



国际电气工程先进技术译丛

ISTE

WILEY


电力电子变换器： PWM策略与电流控制技术

**Power Electronic Converters: PWM Strategies
and Current Control Techniques**

[法]艾瑞克·孟麦森 (Eric Monmasson) 主编

冬雷 译



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

电力电子变换器：PWM 策略与电流控制技术

[法] 艾瑞克·孟麦森 (Eric Monmasson) 主编
冬雷译

机械工业出版社

Eric Monmasson 编写的这本书中,系统地介绍了现代电力电子变换装置及其 PWM 控制策略,具有内容系统全面、范例丰富详尽、原理深入浅出、理论与实际紧密结合等特点。

第 1~9 章主要关注脉宽调制技术;第 10~16 章主要关注电流控制技术。其中,第 1 章和第 2 章讲述两种基本的 PWM 控制策略;第 3 章介绍 PWM 控制中的三相逆变器的过调制问题;第 4~6 章是对不同 PWM 控制方法的详细介绍;第 7 章介绍了 PWM 控制中的电磁干扰问题;第 8 章和第 9 章讲述了多重与多相功率变换器的 PWM 控制策略;第 10~15 章分别以同步电机和直流电源为例详细介绍了各种不同的电流控制方法;第 16 章介绍了多电平变换器的电流控制方法。

本书可以作为高等院校相关专业学生的教材和参考书,也可以作为相关技术人员的参考用书。

Copyright ©2011 John Wiley & Sons Ltd.

All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled < Power Electronic Converters: PWM Strategies and Current Control Techniques >, ISBN < 978-1-848-21195-7 >, by < Eric Monmasson >, Published by < John Wiley & Sons. >. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

本书中文简体字版由 Wiley 授权机械工业出版社独家出版。未经出版者书面允许,本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。版权所有,翻印必究。

北京市版权局著作权合同登记 图字:01-2014-2017 号。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力电子变换器: PWM 策略与电流控制技术/ (法)
孟麦森 (Monmasson, E.) 主编; 冬雷译. —北京:
机械工业出版社, 2016. 3
(国际电气工程先进技术译丛)
书名原文: Power Electronic Converters: PWM
Strategies and Current Control Techniques
ISBN 978 - 7 - 111 - 52721 - 3

I. ①电… II. ①孟…②冬… III. ①变换器
IV. ①TM624

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 016244 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: 江婧婧 责任编辑: 翟天睿
责任印制: 乔宇 责任校对: 陈秀丽
北京京丰印刷厂印刷
2016 年 3 月第 1 版·第 1 次印刷
169mm × 239mm · 24 印张 · 467 千字
0 001—3 000 册
标准书号: ISBN 978 - 7 - 111 - 52721 - 3
定价: 99.00 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

服务咨询热线: 010-88361066

读者购书热线: 010-68326294

010-88379203

封面防伪标均为盗版

网络服务

机工官网: www.cmpbook.com

机工官博: weibo.com/cmp1952

金书网: www.golden-book.com

教育服务网: www.cmpedu.com

译者序

目前,随着智能电网和能源互联网的不断发展,推动电力电子变换器的应用日益广泛,并对电力电子行业的发展起到了相当重要的核心作用。同时,随着新型电力电子器件、电力电子技术、控制理论与控制方法、微处理器与数字控制技术的飞速发展,电力电子变换器无论从器件、拓扑及控制策略方面都呈现出迅猛发展之势。

在以上技术发展背景下,原书作者对电力电子变换器的控制基础核心 PWM 控制技术进行了全面的整理,涵盖了 PWM 控制技术的各个方面,并给出了详细的应用实例,对于电气工程、机电工程、自动化、新能源等相关专业的人员来说是一本难得的技术参考书,也可以作为相关专业的教材或者参考书使用。

本书内容的系统性很强,首先对 PWM 的基础理论进行了详细介绍,另外对交流(单相、三相)、直流、多重、多相变换器的 PWM 控制策略和控制方法均有分析,并通过不同功率变换器的电流控制给出了详细的应用范例。

