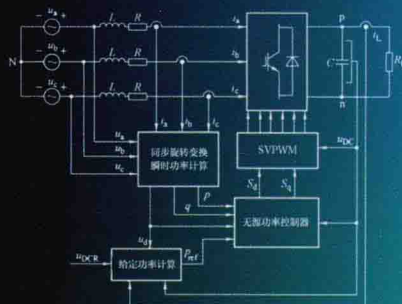


“十二五”国家重点图书出版规划项目

电力电子
新技术系列图书

New Technology Series in
Power Electronics



第2版

◎ 王久和 著

电压型PWM 整流器的 非线性控制

DIANYAXING PWM ZHENGLIUQIDE
FEIXIANXING KONGZHI



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

“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

电压型 PWM 整流器的 非线性控制

第 2 版

王久和 著



机械工业出版社

本书分为6章。第1章介绍了电压型PWM整流器的拓扑结构及分类、非线性控制研究现状及趋势和性能指标；第2章论述了三相三线两电平（三电平）电压型PWM整流器及Vienna整流器的拓扑结构、工作原理、基本数学模型及PWM算法；第3章论述了瞬时功率计算方法、三相三线两电平（三电平）电压型PWM整流器各种直接功率控制策略；第4章首先论述了状态反馈线性化、零动态设计及输入输出反馈线性化理论，随后论述了反馈线性化理论在三相三线两电平（三电平）电压型PWM整流器及Vienna整流器控制中的应用；第5章首先论述了无源控制理论，随后论述了无源控制理论在三相三线（四线）两电平（三电平）电压型PWM整流器及Vienna整流器控制中的应用；第6章首先介绍了自抗扰控制技术，随后论述了自抗扰控制在电网平衡与不平衡电压型PWM整流器控制中的应用。

本书可供高等院校研究生、教师参考，亦可供从事电力电子系统及控制、非线性控制理论应用的科研和工程技术人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

电压型PWM整流器的非线性控制/王久和著. —2版. —北京：机械工业出版社，2015.9

（电力电子新技术系列图书）

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-111-51085-7

I. ①电… II. ①王… III. ①整流器—非线性控制系统 IV. ①TM461

中国版本图书馆CIP数据核字（2015）第180324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：罗莉 责任编辑：朱林 版式设计：赵颖喆

责任校对：刘雅娜 封面设计：马精明 责任印制：李洋

北京机工印刷厂印刷（三河市南杨庄国丰装订厂装订）

2015年10月第2版第1次印刷

169mm×239mm·15.75印张·324千字

0 001—3 000册

标准书号：ISBN 978-7-111-51085-7

定价：49.80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

服务咨询热线：010-88379833 机工官网：www.cmpbook.com

读者购书热线：010-88379649 机工官博：weibo.com/cmp1952

教育服务网：www.cmpedu.com

封面防伪标均为盗版

金书网：www.golden-book.com

**第二届
电力电子新技术系列图书
编辑委员会**

主任：徐德鸿

副主任：白继彬 牛新国 康 勇 李崇坚 杨 耕

委员：(按姓名拼音字母排序)

白继彬 陈 坚 陈道炼 陈守良 陈治明

高艳霞 郭 宏 郭世明 康 勇 李崇坚

李永东 刘进军 吕征宇 牛新国 潘三博

阮新波 孙流芳 孙玉坤 王旭东 王兆安

肖湘宁 徐德鸿 徐殿国 杨 耕 杨 旭

张 波 张承慧 张卫平 张 兴 查晓明

赵善麒 赵争鸣 钟彦儒 周 波 周维维

秘书组：陈守良 孙流芳 杨 旭 罗 莉

电力电子新技术系列图书

序 言

1974年美国学者 W. Newell 提出了电力电子技术学科的定义, 电力电子技术是由电气工程、电子科学与技术和控制理论三个学科交叉而形成的。电力电子技术是依靠电力半导体器件实现电能的高效率利用, 以及对电机运动进行控制的一门学科。电力电子技术是现代社会的支撑科学技术, 几乎应用于科技、生产、生活各个领域: 电气化、汽车、飞机、自来水供水系统、电子技术、无线电与电视、农业机械化、计算机、电话、空调与制冷、高速公路、航天、互联网、成像技术、家电、保健科技、石化、激光与光纤、核能利用、新材料制造等。电力电子技术在推动科学技术和经济的发展中发挥着越来越重要的作用。进入 21 世纪, 电力电子技术在节能减排方面发挥着重要的作用, 它在新能源和智能电网、直流输电、电动汽车、高速铁路中发挥核心的作用。电力电子技术的应用从用电, 已扩展至发电、输电、配电等领域。电力电子技术诞生近半个世纪以来, 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, 电力半导体器件性能不断提高, 并出现了碳化硅、氮化镓等宽禁带电力半导体器件, 新的技术和应用不断涌现, 其应用范围也在不断扩展。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。与之相应, 从事电力电子技术领域的工程技术和科研人员的数量与日俱增。因此, 组织出版有关电力电子新技术及其应用的系列图书, 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, 促进电力电子技术及应用知识的普及。

