



现代电力电子工程

周继华 李 宏 编著



现代电力电子工程

周继华 李 宏 编著

西北工业大学出版基金资助出版

西北工业大学出版社

1998年9月 西安

(陕)新登字 009 号

【内容简介】 本书以全控型器件构成的各类功率变换装置为主线条,对晶闸管构成的相控整流电路作了简要的阐述。着重分析 PWM 整流及逆变理论,以及基于 PWM 控制方式的矩阵式交-交变换器和谐振直流环节(软开关)逆变技术。突出了现代电力电子工程的特点。全书共分 8 章:第 1 章为引论;第 2 章介绍各类功率半导体器件及驱动电路;第 3 章、第 4 章论述 AC/DC 和 DC/AC 变换理论及工程设计;第 5 章为 DC/AC 变换在感应电机控制中的应用;第 6 章讲述 AC/AC 变换原理;第 7 章分析谐振直流环节逆变器基本理论;第 8 章论述 DC/DC 变换理论及应用。

本书注重功率变换理论的完整性、先进性和严密性,突出工程设计和应用技术,理论体系清晰严谨,可供高等工科院校电类、控制专业本科高年级学生及研究生学习用,也可供科研及工程技术人员工作参考。

现代电力电子工程

周继华 李 宏 编著

责任编辑 李 珂

责任校对 耿明丽

*

©1998 西北工业大学出版社出版发行

(邮编:710072 西安市友谊西路 127 号 电话:8493844)

全国各地新华书店经销

西北工业大学出版社印刷厂印装

ISBN 7-5612-1056-6/TP·153

*

开本:850×1168 毫米 1/32 印张:17.5625 字数:430 千字

1998 年 9 月第 1 版

1998 年 9 月第 1 次印刷

印数:1-2 000 册

定价:38.00 元

购买本社出版的图书,如有缺页、错页的,本社发行部负责调换。

前 言

电力电子学在经历了近 40 年的飞速发展后,功率变换理论和变换拓扑日趋完善。全控型功率半导体器件进入了高频化、大容量、易驱动、模块化和智能化的时代;各种高性能微处理器及专用大规模集成电路,为功率变换控制提供了良好的硬件基础;脉冲宽度调制技术和离散脉冲调制技术,使变换器输出具有优良的波形品质和线性度;现代控制理论,如模型参考自适应控制、滑模变结构控制及以神经网络和模糊控制为主的智能控制在功率变换系统中获得了成功的应用;传感技术和微电子技术的发展也有力地促进了电力电子技术的发展。上述理论基础和技术基础的支撑,使一门令人瞩目的工程学科——现代电力电子工程——得到迅速发展和不断完善。

该学科的综合性的特点,使这一领域的文献迅速增多,门类繁杂。到目前为止,在半导体变流技术、晶闸管及晶体管逆变器方面已有不少著作,但作为一门学科进行系统论述的著作尚少。作者试图通过对功率变换理论和变换拓扑的归类论述,为日益广泛的读者提供一个完整、明晰的学科概念。书中既借鉴了前人的研究基础,也融入了作者及其同事们多年从事该学科研究的成果及经验。希望读者通过本书的阅读,能获得设计、应用和发展电力电子系统的技术基础知识。

本书撰写分工:周继华负责第 1 至第 7 章并统稿,李宏负责第 8 章及全书插图底图绘制。在撰写中,陈景熙教授和焦振宏副教授曾对本书提出过宝贵意见,西安交通大学黄俊教授和西北工业大学史义凯教授对全书进行了审阅,在此一并表示感谢。书末附有参

考文献,以表达对文献作者的感谢,同时提供给读者,为作更深入研究时参考。

由于我们水平有限,经验不足,书中难免有不妥之处,敬请读者批评指正。

编著者

1997年8月

目 录

第 1 章 引论	1
1.1 电力变换的基本原理	1
1.2 发展概况及意义	6
1.3 电力电子变换装置应用领域	8
1.4 功率变换的基本类型	11
第 2 章 功率半导体器件及驱动技术	15
2.0 功率半导体器件的发展	15
2.1 功率二极管	16
2.2 半控型功率器件	18
2.2.1 普通晶闸管	18
2.2.2 其他半控型晶闸管	22
2.2.3 双向晶闸管	23
2.2.4 晶闸管触发电路	24
2.3 双极型功率器件	26
2.3.1 功率晶体管	27
2.3.2 门极可关断晶闸管	39
2.3.3 静电感应晶闸管	47
2.4 单极型功率器件	50
2.4.1 功率 MOSFET	50
2.4.2 静电感应晶体管	60
2.5 复合型器件	61

