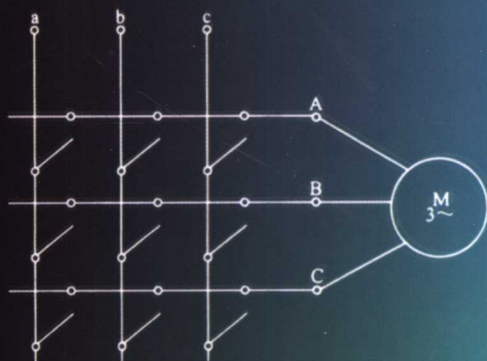


电力电子

新技术系列图书

New Technology Series in
Power Electronics



◎孙凯 周大宁 梅杨 编著

矩阵式变换器 技术及其应用

JUZHENSHI BIANHUANQI
JISHU JIQI YINGYONG



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

电力电子新技术系列图书

矩阵式变换器技术 及其应用

孙 凯 周大宁 梅 杨 编著



机械工业出版社

本书全面系统地介绍了矩阵式变换器技术的工作原理、控制方法及其在工业中的应用。内容包括矩阵式变换器技术的发展历程和研究现状,三相-三相矩阵式变换器的工作原理,矩阵式变换器的换流控制技术和调制算法、在非正常工况下的补偿策略和保护措施、样机的设计和实现,基于矩阵式变换器理论的各种新型电路拓扑的工作原理与分析比较,矩阵式变换器技术在车辆牵引系统、风力发电系统、航空系统、电源系统等各个工业领域中的应用。

本书适合于从事电气传动自动化、电力电子技术、电机及其控制领域的科技人员阅读,也可作为大专院校相关专业的教师、研究生和高年级本科生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

矩阵式变换器技术及其应用/孙凯,周大宁,梅杨编著. —北京:机械工业出版社, 2007. 9

(电力电子新技术系列图书)

ISBN 978-7-111-22088-6

I. 矩… II. ①孙…②周…③梅… III. 矩阵-变换器 IV. TN624

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 120335 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:孙流芳 版式设计:张世琴 责任校对:张晓蓉

封面设计:马精明 责任印制:洪汉军

北京瑞德印刷有限公司印刷(三河市明辉装订厂装订)

2007 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·6.625 印张·257 千字

0001—4000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-22088-6

定价:26.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 88379768

封面无防伪标均为盗版

电力电子新技术系列图书

编辑委员会

主 任：王兆安

副主任：白继彬 牛新国 徐德鸿 杨 耕

委 员：(按姓名拼音字母排序)

白继彬	陈伯时	陈道炼	陈 坚	陈守良
陈治明	高艳霞	郭世明	黄耀先	康 勇
李崇坚	李永东	刘进军	吕征宇	牛新国
钱照明	阮新波	孙流芳	童宗鉴	王鸿麟
王旭东	王兆安	邬伟扬	肖湘宁	徐德鸿
徐殿国	杨 耕	杨 旭	余岳辉	张 波
张承慧	张为佐	张卫平	张 兴	赵善麒
赵争鸣	钟彦儒	周 波	周雏维	查晓明

秘书组：陈守良 刘进军 孙流芳

电力电子新技术系列图书

序 言

电力电子技术诞生近半个世纪以来,使电气工程、电子技术、自动化技术等领域发生了深刻的变化,同时也给人们的生活带来了巨大的影响。

目前,电力电子技术仍以迅猛的速度发展着,新的电力电子器件层出不穷,新的技术不断涌现,其应用范围也不断扩展。不论在全世界还是在我国,电力电子技术都已造就了一个很大的产业群,如果再考虑到与电力电子技术相关的上游产业和下游产业,这个产业群就更加庞大了。与之相应,在电力电子技术领域工作的工程技术和科研人员的数量也相当庞大,且与日俱增。因此,组织出版有关电力电子新技术及其应用的系列书籍,以供广大从事电力电子技术的工程师和高等学校教师和研究生在工程实践中使用和参考,成为眼下的迫切需要。

在20世纪80年代,电力电子学会曾和机械工业出版社合作,出版过一套电力电子技术丛书,那套丛书对推动电力电子技术的发展起过积极的作用。最近,电力电子学会经过认真考虑,认为有必要以“电力电子新技术系列图书”的名义出版一系列著作。为此,成立了专门的编辑委员会,负责确定书目、组稿和审稿工作,向机械工业出版社推荐,仍由机械工业出版社出版。

本系列图书有如下特色:

