的机动性能较好,还具有紧急停车时滑行距离短、小角度回转和快速响应等优点。

(2) 电力推进系统减少传动装置以及热力系统所需要的大量辅机,节省了空间和成本。

(3) 推进效率高。

(4) 节能和有利于环保。减少各种燃油、滑油的消耗;减少废气排放和震动噪声污染。

基于上述优点,电力推进装置广泛应用在电力机车、电力船舶等场合,其研究已成了国际国内科研单位的研究热点。

电力推进方式的沿用已有 100 多年的历史,早期采用直流电机推进,其调速系统简单、性能好,但直流电动机存在电刷和机械换向器,结构复杂、维护困难,并且运行时有火花,使用场所受到限制,同时受到离心力和换向片之间耐压限制,所以直流电动机存在功率极限和转速极限,体积及重量大价格高。随着科学技术的进步,特别是电力电子技术、交流调速技术、永磁电机及其控制技术的飞速发展,电力推进的方式也多样化,如交流永磁同步电力推进系统,利用了永磁同步电动机体积小、重量轻、噪音低效率高的特点,特别是在低速工况下,效率比常规直流电机高很多;又如 PWM 变频器驱动交流感应电机,具有功率因数高、转矩控制平滑的优点。现代电力、电子技术在器件、电路及其控制技术方面,向着集成化、高频化、智能化、数字化方向发展,为交流电动机及控制系统用于电力推进提供了技术基础。

0.2 船舶电力推进研究概况

20 世纪 80 年代中期以来,综合电力系统和船舶电力推进迎来了一个蓬勃发展的新时期,全面融合了现代最先进的数控技术、网络技术以及动力和电力机械领域的最新进展,其原因有两个:一是电力电子和变流技术的发展,使中压电力系统在船舶中得到开拓、变频调速推进系统的功率已与其它动力装置不相上下;另一个是美国国防部的“海上革命”计划,推出了 IPS(综合电力系统)的概念,将电力推进系统快速地引入到军舰中。德国西门子公司于 1986 年完成 1100kW、230r/min 机电一体化的交流永磁同步推进电机并于 1997 年进行了实船运行试验;另外 1760kW 永磁同步推进电机装于 U112 潜艇试用。其体积与传统的直流推进电机相比,其长度和有效体积减少了 40。目前研制最大功率为 40MW、转速 150r/min 的永磁同步电动机用于 Siemens 公司和 Schotell 公司联合生产的 SSP 吊舱式电力推进系统。瑞士 BBC 公司 1986 年为瑞典潜艇设计了 1500kW、180r/min 永磁同步推进电动机,ABB 公司已研制 400kW 到 3MW 的永磁同步电动机用于其“Compact Azipod”吊舱式电力推进系统。美国 1991 年 1 月制定了潜艇电力推进系统的专项开发计划,研制 25000 轴马力永磁同步推进电动机。作

为该电机缩比样机的 3000 轴马力永磁同步推进电动机已完成全部试验。同时美国开始综合电力系统 - 全电力推进/动力系统结构的全电力船的水面舰船的研究,在 Sc-21 舰上装有 19500kW 高效永磁推进电机,于 1996 年开始组装,1998 年取代原有电动机。该电机由英国 CAGELEC 公司提供。英国 1996 年展出了“海航”号轻型隐身护卫舰设计模型,该舰装有 21000kW 永磁电动机在巡航或隐身时直接驱动螺旋桨。法国热蒙工业公司 1987 年研制了 400kW、500r/min 永磁电动机样机,它与直流电机比较体积也减少了 40%。1996 年 1800kW、180r/min、12 相推进电机及控制装置已完成了研制及实船使用所有的试验工作。

90 年代国际上几个主要的设计公司如:ABB,西门子、阿尔斯通、STN-ATLAS 公司,在电力推进船舶的开发方面展开了激烈的竞争,90 年代中期相继在推进机械装置上取得重大突破,各自推出了不同形式的吊舱结构,船的类型已从轮渡、军舰、邮船、液化气船、油轮、到大型集装箱船。电力推进船舶技术性能优越,如:节能、节省舱容、减少废气和震动噪声污染、增强操纵机动性,这一切已充分引起国内外造船界和航运界的重视。例如日本 4.8 万吨的水晶号、英国伊丽莎白皇后二号等豪华客轮采用交流变频电力推进器,节能 14%;目前最大的 9000TEU 集装箱船舶采用电力推进作辅助动力装置,国际上新型的吊舱式电力推进船舶的数量已超过几百条。