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, 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:

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。

理论联系实际, 以应用技术为主。

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

电压型 PWM 整流器在工业中的应用越来越广泛，如 PWM 整流电源、高频开关电源以及各种特种变流器等。随着现代工业的进步，对电压型 PWM 整流器性能提出了更高的要求。决定电压型 PWM 整流器性能的因素包括：开关器件、拓扑结构、PWM 算法及控制策略。开关器件及拓扑结构属于电压型 PWM 整流器硬件范畴，PWM 算法及控制策略属于软件范畴。因此，在开关器件及拓扑结构一定的情况下，PWM 算法及控制策略决定了电压型 PWM 整流器的波形质量、工作效率及稳态与动态性能。

从运行角度看，工业上更注意电压型 PWM 整流器的稳态与动态性能指标。因此，电压型 PWM 整流器的控制策略研究是提高性能指标的重要途径。

电压型 PWM 整流器控制策略传统上采用基于线性模型的 PI 控制器，控制结构为多环级联结构。由于 PI 控制器难于保证电压型 PWM 整流器具有优秀的动态性能以及大范围工作的稳定性。为此，针对电压型 PWM 整流器的非线性特点，国内外学者采用非线性控制理论研究电压型 PWM 整流器的控制问题，期待提高变换器的性能，如反馈线性化、无源控制理论、自抗扰控制技术；同时进行了整流器直接功率控制研究，取得了一定成果。

对于整流器直接功率控制，估算的瞬时功率值不仅有基波分量，也有谐波分量，提高了总功率因数和效率，有功和无功功率得到了精确控制，其误差由功率滞回比较器的滞宽决定。但由于采用功率滞回比较器，导致开关频率不确定，对交流侧电感滤波器设计不利。基于反馈线性化控制的控制器设计方法的目的是利用非线性控制律，将非线性系统转换成线性系统，再由线性理论设计控制器，从而提高系统的动、静性能。其不足是控制器会存在奇异性，对参数的依赖性大，且控制律复杂。无源控制理论是从系统的能量入手，设计的无源控制律可使能量函数按期望的能量函数分布，从而达到控制目的。利用无源控制理论设计的系统控制器可实现系统的全局稳定性，无奇异点问题，对系统参数变化及外来扰动有较强的鲁棒性，是一种本质上的非线性控制理论。自抗扰控制器的技术核心是把系统的未建模动态和未知外扰作用都归结为对系统的“总扰动”而进行评估并给予补偿。其不足是要得到一组满意的非线性函数及相应的参数难度大，同时计算量大，导致控制周期变长，实时性差。

对于整流器直接功率控制中的开关频率变化问题，可采用 PWM 或变滞环宽度的方法予以解决。反馈线性化控制理论存在的主要问题是控制律复杂、存在奇异点。对于由控制律复杂导致的实时性问题，可由高速传感器及高速处理器予以解决；对于奇异点，可通过修改算法予以解决。因此，随着电子技术的迅速发展，定会促进反馈线性化控制理论的发展与应用。对于无源控制理论，由于是基于能量控

制的思路对系统进行控制,是一种本质上的非线性控制,日益受到国内外学者的关注。自抗扰控制技术能够把系统的未建模动态和未知外扰作用都归结为对系统的“总扰动”而进行评估并给予补偿,还可观测系统的参数。因此,近几年自抗扰控制在工程各领域获得了应用。由于反馈线性化控制理论及无源控制理论都需要系统的数学模型及系统的参数,但在实际工程中,系统的数学模型及参数要受到各种干扰及系统工况的影响,某种程度上呈不确定性。对此,可采用反馈线性化、无源控制理论与自抗扰控制技术相结合予以解决。对于高阶系统,可将系统化为若干个低阶子系统,对每个子系统采用自抗扰控制技术。

为促进非线性控制理论在电压型 PWM 整流器控制中的应用,作者根据对非线性控制理论的理解及其在电压型 PWM 整流器中的应用研究,结合国内外专家学者的研究与应用成果,对第 1 版内容进行了修改与充实。本版与第 1 版相比,删去了第 1 版中的基于反步法的电压型 PWM 整流器控制内容,增加了三相四线两电平电压型 PWM 整流器、三相三线(四线)三电平电压型 PWM 整流器及 Vienna 整流器的建模、PWM 算法及非线性控制内容。希望此书能够促进国内广大学者应用非线性控制理论研究电压型 PWM 整流器控制问题,提高整流器的性能。