1. 本系列图书属专题论著性质,选题新颖,力求反映电力电子技术的新成就和新经验,以适应我国经济迅速发展的需要。
2. 理论联系实际,以应用技术为主。
3. 本系列图书组稿和评审过程严格,作者都是在电力电子技术第一线工作的专家,且有丰富的写作经验。内容力求深入浅出,条理清晰,语言通俗,文笔流畅,便于阅读学习。

本系列图书编委会中,既有一大批国内资深的电力电子专家,也有不少已崭露头角的青年学者,其组成人员在国内具有较强的代表性。

希望广大读者对本系列图书的编辑、出版和发行给予支持和帮助,并欢迎对其中的问题和错误给予批评指正。

电力电子新技术系列图书
编辑委员会

前 言

随着全球经济的发展和人们生活水平的不断提高,电气技术的普及与应用愈来愈广,电能的消耗量也迅速升高,由此带来的能源短缺和环境污染问题已成为人类所共同面临的世纪性难题,同时也使电气节能技术日益得到更广泛的关注。我国的电能生产和消费已位居世界前列,但仍远远不能满足工业生产和人民生活发展的需要。由于缺电,正常的生产生活秩序被打乱,造成巨大的经济损失;另一方面,在电能十分紧张的情况下,浪费现象却十分严重。因此,在我国大力发展电气节能技术,是建设“资源节约型”社会,实现可持续发展的必由之路。而交流变频调速技术是实现电气化节能的最有效的途径之一。

交流电力变换器是采用电力电子器件按照一定电路拓扑构成的交-交电力变换装置。它是交流变频调速系统的核心,现已成为许多工业设备和家用电器中不可或缺的重要组成部分。20世纪80年代以来,随着IGBT、功率MOSFET、IGCT等高性能电力电子器件的出现,交流电力变换器也取得了长足的进步。根据有无中间直流环节,交流电力变换器可分为交-直-交型和交-交型变换器两种。交-直-交型变频器存在着中间直流储能环节,根据所用储能元件性质的不同,交-直-交型又可分为电压型和电流型两种。而交-交型变换器主要包括传统交-交变频电路和矩阵式变换器两种。

尽管高性能交-直-交型变频装置的研发已取得了长足的进展,并已有成熟的产品在市场上出现。但是,随着工业电气自动化的不断进步,以及节能和环保要求的逐步提高,目前占主导地位的交-直-交电压型PWM变频器、仍存在直流储能电容不易维护、输入侧功率因数低、制动运行时能量再生困难等许多不足,而传统的交-交变频电路也存在着输出频率范围窄、功率因数低等诸多缺点。

为了弥补交-直-交型变频器和传统交-交变频电路的不足,进一步改善交流变频调速系统的运行性能,扩大并加深交流传动在工业领域的应用,矩阵式变换器作为一种补充和替代技术,被推上了变频调速发展的历史舞台。由于自身结构的特点,矩阵式变换器具有一系列优点:能量双向流通,可实现四象限运行;正弦输入/输出电流;对任意负载输入功率因数为1;不需要直流储能元件等。自1976年矩阵式变换器的概念被提出起,在这今为止的30年间,欧美和日本的许多大学和公司矩阵式变换器技术开展了大量深入的研究,已基本解决了器件、

调制、换相（也称换流）^①、保护等实用化过程中的核心问题，研制开发了多个工业化样机，并已有相关产品问世。矩阵式变换器驱动的交流电动机调速系统已被应用于电梯、起重机、风力发电等需要能量双向流通的场合。另外，矩阵式变换器还被应用于一些安装空间有限、对变频装置体积和重量要求很严格的场合，如铁道机车、电动车辆、飞机等独立电源系统中。近年来，矩阵式变换器技术也已成为国内电力电子学科的研究热点，许多高校对此开展了深入细致的研究工作。清华大学电机工程与应用电子技术系工业控制与应用课题组，自2001年开始，在国家自然科学基金（50377014、50607012）、台达电力电子科教发展基金、铁道部-清华大学科技研究基金、清华大学电力系统国家重点实验室资助下，与三菱电机、富士电机等企业协作，开展了对矩阵式变换器-交流电动机高性能调速系统的研究工作，自主研发了一批核心技术，取得了一些重要的研究成果，并通过与企业的合作加以推广。