近年国内一些船厂也开始建造电力推进船舶,沪东-中华集团公司所属的爱德华船厂两年来已为瑞典船东制造了六条电力推进船,其中两条化学品船舶是采用西门子公司 360 度旋转的吊舱式推进系统;广州广船国际股份有限公司为广远公司制造的万吨船 2001 年 9 月 18 日在广州广船国际股份有限公司顺利下水。该船载重吨位一万八千吨,入级挪威 DNV 船级社。“泰安口”轮在设计和建造时却装置了更为轻巧的、将推进和方向控制合二为一的 SSP 电力推进系统;大连船厂为挪威船东建造的 11.5 万吨出口穿梭油轮,采用了 6600V 中压电力系统。此外,大连与烟台间的轮渡船,东海石油平台也论证选用电力推进系统。预测今后十年电力推进船舶在国内市场会有大的突破。

国内上世纪 80 年代在电力推进的同步电机开发方面获得了成功,但在综合电力系统方面的研究相当滞后,哈尔滨工程大学、海军工程大学和 712 研究所等国内高校和科研院所所在军舰电力推进的理论研究和试验上有所突破,而民船的设计单位大体是直接引进国外的成熟产品。关注船舶发展新动向,研究电力推进系统仿真研究,对航海事业的发展有着巨大意义。

船舶电力推进系统的研究已成了国际国内造船界和科研单位的研究热点。先进的控制理论和控制在船舶电力推进系统的应用研究,并建立一个完善的性能测试平台,对船舶电力推进系统中相关的设备和器件进行科学的试验,这有利于加快国内船舶电力推进系统的研究,并可大大降低研究成本,也为船舶电力推进系统的构建提供可靠的技术保障。

0.3 机械负载模拟的现状

电力推进系统的负载为机械负载,如果能够正确模拟推进系统的负载,将对电力推进系统研究具有重要的意义。机械负载模拟系统就是利用直流电机或者交流电机作为电能-机械能的转换元件,将电能转换成电机转子的机械能,以转矩形式为承载设备加载,通过对加载转矩的控制实现对机械负载的模拟。机械负载模拟系统实质是一种转矩控制系统,机械负载模拟系统的运动是被动的,但其力矩却是主动加载的,故此它是被动运动与主动加载的统一。对于机械负载模拟系统来说,就是如何快速补偿承载对象速度变化而带来的负载电机中的反电动势,使得该模拟系统具有与实际机械负载相同的机械特性。

国外文献报导的多是用于测试电动机或电力传动系统负载能力的电动负载模拟系统的研究工作。目前国外许多学者在研究借助这种驱动电机-负载电机机械负载模拟实验平台,研究一种负载电机控制系统,此系统能够实现该实验平台对机械负载动态特性的模拟,最终实现对各种先进控制算法的验证和测试;进一步还可以对试验平台中电机,电力传动系统及驱动器进行性能测试。

二十世纪九十年代起,负载模拟系统不但能够模拟具有任一惯量和任一摩擦系数的机械负载,还对负载模拟器的两个基本的控制策略进行了对比:其一是驱动电机和负载电机的机械参数都已经知道,这样可以准确模拟;其二是驱动电机的参数不确定但是负载电机的参数已知,这种情况下驱动电机的行为对负载电机而言是一种随机的扰动,这种情况下对负载的模拟精度主要取决控制策略。

对于负载模拟系统地实现上,出现了用直流电机作为负载电机,对其进行控制实现对线性和非线性机械负载的模拟,最终目标是用负载模拟系统来实现对三相交流变速逆变器的测试。此时,针对负载模拟系统的控制提出了三种方案,方案一运用了被模拟机械负载的逆动力学模型,此方法简单,但是由于逆动力学模型中往往含有微分项当运用数字控制系统实现时会引入噪声,并且实际应用中很多非线性机械负载是推导不出精确的逆动力学模型的;方案二引入转矩测量避免了逆动力学模型,但是通过转矩传感器直接对电机的轴转矩进行测量也有困难,传感器采回的信号需要滤波这样会造成频宽变低;方案三运用转矩估计策略,通过获取直流电机电枢电流得到其转矩,并带入实验系统得模型中估计出驱动转矩,这种方法需要电动负载模拟系统的逆动力学模型。

