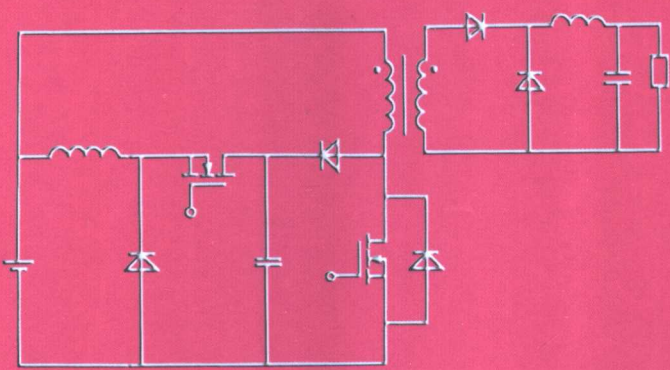


电能变换技术丛书

高频功率开关变换技术



邢岩 蔡宣三 编著



电能变换技术丛书

高频功率开关变换技术

邢 岩 蔡宣三 编著



机械工业出版社

本书着重论述高频功率开关变换技术的基本原理和分析方法,如开关变换器的基本电路拓扑、等效和对偶,吸收电路和软开关技术,高频磁性元件的原理及应用;介绍高频开关变换技术的最新发展,如同步整流、电压调整器模块、磁-后置式调节技术、有源功率因数校正和集成电力电子技术等;分析高频开关变换系统的控制方式、瞬态建模分析方法和系统综合设计方法;还涉及开关电源的电磁兼容性问题。

作者力图在本书内反映高频功率开关变换技术的最新发展,同时又兼顾高层次科研开发常用的开关变换器及其系统的分析设计方法。

本书可作为电力电子领域的研发和工程技术人员的参考用书,也可作为大学自动化、电机与电器、电力电子与电力传动等专业的教师和研究生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

高频功率开关变换技术/邢岩,蔡宣三编著.-北京:

机械工业出版社,2005.1

(电能变换技术丛书)

ISBN 7-111-15626-9

I. 高… II. ①邢…②蔡… III. 高频-功率变换器-开关控制 IV. TM761

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第119834号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:牛新国 王 玫

封面设计:陈 沛 责任印制:杨 曦

成都新华印务有限责任公司印刷·新华书店北京发行所发行

2005年5月第1版·第1次印刷

787mm×1092mm 1/16·18印张·410千字

0 001-4 000册

定价:30.00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)68326294

封面无防伪标均为盗版

电能变换技术丛书

编辑委员会

主任：蔡宣三

副主任：严仰光 牛新国 倪本来

委员：牛新国 王 玫 王 聪 毛三可

艾多文 刘凤君 刘胜利 严仰光

何湘宁 张卫平 张 立 张占松

张志国 李厚福 杨继深 沙 斐

陆 鸣 陈 坚 陈永真 陈建业

陈道炼 区健昌 赵良炳 侯振程

倪本来 倪海东 徐德鸿 崔鼎新

黄济青 龚绍文 路秋生 蔡宣三

执行主编：倪本来

序

电能是当今最重要的能源形式。很难想像失去电能支撑的文明世界如何运行。在所有的动力资源中，电能使用最方便，适用范围非常广，并且是清洁的。电能变换则是用电之门，是用好电的必由之路。

供人类使用的电能都是通过一些方法生产或收集得来的。世界上绝大部分的电能来自发电站，例如水电站、火力发电厂和核电站，发电站是交流电网的源头。燃油发电机是防备电网故障或远离电网的应急和补充。风力发电、潮汐发电等是自然能与电能之间的有效转换。太阳电池是太空最理想的发电装置。燃料电池、锂离子电池、镍氢电池、镍镉电池、铅酸蓄电池等是经过电化学反应而产生电能的固定或移动式电能载体。形形色色的干电池是一次性的微小电能载体。所有称得上“电池”的都是直流电的储蓄体。

直接从电网或电池汲取的原生态的电能（姑且称之为原电）在某种意义上都是“粗电”。在大多数情况下，使用这些“粗电”都不能尽如人意，譬如电网上的电就不一定好使。电网是共用的，宏观上有高峰期和低谷期之分，电网在高峰期和低谷期的电压存在差异；由于不同用户从电网支取电能的时机和电量的不确定性和偶然性，特别是大型设备的启动和停止，足以给邻近电网造成随机的瞬时冲击和定式落差；由于雷电、风暴、炎热等自然因素造成电网扰动甚至供电瞬时中断等，都将给敏感用户带来麻烦：设备运转失常、系统效率降低、计算机数据丢失、逻辑功能混乱，严重时还将造成系统硬件损坏，使系统工作陷于瘫痪。为此需要稳压器和 UPS 对电网下载的粗电进行整合和修补。

由于电池自身具有的电容性，电压瞬时波动可能比电网要小。不过电池在工作中也问题不少，最常见的是电池电量随工作时间的延长或用电量的加大会逐渐衰竭；另外，电池单体的电压较低，很少以其自然形态直接拿来使用，多数是串联或串并联组合，但很难保证串联或串并联组合中的每个单体的特性一致。为此，必须实施合理的充电、放电和监控。