2.5.1 绝缘栅晶体管	62
2.5.2 MOS 控制晶闸管(MCT)	71
2.6 功率集成电路(PIC)	73
2.7 新型半导体材料	73
第3章 AC/DC 变换原理与应用	75
3.0 引言	75
3.1 相控整流电路	76
3.1.1 单相全桥相控整流电路基本分析	76
3.1.2 功率、谐波及电网畸变	83
3.1.3 各类相控整流拓扑	88
3.2 相控整流电路工程设计举例	97
3.2.1 电镀电源及其指标	97
3.2.2 整流电路拓扑选择	97
3.2.3 变压器漏抗的影响	102
3.2.4 相控整流电路外特性	105
3.2.5 带平衡电抗器的六相半波相控整流器	106
3.2.6 整流变压器参数计算	110
3.2.7 整流器件选择与安全使用	113
3.2.8 电抗器电感值计算	115
3.2.9 相位控制	117
3.2.10 电流(电压)闭环控制	124
3.2.11 电镀电源电路原理图	126
3.3 单相高功率因数整流器	128
3.3.1 单相高功率因数升压整流器基本电路	132
3.3.2 滞后电流控制	143
3.3.3 单相高功率因数降压整流器	146
3.4 三相高功率因数整流器	150

3.4.1	三相桥式二极管整流电路	151
3.4.2	单开关三相升压整流器	155
3.4.3	三相电压型 PWM 整流器	161
3.4.4	三相电流型 PWM 整流器	168
第 4 章 DC/AC 变换原理与应用		172
4.0	引言	172
4.1	有源逆变	173
4.1.1	产生逆变的条件	173
4.1.2	三相桥式逆变电路	175
4.1.3	三相桥式逆变电路波形分析	177
4.2	绕线转子异步电动机串级调速原理	183
4.2.1	串级调速原理	183
4.2.2	采用有源逆变的串级调速	184
4.3	单相 DC/AC 变换	189
4.3.1	单相方波逆变器原理	189
4.3.2	单相 SPWM 逆变器原理	193
4.3.3	单相逆变器输出谐波分析	198
4.4	三相电压型逆变器	199
4.4.1	三相电压型方波逆变器	200
4.4.2	三相电压型 SPWM 逆变器基本原理	206
4.5	SPWM 波形调制理论	208
4.5.1	术语和定义	209
4.5.2	电压正弦 SPWM 基本调制方法	213
4.6	SPWM 逆变器电压、电流特征	226
4.6.1	电压特征	226
4.6.2	电流特征	228
4.7	逆变器输入级设计分析	233

4.7.1	软启动电路	234
4.7.2	中间滤波器设计	236
4.7.3	整流元件	239
4.8	电压型 SPWM 逆变器的开关特性及改善方法	241
4.8.1	开关模式	241
4.8.2	GTR 的开通响应	243
4.8.3	GTR 的关断响应	246
4.8.4	吸收网络	250
4.8.5	联锁延时对逆变器输出波形的影响	252
4.8.6	逆变器缓冲(吸收)电路	255
4.9	SPWM 波形生成	262
4.9.1	采用微处理器生成 SPWM 波形的基本原理	262
4.9.2	SPWM 波形生成专用微处理器	264
4.10	UPS 及 VSCF 系统	269
4.10.1	不间断电源(UPS)	269
4.10.2	变速恒频发电系统(VSCF)	273
第 5 章	DC/AC 变换在感应电机控制中的应用	275
5.0	引言	275
5.1	感应电动机的标量控制	276
5.1.1	理论依据	276
5.1.2	可用于开环运行的电压型 SPWM 变频调速器	281
5.1.3	回馈制动装置	287
5.1.4	通用变频器(VVVF)控制系统	292
5.1.5	具有转差率调节的 u_1/f_1 恒定的速度闭环控制	296
5.2	坐标变换及感应电动机动态模型	300
5.2.1	静止坐标系感应电动机数学模型	300
5.2.2	坐标变换	307