同一时期,也有电动负载模拟系统由两台同轴相连的电压源变频器馈电的永磁同步电机组成,其中一台作为驱动机,另一台作为驱动机的负载,通过对负载电机进行合适的控制为驱动机提供各种模拟的机械负载。这两套电机在物理构成上是一致的,但是驱动机为速度控制,负载机为转矩控制。针对负载模拟电机的转矩控制提出了三种方案:方案一采用测得的速度直接计算出负载模拟电机需要的参考转矩,没有采用转矩反馈,该方法简单直接明了,概念清晰,把转矩参考值送给负载电机,让其在直接转矩下工作,也即直接对电流进行调节,提高了快速性使得动态模拟性能更好,并且由于没有引入转矩反馈,不需要转矩传感器,这样就可以缩短负载机和驱动机连接轴的长度,并且使轴的硬度提高,但缺点是需要知道负载电机的机械参数来计算电磁转矩;方案二使用了转矩传感器,由它测量出转矩反馈值,该方案的优点是动态模拟精度对负载电机或驱动电机的机械参数依赖比较小;方案三同样是设置了转矩反馈,只不过此方案中的转矩反馈值是同方案一中一样通过估计计算出来的。在大多数情况下采用方案二,因为该方案的优点对于被测试电机而言尤为重要。

二十一世纪初,负载模拟系统的发展体现在是否能够对机械负载动态特性进行准确模拟,负载模拟系统的控制策略有大量的研究,并且就实验结果与仿真结果进行了对比,证明该策略的可行性。甚至在被模拟机械负载的惯量是实验系统十倍的情况下,实验的结果依然非常好。此时期,不仅对线性负载进行了模拟,而且对非线性负载也进行了模拟。

从国内外机械负载电动模拟技术的研究状况可以看出:(1) 进入到了实践的多数集中在了对电机,驱动器和传动系统得稳态测试,或者为他们提供机械特性缓慢变化的负载,然而,在实际工业过程中机械负载的过渡过程的动态行为往往成为电机或驱动器故障的根源,并且这种暂态特性对运动控制算法影响也很大;(2) 对机械负载的动态特性进行模拟的技术还主要处于理论分析和仿真研究阶段,仿真都集中在了负载电机对不同负载的模拟上,主要基于负载模拟系统的运动方程为数学模型,而作为整体系统中的许多单元(例如调速控制单元,驱动单元)均作为理想化的甚至忽略的处理,这样就失去了真实性;(3) 许多学者在对负载模拟系统进行控制时使用 IMD (inverse - mechanical - dynamics) 即机械负载的逆动力学模型,但是使用该模型仅仅在采样影响不用考虑连续系统中有效。由于逆动力学模型中大多存在微分项,当进行离散化时会产生噪声干扰,如果此时被模拟负载的参数超过负载模拟系统真实参数一定限度就会引起系统不稳定,并且微分环节在实际应用中是难以处理的;(4) 采用滤波的方法可以消除 IMD 离散化时带来的噪声,模拟的效果良好,但是在开环的情况下进行的仿真。采用滤波会改变开环系统的零极点,当负载模拟系统作为某个闭环系统的一部分时,将会使整个系统的特性发生变化,使负载模拟失去意义;(5) 最新的一种控制策略运用被模拟负载的动力学模型进行前馈补偿,可以很好的实现对机械负载动态特性的模拟。但是对于驱动电机实际转矩的处理却带来问题:一种是运用估计的方法计算,这种方法依赖于负载模拟系统的机械参数;另一种方法直接使用参考转矩代替实际转矩,但是参考转矩与实际转矩是不一致的,尤其在过渡过程。

0.4 本书主要内容

本书从电力推进系统的构成出发,对推进电动机的控制进行了介绍,并从船舶电力推进系统的特点出发,对螺旋桨推进器负载进行了介绍。为了突出理论与实践相结合,本书在理论知识的基础上,引入了交直流电力推进系统仿真实验和船舶电力推进系统实验装置的实验研究方法。为了加深对船舶电力推进系统的研究,本书对船舶电力推进仿真装置进行了总体设计、对螺旋桨负载模拟装置的实现作了介绍。本书内容源于工程实际,具有前沿性和先进性,除了电力推进系统的原理,本书作者还结合科研经验和实验室条件融入了机械负载模拟的原理和实践方法。依据本书内容可以开展电力推进的仿真实验教学和实验装置教学等教学内容。