本书分为 6 章。第 1 章介绍了电压型 PWM 整流器的拓扑结构及分类、非线性控制研究现状及趋势和性能指标;第 2 章论述了三相三线(四线)两电平(三电平)电压型 PWM 整流器及 Vienna 整流器的拓扑结构、工作原理、基本数学模型及 PWM 算法;第 3 章论述了瞬时功率计算方法、三相三线两电平(三电平)电压型 PWM 整流器各种直接功率控制策略;第 4 章首先论述了状态反馈线性化、零动态设计及输入输出反馈线性化理论,随后论述了反馈线性化理论在三相三线两电平(三电平)电压型 PWM 整流器及 Vienna 整流器控制中的应用;第 5 章首先论述了无源控制理论,随后论述了无源控制理论在三相三线(四线)两电平(三电平)电压型 PWM 整流器及 Vienna 整流器控制中的应用;第 6 章首先介绍了自抗扰控制技术,随后论述了自抗扰控制技术在三相三线两电平电网平衡与不平衡电压型 PWM 整流器控制中的应用。

本书由哈尔滨工业大学徐殿国教授、浙江大学徐德鸿教授审阅,清华大学李永东教授、西安交通大学刘进军教授对本书提出了许多有益的建议,上述专家的审阅及建议使本书的内容编写和选取更加合理,保证了本书的质量和科学性。本书的出版得到了国家自然科学基金项目(51477011)、北京市自然科学基金重点项目(KZ201511232035)、北京市属高校科技创新能力提升计划项目(TJSHG201310772024)的支持。

本书除选用作者的电压型 PWM 整流器直接功率控制、反馈线性化控制、无源控制及自抗扰控制研究成果外,还选用了部分国内外学者的电压型 PWM 整流器控制的非线性控制研究成果,在此表示衷心的感谢。

由于作者写作能力和学术水平有限,书中难免有不妥之处,敬请读者给予批评指正。

王久和
2015 年 4 月于北京

目 录

电力电子新技术系列图书序言

前言

第 1 章 概论 1

- 1.1 电压型 PWM 整流器拓扑结构及分类 1
 - 1.1.1 电压型 PWM 整流器基本拓扑结构 1
 - 1.1.2 电压型 PWM 整流器分类 4
- 1.2 电压型 PWM 整流器非线性控制研究现状及趋势 7
 - 1.2.1 电压型 PWM 整流器非线性控制研究现状 7
 - 1.2.2 电压型 PWM 整流器非线性控制研究趋势 9
- 1.3 电压型 PWM 整流器的性能要求 12
 - 1.3.1 对整流器的控制要求 12
 - 1.3.2 电压型 PWM 整流器电气性能指标 12

第 2 章 电压型 PWM 整流器的工作原理 16

- 2.1 三相三线两电平电压型 PWM 整流器的工作原理 16
 - 2.1.1 三相三线两电平电压型 PWM 整流器主电路 16
 - 2.1.2 三相三线两电平电压型 PWM 整流器工作过程 20
 - 2.1.3 三相三线两电平电压型 PWM 整流器基本数学模型 29
 - 2.1.4 三相三线两电平电压型 PWM 整流器 SVPWM 算法 32
- 2.2 Vienna 整流器工作原理 37
 - 2.2.1 Vienna 整流器主电路 37

- 2.2.2 Vienna 整流器工作过程 39
- 2.2.3 Vienna 整流器的 SVPWM 算法 45

- 2.3 三相三电平 NPC 电压型 PWM 整流器工作原理 54
 - 2.3.1 三相三线三电平电压型 PWM 整流器主电路 54
 - 2.3.2 三相三电平电压型 PWM 整流器工作过程 55
 - 2.3.3 三相三电平电压型 PWM 整流器基本数学模型 58
 - 2.3.4 三相三电平电压型 PWM 整流器 SVPWM 算法 62

第 3 章 电压型 PWM 整流器直接功率控制 69

- 3.1 瞬时功率 69
 - 3.1.1 传统功率计算 69
 - 3.1.2 瞬时功率计算 71
- 3.2 三相三线两电平电压型 PWM 整流器直接功率控制 73
 - 3.2.1 三相三线两电平电压型 PWM 整流器电压定向直接功率控制 73
 - 3.2.2 虚拟磁链定向的三相三线电压型 PWM 整流器直接功率控制 79
 - 3.2.3 基于输出调节子空间的三相三线电压型 PWM 整流器直接功率控制 82
 - 3.2.4 设置多开关表的三相三线电压型 PWM 整流器直接功率控制 89
 - 3.2.5 功率前馈解耦的三相三线电压型 PWM 整流器直接功率

