

高等院校电气工程系列教材

电力电子技术

叶 斌 主编

清华大学出版社



中国电力出版社

电力电子技术

第二版

中国电力出版社

高等院校电气工程系列教材

电力电子技术

叶 斌 主编

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

本书基于应用广泛的几种电力电子功率变换技术,系统地阐述了功率变换系统的构成、基本工作原理、系统控制技术、变流器的设计方法以及功率变换技术的典型应用,并力求反映电力电子技术的最新成果。全书共分8章,主要包括整流技术、逆变技术、直流电动机调速技术、异步机变频调速技术、开关电源技术、电力电子变流器主电路设计技术以及电力电子技术应用实例。每章后均附有思考题和习题供学生阅读和练习。

本书可供高等院校电气工程及其自动化、自动化等电类专业的高年级本科生和研究生作为教材或参考书,也可供科研院校、厂矿企业从事电力电子及电力传动的工程技术人员阅读参考。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

电力电子应用技术/叶斌主编. —北京:清华大学出版社,2006.5

ISBN 7-302-12447-7

I. 电… II. 叶… III. 电力电子学 IV. TM1

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第005787号

出版者:清华大学出版社 地 址:北京清华大学学研大厦
http://www.tup.com.cn 邮 编:100084
社总机:010-62770175 客户服务:010-62776969

组稿编辑:陈国新

特邀编辑:陈力

印刷者:北京国马印刷厂

装订者:三河市化甲屯小学装订二厂

发行者:新华书店总店北京发行所

开本:185×260 印张:26.75 字数:630千字

版次:2006年5月第1版 2006年5月第1次印刷

书号:ISBN 7-302-12447-7/TM·74

印数:1~3000

定 价:36.00元

电能变换技术是对电能进行变换和控制的技术,它以电力电子、微电子和控制三者紧密结合的形式,形成了电力电子技术这门极具生命力的边缘学科。电力电子技术作为新能源开发、高效节能的基础技术,已成为科学技术发展中的热点课题。目前,介绍电力电子实用技术和装置的专著不断涌现,但有关的教材还不多见,本书正是在这样的背景下,为适应电力电子新技术发展的需要而编写的。

本书本着面向未来,面向应用的原则,选择了电力电子技术应用最为广泛的几个领域,全面、系统、深入地阐述了这些领域电力电子功率变换的基本工作原理、系统组成、系统控制技术、变流器设计方法和应用,力争内容源于实际,具有前沿性和先进性。

全书共分8章。第1章为绪论,综述跨入新世纪的电力电子技术、应用、发展特点和发展趋势。第2章为整流技术,讲述大功率相控整流器原理、功率因数改善、谐波抑制,整流装置功率因数校正,新型高频开关整流器及应用。第3章为逆变技术,讲述DC-AC变换技术原理、逆变装置设计、脉宽调制控制技术;多电平逆变器和通用变频器原理及应用。第4章为直流电动机调速技术,讲述变电压直流调速的电源变换技术、直流调速系统结构、调速特性、调速系统控制技术。第5章为异步机变频调速技术,讲述交流异步电机的变频调速控制方法、标量控制、坐标变换和动态模型、矢量控制以及直接转矩控制。第6章为开关电源技术,讲述开关电源基本DC-DC变换电路及工作原理、主控元器件的设计和选择,以及软开关技术、同步整流技术和分布电源系统。第7章为电力电子变流器主电路设计技术,讲述电力电子器件的选择、使用、驱动,电力电子器件与变流器的保护,电力电子变流器的热设计,电力电子变流器的辅助器件设计和电磁兼容性设计。第8章为电力电子技术应用实例,列举若干电力电子综合应用实例。

本书是在学习过电力电子技术基础、电力拖动自动控制和计算机及其控制技术的基础上使用的。全书按电力电子功率变换的类型分成若干章,每章相对独立地自成系统,以基础理论的概括和工程应用技术为主线,着重对主电路及系统控制技术进行阐述,并集中用一章提供若干电力电子技术综合应用实例,希望它能成为读者窥见电力电子技术发展和应用的窗口。作为教科书,内容取材体现了知识的传统性和先进性的结合,阐述深入浅出、循序渐进,例题和习题起巩固、补充和强化基础概念的作用。由于篇幅所限,对书中所涉及内容的知识背景仍不可能面面俱到,由此而给读者留下开拓思路和培养能力的空间。

叶斌制定了本书最初的编写大纲,并经全体编委多次讨论审定了全书的编写内容。本书第1章由郑琼林编写,第2章、第4章由叶斌编写,第3章由童亦斌编写,第5章由金新民编写,第6章由王立德编写,第7章由张全柱编写,第8章应用实例分别由以上作者

及梁晖提供和编写；叶斌负责全书的统一修改、润色和审定工作。

感谢研究生张艳芳、刘建强、李田雨、侯宁、吴亚楠和乔明等同学，他们为本书的绘图和文稿录入整理工作付出了辛勤的劳动。还要感谢一道承担科研课题的林飞老师、孙湖老师及博士生马志文、郭文杰，他们为本书的编写提供了支持和帮助。

