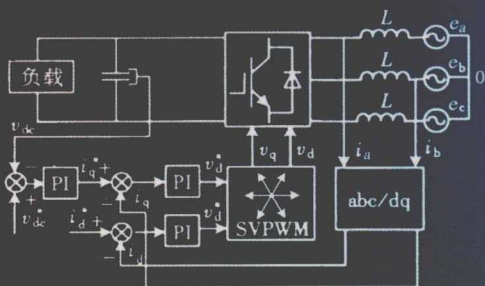


“十二五” 国家重点图书出版规划项目

电力电子

新技术系列图书

New Technology Series in
Power Electronics



张兴 张崇巍 编著

PWM整流器



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

PWM 整流器以其优良的性能和潜在的优势正在广泛地应用, 已成为电力电子技术研究的热点。本书以电压型 PWM 整流器为主, 兼顾电流型 PWM 整流器, 对 PWM 整流器的基本原理、数学建模、特性分析、控制策略和系统设计等进行了系统阐述, 同时结合现代控制理论对 PWM 整流器在若干领域中的具体应用进行了介绍。

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, 也可作为大专院校有关专业教师、研究生和学生的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

PWM 整流器及其控制/张兴, 张崇巍编著. —北京: 机械工业出版社, 2012. 2

“十二五”国家重点图书出版规划项目

(电力电子新技术系列图书)

ISBN 978-7-111-36822-9

I. ①P… II. ①张…②张… III. ①整流器 IV. ①TM461

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 263231 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 罗 莉 责任校对: 申春香

封面设计: 马精明 责任印制: 杨 曦

北京中兴印刷有限公司印刷

2012 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 32.5 印张 · 633 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-36822-9

定价: 69.80 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010)88361066

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售一部: (010)68326294

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售二部: (010)88379649

读者购书热线: (010)88379203

封面无防伪标均为盗版

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

电力电子技术是现代电工技术中最活跃的领域，并且在电力系统中得到日益广泛的应用。电力电子技术根据用电场合而改变电能的应用方式，即所谓“变流”，使得电能的应用更好地满足人们的需求，并通过功能和性能的提高，产生经济效益和社会效益。因此，电力电子技术又被认为是电能应用的优化技术。

除了线性功率放大的场合，电力电子装置中的功率器件大多工作于开关状态，这种电力电子装置不加控制的扩大应用，带来的一个副作用就是电网的“污染”。例如传统的二极管整流器和晶闸管相控整流器，其运行过程中，网侧电流均含有大量谐波，且总的功率因数较低，大量应用所导致的电磁兼容问题可能会造成严重的后果，因此必须加以限制。

环保意识的提高，促使人们在电力电子技术的发展中探索一条“绿色”之路。对变流装置而言，“绿色”的内涵应包括电网无谐波污染、单位功率因数，以及功率控制系统的高性能、高稳定性、高效率等传统变流装置所不具备的优越性能。

“绿色”电能变换的需求呼唤着电力电子技术的发展，而电力电子技术的发展又促进了“绿色”电能变换的实现。PWM 整流器作为各种电力电子应用系统与电网的接口，其发展方向是将变流技术与微电子技术和自动控制技术相融合，已成为电力电子技术发展中的热点和亮点。

PWM 控制技术的应用与发展为整流器性能的改进提供了变革性的思路 and 手段，结合了 PWM 控制技术的新型整流器称为 PWM 整流器。经过多年的研究与探索，PWM 控制技术已成功应用于整流器的设计中，使整流器获得了前所未有的优良性能。

与传统的整流器相比，PWM 整流器不仅获得了可控的 AC/DC 变换性能，而且可实现网侧单位功率因数和正弦波电流控制，甚至能使电能双向传输。一般称电能可双向传输的 PWM 整流器为可逆 PWM 整流器。由于可逆 PWM 整流器不仅体现出 PWM AC/DC 变流特性（整流），而且还可呈现出 PWM DC/AC 变流特性（有源逆变），因而确切地说，可逆 PWM 整流器实际上是一种新型的可四象限运行的变流器。本书的研究对象即为可逆 PWM 整流器，简称为 PWM 整流器。

随着 PWM 控制技术的发展和空间矢量 PWM (SVPWM)、滞环电流 PWM 控制等方案的提出，以及现代控制理论和智能控制技术的发展和运用，PWM 整流器的性能得到了不断提高，功能也不断扩展。PWM 整流器网侧独特的受控电

流源特性,使得 PWM 整流器作为核心被广泛应用于各类电力电子应用系统中,这些应用系统主要有:

- (1) 功率因数校正 (Power Factor Corrector—PFC);
- (2) 静止无功补偿 (Static Var Compensator—SVC);
- (3) 有源电力滤波 (Active Power Filter—APF);
- (4) 统一潮流控制器 (Unified Power Flow Controller—UPFC);
- (5) 超导储能 (Superconducting Magnetic Energy Storage—SMES);
- (6) 高压直流输电 (High Voltage Direct Current Transmission—HVDC);
- (7) 可再生能源并网发电;
- (8) 交直流电气传动。

