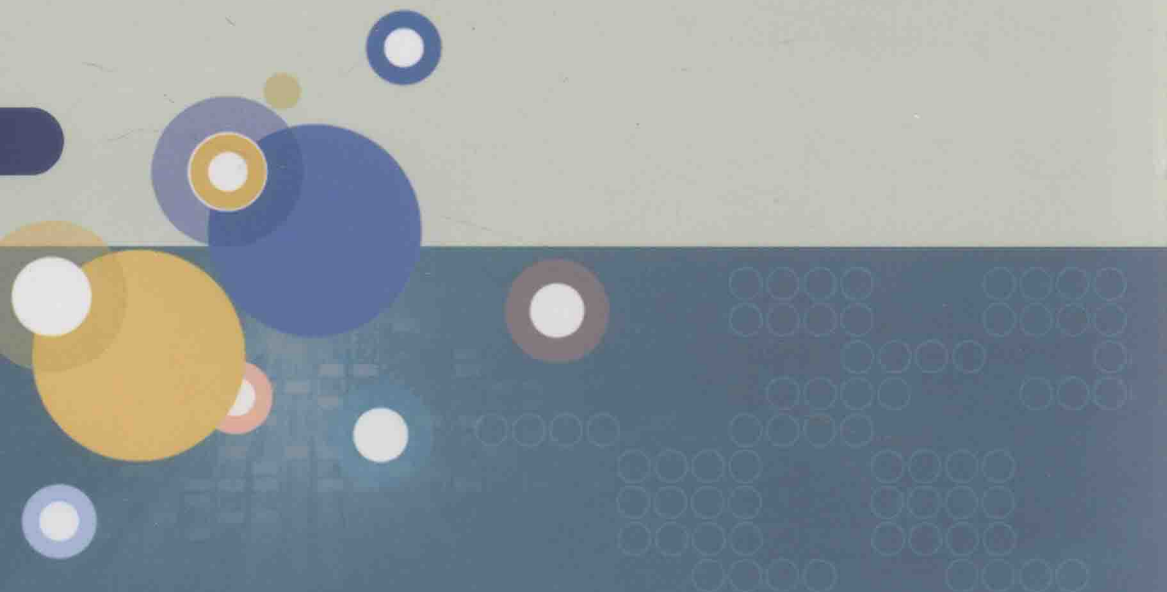


Shuangsan Dianping Shuangkui Dianji

Tiaosu Xitong Jiqi Kongzhi

双三电平双馈电机 调速系统及其控制

叶宗彬 谭国俊 著



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

双三电平双馈电机调速系统 及其控制

叶宗彬 谭国俊 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

三电平变换器以其优异的性能和潜在的优势,广泛地应用中压大功率变频调速场合,成为变换器选型的主导方案。而双馈电机则在工矿企业、风力发电上展现了其优势。本书以三电平变换器及双馈电机为主,对其运行基本原理、数学模型、控制策略和系统设计进行了系统的阐述,同时结合现代智能控制理论对该系统进行了应用探索。

本书可供电力电子技术、自动控制技术及电工电能新技术应用领域的工程技术人员和研究人员阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

双三电平双馈电机调速系统及其控制 / 叶宗彬, 谭国俊著. — 徐州:
中国矿业大学出版社, 2014. 11

ISBN 978 - 7 - 5646 - 2518 - 4

I. ①双… II. ①叶… ②谭… III. ①电平—双馈电机—调速 IV. ①TM34

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第246175号

书 名 双三电平双馈电机调速系统及其控制

著 者 叶宗彬 谭国俊

责任编辑 杨 洋

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

开 本 787×960 1/16 印张 7.5 字数 135 千字

版次印次 2014 年 11 月第 1 版 2014 年 11 月第 1 次印刷

定 价 25.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

我国矿井提升机中交流拖动占 80% 以上,而其中绝大部分采用“绕线式异步电机+转子串电阻调速”或“同步电机+交—交变频调速”。这两种调速方式中,前者能耗大,调速性能差,而后者功率因数低,对电网污染严重。随着国家“节能减排”的需要不断深入,对这些设备进行节能改造势在必行。

本书深入研究了双三电平双馈电机定子磁链矢量控制,为“绕线式异步电机+转子串电阻调速”提升机系统提供了一个较佳的改造方案。同时,为双馈电机在风力发电中的应用奠定了良好基础。