本书遵循深入浅出,循序渐进的写作思想及理论联系实际的原则进行内容安排,以理论为基础,以实验为重点,分别介绍了直流电力推进系统原理和设计方法,将理论设计通过仿真实验进行研究;介绍交流电力推进系统原理和仿真实验研究;介绍机械负载模拟原理与仿真实验;结合具体的电力推进系统和机械负载模拟装置进行硬件设计与实践;并以此装置设置了电力推进系统实验。

本书前续理论包括电机及拖动基础、电力电子技术和自动控制原理。可供高等院校工业自动化专业、电气工程及其自动化专业本科生、研究生作为专业课实验教材使用,也可供科研院所、厂矿企业中从事电器传动的科技工作者参考使用。

第1篇 基本原理

第1章 直流电力推进控制系统原理

1.1 可控直流电源

常用的可控直流电源有以下三种：

- (1) 旋转变流机组——用交流电动机和直流发电机组成机组,以获得可调的直流电压。
- (2) 静止可控整流器——用静止的可控整流器,例如晶闸管可控整流器,以获得可调的直流电压。
- (3) 直流斩波器和脉宽调制变换器——用恒定直流电源或不控整流电源供电,利用直流斩波器或脉宽调制变换器产生可变的平均电压。

下面分别对各种可控直流电源以及由它供电的直流调速系统作概括性的介绍。

1.1.1 旋转变流机组

图1-1中给出了旋转变流机组和由它供电的直流调速系统原理图。

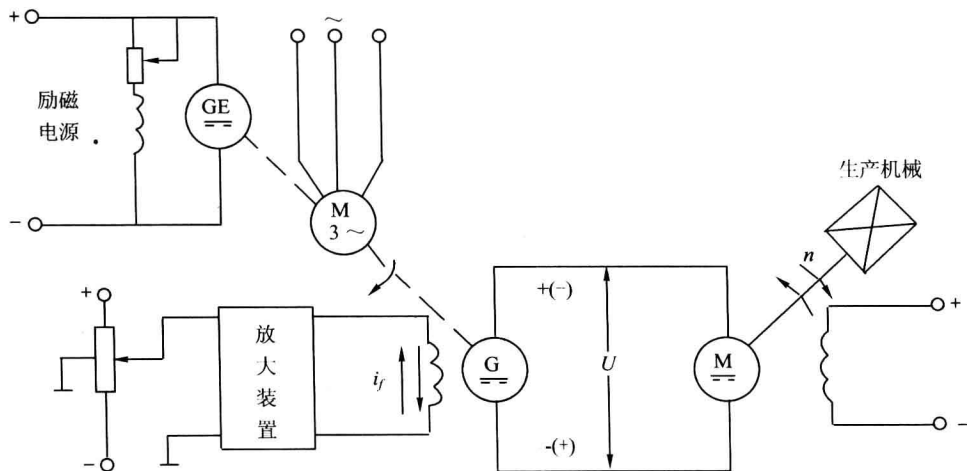


图1-1 旋转变流机组供电的直流电动机控制系统原理图

由交流电动机(异步电动机或同步电动机)拖动直流发电机G实现变流,由发电机给需要调速的直流电动机M供电,调节发电机的励磁电流 i_f 可改变其输出电压 U ,从而调节电动机的转速 n 。这样的调速系统简称G-M系统。为了供给直流发电机和电动机的励磁,通常专门设置一台直流励磁发电机GE,可装在交流机组向轴上,也可另外单用一台交流电动机拖动。对系统的调速性能要求不高时,可直接由励磁电源供电,要求较高的闭环调速系统一般都应通过放大装置进行控制。G-M系统的放大装置多采用电机型放大器(如交磁放大机)和磁放大器,需要进一步提高放大系数时还可增设电子放大路作为前级放大。如果改变 i_f 的方向,则 U 的极性和 n 的转向都跟着改变,所以G-M系统的可逆运行是很容易实现的。

图 1-2 为采用变流机组供电时电动机可逆运行的机械特性。由图可见,无论正转减速还是反转加速时都能够实现回馈制动,因此 G-M 系统是在允许转矩范围之内四象限运行的系统。

