

三相变流器 调制与控制技术

SANXIANG BIANLIUQI TIAOZHI
YU KONGZHI JISHU

孙孝峰 王立乔 著



國防工業出版社

National Defense Industry Press

三相变流器 调制与控制技术

孙孝峰 王立乔 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

三相变流器调制与控制技术/孙孝峰,王立乔著—
北京:国防工业出版社,2010.1

ISBN 978-7-118-06529-9

I. ①三... II. ①孙... ②王... III. ①三相-变流器-
调制技术②三相-变流器-控制-技术 IV. ①TM46

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 183305 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 7 $\frac{3}{4}$ 字数 200 千字

2010 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 30.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

三相 PWM 变流器在电能变换中有着广泛的应用。目前供电系统多采用三相交流供电,一般要将电能进行功率变换以满足被控对象动静态性能指标的要求。传统的晶闸管相控变换技术在 AC/DC、DC/AC、AC/AC 等领域都有广泛而成熟的应用,但带来了电网的谐波污染与谐波振荡问题,引起电网电压波形失真,电网电压频繁波动,致使接在同一电网上的其他用电设备无法正常运行,降低负载功率因数,产生畸变损耗,降低装置效率,同时也对电网的安全运行构成了严重的威胁。

PWM 三相变流器的应用大大提高了三相能量变换的性能。应用 PWM 三相变流器有源电力可以实现无功补偿和谐波抑制,进而可以消除或减轻分布式系统中的谐波振荡;另一方面,三相 PWM 整流器取代晶闸管三相变流器,直接避免了三相变流器在电网侧产生谐波,控制有功及无功功率,并可进一步提高变流系统的动、静态性能。三相变流器在分布式系统并网发电中也得到了越来越多的应用。风力发电机组以及以直流电形式存在的太阳能光伏电池、燃料电池等分布式电源发出的电能须经一定的接口并网,采用电力电子逆变器的接口在体积、质量、变换效率、可靠性、电性能等方面均优于常规旋转电机接口。而在变频控制领域,三相 PWM 变流器已一统天下。

三相 PWM 变流器因使用领域、工况、容量等不同而有多种拓扑结构可以选择,这也关系到电能变换的效率和成本。在低压(380V、600/690V)电网中,主流拓扑是三相全桥两电平或三电平

变流器,而在中高压(3000V 以上)电网中,钳位式多电平、级联多电平变流器有着更广阔的应用天地。调制技术是三相变流器拓扑应用的基础,提高输出电压波形质量和动态性能是其控制的核心课题。作者在攻读学位及参加国家重点自然科学基金项目的过程中,对三相变流的调制和控制技术进行了深入的研究。作者在已有工作的基础上,总结了近年来在三相 PWM 变流领域所做的工作,完成了本书。在调制方面,介绍了主要的电压型及电流型的三相变流拓扑与调制技术,重点介绍了适于大功率电能变换的级联变流器的拓扑与调制。在控制方面,电流控制是有源整流和有源逆变的核心,同时,在无源逆变中可以作为内环以提高逆变性能。优化电流控制技术、 H_∞ 电流控制技术属于现代控制理论的范畴,在此一方面探讨其具体的实现形式与过程,另一方面为使熟悉常规根轨迹等控制工具的读者易于调整性能指标参数,也分析了性能指标与其根轨迹的关系;神经网络电流控制技术属于智能控制方法的范畴,其最大的特点是一旦确立了控制器的结构,参数不需要调整且具有良好的稳态性。在电压控制领域,重点分析了波形库控制、波形库与重复的复合控制技术。波形库控制是一种傻瓜式的控制方案,提出这种控制的目的是要降低控制设计的门槛,使变流器控制研发与工程调试变得更简单易行。在三相变流器的应用中,介绍了三相变流器分布式系统的并网控制。并网控制的核心内容是下垂控制功率调节,同时辅助实现电网的谐波电压控制。最后本书给出了三相变流器无源器件的参数设计。