PWM 整流器及其控制技术以其广泛而重要的应用前景,近年来备受学术界的关注,已有大量的研究报告陆续发表。这些研究报告从各方面对 PWM 整流技术展开研究,从而有力推动了 PWM 整流器应用技术的发展。为了便于相关学科和科研技术人员了解和参与这一领域的研究和掌握 PWM 整流技术,本书作者在多年从事电力电子与电气传动技术基础上,参阅了大量的国内外相关文献,特别是总结了作者近年来从事 PWM 整流器及其控制技术研究科研成果及心得体会,编写了这本《PWM 整流器及其控制》,目的在于抛砖引玉,促进 PWM 整流器技术在我国的发展。

本书较为系统和全面地论述了电压型、电流型 PWM 整流器的拓扑结构、工作原理、数学建模、控制系统设计等。另外,本书还特别将现代控制理论(如最优控制、滑模控制、非线性解耦控制等)与实际的应用相结合,介绍了 PWM 整流器技术在电力电子各相关领域的应用。

本书由合肥工业大学张兴教授、张崇巍教授合作编著。其中,张兴教授编写了全书大纲、前言以及第3章~第9章,张崇巍教授编写了第1章、第2章和第10章,全书由张兴教授、张崇巍教授统稿。

在本书的编写过程中,得到了西安交通大学王兆安教授,阳光电源股份有限公司董事长曹仁贤研究员,合肥工业大学丁明教授、杜少武教授,中国科学院合肥物质研究院等离子所刘正之研究员的关心与指导;也得到了合肥工业大学李维华副教授、杨淑英副教授、谢震副教授、王付胜副教授和刘芳博士以及阳光电源股份有限公司屠运武研究员、赵为博士、余勇博士、张友全经理等的大力协助,他们以读者的视觉提出了很多宝贵意见和建议,并提供了大量有价值的参考文献和相关资料。另外,研究生刘淳、余畅舟、李飞、朱德斌、鲁力、郝木凯、董文杰、卢磊、金晨璐、乔彩霞、石荣亮、陈晓静、施洋洋等参与了文献整理、文档修订与绘图等工作,在此一并向他们表示衷心的感谢。在本书的编写过程中,我们参阅了大量的论著与文献,主要部分已列入了参考文献中,在此也对参考文献

的作者表示衷心的感谢。

与本书有关的研究工作得到了以下课题的支持：

(1) 科技部西部新能源行动专项 (030403B2)：大功率太阳能光伏并网发电系统；

(2) 科技部“十五”科技攻关 (2004BA410A18)：并网光伏发电用系列逆变器的产业化开发；

(3) 安徽省省科技攻关 (0601202020A)：大型光伏并网发电系统及关键技术；

(4) 国家自然科学基金重点项目 (50837001)：分布式发电微网系统运行控制与保护关键技术研究；

(5) 国家 863 高技术基金项目 (2007AA05Z240)：多能互补微型电网的并网、控制和能量管理技术；

(6) 国家 863 高技术基金项目 (2008AA05Z409)：中小功率风机并网变流器及控制技术；

(7) 国家“十一五”科技支撑项目 (2006BAA01A20)：大功率直驱式风电机组控制系统及变流器的研制；

(8) 国家“十一五”科技支撑项目 (2006BAA01A18)：双馈式风电机组大功率双向变流器及控制技术开发；

(9) 自然科学基金面上项目 (51077034)：风机变流器电网适应性的实验室模拟与控制；

(10) 自然科学基金青年基金项目 (51107025) 双馈型风电变流器低电压穿越柔性拓扑及控制策略的研究。

在此一并向上述项目的资助单位致以衷心的感谢。

感谢电力电子新技术系列图书编委会和机械工业出版社对本书写作的指导和支持。

由于作者水平有限，疏漏甚至谬误在所难免，敬请读者不吝指教。

作 者

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 PWM 整流器概述	1
1.2 PWM 整流器研究概况	5
1.3 本书内容概述	11
第 2 章 PWM 整流器的拓扑结构及原理	14
2.1 基本原理及分类	14
2.1.1 PWM 整流器原理概述	14
2.1.2 PWM 整流器的分类及拓扑结构	16
2.2 电压型 PWM 整流器 (VSR) PWM 分析	20
2.2.1 单相 VSR PWM 分析	20
2.2.2 三相 VSR PWM 分析	32
2.3 电流型 PWM 整流器 (CSR) PWM 分析	38
2.3.1 单相 CSR PWM 分析	38
2.3.2 三相 CSR PWM 分析	44
第 3 章 电压型 PWM 整流器 (VSR)	49
3.1 三相 VSR 的建模及动、静态分析	49
3.1.1 三相 VSR 一般数学模型	49
3.1.2 三相 VSR dq 模型的建立	53
3.1.3 三相 VSR dq 模型的动、静态分析	65
3.2 三相 VSR 控制系统设计	88
3.2.1 电流内环控制系统设计	89
3.2.2 电压外环控制系统设计	97
3.2.3 VSR 交流侧电感的设计	106