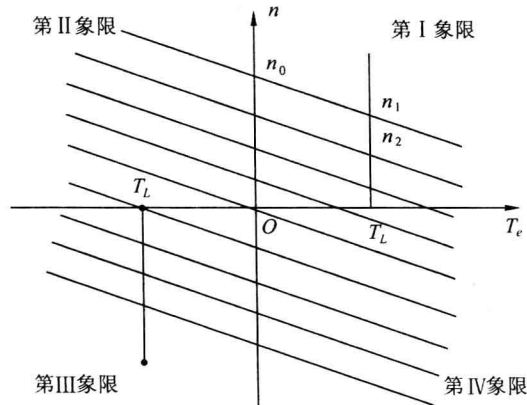


图 1-2 G-M 系统的机械特性

旋转变流机组供电的直流调速系统在 20 世纪 50 年代曾广泛地使用着,至今在尚未进行设备更新的地方仍沿用这种系统。由于该系统需要旋转变流机组,至少包含两台与调速电动机容量相当的旋转电机,还要一台励磁发电机,因而设备多、体积大、费用高、效率低、安装须打地基、运行有噪声、维护不方便。为了克服这些缺点,在 20 世纪 50 年代开始采用汞弧整流器(大容量时)和闸流管(小容量时)这样的静止变流装置来代替旋转变流机组,形成所谓的离子拖动系统。到了 20 世纪 60 年代又让位给更为经济可靠的晶闸管整流器。

1.1.2 静止可控整流器

1957 年,晶闸管(俗称可控硅整流元件,简称“可控硅”)问世,到了 20 世纪 60 年代,已生产出成套的晶闸管整流装置,使变流技术产生了根本性的变革,开始进入晶闸管时代。到今天,晶闸管-电动机调通系统(简称 V-M 系统)已成为直流调速系统的主要形式。图 1-3 是 V-M 系统的简单原理图。

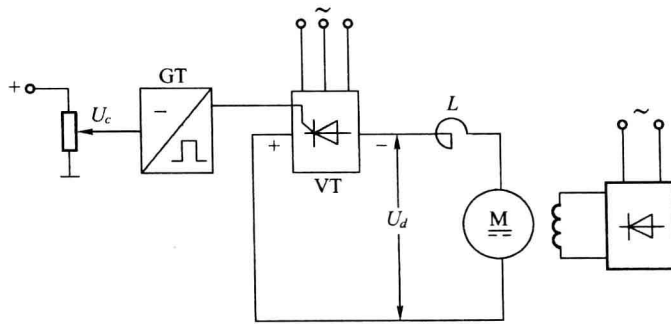


图 1-3 V-M 系统的简单原理图

图中:VT 是晶闸管可控整流器,它可以是单相、三相或更多相数,半波、全波、半控、全控等类型,通过调节触发装置 GT 的控制电压来移动触发脉冲的相位,即可改变整流电压 U_d ,从而实现平滑调速。和旋转变流机组及离子拖动变流装置相比,晶闸管整流装置不仅在经济性和可取性上都有很大提高,而且在技术性能上也显示出较大的优越性。晶闸管可控整流器的功率放大倍数在 10^4 以上,其门极电流可以直接用晶体三极管来控制,不再象直流发电机那样需要较大功率的放大装置。在控制作用的快速性方面,变流机组是秒级,而晶闸管整流器是毫秒级,这将会大大提高系统的动态性能。

晶闸管整流器也有它的缺点。首先,由于晶闸管的单向导电性,它不允许电流反向,给系统的可逆运行造成困难。由半控整流电路构成的 V-M 系统只允许单象限运行,全控整流电路可以实现有源

逆变,允许电动机工作在反制动状态,因而能够获得二象限运行。如果要实现四象限运行时,只好采用正、反两组全控整流电路,所用变流设备要增多一倍。

晶闸管的另一个缺点是元件对过电压、过电流以及过高的 du/dt 和 di/dt 都十分敏感,其中任一指标超过允许值都可能在很短时间内损坏元件,因此必须有可靠的保护装置和符合要求的散热条件,而且在选择元件时还应留有足够的余量。只要元件质量过关、装置设计合理、保护设施齐备,晶闸管装置的运行就十分可靠,如果不是这样,就可能常出事故,给维护运行带来不少麻烦。最后,当系统处在深调速状态,即在较低速运行时,晶闸管的导通角很小,使得系统的功率因数很低,并产生较大的谐波电流,引起电网电压波形畸变,殃及附近的用电设备。如果采用晶闸管调速的设备在电网中所占的容量比重较大,就会造成所谓的“电力公害”。在这种情况下,必须增设无功补偿和谐波滤波装置。