近10多年来，关于矩阵式变换器技术的研究很多，积累了大量的文献，成果也极为丰硕。因此，作者根据自己的研究成果和已有的文献资料撰写了这本全面系统介绍矩阵式变换器工作原理、控制方法及其应用技术的书籍。因此，本书作者希望，一方面较为系统地介绍矩阵式变换器的工作原理，使读者能够深入地理解该项技术；另一方面较为全面地介绍矩阵式变换器的控制方法和应用领域，以使读者在解决实际问题时能够加以利用。此外，对目前国内外比较前沿的研究课题，如间接矩阵式变换器等新型电路拓扑，本书也给予了充分的重视，希望读者对此有所了解，从而推动矩阵式变换器技术的进一步发展。

全书共分10章。第1章简述矩阵式变换器的发展背景、概念、分类与特点，以及主要存在的问题和研究热点。第2~8章主要介绍目前研究得最为广泛和深入的三相-三相矩阵式变换器技术。其中，第2章介绍三相-三相矩阵式变换器的电路拓扑、开关构成等基本原理解，第3章重点介绍矩阵式变换器中双向开关的换流控制方法，第4章介绍三相-三相矩阵式变换器的调制策略，第5章介绍矩阵式变换器在非正常工况下的运行控制，第6章介绍矩阵式变换器的保护技术，第7章介绍矩阵式变换器-交流电动机调速系统，第8章介绍三相-三相矩阵式变换器样机的设计与实现。第9章主要介绍间接矩阵式变换器、三相-单相矩阵式变换器等新型电路拓扑，并介绍几种主要的交-交电力变换器拓扑的比较。第10章介绍矩阵式变换器技术在工业传动、车辆牵引、风力发电、航空系统等领域的应用。

作者对矩阵式变换器技术的研究工作以及本书的写作均是在黄立培教授的悉心指导下完成的，作者在这里表示深深的感谢。在本书的选题和出版过程中，得

① 在矩阵式变换器中，习惯称为“换流”，所以本书以下仍采用“换流”。

到了系列图书编辑委员会和机械工业出版社的大力支持，特别是陈伯时教授的关怀和指导，作者在这里深表感谢。另外，作者还要感谢清华大学蔡宣三教授和日本明治大学松濑贡规教授，在作者对矩阵式变换器技术的研究工作中，他们给予了热情的关心和帮助。

本书的第1、5、7、9、10章以及第2章的部分内容由孙凯编写，第3、8章以及第2章的部分内容由周大宁编写，第4、6章由梅杨编写。全书的统稿和修改工作由孙凯完成。另外，对曾在本课题组从事相关研究工作，现已出站或毕业的博士后和研究生同仁，作者也要表示深深的谢意，他们是邢岩、王莉娜、冯光、吴学智、蒋志宏、刘亚东、孔鹏举、蒲志勇、邓毅晟、孙宇平、刘智超、朱晓峰等。最后，还要感谢我们的家人，是他们给了我们无私的支持。

由于作者学识所限和时间的紧迫，以及矩阵式变换器技术领域中的许多创新点仍处于研究过程中，因而一些相关内容在本书中并未完全得到反映，恳请读者谅解。书中内容也难免有不当和错误之处，敬请有关专家和各位读者给予批评和指正。

作 者

2007年5月于清华大学

目 录

电力电子新技术系列图书序言

前 言

第 1 章 绪论 1

- 1.1 矩阵式变换器技术的发展
背景 1
- 1.2 矩阵式变换器的分类和
特点 4
 - 1.2.1 矩阵式变换器的基本概念
与分类 4
 - 1.2.2 矩阵式变换器的研究
历程 6
 - 1.2.3 矩阵式变换器存在的问题
与研究热点 12
- 1.3 矩阵式变换器研究工作的
意义 16
- 参考文献 17

第 2 章 矩阵式变换器的基本

- 原理 23
- 2.1 矩阵式变换器基本拓扑 23
- 2.2 矩阵式变换器的双向开关
构成 24
- 2.3 矩阵式变换器实际电路结构 26
- 参考文献 26

第 3 章 矩阵式变换器的换流

- 方法 28
- 3.1 双向开关换流控制的基本
原理 28
- 3.2 基于输出电流方向检测的
多步换流策略 29
 - 3.2.1 四步换流策略 29
 - 3.2.2 两步换流策略 32
 - 3.2.3 智能换流策略 33