3.2.4 VSR 直流侧电容的设计	112
第 4 章 VSR 电流控制技术	118
4.1 VSR 间接电流控制	118
4.1.1 三相 VSR 静态间接电流控制	119
4.1.2 三相 VSR 动态间接电流控制	128
4.2 VSR 直接电流控制	132
4.2.1 固定开关频率 PWM 电流控制	133
4.2.2 滞环 PWM 电流控制	143
4.3 影响三相 VSR 电流控制要素分析	163
4.3.1 三相 VSR 网侧电流的时域描述	163
4.3.2 PWM 开关死区的效应及影响	165
4.3.3 三相 VSR 直流电压对网侧电流波形的影响	168
4.4 VSR 输出直流分量和共模电流的抑制	172
4.4.1 VSR 输出直流分量的抑制	172
4.4.2 非隔离型 VSR 中共模电流的抑制	177
第 5 章 VSR 空间矢量 PWM (SVPWM) 控制	184
5.1 SVPWM 一般问题讨论	185
5.1.1 三相 VSR 空间电压矢量分布	185
5.1.2 空间电压矢量的合成	186
5.1.3 SVPWM 与 SPWM 控制的比较	190

5.1.4	VSR 空间电压矢量的几何描述	192	7.1	无交流电动势、电流传感器的三相 VSR 控制	287
5.2	三相 VSR 空间电压矢量 PWM (SVPWM) 控制	203	7.1.1	无交流电动势传感器的三相 VSR 控制	287
5.2.1	基于不定频滞环的 SVPWM 电流控制	203	7.1.2	无交流电流传感器的三相 VSR 控制	293
5.2.2	基于定频滞环的 SVPWM 电流控制	211	7.2	电网不平衡时的三相 VSR 控制	300
5.2.3	跟踪指令电压矢量的 SVPWM 电流控制	219	7.2.1	电网不平衡时的三相 VSR 基本问题	301
第 6 章	VSR 并网控制策略	225	7.2.2	电网不平衡时的三相 VSR 控制	311
6.1	VSR 并网控制概述	225	第 8 章	电流型 PWM 整流器 (CSR) 的建模及控制 ..	324
6.2	基于电流闭环的矢量控制策略	227	8.1	三相 CSR 建模	324
6.2.1	概述	227	8.1.1	三相 CSR 一般数学模型的建立	324
6.2.2	基于电网电压定向的矢量控制 (VOC)	228	8.1.2	三相 CSR dq 模型的建立	327
6.2.3	基于虚拟磁链定向的矢量控制 (VFOC)	230	8.1.3	三相 CSR dq 模型的改进	329
6.3	直接功率控制 (DPC)	235	8.2	三相 CSR dq 模型的动、静态分析	331
6.3.1	瞬时功率的计算	236	8.2.1	三相 CSR dq 等效电路描述	331
6.3.2	基于电压定向的直接功率控制 (V-DPC)	238	8.2.2	三相 CSR 静态特性分析 ..	336
6.3.3	基于虚拟磁链定向的直接功率控制 (VF-DPC)	248	8.2.3	三相 CSR 动态特性分析 ..	340
6.4	基于 LCL 滤波的 VSR 控制	254	8.3	三相 CSR PWM 信号发生技术	346
6.4.1	概述	254	8.3.1	三值逻辑 PWM 信号发生	346
6.4.2	无源阻尼法	256	8.3.2	三值逻辑空间矢量 PWM 信号发生	353
6.4.3	有源阻尼法	261	8.3.3	三相 CSR PWM 电流利用率讨论	357
6.4.4	基于 LCL 滤波的 VSR 中滤波器设计	272	8.3.4	低电压应力三值逻辑 PWM 信号发生	361
6.5	单相 VSR 的控制	281	8.4	电流型 PWM 整流器 (CSR)	
6.5.1	静止坐标系中单相 VSR 的控制	281			
6.5.2	同步旋转坐标系中单相 VSR 的控制	284			
第 7 章	三相 VSR 的其他控制策略	287			