本书研究了二极管钳位式三电平变换器、三电平 PWM 整流器以及双馈电机定子磁链定向矢量控制等控制策略。其中,针对二极管钳位式三电平变换器进行了深入研究,阐述了二极管钳位式三电平变换器中性点电位波动的原因,给出了有效的平衡控制策略。

对于三电平 PWM 整流器,本书提出了适用于高压大功率场合的新型虚拟磁链观测器,为使双馈电机适用于全速范围内的调速,提出了一种零速下的双馈电机初始转子位置角的辨识方法。

此外,本书还结合现代智能控制算法理论,采用单神经元自适应控制器取代传统的 PI 控制器对三电平 PWM 整流器的电压外环、双馈电机的速度外环进行控制,分析了其稳定性,并对比了两种控制方案的效果。

本书算法基本在工业现场得以应用验证,可为工程技术人员提供一些参考。感谢中国矿业大学出版社对本书写作的指导和支持。

由于笔者水平所限,疏漏甚至谬误在所难免,敬请读者不吝指教。

作 者

2014 年 7 月

目 录

1	绪论	1
1.1	概述	1
1.2	国内外研究概况	2
1.3	本课题研究内容及安排	14
2	双三电平变换器关键技术研究	16
2.1	引言	16
2.2	两电平 SVPWM 算法	17
2.3	参考电压分解的三电平 SVPWM	19
2.4	三电平变换器中性点电位平衡控制	21
2.5	实验	30
2.6	本章小结	32
3	三电平整流器的控制策略研究	34
3.1	引言	34
3.2	三电平整流器的数学模型	35
3.3	三电平整流器直接电流控制和 SVM-DPC 控制策略的分析与对比	48
3.4	本章小结	56
4	双馈电机数学模型及其矢量控制	57
4.1	引言	57
4.2	双馈电机数学模型	57
4.3	双馈电机定子磁链定向矢量控制	61
4.4	双馈电机定子磁链定向矢量控制仿真及实验	69

4.5 本章小结	72
5 单神经元自适应控制器在双馈调速系统中的应用	74
5.1 引言	74
5.2 单神经元自适应三电平 PWM 整流器控制系统	75
5.3 单神经元自适应双馈电机矢量控制	82
5.4 单神经元自适应控制器系统实验	82
5.5 本章小结	89
6 应用研究	90
7 结论及展望	100
参考文献	102
变量注释表	112

1 绪 论

1.1 概述

迈入 21 世纪以来,随着世界人口的迅速膨胀以及全球经济一体化进程的发展,能源逐渐成为制约各国发展的重要因素。最近几年来,我国大范围出现电力短缺,甚至发生拉闸限电的情况,这在一定程度上影响了我国经济的发展,同时也为我国的能源问题敲响了警钟。

电气传动系统是我国能源体系的一个重要组成部分,而电机作为实现机械能与电能之间相互转换的动力装置,又是电气传动系统的关键组成之一。截至 2006 年年末,我国发电总量已达 2.8 万亿 kW。据《电动机调速技术产业化途径与对策的研究》报告显示,目前我国发电总量的 66% 消耗在电动机上,而我国的能源平均利用率却比发达国家低 20% 左右^[1]。

进入“十一五”以来,基于节能降耗的迫切要求,2006 年国家发改委在《“十一五”十大重点节能工程实施意见》中明确规定,电动机系统节能是十大重点节能工程之一。2007 年 4 月,发改委出台《能源发展“十一五”规划》中明确规定,到 2010 年实现我国单位 GDP 能耗降低 20%,主要污染物排放减少 10% 的节能减排战略目标^[2]。

矿山企业是能耗和污染大户,如何实现节能减排目标,是值得密切关注的问题。在矿山企业,作为矿山咽喉设备的矿井提升机在生产过程中担负着矿物的提升、人员的上下、生产材料和设备的运输等任务。

矿山企业中应用的提升系统主要有直流调速和交流调速系统两大类。

直流调速系统以其良好的机械特性长期以来在调速领域占据首位,但是由于直流电动机本身具有机械换向器,存在故障率高、维修费用大等问题,70 年代后逐渐被交流调速系统所取代。

而目前矿山交流提升系统中普遍采用的是“绕线式异步电机+转子串电阻+高压接触器+动力制动(或低频拖动)+PLC 控制”的控制方式^[3](此调速方式又被称为 TKD 调速)。这种方式结构及控制方式均简单,可在一定程度上满

足提升系统的运行要求。但其存在的突出问题却不容忽视:

① 电机转差功率全部消耗于转子电阻回路中,而提升机有较长时间运行在低速重载的工况下,此时转差功率非常大,这就造成了巨大的能源浪费。

② 系统调速模式为有级调速,切换冲击电流大,运行平稳性差,安全性低。

③ 系统发热严重,工作环境恶劣。

④ 系统占地面积大,设备维护量大。

鉴于上述缺点,我国在 2008 年 3 月颁布的《第二批井工淘汰设备目录》中,明令禁止这种 TKD 类型的提升设备电控系统的使用。据统计,大功率绕线式异步电机和直流电机拖动系统在整个矿山提升系统中占近 90%,在这两种系统中绕线式异步电机提升系统又占 70%左右的份额,且全部采用高能耗的转子串电阻调速方式。

本书研究课题“大功率提升机三电平双馈调速关键技术研究”,旨在为矿山企业现役交流提升系统寻求一个具有较佳效费比的节能减排改造选项。在改造的同时,新系统可与原有系统互为备用,提高了系统冗余度和设备利用率,最大限度上满足节能及可靠性的需要。

1.2 国内外研究概况

1.2.1 我国矿井提升电控系统工艺

矿井提升系统是由提升容器、提升钢丝绳、滚筒、减速器、井架和装卸载设备(或操车设备)以及拖动电机、电控设备和制动装置等组成^[4]。

矿井提升机是矿井生产的重要环节,其主要任务是将原煤或矸石从井下提到地面,将材料、设备和人员运往井下,或从井下运到地面。它在矿井生产中占有极其重要的地位。

一般提升设备是非连续运行的,即需要经常启动,停车、反向运行,20 世纪 90 年代初为保证设备以较高的速度安全的往返运行,要求提升系统的控制性能好,应有较高的调速性能和位置控制,同时具有可靠的安全保护。作为矿山大型设备之一,其功率大,耗电也大,应尽量发挥设备能力,减少提升循环时间,以减少吨煤电耗,矿井提升设备的造价以及运转费用是影响矿井生产技术经济指标的重要因素之一。

提升机系统有其自身的运行特点及对拖动控制的要求^[4]。

1.2.1.1 提升机的运行特点

(1) 具有周期性

提升机的运行情况如图 1-1 所示,在 t_1 时刻,提升机启动,容器 A 开始上提、容器 B 开始下放, t_2 时刻提升机由静止加速到最高运行速度 v_m ,当运行到 t_3 时刻,提升机开始减速,到 t_4 时刻速度降至爬行速度,爬行速度是为了容器准确停在需要的位置而设置的。当达到 t_5 时刻,容器到达最终位置,提升机停车,而容器 B 到达井底,下一次提升是容器 B 按照上述速度图运行,如此按一定规律往返周期运行。

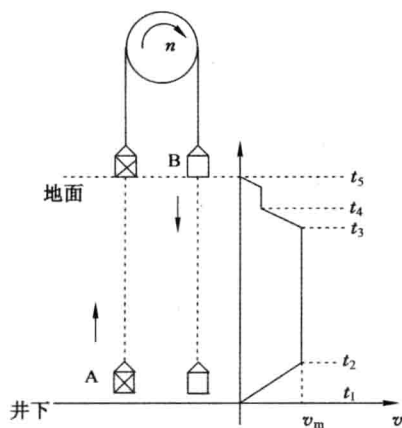


图 1-1 提升机运行示意图

(2) 电动机两种运行状态

根据电动机负载情况的不同,电动机轴上的受力方向有时与容器的运动方向相反,如向上提升重物,就需要电动机发出拖动转矩,即为电动状态,称为正力。有时轴上受力的方向与容器运动方向相同,如提升机下放重物,此时为了限制下放重物的速度,可采用制动状态,使电动机发出转矩的方向与重物方向相反,则称为负力。

(3) 加速度、减速度的限制

由于提升系统存在有绳索(弹性环节),多数情况下还存在减速器齿轮间隙,加速度过大,则会产生过大的机械振动应力,对机械有害。煤矿安全规程规定,当升降人员时,加速度不得大于 0.75 m/s^2 ,而在主井提升中,一般根据设计规定,加、减速度也最好不大于 1.2 m/s^2 。

