

电压型PWM整流器 的非线性控制

王久和 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

电压型 PWM 整流器的 非线性控制

王久和 著



机械工业出版社

本书系统地论述了电压型 PWM 整流器的结构、原理及非线性控制理论在电压型 PWM 整流器控制中的应用。本书分为 7 章。第 1 章论述了电压型 PWM 整流器非线性控制的现状及趋势,介绍了衡量整流器的性能指标;第 2 章依据整流器的拓扑结构介绍了整流器的工作原理、数学模型及空间矢量算法;第 3 章依据瞬时功率理论,论述了各种整流器直接功率控制策略;第 4 章论述了反馈线性化控制理论及在整流器控制中的应用;第 5 章介绍了 Lyapunov 稳定控制及无源性的控制理论,论述了基于 Lyapunov 稳定控制和无源控制理论的电压型 PWM 整流器控制策略;第 6 章介绍了自抗扰技术及在整流器控制中的应用;第 7 章介绍了反步法及在整流器控制中的应用。

本书可供从事电力电子技术的科研和工程技术人员参考,也可作为高校相关专业本科高年级学生、研究生的参考书。

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. —北京:机械工业出版社, 2008.9

(电气自动化新技术丛书)

ISBN 978-7-111-25144-6

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 143547 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:吉玲 责任编辑:顾谦 责任校对:樊钟英

封面设计:姚毅 责任印制:洪汉军

北京汇林印务有限公司印刷

2008 年 11 月第 1 版·第 1 次印刷

169mm × 239mm · 13 印张 · 242 千字

0001—3000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-25144-6

定价:27.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010)68326294

购书热线电话:(010)88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010)88379768

封面无防伪标均为盗版

前 言

在现代工业中，很多场合需要进行电能变换，把交流电能变为直流电能、直流电能变为交流电能。交流电能变为直流电能由整流器实现，直流电能变为交流电能由逆变器实现。整流器主要使用功率二极管或晶闸管，实现不控整流和可控整流（相控整流）；其主要存在的问题是在交流侧造成电流波形畸变给电网注入了大量的谐波及无功功率，造成了严重的电网“污染”；同时存在深控时功率因数低、直流电压波动等问题，制约了整流器在工业中的应用。

随着电力电子技术的发展，先进的全控型功率半导体器件，如绝缘栅双极型晶体管（IGBT）、集成门极换向晶闸管（IGCT）、智能功率模块（IPM）等的出现，微电子（计算机）技术及控制技术的发展促进了整流技术的发展，出现了以脉宽调制（PWM）控制为基础的各类变流装置，如PWM整流电源、逆变电源、高频开关电源以及各种特种变流器等。采用PWM技术的电压型PWM整流器具有网侧交流电流低谐波、单位功率因数（Unity Power Factor, UPF）、直流侧直流电压恒定控制以及能量双向流动等优点，实现了电能“绿色变换”，使整流器在各种直流电源（如通信电源）、变频调速系统（如双PWM变频调速）等领域获得了广泛应用。在主电路拓扑结构一定的情况下，为使电压型PWM整流器实现电能“绿色变换”，提出了各种控制策略。目前常用的电流控制策略分为“间接电流控制”和“直接电流控制”两种。间接电流控制是幅相控制，根据系统低频稳态数学模型（反映稳态下电压平衡关系），通过控制电压型PWM整流器的交流侧电压基波的幅值、相位，从而间接控制网侧电流。“间接电流控制”策略的显著优点是结构简单、无需电流传感器、静态特性良好，但这种控制方式的不足是稳定性差、动态响应慢、动态过程中存在直流电流偏移和很大的电流过冲、自身无限流保护、需有过电流保护，制约了该种策略的应用。“直接电流控制”策略是通过对交流电流的直接控制而使其跟随电流给定信号的控制方法，引入交流电流内环、直流电压外环构成整流器控制系统，既可实现单位功率因数，又可控制直流电压恒定。直接电流控制的PWM整流器采用空间矢量调制方式，直流电压利用率得到了提高，采用双闭环结构，利用线性控制理论方法进行设计，系统的动态性能得到明显改善，在工程实际中得到了应用。