控制系统设计	367	环方案	443
8.4.1 单相 CSR 控制系统设计	367	9.5 锁相环控制器参数的整定	449
8.4.2 三相 CSR 控制系统设计	379	第 10 章 PWM 整流器应用	451
8.4.3 三相 CSR 主电路参数 设计	392	10.1 高功率因数整流器 (HPFR)	451
第 9 章 PWM 整流器中的锁 相环技术	400	10.1.1 概述	451
9.1 锁相环技术概述	400	10.1.2 高功率因数整流器最优 控制	452
9.2 基本锁相环的结构与原理	403	10.2 静止无功发生器 (SVG)	458
9.2.1 过零鉴相法——基本开环 锁相法	403	10.2.1 概述	458
9.2.2 乘法鉴相法——基本闭环 锁相法	404	10.2.2 SVG 非线性解耦控制	460
9.3 三相锁相环技术	410	10.3 有源电力滤波器 (APF)	464
9.3.1 单同步坐标系软件锁 相环	411	10.3.1 概述	464
9.3.2 基于对称分量法的单同 步坐标系软件锁相环	418	10.3.2 谐波检测	465
9.3.3 基于双同步坐标系的解耦 软件锁相环	421	10.3.3 采用滑模控制的 APF 电流控制策略	467
9.3.4 基于双二阶广义积分器的 软件锁相环	429	10.4 统一潮流控制器 (UPFC)	472
9.4 单相软件锁相环技术	437	10.4.1 概述	472
9.4.1 基于单相变量的单相锁 相环方案	437	10.4.2 UPFC 控制系统设计	474
9.4.2 基于两相正交变量的单相锁相		10.5 可再生能源并网发电	478
		10.5.1 概述	478
		10.5.2 光伏并网逆变器及其 控制	480
		10.5.3 风力发电机并网及其 控制	488
		参考文献	494

第 1 章 绪 论

1.1 PWM 整流器概述

随着电力电子技术的发展,电力半导体开关器件性能不断提高,已从早期广泛使用的半控型电力半导体开关器件,如普通晶闸管(SCR)[⊖]发展到如今性能各异且类型诸多的全控型电力半导体开关器件,如双极型晶体管(BJT)、门极关断(GTO)晶闸管、绝缘栅双极型晶体管(IGBT)、集成门极换向晶闸管(IGCT)、电力场效应晶体管(MOSFET)以及场控晶闸管(MCT)等。而20世纪90年代发展起来的智能功率模块(IPM)则开创了电力半导体开关器件新的发展方向。电力半导体开关器件技术的进步,促进了电力电子变流装置技术的迅速发展,出现了以脉宽调制(PWM)控制为基础的各类变流装置,如变频器、逆变电源、高频开关电源以及各类特种变流器等,这些变流装置在国民经济各个领域取得了广泛的应用。但是,目前这些变流装置很大一部分需要整流环节,以获得直流电压,由于常规整流环节广泛采用了二极管不控整流电路或晶闸管相控整流电路,因而对电网注入了大量谐波及无功功率,造成了严重的电网“污染”。治理这种电网“污染”最根本的措施就是,要求变流装置实现网侧电流正弦化,且运行于单位功率因数。因此,作为电网主要“污染”源的整流器,首先受到了学术界的关注,并开展了大量研究工作^[1,2]。其主要思路就是,将PWM技术引入整流器的控制之中,使整流器网侧电流正弦化,且可运行于单位功率因数。根据能量是否可双向流动,派生出两类不同拓扑结构的PWM整流器,即可逆PWM整流器和不可逆PWM整流器。本书只讨论能量可双向流动的可逆PWM整流器及其控制策略,以下所称PWM整流器均指可逆PWM整流器。

能量可双向流动的PWM整流器不仅体现出AC/DC变流特性(整流),而且还可呈现出DC/AC变流特性(有源逆变),因而确切地说,这类PWM整流器实际上是一种新型的可逆PWM变流器。

经过几十年的研究与发展,PWM整流器技术已日趋成熟。PWM整流器主电路已从早期的半控型器件桥路发展到如今的全控型器件桥路;其拓扑结构已从单

⊖ SCR为硅可控整流器,是1957年美国通用电气公司命名的,后来国际电工委员会(IEC)将其正式定名为晶闸管(Thyristor),为方便起见,本书仍沿用SCR代表普通晶闸管。

相、三相电路发展到多相组合及多电平拓扑电路；PWM 开关控制由单纯的硬开关调制发展到软开关调制；功率等级从千瓦级发展到兆瓦级，而在主电路类型上，既有电压型整流器（Voltage Source Rectifier——VSR），也有电流型整流器（Current Source Rectifier——CSR），并且两者在工业上均成功地投入了应用。

由于 PWM 整流器实现了网侧电流正弦化，且运行于单位功率因数，甚至能量可双向传输，因而真正实现了“绿色电能变换”。由于 PWM 整流器网侧呈现出受控电流源特性，因而这一特性使 PWM 整流器及其控制技术获得进一步的发展和拓宽，并取得了更为广泛和更为重要的应用，如静止无功发生器（SVG）、有源电力滤波（APF）、统一潮流控制器（UPFC）、超导储能（SMES）、高压直流输电（HVDC）、电气传动（ED）、新型不间断电源（UPS）以及太阳能、风能等可再生能源的并网发电等，现分别简述如下。

1. 有源电力滤波（APF）及静止无功发生器（SVG）

图 1-1 示出了与 LC 滤波器混合的并联型有源电力滤波器主电路拓扑结构。它主要由无源 LC 环节和基于 PWM 整流器拓扑结构的有源滤波环节组成。

这种混合并联型有源电力滤波器利用 LC 滤波器以及有源滤波器共同起到电网的谐波抑制及无功补偿作用，从而有利于提高系统性能价格比。一般而言，希望 LC 滤波器承担大部分谐波和无功补偿的任务，而利用有源电力滤波器的作用改善系统性能，这样可在满足补偿要求的同时，大大降低了有源电力滤波器的容量，从而减少系统造价。