- 3.3 基于换流电压检测的换流
策略 33
 - 3.3.1 四步换流策略 33
 - 3.3.2 其他换流策略 34
- 3.4 RB-IGBT 双向开关的两步换流
方式 36
 - 3.4.1 换流过程所需信息的获
取 36
 - 3.4.2 换流原理 39
 - 3.4.3 潜在问题的分析 42
 - 3.4.4 实验的测试与分析 43
 - 3.4.5 小结 47
- 3.5 换流时间对矩阵式变换器性能
的影响 47
- 参考文献 49

第 4 章 矩阵式变换器的调制

- 策略 51
- 4.1 直接传递函数法
(Venturini 法) 51
 - 4.1.1 AV 方法 51
 - 4.1.2 优化 AV 方法 54
- 4.2 间接空间矢量调制算法 56
 - 4.2.1 间接调制模型 57
 - 4.2.2 脉宽调制策略 60
- 4.3 直接空间矢量调制算法 64
- 4.4 双电压控制法 69
- 4.5 其他调制算法 72
- 4.6 PWM 脉宽分布 73
- 参考文献 77

第 5 章 矩阵式变换器在非正常

- 工况下的运行控制 79
- 5.1 矩阵式变换器在非正常工况下

的运行性能分析	79	参考文献	126
5.1.1 输入电压不平衡时的运行性能分析	80	第7章 矩阵式变换器—交流电动机调速系统	128
5.1.2 输入电压非正弦时的运行性能分析	83	7.1 矩阵式变换器—交流电动机调速系统概述	128
5.1.3 输入电压瞬时跌落时的运行性能分析	86	7.2 矩阵式变换器—异步电动机矢量控制系统	129
5.1.4 输入侧瞬时断电时的运行性能分析	88	7.2.1 采用组合控制策略的矩阵式变换器—异步电动机矢量控制系统	130
5.2 矩阵式变换器在非正常工况下的控制策略	89	7.2.2 带输入电压不平衡补偿功能的矩阵式变换器—异步电动机矢量控制系统	139
5.2.1 基于间接空间矢量调制法的前馈补偿控制	89	7.3 矩阵式变换器—异步电动机直接转矩控制系统	140
5.2.2 基于间接空间矢量调制法的输入电流调制	94	7.4 矩阵式变换器—永磁同步电动机调速系统	141
5.2.3 基于双电压控制法的输入电压不平衡补偿	97	参考文献	142
5.3 输入侧瞬时断电时的跨越失压能力	99	第8章 矩阵式变换器的设计与实现	144
5.3.1 输入侧瞬时断电时矩阵式变换器运行机理	100	8.1 矩阵式变换器样机系统结构	144
5.3.2 矩阵式变换器跨越失压运行控制	101	8.2 开关矩阵主电路	145
参考文献	102	8.3 RB-IGBT 驱动保护电路	147
第6章 矩阵式变换器的保护技术	104	8.4 箝位电路	148
6.1 器件级保护	104	8.5 输入滤波器	148
6.2 驱动级保护	104	8.6 辅助开关电源	152
6.2.1 设计驱动保护电路的依据	105	8.7 信号采样与调理电路	153
6.2.2 IGBT 驱动保护电路方案概述	105	8.8 控制电路	154
6.2.3 适用于 RB-IGBT 的驱动保护电路方案	108	8.8.1 控制电路结构与信号流程	154
6.3 系统级保护	119	8.8.2 CPLD 开关换流控制器	156
6.3.1 一般性过电流保护	120	8.9 样机系统实现	160
6.3.2 短路过电流保护	121	参考文献	161
6.3.3 箝位保护电路	121	第9章 交—交电力变换拓扑研究	162
		9.1 矩阵式变换器新型电路拓扑的发展背景	162
		9.2 间接型矩阵式变换器	163

9.2.1	双级矩阵式变换器	163
9.2.2	稀疏矩阵式变换器	169
9.3	其他新型拓扑矩阵式变换器 ...	171
9.3.1	三相-两相矩阵式变换器	171
9.3.2	三相-单相矩阵式变换器	173
9.3.3	单相-三相矩阵式变换器	175
9.3.4	单相-单相矩阵式变换器	180
9.4	交-交功率变换拓扑的比较	182
9.4.1	四种交-交电力变换器概述	182
9.4.2	四种交-交电力变换器的结构与性能比较	183
9.4.3	四种交-交电力变换器的	

功率损耗比较	185
--------------	-----

参考文献	188
------------	-----

第10章 矩阵式变换器技术的

应用	191
----------	-----

10.1	矩阵式变换器在通用交流变频传动系统中的应用	191
10.2	矩阵式变换器在车辆牵引系统中的应用	193
10.3	矩阵式变换器在风力发电系统中的应用	196
10.4	矩阵式变换器在航空系统中的应用	197
10.5	矩阵式变换器在其他领域的应用	199
参考文献		200