太阳电池用来将阳光转换成电能，但阳光的照射会因向背、阴晴、昼夜、四季而不均衡，为此，需要对转换的电能进行收集储存，再经 DC-DC 或 DC-AC 变换，获得稳定的直流电和交流电；风力等自然能发电同样受自然因素牵制，借助风力等自然力传动的发电机输出的电力经常处于不稳定状态，也必须实行调整控制。

不管是电网、电池还是相对独立的供电系统，都存在电磁环境问题。即在运行中因环境电磁干扰（如雷电、汽车点火引发），或共享电源母线的“惹事”负载设备的电磁干扰，或 DC-DC、DC-AC 变换装置自身的电磁干扰，都能搅得“四邻不安”。

今天的电网面临的承载非常严酷。由于功率半导体开关器件的长足进步、控制技术日益先进，变流设备的功率等级提升极快；又由于采用变流举措的负载设备日益增多，其复杂的负载性质带来的负面影响突出。基于这些因素的电网存在功率因数低下、波形畸变、浪涌、相位丢失等不良境况。因此，电能质量控制刻不容缓，电力补偿、有源滤波、柔性输配电等电能变换技术在电网和用户之间能起到较佳的缓冲匹配作用。

能源问题在本世纪仍占据瞩目位置,人们追求在节约电能方面有卓越贡献的高效能供电设备和用电方法。在现实中,相当一部分电能消费是以驱动电动机的形式进行的,如机床、电动工具、电动汽车、城市轻轨、传动系统、机器人、风机、水泵、纺机、空调等等。直接用粗放的原电驱动,免不了要引入串联阻抗或并联阻抗,以控制和调节电动机的运行状态,而这些不得已介入的阻抗会白白消耗电能。为了将这些浪费掉的非常可观的电能拣回来,利用现代电能变换技术对电动机实行变频调速控制,具有很好的节电潜力。

照明用电据称占全球总体用电的20%,节电潜力巨大,起源于欧美的绿色照明浪潮大有席卷全球之势。绿色照明的主题词:最小耗电产生最大流明。除了新型电光源和新型发光介质外,以全新的电能变换技术装备的电子镇流器将是实现绿色照明的主要角色。

生产力越发展,技术越进步,环境问题越加突出。电能的生产、变换、使用在很大程度上影响到环境。电能的生产一般伴随二氧化碳、二氧化硫气体排放,前者是地球温室效应的参与者,后者是酸雨的成因,两者对环境危害都很大。少一点电能生产却能换得环境少一点恶化。生产发展必然要增加电力的需求,关键在于节约电力,减少电力的浪费。这要求我们的电源装置、电能变换系统提高效率。另外,干净的电磁环境也要求电能变换设备在电磁兼容性方面达标。节约电能、电磁兼容、无环境污染的绿色供电势在必行。

21世纪将是科学技术突飞猛进的时代,技术进步定会牵动电能变换技术需求急速膨胀。“电能变换技术丛书”在这一时刻呈献给读者,意在诠释电能变换技术的最新应用。但是电能变换技术是实用性极强的技术,服务于各种领域,内容异常丰富,丛书限于规模实难尽述。不过,我们仍然企望借助几个具有典型意义的层面,如高频功率变换、变频传动、电能质量控制等在学术、产业都呈热点的几个方面展示多彩的电能变换技术应用。丛书主要供中等技术水平的科技人员阅读,在概念和应用实例方面照顾到其他层面的科技人员。丛书的读者定位为电源技术、运动控制、电力电子、电子技术、信息技术、能源转换、过程控制等应用领域的工程技术人员,以及科技爱好者们。读者如能从“电能变换技术丛书”中得到启示,并能在自己的工作实践中获得应用,编者将足以自慰。本丛书从立意到选题到写作内容,定有不足之处,欢迎读者批评斧正。

“电能变换技术丛书”编辑委员会

前言

信息技术的迅速发展,极大地推动着高频功率开关变换技术的研究和应用。近年来,国内外电力电子技术界在高频开关功率变换器的拓扑、控制、电力半导体器件和磁性元件、建模和系统设计以及电力电子系统集成等方面,做了大量卓有成效的研究工作。本书作者在阅读分析国内外大量科技论文资料、总结作者多年的教学经验和科研成果的基础上编写了本书。其中的部分内容也是在蔡宣三教授讲学讲演稿和系列讲座的基础上充实修订完成的,部分新内容首次在国内参考书中系统地论述。

本书力图反映高频开关变换技术的最新发展,同时又兼顾高层次科研开发常用的高频开关变换技术及其系统分析设计方法。书中着重介绍开关变换技术的基本原理和研究方法,如开关变换器的基本电路、等效和对偶,吸收电路和软开关技术,高频磁性元件原理和应用;论述高频开关变换技术最新发展和新的分析方法,如同步整流、电压调整器模块、磁-后置式调节技术、有源功率因数校正和集成电力电子技术等;分析开关变换系统的控制方式、瞬态建模分析方法和系统综合设计方法;鉴于开关电源中 EMI 问题日益受到人们重视,我们特别邀请清华大学电机工程系姜建国教授撰写开关电源中的电磁干扰问题一章,供读者参考。

