

矩阵变换器— 永磁同步电机系统

夏长亮 著



科学出版社

矩阵变换器-永磁同步电机系统

夏长亮 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是作者及所带领研究团队十余年从事矩阵变换器-永磁同步电机系统研究成果的整理和总结,内容涉及矩阵变换器调制原理及运行特性分析方法、矩阵变换器-永磁同步电机系统矢量控制与直接转矩控制下的特性分析及综合性能提升策略等。其中包括矩阵变换器运行稳定性、非理想电网供电下电机系统运行控制、高性能电机系统直接转矩控制等前沿研究成果。

本书适合作为电机系统及其控制、电力电子与电力传动领域研究生的教材与教学参考书,也可作为具有电机学、电力电子学、自动控制理论等基础的高等学校本科生参考书,并可供从事电机系统设计和研究的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

矩阵变换器-永磁同步电机系统/夏长亮著. —北京:科学出版社,2016. 12
ISBN 978-7-03-051102-7

I. 矩… II. 夏… III. 功率变换器-永磁电动机-研究
IV. ①TM671②TM351

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 309064 号

责任编辑:魏英杰 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张倩 / 封面设计:陈敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 12 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016 年 12 月第一次印刷 印张:16

字数:319 000

定价:85.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言


电机系统是支撑国民经济发展和国防建设的重要能源动力装备。随着我国建设步伐的不断加快,装备制造业面临的技术要求日益提高,给电机系统的发展注入了新的动力,同时也对电机系统及其控制技术提出了更高要求。目前,研究开发高控制精度、高功率密度及高运行效率的永磁同步电机系统是推进装备高端化发展的关键。

矩阵变换器是一种在强迫换流周波变换器基础上发展起来的交-交单级功率变换器,无中间直流储能元件,能量双向流动,输入与输出波形正弦且谐波畸变小,输入电流相位调整灵活。矩阵变换器-永磁同步电机系统具有如下优点:系统功率密度大,结构紧凑,环境适应性强;电机再生能量馈送电网,具有快速制动和频繁正反转能力;系统输入电流正弦,功率因数调整灵活,与电网兼容性好。

本书围绕矩阵变换器-永磁同步电机系统的设计、运行与控制问题进行论述。全书共分为六章。第1章介绍系统结构组成及相关变流、控制技术的研究发展现状。第2章阐述矩阵变换器调制原理,结合波形合成过程分析矩阵变换器运行特性。第3章以提高矩阵变换器综合电能变换质量为出发点,探讨矩阵变换器-永磁同步电机系统调制过程优化方式。第4章分析矩阵变换器-永磁同步电机系统在矢量控制下的运行性能,剖析系统稳态运行范围、运行稳定性及输入电源扰动下的运行控制方法。第5章建立矩阵变换器开关状态对永磁同步电机系统关键被控量的量化调控机制,研究高性能电机系统直接转矩控制优化方法。第6章对矩阵变换器-永磁同步电机系统发展前景进行展望。

本书是作者及所带领研究团队在十余年矩阵变换器-永磁同步电机系统研究工作基础上完成的一部学术著作,是作者研究团队主持承担的多个国家级和省部级基金项目的成果汇总。这里要感谢每一位曾经在和正在研究团队勤奋工作的博士研究生和硕士研究生,感谢史婷娜教授、阎彦博士、王志强博士所做的校核、修改和补充工作。此外,本书的完成也离不开前人所做的贡献,在此对本书所参考的书籍、期刊、会议录和专利等内容的原作者表示感谢。

因作者水平有限,书中难免有遗漏和不妥之处,恳切希望广大同行、读者批评指正。



2016年5月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 矩阵变换器-永磁同步电机系统结构组成	1
1.1.1 矩阵变换器的提出	2
1.1.2 矩阵变换器-永磁同步电机系统功率电路结构	3
1.1.3 矩阵变换器-永磁同步电机系统控制结构	5
1.2 矩阵变换器-永磁同步电机系统研究现状	8
1.2.1 矩阵变换器-永磁同步电机系统变流技术	8
1.2.2 矩阵变换器-永磁同步电机系统控制技术	15
参考文献	17
第 2 章 矩阵变换器运行特性	23
2.1 拓扑结构与调制原理	23
2.2 空间矢量调制	27
2.2.1 间接空间矢量调制	28
2.2.2 直接空间矢量调制	37
2.3 瞬时双电压调制	44
2.4 运行特性分析	51
2.4.1 电压传输比	51
2.4.2 换流控制与窄脉冲	53
2.4.3 共模电压	57
2.4.4 非理想电源输入下的电流谐波	59
参考文献	62
第 3 章 矩阵变换器-永磁同步电机系统调制策略	64
3.1 电流减谐调制策略	64
3.1.1 窄脉冲消除与电流减谐调制	64
3.1.2 电流减谐调制结果分析	75
3.2 共模电压降幅调制策略	81
3.2.1 零矢量替换与共模电压降幅调制	81
3.2.2 共模电压降幅调制结果分析	86
3.3 不平衡电源下输入电流调制策略	91

