



交流牵引

传动技术基础

骆开源 邱忠才◎主编

JIAOLIU QIANYIN

CHUANDONG JISHU JICHU



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

交流牵引传动技术基础

骆开源 邱忠才 主编

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

内 容 简 介

本书全面介绍了交-直-交鼠笼式异步牵引电动机变频调速系统在交流传动电力机车和高速动车上的应用, 突出介绍和分析交-直-交鼠笼式异步牵引电动机变频调速系统的结构原理和性能特点。针对我国目前运用的交流电力机车及动车组实际问题, 以交流传动的基础理论加以分析阐述, 力求深入浅出、理论联系实际。

本书可作为高等院校机车车辆本科专业教材, 也可供从事电气牵引相关专业的工程技术人员参考, 以及继续教育的培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

交流牵引传动技术基础 / 骆开源, 邱忠才主编. —
成都: 西南交通大学出版社, 2012.8
ISBN 978-7-5643-1894-9

I. ①交… II. ①骆… ②邱… III. ①异步电动机—
牵引电动机—变频调速—研究 IV. ①TM922.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 185998 号

交流牵引传动技术基础

骆开源 邱忠才 主编

*

责任编辑 黄淑文

封面设计 墨创文化

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段 111 号 邮政编码: 610031 发行部电话: 028-87600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

四川五洲彩印有限责任公司印刷

*

成品尺寸: 170 mm × 230 mm 印张: 9.5

字数: 171 千字

2012 年 8 月第 1 版 2012 年 8 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5643-1894-9

定价: 20.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

自 20 世纪 50 年代中国第一条电气化铁路诞生至今,国产韶山型交-直电力机车,是唯一的牵引动力,所以韶山型交-直电力机车成为我国电力机车发展史上的第一座里程碑。

随着我国社会和经济的快速进步,现有的铁路运输已远不能满足形势发展的需求,而牵引动力的不足首当其冲,成为重要障碍。事实表明:交-直电力机车已不能适应当前和未来电气化铁路客、货运输对高速和重载的要求。而交流传动电力机车具有功率大、牵引电动机体积小且结构简单、粘着性能好等固有优点,是替代交-直电力机车成为新一代电气化铁路牵引动力的必然选择。

通过自主研发和技术引进,目前我国已基本掌握交流传动电力机车和高速动车生产的关键技术,批量生产出了“和谐”系列交流传动大功率货运电力机车和“CRH”系列 200~300 km/h 交流传动动车组。可以预见,在不远的将来,越来越多的交流传动电力机车和动车组,将逐步且最终完全取代交-直电力机车,而进入电力牵引的下一个新时代。

我们认为,“电力机车”作为西南交通大学的一个专业方向,其专业教学内容必须紧跟生产实际、与时俱进,因此从 2006 年起,修订产生出新的专业教学大纲和“交流传动与控制”课程教学大纲,开设“交流牵引传动技术基础”作为专业必修课,并编写了《交流牵引传动技术基础》教材。该教材从油印讲义至今已使用三届,并在教学过程中修改、补充,终成定稿出版。

本书按专业大纲要求,授课为 48 学时,有两点须加以说明:

(1) 为使全书结构更紧凑且紧密结合专业需要,本书只涉及交-直-交、鼠笼式异步牵引电动机变频调速系统,而其他交流传动方式和系统都不作介绍。另外在学习本课程前,最好较系统地学习过“电机学”、“电力电子技术”、“自动控制原理”等专业基础技术课程。

(2) 全书有三处重点:① 第 2 章,变频调速三相异步电动机的稳态,即

是对被控制对象的特性的认识了解；② 交-直-交鼠笼式异步牵引电动机变频调速系统的结构、组成及工作原理，即书中第 3 章全部内容。③ 几种典型的交-直-交鼠笼式异步牵引电动机变频调速系统的控制原理和特点，即书中 4 ~ 8 章的内容。

本书旨在突出交流传动基础理论，联系我国目前交流电力机车和动车组的运用实际，给学生提供一份专业性基础教材。但因目前国内相关资料较少，特别是作者水平有限又比较缺乏实践经验，书中难免存在不妥之处，欢迎大家批评指正。