全书共分 14 章:

第 1 章简要回顾 20 世纪高频开关变换技术的进展历程和取得的成就;探讨高频开关变换技术的未来发展趋势,如新器件、新拓扑和新系统的研究。高功率密度、高效率、高性能、高可靠性、低噪声、低价格以及小型化等,仍然是今后高频开关变换技术的发展方向。

第 2 章介绍 DC-DC PWM 变换器的基本电路拓扑和分析方法、连续和断续工作模式、开关变换器电路的等效和对偶分析、DC-DC 变换器的三端 PWM 开关模型等。

第 3 章介绍吸收电路的作用、类型和几种常用吸收电路的组成及基本工作原理。以 Buck 变换器为例,重点讨论最基本、最简单的关断和开通两类无源吸收电路的原理,并介绍有极性组合吸收电路和 LC 无损吸收电路工作原理。

第 4 章讨论软开关技术及其应用。高频化可降低功率变换器的尺寸和重量,但也增大了开关损耗。高频软开关技术,可使开通/关断过程中电压和电流波形不交叠,从而减少了开关损耗和开关浪涌,提高了效率。本章介绍了软开关-脉宽调制变换器的工作原理和特点,包括 ZS-PWM、ZT-PWM 变换器,移相控制全桥 ZVS-PWM,混合 ZCZVS-PWM 变换器等;并分析了广义软开关技术的特点和意义。

第 5 章讨论同步整流(SR)的概念和意义、同步整流的控制时序;分析各种同步驱动方法的原理特点和适用拓扑,包括电压型自驱动、电流型驱动、控制驱动和混合驱动方式,介绍几种典型的 SR-变换器电路。

第 6 章介绍开关变换系统的电压型和电流型控制的基本原理和特点,以及新的控制方式,如电荷控制、单周控制等,以及控制驱动回路中的电气隔离方法。

第7章介绍有源功率因数校正 (APFC) 技术, 包括非线性电路功率因数的基本概念, 连续、断续和临界连续 Boost PFC 变换器的工作原理, PFC 变换器的电流控制方法, 几种单级单开关 PFC 变换器拓扑及其工作原理, 三相 APFC 技术, 简要介绍了典型 PFC 集成控制器 (UC3854、UC3855 和 L6561) 的基本原理和应用。

第8章介绍低压大电流输出电压调整器模块 (VRM) 的性能要求, 单通道和多通道 VRM、高压 (48V) 输入 VRM 拓扑, 讨论了元件和线路的寄生参数对 VRM 瞬态特性的影响。

第9章介绍高频开关变换器中的磁性元件特性、原理及应用, 高频磁性材料和参数, 着重分析了几种电感、变压器的特点, 设计原则和建模分析, 介绍了磁性元件集成的概念和基本方法。举例分析了磁放大器式后置电压调节器、压电式变压器的原理和应用等。

第10章介绍 DC-DC 变换器并联系统均流技术的意义, 分析了下垂法、主从均流法、自动均流法和民主均流法的控制原理, 简要介绍了 UC3907 均流控制芯片。

第11章研究功率开关变换器瞬态分析的建模方法, 结合实例着重介绍状态空间平均法和平均电路法。

第12章研究开关调节器的系统频域分析方法, 建立和分析功率开关变换器闭环系统的频域特性及校正方法, 还介绍了基于功率守恒法建立电流型控制的开关变换器系统模型的方法。

第13章介绍电力电子集成技术的意义和最新进展, 电力电子模块化、集成化的发展进程, 无源集成模块的发展, 多芯片功率模块 (MCM) 及其应用, 无引线键合的多层三维封装平面金属化集成电力电子模块和典型集成电力电子系统 (集成变频传动系统, 微处理器-VRM 集成系统, 集成分布电源系统)。