5.2.3 感应电动机在 d, q 系统的数学模型	313
5.2.4 基于动态模型的标量控制	325
5.3 感应电机矢量控制变频调速系统	325
5.3.1 矢量控制的直接法	327
5.3.2 矢量控制的间接法(转差频率控制)	331
5.3.3 矢量控制的工程实现	332
5.3.4 空间矢量 SPWM 波形生成原理(磁链轨迹控制)	342
5.4 直接转矩控制	349
5.4.1 直接转矩控制的基本原理	349
5.4.2 研究课题	351
5.5 其他控制理论在电机控制中的应用	352
5.5.1 模型参考自适应控制	352
5.5.2 滑模(变结构)控制	360
5.5.3 智能控制在电机控制中的应用	364
5.6 电流型逆变器及同步电机控制	367
5.6.1 基本电路及运行特征	368
5.6.2 强迫换流	371
5.6.3 采用电流型逆变器的同步(无换向器)电机控制	377
第 6 章 AC/AC 变换	384
6.1 交流调压器	384
6.1.1 单相交流调压电路	384
6.1.2 三相交流调压电路	389
6.2 相控交—交变换器	396
6.2.1 基本工作原理	396
6.2.2 三相半波及三相桥式电路	398

6.2.3 控制波形生成	403
6.2.4 相控式交—交变换器谐波及功率因数	413
6.3 矩阵式(PWM)交—交变换器	414
6.3.1 矩阵式交—交变换器基本电路	414
6.3.2 矩阵式正弦波调压器	416
6.3.3 矩阵式变频器控制方式	424
第7章 谐振直流环节逆变器	431
7.0 引言	431
7.1 基本拓扑和工作原理	433
7.2 RDCLI 主回路谐振参数计算	441
7.3 有源钳位谐振直流环节逆变器	445
7.4 谐振直流环节逆变器控制	450
7.5 谐振直流环节逆变器交流传动系统	461
7.6 谐振直流环节拓扑比较	465
7.7 多谐振开关概念及其在三相大功率逆变器中的推广	467
第8章 DC/DC 变换及应用	478
8.1 无变压器 DC/DC 变换器	478
8.1.1 降压型(串联)开关稳压器	479
8.1.2 升压型(并联)开关稳压器	481
8.1.3 升、降压(电感储能)型开关稳压器	484
8.1.4 库克(CUK)变换器	485
8.1.5 桥式 PWM DC/DC 变换器	488
8.2 悬浮输出 DC/DC 变换器	491
8.2.1 单端反激变换器	492
8.2.2 单端正激变换器	494

8.2.3 扩展占空比 q 改变单端正激变换器性能	496
8.2.4 单端双正激变换器	503
8.2.5 推挽式变换器	504
8.2.6 桥式变换器	505
8.3 DC/DC 变换器控制	515
8.3.1 电压型 PWM 调制器	515
8.3.2 电流型 PWM 调制器	519
8.4 DC/DC 变换弧焊电源	524
8.4.1 焊接电弧要求及弧焊电源外特性	526
8.4.2 主电路设计	528
8.4.3 弧焊电源控制系统设计	536
参考文献	548

第 1 章 引 论

现代电力电子工程是研究电能变换原理及变换装置的综合性学科,它利用半导体功率器件及无源功率元件、功率变换理论、传感技术、现代控制理论、微处理器及大规模集成电路,以功率变换电路为核心对电能进行变换和控制。它是在几十年的工程实践中逐渐完善发展起来的。1956 年,美国 Bell 电话公司发明了 PNP 可触发晶体管。1957 年美国通用电气(GE)公司对其进行了商业化开发,并正式命名为晶体闸流管,简称为晶闸管(SCR)或可控硅,开创了功率电子学的新时代。在此之前,用半导体硅或锗材料制造的功率二极管已被用于各种整流电路,基本的整流、逆变拓扑也已在汞弧(水银)整流器时代被确立。这些成就为近代电力电子技术发展奠定了坚实的基础。

80 年代以来,采用全控型(自关断)功率器件和脉冲宽度调制(PWM)原理构成的功率变换装置,已广泛用于工业、交通、能源及军事等各个领域,采用谐振原理的软开关逆变技术也逐步进入实用阶段。它标志着电力电子技术以全新的概念跨入了蓬勃发展的时代。