第1章 绪 论

1.1 矩阵式变换器技术的发展背景

随着全球经济的发展和人们生活水平的不断提高,电气化技术的普及与应用愈来愈广,电能的消耗量也迅速升高,由此带来的能源短缺和环境污染问题已成为人类所共同面临的世纪性难题。特别是在我国,近年来国民经济快速发展,迅猛增长的耗电量使能源和环境这两个问题更显得尤为突出。一方面,我国的电能生产中70%依赖于火电,每年消耗大量的煤炭资源。目前全世界每使用3t煤中,就有1t以上是我国使用的。我国的煤炭可采储量只占世界总量的11%,但年开采量却是世界第一,这给经济和社会的可持续发展带来了严重的隐患。另一方面,燃煤发电还造成了对环境的严重污染,而且二氧化碳排放过度已导致全球性的温室效应。

我国的电能生产和消费已居世界第二位,但仍远远不能满足工业生产和人民生活发展的需要。由于缺电,正常的生产、生活秩序被打乱,造成巨大的经济损失;另一方面,在电能十分紧张的情况下,浪费现象却十分严重。根据国家有关部门的调查统计,我国发电量的60%~70%用于推动电动机做功,其中90%的电动机是交流电动机,大部分为直接拖动。由于采用直接恒速拖动,每年造成大量的电能浪费。再考虑到电力从发出到传输和使用中,如调峰、励磁、网损、无功及各种用电设备上的损耗,全国每年浪费的用电总量十分惊人。因此在我国大力发展电气节能技术,是建设“资源节约型”社会、实现可持续发展的必由之路。而交流变频调速技术是实现电气化节能的最重要的途径之一。如国内约有各种风机、泵类负载4700万台,总功率为1.3亿kW,占工业用电总量的30%以上。由于此类负载工况变化较大,如采用交流变频调速技术实现变速运行,节能效果明显。以平均节电20%计算,对于全国来说,相当于一年节电500亿kW·h,相当于1500万kW发电站的年发电量,还可节约数百亿元的电力建设投资,同时可以减少2000万t发电用煤、50万t二氧化硫和1200万t二氧化碳的污染排放。

交流电力变换器是采用电力电子器件按照一定电路拓扑构成的交-交电力变换装置。它是交流变频调速系统中的核心,现已成为许多工业设备和家用电器中不可或缺的重要组成部分。20世纪80年代以来,随着IGBT、功率MOSFET、

IGCT 等高性能电力电子器件的出现, 交流电力变换器也取得了长足的进步^[1,2]。

交流电力变换形式的分类如图 1-1 所示。根据有无中间直流环节, 交流电力变换器可分为交-直-交型和交-交型变换两种形式。交-直-交型变换器存在着中间直流储能环节, 根据所用储能元件性质的不同, 交-直-交型又可分为电压型和电流型两种。而交-交型变换器主要包括传统交-交型变频和矩阵式交-交型变换两种形式。

尽管高性能交-直-交型变频装置的研发已取得长足的进展, 并已有成熟的产品在市场上出现。但是, 随着工业电气自动化的不断进步, 以及节能

和环保要求的提高, 目前占主导地位的交-直-交型 PWM 变频器 (见图 1-2) 仍有许多方面存在不足:

1) 交-直-交型变频器均含有大电容或大电感作为直流储能环节, 不仅体积大重量重, 造成了变频装置安装和使用的不便, 而且不易于维护, 尤其是大电解电容, 由于电解液的挥发, 严重影响了变频器的使用寿命;

2) 大部分交-直-交型变频器的整流侧采用二极管全桥整流, 使得输入侧功率因数较低, 对电网谐波污染严重;

3) 在机车牵引、电梯等既需要连续电动又需要连续发电制动的工业应用场合, 交-直-交型变频器—电动机制动运行时, 能量一般消耗在制动电阻上, 而没有回馈到电网上, 不利于节约能源;