控制	92	控制	146
3.2.6 功率内环和电压平方外环的 三相三线电压型 PWM 整流器控制	96	4.4.1 Vienna 整流器的数学 模型	146
3.3 三相三线三电平电压型 PWM 整流器直接功率控制	99	4.4.2 Vienna 整流器反馈线性化 控制	151
3.3.1 三相三线三电平电压型 PWM 整流器功率数学模型	99	第 5 章 电压型 PWM 整流器无源 控制	155
3.3.2 三相三线三电平电压型 PWM 整流器电压定向直接功率 控制	101	5.1 无源控制理论简介	155
3.3.3 基于虚拟磁链的三相三线三电 平电压型 PWM 整流器直接 功率控制	105	5.1.1 稳定性概念	155
第 4 章 电压型 PWM 整流器反馈 线性化控制	109	5.1.2 系统的无源性	156
4.1 反馈线性化控制理论	109	5.1.3 基于 EL 方程的系统无源 控制器	160
4.1.1 数学预备知识	109	5.1.4 基于 PCHD 方程的系统 无源控制器	163
4.1.2 状态反馈线性化理论	113	5.2 三相三线两电平电压型 PWM 整流器无源控制	169
4.1.3 零动态设计	121	5.2.1 基于 EL 模型的三相三线两 电平电压型 PWM 整流器 无源控制	169
4.1.4 输入输出反馈线性化 理论	124	5.2.2 基于 PCHD 模型的三相三线 两电平电压型 PWM 整流器 无源控制	177
4.2 三相三线两电平电压型 PWM 整流器反馈线性化控制	127	5.3 三相四线两电平电压型 PWM 整流器无源控制	182
4.2.1 三相三线两电平电压型 PWM 整流器状态反馈线性化 控制	127	5.3.1 三相四线两电平电压型 PWM 整流器基本数学模型	182
4.2.2 三相三线两电平电压型 PWM 整流器输入/输出反馈线性 化控制	132	5.3.2 基于 EL 模型的三相四线两 电平电压型 PWM 整流器 无源控制	184
4.3 三相三线三电平 NPC 电压型 PWM 整流器反馈线性化控制	139	5.3.3 基于 PCHD 模型的三相四线 两电平电压型 PWM 整流器 无源控制	188
4.3.1 三相三线三电平 NPC 电压 型 PWM 整流器输入/输出 反馈线性化控制	139	5.4 电网不平衡时三相两电平电压型 PWM 整流器无源控制	192
4.3.2 三相四线三电平 NPC 电压 型 PWM 整流器输入/输出 反馈线性化控制器	141	5.4.1 基于 EL 模型的电压型 PWM 整流器无源控制	192
4.4 Vienna 整流器反馈线性化		5.4.2 基于 PCHD 模型的电压型 PWM 整流器无源控制	197
		5.5 三相三电平 NPC 电压型 PWM	

整流器无源控制	200	6.1 自抗扰控制技术简介	215
5.5.1 三相三线三电平电压型 PWM 整流器无源控制	200	6.1.1 自抗扰控制器	215
5.5.2 三相四线三电平电压型 PWM 整流器无源控制	204	6.1.2 非线性 PID 控制器	223
5.6 Vienna 整流器无源控制	207	6.2 基于 ADRC 的电压型 PWM 整流器	224
5.6.1 双负载 Vienna 整流器数学 模型	207	6.2.1 基于 ADRC 电网平衡时 电压型 PWM 整流器	224
5.6.2 双负载 Vienna 整流器无源 控制	210	6.2.2 基于 ADRC 电网不平衡时 电压型 PWM 整流器	228
第 6 章 基于自抗扰控制的电压型 PWM 整流器	215	6.2.3 基于非线性 PID 的电压型 PWM 整流器	231
		参考文献	234

第 1 章 概 论

整流器是将交流电能转换成直流电能的装置，在电力传动、工业直流电源、新能源等领域获得了广泛应用。为避免给电网注入大量的谐波及无功，造成严重的电网“污染”，国内外学者开始了 PWM 整流器的研究。PWM 整流器分为电压型和电流型，由于电压型 PWM 整流器具有交流侧交流电流低谐波、单位功率因数、能量双向流动及恒定直流电压控制等优点，使其得到了更为广泛的应用。

1.1 电压型 PWM 整流器拓扑结构及分类

1.1.1 电压型 PWM 整流器基本拓扑结构

1. 电压型 PWM 整流器的基本组成

电压型 PWM 整流器主要由交流侧电流滤波器、整流电路及直流侧电压滤波器组成，如图 1.1-1 所示，图 1.1-1a 为功率能够双向流动的整流器，图 1.1-1b 为功率能够单向流动的整流器。交流侧电流滤波器一般由电感滤波器或 LC 滤波器实现，用于平滑交流电流；整流电路由电力电子开关器件实现，用于交流电能与直流电能的转换；直流侧电压滤波器由电容器实现，用于平滑直流电压。