限于译者的水平,本书可能存在一些翻译不当之处,欢迎读者提出宝贵的修改意见和建议。

冬雷

2016年1月

引 言

由于现代社会对石油的依赖所产生的弊端，因此人们正在考虑更多地利用可替代、可再生能源，这使得电能在未来具有极其重要的地位，并且可以有效降低对环境的影响。

在过去的30年中，电能变换是一个不断发展的领域。这个发展主要得益于功率开关速度的不断提高，而且其功率等级也持续增加。同时，由于数字控制系统的使用更加容易且功能更加丰富，从而使之能够成为电力电子装置的控制器。

因此，对于现代功率变换装置，静止变流器及其相关的控制器就变得非常关键。这使得控制器的设计者更加注重变换器的电气输出（电压、电流），因为它们能够影响更高一级的控制变量，例如转矩和转速，或者并网发电装置的有功、无功等。

这一现象自然地使设计者将他们的控制器按不同层次进行组织和安排。最底层为电流或电压控制器。这个控制器的内环确保变换器的电气输出量能够被准确调节，这就确保了变换器的上游能源到下游负载之间能量的高质量变换。高一级的控制与内环控制器同时作用。第二层通常称为“算法控制”，因为这通常在一个微处理器中执行（DSP、RISC等）。这些更先进的器件主要用于控制与最终应用相关的变量（电动机转速等）。由此产生的伺服回路被称为外环控制器，它们的控制量用作内环控制器的参考值。

静止变流器的电流—电压控制是一项重要的技术问题，因为它对于整个能量变换系统的准确控制来说是至关重要的。

动态特性需要一个相当大的范围，指标也需要紧跟技术的发展。因此，不论是工业界还是在大学，都需要在这个研究方向上投入巨大的努力，这正是本书想要概括的研究工作，不仅在于控制算法，还要讨论这一领域的最新发展方向。

在本书中静止变流器的电流和电压控制方面，我们将着重于以下两个主题：

第1~9章主要关注脉宽调制技术（Pulse Width Modulation, PWM），该技术使静止变流器可以连续输出变化的电压脉冲，使得输出瞬态电压幅值和频率的平均值可控。

第10~16章主要关注电流控制技术。

为了更好地介绍PWM技术，我们将回顾一下几个电力电子器件的特性。这些器件作为理想器件，它们仅工作在完全阻断状态（电流为零）或者完全导通状态（电压为零）。从阻断状态到导通状态或者反过来的瞬态过程作为电力电子

器件的开关状态。

然而，这个能源变换的开关方法只能产生一个数量有限的不同电压等级脉冲，换句话说，这是一个离散化的变换。为了得到足够准确的电压波形幅值和频率，必须调节功率开关门极所施加的电压脉冲宽度。

当开关频率提高时，调制会更加有效。然而，调制频率的提高是有限度的，否则会引起无法接受的开关损耗。另外一个影响开关频率提高的因素是传导和发射干扰，并造成静止变流器周围设备的损坏，这是一个电磁兼容问题。

因此，必须在提高频率和所带来的问题之间做出折中，从而使得研究人员开发出一系列调制技术。

一个 PWM 系统的质量标准通常包括电流总谐波畸变率最小化，基波电压线性范围最大化，转矩谐波（电动机控制系统）最小化，静止变流器损耗的降低，以及产生的共模电压最小化。

本书前 9 章编写的主要目的在于介绍各种不同 PWM 技术的种类和方法。将以电压源型逆变器为主，因为它在工业应用中具有重要地位。

第 1 章和第 2 章作为参考章节，深入讨论两个主要的 PWM 策略家族，分别是基于载波的 PWM 策略和空间矢量 PWM 策略。在这两个策略中，我们都将研究一个两电平电压源型逆变器控制三相异步电动机的负载。本书中将着重分析两种方法的相似性，尽管它们的实现方法不同。通过在调制电压中加入零序分量所引入的自由度，使我们面临一系列挑战（例如线性区最大化和损耗限制等）。

第 3 章为三相逆变器的过调制问题，这在调速系统应用中是一个非常重要的模态。本书将讨论当需要电压接近或者大于可能的电压最大值时的调制策略，其主要目的就是在低频谐波含量约束条件下将总功率最大化。