作者在攻读学位期间参与了国家自然科学基金及其重点项目有:“新型高频中小功率逆变电源的拓扑与控制技术”、“GTO 整流逆变双向变流器控制研究”、“组合变流器相移 SPWM 技术研究”和“电流型多电平变流器拓扑和控制技术的研究”。在此书成书之际,向导师邬伟扬、张仲超老师致敬,不会忘记导师的谆谆教诲,感谢导师传递的志在千里、孜孜以求的精神。本书有关研究工作

得到了以下项目的支持资助:国家自然科学基金项目“基于波形库的电力电子波形控制技术”,国家自然科学基金项目“基于波形评估的可调载波脉宽调制研究”,国家自然科学基金重点项目“可再生能源的分布式发电系统能量变换、控制与并网运行研究”,以及河北省自然科学基金项目“独立运行微电网能量优化控制研究”。

本书第1章第1节、第3、4节,第4章、第5章、第6章、第7章、第8章作者为孙孝峰,第1章第2节,第2章、第3章作者为王立乔。研究生黎顺元、魏坤、王彬、孟令杰、李宁宁、冯林参与了研究工作。在本书撰写过程中,研究生彭晶、徐延伟、霍箭、张芳给予了帮助。

本书难免存在欠妥之处,欢迎读者批评指正,以使本书日臻完善。

燕山大学 孙孝峰

2009年7月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 三相变流器应用概述	1
1.2 三相变流器拓扑与调制策略	5
1.3 三相变流器常用控制策略	8
1.4 本书的内容	11
第 2 章 三相变流器调制技术	13
2.1 三相变流器的基本电路拓扑	13
2.1.1 三相电压型桥式变流器	14
2.1.2 三相电流型桥式变流器	15
2.1.3 两种三相桥式变流器拓扑的比较	16
2.2 正弦波脉宽调制技术	17
2.2.1 三相电压型桥式变流器的 SPWM 技术	18
2.2.2 三相电流型变流器的 SPWM 技术	19
2.3 空间矢量调制技术	23
2.3.1 SVM 基本原理	24
2.3.2 MSL-SVM 的频域调制模型	30
2.3.3 三相电流型桥式变流器的 SVM 技术	40
2.4 跟踪型 PWM 技术	42
2.4.1 滞环 PWM	42
2.4.2 单周期控制和定频积分控制	43
2.5 优化 PWM 技术	46
2.5.1 基本原理	47

2.5.2	开关角求解	48
第3章	大容量变流器拓扑及调制技术	51
3.1	电路结构	51
3.1.1	多重化变流器	52
3.1.2	多电平变流器	55
3.2	调制方式	69
3.2.1	阶梯波脉宽调制	69
3.2.2	多电平空间矢量调制	71
3.2.3	载波层叠 PWM	74
3.2.4	载波相移 PWM	86
第4章	三相变流器的数学模型	94
4.1	三相并网连接变流器的数学模型	94
4.1.1	三相变流器基本数学模型	95
4.1.2	两相坐标系下的数学模型	97
4.1.3	系统的小信号模型	100
4.1.4	双旋转坐标系模型	101
4.2	三相无源逆变器的数学模型	103
4.2.1	三相逆变器基本数学模型	103
4.2.2	三相逆变器解耦模型	106
4.2.3	三相逆变器在两相旋转坐标系中的模型	108
第5章	三相变流器电流控制技术	110
5.1	引言	110
5.2	模型解耦电流控制	112
5.3	线性二次型最优电流控制	115
5.3.1	最优控制理论	115
5.3.2	最优电流控制	116
5.3.3	性能指标与系统特性	120

5.3.4	最优控制鲁棒性分析	132
5.4	H_{∞} 电流控制	134
5.4.1	基本概念	134
5.4.2	系统数学模型扩展	135
5.4.3	H_{∞} 电流控制	136
5.5	三相变流器神经网络电流控制技术研究	138
5.5.1	神经网络控制	138
5.5.2	基于神经网络的直接电流控制	139
5.5.3	三相变流器神经网络电流控制研究	143
5.5.4	神经网络控制器实现与特性分析	150
第 6 章	三相变流器电压控制技术	157
6.1	无源逆变的波形库电压控制	157
6.1.1	波形库控制基本原理	157
6.1.2	三相逆变器的波形库控制	164
6.2	无源逆变器重复控制	172
6.2.1	内模控制与重复控制	172
6.2.2	重复控制系统的改进	174
6.3	基于波形库模型的重复控制	178
6.4	波形库与重复复合控制器	187
6.5	直流电压控制	189
6.5.1	最优电压环控制	190
6.5.2	波形库控制	193
第 7 章	分布式系统中的三相变流器并网控制	197
7.1	三相变流器电流型并网控制	197
7.1.1	传输线电感电流控制策略	197
7.1.2	基于滤波电感电流控制策略	198
7.2	电压型控制	199
7.3	三相变流器并网功率控制	200