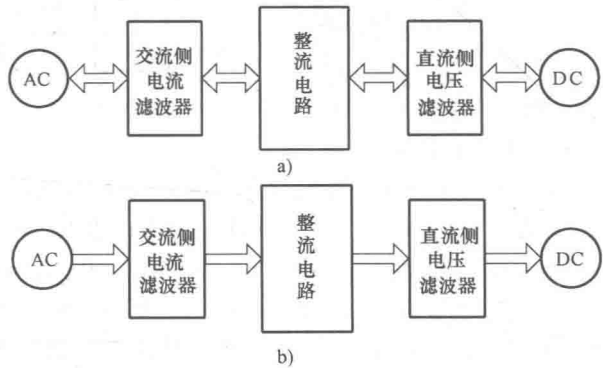


图 1.1-1 电压型 PWM 整流器的基本组成

2. 电压型 PWM 整流器的基本拓扑结构

电压型 PWM 整流器的交流侧电流滤波器由 L 、 LC 或 T 型 LC 无源器件组成，直流侧电压滤波器由并联在整流电路的电容器实现，整流电路由电力电子开关器件根据不同整流器类型及其电平要求构成。

整流电路由全控电力电子开关器件组成，假设全控电力电子开关器件为理想开关，通断受驱动信号控制，驱动信号用开关函数 S 表示，当 $S=1$ 时开关导通， $S=0$ 时，开关关断。则整流电路的输入端通过理想开关以某种形式与直流侧相连。

(1) 两电平整流电路基本拓扑

以一相为例论述整流电路的基本拓扑。两电平整流电路基本拓扑如图 1.1-2 所示,为实现整流器对直流侧电压的控制,必须保证交流侧与直流侧连通,且输入端不能悬空,则采用互补开关的形式予以实现。

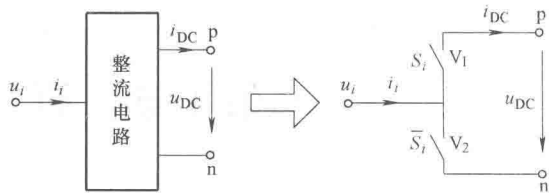


图 1.1-2 两电平整流电路基本拓扑

由图 1.1-2 可知,若以 n 点为参考点,在遵守两个开关只有一个导通的规则情况下,当 $S_i = 1$ 时, V_1 导通、 V_2 关断, $u_i = u_{DC}$; $S_i = 0$ 时, V_1 关断、 V_2 导通, $u_i = 0$; 因此,称图 1.1-2 为两电平整流电路。另外,输入电压 u_i 是 S_i 和 u_{DC} 的函数,即 $u_i = f_v(S_i, u_{DC}) = S_i u_{DC}$ 。当 $S_i = 1$ 时, V_1 导通、 V_2 关断, $i_{DC} = i_i$; $S_i = 0$ 时, V_1 关断、 V_2 导通, $i_{DC} = 0$; 则直流输出电流 i_{DC} 是 S_i 和 i_i 的函数,即 $i_{DC} = f_i(S_i, i_i) = S_i i_i$ 。

(2) 三电平整流电路基本拓扑

三电平整流电路基本拓扑如图 1.1-3 所示,若以 o 点为参考点,在遵守 3 个开关只有一个导通的规则情况下,当 $S_{i1} = 1$ 、 $S_{i2} = 0$ 、 $S_{i3} = 0$ 时(定义 $S_i = 1$), V_{i1} 导通、 V_{i2} 及 V_{i3} 关断, $u_{i0} =$

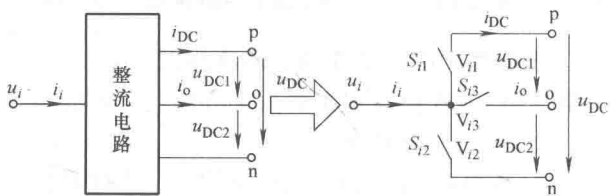


图 1.1-3 三电平整流电路基本拓扑

u_{DC1} 、 $i_{DC} = i_i$ 、 $i_o = 0$; 当 $S_{i1} = 0$ 、 $S_{i2} = 1$ 、 $S_{i3} = 0$ 时(定义 $S_i = -1$), V_{i2} 导通、 V_{i1} 及 V_{i3} 关断, $u_{i0} = -u_{DC2}$ 、 $i_{DC} = 0$ 、 $i_o = 0$; 当 $S_{i1} = 0$ 、 $S_{i2} = 0$ 、 $S_{i3} = 1$ 时(定义 $S_i = 0$), V_{i3} 导通、 V_{i1} 及 V_{i2} 关断, $u_{i0} = 0$ 、 $i_{DC} = 0$ 、 $i_o = i_i$ 。由上分析,根据开关状态不同, u_{i0} 有 3 种电平 u_{DC1} 、 0 、 $-u_{DC2}$, 即 $u_{i0} = f_v(S_{ij}, u_{DC1}, u_{DC2}) = S_{i1} u_{DC1} - S_{i2} u_{DC2}$, $j = 1, 2, 3$; i_{DC} 、 i_o 是由开关状态及 i_i 决定的, 即 $i_{DC} = f_{id}(S_{ij}, i_i) = S_{i1} i_i$ 、 $i_o = f_{io}(S_{ij}, i_i) = S_{i3} i_i$ 。