3.3.1 随不平衡电源变化的输入电流动态调制	91
3.3.2 不平衡电源下输入电流调制结果分析	95
参考文献	101
第4章 矩阵变换器-永磁同步电机系统矢量控制	102
4.1 矩阵变换器-永磁同步电机系统稳态运行范围	102
4.1.1 电压极限椭圆与电流极限圆	102
4.1.2 电压传输比对电机系统矢量控制稳态运行范围的影响	105
4.2 矩阵变换器-永磁同步电机系统运行稳定性	115
4.2.1 矩阵变换器稳定运行临界功率	116
4.2.2 矩阵变换器不稳定运行的复杂动力学特性	124
4.2.3 矩阵变换器运行稳定性提升方法	139
4.2.4 矢量控制下电机系统运行稳定性分析	149
4.3 非理想电源下矩阵变换器-永磁同步电机系统矢量控制策略	157
4.3.1 运行稳定性提升方法下的矩阵变换器数学建模	157
4.3.2 输入电源扰动对矩阵变换器输出特性的影响分析	159
4.3.3 基于内模原理的电机系统矢量控制	164
4.3.4 基于内模原理的电机系统矢量控制结果分析	169
参考文献	180
第5章 矩阵变换器-永磁同步电机系统直接转矩控制	181
5.1 矩阵变换器开关状态对电机系统被控量的调控作用	181
5.1.1 开关状态对电磁转矩和定子磁链的调控作用	181
5.1.2 开关状态对输入侧无功功率的调控作用	190
5.1.3 调控作用评价函数集	194
5.2 多开关状态调制直接转矩控制策略	196
5.2.1 两级调控直接转矩控制开关表	197
5.2.2 多开关状态调制直接转矩控制	203
5.2.3 多开关状态调制直接转矩控制结果分析	211
5.3 多级调控-单开关状态输出直接转矩控制策略	216
5.3.1 多级调控直接转矩控制开关表	217
5.3.2 多级调控-单开关状态输出直接转矩控制	231
5.3.3 多级调控-单开关状态输出直接转矩控制结果分析	233
参考文献	243
第6章 矩阵变换器-永磁同步电机系统发展前景与展望	244
索引	246

第 1 章 绪 论

电机作为实现电能与机械能转换的重要电磁装置,自其广泛使用以来一直是推动工业生产不断发展的重要动力核心。正是因其在工业领域所处地位的特殊性与重要性,电机运行品质与效能指标的提升更是成为备受国内外科研及工程技术人员关注的焦点。传统依靠继电器、接触器等电器构成的复杂电气回路虽然在一定程度可以对电机进行简单控制,但难以实现灵活的变频变压控制,从而无法充分发挥电机的性能优势,制约了电机在运行品质与效能指标方面的提升。直至 20 世纪 50 年代末,伴随着电力电子技术的快速发展,出现了一系列用于电能转换的拓扑结构,可以便捷地实现交流到直流、直流到交流、直流到直流、交流到交流的自由控制。这些电力电子技术与电机的紧密结合,可以突破电网频率与幅值对电机运行状态的限制,实现对电机灵活的变频变压控制,大幅提升电机的可控性与适应性,进而形成由电机、变流器和控制器等部件有机组成的电机系统。

目前,我国经济建设步伐不断加快,轨道交通、舰船推进、航空航天等重大装备在动力牵引、驱动控制上面临的技术需求日益提高,不但给电机系统的发展注入了新的动力,而且也对电机系统及其控制技术提出了更高的要求。研究开发高控制精度、高功率密度、高运行效率的电机系统成为推进装备高端化发展的关键。

1.1 矩阵变换器-永磁同步电机系统结构组成

交流电机系统中变流器的主要功能是将恒频恒幅值的交流电网电压转换为电机所需要的变频变幅值的交流电压。其中,交-直-交结构是一种较为成熟的功率变换方案,该方案中两侧电路的拓扑结构非常丰富。例如,在交-直变换中,既可以采用全控型器件构成三相两电平、三电平甚至多电平可控整流电路,实现电能的双向流动,也可以采用成本较低的三相不可控二极管整流电路实现单向的交-直流变换。在直-交变换中,既可以针对三相交流电机采用全控型器件构成三相两电平、三电平、多电平逆变电路,也可以针对多相交流电机采用多桥臂的两电平、三电平、多电平逆变电路。无论整流侧与逆变侧采取何种电路拓扑结构,该方案的共同特点是利用储能元件(电容器或电抗器)作为中间直流支撑。由于储能元件在整个变流器中所占的体积、重量比例较大,因此导致电机系统整体功率密度提升难度较大。除此之外,电容器电解液的挥发性也导致电机系统应用环境受到严格限制。寻求一种可实现高效电能转换的交-交直接变换变流器是解决上述问题的一个重要途径。

1.1.1 矩阵变换器的提出

矩阵变换器的提出源于周波变换器技术的发展。周波变换器,也称为循环换流器,是一类交流-交流的直接功率变换器,其工作原理“利用多相交流电的电压波形片段拼接产生所需交流输出电压”最初是由哈泽泰于1923年设想出来的^[1]。20世纪30年代初,由汞弧整流器构成的交-交直接功率变换器研制成功,使哈泽泰的设想付诸实际,但与其设想不同的是,变换器输出频率范围的上限要低于输入电压频率。随后,多相“高频”电源波形逐个变换为“低频”交流电压波形的过程被描述为周波变换^[2],周波变换器的名称由此得来。