由于电压型PWM整流器属于非线性混合控制系统，用线性控制方法进行研究，导致整流器的性能已不能满足工业日益增加的性能要求或特殊指标的要求。

对此,国内外学者开始了整流器非线性控制策略的研究,并取得了一定进展。为推动电压型 PWM 整流器非线性控制的研究,开发高性能整流器,本书主要根据作者对电压型 PWM 整流器非线性控制的研究,结合国内外学者的研究成果,系统地论述了电压型 PWM 整流器的结构、原理,及非线性控制理论在电压型 PWM 整流器控制中的应用。

本书分为 7 章。第 1 章论述了电压型 PWM 整流器非线性控制的现状及趋势,介绍了衡量整流器的性能指标。第 2 章依据三相电压型 PWM 整流器的拓扑结构介绍了整流器的工作原理,在三相 uvw 坐标系、两相静止 $\alpha\beta$ 坐标系的数学模型及两相同步旋转 dq 坐标系中的数学模型及 SVPWM 空间矢量算法。第 3 章依据瞬时功率理论,论述了各种整流器直接功率控制 (Direct Power Control, DPC) 策略,如电压定向直接功率控制 (VO-DPC)、基于虚拟磁链的直接功率控制 (VF-DPC) 等。第 4 章首先介绍了状态反馈线性化和输入输出反馈线性化控制理论,随后论述了两种反馈线性化理论在整流器控制中的应用。第 5 章首先简介了 Lyapunov 稳定性、无源性的控制理论;随后论述了基于 Lyapunov 稳定控制策略,基于欧拉-拉格朗日 (Euler-Lagrange, EL) 模型和带耗散的端口受控哈密顿 (Port Controlled Hamiltonian with Dissipation, PCHD) 模型的无源策略,基于能量成形和阻尼注入 (Energy Shapping and Damp Injecting, ESDI) 的控制策略。第 6 章介绍了自抗扰技术及在整流器控制中的应用。第 7 章介绍了反步法及在整流器控制中的应用。

本书在写作过程中得到了北京科技大学李华德教授、清华大学黄立培教授和北京交通大学郑琼林教授的指导和建议,使本书的内容选取和编写更加合理,保证了本书的质量。本书的出版得到了北京市人才强教计划—市属市管高等学校拔尖创新人才项目 (2006)、北京市教育委员会科技发展重点项目/北京自然科学基金重点项目 (B 类) (KZ200710772015) 及北京市高等教育教学名师项目的资助。

本书内容除选用了自己多年的研究成果外,还选用了国内外学者和作者的研究生:王栓庆、杨威、王丽、王朋飞的研究成果,在此表示衷心的感谢。

由于本人的写作能力和学术水平有限,书中有不妥之处,敬请读者给予批评指正。

作者

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 电压型 PWM 整流器控制研究现状及趋势	1
1.1.1 电压型 PWM 整流器控制研究现状	1
1.1.2 电压型 PWM 整流器控制研究趋势	4
1.2 电压型 PWM 整流器性能指标	5
1.2.1 直流侧性能指标	6
1.2.2 交流侧性能指标	6
第 2 章 电压型 PWM 整流器工作原理及基本数学模型	8
2.1 电压型 PWM 整流器主电路拓扑结构	8
2.1.1 不控和半控电压型整流器	8
2.1.2 电压型 PWM 整流器	9
2.2 电压型 PWM 整流器工作原理	10
2.2.1 电压型 PWM 整流器的两种工作状态	10
2.2.2 电压型 PWM 整流器电压电流矢量关系	11
2.2.3 整流器开关工作状态	13
2.2.4 整流器的整流与逆变换流过程	14
2.3 电压型 PWM 整流器基本数学模型	18
2.3.1 电压型 PWM 整流器在三相 uvw 坐标系中的数学模型	19
2.3.2 电压型 PWM 整流器在两相静止 $\alpha\beta$ 坐标系中的数学模型	21
2.3.3 电压型 PWM 整流器在两相同步旋转 dq 坐标系中的数学模型	24
2.4 电源不平衡时电压型 PWM 整流器数学模型	27
2.4.1 考虑各种因素时的电压型 PWM 整流器等效电路	27
2.4.2 电源不平衡时电压型 PWM 整流器数学模型	27
2.5 PWM 整流器空间矢量算法	29