4) 在酒精厂、化工厂等生产危险品的工业场所, PWM 变频器中的大容量制动电阻可能引起火灾, 是影响安全生产的一个潜在因素。

传统的三相交-交变频电路由三组反并联晶闸管可逆桥式变流器组成, 如图 1-3 所示。和交-直-交型变频器相比, 它采用电网自然换流, 只需一次换流就实

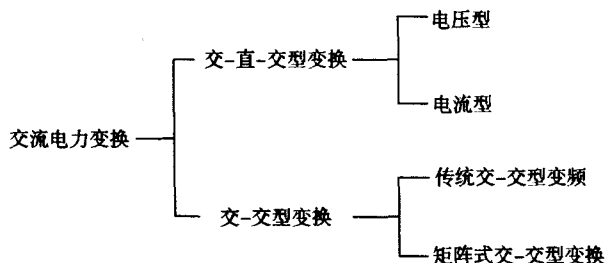


图 1-1 交流电力变换形式的分类

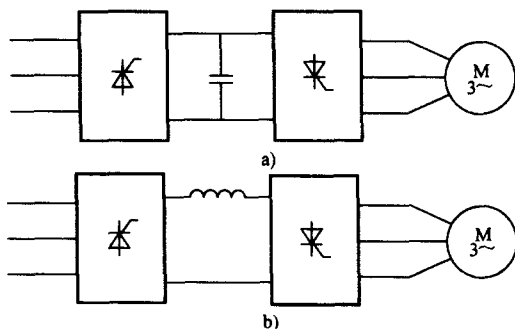


图 1-2 交-直-交变频器拓扑

a) 电压型 b) 电流型

现了变频,换流效率高,可以方便地实现四象限运行,而且低频时输出波形接近正弦波。然而,这种交-交变频电路也存在着诸多缺点:①使用晶闸管较多,接线复杂;②输出频率范围窄,只能为电网频率的 $1/3 \sim 1/2$;③由于采用相控整流,功率因数低。因此,传统的交-交变频电路只能用于大容量低速重载调速场合,如破碎机、水泥球磨机、卷扬机、矿井提升机和轧机等传动系统中。

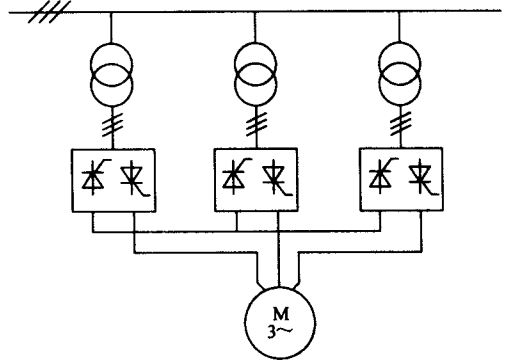


图 1-3 传统三相交-交变频电路

为了解决传统的交-交电力变换器存在的功率因数低、谐波污染严

重等问题,进一步改善交流电动机调速系统的运行性能,扩大并加深交流传动在工业自动化领域的应用,矩阵式变换器作为现有交-直-交型 PWM 变频器和传统交-交变频电路的一种补充和替代技术,被推上了变频调速发展的历史舞台。由于自身结构的特点,矩阵式变换器具有一系列优点:能量双向流通,可实现四象限运行;正弦输入/输出电流;对任意负载输入功率因数为 1;不需要直流储能元件等。因此可以说,矩阵式变换器技术的提出是为了弥补交-直-交型变频器和传统交-交变频电路的不足。

矩阵式变换器这一技术,从 30 年前提出概念,到近 10 年间逐步成熟并实现商品化,得益于两个方面的技术进步:

1) 电力电子器件的不断进步,为矩阵式变换器的性能完善提供了物质保证。矩阵式变换器的开关调制过程相对比较复杂。为了实现正弦的输入/输出电流以及可调的输入功率因数,必须采用高频脉宽调制 (PWM) 技术。新型的可关断器件,如双极结型晶体管 (BJT)、金属氧化物半导体场效应晶体管 (MOSFET)、绝缘栅双极型晶体管 (IGBT)、集成门极换流晶闸管 (IGCT) 均可以用于构成矩阵式变换器。特别是近年来出现的逆阻式 IGBT (Reverse Blocking IGBT, RB-IGBT),它不仅具有输入阻抗高、开关速度快、通态电压低、阻断电压高、承受电流大等优点,而且具有反向阻断的能力,可承受接近于正向阻断电压的反向阻断电压,非常适合于构成矩阵式变换器中的双向开关。RB-IGBT 的出现,有力地推动了矩阵式变换器的产品化进程。最近,已有学者开始采用性能更为先进的碳化硅 (SiC) 器件作为矩阵式变换器的开关器件。目前电力电子器件正向高压、大功率、高频化、组合化和智能化方向发展。相信在不久的将来,还会出现更适用于矩阵式变换器的、具有双向导通和双向阻断能力的电力电子器件。