并联型有源电力滤波器网侧实质上可以看成是一个等效的可控电流源。它产生一个与被补偿量（谐波电流及无功电流）的量值相等，且相位相反的补偿电流，并注入电网，这样电网电流即获得所需功率因数角的正弦波电流，以达到有源滤波及无功补偿的目的。此时，系统既实现了对电网的有源滤波，同时也补偿了无功。

实际上，当基于 PWM 整流器拓扑结构的有源环节只向电网注入无功电流而不补偿谐波电流时，该有源环节相当于一个静止无功发生器（SVG）。

2. 统一潮流控制器（UPFC）

统一潮流控制器（UPFC）是柔性交流输电系统（FACTS）技术中最引人注目、最有应用前景的一种电力补偿装置。UPFC 用于输电网，主要起控制有功潮流和吞吐无功功率的作用，其主电路拓扑结构如图 1-2 所示。UPFC 主电路主要由串联变流器和并联变流器组合而成，其串联变流器通过变压器向电力网引入一

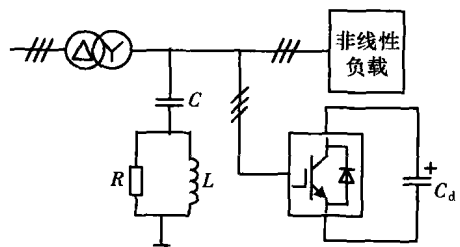


图 1-1 混合并联型有源电力滤波器（APF）拓扑结构

一个幅值可变、相位可任意调节的电压源，从而能对线路的有功、无功功率进行控制；而并联变流器则采用了 PWM 整流器拓扑结构，它通过变压器向电力网引入一个幅值可变、相位可任意调节的电流源，从而具有快速吞吐无功功率的能力，并联变流器的另一个主要作用是提供一个稳定的直流电压，以确保串、并联变流器的正常运行。

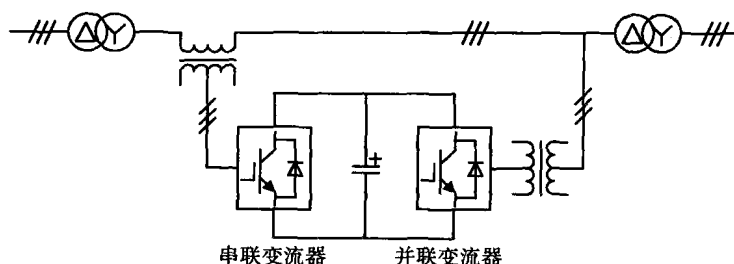


图 1-2 统一潮流控制器 (UPFC) 的拓扑结构

3. 超导储能 (SMES)

随着超导材料及应用技术的发展，超导储能的研究与应用引起了工程与学术界的关注。超导储能主要用于电力网的调峰控制以及其他需要短时补偿电能の場合。在电网用电量正常时，电网中的电能通过变流装置的超导线圈存储足够的能量，而当用电量很大（用电高峰）时，超导线圈中的能量则通过变流装置向电网馈能，从而起到调峰作用。超导储能 (SMES) 系统主电路拓扑结构如图 1-3 所示。

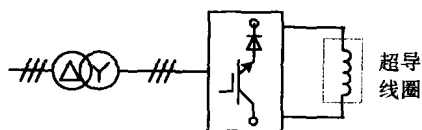


图 1-3 超导储能 (SMES) 系统主电路拓扑结构

一般而言，SMES 主电路常由电流型 PWM 整流器组成，将损耗极小的超导线圈串入

PWM 整流器直流侧，使其既是电流型 PWM 整流器的直流缓冲电感，又是其直流侧的负载线圈，这种设计简化了电流型 PWM 整流器主电路结构，并克服了常规电流型变流器损耗大的不足。

SMES 中的 PWM 整流器在使电能双向传输的同时，还可以利用其快速的电流响应解决电力系统中的一些问题，如切换低功率因数负载所引起的电压冲击和短时间的供电失败等。

4. 四象限交流电动机拖动系统

在常规的由电压型逆变器组成的交流电动机拖动系统中，为实现电动机的四象限运行，必须在逆变器直流侧加装耗能或馈能装置，这主要是由于常规的电压型逆变器交流电动机拖动系统采用了交-直-交拓扑结构，而整流环节大都采用二极管整流器，因而无法实现电能回馈，并且将给电网造成一定的谐波“污

染”。若将 PWM 整流器取代二极管整流器，不仅可实现交流电动机的四象限运行，以及网侧单位功率因数正弦波电流控制，还可使直流侧获得足够高且稳定的直流电压，从而改善了电动机的拖动性能。另一方面，通过引入适当的控制策略，还可以大大减少直流侧电容的容量，提高装置运行可靠性。四象限交流电动机拖动系统主电路拓扑结构如图 1-4 所示。