近年来,为了改善钢丝绳在启动、制动过程可能出现的动态张力,采用变加速度控制,或称加速度变化率限制,这样可以在加、减速阶段减小冲击,同时也可减小钢丝绳的摆动。

1.2.1.2 提升机对拖动系统的控制性能要求

① 调速范围较宽,可高达 100。

② 箕斗容器出卸载曲轨的速度要受到限制,一般不超过 1.5 m/s ,否则冲击力过大。

③ 升降人员时,加、减速度受到限制,与升降货物时速度图不同。

④ 启动和制动过程实现加、减速度的自动控制。

⑤ 便于实现自动、半自动控制,以减轻工人的劳动强度,避免由于人为操作造成的事故,提高运行安全性,充分发挥提升设备的能力。

⑥ 各种保护要完善。

根据不同使用条件和要求,可选用不同的速度图和力图,应用较多的有三段速度图和五段速度图,如图 1-2 所示。

① 三阶段速度图如图 1-2(a)所示。

② 五阶段速度图如图 1-2(b)所示。

用于箕斗提升系统,其特点是设有初加速阶段和爬行阶段。

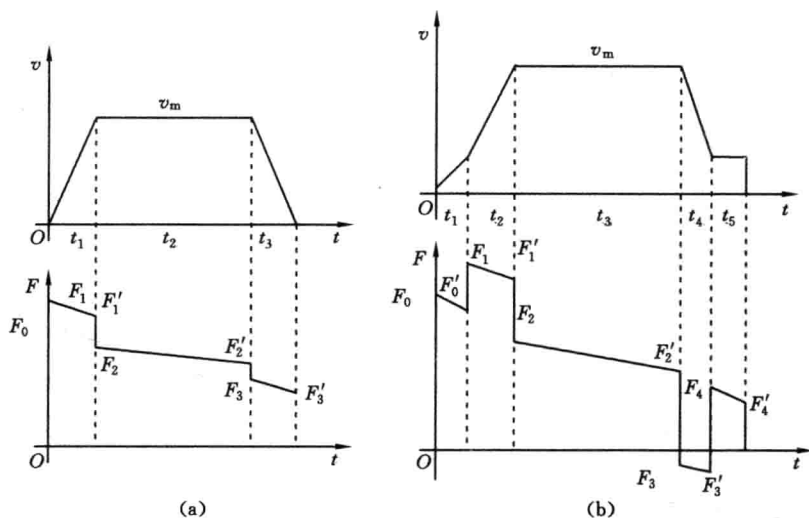


图 1-2 提升机运行速度图

① 初加速阶段 t_0 ——初加速度 a_0 较小,主要是箕斗受出卸载曲轨的速度不大于 1.5 m/s 的限制,这样可以减小对井架的冲击。

② 主加速阶段 t_1 ——空箕斗出卸载曲轨后,为了缩短启动时间,将加速度提高为 a_1 ,直至最大提升速度 v_m 。

③ 等速阶段 t_2 ——此阶段,提升容器以不变的速度 v_m 在井筒中运行。

④ 减速阶段 t_3 ——此时重载箕斗已接近井口,空箕斗接近装载点,应减速,减速度为 a_3 ,直至速度降为爬行速度 v_4 。

⑤ 爬行阶段 t_4 ——此时重载箕斗进入卸载曲轨,为了减少冲击,容器应以低速爬行,爬行速度一般不超过 0.5 m/s 。

⑥ 停车休止阶段——此时提升机停止运转,井口箕斗卸载,井底箕斗装载。

1.2.2 双馈电机控制策略的发展与现状

早在 20 世纪 30 年代,学者们对绕线式电机双馈调速控制系统的研究就已经开始。由于当时电力电子变流技术的限制,双馈调速的控制只能采用电动机组来实现,克雷默(Kramer)变换器即是电动机式变换器的著名代表。由于仅限于稳态性能的研究,克雷默变换器没有得到广泛的应用。随着变流技术的发展,整流子式交流电动机的谢尔比乌斯(Scherbius)式变换器问世^[5,6]。谢尔比乌斯变换器以水银整流器作为变换器对绕线电机进行调速控制,由于可以进行一定的动态性能研究,这种变换器的应用较克雷默式变换器为广泛。但就总体而言,克雷默式和谢尔比乌斯式两类变换器因其结构复杂、换相可靠性差、价格昂贵、维护量大等缺点,不适合广泛应用,最终为阀式串级调速所取代^[7]。

直至 20 世纪 80 年代以前,绕线式电机的串级调速由于系统结构简单、价格低廉、可靠性高、调速范围宽而被广泛研究,并在工业现场得到了一定的应用。随着应用的推广,串级调速自身固有的缺点逐渐显现出来。串级调速系统是在绕线电机转子侧采用不控整流,无法调节定子侧的无功功率,且逆变器的功率因数低,导致整个系统的功率因数很低。此外,串级调速在工作速度范围之内没有制动转矩。以上种种不足在很大程度上制约了绕线电机串级调速的发展和应用。