编 者

2012 年 5 月

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 交流传动电力机车——中国新一代铁路牵引动力	1
1.2 交-直-交牵引传动系统的特点	3
1.3 我国交流传动电力机车现状及发展	4
第 2 章 变频调速三相异步电动机的稳态特性	7
2.1 变频调速异步电动机的稳态特性	7
2.2 恒 U_1/f_1 控制的三相异步电动机变频调速	12
2.3 电力机车牵引特性对变频调速的要求	13
思考题	19
第 3 章 电力机车交-直-交传动系统的主电路	21
3.1 交-直-交传动系统主电路的组成	21
3.2 交-直-交电压型逆变器和电流型逆变器	22
3.3 交-直-交 180° 导通型逆变器	24
3.4 脉宽调制型 (PWM) 逆变器	27
3.5 正弦脉宽调制 (SPWM)	29
3.6 PWM 逆变器的控制技术	34
3.7 四象限脉冲整流器	42
3.8 三相交流异步牵引电动机的结构及参数	52
思考题	59
第 4 章 稳态模型下交-直-交传动控制系统	60
4.1 转速开环的 SPWM 电压型逆变器调速系统	60
4.2 异步电动机转差频率控制变频调速系统	61
思考题	65

第 5 章 三相异步电动机的矢量控制	66
5.1 异步电动机矢量控制的基本原理	66
5.2 定子空间矢量坐标变换	68
5.3 三相异步电动机在两相同步旋转 M 、 T 坐标系中的数学模型	70
5.4 矢量控制的实现	72
思考题	77
第 6 章 矢量控制变频调速系统	78
6.1 带转矩内环的转速、磁链闭环矢量控制系统	78
6.2 磁链开环矢量控制系统	80
6.3 矢量控制的国产和谐 HX _{D1} 型货运交流电力机车简介	81
思考题	87
第 7 章 电压空间矢量调制 (SVPWM) 技术	88
7.1 电压空间矢量与磁链轨迹	88
7.2 二电平逆变器的电压空间矢量组合和磁链轨迹	90
7.3 三电平逆变器的 SVPWM 控制	98
思考题	102
第 8 章 异步电动机的直接转矩控制	103
8.1 直接转矩控制的基本原理和系统结构	103
8.2 定子磁链的控制	106
8.3 和谐 CRH ₂ 动车组简介	113
思考题	118
第 9 章 CRH ₁ 型动车组牵引传动系统及仿真	119
9.1 CRH ₁ 型动车组牵引传动系统结构	119
9.2 CRH ₁ 型动车组牵引传动系统仿真主要模块构建	136
9.3 CRH ₁ 型动车组牵引传动系统仿真结果分析	139
参考文献	144

第1章 绪论

1.1 交流传动电力机车——中国新一代铁路牵引动力

自 20 世纪 80 年代德国 E120 型交流电力机车投入运用，证实了人们对交流传动电力机车的一系列优点的预期，之后包括德国、法国、日本、瑞典等国家先后研制出多种系列的交流电力机车用于铁路干线牵引和城际高速动车组。至今，欧洲和日本形成全球交流电力机车生产和技术研究中心，以新科技、新材料、新工艺不断推出新型交流电力机车和动车组。牵引动力的转型带动了铁路全面的技术改造，使具有百年历史的铁路迎来了又一次发展机遇。

随着经济发展和社会进步，高速铁路越来越受到世界发达国家及新兴工业国家的重视，成为解决客运交通拥堵的一种选择，从而推动了交流传动动车组的研究、应用和技术进步。

以日本为例，高速铁路的发展与动车组科技进步是密切相关的。1964 年日本建成世界上首条高速铁路即东海道新干线，之后到 2000 年又有山阳等 6 条高速铁路新干线相继开通，总里程达 2 500 km。从 1964 年到 1990 年，各新干线使用的动车组仍采用相控调压的交-直传动系统，最高时速为 200 km/h。1990 年研制出 300 系列动车组，以交-直-交成功取代交-直传动系统，但牵引调速控制仍采用静态的转差频率调节方式。此后不到 10 年的时间内，陆续开发出 500 系、E1、E2、E3 系及 700 系交-直-交动车组，除主电路采用先进的大功率电力电子元件如 GTO、IGBT（绝缘栅极、双极性晶体管）、IPM（智能功率模块）外，牵引传动控制方式也实现了转子磁链矢量控制。技术进步使动车组性能不断提升，其中 E2、E3、700 系列动车组的最高时速可高达 300 km/h 以上。