7.4	分布式系统电压谐波抑制	205
7.4.1	分布式系统的谐波振荡	205
7.4.2	三相变流器谐波受控电流源并网应用	206
7.4.3	复合并网谐波控制应用示例	211
第 8 章	三相变流器参数设计	219
8.1	交流侧电感参数设计	219
8.1.1	变流器工作于 PFC 时的选取原则	219
8.1.2	变流器工作于 APF 时的选取原则	220
8.2	直流侧电容以及电压的选取原则	222
8.2.1	变流器作为 PFC 时的选取原则	222
8.2.2	变流器作为 APF 时的选取原则	223
8.3	变流器同时工作于 APF 和 PFC 时的参数选择 考虑	224
8.4	三相电压不平衡系统电容参数分析	225
8.4.1	脉动有功功率分析	225
8.4.2	电容选择与电压纹波	229
参考文献		232

第1章 绪 论

1.1 三相变流器应用概述

现代生产生活离不开电力开发与应用,电能变换越来越广泛,供电电源的电压、频率甚至波形都要进行变换以满足各种用电设备的需求。电能的合理变换可以为社会带来大量的经济效益,如风机水泵类负载在应用挡板、阀门进行调节时,电能利用率可能低于 50%,而通过变频调速,电能利用率可以达到 90%,全国这类负载的耗电约占 30%。

目前供电系统多采用三相交流(三相制)供电,一般要将电能进行功率变换以满足被控对象动静态性能指标的要求。三相供电系统 in 应用电力电子电路进行能量变换时,主要包含 AC/DC、DC/AC、AC/AC 等几种形式。传统的三相变流采用的是晶闸管相控变换技术,在以上等领域都有广泛而成熟的应用。三相变流器在电机调速、潮流控制、分布式电网接口等方面有着广泛的应用。电动机作为把电能转换为机械能的主要设备。国际上在 20 世纪 70 年代就开始实现交流调速高压、大容量、小型化,且逐渐替代了大部分传统的直流电动机应用领域。目前交流电力拖动系统静、动特性均可以与直流电动机拖动系统相媲美。通过三相变频器实现异步电机变频调速,转差功率只包含有转子铜损,而且无论转速高低,转差功率基本不变,效率高,同时可以构成高动态性能的交流调速系统,取代直流调速。应用三相变流器可实现同步电动机变压变频调速,同步电动机的发展为三相变流器的应用提供了更广泛的天地。

随着电力系统中的非线性负载比重不断增加,电流和电压波形产生周期性畸变,电路中大量的高次谐波注入公用电网,引起电网电压波形失真,电网电压频繁波动,致使接在同一电网上的其他用电设备无法正常运行,降低负载功率因数,产生畸变损耗,降低装置效率,同时也对电网的安全运行构成了严重的威胁。电网中的谐波主要是由各种大容量变流设备以及其他非线性负载产生的。晶闸管相关设备迅猛增长在提高系统性能的同时给电网带来了谐波污染。为实现功率因数校正和供给无功功率而大量增加使用并联电容器,并联电容器以谐振的方式加重了谐波问题。此外,一些铁磁非线性设备,如发电机、变压器及铁磁谐振设备等也是不可忽视的谐波源。