第14章结合几个具体电路, 从电磁干扰源、干扰耦合通道等方面, 介绍如何分析和研究开关电源的电磁干扰以及抑制电磁干扰的途径。

本书承南京航空航天大学赵修科教授审阅, 提出了宝贵意见, 在此表示衷心感谢。同时感谢王玫责任编辑的大力协助。

文中不妥之处, 敬请广大读者批评指正。

作者

2004年6月

目 录

序	
前言	
第 1 章 电力电子技术的发展和展望	
.....	1
1.1 电力电子技术 40 年进展的	
标志	1
1.1.1 电力半导体器件	1
1.1.2 高频化和软开关技术	2
1.1.3 电力电子集成技术	4
1.2 分布式电源结构	5
1.2.1 分布式电源系统的结构	5
1.2.2 PFC 变换器	6
1.2.3 电压调节器模块	6
1.2.4 全数字化控制	7
1.2.5 高频电力电子电路的电磁	
兼容性	7
1.2.6 电力电子的设计和测试技术 ..	8
1.3 高频磁性元件和磁技术	8
1.3.1 集成磁性元件	8
1.3.2 平面变压器	8
1.3.3 饱和电感	9
1.3.4 磁放大器后置电压调节器	9
1.3.5 高频磁技术	9
第 2 章 DC-DC PWM 变换器的	
电路拓扑	11
2.1 DC-DC PWM 变换器的组成	
和基本原理	11
2.1.1 DC-DC PWM 变换器的	
工作原理	11
2.1.2 降压、升压和升降压变换器 ..	12
2.1.3 DC-DC 变换器的工作模式 ..	13
2.1.4 Buck PWM 变换器的工作	
原理	13
2.1.5 DC-DC 变换器的特点	14
2.2 DC-DC PWM 变换器的	
基本电路	15
2.2.1 Cuk 变换器	15
2.2.2 SEPIC 变换器	16
2.2.3 六种 DC-DC 开关变换器	
基本拓扑	17
2.3 开关变换器的等效电路	17
2.4 开关变换器的对偶	19
2.4.1 电路的对偶	19
2.4.2 DC-DC 开关变换器中几个	
重要的对偶关系	19
2.4.3 功率半导体开关器件的	
对偶	20
2.4.4 DC-DC PWM 变换器的	
对偶	22
2.5 隔离式 DC-DC PWM	
变换器	23
2.5.1 单端隔离式 DC-DC	
变换器	23
2.5.2 正激变换器	24
2.5.3 双管正激变换器	25
2.5.4 反激变换器	26
2.5.5 双端隔离式 DC-DC	
变换器	26
2.5.6 DC-DC 推挽变换器	27
2.5.7 DC-DC 半桥变换器	27
2.5.8 DC-DC 全桥 PWM 变换器 ..	28
2.5.9 隔离式 DC-DC PWM	
变换器比较	28
第 3 章 开关电源的吸收电路	29
3.1 吸收电路的作用	29
3.2 吸收电路的类型	31

3.3 关断吸收电路.....	31	4.5.1 工作原理	55
3.3.1 并联电容	31	4.5.2 PS FB ZVS-PWM 变换器	
3.3.2 有极性关断吸收电路		几个问题的分析	58
——RCD 网络	31	4.6 PS FB 混合 ZCZVS-PWM	
3.4 开通吸收电路	32	变换器	59
3.4.1 开通和关断吸收电路的对偶		4.7 广义软开关 PWM 变换器	60
关系	32	第 5 章 同步整流技术	63
3.4.2 串联电感	32	5.1 肖特基整流管的损耗分析	63
3.4.3 有极性开通吸收电路		5.2 同步整流的工作原理和特性	
——RLD 网络	32		63
3.5 组合吸收电路.....	33	5.2.1 同步整流的基本工作原理	64
3.5.1 组合方案 I (并联 RCD、		5.2.2 同步整流管的主要参数	65
串联 L_{VT})	33	5.3 同步整流的驱动方式	66
3.5.2 组合吸收电路方案 II (串联		5.3.1 SR 的控制时序	66
RLD、并联 C_{VT})	34	5.3.2 电压型自驱动方式	70
3.6 LCD 吸收电路	34	5.3.3 控制驱动方式	73
第 4 章 高频软开关变换器	37	5.3.4 电流型自驱动方式	74
4.1 谐振变换器	37	5.3.5 混合驱动方式	76
4.1.1 串联谐振和并联谐振		5.4 SR-Buck 变换器	76
变换器	38	5.5 SR-正激变换器	77
4.1.2 串并联谐振变换器	38	5.5.1 有磁复位绕组的 SR-正激	
4.1.3 ZCS/ZVS-准谐振变换器	38	变换器	77
4.1.4 多谐振变换器	40	5.5.2 SR-有源钳位正激变换器	78
4.2 有源钳位软开关变换技术	41	5.6 SR-反激变换器	80
4.2.1 有源钳位正激变换器	42	第 6 章 开关型功率变换器的控制	82
4.2.2 有源钳位 ZVS-PWM 正激		6.1 电压型控制	82
变换器稳态运行分析	43	6.2 电流型控制	84
4.2.3 有源钳位反激变换器	46	6.2.1 峰值电流控制	85
4.2.4 有源钳位反激-正激变换器	47	6.2.2 平均电流型控制	88
4.3 ZS-PWM 变换器	48	6.2.3 滞环电流型控制	88
4.3.1 ZCS-PWM 变换器	48	6.3 电荷控制	89
4.3.2 ZVS-PWM 变换器	49	6.4 单周控制	90
4.4 ZT-PWM 变换器	51	6.5 前馈控制	92
4.4.1 ZCT-PWM 变换器	51	6.6 数字控制(离散控制)	93
4.4.2 三种零电流开关	53	6.6.1 数字控制的特点	93
4.4.3 ZVT-PWM 变换器	53	6.6.2 离散 PID 算法	94
4.4.4 零电压开关	55	6.6.3 改进的离散 PID 算法	95
4.5 移相控制全桥 ZVS-PWM		6.7 控制、驱动回路中的隔离	
变换器	55	方法	96