1957年,半控型普通晶闸管研制成功,当时其体积小、压降低、切换速度快的特性加速了实用化周波变换器的研制及其应用技术的发展。由大容量晶闸管构成的自然换流周波变换器作为变频电源陆续出现在飞机供电、交流电机传动等应用场合。然而,受换流及相控方式影响,周波变换器输出波形的频率无法突破输入电源频率的限制。

1959年,美国新泽西科技发展公司以提升飞机供电系统整体性能为目标,将全控型器件——电力双极型晶体管引入周波变换器设计方案中^[3]。随后,美国西屋电气公司也提出类似方案^[4]。上述设计使周波变换器的输出频率范围得到扩展,同时三相半桥式结构,即三相-三相矩阵变换器基本拓扑结构由此建立。20世纪60年代中期,工程师居吉与佩莱在美国西屋电气公司开始周波变换器研究工作。1967年,他们在发明专利“具有新颖电压控制的静止变频器”中提出首个输出电压控制方案,使周波变换器在输出频率可调基础上,具备了连续调节输出电压幅值的能力^[5]。除此之外,具有双向导通和双向关断能力的双向开关概念也在同一专利中被首次提出。

受限于当时电力电子器件技术的不成熟,上述采用内部自关断能力开关(如电力双极型晶体管)的强迫换流周波变换器,虽然早在1959年就被提出,但是有很长时间停留在理论研究层面。与之相较,各种采用普通晶闸管并配以外部换流电路的双向开关设计方案,以及由其构成的周波变换器,得到了实验层面的发展。1976年,居吉与佩莱汇集当时各类强迫换流设计方案和实验模型数据,出版了《静止功率变频器》^[6,7]一书,推动周波变换器向强迫换流型周波变换器趋势发展。

20世纪70年代后期,以门极可关断晶闸管、电力双极型晶体管、电力场效应晶体管为代表的全控型电力电子器件制造技术逐步成熟、完善。通过门极控制,这些开关可以随时开通或关断,且开关速度远高于普通晶闸管。这些优越的特性使强迫换流周波变换器技术焕然一新。1980年,意大利学者文图里尼和艾莱辛那合作发表了关于正弦波频率变换技术和广义变换器合成理论的论文^[8-10],使《静止功率变频器》一书中设想的理想变频器功能在理论层面上获得实现。与此同时,居吉

与佩莱设计的理想变频器结构,即双向开关在各相输入端和各相输出端之间构成交错连接的矩阵变换电路,被文图里尼和艾莱辛那命名为矩阵变换器。由此,作为一类采用开关矩阵结构,具有任意 n 相输入到任意 m 相输出的电压(或电流)变换和频率变换功能的强迫换流周波变换器——矩阵变换器被正式提出。

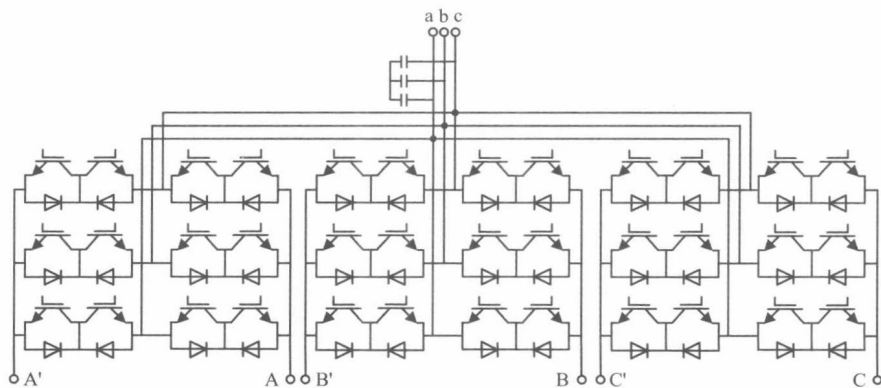
1.1.2 矩阵变换器-永磁同步电机系统功率电路结构

矩阵变换器无中间直流储能元件,可以实现能量双向流动,具备输入与输出波形正弦且谐波畸变小和输入电流相位调整灵活等优点,是一种高效的交-交功率变换结构^[11,12]。同时,永磁同步电机是一种高效能的电机形式,将两者相结合构成的矩阵变换器-永磁同步电机系统更是具有功率密度大,结构紧凑,环境适应性强;电机再生能量馈送电网,有快速地制动和频繁正反转能力;系统输入电流正弦,功率因数调整灵活,与电网兼容性好等优点。

在矩阵变换器-永磁同步电机系统中,矩阵变换器的拓扑结构具有多种形式,除双向开关在各相输入端和各相输出端之间交错连接的直接矩阵变换器,还有由整流和逆变两级变换构成的间接矩阵变换器结构。下面结合不同拓扑结构对矩阵变换器-永磁同步电机系统的组成方式与特点做简要概述。