实践证明：交流传动动车组不仅可以提供更强大的动力跑得更快，而且降低了整车的重量、减轻了轴重、增加了载客空间，给乘客带来更加舒适的旅行环境。表 1.1 仅举交流和交-直动车组牵引电动机的参数比较，可以看出上述优势。

表 1.1 牵引电动机参数比较

制造时间	系列	动车数	电机类型	全车台数	单台功率	单台重量	电机体积
1963 年	0 系	16	DC	64	185 kW	876 kg	$\phi 580 \text{ mm} \times 743 \text{ mm}$
1990 年	300 系	10	AC	40	300 kW	397 kg	$\phi 458 \text{ mm} \times 700 \text{ mm}$

我国现有电气化铁路近 2 万 km, 国产韶山型交-直电力机车占 90% 以上, 在“七五”期间形成了 4、6、8 轴机车的系列化, 每轴电机功率在 800 kW 以下, 列车最高时速 120 km/h, 多数机车为客货兼用。

以下几点原因可以说明交-直电力机车, 已不能适应当前和未来对客运高速、快速及货运重载的要求。

(1) 以货运重载而言, 如果在平直线路上单机 5 000 t, 最高时速 120 km/h, 机车牵引总功率应达到 10 000 kW 以上, 以 8 轴机车计算, 则单轴功率应在 1 200 kW 以上。对于交-直电力机车所用直流牵引电动机来, 这几乎是无法实现的。

再以高速而论, 当速度为 200 ~ 300 km/h 时, 动车组整车功率应达到 12 000 ~ 16 000 kW, 由表 1.1 可以看出, 日本在新干线初期使用的 0 系交直动车组, 最高时速为 200 km/h, 直流牵引电动机体积和重量已接近动车组的设计极限, 而单台电机的功率却不及交流牵引电动机的 2/3。

应该说以上的单机 5 000 t 重载、客运高速 200 km/h 仅为起点指标, 则起点以上的指标交-直电力机车更无法满足。

(2) 制约交-直电力机车的主要因素, 还在于直流牵引电动机。与三相交流异步电动机相比, 直流电动机结构复杂, 直流电动机除定子励磁绕组外, 转子上有电枢绕组、换向器, 还有电刷装置连接定子和转子, 因此体积大; 直流电机消耗铁磁材料和铜线、绝缘材料多, 因此重量大, 成本也高。而三相异步电动机结构可以说特别简单, 仅有三相定子绕组, 转子鼠笼结构, 定、转子间为空气隙。

与相同容量的三相异步电动机比较, 直流电动机的重量是交流电动机的 3 倍, 体积是交流电动机的 2 倍, 而交流电动机的成本仅为直流电动机的 40%,

且直流电动机结构复杂,故障率远比交流电动机高。

(3) 由于异步牵引电动机体积较小而不受电力机车转向架结构尺寸的限制,单电机功率可以做到 $1\,500 \sim 2\,000\text{ kW}$;且由于异步牵引电动机转子结构简单而紧凑,其转速在 $4\,000\text{ r/min}$ 以上,最高可达 $10\,000\text{ r/min}$,这就为电力机车的重载、高速牵引提供了理想的动力选择。

(4) 电力机车的牵引力是由轮轨间的粘着产生的,称为轮周牵引力,交流异步电机与直流牵引电动机比较具有更好的粘着特性,这是因为异步电动机有“硬”机械特性,当动轮在钢轨上打滑(粘着破坏)时,虽电机负载急剧下降,但电机转速上升有限,有利于粘着的再恢复;相反,直流串激牵引电动机在这种情况下,转速陡升直到造成电机损害,所以必须加设专门的“防空转”保护措施。

(5) 随着电力电子技术和微型计算机功能的提升,异步电动机矢量控制、磁链空间矢量控制、直接转矩控制等基于动态模型的控制方式,已经引入机车牵引控制系统,使机车交流传动系统的静态和动态性能完全能和直流传动相媲美。

