

PWM 整流器 及其控制

张崇巍 张 兴 编著

电气自动化
新技术丛书



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

电气自动化新技术丛书

PWM 整流器及其控制

张崇巍 张 兴 编著



机械工业出版社

PWM 整流器以其优良的性能和潜在的优势将得到广泛的应用,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/张崇巍,张兴编著. —北京:机械工业出版社,2003.10

(电气自动化新技术丛书)

ISBN 7-111-12708-0

I. P… II. ①张… ②张… III. 整流器 IV TM461

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 064006 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:孙流芳 责任编辑:孙流芳

版式设计:张世琴 责任校对:申春香

封面设计:姚毅 责任印制:闫焱

北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2003 年 10 月第 1 版·第 1 次印刷

850mm×1168mm $1/32$ ·15.375 印张·410 千字

0 001—4 000 册

定价:28.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话(010) 68993821、88379646
封面无防伪标均为盗版

《电气自动化新技术丛书》

序 言

科学技术的发展，对于改变社会的生产面貌，推动人类文明向前发展，具有极其重要的意义。电气自动化技术是多种学科的交叉综合，特别在电力电子、微电子及计算机技术迅速发展的今天，电气自动化技术更是日新月异。毫无疑问，电气自动化技术必将在提高国民经济水平中发挥重要的作用。

为了帮助在经济建设第一线工作的工程技术人员能够及时熟悉和掌握电气自动化领域中的新技术，中国自动化学会电气自动化专业委员会和中国电工技术学会电控系统与装置专业委员会联合成立了《电气自动化新技术丛书》编辑委员会，负责组织编辑《电气自动化新技术丛书》。丛书将由机械工业出版社出版。

本丛书有如下特色：

一、本丛书是专题论著，选题内容新颖，反映电气自动化新技术的成就和应用经验，适应我国经济建设急需。

二、理论联系实际，重点在于指导如何正确运用理论解决实际问题。

三、内容深入浅出，条理清晰，语言通俗，文笔流畅，便于自学。

本丛书以工程技术人员为主要读者，也可供科研人员及大专院校师生参考。

编写出版《电气自动化新技术丛书》，对于我们是一种尝试，难免存在不少问题和缺点，希广大读者给予支持和帮助，并欢迎大家批评指正。

《电气自动化新技术丛书》

编辑委员会

第4届《电气自动化新技术丛书》

编辑委员会成员

主任：王 炎

副主任：王兆安 王志良 赵相宾 牛新国

委员：王正元 王永骥 王兆安 王 旭

王志良 王 炎 牛新国 尹力明

刘宗富 许宏纲 孙流芳 阮 毅

李永东 李崇坚 陈伯时 陈敏逊

陈维均 周国兴 赵光宙 赵 杰

赵相宾 张 浩 张敬明 郑颖楠

涂 健 徐殿国 黄席樾 彭鸿才

霍勇进 戴先中

秘 书：刘凤英

第4届《电气自动化新技术丛书》 编辑委员会的话

自1992年本丛书问世以来，在学会领导和广大作者、读者的支持下，至今已出版发行丛书38种33万余册，受到广大读者的欢迎，对促进我国电气传动自动化新技术的发展和传播起到了很大作用。

许多读者来信，表示这套丛书对他们的工作帮助很大，希望我们再接再厉，不断推出介绍电气传动自动化新技术的丛书。因此，本届编委会决定选择一些大家所关心的新选题，继续组织编写出版，同时对受读者欢迎的已出版的丛书，根据技术的发展，我们将组织一些作者进行修订再版，以满足广大读者的需要。

我们诚恳地希望广大读者来函，提出您的宝贵意见和建议，以使本丛书搞得更好。

在本丛书出版期间，为加快与支持丛书出版，成立了丛书出版基金，得到了中国电工技术学会、天津电气传动设计研究所等单位的支持，在此我们对所有资助单位再次表示感谢。

第4届《电气自动化新
技术丛书》编辑委员会
2002年10月12日

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 20 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，如空间矢量 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)；
- (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力传动技术基础上，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的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崇巍、张兴合作编著。张崇巍拟订了本书大纲并编写了第 1、2 和 8 章，张兴编写了第 3~7 章。全书由张崇巍统稿。

本书在编写过程中，得到了电气自动化丛书编委会的大力支持和指导，西安交通大学王兆安教授和北京电力电子研究开发中心王正元教授审阅了本书大纲，并提出了中肯的修改建议，作者深表谢意。