1. 直接矩阵变换器

直接矩阵变换器采用双向开关在各相输入端和各相输出端之间交错连接的电路结构。根据桥路结构的不同,直接矩阵变换器可被分为全桥式和半桥式两种,拓扑结构如图 1.1 所示。半桥式结构被称为传统矩阵变换器,由于其功率开关数量只是全桥式结构的一半,因此受到研究人员的广泛关注,积累了大量研究成果和成功应用实例。全桥式矩阵变换器,在交流输入侧参数与控制特性一致的前提下,由于其功率器件的耐压是半桥式结构的一半,因此更适用于高压大功率场合。



(a) 全桥式

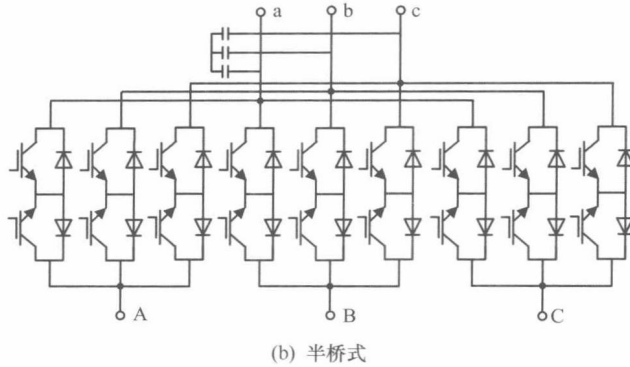


图 1.1 三相-三相直接矩阵变换器拓扑结构

2. 间接矩阵变换器

区别于直接矩阵变换器的交-交单级变换,间接矩阵变换器由整流和逆变两级变换构成^[13]。主要拓扑结构包括基频前端变换器、双级间接矩阵变换器和稀疏矩阵变换器。

(1) 基频前端变换器

基频前端变换器是一类采用单向开关构成的矩阵变换器,其结构由整流器和逆变器级联构成,如图 1.2 所示^[14]。区别于其他结构的矩阵变换器,基频前端变换器整流级的单向开关由于采用 120 度导通方式,且开关频率与输入电源频率一致,使得变换器的输入电流特性与二极管整流极为相似,无法提供正弦波形输入电流。

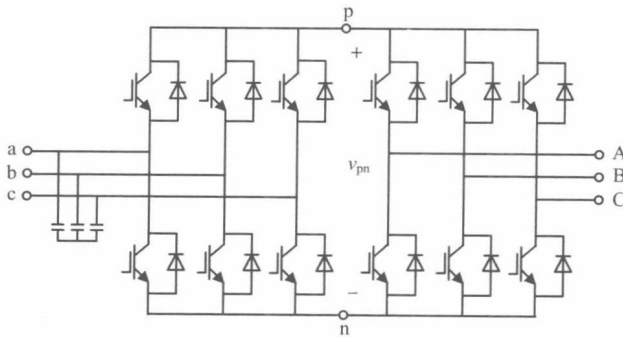


图 1.2 基频前端变换器拓扑结构

(2) 双级间接矩阵变换器

双级间接矩阵变换器结构如图 1.3 所示^[15]。在逆变级,双级间接矩阵变换器

与基频前端变换器相同,采用普通三相逆变电路。在整流级,采用6个双向开关构成的桥式整流电路,直流侧电流可以实现双向流动。与基频前端变换器的整流级相比,图1.3的整流级增加了6个全控型功率器件及6个二极管,使双级间接矩阵变换器整流级输出的电压较基频前端变换器有了正、负两种极性,为了避免逆变级反并联二极管出现短路问题,整流级输出的直流电压 v_{pm} 极性要求始终为正。

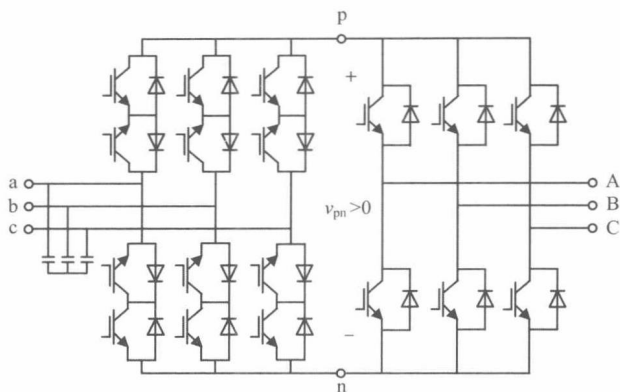


图 1.3 三相-三相双级间接矩阵变换器拓扑结构

与传统矩阵变换器相比,双级间接矩阵变换器的开关状态和功能与传统矩阵变换器相等效,采用分立开关形式构成双向开关时,所需的功率器件数量与传统矩阵变换器相同。在换流方式上,双级间接矩阵变换器更具优势。传统矩阵变换器为了保证输入电源不发生短路、输出电路不发生开路,需要采用多步开关状态的切换实现安全换流。双级间接矩阵变换器通过整流级与逆变级开关状态的配合(逆变级为零矢量作用时,整流级开关进行换流),可以在整流级实现零电流换流,而逆变级换流又与两电平电压源逆变器换流方式完全相同,因此与传统矩阵变换器相比,双级间接矩阵变换器换流控制的复杂程度极大简化。