2.5.1	PWM 整流器空间矢量算法	29
2.5.2	PWM 调制模块工作波形	34
第3章 电压型 PWM 整流器直接功率控制		37
3.1	功率理论	37
3.1.1	传统的功率定义	37
3.1.2	瞬时功率计算	39
3.2	电压型 PWM 整流器电压定向直接功率控制	42
3.2.1	有交流电压传感器控制策略	42
3.2.2	无交流电压传感器控制策略	53
3.3	虚拟磁链定向的电压型 PWM 整流器直接功率控制	55
3.3.1	系统的组成	56
3.3.2	工作原理	56
3.3.3	系统的优缺点	59
3.4	基于输出调节子空间的电压型 PWM 整流器直接功率控制	59
3.4.1	系统组成	60
3.4.2	系统的工作原理	60
3.5	设置扇形边界死区的电压型 PWM 整流器直接功率控制	67
3.5.1	功率滞环比较器的滞环宽度对整流器 DPC 系统的影响	67
3.5.2	设置扇形边界死区的整流器 DPC 系统	68
3.6	设置双开关表的电压型 PWM 整流器直接功率控制	70
3.6.1	电压型 PWM 整流器 DPC 系统性能分析	70
3.6.2	电压型 PWM 整流器双开关表控制	72
3.6.3	采用双开关表电压型 PWM 整流器 DPC 系统	73
3.6.4	双开关表电压型 PWM 整流器 DPC 系统仿真	74
3.7	功率前馈解耦控制的电压型 PWM 整流器功率控制	76
3.7.1	电压型 PWM 整流器前馈功率解耦控制系统结构	76
3.7.2	电压型 PWM 整流器前馈功率解耦控制系统设计	78
3.7.3	系统控制原理	79
3.8	功率内环和电压平方外环的电压型 PWM 整流器控制	82
3.8.1	电压型 PWM 整流器功率模型及解耦控制	82
3.8.2	功率内环和直流电压平方外环电压型 PWM 整流器控制系统	83

3.8.3 基于功率控制的电压型 PWM 整流器系统仿真研究	84
3.9 变无功功率给定电压型 PWM 整流器功率控制	88
3.9.1 无功功率的调节对整流器的影响	88
3.9.2 整流器变无功功率给定控制策略	88
第 4 章 电压型 PWM 整流器反馈线性化控制	90
4.1 反馈线性化控制理论	90
4.1.1 状态反馈线性化控制理论	90
4.1.2 输入/输出反馈精确线性化	99
4.1.3 多输入多输出仿射非线性系统	101
4.2 电压型 PWM 整流器 MIMO 反馈线性化控制	104
4.2.1 电压型 PWM 整流器的仿射非线性数学模型	104
4.2.2 系统相对阶及控制器设计	106
4.2.3 电容器纹波电流的分析	109
4.2.4 实验研究	110
4.3 电压型 PWM 整流器 MIMO 状态反馈线性化控制	115
4.3.1 电压型 PWM 整流器的仿射非线性数学模型	115
4.3.2 状态反馈精确线性化条件	116
4.3.3 反馈控制律的确定	116
4.3.4 实验研究	119
4.4 电压型 PWM 整流器 SISO 反馈线性化控制	121
4.4.1 电压型 PWM 整流器的仿射非线性数学模型	121
4.4.2 反馈线性化的应用	122
4.4.3 实验研究	124
第 5 章 基于存储函数的电压型 PWM 整流器控制	127
5.1 基于存储函数的控制理论	127
5.1.1 基于 Lyapunov 稳定性的控制理论	127
5.1.2 基于无源性的控制理论	128
5.2 基于 Lyapunov 能量函数的电压型 PWM 整流器控制	133
5.2.1 基于 Lyapunov 理论电压型 PWM 整流器控制 ($\alpha\beta$ 坐标系)	133
5.2.2 基于 Lyapunov 理论电压型 PWM 整流器控制 (dq 坐标系)	134
5.3 基于 EL 模型无源性的电压型 PWM 整流器控制	139