20 世纪 70 年代以来两次世界性的能源危机促使各国对节能技术进行研究,矢量控制就是在这样的背景下被提出来的。矢量控制,也称磁场定向控制,于 1971 年由美国的 P. C. Custman 和 A. A. Clark 以及德国 SIEMENCE 公司的 F. Blashke 和 W. Flotor 相继提出,他们采用直流电机和交流电机比较的方法分析阐述了其原理,这也开创了交流电机等效为直流电机控制的先河。矢量控制关键在于以转子磁场进行定向,对转子磁链进行控制,分解定子电流,使之成为转矩和磁场两个分量,再经过坐标变换实现解耦控制。然而该方法在计算转子磁链的过程中较多地运用了容易随温度或者工况变化的电机电阻、电感等参数,故控制的精度及稳定性对参数较为敏感。为此,许多学者在电机参数离线、在线辨识上做了许多研究,以提高控制的精度及稳定性^[3]。

1985 年德国鲁尔大学 Depenbrock 教授首先提出直接转矩控制理论(Direct

Torque Control, 简称 DTC)^[3]。直接转矩控制与矢量控制不同,它不是通过控制电流、磁链等量来间接控制转矩,而是把转矩直接作为被控量来控制。DTC 跳出了矢量控制技术的思维框架,不再考虑各个物理量如何解耦,取消坐标旋转变换,而是简单地检测定子电压和定子电流,计算瞬态定子磁链空间磁链进而直接控制转矩,以获得电机转矩的快速响应。这是一种具有很高动、静态性能的交流调速控制方式^[8]。

双馈电机调速控制中,矢量控制应用较为广泛。双馈电机矢量控制中常采用定子磁链作为定向矢量,通常电网可认为刚性稳定,双馈电机由于定子与电网直接相连,定子磁链较为稳定,在控制中有较强的鲁棒性。

文献[9]对转子串电阻以及双馈调速方式下电机的启动转矩进行了分析、计算。计算结果表明,系统采用双馈调速完全可以满足按转子串电阻方式进行设计、计算的要求,这意味着国内大量采用绕线电机进行串电阻有级调速的系统可改造成平滑的无级调速的双馈调速方式。与采用其他的改造方案相比,进行双馈调速改造可以极大程度保留原有的机电系统,削减改造成本,性价比较高。

近年来有学者开始研究双馈电机的直接转矩控制,通过对电机转子侧有功功率的控制实现对电机转速的控制,美国学者 O. A. Mohammed 等提出的双馈电机直接转矩控制方案突出优点在于控制系统仅用到转子侧变量,而缺点在于电机功率因数不可调整,这就限制了其应用范围。文献[10]和[11]对此控制策略进行了改进,将双馈电机有功及无功功率均作为被控量纳入控制体系,最终在电机电磁转矩控制的同时实现了对电机定子侧功率因数的控制。

20 世纪 80 年代中期以来,许多学者将现代控制理论逐渐引入交流调速控制中^[12-14],其中神经网络、模糊控制等人工智能研究尤为火热^[15-17]。由于交流电机参数时变等特性的存在,交流调速控制中增加了自适应控制及非线性反馈的反馈线性化等措施,取得了很好的控制效果。但这些研究大多数针对鼠笼式异步电机或者同步电机的控制,而对绕线式电机的双馈控制中研究非常少^[18]。

为避免采用速度及位置传感器,不少学者对双馈电机的无速度、无位置传感器算法进行了研究^[19]。双馈电机的无速度、无位置传感器观测技术可分为开环和闭环观测两种方式。

双馈电机的开环观测技术主要是通过定、转子电压电流的采样,由电机数学模型直接计算出其转子位置,进而观测电机速度。这种方法较为简单,但位置角及速度的观测精度受电机参数的影响较大。且开环观测方案缺乏自校正能力,计算、采样等误差也将引起观测的极大误差,在控制中易于导致系统失稳^[20-22]。