(3) 稀疏矩阵变换器

稀疏矩阵变换器是在图1.3所示双级间接矩阵变换器基础上发展而来,如图1.4(a)所示^[16-18]。通过进一步限定整流级输出电压极性和输出功率因数范围,稀疏矩阵变换器还可进一步简化为非常稀疏矩阵变换器和超稀疏矩阵变换器,如图1.4(b)和图1.4(c)所示^[19-21]。

1.1.3 矩阵变换器-永磁同步电机系统控制结构

按电机控制策略划分,矩阵变换器-永磁同步电机系统主要有矢量控制和直接转矩控制两种形式。

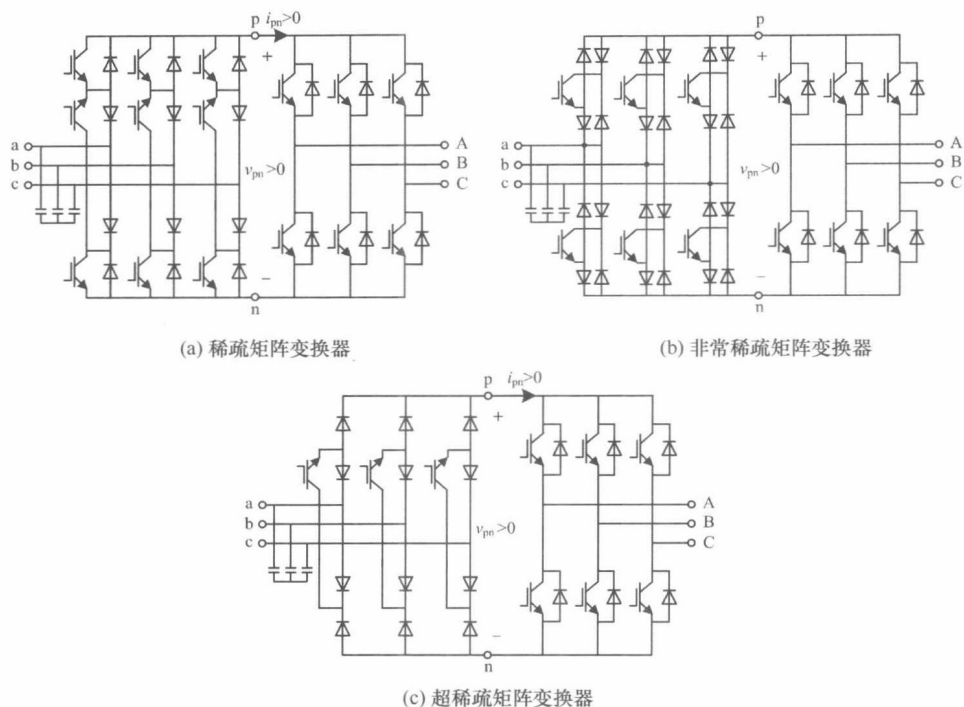


图 1.4 三相-三相稀疏矩阵变换器拓扑结构

图 1.5 为矩阵变换器-永磁同步电机系统 $i_d=0$ 矢量控制下的结构简图。图中,矢量控制利用旋转坐标变换将电机各被控物理量从三相静止坐标系下的交流量形式转换为同步旋转坐标系下的直流量形式,使电机电磁转矩仅受控于定子电流交轴分量大小,通过对电流的控制,可以获得施加于电机的电压参考量。在此基础上,矩阵变换器作为功率变换电源,在调制策略和换流控制作用下,通过对功率开关的通断控制,将电压参考量转换为电机运行所需的实际电压信号。

图 1.6 为矩阵变换器-永磁同步电机系统直接转矩控制结构简图。与采用二极管整流和电压源逆变器相连功率变换结构(diode rectifier-voltage source inverter, DR-VSI)的电机系统直接转矩控制相比,该系统通过对空间矢量的两次筛选来确定开关状态。首先,根据转矩、磁链滞环比较器的输出和定子磁链所在扇区从逆变器开关表中选择一个虚拟空间矢量,完成第一次筛选;然后,根据功率因数角的滞环比较器输出量和输入电压矢量所在扇区号从矩阵变换器开关表中选择与虚拟空间矢量同方向的矩阵变换器空间矢量,完成第二次筛选。