当前我国铁路正处于跨越式发展的时期,牵引动力的现代化改造势在必行。可以预见不久的将来,越来越多的国产交流传动的电力机车和动力车组,将逐步取代交-直机车而进入一个新时代。

1.2 交-直-交牵引传动系统的特点

交-直-交牵引系统是交流传动技术在电力机车上的应用,除具有交流传动的一般共性外,交流牵引传动系统还有如下特点:

(1) 主电路功率大,因此牵引电动机首选三相异步电动机。如国产 HXD_1 货运交流机车单台牵引电动机(ITB2624-0TD02)额定功率 $1\,224\text{ kW}$,逆变器输出额定容量 $3\,000\text{ kV}\cdot\text{A}$,最高电压 $1\,500\text{ V}$ 、最大电流 $1\,800\text{ A}$;即使分散动力型的动车组,其单台电机功率也在 300 kW 左右,逆变器容量 $2\,000\text{ kV}\cdot\text{A}$ 。

大功率的变流过程,首先必须要有大功率的电力电子元件,目前欧洲和日本处于领先地位,20世纪90年代已开发出电压、电流 $1.5\text{ kV}/0.6\text{ kA}$ 的IGBT(绝缘栅极、双极性晶体管)系列的全控元件,1996年日本三菱公司展示了

2kV/0.6kA 的 IPM (智能功率模块) 并在 1997 年用于新干线, 表明大功率电力电子器件在小型化、可靠性方面取得重要进展, 为构成高性能的交-直-交牵引系统提供了条件。

(2) 为适应牵引要求, 交流牵引传动系统必须有宽的调速范围, 其恒功调速比 K_n (电机最大转速/额定转速) ≥ 2 。在整个启动过程 (额定转速以下) 电机提供可能的最大转矩。

(3) 系统具有再生制动功能, 如 HX_{D1} 其再生制动功率和牵引额定功率相同为 9 600 kW。动车组的再生制动总功率也和总的牵引功率一致。

(4) 交流传动系统从控制理论角度看, 是从电机的数学模型入手, 通过可调电压和可变频率的逆变三相交流电源对异步电动机的转速 (转矩) 实施控制。定子电压 (或电流)、频率是电动机的两个输入变量。由于被控对象三相异步电动机的多变量、非线性、强耦合性质, 定子电流中励磁电流和转矩电流相互耦合, 所以解决异步电动机控制的关键, 就集中于使定子电流按励磁分量和转矩分量解耦, 以实现磁链和转矩的单变量控制。

以异步电动机静态模型为基础的控制系統, 用恒电压/频率比或保持励磁电流不变的方法, 在一定的调速范围保持气隙磁通幅值不变, 也相当于静态磁场解耦。

随着大功率、高频率的全控电力电子器件及专用大规模数字电路的应用, 交流牵引传动控制系统已成功引入基于异步电动机动态模型的矢量控制, 实现磁通的动态检测, 使定子电流按励磁分量和转矩分量动态解耦, 从而使异步电动机能有直流电动机控制系统一样的动、静态性能指标。

1.3 我国交流传动电力机车现状及发展

1.3.1 我国交流传动电力机车发展概况

我国在 1996 年研制成功 4 000 kW、4 轴三相异步电动机变频调速电力机车 AC4000, 标志着我国铁路进入交流牵引动力时代。

与此同时, 国内科研部门和有关厂家先后开发出 200 km/h 客运电力机车 DJ1、DJ2 以及 270 km/h 动力集中动车组 DJJ2 (中华之星)、200 km/h 分散动力动车组 “先锋” 号等, 为铁路牵引动力装备的现代化建立了技术储备,



并为国产化的目标奠定了基础。

为加快实现我国铁路机车车辆现代化步伐,根据中央专题会议的精神,提出了“引进先进技术、联合设计、打造中国品牌”的总体要求,按照“先进、成熟、经济、适用、可靠”的十字方针,以国内企业为主体,通过“以市场换技术”引进国外的关键技术,推动铁路装备的跨越式发展。