双馈电机的闭环观测技术则具有一定的自校正能力,现今研究的热点是基于模型参考自适应系统(MRAS)的位置、速度观测技术^[23-25]。

1.2.3 大功率高压变换器发展与现状

作为交流电机的驱动源,大功率高压变换器的发展与功率开关器件的发展密不可分。

1955年美国通用电气公司研制出了第一支5A的功率整流管,1957年通用公司研制出第一支晶闸管,这两个功率器件的诞生标志着电力电子技术的开始^[26]。自此,以整流管和晶闸管为核心组件的对电能进行处理的技术迅速发展起来,并开始应用于多个领域。这一阶段,以晶闸管为基础派生出了许多器件,如快速晶闸管、高频晶闸管、双向晶闸管、逆导晶闸管和光控晶闸管等。这些器件都是通过对门极的控制使其导通,但无法实现可控关断,所以被称为半控器件。

20世纪70年代后期,以门极可关断晶闸管(GTO)、电力晶体管(GTR)和电力场效应管(MOSFET)等全控型器件相继出现。这些全控型器件的特点是通过对器件门极的控制可使其开通和关断,且其开关速度均高于晶闸管。以此为契机,脉宽调制技术(PWM)被引入电力电子技术中,大批新型产品如变频电源、开关电源等开始面市,电力电子技术的面貌也焕然一新。

然而,电力电子技术的发展并未就此放缓步伐。20世纪80年代后期,绝缘栅型双极晶体管(IGBT)以及集成门极换流晶闸管(IGCT)这两种具有代表性的新型复合型器件开始异军突起。这些器件具有驱动容易、开关速度快、通态压降低、载流能力强的特点,这些优异的性能使之成为现代电力电子技术中应用的主导器件。当今市场上的大功率变流装置大都采用这些复合型的器件。

纵观高压大功率变换器的分类,可以看出功率开关器件发展遗留的痕迹。现今采用的高压大功率变频器大致可分为如下两大类:无中间直流环节的直接变换器交—交变频器和有中间直流环节的间接变频器交—直—交变换器。

1.2.3.1 交—交变换器

(1) 晶闸管相控交—交变换器

作为首先出现的功率开关器件,晶闸管的应用非常广泛。至今晶闸管以其成熟的应用方案仍被作为交—交变频的主导器件。西门子公司SIMADYN D及其改进型号SL150即为其中的典型代表。

晶闸管交—交变换器采用一次变换,无需中间的直流环节,所以效率较交—直—交变换器为高,由于其输出电压为输入电压的包络,故在输出低频交流电压时输出波形质量好。但变频器需要为数众多的晶闸管,且在深控时功率因数极低,对电网注入大量谐波,需要附加滤波器进行无功补偿。

(2) 矩阵式变换器

矩阵式变换器作为一种新型的交—交变换器,1976年由L. Gyugi和B. R. Pelly首先提出其概念及拓扑形式。当意大利学者M. Venturini和

A. Alesina提出了矩阵式变换器的存在理论和相应的调制策略后,矩阵变换器受到广泛的关注^[27]。

矩阵式变换器拥有理想变频电源的性能:① 正弦的输入、输出特性;② 高效率、高功率密度;③ 能量可双向流动,可四象限运行;④ 输入功率因数可调。尽管拥有以上的诸多优点,矩阵式变换器固有的缺点严重地限制了其应用:矩阵式变换器电压增益低、功率器件数量多、环流策略复杂、开关保护困难、调制策略复杂等。

国内外学者对矩阵式变换器进行了大量研究。2004年4月,汉诺威国际展览会上,日本安川公司展示了其即将推向市场的矩阵式变换器的原型,并于次年启动销售策略。同时,安川公司已经在日本市场上现场测试和运行了多台矩阵式变换器。至此,矩阵式变换器跨出了实用化的第一步。

1.2.3.2 交—直—交变换器

按交—直—交变换器的中间直流环节类型进行划分,可将其分成电流源型变换器及电压源型变换器。

(1) 电流源型变换器

电流源型变换器中间直流环节采用电感器进行储能。由于电容技术的飞速发展,实际应用中电压源型变换器的中间直流环节电容器的储能效率及体积、价格均具有极大的优势,从而电流源型变换器的发展被严重制约。但随着高温超导技术的发展,电流源型变换器将以最佳的切入方式拥有广阔的应用前景^[28]。

(2) 电压源型变换器

电压源型变换器中间直流环节采用电容器。正如前面所述,现有的变换器也反映了功率器件的发展历程。功率开关器件从低压、小电流发展到如今6.5 kV/600 A经历了漫长的时间。在此期间涌现出了大量的变频器拓扑,以满足低压器件控制高压大功率电机的巨大市场需求。通常交—直—交型电压源型变换器可分为以下几种:

- ① 功率器件串联两电平直接高压变换器^[29];
- ② 采用低压变频器+变压器的高低高方案^[30];
- ③ 单元级联多电平逆变器^[31];
- ④ 飞跨电容多电平变换器^[32];
- ⑤ 二极管钳位式三电平变换器^[33]。

下面以应用较多的后面两种类型进行分析。

图1-3所示为成都佳灵电气制造有限公司采用IGBT直接串联方式的高压变换器。此变换器结构简单,功率器件个数少。但功率器件的串联带来了系统运行中功率器件的动、静态均压问题,对驱动电路的要求极高,串联的功率器件

必须同时导通和关断,否则将造成功率器件承压不均,最终损坏变换器。

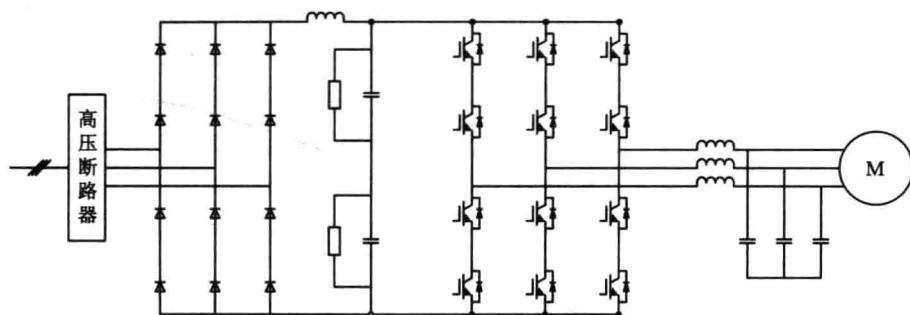


图 1-3 IGBT 直接串联高压变换器

借助成熟的低压变换器,通过输入降压变压器将 6 kV 的高压变为 380 V,经过低压变换器后再利用输出升压变压器进行升压,然后驱动高压电机。此解决方案称为“高一低—高”方案。该方案造价低廉,但由于需要两级附加的变压器,系统体积大,效率低,且在输出侧的升压变压器需为造价昂贵的高频变压器。

1975 年, P. Hammond 提出了采用多个 H 桥, 分别以独立的直流电流电源为输入, 输出进行串联的拓扑结构, 并在美国申请了专利^[34,35]。现在, 单元串联型多电平变换器广泛应用于高压电机变频驱动、大功率电源、大功率有源滤波器等场合。图 1-4 所示为单元串联多电平变换器的原理图。

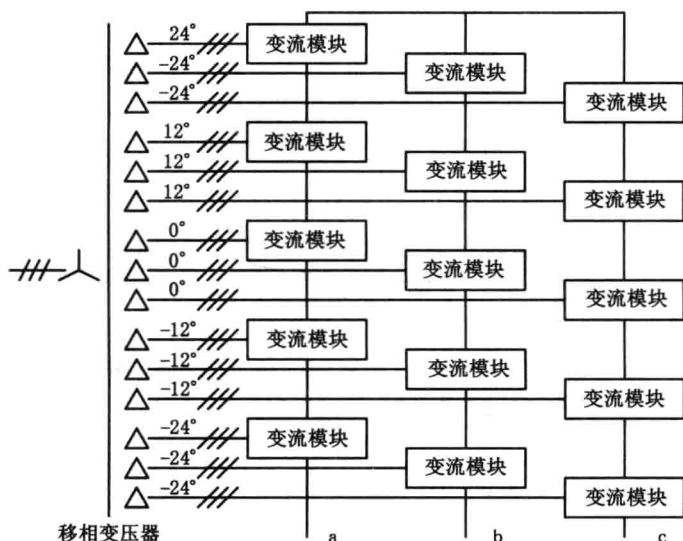


图 1-4 单元串联多电平方案

单元串联多电平变换器各路直流电源是独立的,无需考虑其电容电压的均衡问题, dV/dt 低,开关损耗也随之降低,输出电压、电流谐波含量低。其存在的缺点是每路独立直流电源均需要一组整流装置,所以需要的功率开关器件数量较多,如果来实现变换器的四象限运行,前端需要配置可控整流,则系统所需的功率器件和传感器数量将急剧增加,系统可靠性将降低。此外,单元串联多电平变换器需要制造工艺复杂的移相变压器,系统占地面积也较大。