5.3.1	电压型 PWM 整流器的 EL 模型	139
5.3.2	基于 EL 模型无源性的电压型 PWM 整流器控制策略 I	140
5.3.3	基于 EL 模型无源性的电压型 PWM 整流器控制策略 II	144
5.3.4	基于 EL 模型无源性的电压型 PWM 整流器控制策略 III	148
5.3.5	基于 EL 模型无源性的电压型 PWM 整流器功率控制策略 IV	153
5.4	基于 PCHD 模型的电压型 PWM 整流器无源控制	160
5.4.1	电压型 PWM 整流器 PCHD 数学模型	160
5.4.2	基于 PCHD 模型的三相电压型 PWM 整流器控制策略	161
5.5	基于 ESDI 方法的电压型 PWM 整流器无源控制	166
5.5.1	问题的描述	166
5.5.2	输出调节子空间	167
5.5.3	基本控制器的设计	168
5.5.4	能量成形和阻尼注入方法	169
5.5.5	ESDI 在三相电压型 PWM 整流器中的应用	170
第 6 章	电压型 PWM 整流器自抗扰控制	173
6.1	自抗扰控制技术	173
6.1.1	PID 控制的优缺点	173
6.1.2	自抗扰控制技术	174
6.2	电压型 PWM 整流器自抗扰控制	181
6.2.1	电压型 PWM 整流器自抗扰控制 I	181
6.2.2	电压型 PWM 整流器自抗扰控制 II	183
第 7 章	基于反步法的电压型 PWM 整流器控制	186
7.1	反步法	186
7.1.1	反步法的基本思想	186
7.1.2	反步法控制器设计	186
7.2	基于反步法的电压型 PWM 整流器控制	189
7.2.1	数学模型的标准化	189
7.2.2	利用反步法设计控制器	191
参考文献	193

第1章 绪 论

在交流网侧,使用功率二极管或晶闸管实现不控整流和可控整流(相控整流)的整流器,电流波形畸变给电网注入了大量的谐波及无功功率,造成了严重的电网“污染”;对于可控整流器,在深控时存在功率因数低、直流电压波动等问题,制约了整流器在工业中的应用。

近年来开始对电压型 PWM 整流器进行了研究,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^[1]等优点,日益引起人们的关注。由于电压型 PWM 整流器具有上述优点,现已开始应用于单位功率因数整流、工业直流电源、交流传动等工业领域中。

1.1 电压型 PWM 整流器控制研究现状及趋势

1.1.1 电压型 PWM 整流器控制研究现状

1. 电压型 PWM 整流器控制策略

(1) 电流控制策略

电流控制策略有“间接电流控制”和“直接电流控制”两种控制策略。实际上间接电流控制是幅相控制,根据系统低频稳态数学模型(反映稳态下电压平衡关系)通过控制电压型 PWM 整流器的交流侧电压基波的幅值、相位,从而间接控制网侧电流。“间接电流控制”策略^[1]的显著优点是结构简单、无需电流传感器、静态特性良好,但这种控制方式的不足是:稳定性差、动态响应慢、动态过程中存在直流电流偏移和很大的电流过冲、自身无限流保护、需有过流保护,制约了该种策略的应用^[2]。“直接电流控制”策略^{[1][3]}是通过对交流电流的直接控制而使其跟随电流给定信号的控制方法,采用交流电流内环、直流电压外环构成整流器控制系统,既可实现单位功率因数,又可控制直流电压恒定。直接电流控制的 PWM 整流器采用空间矢量调制方式,直流电压利用率得到了提高,采用双闭环结构,电压外环输出作为电流指令,电流内环则控制输入电流,使之快速跟踪电流指令,其动态响应速度较快、限流容易、控制精度高,在工程实际中得到了应用。

(2) 非线性控制策略

由于电压型 PWM 整流器属于非线性混合控制系统, 基于小信号模型用线性控制方法进行研究已不适应^[4]。对此, 为提高整流器的性能, 应用非线性控制理论或新的控制方式研究电压型 PWM 整流器控制系统, 成为国内外学者研究的新热点。各种非线性控制策略见后述。