近年来,我国株洲、大连、大同等电力机车制造企业与欧洲西门子、阿尔斯通等公司合作,推出了 HX_{D1} 、 HX_{D2} 大功率交流货运 4 轴电力机车,大连机车厂与日本东芝公司合作生产 6 轴 HX_{D3} 货运交流电力机车,这些机车不论单轴电机容量还是发挥的轮周牵引力,都是交-直电力机车无法达到的,设计时速为 120 km/h,将逐渐取代交-直机车而成为我国重载牵引的主力。

而我国长春客车厂、四方机车车辆厂、唐山机车厂在日本原型动车组 E2-1000 的基础上,开发生产出 CRH_1 、 CRH_2 、 CRH_3 、 CRH_5 等最高时速 200 km/h 的动车组系列,其中 CRH_3 在京-津城际运行最高时速达到 350 km/h。

通过引进、消化吸收、再创新,目前我国在交流传动电力机车装备和制造方面已基本实现了国产化,并取得大量创新成果,必将推动我国铁路牵引动力装备现代化更快、更好发展。

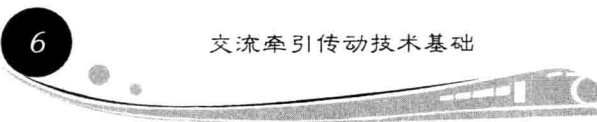
1.3.2 交流传动是一门跨学科的技术

交流牵引传动在我国的应用和取得成功的时间很短,因此有待于进一步展开科学研究和提高技术水平,主要有如下 4 个方面:

(1) 必须拥有大功率全控型电力电子器件的研发、生产能力和器件性能的测试技术。当今世界,各工业化国家已逐步淘汰 GTO 等所谓第二代门极可关断器件在交流传动系统中使用,而第三代的器件如绝缘门极晶体管(IGBT)已普遍应用,其工作电压/电流在 2 kV/1 kA 以上,开关时间 2 μ s 的高频 IGBT 器件已经问世。

在日本和欧洲,正大力研发功率集成电路(PIC)。所谓 PIC,是把大功率的器件与驱动电路、保护电路、信号检测电路、控制逻辑电路集成于一体,称为第四代电力电子器件。PIC 能使变流装置更小型化,由于组合了多种功能,因而能更好地满足复杂自动控制系统的动态响应和控制精度要求。总之,电力电子器件将进一步向高电压、大电流、高频率、全控且快关断、低功耗、模块化、智能化的方向发展。

(2) 交流电力机车或动车组的牵引动力控制系统由多个相关环节组成,



如变流装置、三相异步电动机等。目前逆变器的输出频率在 200 Hz 以上、三相电动机的转速可达 10 000 r/min, 因此制造和组装工艺都有很高的要求。另外, 控制系统的电压、电流检测, 机车速度的检测, 数字控制单元、机车信息的传递、显示等, 都应进行专业化分工生产。

(3) 交流牵引传动系统的理论普及和深入研究。交流电动机的变频调速原理早就被人们所认识, 而发展到今天的较高水平, 交流电动机控制的理论研究成果, 起到重大的指导作用。如 1972 年提出的矢量控制系统、电压空间矢量控制系统, 1977 年提出的直接转矩控制系统理论, 用不同的方法解决了异步电动机的解耦问题, 使交流传动系统由静态进入了更高阶段的动态控制。

为解决非线性、参数时变对交流传动控制系统的影响, 借助于模型线性化、模型参考自适应、模糊智能控制等相关理论方法都取得了一定的成果, 还有待实践的进一步检验。

(4) 基于我国交流电力机车和动车组运行、维护、管理同时起步的情况, 现阶段交流机车(分重载机车和动车组)的运用和检修都在原交-直机车基础上进行。由于交流机车使用时间不长, 所以运用和检修的经验不足。比如, 在客货运输中对交流机车的轮轨关系、弓网关系的评价, 都还有一个适应、验证的过程; 检修中如何划定修程和不同修程的应检、应修项目规范的制定, 交流机车与交-直机车检修流程、工艺和装备的区别等, 都需要进一步探索并逐步完善, 同时运用、维修的信息和资料分析都要与现代化管理相适应。

第2章 变频调速三相异步电动机的稳态特性

2.1 变频调速异步电动机的稳态特性

2.1.1 三相异步电动机的工作状态

1. 电角速度和空间角速度

三相异步电动机的转速表示为

$$n = \frac{60f_1}{p_n}(1-s) = \frac{60\omega_1}{2\pi p_n}(1-s) = n_1(1-s) \quad (2.1)$$