第 7 章 有源功率因数校正技术	98	7.6.3 三相 CCM Boost 整流器	132
7.1 功率因数和功率因数校正	98	7.6.4 三相 CCM Buck 整流器	135
7.1.1 非线性电路的功率因数和 THD	98	7.6.5 三相三电平 Boost PFC 变 换器	135
7.1.2 AC-DC 电路输入电流及 PF	99	7.6.6 空间矢量控制	136
7.1.3 提高 AC-DC 电路输入端 功率因数的主要方法	102	第 8 章 电压调整器模块	139
7.2 单相 Boost PFC 变换器	102	8.1 VRM 的性能要求	139
7.2.1 DCM Boost PFC 变换器	103	8.2 低输入电压的 VRM	141
7.2.2 CCM Boost PFC 变换器	104	8.2.1 SR-Buck 变换器	141
7.2.3 CRM Boost PFC 变换器	105	8.2.2 多通道 SR-Buck 变换器	141
7.2.4 Boost PFC 电路的主要优缺点	107	8.2.3 多通道 SR-Buck 变换器 的设计考虑 ^[40,42]	142
7.3 APFC 的控制方法	107	8.3 高电压输入的 VRM	143
7.3.1 常用的三种控制方法	107	8.4 元件和线路的寄生参数 对 VRM 瞬态特性的影响	144
7.3.2 平均电流控制法	107	8.4.1 电容 ESR 和 ESL 的影响	144
7.3.3 峰值电流控制法	108	8.4.2 改善 VRM 输出瞬态响应 的办法	144
7.3.4 电流滞环控制法	109	8.4.3 微处理器与 VRM 接口的 仿真模型	145
7.3.5 APFC 集成控制电路	110	第 9 章 高频开关变换器中的磁性 元件	147
7.4 单相反激 PFC 变换器	114	9.1 高频磁心的特性和参数	147
7.4.1 CCM 反激 PFC 变换器	114	9.1.1 磁滞回线	148
7.4.2 DCM 反激 PFC 变换器	117	9.1.2 动态磁滞回线的测试	149
7.4.3 反激 PFC 变换器的优缺点	120	9.1.3 基本磁化曲线	150
7.5 单级单开关 PFC 变换器	120	9.1.4 不对称局部磁滞回线	150
7.5.1 集成 PFC 整流器-调节器	122	9.1.5 伏秒积分	151
7.5.2 BIFRED 变换器	122	9.1.6 磁导率	152
7.5.3 BIBRED 变换器	125	9.1.7 磁心损耗	153
7.5.4 集成 PFC 整流器-调节器的 优缺点	127	9.2 磁性材料和磁心结构	153
7.5.5 变频控制	127	9.2.1 开关电源常用的磁性材料	154
7.5.6 S ⁺ PFC 正激变换器	128	9.2.2 磁心结构形式	156
7.6 三相 PFC 变换器	129	9.3 电 感	157
7.6.1 三个单相 Boost PFC 变换器 组成三相 PFC 整流器	130	9.3.1 电感的基本公式	157
7.6.2 三相单开关 DCM Boost 整流器	131	9.3.2 磁心气隙	157
		9.3.3 电感元件储能	158
		9.3.4 高频电感元件的等效电路 模型	159

9.3.5 直流滤波电感分析	159	模型	192
9.3.6 自饱和和电感	161	11.3 PWM 变换器频域模型	197
9.3.7 可控饱和和电感	161	11.3.1 PWM 变换器小信号等效 电路规范形模型	198
9.4 变压器	162	11.3.2 Cuk 变换器小信号等效电路 规范形模型	199
9.4.1 励磁电感与漏电感	162	11.3.3 PWM 变换器小信号等效电 路规范形模型参数	199
9.4.2 高频变压器模型	163	11.3.4 PWM 变换器的传递函数	200
9.4.3 变压器的磁分析	163	11.3.5 Buck - Boost 变换器的传递 函数	201
9.4.4 平面变压器	164	11.3.6 Buck 族和 Boost 族 PWM 变换器	201
9.4.5 空心 PCB 变压器	166	11.4 平均电路法	202
9.4.6 集成高频磁性元件	166	11.4.1 平均变量和平均电路	202
9.4.7 压电变压器	166	11.4.2 平均开关函数	202
9.5 直流脉冲电流互感器	167	11.4.3 开关网络的平均模型	203
9.5.1 工作原理	168	11.4.4 三端 PWM 开关模型法	204
9.5.2 电流互感器设计方法	169	11.4.5 考虑寄生参数的 PWM 变换器平均电路模型	208
9.6 高频磁放大器式输出电压 调节器	170	第 12 章 开关调节器系统的频域 分析与综合	213
第 10 章 DC - DC 变换器并联系统 的均流技术	175	12.1 时域分析	214
10.1 开关变换器的并联	175	12.1.1 时域数学模型	214
10.2 下垂法	177	12.1.2 系统的时域响应	214
10.3 主从均流法	180	12.1.3 自动调节系统的时域性能 指标	214
10.4 自动均流法	181	12.1.4 时域法综合系统的步骤	215
10.5 热应力自动均流法	182	12.2 频域模型分析	216
10.6 民主均流法	183	12.2.1 传递函数	216
10.6.1 民主均流法的原理	183	12.2.2 频率响应	216
10.6.2 UC3907 均流控制器芯片	184	12.2.3 对数频率特性	217
第 11 章 开关功率变换器的瞬态 建模分析	187	12.2.4 拉普拉斯变换简表	217
11.1 瞬态分析	187	12.3 开关电源系统的频域模型 及分析	218
11.1.1 瞬态分析的目的	187	12.3.1 方块图	218
11.1.2 瞬态模型	187	12.3.2 系统的稳定性和稳定裕量	220
11.1.3 稳态分析	188	12.3.3 频域性能指标	221
11.1.4 PWM 开关变换器瞬态 建模方法	188		
11.2 状态空间平均法	188		
11.2.1 基本概念	188		
11.2.2 基本假设条件	190		
11.2.3 分析方法和步骤	190		
11.2.4 Boost 变换器状态空间平均			