2. 功率控制

从能量的角度看, 在交流电压一定的情况下, 如能控制 PWM 整流器的瞬时功率(有功和无功)在允许的范围内, 也就间接控制了瞬时电流(有功和无功)在允许的范围内, 此种控制策略即为直接功率控制(DPC)^[5]。在20世纪90年代初, Tokuo Ohnishi 提出了一种将瞬时有功功率、无功功率用于 PWM 变换器闭环控制系统中的新型控制策略^[6], 随后 Toshihiko Noguchi 等学者进行了研究并取得了进展^[7]。整流器 DPC 系统结构为直流电压外环、功率控制内环结构, 根据交流电源电压及瞬时功率在开关表中选择整流器输入电压所需的开关量, 实现高性能整流。由于整流器直接功率控制采用了 bang-bang 控制, 与通常的电流控制策略相比, 直接功率控制 PWM 整流器具有更高的功率因数、响应快、高效率、算法和系统结构简单等优点, 日益引起国内外学者的关注。

3. 反馈线性化控制

反馈线性化控制通过适当的非线性状态和反馈变换, 使系统实现状态或输入/输出的精确线性化, 从而将复杂的非线性系统综合问题转化为线性系统的综合问题。它的理论基础是微分几何理论。非线性系统反馈线性化与传统的利用泰勒级数展开进行局部线性化近似的方法不同, 在线性化过程中没有忽略任何高阶非线性项, 因此, 这种线性化不仅是精确的, 而且是整体的, 即线性化对变换有定义的区域都适用。

由于电压型 PWM 整流器数学模型具有仿射非线性系统的形式, 符合反馈线性化条件, 可实现反馈线性化控制^[4]。电压型 PWM 整流器采用反馈线性化控制策略, 加速了直流电压响应, 直流电压跟踪比常规的 PI 调节器控制的整流器速度快, 电流波动小; 同时电容器的电容量大大减少, 亦可减少设备的成本及所占空间^[8]。

4. 基于 Lyapunov 稳定理论的控制

现行的大多数 PWM 整流器控制策略是基于小信号线性模型, 应用线性控制理论进行设计的。因此, 系统的状态和输入只有在小干扰的情况下能够保证系统的稳定, 在大范围大干扰的情况下, 难以使系统稳定。为保证电压型 PWM 整流器在大范围、大干扰的情况下使系统稳定运行并具有良好的动、静性能, 国内外学者已将 Lyapunov 稳定理论应用到系统控制设计中^{[9][10]}。对于非线性系统, 只要找到合适的 Lyapunov 函数, 就可利用该函数对控制器进行设计。利用 Lyapunov 稳定理论设计的控制器, 在负载电流跃变时, 直流电压呈现快速响应, 且

动态压降小；电源线电流也呈现快速响应，且很快和电源电压同步。

5. 基于无源控制理论的控制

无源性是与系统外部输入、输出相关的概念。系统的能量由初始时刻到目前时刻的增长量小于或等于外部注入的能量总和，表明无源系统的运动总是伴随着能量的损失^[11]。无源控制的本质是能量控制，即按系统的控制要求确定系统的能量分布，以获得最佳的控制效果。国外学者 R. Ortega 等将无源性控制理论用于 PWM 整流器控制器设计中，取得了良好的控制效果^{[12][13]}；国内已开始无源控制理论的应用研究，取得了进展^[14~15]。研究电压型 PWM 整流器采用的数学模型为欧拉-拉格朗日（Euler-Lagrange, EL）和具有耗散的端口受控哈密顿（Port Controlled Hamiltonian with Dissipation, PCHD）模型。根据系统控制要求，通过选择合适的存储函数，采用合适的阻尼注入方法，设计无源控制器^[16~17]。由于整流器 EL、PCHD 模型中有反对称矩阵，简化了无源控制律。无源控制器使整流器具有更好的动、静性能，对负载扰动具有强的鲁棒性，因此，基于无源控制理论的整流器控制是一种优秀控制策略。