式中 n_1 ——同步转速 (r/min);

f_1 ——电源频率 (Hz);

ω_1 ——电源角频率 (rad/s), $\omega_1 = 2\pi f_1$;

p_n ——极对数;

s ——转差率, $s = \frac{n_1 - n}{n_1}(\%)$, $s = \frac{f_2}{f_1}$, f_2 为转子感应电势 (转子电流) 的频率 (Hz)。

旋转磁场同步转速 n_1 和转子转速 n 是以电机定子圆周为参考坐标的空间变量, 二者也可以用电角频率来表示, 由式 (2.1) 可推得

$$\begin{cases} \omega_1 = 2\pi n_1 p_n / 60 \\ \omega = 2\pi n p_n / 60 \end{cases} \quad (2.2)$$

$$s = \frac{\omega_1 - \omega}{\omega_1}, \quad \omega_s = \omega_1 - \omega$$

在变频调速中,异步电动机定子绕组的交流电源角频率 ω_1 也可作为定子旋转磁场 Ψ_1 在空间的同步电角速度,同步电角速度是同步转速的 p_n 倍;而转差率 s 和转差角频率 ω_s 则与极对数 p_n 无关。

2. 异步电机工作状态

图 2.1 所示为三相异步电动机在某个稳态电压、频率的电源供电下的 T_e-s 曲线。按转差率 s 不同,可把电机划分为三种工作状态。

(1) 在 $0 < s \leq 1$ 即 $n_1 > n \geq 0$ 的范围,电磁转矩 T_e 和转速 n 方向相同,为电动机工作状态。

(2) 在 $s < 0$ 即 $n > n_1$ 的范围,电磁转矩 T_e 与转速 n 反向,为负值,是制动转矩,电机为发电机工作状态。

(3) 在 $s > 1$ 即 $n < 0$ 的范围,转速 n 反向,且电磁转矩 T_e 与转速 n 反向,产生制动力,电机为电制动工作状态。

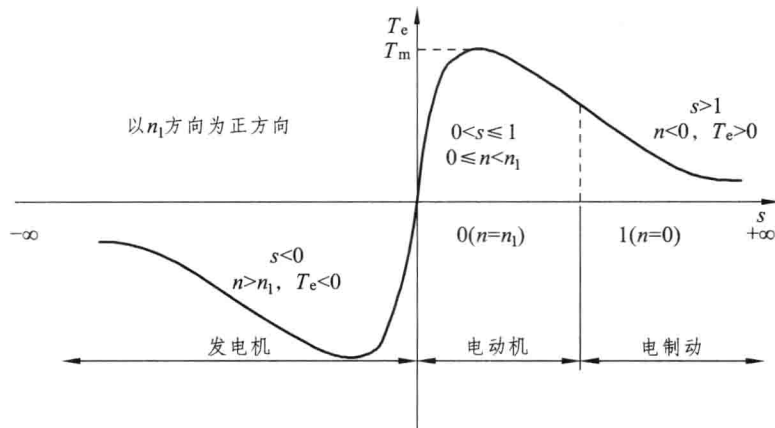
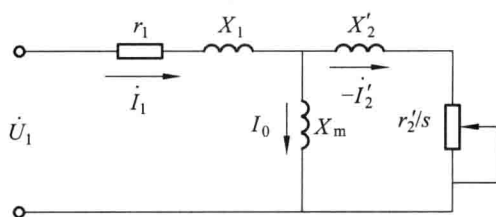


图 2.1 三相异步电动机的三种工作状态

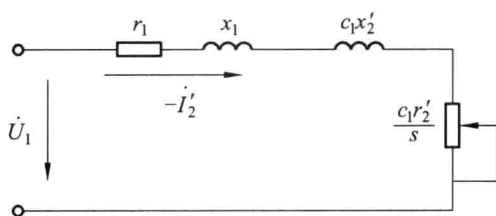
2.1.2 变频调速三相异步电动的机械特性

由式(2.1)可知,当改变电源频率 f_1 时同步转速 n_1 改变,则电机转速 n 随之变化,称之为变频调速。由式(2.1)可知,调整电机极对数 p_n 和转差