12.3.4 极点和零点	221	12.8 双环控制开关电源系统的 瞬态建模分析	232
12.4 系统频率响应与瞬态响应 的关系	222	12.8.1 电流型控制的开关电源系统	233
12.4.1 频率尺度与时间尺度成反比	222	12.8.2 Tellegen 定理	233
12.4.2 频段的特征与时域响应关系	223	12.8.3 功率守恒建模方法	234
12.4.3 频率特性与系统稳定性的关系	223	12.8.4 电流控制的开关电源系统的 一般设计步骤	235
12.4.4 阻尼比 ζ 对系统瞬态响应 的影响	223	12.8.5 UPF Boost PWM 变换器 瞬态建模分析	236
12.5 电压型控制的开关电源的 频域模型	224	12.9 非最小相位系统	239
12.5.1 开关变换器的控制 - 输出 传递函数	224	12.9.1 最小相位系统与非最小 相位系统比较	239
12.5.2 电压检测、控制器和 PWM 的传递函数 $G_1(s)$	224	12.9.2 非最小相位系统的物理 特征	240
12.5.3 音频纹波衰减率	224	12.9.3 非最小相位系统的控制器 设计	240
12.5.4 开关电源的抗负载扰动能力	226	第 13 章 电力电子集成技术和集成 电力电子模块	242
12.6 电压控制器	226	13.1 集成电力电子模块技术的 提出	242
12.6.1 电压控制器的传递函数	226	13.1.1 电力电子技术的进展	242
12.6.2 控制器的作用	226	13.1.2 阻碍电力电子技术发展的 因素	242
12.6.3 对补偿后的电源系统的 频率特性要求	227	13.1.3 集成电力电子技术的发展 概况	243
12.6.4 控制器(补偿网络)的类型	227	13.2 电力电子器件模块化和 集成化的进展	244
12.6.5 带积分环节的控制器的	228	13.2.1 分立器件	244
12.6.6 开关电源中控制器特性 分析举例	228	13.2.2 功率器件模块	244
12.6.7 增设单极点、单零点的 PI 补偿网络	230	13.2.3 单片集成	247
12.6.8 增设双极点、双零点的 PI 补偿网络	231	13.2.4 智能功率模块	247
12.7 开关电源系统频域设计 (综合)	232	13.3 集成电力电子模块封装技术	247
12.7.1 开关电源系统频域综合的 一般步骤	232	13.3.1 MCM 封装技术	248
12.7.2 补偿网络的设计	232	13.3.2 平面金属化封装技术	248
		13.4 无源集成模块	250
		13.4.1 L-L 集成	250
		13.4.2 L-T 集成	250

13.4.3 L-C-T集成	250	14.1.1 主电路与控制电路产生的 dv/dt 、 di/dt 的比较	258
13.4.4 平面变压器	250	14.1.2 二极管反向恢复电流	258
13.5 电力电子积木块结构	251	14.1.3 dv/dt 与负载电流大小的 关系	260
13.6 集成电力电子系统	252	14.1.4 跳变过冲对频谱的影响	261
13.6.1 集成变频传动系统	252	14.2 开关电源的电磁噪声的耦合 通道特性	262
13.6.2 集成VRM-微处理器系统	253	14.2.1 杂散参数影响耦合通道的 特性	263
13.6.3 集成分布电源系统	254	14.2.2 耦合通道的系统函数	263
13.7 电力电子系统集成的问题	256	14.3 开关电源运行中的电磁干扰 及其抑制	266
第14章 开关电源中的电磁干扰 问题	258	参考文献	270
14.1 开关电源中的电磁干扰源	258		

第1章 电力电子技术的发展和展望

自20世纪50年代末晶闸管问世,电力电子的新时代诞生以来,信息技术的进步推动了电力电子技术的深入研究和广泛应用,用电设备对开关电源的高性能和高功率密度等要求的提高,促使其在器件、电路拓扑、系统结构和控制方式等各个方面已经有了飞跃的发展和变化。