2) 高性能微电子控制技术的发展,使得矩阵式各种先进的调制策略、换流方式以及保护措施得以实现。随着微电子技术的发展,数字式控制处理芯片的运算能力和可靠性得到了很大的提高,这使得以微处理器为控制核心的全数字化控制系统取代以前的模拟器件控制系统成为可能。微电子控制技术的主要体现在两个方面。一是微机控制电路,主要采用数字信号处理器(DSP)、精简指令集中央处理器(RISC CPU)、单片机等串行处理芯片或复杂可编程逻辑器件(CPLD)、现场可编程门阵列(FPGA)等并行处理芯片。对高性能运动控制系统来说,由于控制过程复杂,要求存储多种数据和快速实时处理大量的信息,可采用数字信号处理器(如TMS320、NEC 7720 DSP,等)加可编程逻辑器件(如Altera EPM9000 PLD,等)的方案,除实现复杂的控制规律外,也便于故障监视、诊断保护、人机对话等功能的实现。二是与计算机软件的结合,可用于数字仿真和计算机辅助设计。仿真时,如发现系统性能不理想,则可用人机对话的方式改变控制器的参数、结构以及算法,直到满意为止。这样得到的参数可直接加载到系统上,避免了实际调试的盲目性,并降低了发生事故的可能性。目前已有多种实用软件包,如Saber、Pspice、PSIM、MATLAB等,以及dSPACE、My-Way MATcoder等软硬件结合的仿真开发平台,均可用于控制系统的辅助设计。

近年来,电力电子变频装置正在朝着高压大功率、高功率因数、高频化、数字化方向发展,国内外许多公司研制的新型变频器,如多电平变换器、串并联谐振式变频器也已开始进入实用阶段。而随着技术的不断成熟以及成本的逐步下降,矩阵式变换器也将在交流变频调速领域中占有自己一席之地。

1.2 矩阵式变换器的分类和特点

1.2.1 矩阵式变换器的基本概念与分类

矩阵式变换器(MC)是一种基于双向开关并采用脉宽调制得到期望输出电压的电力变换装置,可以产生交流或直流电压。

狭义的矩阵式变换器仅指普通三相-三相矩阵式变换器。这种电路拓扑应用面广,是被研究得最早也是最多的一种矩阵式电力变换形式。如图1-4所示,普通三相-三相矩阵式变换器由9个双向开关(S_{ij} , $i = A, B, C$; $j =$

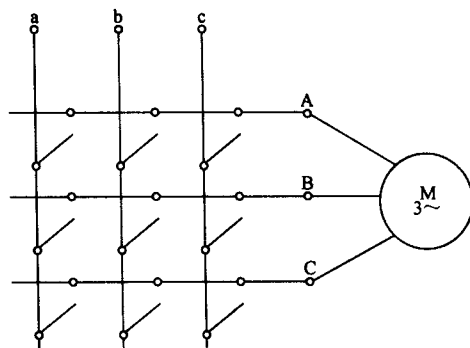


图 1-4 普通三相-三相矩阵式变换器拓扑

a, b, c) 组成, 每个双向开关均具有双向导通和双向关断的功能。9 个双向开关按照 3×3 的矩阵进行排列, 通过双向开关的导通与关断, 三相交流输入中的任意一相可以直接连接至三相交流输出中的任意一相。矩阵式变换器的输入侧还需要三相电感电容 (LC) 滤波器, 以滤除输入电流中由开关动作引起的高频谐波。图中, M 表示作为矩阵式变换器负载的异步电动机。

由于普通三相-三相矩阵式变换器自身结构的特点, 它具有很多优于传统交流电力变换装置的特性, 如:

- 1) 电能的直接双向流通, 可以实现真正的四象限运行;
- 2) 输入与输出电流波形均为正弦波, 谐波含量少;
- 3) 对任意负载均可实现输入侧功率因数为 1;
- 4) 不需要作为直流储能环节的电感或电容, 电路结构紧凑, 体积小。

本书中, 将主要介绍这种普通三相-三相矩阵式变换器的原理、控制及应用。

广义的矩阵式变换器概念包括 M 相- N 相变换的各类拓扑, 目前研究较多的有间接型三相-三相矩阵式变换器、三相-单相矩阵式变换器、单相-单相矩阵式变换器等, 如图 1-5 所示。间接型三相-三相矩阵式变换器由整流级电路和逆变级电路两部分组成, 与传统的交-直-交变频器不同的是, 中间环节不采用电容或电感等直流储能元件, 如图 1-6 所示。三相-单相矩阵式变换器是指输入侧为