2. 三相三线两电平电压型 PWM 整流器的拓扑

根据图 1.1-1 和图 1.1-2 可得采用 L 型滤波的双向三相三线两电平电压型 PWM 整流器的基本组成如图 1.1-4 所示。

根据图 1.1-4 和图 1.1-2 可得

$$\begin{cases} u_{an} = f_a(S_i, u_{DC}) = S_a u_{DC} \\ u_{bn} = f_b(S_i, u_{DC}) = S_b u_{DC} \\ u_{cn} = f_c(S_i, u_{DC}) = S_c u_{DC} \end{cases} \quad (1.1-1)$$

$$i_{DC} = f_i(S_i, i_i) = \sum_{i=1}^n S_i i_i = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c \quad (1.1-2)$$

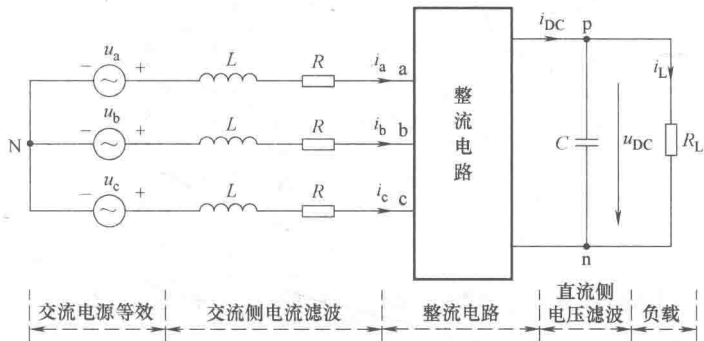


图 1.1-4 三相三线两电平电压型 PWM 整流器的基本组成

式中, S_a 、 S_b 、 S_c 为相对于 a、b、c 的等效开关函数。

整流电路输入线电压为

$$\begin{cases} u_{ab} = S_a u_{DC} - S_b u_{DC} \\ u_{bc} = S_b u_{DC} - S_c u_{DC} \\ u_{ca} = S_c u_{DC} - S_a u_{DC} \end{cases} \quad (1.1-3)$$

满足式 (1.1-2) 和式 (1.1-3) 的整流电路拓扑如图 1.1-5 所示, V_1 和 V_6 驱动信号互补、 V_3 和 V_4 驱动信号互补、 V_5 和 V_2 驱动信号互补。