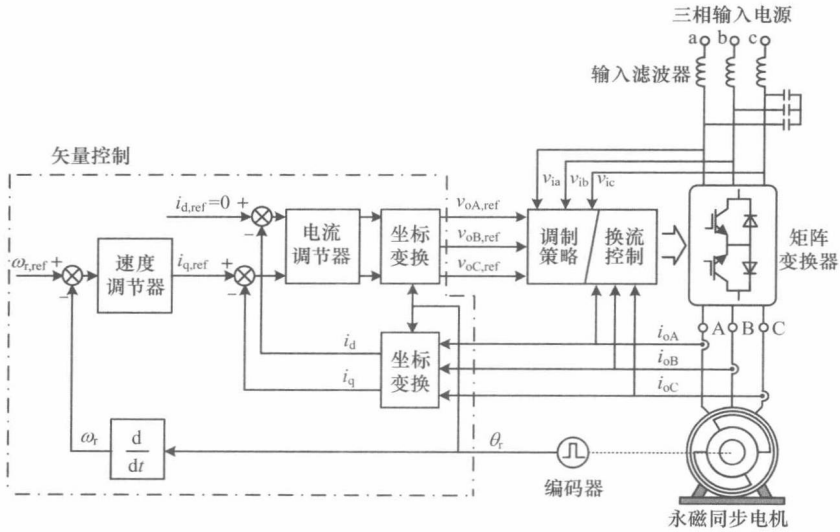


图 1.5 矩阵变换器-永磁同步电机系统矢量控制结构简图($i_d=0$ 控制)

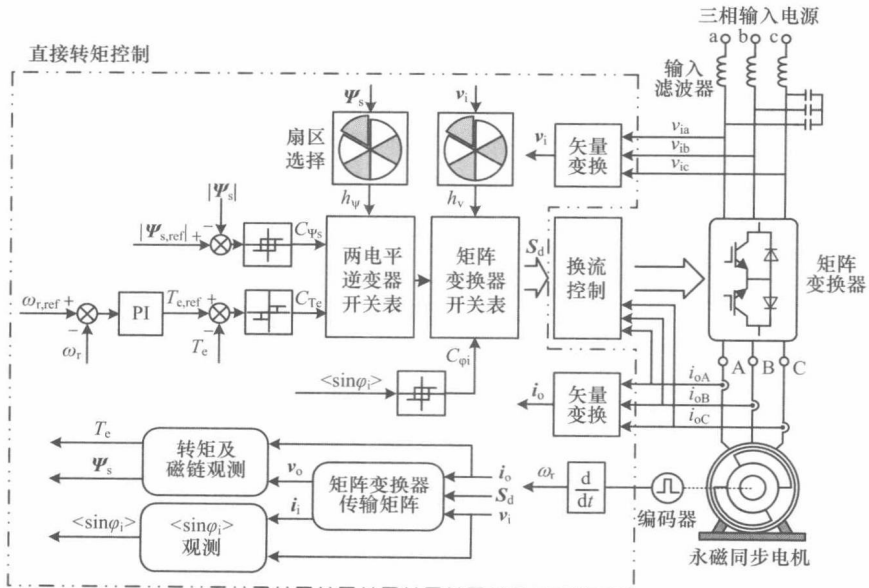


图 1.6 矩阵变换器-永磁同步电机系统直接转矩控制结构简图

1.2 矩阵变换器-永磁同步电机系统研究现状

矩阵变换器-永磁同步电机系统性能取决于矩阵变换器变流技术和永磁同步电机系统的控制技术。其中,变流技术以向永磁同步电机提供高质量供电电源为出发点,涉及矩阵变换器的调制和换流及电压传输比提升等措施。控制技术以高精度控制为主导,涵盖系统稳定运行、转矩波动抑制及不平衡电网输入工况下的控制方法等。

1.2.1 矩阵变换器-永磁同步电机系统变流技术

1. 电力电子器件

对于矩阵变换器,双向开关是构成功率电路、实现电能变换的核心部件。随着电力电子器件的发展,双向开关中采用的全控型器件从最初的电力双极型晶体管、静电感应晶体管、电力场效应管逐渐过渡至绝缘栅双极晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)。20 世纪八九十年代,矩阵变换器的双向开关采用分立器件构成,实现方案如图 1.7(a)~图 1.7(c)所示。90 年代中期,在非穿通型 IGBT 基础上发展起来的逆阻式 IGBT(reverse blocking IGBT, RB-IGBT)为双向开关设计提供了新的选择。这种开关器件除具有输入阻抗高、开关速度快、通态电压低、阻断电压高、承受电流大等优点外,还具备反向阻断能力^[22]。两个 RB-IGBT 反并联构成的双向开关,如图 1.7(d)所示,与图 1.7(b)和图 1.7(c)所示结构相比,省去了两个二极管,利于进一步降低变换器的导通损耗。

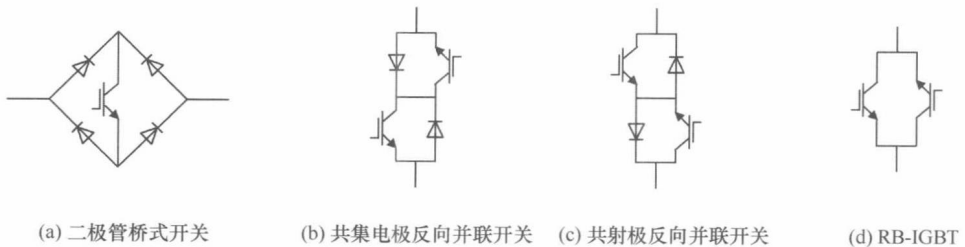


图 1.7 矩阵变换器的双向开关结构

为了进一步提高功率密度、减少中间连接件的数量、降低功率电路中的杂散电感和实现保护功能的硬件优化集成,矩阵变换器的电力电子器件向功率集成电路发展。第一款针对矩阵变换器量身定制的功率模块内部集成了 3 个共集电极形式连接的双向开关,封装后的模块额定值为 1200V/100A^[23]。随后,传统矩阵变换器的全部电力电子器件被封装至一个功率模块之中,构成了额定值 1200V/30A 的