电力系统的用电负载中,感性负载占有很大的比例,它们的正常运行在消耗有功功率的同时,需要大量的无功功率。电网中有功功率的波动一般对电网电压的影响较小,电网电压波动主要是由无功功率的波动引起的。电动机在起动期间功率因数很低,这种冲击性无功功率会使电网电压剧烈波动,甚至使接在同一电网上的用户无法正常工作。电弧炉、轧钢机等大型设备会产生频繁的无功功率冲击,严重影响电网供电质量。为了消除、抑制谐波及无功功率,提高电能利用率,必须根据用电设备的要求采用电力电子技术对电能进行变换。从 20 世纪 80 年代开始已提出一系列谐波限制标准,如国际电工委员会(IEC)对于输入电流 $\geq 16\text{A}$ 的设备制订了国际标准 IEC1000 - 3 - 2,另外还有 IEC555 - 2、IEEE519 等标准,对电力电子和电器设备的电流谐波进行了限制。我国从 1994 年开始执行国标 GB/T 14549—93《电能质量公用电网谐波》。

目前,解决谐波污染问题的思路有两种:一是设置滤波器补偿已产生的谐波;二是采用功率因数校正技术(PFC),对电力电子装置本身进行改进,使其在电网输入侧不产生谐波,并使功率因数接近于 1。传统的抑制谐波的方法是使用 LC 无源电力滤波器(PPF),结构简单、成本较低,吸收特定次谐波效果显著。

但是,PPF 只能抑制按设计要求规定的谐波成分,在谐波成分较多的情况下,必须同时加入多个滤波器,使整个滤波装置的成本和体积增加;另外 LC 滤波器的补偿特性受电网阻抗和运行状态的影响,易和系统发生并联谐振,导致谐波放大,使 LC 滤波器过载甚至烧毁。尽管如此,LC 滤波器仍是当前补偿谐波的主要手段。

早期的无功功率补偿装置的典型代表是同步调相机,相对成本较高,目前较少使用。现在广泛采用的并联电容器补偿无功功率的方法,其成本较低,但是这种方法只能补偿固定的无功功率,在系统有谐波时,还有可能发生并联谐振,使谐波放大,从而烧毁电容器。静止无功补偿装置(SVC)在近年来获得了很大发展,已被广泛用于电力系统。其典型代表是固定电容器+晶闸管控制电抗器(FC+TCR)。晶闸管投切电容器(TSC)也获得了广泛地应用。比 SVC 更先进的现代补偿装置是静止无功发生器(SVG),SVG 在其直流侧只需要较小容量的储能电容。SVG 既可发出无功功率,也可吸收无功功率。采用多重化或 PWM 控制技术,可以使其输出电流谐波成分较小,将电网电流补偿为近似正弦波形。

PWM 三相变流器取代晶闸管三相变流器,可以进一步提高三相变流器的动静态性能,实现谐波抑制或无功补偿。PWM 电压型三相变流器可以实现低谐波、功率因数可控的 AC/DC 电能变换及有源电力滤波(APF)。APF 的基本思想在 20 世纪六七十年代就已经形成,该技术是从补偿对象中检测出谐波,由补偿装置产生一个与该谐波大小相等而极性相反的补偿电流,使电网电流只含基波分量。80 年代以来,随着 PWM 控制技术的发展,对 APF 的研究开始活跃并快速发展起来。H. Akagi 等人提出三相电路的瞬时无功功率理论对 APF 的快速发展起到了极大的推动作用,并使之走向工业实用化。

根据三相电压型变流器接入电网的方式,APF 可以分为两大类:并联型和串联型。并联电压型 APF 与负载并联接入电网,主

要适用于电流型负载的谐波和无功电流的补偿;串联电压型 APF 与负载串联接入电网,主要用于消除电压型谐波源对系统的影响。随着 APF 的发展,为了尽量发挥其特长,提高性能和减小容量,出现了混合型的 APF,如 APF 和 LC 无源滤波器构成的并联混合式系统、组合式并联混合系统、APF 和 LC 无源滤波器构成的串联混合系统,不同的组合使系统在某些方面有特色,但这些组合受到组合复杂度及成本的制约。目前,国内外常用的多为由 APF 和 LC 无源滤波器构成的混合式系统,这种组合结构简单、易于控制。将并联型和串联型 APF 结合起来使用的混合 APF 又称为统一电能质量调节器(UPQC),可兼有并联型和串联型 APF 的功能。在 UPQC 系统中,并联型 APF 主要进行谐波和无功功率的补偿,它同时还用于调节直流电容上的电压。串联型 APF 的主要作用是对电力系统和负载之间的谐波起隔离作用并在电源电压波动时对电压进行调节,同时可防止电力系统的内阻抗和无源滤波器之间发生谐振。