根据图 1.1-4 和图 1.1-5 可得三相三线两电平电压型 PWM 整流器拓扑如图 1.1-6 所示。

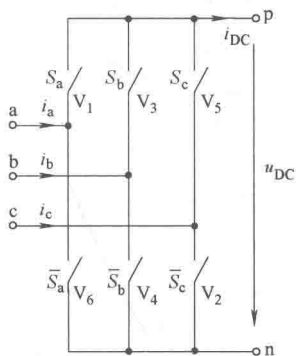


图 1.1-5 三相三线两电平电压型 PWM 整流器的整流电路拓扑

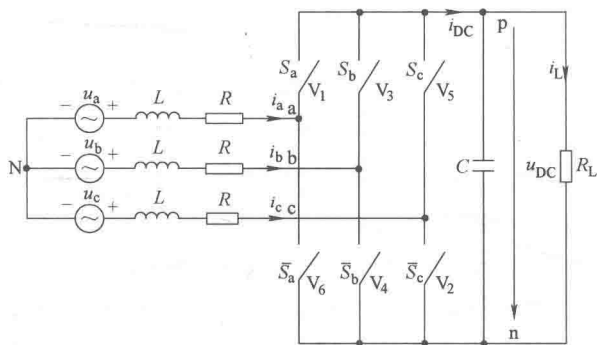


图 1.1-6 三相三线两电平电压型 PWM 整流器拓扑

3. 三相三线三电平电压型 PWM 整流器拓扑

根据图 1.1-1 和图 1.1-3 可得采用 L 型电流滤波的双向三相三线三电平电压型 PWM 整流器的基本组成如图 1.1-7 所示。

根据图 1.1-7 和图 1.1-3 可得

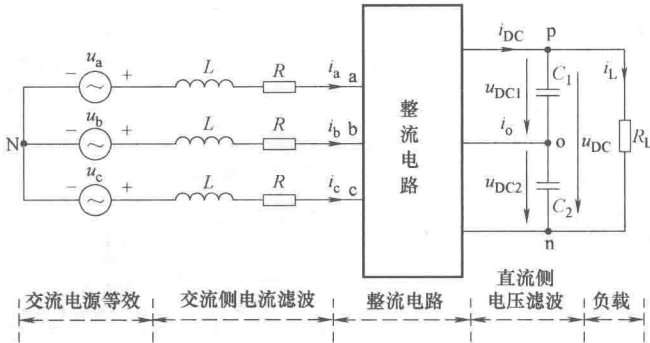


图 1.1-7 三相三线三电平电压型 PWM 整流器的基本组成

$$\begin{cases} u_{ao} = S_{a1} u_{DC1} - S_{a2} u_{DC2} \\ u_{bo} = S_{b1} u_{DC1} - S_{b2} u_{DC2} \\ u_{co} = S_{c1} u_{DC1} - S_{c2} u_{DC2} \end{cases} \quad (1.1-4)$$

$$\begin{cases} i_{DC} = S_{a1} i_a + S_{b1} i_b + S_{c1} i_c \\ i_o = S_{a3} i_a + S_{b3} i_b + S_{c3} i_c \end{cases} \quad (1.1-5)$$

整流电路输入线电压为

$$\begin{cases} u_{ab} = u_{ao} - u_{bo} = (S_{a1} - S_{b1}) u_{DC1} - (S_{a2} - S_{b2}) u_{DC2} \\ u_{bc} = u_{bo} - u_{co} = (S_{b1} - S_{c1}) u_{DC1} - (S_{b2} - S_{c2}) u_{DC2} \\ u_{ca} = u_{co} - u_{ao} = (S_{c1} - S_{a1}) u_{DC1} - (S_{c2} - S_{a2}) u_{DC2} \end{cases} \quad (1.1-6)$$

满足式 (1.1-4) ~ 式 (1.1-6) 的三电平整流电路拓扑结构如图 1.1-8 所示。

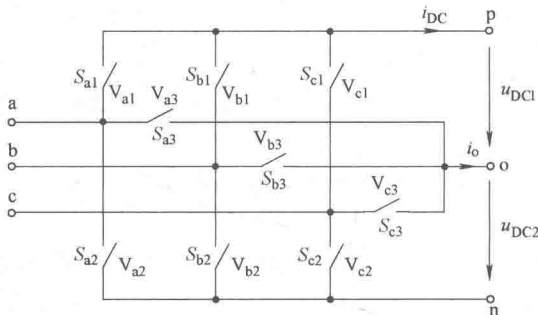


图 1.1-8 三相三线三电平整流电路拓扑结构

根据图 1.1-7 和图 1.1-8 可得三相三线三电平 PWM 整流器拓扑如图 1.1-9 所示。

1.1.2 电压型 PWM 整流器分类

1. 基本分类

按功率流向分电压型 PWM 整流器有双向、单向 (见图 1.1-1) 两类, 按相数分有单相和多相 (如三相) 两类, 按输入线数可分为三线、四线 (对三相而言)

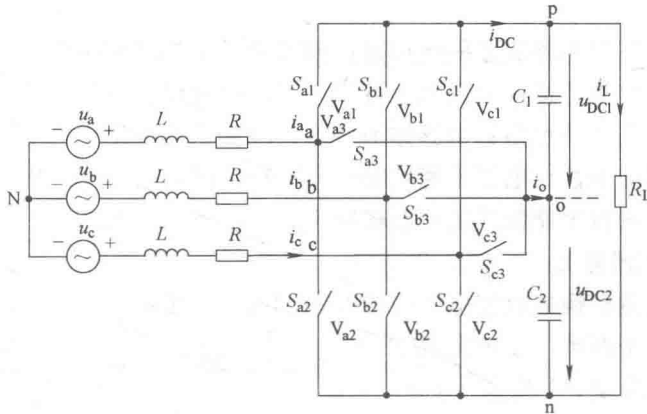


图 1.1-9 三相三线三电平 PWM 整流器拓扑

两类，按所带负载可分为单负载和双负载两类，按电平分类电压型 PWM 整流器有两电平和多电平（如三电平）两类。电压型 PWM 整流器分类如图 1.1-10 所示。对于双向三相两电平电压型 PWM 整流器具有简单、鲁棒性强、功率模块及辅助器件容易获得的特点，其不足是需限制最大频率及大体积交流电感滤波器。