本章将简要阐述电力变换的基本原理、发展概要和应用需求。1.4 节中按照变换功能对变换电路给以分类,后续各章节将按照这种分类方法进行系统性研究。

1.1 电力变换的基本原理

电力变换系统的基本组成如图 1-1 所示。它由待变换电源、

耦合环节、功率变换拓扑、信息检测与反馈、控制电路、辅助电源以及负载组成。图中箭头方向表示,理想的电力变换系统主回路功率流应该是双向的。图中各方框的功能简述如下:

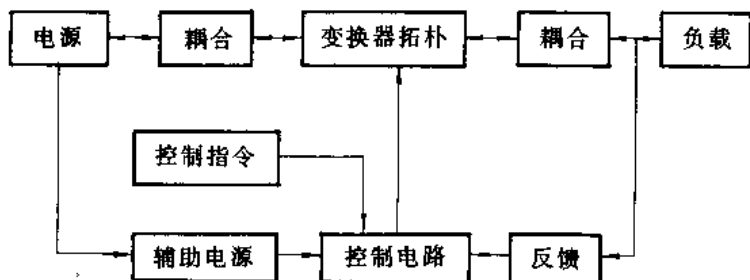


图 1-1 电力变换系统基本组成框图

(1) 电源 一般指交流电网电源或整流后的直流电源,也可以是设备或系统内发电机送出的交流电源。包括各类蓄电池、太阳能、风力及潮汐转换的电及化学能转换的电。在某些应用中,交流电源被变压器升降压后才送到变换器拓扑中。

(2) 耦合环节 耦合环节在系统中的作用是滤波、缓冲储能、确定电源属性。它一般由无源功率元件(电感器、电容器以及其组合)构成。耦合环节在系统中的位置与变换方式有关,在 AC/DC 变换电路中,它位于变换器拓扑和负载之间;在 DC/AC 变换电路中,它位于电源和变换拓扑之间;在 DC/DC 变换中,变换拓扑两侧都需要设置此环节;在 AC/AC 变换中一般不设置耦合环节,运行于 PWM 方式的矩阵式交—交变换例外。耦合环节的滤波及储能作用在电路分析中详述,此处仅就电源属性作如下定义:

在功率变换电路中,半导体功率器件一般以开关方式工作,分析电路时必须知道某种状态或某一瞬间电源或负载的性质(电压或电流源)。理论上说,电压源具有零值戴维南阻抗,而电流源的戴

维南阻抗为无穷大。受实际物理系统限制,将此概念引申如下:

电压源定义:当一个电源(或负载)两端之间的电压不能突变时,该电源被称做电压源。电容器及任何与电容器并联的电源(或负载)均为电压源,因为电容两端的电压不能突变。

电流源定义:当一个电源(或负载)两端之间的电流不能突变时,该电源被称做电流源。电感及任何串有不可忽略电感的电源(或负载)均为电流源,如电网、发电机、电动机、变压器等。

一般情况电压源不允许短路,电流源不允许开路。

(3) 变换器拓扑 变换器拓扑可以理解为变换主回路(耦合环节除外)所有元器件的平面布置。确定变换主回路结构的基本方法被称为电力电子电路拓扑研究和综合分析。概括说,变换器拓扑实质上是按一定规则联接的一组半导体器件阵列,其中包括无源及有源功率元件。拓扑中元件数量可以从几个到几百个。在不同的拓扑中,不控型、半控型及全控型功率器件可能同时存在或独立出现。为了防止开关瞬间大电流、高电压同时作用于功率器件,抑制尖峰电压、电流并扩大器件的安全工作区,一般要在器件上并联续流二极管及吸收网络。软开关逆变器无需吸收电路。变换器拓扑还应包括电流、电压及温度传感器。

现代电力电子工程的主要研究方向之一是寻求变换主电路的拓扑优化。拓扑优化的概念可以理解为:在功率变换主回路设计中,选择网络中各元件的位置,以便互连起来尽可能经济而又能满足全部变换性能指标和限制条件。

由于变换器拓扑在对电源幅度、频率及波形变换的同时,要担负传递功率的任务,因此拓扑优化的目标可归纳为高频化、高变换效率、高功率因数及低变换损耗。高频化的主要目的,是减少滤波器(耦合环节)尺寸、提高波形质量、减少变换器体积重量。单纯依靠高速功率器件实现高频化,在硬性开关方式下会增加开关损耗。依靠拓扑优化研究,提出了软开关逆变技术,既达到了高频化目的