应用三相变换器可以实现系统潮流控制(UPFC)。UPFC 由两个三相变流器构成,由直流电容母线对两个变流器进行连接。工作中与母线串联的三相变流器通过变压器为母线提供一个可控电压源,对系统无功功率、有功功率进行调节;与电网并联的三相变流器则通过变压器向母线提供一个可控电流源,在母线上吸收、释放有功功率及无功功率,一方面维持母线电压平衡,另一方面对系统无功进行调节。UPFC 主要的功能是独立控制有功功率与无功功率,实现并联补偿、串联补偿、相角调节或是相应的多重功能。应用 UPFC 可以控制线路电压、阻抗和相位,具有改善系统特性、减少维护、设备集中化和简单调度的优点。

三相变流器也是分布式电网的接口电路。同步风能发电机可将频率电压不稳定的三相电整流后经三相变流器逆变为频率电压稳定的三相电能,为独立负载供电或并网;异步风能发电机多通过双 PWM 三相变流器组进行双馈调节,以控制输出频率、电压。大功率光伏发电也需要三相变换器作为并网的接口。

1.2 三相变流器拓扑与调制策略

三相电压型可逆变流器可实现交流电流跟踪控制,得到稳定的直流输出,实现能量的双向流动(可逆)。三相电压型可逆变流器拓扑应用最为广泛。电流型变流器,其结构特点是可实现交流输入电流跟踪控制,有效降低谐波成分,可应用各种成熟的 PWM 控制技术,对开关的频率要求不高,缺点是输入电流不连续时输出直流电压脉动大,本书内容均以电压型变换器为主。其他衍生三相拓扑形式也较多,如四开关结构、三相四线制结构、双向 buck 结构、四桥臂双向 buck 结构、矩阵式 buck-boost 结构等。三相变流器的功率等级已经达到 MW 级,这是三相变流器容量的极限。由于到目前为止,尚未出现能够在功率等级上达到晶闸管容量的全控型器件,因此,上述各种拓扑结构不适用于更大容量的场合。解决全控型器件在大功率场合中应用的问题,有两种常用的解决思路。一种是将多个器件串、并联在一起当做单个器件使用,以适应容量的要求;另一种是将多个基本逆变器单元串、并联在一起,以达到提升功率等级的目的。

将器件串、并联使用,是满足系统容量要求的一个简单直观的办法。串、并联在一起的各个器件,被当做单个器件使用,其控制也是完全相同的;这样做虽然能够达到容量要求,但由于各器件本身的特性不可能完全相同,会导致各器件的电压、电流不均衡,严重时造成器件损坏甚至控制失败,因此,其关键技术是串联均压、并联均流问题。

提高电力电子装置功率等级的方法,除了将功率器件串、并联使用以外,还可以将变流电路作为基本单元,将多个逆变器单元模块串、并联应用,也就是所谓多重化逆变器结构。多重化逆变器结构是将多个逆变器单元在交流侧进行串、并联。大多数多重化逆变器结构需要通过变压器或电抗器实现逆变器单元间的连接。变压器的体积、价格和效率阻碍多重化逆变器的功率等级提升。为

了解决上述问题,必须采用新型电路拓扑,多电平逆变器应运而生。多电平变流器的拓扑结构层出不穷,至今仍是研究热点。

传统的晶闸管逆变器采用工频方波控制,交流侧通过低通滤波器输出正弦波电压;利用滤波电路中电感、电容器件的谐振,实现晶闸管的自然关断。由于方波电压的谐波成分尤其是低次谐波成分丰富,因此,采用方波控制方式时,其滤波器的截止频率要非常低;为了达到这一目的,必须提高滤波器的阶数。显而易见,采用这种控制方式时,滤波器的体积、效率和成本将成为影响逆变电路功率等级、输出电压品质的关键因素。