作者在与本书有关的研究中，得到了中国科学院合肥等离子物理研究所刘正之研究员，合肥阳光电源公司曹仁贤总经理、新疆新能源研究所吕绍勤研究员，北京桑普太阳能电气公司王国华研究员等人的大力支持，作者在此表示深深的谢意。

博士生鞠建永、硕士生马先奎为本书收集和提供了部分参考资料，博士生许颇、张强、余勇和硕士生季建强、杨孝志、汪国林、吴敏等在本书编写过程中参与了相关问题的讨论与研究，并完成了插图绘制工作，在此作者也深表谢意。

与本书有关的研究工作得到了以下项目的支持：

中国科学院国家九五重大科学工程项目“HT-7U 超导托卡马克核聚变实验装置”（国计字 1998-210）；

高等学校博士学科点专项科研基金资助项目“灵活交流输电系统的可靠性建模及控制策略研究”（20020359004）；

新疆自治区科技厅科技攻关项目“太阳能光伏并网逆变系统

的研究”(990102002);

安徽省科技厅科技攻关项目“双向逆变技术在新能源发电和节能装备中的产业化研究”(01012043)。

在此一并向上述项目的资助单位致以衷心的感谢。

感谢电气自动化新技术丛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

2003年5月

目 录

《电气自动化新技术丛书》序言

第4届《电气自动化新技术丛书》编辑委员会的话

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	6
1.3 本书内容概述	12
第2章 PWM 整流器的拓扑结构及原理	15
2.1 基本原理及分类	15
2.1.1 PWM 整流器原理概述	15
2.1.2 PWM 整流器的分类及拓扑结构	18
2.2 电压型 PWM 整流器 (VSR) PWM 分析	23
2.2.1 单相 VSR PWM 分析	23
2.2.2 三相 VSR PWM 分析	40
2.3 电流型 PWM 整流器 (CSR) PWM 分析	48
2.3.1 单相 CSR PWM 分析	48
2.3.2 三相 CSR PWM 分析	55
第3章 电压型 PWM 整流器 (VSR)	62
3.1 三相 VSR 的建模及动、静态分析	62
3.1.1 三相 VSR 一般数学模型	62
3.1.2 三相 VSR dq 模型的建立	68
3.1.3 三相 VSR dq 模型的动、静态分析	82
3.2 三相 VSR 控制系统设计	112
3.2.1 电流内环控制系统设计	112
3.2.2 电压外环控制系统设计	123
3.2.3 VSR 交流侧电感的设计	133
3.2.4 VSR 直流侧电容的设计	148

X

第 4 章 VSR 电流控制技术	154
4.1 VSR 间接电流控制	154
4.1.1 三相 VSR 静态间接电流控制	155
4.1.2 三相 VSR 动态间接电流控制	167
4.2 VSR 直接电流控制	172
4.2.1 固定开关频率 PWM 电流控制	173
4.2.2 滞环 PWM 电流控制	186
4.3 影响三相 VSR 电流控制要素分析	213
4.3.1 三相 VSR 网侧电流的时域描述	213
4.3.2 PWM 开关死区的效应及影响	215
4.3.3 三相 VSR 直流电压对网侧电流波形的影响	219
第 5 章 VSR 空间矢量 PWM (SVPWM) 控制	226
5.1 SVPWM 一般问题讨论	227
5.1.1 三相 VSR 空间电压矢量分布	227
5.1.2 空间电压矢量的合成	229
5.1.3 SVPWM 与 SPWM 控制的比较	233
5.1.4 VSR 空间电压矢量的几何描述	237
5.2 三相 VSR 空间电压矢量 PWM (SVPWM) 控制	250
5.2.1 基于不定频滞环的 SVPWM 电流控制	251
5.2.2 基于定频滞环的 SVPWM 电流控制	261
5.2.3 跟踪指令电压矢量的 SVPWM 电流控制	271
第 6 章 三相 VSR 的其他控制策略	279
6.1 无交流电动势、电流传感器的三相 VSR 控制	279
6.1.1 无交流电动势传感器的三相 VSR 控制	279
6.1.2 无交流电流传感器的三相 VSR 控制	287
6.2 电网不平衡时的三相 VSR 控制	296
6.2.1 电网不平衡时的三相 VSR 基本问题	297
6.2.2 电网不平衡时的三相 VSR 控制	306
第 7 章 电流型 PWM 整流器 (CSR) 的建模及控制	321
7.1 三相 CSR 建模	321
7.1.1 三相 CSR 一般数学模型的建立	321
7.1.2 三相 CSR dq 模型的建立	325