1.1 电力电子技术40年进展的标志

40多年间电力电子技术进步和发展的历史进程有三大标志:电力半导体器件、高频化和软开关技术、电力电子系统的集成技术。

(1)1960~2000年,电力半导体器件从双极型器件(BPT、SCR、GTO)发展为MOS型器件(功率MOSFET、IGBT、IGCT等),显著改善了电力电子变换器的性能,使电力电子系统有可能实现高频化,并大幅度降低导通损耗,电路也更为简单。

(2)1980~2000年,高频化和软开关技术的开发研究,使电力电子功率变换器性能更好、重量更轻、尺寸更小。高频化和软开关技术是过去20年国际电力电子界研究的热点之一。

(3)1995年至今,集成电力电子系统和集成电力电子模块(IPEM)技术开始发展,它是当今国际电力电子界亟待解决的新问题之一。

1.1.1 电力半导体器件

过去20多年,出现了一些新的电力半导体器件和模块,在诸如电力MOSFET、绝缘栅双极晶体管(IGBT)、碳化硅(SiC)器件等领域都有不同程度的新进展。(以下未特别注明MOSFET或IGBT、IGCT等均指用硅晶片制成的)。

1. 电力MOSFET 1979年,电力MOSFET场效应晶体管问世。由于它的输入阻抗高、开关速度快和热稳定性好,可完全替代电力晶体管(GTR)和中小电流的晶闸管,使电力电子电路和系统实现高频化有了可能。并且达到500V/240A、1500V/200A的电压电流定额。电力MOSFET的开关损耗小,但是通态功耗大,而且,电力MOSFET的击穿电压 V_B 越高,通态电阻 R_{on} 越大。以理想的N沟道电力MOSFET为例,通态电阻 R_{dson} 和击穿电压 V_B 有如下关系:

$$R_{dson} = 5.93 \times 10^{-9} V_B^{2.5}$$

1998年,Infineon公司推出冷MOS管(Cool MOSFET),它采用超级结(Super-Junction)结构,故又称超结电力MOSFET,工作电压600~800V,通态电阻几乎降低了一个数量级,但仍保持开关速度快的特点,是一种有发展前途的高频电力半导体器件。

2. 绝缘栅双极晶体管IGBT 1982年,B. J. Baliga将双极晶体管和电力MOSFET技术组合,成功开发出第一个绝缘栅双极晶体管,取名为IGT(Insulated Gate Transistor),后来国际电力电子界通称为IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)。它是将MOS门极(栅极)的优

良输入特性和双极晶体管的良好输出特性的功能集成在一起的结果。它的通态压降小、电流密度大,完全可替代电力晶体管(GTR)和中小电流的晶闸管,成为公认的最有发展前景的一种电力半导体器件。

IGBT的技术进展实际上是通态压降、快速开关和高耐压能力三者的折衷。IGBT的门极结构有平面型和沟槽型两种,随着工艺和结构形式的不同,在20年历史发展进程中,开发的IGBT有以下几种类型:穿通(PT)型、非穿通(NPT)型、软穿通(SPT)型、沟槽型和电场截止(FS)型等。IGBT的未来发展方向是:(1)逆阻型IGBT模块,减小输入电流畸变;(2)最佳模块组合,减小通态噪声,(3)控制 dv/dt 和 di/dt 的能力,减小噪声发射。

据报道,IGBT刚出现时,电压电流额定值只有600V25A。很长一段时间内,耐压水平限于1200~1700V,经过长时间的探索研究和改进,现在IGBT的电压电流额定值已达到3300V/1200A、4500V/1800A等,高压IGBT单片耐压甚至达到6500V。一般IGBT的工作频率上限为20~40kHz。基于PT结构、应用新技术所制造的IGBT,可工作于150kHz(硬开关)和300kHz(软开关)。

3. 集成门极换流晶闸管(IGCT) 集成门极换流晶闸管(Integrated Gate Commutation Thyristor)是1997年出现一种新型高电压大电流器件,简称IGCT。它利用电力MOSFET的优点,将MOS技术与晶闸管组合。它的损耗比可关断晶闸管GTO小,接线比GTO简单可靠,并可以采用风冷。现在已开始应用于中大功率的电力电子系统,如MW级变频器、新型静止无功补偿装置等。

4500V/4000A IGCT的参数为工作频率1kHz、正向压降2.7V、 $di/dt=1000A/\mu s$ 。

4. 碳化硅电力半导体器件 碳化硅SiC(Silicon Carbide)是电力半导体器件晶片的理想材料。其优点是:禁带宽、工作温度高(可达600℃)、热稳定性好、通态电阻小、导热性能好、漏电流极小、PN结耐压高等,有利于制造出耐高温的高频大功率电力半导体器件。

现在已研制出40mm SiC晶片,1990年已有30mm晶片上市,在电力电子技术中开始用SiC器件代替Si器件。例如,SiC肖特基二极管已有商品问世,定额为300V、600V、1200V/20A,反向恢复时间接近于零,175℃以下SiC肖特基二极管的反向电流几乎不变。