第 4 章讨论调制频率必须受到约束的大功率系统。这里的想法是调制频率与基波同步，并且通过仔细分配准确的开关时刻来优化谐波的成分。我们也会考虑三电平逆变器，同时还会提供一个采用有源滤波的多电平电源的基本配置，该配置采用两个两电平逆变器（一个提供电源；另外一个作为有源滤波器）。这种结构可以使电源的谐波成分得到优化。

第 5 章介绍德尔塔—西格玛调制策略。这种调制的主要优点是其具有鲁棒性、开关频率和调制频率比率降低的可能性，以及固定开关频率和变化开关频率的可能性。

第 6 章介绍随机调制方法。该调制方法的主要优点是可以拓宽调制信号的频谱，从而降低电磁和可闻噪声。本章的结尾会对该课题进行详细的讨论。

第 7 章是前面章节的继续。本章主要关注并分析利用电压源型逆变器驱动电机时所产生的传导电磁干扰。

第 8 章和第 9 章介绍分布式供电系统中电能变换器的调制策略。最近关于多

电平、多绕组电能变换器结构的研究非常热门。这个结构必然会比传统的用于三相电动机驱动的两电平逆变器复杂得多。利用这些结构可以开发出容错系统，并能够在这样的系统中得到冗余结构；它们也可以用于多个模块之间的能量传递，从而降低功率开关的应力并增加设备的寿命。

第8章介绍利用线性代数形式对空间矢量 PWM 技术的一个扩展，并用于多相系统。

第9章提供了关于 PWM 应用于通用多电平变换器拓扑的一般性讨论。特别要注意的是，本书还介绍了如何利用冗余电压矢量来优化额外的目标，例如飞跨电容的电压平衡。

第10~16章主要关注电流控制技术。这里需要回顾一下如何利用适当的系统方法来设计静止变流器的内环控制器。其主要目标就是确保对瞬态电流波形的准确控制，保护静止变流器不会过电流，避免由于负载引起的扰动，对变换器参数变化和非线性化具有鲁棒性，并能够提供出色的动态控制。从量化的角度看就是最小化静态误差，最大化带宽，并提供一个优化的调制深度和最小化畸变。

电流调节的基本要求经常伴随着其他额外控制要求，例如基于滞环控制的开关频率控制，多单元变换器的内部电压平衡等。

在本书的这个部分，电流控制结构也与应用紧密结合。正是由于这个原因，尽管没有详细介绍，但仍给出了一系列研究案例。这些案例将包括电压型逆变器和电动机的结合，这是一个非常流行的案例并且可以看到该案例中有相当多关于电流控制方面的实验研究。不仅如此，电流控制技术也带来了其他相关应用，诸如高性能“功率在环”仿真，并网和离网的发电控制，DC-DC 电能传输，以及基于多电平变换器的大功率应用。

按照工作原理，静态变流器的电流调节方法可以分为两个主要类别：

(1) 直接控制，也称为幅值控制，电流调节器的输出直接控制相关静态变流器，这些控制策略全部属于非线性。它们的主要优点是在参数变化及系统模型不确定的情况下可以保证较好的系统动态特性。其主要缺点就是开关频率不确定及在稳态时会出现极限环。

(2) 间接控制，也称为 PWM 控制，电流调节器的输出作为 PWM 调节器的输入（1~9章）。这些控制策略可以是线性的或者是非线性的，可以控制变换器工作在一个固定的频率，这样可以避免极限环出现的风险。但是其动态特性无法与直接控制相比。

第10~12章讨论由一个三相电压型逆变器供电的同步电动机电流控制的应用。对于这个控制，对电流的控制等效于对转矩的控制。第10章讨论在旋转坐标系中利用 PI 调节器直接控制。控制量在稳态时是常数，这使得这些量的伺服控制变得容易。第一个控制方法是线性的并被作为一个参考方法，因为它被广泛

应用于工业领域。

第11章讨论直接和间接预测控制，控制原理包括在每个采样周期计算出最适合的电压矢量。这种控制策略对计算时间要求较高，但是可以利用平行算法实现。因此它特别适合在FPGA中执行。