6. 基于自抗扰技术的控制

上述谈及的各种非线性控制策略都是基于准确的电压型 PWM 整流器数学模型和参数为定值的情况下提出的，由于实际工程中存在着各种扰动（如参数摄动、电源扰动等），这些扰动影响了整流器的性能，严重时使整流器不能实现电能“绿色变换”。对此，可利用自抗扰技术^[18~19]对整流器实施控制。自抗扰控制器（Auto/Disturbances Rejection Controller, ADRC）由非线性跟踪—微分器（Tracking-Differentiator, TD）、扩张状态观测器（Extended State Observer, ESO）和非线性状态误差反馈（Nonlinear State Error Feedback, NLSEF）三个部分组成。TD 用来实现对系统输入信号的快速无超调跟踪，并能对其给出良好的微分信号；通过 ESO 对系统的状态和扰动分别进行估计；最后，利用 NLSEF 获得扰动分量的补偿作用。

7. 基于反步法的控制

反步设计法，又称后推法^[20]，其基本设计方法是从一个高阶系统的内核开始（通常是系统输出量满足的动态方程），设计虚拟控制律保证内核系统的某种性能，如稳定性、无源性等；然后对得到的虚拟控制律逐步修正算法，但应保证既定性能；进而设计出真正的镇定控制器，实现系统的全局调节或跟踪，使系统达到期望的性能指标。反步设计法适用于可以状态线性化或具有严格参数反馈的不确定非线性系统，可用符号代数软件较为方便地实现。基于反步法对整流器实施控制，动、静性能得到了明显的改善。

除了上述非线性控制策略外，参考文献 [21~22] 采用滑模变结构理论设计整流器的控制器，参考文献 [23] 采用逆系统方法研究了整流器控制问题，

获得了良好的效果。

1.1.2 电压型 PWM 整流器控制研究趋势

1. 非线性控制策略分析

(1) 功率控制

功率控制策略估算的瞬时功率值不仅有基波分量, 还有谐波分量, 提高了总功率因数和效率。系统没有电流环和复杂的算法, 有功和无功功率得到了精确控制, 其误差由功率滞环比较器的滞宽决定; 根据开关表中选取所需的开关信号, 系统具有结构简单、响应快的特点。由于功率滞环比较器不能完全跟踪按时间变化的信号, 对此需采用高的开关频率 (如 80kHz), 而且频率不稳定, 给滤波器设计带来困难。

(2) 反馈线性化控制

反馈线性化控制策略需用两相同步旋转 dq 坐标系中的数学模型。状态反馈线性化控制策略虽可使非线性系统变为线性系统, 用线性系统的设计方法进行系统设计, 可加速系统的响应。存在的问题在于解耦矩阵、反馈控制律复杂, 有时存在奇异性, 导致运算复杂, 需要高速数字信号处理器 DSP。

(3) 基于 Lyapunov 稳定理论的控制

基于 Lyapunov 稳定理论的控制策略可保证系统在大范围内干扰的情况下稳定, 问题在于必须设置一个合适的 Lyapunov 函数。尽管采用反映系统储能的数量来构成能量函数, 但 Lyapunov 能量函数向系统期望点收敛速度不可控, 导致动态性能不理想。

(4) 基于无源控制理论的控制

无源控制的本质是能量控制, 即按系统的控制要求确定系统的能量分布, 以获得最佳的控制效果。基于电压型 PWM 整流器的 EL、PCHD 模型, 根据系统控制要求, 通过选择合适的存储函数, 采用合适的阻尼注入方法, 可设计出高性能无源控制器。由于 EL、PCHD 模型中有反对称矩阵, 简化了无源控制律, 增强了系统控制的实时性。

(5) 基于自抗扰技术的控制

利用自抗扰技术设计整流器控制器, 实现实际工程中存在着各种扰动 (如参数摄动、电源扰动等) 的观测与补偿, 提高了整流器的性能。这种技术的优点是: 安排过渡过程解决了“快速性和超调性之间的矛盾”, 不用反馈也能实现“无静差”, 避免了积分反馈的副作用, 统一处理了确定系统和不确定系统的控制问题。

ADRC 的不足是在被控对象阶数较低 (如小于 3) 时, 根据对象模型的变化范围适当地选取观测器中的非线性函数及相应的参数, 会取得较好的控制效果,

但当对象模型阶数大于3时,要得到一组满意的非线性函数及相应的参数并非易事,同时计算量大,导致控制周期变长,实时性差。

(6) 基于反步法的控制

反步设计法的基本思想是将复杂的非线性系统分解成不超过系统相对阶数的子系统,然后为每个子系统设计部分 Lyapunov 函数和中间虚拟控制量,以至“后退”到整个系统,将它们集成起来完成整个控制律的设计。反步设计法适用于状态线性化或具有严格参数反馈的不确定非线性系统,可用符号代数软件较为方便地实现。反步设计法的缺点是不能对电气参数进行补偿,且计算量大,限制了实测值。