飞跨电容多电平变换器最早由 T. A. Meynard 和 H. Foch 于 1992 年在召开的 PESC 会议上提出^[36]。图 1-5 所示为法国阿尔斯通公司的 alspacdm6000 系列的高压变换器,此系列变换器采用 IGBT 作为功率开关器件,以电容进行钳位的四电平变换器,可四象限运行,输出波形较好,谐波含量较低。但变换器控制方法复杂,开关损耗大,由于采用了大量的体积庞大的钳位电容,安装困难的同时也降低了系统效率。

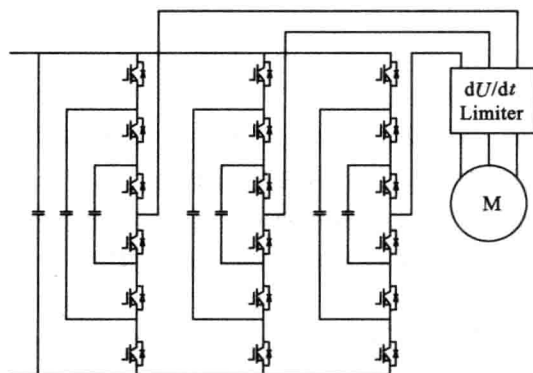


图 1-5 飞跨电容多电平方案

三电平电压源型变换器是日本长冈科技大学学者 1980 年在 ISA 年会上首次提出的。它的出现为高压大容量电压型逆变器的研制开辟了一条新思路。图 1-6 所示为二极管钳位式三电平变换器的主回路拓扑图。

三电平变换器的特点:

- ① 通过二极管钳位实现了功率开关器件的串联,采用相同电压定额的功率开关器件时,直流母线电压可达两电平变换器的两倍;
- ② 输出电平为正、零和负三个,输出波形正弦化程度高,输出谐波降低;
- ③ 主电路比单元串联多电平变换器简单。

三电平变换器存在的问题^[2]:

- ① 由于 dU/dt 较高,所以变换器产生的电磁干扰大,会对周围的控制电路、

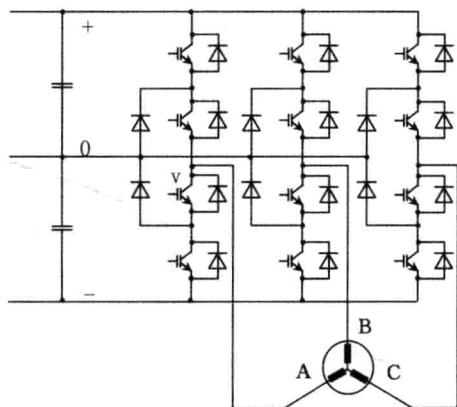


图 1-6 二极管钳位式三电平方案

检测电路产生强烈的干扰；

② 中点电位波动问题,中点电位控制不好,会造成输出电压中含有偶次谐波,且使串联的功率开关器件承压不均,造成器件的损坏。

由于交一直一交变换器技术发展良好态势,大量的变频器生产厂商均采用此方案作为变频改造的首选。传统的交一直一交变换器中,为获取直流电源通常采用二极管整流的方式。二极管整流电路简单、成本低廉,但也存在以下缺点:对电网注入了大量的谐波及无功,能量只能从电网至变换器直流侧传输,在电机制动时,负载回馈的能量无法回馈至电网,只能通过电阻泄放,造成了能源的浪费。针对这些问题,采用背靠背(back-to-back)技术已经成为了现今变频器的亮点之一。目前产品化的背靠背双向变换器主要有两电平和二极管钳位式三电平这两种拓扑,随着被控电机电压等级和容量的提高,二极管钳位式三电平是首选方案^[37-39]。

背靠背技术近年迅猛发展,其关键技术在于引入了可控的前端脉宽调制(PWM)整流器。PWM 整流器的引入带来了以下好处:

① 变换器的四象限运行,能量的双向流动。对于矿用提升机,频繁的启制动工况是现实存在的,也就是说,电机运行于能量回馈的二、四象限的时间非常可观。如果采用传统的只允许能量单向流动的变换器,电机工作在二、四象限时能量只能白白浪费。而引入 PWM 整流器后,能量可以通过整流器回馈至电网,大大提高了系统的效率,达到了节能的效果。

② 网侧的功率因数可调,且网侧的交流电流波形正弦,谐波含量低。

通过对 PWM 整流器的控制,可对整流器在电网的接入点的功率因数进行调节,如果将功率因数调节至单位功率因数,此时可以使系统无功电流为零、谐波含量降低,减少了无功及谐波带来的附加损耗,运行效率得以提高。