为了解决上述问题,出现了将无线通信领域中的脉宽调制(Pulsewidth Modulation, PWM)技术应用于电力开关变换器的思想。A. Schonung 于 1964 年发表的“具有谐波抑制的静止频率变换及其在可逆交流变速驱动电源中的应用”是目前所能知道的有关这方面的最早期文献。目前较为流行的 PWM 技术主要有正弦 PWM(Sinusoidal PWM, SPWM)技术、定次谐波消除 PWM 技术和空间矢量调制(Space Vector Modulation, SVM)技术等。这些 PWM 技术各有特点,在不同的应用场合发挥不同的优势。

SPWM 技术由于原理简单,实现容易,具有良好的谐波抑制功能,迅速成为全控型正弦波逆变电路中最重要开关调制技术,其地位一直保持到现在。SPWM 技术本身也并非是一成不变的。早期的 SPWM 只有双极性调制一种调制策略。后来,在电压型单相全桥逆变电路中,又出现了单极性 SPWM 和倍频式 SPWM 两种谐波抑制效果更好的开关调制策略。在高频电压型单相全桥逆变电路中,单极性 SPWM 的器件总开关频率(4 个开关器件总开关频率之和)只有双极性 SPWM 的 $1/2$,其谐波特性比双极性 SPWM 更好。倍频式 SPWM 的器件总开关频率与双极性 SPWM 相等,但其等效开关频率却是双极性 SPWM 的一倍。对于电流型正弦波逆变器,由于其开关器件的单相导电性以及直流侧大电感的存在,在使用常规双极性 SPWM 时会遇到换相困难的问题,因而必须采用新的调制方法。20 世纪 90 年代初期,加拿大 McGill 大学的 Ooi

教授及其研究组给出了适用于三相电流型 AC/DC 变流器的三逻辑 SPWM 策略。三逻辑 SPWM 策略同样适用于电流型逆变电路。SPWM 技术虽然具有非常优秀的谐波品质和良好的输入输出线性度,但由于其对开关频率的要求较高,因而在大功率场合往往不能使用。同样是 20 世纪 90 年代初期,先后出现了组合变流器载波相移 SPWM 技术和基于载波组的多电平 SPWM 技术,使得 SPWM 技术在大功率电力电子变流电路的应用成为了现实。应该说,从那时起,SPWM 技术已经在所有功率等级的电力电子变流电路中都得到了充分的应用。SPWM 的调制算法最初只有自然采样法和对称规则采样法。后来又出现了不对称规则采样法。规则采样法用阶梯波代替正弦波进行调制,简化了调制算法,对数字化 SPWM 技术的发展起到了重大的作用。但阶梯波并不能准确地逼近正弦波,因而又出现了割线法 SPWM 和切线法 SPWM 等新型 SPWM 技术。对 SPWM 技术调制算法的研究直到现在仍然是重要的研究课题。

定次谐波消除法 PWM (Selected Harmonic Elimination PWM, SHEPWM) 技术是一种优化 PWM 技术,但由于其追求谐波消除的目的和方法与 SPWM 近似,因而常常将 SHEPWM 也算做 SPWM 的一种。SPWM 的直流电压利用率较低,为解决这一问题又出现了谐波注入式 SPWM (Harmonic Insert SPWM, HISPWM)。HISPWM 是在常规正弦调制波的基础上,加入 3 以及 3 的倍数次谐波,以达到提高电压利用率的目的。HISPWM 的最优叠加模式实际上与下面介绍的空间矢量调制 (Space Vector Modulation, SVM) 等价。

无源逆变电路最常见的应用场合是交流调速变频器。SPWM 控制主要着眼于使逆变器输出电压尽量接近正弦波,对电流波形一般只能采取间接控制。而交流电机则需要输入电流尽量接近正弦波,从而在空间上形成圆形旋转磁场,产生稳定的电磁转矩。如果对准这一目标,按照跟踪圆形磁场来控制 PWM 电压,那么控制效果就会更直接,这就是“磁链跟踪控制”的基本思想。磁链的轨迹是靠电压空间矢量相加得到的,所以这种方法又叫做“电压空