据《电力电子》杂志2004第4期报道,已经试制出一批SiC器件样品,如:SiC电力MOSFET,定额为750V/15mA, $R_{ds(on)}=66m\Omega$;1998年研制出耐压达1400V,通态电阻311m Ω 的SiC电力MOSFET。其他再如SiC晶闸管,950V/6A,通态压降3.67V;1999年研制出耐压达790V,通态压15V,电流密度75A/cm²的SiC IGBT。

可以预见,碳化硅将是21世纪最可能成功应用的新型电力半导体器件材料。

1.1.2 高频化和软开关技术

1. 电力电子设备的小型轻量化和高功率密度化 电力电子设备的发展方向之一是小型化,降低其体积、重量,提高功率密度。例如,随着微处理器大规模集成电路(VLSI)尺寸不断减小,而供电电源的尺寸与微处理器相比却要大得多,因此,必须采取新技术降低开关变换器的体积重量。20世纪人们在提高开关变换器功率密度方面做了不少工作。电源的小型化、减轻重量对便携式电子设备(如移动电话、数码相机等)尤为重要。为了实现电源高功率密度,必须提高PWM变换器的工作频率,从而减小电路中储能元件的体积和重量。

2. 高频电力电子技术 1980年前,开关变换器的工作频率为20~50kHz,从1980年起,

提高开关频率成为减少开关变换器尺寸的最有效手段,同时也改善了它的动态性能。现在 200~500kHz 已成为输出 100W 以下 DC-DC 电力变换器的标准开关频率。特殊制造的小功率电源,开关频率达几兆赫。

小功率(200W 以下)高频 DC-DC 变换器做成标准模块,外形像一块砖。根据国际标准,按外形尺寸,以砖(Brick)为标准单位分类,例如:1/8 砖、1/4 砖、半砖(尺寸分别为 0.8in×2.3in×0.36in、1.45in×2.3in×0.4in 和 2.4in×2.3in×0.4in)和全砖。2004 年又推出了 1/16 砖的 DC-DC 变换器模块。

表 1-1 给出 20 世纪 70 年代以后的 30 年间,通信和计算机用 DC-DC 开关变换器高功率密度的发展进程。可见,高频化、高功率密度和高效率是开关变换器技术发展进步的重要标志。

表 1-1 DC-DC 开关变换器的发展进程

	70 年代初	1980	1990	2000
开关频率/kHz	10~20	20~40	100~300	500~1000
功率密度/(W/in ³)	0.5	1	4~30	300
效率(%)	<	65	<75	80

3. 高效率 and 软开关技术 PWM 开关变换器按硬开关模式工作,在开关过程中,电力开关器件的电压和电流波形有交叠,因而开关损耗大。高频化可以缩小感性和容性元件的体积重量,但频率越高,开关损耗越大。为此必须采取措施以提高高频开关变换器的效率。人们研究了开关过程中开关器件的电压和电流波形不相交叠的技术,即所谓零电压开关(ZVS)和零电流开关(ZCS)技术,总称为软开关技术(相对于 PWM 硬开关技术而言)。除了减小开关损耗外,应用软开关技术还可以大大降低开关噪声、减小电磁干扰。

20 世纪 90 年代中期,30A/48V 开关变换器采用移相全桥 ZVS-PWM 技术后,比用 PWM 技术的同类产品重量下降 40%。软开关技术的开发和应用,提高了开关变换器的效率。20 世纪末,国内生产的通信用 50~100A 输出、全桥移相 ZVZCS-PWM 开关变换器模块的效率超过 93%。

4. 同步整流技术 对于低电压大电流输出的开关变换器,进一步提高其效率的措施是,在应用软开关技术的基础上,以电力 MOS 管反接作为整流用开关二极管,称为同步整流(Synchronous Rectifier SR),代替肖特基二极管(SBD)可降低整流管压降,从而提高电路效率。有报道称,应用软开关和同步整流等技术的小功率 DC-DC 开关电源,48/12V 模块的效率达到 96%、48V/5V 模块的效率可达到 92%~93%。

日本文献报道了在一台 100W 输出的软开关(ZVS)变换器的试验结果,用 SBD 的变换器效率为 83%,电路损耗(包括整流器件、变压器、开关器件、控制电路、滤波器等)21W;而用 SR 的变换器效率为 90%,电路损耗仅 11W。

5. 压电变压器 在高频功率变换器中,应用压电(Piezo-electric)变压器(简称 PET),可使变换器实现轻、小、薄和高功率密度,例如,一台 DC-DC 变换器中的 PET,其输入为有源钳位 ZVS 逆变电路,产生梯形波交流电,经过 PET,输出给整流滤波电路。

压电变压器是利用压电陶瓷材料特有的电压-振动变换和振动-电压变换的性质传送能量,其等效电路如同一个串并联谐振电路。它是功率变换领域的研究热点之一,研究内容包括:压电材料的损耗评估、PET 设计计算方法、仿真、参数分析、有限元分析、振动速度极限、