1.1.3 直流斩波器或脉宽调制变换器

在无线铁道电力机车、工矿电力机车、城市电车和地铁电机车等电力推进场合,常采用直流串励或复励电动机,由恒压直流电源供电。过去多用切换电阻来控制电车的起动、制动和调速,电能电阻中损耗很大。晶闸管也可用来控制直流电压,这就是直流斩波器,或称直流调压器。采用晶闸管的直流斩波器基本原理示于图 1-4。

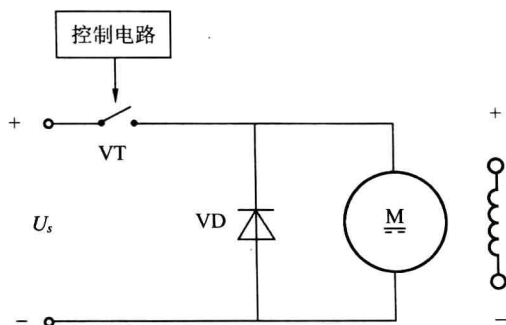


图 1-4 直流斩波器 - 电动机系统的原理图

与整流电路不同的是,在这里晶闸管 VT 不是受相位控制,而是工作在开关状态。当 VT 被触发导通时,电源电压 U_s 加到电动机上,当 VT 关断时,直流电与电动机断开,电动机经二极管 VD 续流,两端电压接近于零,如此反复,得电枢端电压波形 $u=f(t)$ 如图 1-5 所示。

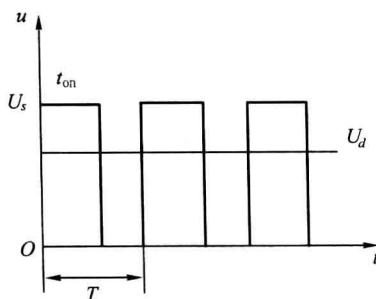


图 1-5 直流斩波器 - 电动机系统的电压波形

电动机得到的平均电压为:

$$U_d = \frac{t_{on}}{T} U_s = \rho U_s \quad (1-1)$$

式中: T ——晶闸管的开关周期;

t_{on} ——VT 开通时间；

$\rho = t_{on}/T = t_{on}f$ ——占空比；

f ——开关频率。

直流斩波器的平均输出电压 U_d 可以通过改变主晶闸管的导通和(或)关断时间来调节。

(1) 脉冲宽度调制(Pulse Width Modulation), 简称 PWM——脉冲周期 T 不变, 只改变晶闸管的导通时间 t_{on} 。亦即改变脉冲的宽度；

(2) 脉冲频率调制(Pulse Frequency Modulation), 简称 PFM——导通时间不变, 只改变开关频率 f 或开关周期 T , 也就是只改变晶闸管关断的时间；

(3) 两点式控制。当负载电流或电压低于某一最小值时, 使 VT 触发导通；当电流或电压达到某一最大值时, 使 VT 关断。导通和关断的时间都是不确定的。

由普通晶闸管或逆导晶闸管构成的斩波器开关频率不高, 因而输出电流脉动较大, 调速范围有限, 此外, 附加的强迫关断电路也增加了装置的体积和复杂性。为了适应大功率开关电路的要求, 自 70 年代以来研制了多种既能控制其导通又能控制其关断的“全控式”电力电子器件。如门极可关断晶闸管(GTO)、电力晶闸管(GTR)、电力场效应管(P-MOSFET) 等等。全控式器件的关断时间短, 因而由它们构成的斩波器其工作频率可以提高到 $1 \sim 4\text{kHz}$, 甚至达到 20kHz 。采用全控式器件实行开关控制时, 多用脉冲宽度调制的控制方式, 形成近年来应用日益广泛的 PWM 装置-电动机系统, 简称 PWM 调速系统或脉宽调速系统。

与 V-M 系统相比, PWM 调速系统有下列优点：

(1) 由于 PWM 调速系统的开关频率较高, 仅靠电枢电感的滤波作用可能就足以获得脉动很小的直流电流, 电枢电流容易连续, 系统的低速运行平稳, 调速范围较宽, 可达 $1:10000$ 左右。又由于电流波形比 V-M 系统好, 在相同的平均电流即相同的输出转矩下, 电动机的损耗和发热都较小；