7.1.3	三相 CSR dq 模型的改进	328
7.2	三相 CSR dq 模型的动、静态分析	330
7.2.1	三相 CSR dq 等效电路描述	330
7.2.2	三相 CSR 静态特性分析	336
7.2.3	三相 CSR 动态特性分析	341
7.3	三相 CSR PWM 信号发生技术	349
7.3.1	三值逻辑 PWM 信号发生	349
7.3.2	三值逻辑空间矢量 PWM 信号发生	359
7.3.3	三相 CSR PWM 电流利用率讨论	364
7.3.4	低电压应力三值逻辑 PWM 信号发生	368
7.4	电流型 PWM 整流器 (CSR) 控制系统设计	376
7.4.1	单相 CSR 控制系统设计	376
7.4.2	三相 CSR 控制系统设计	392
7.4.3	三相 CSR 主电路参数设计	409
第 8 章	PWM 整流器应用	420
8.1	高功率因数整流器 (HPFR)	420
8.1.1	概述	420
8.1.2	高功率因数整流器最优控制	421
8.2	静止无功补偿器 (SVG)	429
8.2.1	概述	429
8.2.2	SVG 非线性解耦控制	433
8.3	有源电力滤波器 (APF)	437
8.3.1	概述	437
8.3.2	谐波检测	439
8.3.3	采用滑模控制的 APF 电流控制策略	441
8.4	统一潮流控制器 (UPFC)	447
8.4.1	概述	447
8.4.2	UPFC 控制系统设计	449
8.5	可再生能源并网发电	455
8.5.1	概述	455
8.5.2	光伏并网逆变器及其控制	457
8.5.3	风力发电机并网及其控制	461
参考文献	467

第1章 绪 论

1.1 PWM 整流器概述

随着电力电子技术的发展,功率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功率半导体开关,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功率开关,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)、功率场效应晶体管(MOSFET)以及场控晶闸管(MCT)等。而20世纪90年代发展起来的智能型功率模块(IPM)则开创了功率半导体开关器件新的发展方向。功率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领域中取得了广泛的应用。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,造成了严重的电网“污染”。治理这种电网“污染”最根本措施就是,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^[57,58]。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

⊖ SCR为硅可控整流器,是1957年美国通用电气公司命名的,后来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。

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，如静止无功补偿（SVG）、有源电力滤波（APF）、统一潮流控制（UPFC）、超导储能（SMES）、高压直流输电（HVDC）、电气传动（ED）、新型 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）及无功补偿（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，大大降低了有源滤波装置的容量，从而减少系统造价。

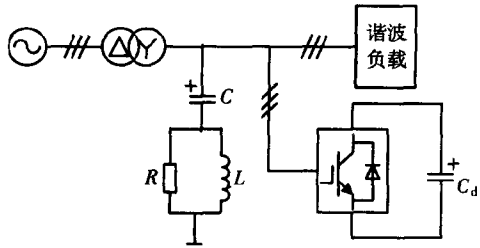


图 1-1 混合并联型有源电力滤波器 (APF) 拓扑结构

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 (APF) 同时也补偿了无功 (SVG)。

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，该有源环节相当一个静止无功补偿器 (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、并联交流

器的正常运行。

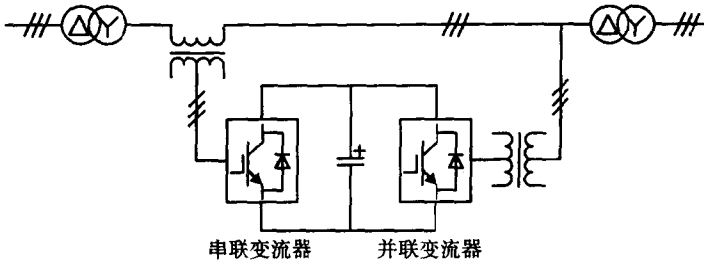


图 1-2 统一潮流控制器 (UPFC) 的拓扑结构

3. 超导磁能储存 (SMES)

随着超导材料及应用技术的发展，超导磁能储存的研究与应用引起了工程与学术界的关注。超导磁能储存主要用于电力网的调峰控制以及其他需要短时补偿电能的场合。在电力网用电量正常时，电网中的电能通过变流装置的超导线圈储存足够的能量，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力网馈能，从而达到调峰作用。超导磁能储存 (SMES) 系统主电路拓扑结构如图 1-3 所示。

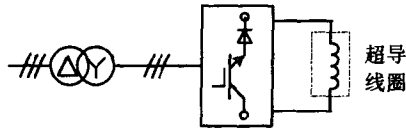


图 1-3 超导磁能储存 (SMES) 系统的拓扑结构

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. 四象限交流电动机驱动系统