第12章介绍了直接和间接滑模控制。在介绍了这两种滑模控制方法之后，详细描述了设计原理及在动态和准确性方面的对比优势。

第13章讨论滞环控制。主要目的是利用为非线性系统研究所开发的理论工具来说明这种控制方法的基本原理。本章并不针对某个具体应用，而是提供一个关于这种直接控制方法的品质的不同视角，主要是关于调制的滞环控制概念，并结合动态性能优良的滞环控制和固定频率控制。

第14章讨论利用自振荡调节电流与电压控制，即自振荡电流控制（Self-Oscillating Current Control, SOCC）和自振荡电压控制（Self-Oscillating Voltage Control, SOVC）。这项新发明的直接控制技术受到专利保护，它依赖于控制环内部的自振荡，与此同时一个固定的工作频率保障了系统在动态和鲁棒性方面具有较好的性能。这里介绍的应用领域为电气负载的“功率在环”仿真。

第15章介绍固定频率下的谐振控制原理。这种控制使得在一个精确的已知频率中加入一个无限制的增益成为可能，它既可以消除这个特定频率下的跟踪误差，又可以消除畸变。这个控制策略是一种调节的敏感形式，而且非常具有前途，因为它非常适合用于分布式发电系统。这里作者利用一个风力发电系统能够工作于并网状态和离网状态来说明这种谐振调节器的性能。这是一种直接的线性控制。

最后，第16章介绍最新的多模块变换器的电流控制。这种变换器结构的自由度数量也适用于多目标电流控制研究（既跟踪电流参考值，又平衡内部电压）。主要应用领域为大功率设备。本书也将介绍如何将前面所提出的控制原理应用到多电平变换器中。

Eric Monmasson

2011年2月

目 录

译者序

引言

第 1 章 用于两电平三相电压型逆变器的载波脉宽调制	1
1.1 引言	1
1.2 参考电压 $v_{a\text{ref}}$ 、 $v_{b\text{ref}}$ 、 $v_{c\text{ref}}$	3
1.3 参考电压 $P_{a\text{ref}}$ 、 $P_{b\text{ref}}$ 、 $P_{c\text{ref}}$	6
1.4 v_a 、 v_b 、 v_c 与 P_a 、 P_b 、 P_c 之间的联系	8
1.5 PWM 信号的产生	8
1.5.1 反锯齿波	8
1.5.2 传统锯齿形载波	11
1.5.3 三角形载波	12
1.5.4 说明	16
1.6 通过参考波形 $v_{a\text{ref}k}$ 、 $v_{b\text{ref}k}$ 、 $v_{c\text{ref}k}$ 确定 $P_{a\text{ref}k}$ 、 $P_{b\text{ref}k}$ 、 $P_{c\text{ref}k}$	16
1.6.1 “正弦”调制	17
1.6.2 “居中”调制	18
1.6.3 “亚优化”调制	19
1.6.4 “平顶”和“平底”调制	20
1.7 总结	22
1.8 参考文献	22
第 2 章 空间矢量调制策略	24
2.1 逆变器和空间矢量 PWM	24
2.1.1 问题描述	24
2.1.2 逆变器模型	24
2.1.3 空间矢量调制	27
2.2 通用方法	33
2.2.1 自由度	33
2.2.2 全指令域的拓展	34
2.2.3 空间矢量调制	36
2.2.4 PWM 频谱	38
2.3 空间矢量 PWM 与实现	39
2.3.1 实现所需硬件及通用结构	39
2.3.2 工作扇区的确定	42