2. 非线性控制研究趋势

(1) 直接功率控制研究

由于电压型 PWM 整流器采用功率控制,可从根本上解决控制的问题,即实现功率(或能量)的控制,也可实现电流的控制(电源电压一定);由于功率控制属标量控制,实现更为容易。因此,需研究完善直接功率控制策略,进一步提高整流器的性能。

(2) 非线性控制理论的应用

上述介绍的非线性控制理论在电压型 PWM 整流器中的应用,不同程度地改进了整流器的性能;基于无源控制理论的控制策略可使整流器控制器结构简单,通过合适的能量成形和阻尼注入,可获得好的动态和静态性能,具有其他控制策略不可比拟的优点。虽然反馈线性化控制策略控制律比较复杂,但它的直流电压跟踪负载变化快,可减少直流电容量;对于解耦矩阵的奇异点问题,实际工程中可通过给导致奇异点的量预置数予以解决;因此,随着高速数字信号处理器的出现,反馈线性化控制策略也是有发展前途的。上述两种控制策略都是基于精确的数学模型和参数值,为增加系统的抗扰动性和鲁棒性,应将自抗扰技术与无源控制、反馈线性化控制策略相结合,研究出更优秀的控制策略。

1.2 电压型 PWM 整流器性能指标

对电压型 PWM 整流器最基本性能要求是:交流侧功率因数高(接近1),交流电流的谐波电流在允许的范围内;直流侧的直流电压可控(在输入电压变化时或负载变化时保持恒定值或保持在任意的指令值),直流电压中的交流分量,即纹波电压被控制在允许的范围内。整流器的效率、重量、体积、成本、电磁干扰(EMI)和电磁兼容(EMC)以及静态和动态控制精度、对控制指令的响应特性也是评价整流器的重要指标。^[24]

1.2.1 直流侧性能指标

1. 电压波形系数

电压波形系数 (Form Factor, FF) 定义为输出电压有效值 U_D 与直流电压平均值 U_{DC} 之比, 即 $FF = U_D / U_{DC}$ 。

2. 电压纹波系数

电压纹波系数 (Ripple Factor, RF) 定义为整流器输出电压 u_{DC} 中除 U_{DC} 外的交流谐波电压分量的有效值 U_H (又称为纹波电压) 与输出直流电压平均值 U_{DC} 之比, 常用 γ_u 表示, 即

$$\gamma_u = RF = \frac{U_H}{U_{DC}} \quad (1-1)$$

输出直流电压中交流谐波电压分量的有效值 U_H 可用输出电压有效值 U_D 与直流电压平均值 U_{DC} 表示, 即 $U_H = \sqrt{U_D^2 - U_{DC}^2}$ 。则有

$$\gamma_u = \frac{U_H}{U_{DC}} = \sqrt{\left(\frac{U_D}{U_{DC}}\right)^2 - 1} = \sqrt{FF^2 - 1} \quad (1-2)$$

3. 电压脉动系数

电压脉动系数 S_n 定义为第 n 次谐波幅值 U_{nm} 与直流电压平均值 U_{DC} 之比, 即 $S_n = U_{nm} / U_{DC}$ 。

1.2.2 交流侧性能指标

1. 输入电流总畸变率

交流输入电流中的除基波电流外通常还含有各次谐波电流, 输入电流谐波因数或者总畸变率 (Total Harmonic Distortion, THD) 定义为基波电流外的所有谐波电流有效值与基波电流有效值之比, 即

$$THD = \frac{\sqrt{I_s^2 - I_{s1}^2}}{I_{s1}} = \left(\left(\frac{I_s}{I_{s1}} \right)^2 - 1 \right)^{\frac{1}{2}} = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_{sn}^2} / I_{s1} \quad (1-3)$$