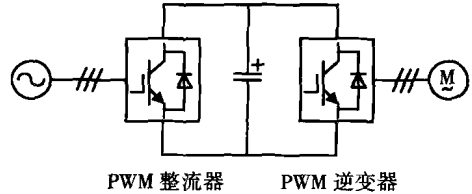


图 1-4 四象限交流电动机拖动系统的拓扑结构

5. 太阳能、风能等可再生能源的并网发电

太阳能、风能的大规模应用是 21 世纪人类社会发展的一个重要标志。然而要实现这一目标，首先必须完成太阳能、风能由补充能源向替代能源过渡，使太阳能、风能的利用由边远无电地区向有电地区的常规供电方向发展。这就要求开发性能优越的并网发电系统。

太阳能光伏并网发电将主要用于调峰电站以及屋顶光伏系统。目前美、日、德等发达国家已推出相应的屋顶光伏计划，仅美国预计 10 年内安装容量约为 3000MW。太阳能光伏并网发电系统拓扑结构如图 1-5 所示。

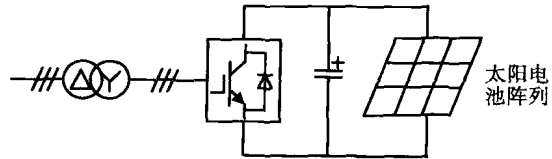


图 1-5 太阳能光伏并网发电系统的拓扑结构

太阳能光伏并网发电系统由太阳电池以及 PWM 整流器组成，PWM 整流器经过最大功率点寻优控制将太阳电池电能并入电网，并实现网侧单位功率因数正弦波控制。

风力发电机的并网发电，传统上常采用同步或异步发电机并网发电系统。同步发电系统需一套结构复杂的调速机构，以稳定发电机转子转速；而异步发电系统在发电的同时，需向电网吸取无功功率，或由自备电容器提供无功电能，并且发电机转速变化范围较小。若采用交-直-交型风力发电机并网发电系统，就能较好地克服同步、异步发电系统的不足，其拓扑结构如图 1-6 所示，图中采用了双 PWM 整流器结构。其中，风力发电机侧的 PWM 整流器控制风力发电机运行，且输出电流为正弦波，从而提高了风力发电机的运行效率。同时，通过发电机转矩的调节，以满足风力机的最大功率点运行；而网侧的 PWM 整流器则完成向电网的馈电控制，并实现网侧单位功率因数正弦波电流控制。

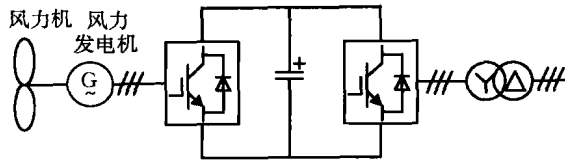


图 1-6 风力发电机并网发电系统的拓扑结构

1.2 PWM 整流器研究概况

PWM 整流器的研究始于 20 世纪 80 年代，这一时期由于自关断器件的日趋成熟及应用，推动了 PWM 技术的应用与研究。1982 年 Busse Alfred、Holtz Joachim 首先提出了基于可关断器件的三相全桥 PWM 整流器拓扑结构及其网侧电流幅相控制策略^[3]，并实现了电流型 PWM 整流器网侧单位功率因数正弦波电流控制。1984 年 Akagi Hirofumi 等提出了基于 PWM 整流器拓扑结构的无功补偿器控制策略^[4]，这实际上就是电压型 PWM 整流器早期设计思想。到 20 世纪 80 年代末，随着 A. W. Green 等人提出了基于坐标变换的 PWM 整流器连续、离散动态数学模型及控制策略，PWM 整流器的研究发展到一个新的高度^[5]。

自 20 世纪 90 年代以来，PWM 整流器一直是学术界关注和研究的热点。随着研究的深入，基于 PWM 整流器拓扑结构及控制的拓展，相关的应用研究也发展起来，如有源电力滤波器^[6]、超导储能^[7]、交流传动^[8]、高压直流输电^[9]以及统一潮流控制器^[10]等。这些应用技术的研究，又促进了 PWM 整流器及其控制技术的进步和完善。

这一时期 PWM 整流器的研究主要集中于以下几个方面：

- 1) PWM 整流器的建模与分析；
- 2) 电压型 PWM 整流器的电流控制；
- 3) 主电路拓扑结构研究；
- 4) 系统控制策略研究；
- 5) 电流型 PWM 整流器研究。

具体简述如下：

1. 关于 PWM 整流器的建模研究

PWM 整流器数学模型的研究是 PWM 整流器及其控制技术研究的基础。自 A. W. Green 等提出了基于坐标变换的 PWM 整流器连续、离散动态数学模型之后，各国学者以不同方法从各方面对 PWM 整流器的数学模型进行了深入仔细的研究，其中 R. Wu、S. B. Dewan^[11,12]等较为系统地建立了 PWM 整流器的时域模型，并将时域模型分解成高频、低频模型，且给出了相应的时域解。而 Chun