2.3.3 空间矢量 PWM 的一些变种	43
2.4 总结	46
2.5 参考文献	46
第3章 三相电压型逆变器的过调制	48
3.1 背景	48
3.2 调制策略的比较	48
3.2.1 引言	48
3.2.2 “全波”调制	49
3.2.3 标准调制策略的性能	50
3.3 调制器的饱和	53
3.4 改进的过调制	56
3.5 参考文献	62
第4章 脉冲宽度调制的计算与优化策略	64
4.1 程式化 PWM 简介	64
4.2 PWM 的有效频率范围	65
4.3 程式化谐波消除 PWM	66
4.4 优化 PWM	68
4.4.1 简介	68
4.4.2 最小化判据	68
4.4.3 优化结果应用	70
4.4.4 实时生成原理	72
4.5 多电平 PWM 的计算	73
4.5.1 简介	73
4.5.2 三电平 PWM 的计算	74
4.5.3 独立的多电平 PWM 的计算	77
4.6 总结	78
4.7 参考文献	79
第5章 Δ-Σ 调制	81
5.1 引言	81
5.2 单相 Δ - Σ 调制原理	81
5.2.1 开环或闭环操作	82
5.2.2 频率特性	82
5.2.3 参考信号幅值对频谱的影响	84
5.2.4 指令信号频率对频谱成分的影响	85
5.2.5 窄脉冲的缺失	85
5.2.6 决策要素	85
5.2.7 非对称与对称 DSM	86
5.3 三相情况: 矢量 DSM	87

5.3.1 选择新矢量的判据	88
5.3.2 三电平三相逆变器	93
5.4 总结	94
5.5 参考文献	94
第6章 随机调制策略	96
6.1 引言	96
6.2 展布频谱技术及其应用	96
6.3 随机调制技术介绍	98
6.3.1 PWM 的确定性基础	98
6.3.2 变频率随机 PWM	98
6.3.3 随机脉冲位置 PWM	99
6.3.4 三相逆变器中的随机 PWM	99
6.3.5 整体评价	99
6.4 随机调制的频谱分析	100
6.4.1 电压频谱的影响	100
6.4.2 负载电流频谱的影响	101
6.4.3 直流母线电流影响	101
6.4.4 对电动机噪声和振动的影响	103
6.5 总结	106
6.6 参考文献	106
第7章 调速装置的电磁兼容：PWM 控制策略的影响	108
7.1 简介	108
7.2 EMC 研究的目标	109
7.3 静止变流器中的 EMC 机理	110
7.3.1 引言	110
7.3.2 EMC 标准	111
7.3.3 标准的测量与仿真	112
7.4 时域仿真	113
7.5 频域建模：工程师的工具	114
7.5.1 建模的目标	114
7.5.2 干扰源建模	115
7.5.3 逆变器的频域表示	119
7.6 PWM 控制	120
7.6.1 基于载波 PWM	120
7.7 不同基于载波 PWM 策略的源的比较	128
7.7.1 正弦交叉比较 PWM	128
7.7.2 谐波注入控制	129
7.7.3 换相率限制：死区带 PWM 控制	129

7.8	空间矢量 PWM	130
7.9	最小化共模电压的结构	134
7.10	总结	134
7.11	参考文献	135
第 8 章	多相电压源逆变器	137
8.1	引言	137
8.2	电压源逆变器的矢量建模	138
8.2.1	n 桥臂结构: 术语、标记、举例	138
8.2.2	平均值控制: PWM	140
8.3	带多相负载的逆变器	148
8.3.1	负载拓扑和相关自由度	149
8.3.2	实际例子: 三相情况	152
8.3.3	实际例子: 五相负载	154
8.4	总结	158
8.5	参考文献	158
第 9 章	多电平变换器的 PWM 策略	163
9.1	多电平和交错并联变换器	163
9.2	调制器	169
9.2.1	回顾: 两电平调制器	169
9.2.2	多电平调制器	172
9.3	不同多电平结构的控制信号发生器	187
9.3.1	“三点”逆变器 (中点钳位逆变器)	187
9.3.2	飞跨电容逆变器	188
9.4	总结	192
9.5	参考文献	193
第 10 章	同步电动机的 PI 电流控制	196
10.1	引言	196
10.2	同步电动机模型	196
10.2.1	基于定子固定坐标系的同步电动机模型	196
10.2.2	同步电动机转子绕组轴线对齐的旋转坐标系 (d, q) 模型	200
10.2.3	电磁转矩的表示	202
10.3	同步电动机的典型功率传输系统	204
10.4	同步电动机在定子固定三相坐标系下的 PI 电流控制	205
10.4.1	与定子轴对齐的固定三相坐标系下的 PI 控制器的整定	208
10.4.2	与定子轴对齐的固定三相坐标系下的 PI 控制器的结构	209
10.5	旋转坐标系 (d, q) 下的同步电动机 PI 电流控制	211
10.5.1	在 (d, q) 坐标系下的 PI 控制器整定	211
10.5.2	在 (d, q) 参考坐标系下的 PI 控制器结构	213