(2) 同样由于开关频率高, 若与快速响应的电机相配合, 系统可以获得很宽的频带, 因此快速响应性能好, 动态抗扰能力强；

(3) 由于电力电子器件只工作在开关状态, 主电路损耗较小, 装置效率较高。

受到器件容量的限制, 直流 PWM 调速系统目前只用于中、小功率的系统。

1.2 晶闸管-电动机系统

晶闸管-电动机直流调速系统这类系统目前应用比较普遍, 并且分析这类系统所用的基本概念和方法都可以作为分析其它系统的基础。V-M 系统就是带 R、L、E 负载的晶闸管可控整流电路, 关于它的线路、电压和电流波形、机械特性等等都已在《电力电子技术》课程中讲授。为了承上启下, 本节根据分析直流电力推进系统的需要, 重点地归纳出 V-M 系统的几个特殊问题:(1) 触发脉冲相位控制；(2) 电流脉动的影响及其抑制措施；(3) 电流波形的连续与断续；(4) V-M 系统的机械特性。

1.2.1 触发脉冲相位控制

在 V-M 系统中, 调节给定电压, 即可移动触发装置 GT 输出脉冲的相位。从而很方便地改变整流器的输出瞬时电压 u_d 和平均电压 U_d 。如果把整流装置内部的电压压降、器件正向压降和变压器漏抗引起的换相压降都移到整流装置外面, 当作负载电路压降的一部分, 那么整流电压便可用其理想空载值 u_{d0} 和 U_{d0} 代替, 相当于用图 1-6 的等效电路代替图 1-3 的实际主电路。

这时, 瞬时电压平衡方程式可写作：

$$u_{d0} = E + i_d R + L \frac{di_d}{dt} \quad (1-2)$$

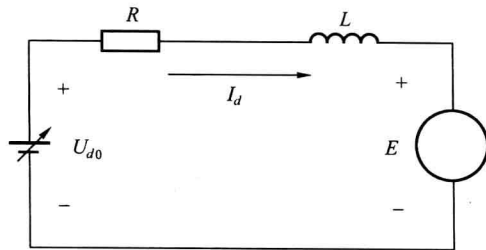


图 1-6 V-M 系统主电路的等效电路图

式中： L ——主电路总电感；

R ——主电路总的等效电阻，包括整流装置内阻，电机电枢电阻和平波电抗器电阻；

E ——电动机反电动势；

i_d ——整流电流瞬时值。

对 u_{d0} 进行积分即得理想空载整流电压的平均值 U_{d0} 。

用触发脉冲的相位控制整流电压的平均值是晶闸管整流器的主要特点。 U_{d0} 与触发脉冲相位 α 的关系因整流电路的形式而异。对于一般全控式整流电路，当电流波形连续时， $U_{d0} = f(\alpha)$ 可用式(1-3)表示。

$$U_{d0} = \frac{m}{\pi} U_m \sin \frac{m}{\pi} \cos \alpha \quad (1-3)$$

式中： α ——从自然换相点算起的触发脉冲控制角；

U_m —— $\alpha = 0$ 时的整流电压波形峰值；

m ——交流电源一周内的整流电压脉波数。

对于不同的整流电路，它们的数值示于表 1-1。表中 U_2 是整流变压器二次侧额定相电压有效值。

表 1-1 不同整流电路整流电压波形峰质、脉波数及平均整流电压

| 整流电路 | 单相全波 | 三相半波 | 三相全波 | 六相半波 |
|----------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| U_m | $\sqrt{2}U_2$ | $\sqrt{2}U_2$ | $\sqrt{6}U_2$ | $\sqrt{2}U_2$ |
| m | 2 | 3 | 6 | 6 |
| U_{d0} | $0.9U_2 \cos \alpha$ | $1.17U_2 \cos \alpha$ | $2.34U_2 \cos \alpha$ | $1.35U_2 \cos \alpha$ |

1.2.2 电流脉动与平波电抗器

整流电路的脉波数 $m = 2, 3, 6, 12, \dots$ ，其数目总是有限的，比直流电机每对极下换向片的数目要少得多。因此，除非主电路电感 $L = \infty$ ，否则 V-M 系统的电流脉动总比 G-M 系统更为严重。这样一来，会产生以下两个主要的问题：

(1) 脉动电流产生脉动的转矩，对生产机械不利。

(2) 脉动电流造成较大的谐波分量，流入电源后对电网不利，同时也增加电机发热。

在应用 V-M 系统时，首先要考虑抑制电流脉动的问题，其主要措施是：

(1) 增加整流电路的相数。