T. Rim 和 Dong Y. Hu 等则利用局部电路的 dq 坐标变换建立了 PWM 整流器基于变压器的低频等效模型电路^[13]，并给出了稳态、动态特性分析。在此基础上，Hengchun Mao 等人又建立了一种新颖的降阶小信号模型，从而简化了 PWM 整流器的数学模型及特性分析。^[14]

另外，Ma Hao、Mao Xingyun 等采用了混杂系统的建模^[15]，实现了 PWM 整流器的准确描述，并引入线性切换系统的稳定性判定法则，对 PWM 整流器的开关切换过程的稳定性进行了系统分析。

2. 关于电压型 PWM 整流器的电流控制策略研究

为了使电压型 PWM 整流器网侧呈现受控电流源特性，其网侧电流控制策略的研究显得十分重要。在 PWM 整流器技术发展过程中，电压型 PWM 整流器网侧电流控制策略主要分成两类：一类是由 J. W. Dixon 和 B. T. Ooi 首先提出的“间接电流控制”策略^[16]；另一类就是目前占主导地位的“直接电流控制”策略^[17,18]。“间接电流控制”实际上就是所谓的“幅相”电流控制，即通过控制电压型 PWM 整流器的交流侧电压基波幅值、相位，进而间接控制其网侧电流。由于“间接电流控制”其网侧电流的动态响应慢，且对系统参数变化灵敏，因此这种控制策略已逐步被“直接电流控制”策略所取代。“直接电流控制”策略以其快速的电流响应和鲁棒性受到了学术界的关注，并先后研究出各种不同的控制方案^[12,18,19]，主要包括以固定开关频率且采用电网电动势前馈的 SPWM 控制^[20]，以及以快速电流跟踪为特征的滞环电流控制^[21,22]等。为了提高电压利用率并降低损耗，基于空间矢量的 PWM 控制在电压型 PWM 整流器电流控制中取得了广泛应用，并先后提出了多种控制方案^[19,23,24]。目前，电压型 PWM 整流器网侧电流控制有将固定开关频率、滞环及空间矢量控制相结合的趋势^[25]，以使其在大功率有源滤波等需快速电流响应场合获得优越的性能。此外，在具体的控制策略上还相继提出了状态反馈控制^[17]等。

3. 关于 PWM 整流器拓扑结构的研究

就 PWM 整流器拓扑结构而言，可分为电流型和电压型两大类。而对于不同功率等级以及不同的用途，人们研究了各种不同的 PWM 整流器拓扑结构。在小功率应用场合，PWM 整流器拓扑结构的研究主要集中在减少功率开关管和改进直流输出性能上。J. J. Shieh 等对四开关三相电压型 PWM 整流器进行了建模与分析，并阐述了这类电路的工作特点^[26]。然而，一般的电压型 PWM 整流器为 Boost（升压）型变换器，正常工作时，其直流侧电压须高于交流侧电压峰值，那么如何利用电压型 PWM 整流器输出相对较低的直流电压呢？Ching - Tsai Pan 等学者对一般的 PWM 整流器拓扑结构进行改进，并取得了一定结果^[27,28]。对于大功率 PWM 整流器，其拓扑结构的研究主要集中在多电平拓扑结构^[29,30]、变流器组合^[31]以及软开关技术上^[32]。多电平拓扑结构的 PWM 整流器主要应用于高

压大容量场合。而对大电流应用场合，常采用变流器组合拓扑结构，即将独立的电流型 PWM 整流器进行并联组合。与普通并联不同的是，每个并联的 PWM 整流器中的 PWM 信号发生采用移相 PWM 控制技术^[33]，从而以较低的开关频率获得了等效的高开关频率控制，即在降低功率损耗的同时，有效地提高了 PWM 整流器的电流、电压波形品质。与此相似，也可将独立的电压型 PWM 整流器进行串联移相组合，以适应高压大容量的应用场合。此外，在大功率 PWM 整流器设计上，还研究了基于软开关 [零电压开关 (ZVS)、零电流开关 (ZCS)] 控制的拓扑结构和相应的控制策略，然而这一技术还有待进一步完善和改进。

4. PWM 整流器系统控制策略的研究

随着 PWM 整流器及其控制策略研究的深入，研究人员相继提出了一些较为新颖的系统控制策略，分述如下：

(1) 无电网电动势传感器及无网侧电流传感器控制 为进一步简化电压型 PWM 整流器的信号检测，Toshi Hiko Noguchi 等学者提出了一种无电网电动势传感器的 PWM 整流器控制策略。随后 B. H. Kwon 等人也提出了类似的研究报告^[34,35]。这一研究主要包括两类电网电动势的重构方案：其一是通过复功率的估计来重构电网电动势；其二是基于网侧电流偏差调节的电网电动势重构。前者是一种开环估计算法，因而准确度不高，并且在复功率估计算法中，由于含有微分项，因而容易引入干扰；而后者则是一种闭环估计算法，它采用网侧电流偏差的 PI 调节来控制电网电动势的重构误差，因而准确度较高。另外，M. Riese 则通过直流侧电流的检测来重构电压型逆变器的交流侧电流，从而为无交流电流传感器的 PWM 整流器研究奠定了基础^[36]。