10.6	总结	214
10.7	参考文献	215
第 11 章	同步电动机的预测电流控制	216
11.1	引言	216
11.2	最小开关频率预测控制策略	217
11.3	限制开关频率的预测控制策略	217
11.4	同步电动机的限制开关频率预测电流控制策略	218
11.4.1	同步电动机带有可变、受限开关频率的预测电流控制策略	218
11.4.2	同步电动机固定开关频率预测电流控制	222
11.5	总结	225
11.6	参考文献	226
第 12 章	同步电动机的滑模电流控制	227
12.1	引言	227
12.2	直流电动机的滑模控制	227
12.2.1	直流电动机的直接滑模电流控制	229
12.2.2	直流电动机的非直接滑模电流控制	231
12.3	同步电动机的滑模电流控制	236
12.3.1	同步电动机定子电流矢量直接滑模控制	238
12.3.2	同步电动机定子电流矢量非直接滑模控制	245
12.4	总结	250
12.5	参考文献	251
第 13 章	大带宽与固定开关频率的混合电流控制器	252
13.1	引言	252
13.2	离散输出电流调节器的主要类型	253
13.2.1	引言	253
13.2.2	滞环调节器	253
13.2.3	固定频率滞环调节器	254
13.2.4	开通触发电流调节器	256
13.2.5	关断触发控制器	260
13.2.6	开通或关断触发调节器	262
13.2.7	混合调制的滞环调节器原理	263
13.3	极限环分析工具	266
13.3.1	动力系统简介;分岔概念	266
13.3.2	动力系统的分岔概念	268
13.3.3	庞加莱截面及分岔图	269
13.3.4	电气工程应用	269
13.3.5	非线性电流调节器中极限环的分析	271
13.4	总结	281

13.5 参考文献	281
第 14 章 利用自振荡电流控制器的电流控制	283
14.1 引言	283
14.2 自振荡电流控制器工作原理	283
14.2.1 两用的局部环	283
14.2.2 开关频率控制的局部控制环	284
14.2.3 具备低频电流控制环	287
14.2.4 调节器的稳定性	289
14.3 SOCC 的改进	290
14.3.1 静态误差的降低	290
14.3.2 开关频率控制	291
14.3.3 初步设计的变化	293
14.4 SOCC 的特性	293
14.4.1 开关频率	293
14.4.2 线性度	295
14.4.3 谐波畸变	295
14.5 SOCC 概念的拓展	296
14.5.1 自振荡电压控制	296
14.5.2 三相 SOCC	299
14.5.3 三相 SOVC	300
14.5.4 高功率有源负载的模拟	301
14.5.5 检测电路的模-数转换器	302
14.6 总结	302
14.7 参考文献	303
第 15 章 利用谐振校正器的电流与电压控制策略：固定频率应用	305
15.1 引言	305
15.2 电流控制利用谐振校正器	306
15.2.1 利用 Kessler 对称优化控制	306
15.2.2 功率控制应用：风力发电机案例	308
15.3 电压控制策略	315
15.3.1 引言	315
15.3.2 功率控制原理	316
15.3.3 电容端的电压控制	318
15.3.4 参考电压的确定	321
15.3.5 功率控制	322
15.3.6 电压控制	324
15.3.7 仿真	324
15.4 总结	330