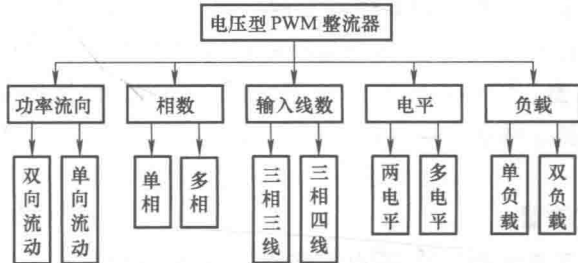


图 1.1-10 电压型 PWM 整流器分类

2. 双向三电平整流器的分类

对于双向三相三电平电压型 PWM 整流器有中性点钳位（Neutral Point Clamped, NPC）型、飞跨电容（Flying Capacitor, FC）型、T 型、有源 NPC 及桥臂电感（Bridge-Leg Inductor, BLI）型。对于 NPC 型整流器具有器件电压应力小、低开关损失、无源器件体积小特点，其不足是较高的导通损失、控制复杂及实现困难；FC 型整流器的特点为每个电压等级需较少的元件，对三电平拓扑仅有两个输出端，其不足为需一定容量的飞跨电容且没有标准的工业拓扑；与 NPC 型整流器相比，T 型整流器在低开关频率有更低的半导体损失，可用标准六封装模块实现，其不足是需不同阻断电压等级的开关器件；有源 NPC 型整流器具有可主动分布开关损失、更加合理地安装开关器件等特点，与 NPC 型整流器相比实现更加困难；BLI 型整流器的特点为每个电压等级需较少的元件，对三电平拓扑仅有两个输出端，其不足是由于耦合电感增加附加体积，以及半导体阻断电压等于直流母线

电压。

综上所述，三电平整流器的优点是：损失分布在多个半导体上，使芯片上的负载更加均匀，在整流器运行的情况下可优化芯片的面积；高开关频率、高效率；小容量的无源器件。其缺点是：半导体器件多；门极驱动单元多；结构复杂；需要电容电压平衡，即需中性点电压平衡控制；成本高。因此，三电平整流器应用于中压场合，也在低压可再生能源系统中获得应用。

3. 单向整流器分类

对于只需交流转换成直流电能的情况下，可使用单向 PWM 整流器。按电平分有两电平和三电平两类^[1]，按结构可分为 Δ 开关型、Y 开关型、T 型及 Vienna 型电压型整流器，其具体类别如图 1.1-11 所示。

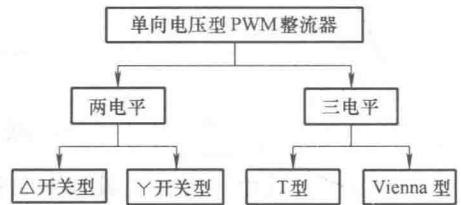


图 1.1-11 单向电压型 PWM 整流器分类

对于两电平 Y 开关型整流器，通过对开关器件的合理控制就可在整流电路的输入端形成 PWM 电压或正弦的输入电流；与两电平 Y 开关型整流器相比，两电平 Δ 开关型整流器具有更低的导通损失，且有源开关部分可用标准的六开关功率模块实现。

对于三电平 T 型整流器，在低开关频率运行时有更低的半导体损失；对于三电平 Vienna 型整流器，除具有低的开关频率、高效率、低电压应力外，还具有功率密度高、输入电流正弦化、电压不平衡及断相条件下仍然可以工作、电感体积小等优点。

4. 单向混合整流器

混合三相电压型整流器^[2-4]是由工作在不同拓扑结构和工作频率的整流器 A 和 B 并联组成，共为同一负载供电，如图 1.1-12 所示。整流器 A 和 B 的输入电流合成为与电网电压同步的正弦电流。整流器 A 一般由三相二极管桥整流器和 boost 型 DC/DC 变换器组成单开关三相整流器，负担大部分负载功率；整流器 B 为工作于高频的三相电压型 PWM 整流器，负担小部分负载功率。

单向混合三相电压型整流器按整流器 B 的结构进行分类。按整流器 B 的结构分类有双向和单向两大类，单向电压型 PWM 整流器可由图 1.1-11 所示整流器实现。同时，由于负载功率由原来的一个整流器变为两个整流器负担，可减少器件定额和损失，进而提高效率 and 功率密度。因此，单向混合三相电压型整流器可获得期望的综合性能，成为新的研究热点。

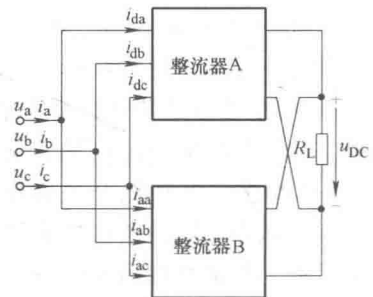


图 1.1-12 混合三相电压型整流器