率 s 也能改变电机转速, 但相比较而言, 变频调速具有效率高、调速范围宽、平滑稳定的优点。



(a) T 形等值电路



(b) 求转子电流的近似等值电路

图 2.2 异步电动机等值电路

由异步电动机等值电路图 2.2 (b), 可得转子电流表达式为

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{(r_1 + c_1 r_2' / s)^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2}} \quad (2.3)$$

式中 U_1 ——定子相电压 (V);

x_1 、 x_2' ——定子及折算于定子侧的转子绕组每相漏抗 (Ω);

r_1 、 r_2' ——定子及折算于定子侧的转子绕组每相电阻 (Ω);

c_1 ——换算系数, $c_1 = 1 + x_1 / x_m \approx 1$ 。

定子向转子传递的有功功率 (电磁功率) 为

$$P_m = m_1 I_2'^2 \frac{r_2'}{s} \quad (2.4)$$

式中 m_1 ——定子相数, $m_1 = 3$ 。

将式 (2.3) 代入式 (2.4) 得调频异步电动机机械特性表达式为

$$T_e = \frac{P_m}{\Omega_1} = \frac{P_m}{2\pi f_1 / p_n} = \frac{m_1 p_n}{2\pi} \left(\frac{U_1}{f_1} \right)^2 \frac{f_1 r_2' / s}{(r_1 + r_2' / s)^2 + (x_1 + x_2')^2} \quad (2.5)$$

式中 Ω_1 ——同步机械角速度, $\Omega_1 = 2\pi n_1 / 60$ 。

对式(2.5)令 $dT_e / ds = 0$ 求得产生最大转矩时的转差率 s_m , 当频率 f_1 较高时, 由于 $r_1 \ll x_1 + x'_2 = 2\pi f_1(L_{\sigma 1} + L_{\sigma 2})$, 可忽略定子电阻 r_1 , 则

$$s_m = \frac{r'_2}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x'_2)^2}} \approx \frac{r'_2}{2\pi f_1(L_{\sigma 1} + L'_{\sigma 2})} \quad (2.6)$$

式中 $L_{\sigma 1}$ ——定子绕组每相漏电感(H);

$L'_{\sigma 2}$ ——折算于定子侧的转子每相漏电感(H)。

将式(2.6)代入式(2.5)经整理后得最大转矩为

$$T_m \approx \frac{m_1 p_n}{8\pi^2} \left(\frac{U_1}{f_1} \right)^2 \frac{1}{L_{\sigma 1} + L'_{\sigma 2}} \quad (2.7)$$

令 $s=1$, 代入式(2.5)求得启动转矩为

$$T_{st} = \frac{m_1 p_n}{2\pi} \left(\frac{U_1}{f_1} \right)^2 \frac{f_1 r'_2}{(r_1 + r'_2)^2 + (x_1 + x'_2)^2} \quad (2.8)$$

异步电动机变频调速必须考虑的因素是: 保持电动机每极磁通的额定幅值 Φ_m 不变。若在变频调速过程中 Φ_m 发生变化, 将引起转矩的波动。如果磁通太弱, 则电机铁芯未得到充分利用, 浪费铁磁材料; 而过大的磁通又将导致铁芯的饱和, 导致激磁电流增大, 甚至因过热而烧坏定子绕组。如何才能在变频调速过程中保持 $\Phi_m = \text{常数}$ 呢?

由电机定子电动势有效值

$$E_1 = 4.44 f_1 N_1 k_{N1} \Phi_m \quad (2.9)$$

得
$$\Phi_m = \frac{E_1}{C_{E1} f_1} \quad (2.10)$$

式中 E_1 ——气隙磁通在定子每相绕组中的感应电动势有效值(V);

N_1 ——定子每相绕组的串联绕组匝数;

k_{N1} ——定子基波绕组系数;

C_{E1} ——电机电势常数, $C_{E1} = 4.44 N_1 k_{N1}$ 。

由式(2.10)知, 在频率调节时, 若 $E_1 / f_1 = \text{常数}$, 则主磁通 Φ_m 不变。但实际操作中感应电势 E_1 难以检测和控制, 如果忽略定子漏阻抗压降, 则有 $E_1 \approx U_1$, 于是