式中, I_{sn} 为第 n 次谐波电流有效值; 对于 380V 交流电源, $THD \leq 5\%$ 。

2. 输入功率因数

输入功率因数 (Power Factor, PF) 定义为交流电源输入有功功率平均值 P_{AC} 与其视在功率 S 之比, 即 $PF = P_{AC} / S$, $S = U_s I_s$ 。

若输入电压、电流为无畸变的正弦波, 若谐波电压、电流在一个周期内平均功率为 0 (瞬时功率不为 0), 只有同频率的基波电压、电流形成有功功率, 则有

$$P_{AC} = U_{SI} I_{SI} \cos\varphi$$

$\cos\varphi$ 为功率因数。

对于电压型 PWM 整流器，期望 $\cos\varphi = 1$ ，即实现单位功率因数 (Unity Power Factor, UPF)。

第 1 章 绪 论

随着工业的快速发展，电力电子技术的应用越来越广泛，特别是在新能源发电、电动汽车、工业电机驱动等领域，功率电子器件的应用日益广泛。功率电子器件的应用不仅提高了系统的效率和可靠性，还为实现绿色能源和节能减排提供了有力的技术支持。

2.1 PWM 整流器

2.1.1 电压型 PWM 整流器 (VSI) 的基本原理

电压型 PWM 整流器 (VSI) 的基本原理是利用功率半导体器件 (如 IGBT、MOSFET 等) 的开关作用，将直流电压通过 PWM 调制转换为交流电压。其核心思想是通过控制开关器件的导通和关断时间，使得负载两端的电压平均值等于所需的交流电压。VSI 广泛应用于电动汽车、工业电机驱动等领域。

2.1.1 电压型 PWM 整流器 (VSI) 的基本原理

其基本原理如图 2-1 所示。图中展示了 VSI 的基本电路结构，包括直流电源、功率半导体器件 (IGBT 和反并联二极管) 以及负载。通过 PWM 调制，直流电源的能量被转换为交流能量，驱动负载工作。VSI 具有效率高、功率密度大、控制灵活等优点，是现代电力电子技术的重要组成部分。



图 2-1 电压型 PWM 整流器 (VSI) 的基本原理图

第2章 电压型 PWM 整流器工作 原理及基本数学模型

本章根据电压型 PWM 整流器的主电路拓扑结构, 介绍整流器的工作原理。根据拓扑结构得到在三相 uvw 坐标系、两相静止 $\alpha\beta$ 坐标系及两相同步旋转 dq 坐标系中的数学模型。

2.1 电压型 PWM 整流器主电路拓扑结构

PWM 整流器分为电压型 (Voltage Source Rectifier, VSR) 和电流型 (Current Source Rectifier, CSR) 两类。电压型 PWM 整流器主电路拓扑结构有多种类型。电压型 PWM 整流器显著特点是直流侧接电容器, 对直流电压进行滤波, 获得平稳的直流电压。

2.1.1 不控和半控电压型整流器

采用二极管的电压型整流器如图 2-1a 所示, 这种不可控二极管整流器具有结构简单、造价低的优点; 但它仅允许电能从交流网侧流向直流侧。当整流器用于交一直一交变频调速系统时, 从电动机返回的能量只能消耗在由斩波器控制的直流侧电阻器上。二极管的输入电路存在低的功率因数和高谐波电流。这种整流器的另一个缺点是逆变器的输出电压总是小于交流电源电压。

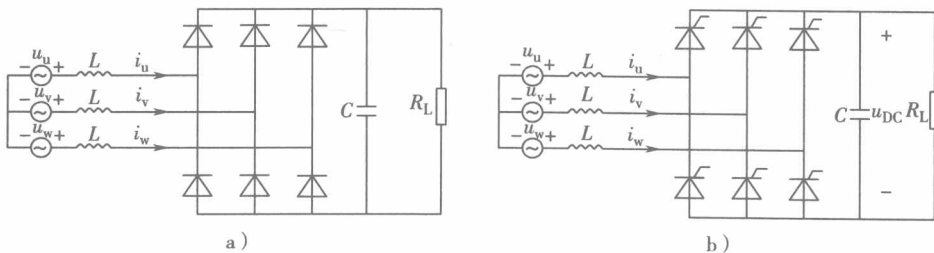


图 2-1 二极管和晶闸管电压型整流器