15.5	附录: 变压器参数	330
15.6	参考文献	330
第 16 章	多电平变换器的电流控制策略	333
16.1	引言	333
16.2	多电平变换器拓扑	334
16.2.1	多电平结构的主要种类	334
16.2.2	多单元结构的优缺点	336
16.2.3	高功率多单元拓扑的演化: 层叠式多单元变换器	337
16.3	控制自由度的建模与分析	338
16.3.1	瞬态建模	338
16.3.2	平均值模型	339
16.4	可用于控制算法的自由度分析	339
16.4.1	开环 PWM 调制	339
16.4.2	拓扑的自由度	339
16.4.3	指令规则的目标	340
16.5	控制策略分类	341
16.6	单相桥臂非直接控制策略	342
16.6.1	解耦控制原理	342
16.6.2	线性和非线性控制	342
16.6.3	利用严格输入/输出线性化解耦	345
16.6.4	利用指令信号之间相移的控制	347
16.7	单相桥臂直接控制策略	350
16.7.1	滑模控制	350
16.7.2	电流控制模式	352
16.8	控制策略, 三相方法	355
16.8.1	三相系统两电平逆变器特点	355
16.8.2	三相 N 电平系统特点	356
16.8.3	使用多单元逆变器可用自由度的分析	356
16.8.4	多电平逆变器自由度应用范例	359
16.9	多单元变换器特点: 需要观测器	361
16.10	总结与展望	362
16.11	参考文献	363
参编人员	366

第 1 章 用于两电平三相电压型 逆变器的载波脉宽调制

1.1 引言

两电平三相电压型逆变器广泛应用于交流电动机，并对其输入电压的幅值和频率进行控制。而且在可控整流方面的应用也逐步增加。早前的专著^[LAB 04]中专门有一章从仿真的角度介绍了这个主题。图 1.1 所示为一个利用两电平三相逆变器向一个三相平衡负载供电的配置，负载为星形接法，并且没有中线，该图介绍了本书将应用的标记，输入参考电压的参考点为直流母线中点。

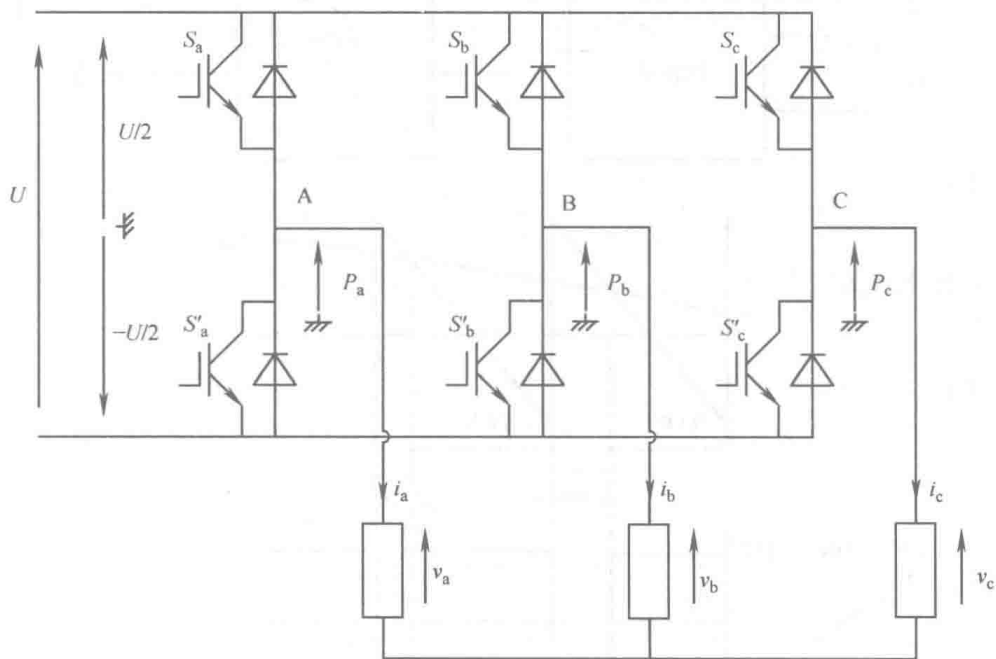


图 1.1 所使用的参数参考方向图

可以通过 PWM 的以下过程来提出控制问题：

(1) 开始在负载的不同相施加参考电压 $v_{a\text{ref}}$ 、 $v_{b\text{ref}}$ 、 $v_{c\text{ref}}$ ，第一步确定由逆变器桥臂所产生的电压 P_a 、 P_b 、 P_c ，为了保证准确输出电压 P_a 、 P_b 、 P_c ，需要适当的参考值 $P_{a\text{ref}}$ 、 $P_{b\text{ref}}$ 、 $P_{c\text{ref}}$ ，从而得到期望的电压 v_a 、 v_b 、 v_c 。