又获得了低开关损耗,提高了变换效率,降低了变换器电磁辐射。为了使变换器对电网具有较高的功率因数,传统的作法是采用无源元件滤波或功率因数补偿。但对于相控整流这类变换器,无功补偿设备昂贵,采用 PWM 方式有源无功补偿,或直接采用 PWM 方式高功率因数整流则获得了非常理想的效果。上述论述是为了说明,为了获得理想的功率变换装置,既要依靠半导体功率器件的发展,又要着眼于变换拓扑的优化设计。当然新拓扑设计必然伴随着新的控制技术的诞生,本书正是按照这种思路撰写的。

(4) 控制电路 控制电路的主要功能是,为变换器拓扑中功率器件提供门极(控制极)驱动信号。特定应用的驱动信号是根据控制指令的比较综合,通过某种调节规律(控制策略或控制算法)及调制方式而获得的。在控制电路中还应包括时序控制、各种保护电路、电位隔离及驱动功率放大。由于功率变换装置及负载通常是一个非线性、时变的高阶复杂系统,控制作用对变换器输出特性及运行过程起着决定性作用,因而相应的控制方式、控制策略和控制手段得到迅速发展和完善。

产生控制波形的方法称为控制方式。最初的晶闸管采用延时脉冲控制其导通相位。随着各种自关断器件的实用化,为减少输出波形中谐波分量,1964 年德国的 A. Schonung 和 H. Stemmler 首次把通讯工程中脉冲宽度调制理论(PWM)移植应用到电力变换装置中,它具有功率因数高、可同时实现变频变压及抑制谐波等优点,从而成为功率变换的核心技术。其应用范围涉及斩波、整流、逆变、交—交变换等各种电路,目前仍占据主导地位。为了适应谐振式软开关逆变器控制特点,开关点必须选择在直流母线电压过零的时刻。常用的离散脉冲调制方式有线性 Delta 调制、 $\Sigma\delta_m$ 调制及整数脉冲调制,某些性能更好的调制方式正处于研究之中。还应该提及的是,在功率变换的控制方式中脉冲幅度调制(PAM)和脉冲频率调制(PFM)也得到广泛的应用。

大部分功率变换系统对动态性能和稳态精度都有较高的要求,因而必须采用相应的控制规律或控制策略。对于线性负载通常采用比例加积分加微分(PID)控制规律。对交流电机这样的非线性控制对象,通常要进行解耦运算,最典型的是基于坐标变换解耦的矢量控制算法。为了针对对象参数随温度、频率等参量变化情况下获得理想的控制效果,各种现代控制理论,如滑模自适应控制、变结构控制、直接转矩控制,基于神经网络和模糊数学的智能控制在功率变换技术中已获得实际应用。

实现调制方式和控制规律,在工程上必须有实际的物理系统,实现这种物理系统所采用的技术称为控制手段或控制技术。早期采用分立元件构成控制电路,这种电路可以是数字的或模拟的。复杂的功率变换控制系统,通常采用专用大规模集成电路或微处理器。微处理器及少量外围芯片构成的控制电路,硬件成本低;消除了漂移并具有较强抗干扰能力;其硬件可以设计成通用形式而软件易改动和更新;信息存储方便,运算能力强;便于运行监控及故障诊断;在复杂系统中可方便地实现分级控制、非线性补偿及参数在线辨识。功率变换器中常用的微处理器芯片(CPU)有intel系列的8031、8051、80C196,德克萨斯仪器公司推出的TMS320系列芯片。其中TMS320 C30是32位浮点运算型,指令周期为60 ns运算速度快、功能强。另一方面,功率变换器专用大规模集成电路应用也很普通,例如SPWM信号发生器HEF4752、4520等。采用CMOS的大规模集成电路主要由门阵列构成,这些门阵列和一些模拟器件被集成在一起完成某一专门功能。可编程门阵列可以像EPROM那样被擦除和编程,以适应灵活多样的逻辑系统设计。

(5) 反馈环节 反馈电路的功能是对来自传感器的检测信号进行系数变换和电位隔离,使之成为适合于控制运算的变量。对这级信号变换的要求是不能有附加相移和噪声干扰的。

(6) 辅助电源 辅助电源向控制系统提供多路浮地驱动电源