(2) 基于 Lyapunov 稳定性理论的 PWM 整流器控制 针对具有非线性多变量耦合特性的电压型 PWM 整流器模型，常规的控制策略及其控制器设计一般采用稳态工作点小信号扰动线性化整定方案，这种方案不足之处在于无法保证控制系统大范围扰动的稳定性。为此，Hasan Komürçügil 等学者提出了基于 Lyapunov 稳定性理论的控制策略^[37]。这一新颖的控制方案以电感、电容储能的定量关系建立了 Lyapunov 函数，并由三相 PWM 整流器的 dq 模型以及相应的空间矢量 PWM 约束条件，推导出相关的控制算法。从相关实验结果来看，这一方案较好地解决了 PWM 整流器的大范围稳定控制问题。随后，Hasan Komürçügil 等又针对单相电压型 PWM 整流器的 Lyapunov 控制方案进行了系统研究^[38]。

(3) PWM 整流器的时间最优控制 常规的基于 dq 模型的电压型 PWM 整流器控制，一般通过前馈解耦控制，并采用两个独立的 PI 调节器，分别控制相应的有功、无功分量。而有功、无功分量间的动态耦合和 PWM 电压利用率的约束，影响了电压型 PWM 整流器有功分量（直流电压）的动态响应。针对这一问题，Jong - Woo choi 等学者利用最优控制理论，提出了确保直流电压响应的时

最优控制^[38]。其基本思路就是，根据时间最优控制算法求解出跟踪指令电流所需的最优控制电压，并在动态过程中降低相应无功分量的响应速度，从而有效地提高了有功分量（直流电压）的动态响应速度，实现了三相电压型 PWM 整流器直流电压的时间最优控制。

(4) 电网不平衡条件下的 PWM 整流器控制 在三相 PWM 整流器控制策略研究过程中，一般均假设三相电网是平衡的。而实际上，三相电网常处于不平衡状态，即三相电网电压的幅值、相位不对称。一旦电网不平衡，以三相电网平衡为约束所设计的 PWM 整流器就会出现不正常的运行状态，主要表现在：PWM 整流器直流侧电压和网侧电流的低次谐波幅值增大，且产生非特征谐波，同时损耗相应增大；PWM 整流器网侧电流亦不平衡，严重时可使 PWM 整流器发生故障，甚至烧坏装置。

为了使 PWM 整流器在电网不平衡条件下仍能正常运行，必须提出相应的控制策略。Luis Morán 等学者于 1992 年提出研究报告，分析并推导了三相电压型 PWM 整流器在三相电网不平衡条件下，网侧电流以及直流电压时域表达式^[39]。Luis Moran 等通过理论分析认为，电网负序分量是导致网侧电流畸变的原因；同时指出，电网不平衡条件下，常规的控制方案将使直流侧产生偶次谐波分量，且通过 PWM 控制，PWM 整流器交流侧会产生相应的奇次谐波，从而导致网侧电流畸变。然而，Luis Moran 并没有从控制策略上改进设计，而只是提出了电网不平衡条件下，电压型 PWM 整流器网侧电感、直流侧电容的设计准则。为此，D. Vincenti 等人较为系统地提出了正序 dq 坐标系中的前馈控制策略，即通过负序分量的前馈控制来抑制电网负序分量对 PWM 整流器控制的影响^[40]。但这一方案使正序 dq 坐标系中的负序基波分量呈现出 2 次谐波形式，显然，采用 PI 调节器无法获得负序基波分量的无静差控制，因此不能完全消除负序基波分量的影响。作为改进研究，Hong - Seok Song 等学者提出了一种采用正序、负序两套同步旋转坐标系的独立控制方案^[41]，该方案在各自的同步旋转坐标系中，将正序、负序基波分量均转换成直流分量，从而通过 PI 调节器即可实现无静差控制，因此这是一个理论上较为完善的控制方案。

该方法的主要不足在于当电网含有谐波时，为抑制电网电压谐波对其中锁相环信号的扰动，一般要设置低通滤波器，从而会减小系统控制带宽，影响其响应快速性。另外，上述方法一般均忽略了 PWM 整流器交流输出滤波电感消耗的瞬时功率，从而无法完全消除直流侧电压的 2 次谐波，为此 Suh 等分析了 PWM 整流器交流输出滤波电感上瞬时功率对输出电流指令计算的影响，提出了基于桥臂侧瞬时功率的指令电流计算方案^[42]。然而，由于桥臂侧瞬时功率的计算需要求解一组非线性方程，运算量较大，为此作为改进研究，Suh 等又提出了桥臂侧瞬时功率由电压调制波指令及并网电流进行计算的方法^[43]，并为改善动态响应，