EconoMAC 模块和 1200V/100A 的 RB-IGBT 功率模块^[24,25]。

近些年,宽能带间隙材料的半导体器件,如碳化硅和氮化镓器件得到了较快的发展。这类器件与传统的硅基电力电子器件相比,在击穿电场强度、能带间隙、热导率等方面具有突出优势。最新研究数据表明,在 18mm×25mm 的尺寸范围内,采用氮化镓双向开关及射频驱动技术可实现传统矩阵变换器整体功率电路及驱动电路的设计,满足 4kW 电机的供电需求^[26]。

2. 调制技术

调制策略是功率开关器件的动作规则。在该规则下,矩阵变换器-永磁同步电机系统中的矩阵变换器将电网提供的三相正弦电压调制为电机运行控制所需的特定幅值、频率和相位的电压,同时保证电网侧输入电流正弦且相位一定范围内可调。目前,矩阵变换器的调制策略可分为标量调制和脉宽调制(pulse width modulation, PWM)两种。

(1) 标量调制

标量调制是一类利用输入电源电压和参考输出电压直接计算双向开关的控制信号的调制方法。在这类方法中,最著名的矩阵变换器调制策略是 alesina-venturini(AV)调制法^[10]。AV 调制法是矩阵变换器的第一个调制策略,1981 年提出时,电压传输比(输出电压与输入电压的幅值比)的最大值仅为 0.5 且输入功率因数的调节会受到输出功率因数的限制。随后,通过在正弦基波相电压基础上叠加共模电压的方式,AV 调制法被改进为优化 AV 调制法,矩阵变换器电压传输比的最大值被提高到 0.866,同时输出功率因数对变换器输入功率因数调节范围的限制作用得到消除^[27,28]。采用优化 AV 调制法,波形合成过程如图 1.8 所示。

(2) PWM 调制

PWM 调制技术于 1987 年被引入到矩阵变换器的调制过程中^[29]。目前,应用较为广泛的 PWM 调制方法是空间矢量调制和瞬时双电压调制。

对于传统矩阵变换器,空间矢量调制根据是否将交-交单级变换等效为具有虚拟直流环节的交-直-交两级变换,被分为间接空间矢量调制和直接空间矢量调制。其中,间接空间矢量调制策略将传统矩阵变换器等效为整流器-逆变器级联结构,利用空间矢量调制技术,在整流器和逆变器中分别利用静止的有效矢量对目标矢量进行合成,然后通过整流器-逆变器与矩阵变换器结构之间的等效关系,实现矩阵变换器期望输出电压与期望输入电流同时调制^[30]。与上述利用等效整流器空间矢量和逆变器空间矢量合成期望矢量不同,直接空间矢量调制是一种直接利用矩阵变换器开关状态对应的空间矢量合成期望矢量的方法。具体来说,该方法将矩阵变换器 27 种开关状态对应的输出电压和输入电流表示为空间矢量形式,再根据目标输出电压矢量、输入电流矢量的空间位置,从 18 个方向固定、幅值时变的有