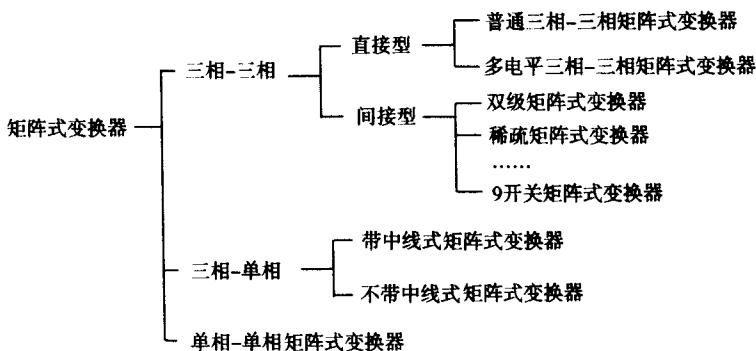


图 1-5 矩阵式变换器的分类

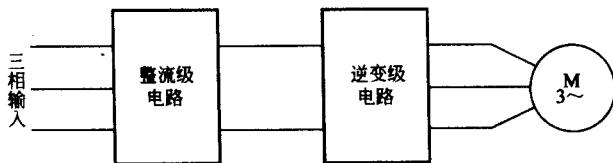


图 1-6 间接型矩阵式变换器基本结构

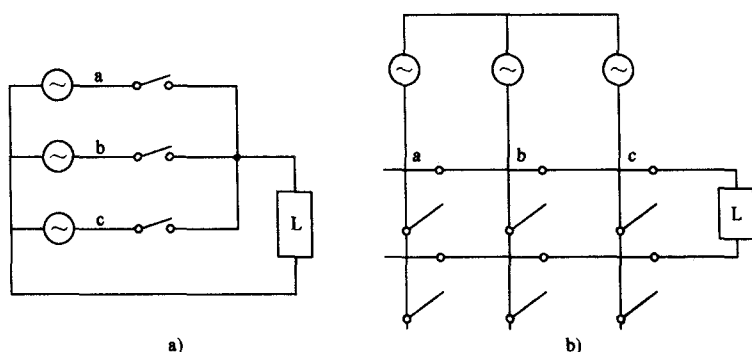


图 1-7 三相-单相矩阵式变换器基本拓扑
a) 带中线式 b) 不带中线式

三相交流电，而输出侧为单相负载的矩阵式电路拓扑，分为带中线式和不带中线式两种形式，如图 1-7 所示。单相-单相矩阵式变换器是指输入侧为单相交流电，而输出侧也为单相负载的矩阵式电路拓扑，如图 1-8 所示。本书第 9 章将详细介绍除普通三相-三相矩阵式变换器之外的其他各种矩阵式电力变换拓扑。

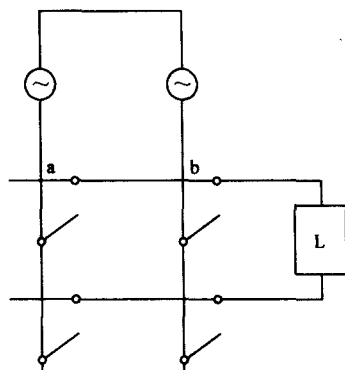


图 1-8 单相-单相矩阵式变换器拓扑

1.2.2 矩阵式变换器的研究历程

关于矩阵式变换器的研究从提出概念至今已有约 30 年，在调制策略、换流方式、器件开发等各项关键技术上都取得了长足的进步，其研究历程可由图 1-9 所示的简图来表示。

矩阵式变换器和双向开关的概念最早由 L. Gyugi 和 B. Pelly 于 1976 年提出^[3]，当时的设想是利用晶闸管和外部强制换流电路来实现双向开关的功能。用这种方法实现的变换器体积过大，并且不能获得令人满意的性能。

M. Venturini 和 A. Alesina 在 1980 年提出了用晶体管构成双向开关以实现矩阵式变换器的方案，并在此基础上，首次开发出了矩阵式变换器的样机，并取得了一系列有吸引力的结果^[4,5]。他们首次系统地给出了矩阵式变换器低频特性的数学分析，并且提出了“低频调制矩阵”的概念。同时，他们提出了一种矩阵式变换器的调制算法，被称为“直接传递函数”方法。在这种方法中，将矩阵