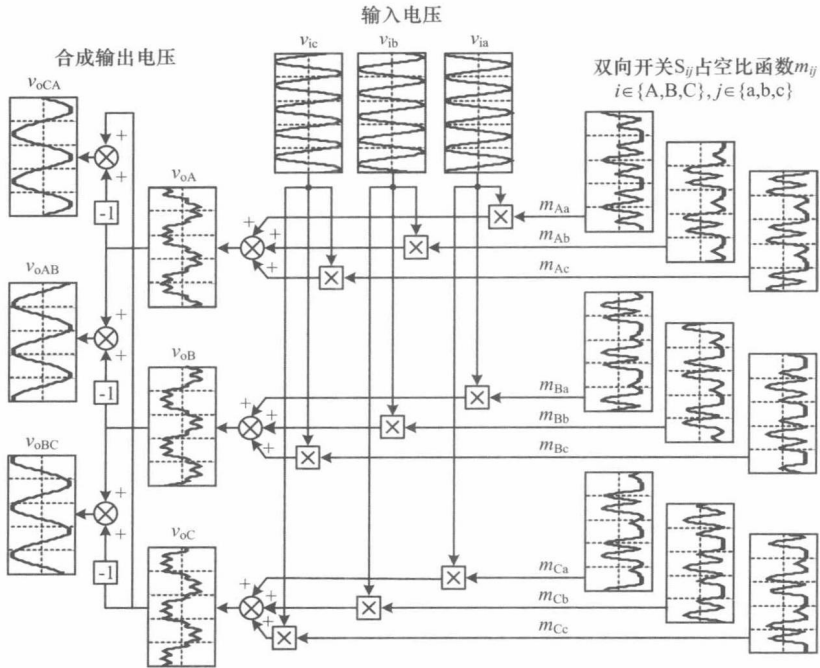


图 1.8 矩阵变换器优化 AV 调制法下的电压波形合成示意图

效矢量中选取 4 个同时满足电压与电流调制要求的有效矢量, 实现目标矢量合成^[31]。

瞬时双电压合成调制最初于 1987 年提出, 20 世纪 90 年代得到完善。该方法根据输入线电压和期望输出线电压瞬时值计算开关时间, 实现输入线电压到期望输出线电压的合成。与此同时, 兼顾输入电流控制要求, 电流分布系数根据期望的输入电流确定, 据此调整开关作用时间, 达到控制矩阵变换器输入侧功率因数的目的^[32-34]。

3. 安全换流技术

受功率开关器件导通与关断延时的影响, 矩阵变换器各相输出电流, 在不同输入相间切换时极易出现瞬时输入电源短路或瞬时输出电路开路引起的电流冲击和电压尖峰问题。这些尖峰会随输出电流、负载感抗的增加而增加, 极端情况会造成整个变换器的损毁。目前, 实现矩阵变换器-永磁同步电机系统安全换流的最常用方法是多步换流策略。

较为典型的多步换流策略是基于输入电源电压检测(检测即将关断相与即将导通相间的线电压极性)的四步换流策略^[32]和基于输出电流检测(检测输出电流

方向)的四步换流策略^[35]。这些策略根据输入线电压或输出电流的极性来控制换流支路上双向开关(4个分立功率器件)的导通、关断状态。由于整个换流过程分四步完成且构成双向开关的分立功率器件有50%的可能实现零电压开通或零电流关断,因此又被称为四步半软换流策略。图1.9为上述两种策略的换流时序图。假设输出电流从输入侧流向输出侧,三相输入电压瞬时值从大至小依次为a相、b相和c相。

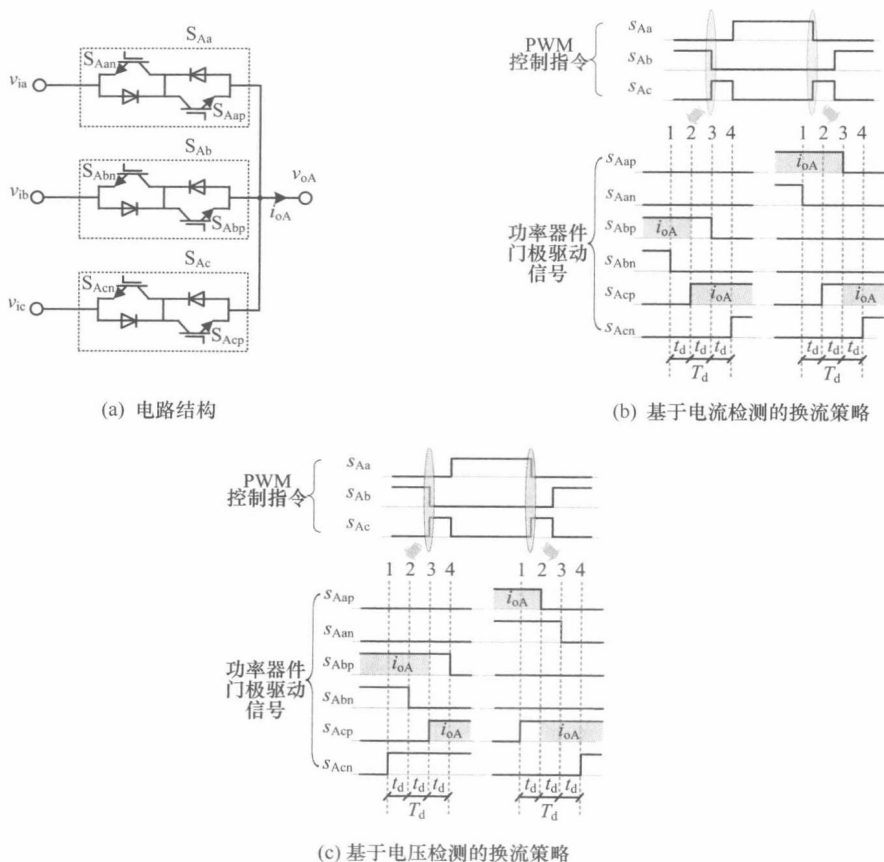


图 1.9 矩阵变换器多步换流时序图

关于换流技术,有两方面性能亟待改善。第一,类似于电压源逆变器中的死区效应,多步换流策略由于增加功率器件触发时刻的不确定性和去除窄脉冲触发信号等原因,导致变换器输出电压的非线性偏差增加,引起电机低速运行时的电流畸变、输出转矩降低和波动加剧及电机发热等问题。目前,将缩减换流时间^[36-38]与窄脉冲消除技术^[39]相结合成为改善这一问题的主要方法。第二,换流策略以输入电压极性检测或输出电流方向检测为基础,然而传感器及信号调理电路带来的延