清华大学自动化系杨耕老师对全书的编写提纲提出了宝贵的意见和建议，在此表示衷心的感谢。

限于作者的学识水平有限，书中的不足甚至错误之处难免，恳请广大读者批评指正，并给予谅解。

编者

北京交通大学电气工程学院

2006年1月

yeb@dq.njtu.edu.cn

第 1 章 绪论	1
第 2 章 整流技术	12
2.1 整流电路的类型和性能指标	12
2.1.1 整流电路的类型及基本组成环节	12
2.1.2 整流电路的基本性能指标	13
2.2 整流电路的典型结构及特性	14
2.2.1 多相半波整流电路	14
2.2.2 三相半波整流电路的并联和串联	19
2.2.3 整流装置的多重化	24
2.3 整流变压器和电抗器	26
2.3.1 整流变压器特性与连接方式	27
2.3.2 电抗器的设置和计算	30
2.4 整流装置的谐波及抑制技术	32
2.4.1 整流装置的谐波特性	32
2.4.2 整流装置的谐波抑制技术	42
2.5 提升相控电路的功率因数	49
2.5.1 功率因数恶化的危害	49
2.5.2 提升相控电路功率因数的措施	50
2.6 有源功率因数校正	58
2.6.1 APFC 的基本原理和电路结构	58
2.6.2 有源功率因数校正的控制	59
2.7 PWM 整流电路	64
2.7.1 PWM 整流电路结构和原理	64
2.7.2 PWM 整流电路的控制	68
2.7.3 PWM 整流器的应用	74
小结	76
思考题及习题	77
参考文献	79



第3章 逆变技术	81
3.1 逆变技术概述	81
3.1.1 逆变技术基本概念和分类	81
3.1.2 逆变技术的应用领域	82
3.2 逆变器基本工作原理及设计技术	85
3.2.1 逆变器主电路工作原理	86
3.2.2 电压型逆变器开关过程分析	90
3.2.3 逆变器功率半导体开关器件的选择	94
3.2.4 功率半导体器件的缓冲电路	97
3.2.5 逆变器的驱动电路	99
3.3 脉冲宽度调制技术概述	100
3.3.1 脉冲宽度调制的基本原理	101
3.3.2 PWM 控制技术基本概念	103
3.3.3 逆变装置 PWM 技术性能指标	110
3.4 逆变器常用 PWM 控制技术	111
3.4.1 正弦脉冲宽度调制	111
3.4.2 准正弦波脉冲宽度调制法	115
3.4.3 消除特定谐波法	116
3.4.4 电压空间矢量脉冲宽度调制技术	118
3.4.5 电流跟踪型 PWM 控制技术	124
3.5 PWM 控制的实现方法	126
3.5.1 利用硬件电路产生 PWM 脉冲	126
3.5.2 利用软件产生 PWM 脉冲	127
3.6 多电平逆变技术	130
3.6.1 二极管钳位型多电平逆变器	131
3.6.2 电容钳位型多电平逆变器	133
3.6.3 具有独立直流电源的级联型逆变器	134
小结	136
思考题及习题	137
参考文献	137
第4章 直流调速技术	138
4.1 直流调速系统概述	138
4.1.1 直流调速系统用可控直流电源	138
4.1.2 调速系统的分类及调速指标	141
4.2 V-M 系统开环机械特性与动态特性	145
4.2.1 V-M 系统的开环机械特性	145

4.2.2	V-M 系统的动态特性	152
4.3	V-M 闭环调速系统	155
4.3.1	单闭环无静差调速系统	156
4.3.2	转速、电流双闭环调速系统及特性	159
4.4	可逆直流调速系统	165
4.4.1	V-M 系统的可逆线路	166
4.4.2	可逆拖动的工作状态及机械特性	168
4.4.3	可逆系统中的环流	170
4.5	配合控制的有环流可逆调速系统	173
4.5.1	配合控制的有环流可逆系统工作原理	173
4.5.2	有环流可逆调速系统的工作过程	175
4.6	逻辑控制的无环流可逆调速系统	177
4.6.1	系统结构及对逻辑装置的要求	178
4.6.2	无环流逻辑控制装置	180
4.7	直流脉宽调速系统	184
4.7.1	直流 PWM 变换器的类型和工作原理	184
4.7.2	直流脉宽调速系统的开环机械特性	190
4.7.3	直流脉宽调速系统开关频率对系统性能的影响	191
	小结	195
	思考题及习题	196
	参考文献	198
第 5 章	交流异步电机的变频调速技术	199
5.1	异步电机变频调速的控制方法	199
5.1.1	异步电机的等效电路	200
5.1.2	电压频率一定时的速度-转矩特性	201
5.1.3	恒磁通控制	203
5.1.4	恒电压频率比控制	204
5.1.5	弱磁控制	204
5.1.6	整个调速范围的典型控制	205
5.2	异步电机的标量控制	207
5.2.1	转速开环的恒压频比控制	207
5.2.2	转速闭环的控制	209
5.3	坐标变换和异步电机的动态模型	213
5.3.1	坐标变换	214
5.3.2	异步电机的动态模型	217
5.4	异步电机的矢量控制	220
5.4.1	异步电机矢量控制的原理	220

5.4.2	直接矢量控制	222
5.4.3	磁链观测器	223
5.4.4	间接矢量控制	227
5.5	异步电机的直接转矩控制	230
5.5.1	转矩的控制	230
5.5.2	定子磁链的控制	231
5.5.3	直接转矩控制的实现	232
	小结	235
	思考题及习题	236
	参考文献	236
第6章	开关电源技术	238
6.1	概论	238
6.2	开关电源的基本电路及工作原理	241
6.2.1	降压式(Buck)变换器	242
6.2.2	升压式(Boost)变换器	248
6.2.3	升降压(Buck/Boost)变换器	251
6.2.4	Cuk 变换器	253
6.3	单端正激变换器与单端反激变换器	256
6.3.1	单端正激变换器	256
6.3.2	单端反激变换器	259
6.4	桥式变换器	261
6.4.1	半桥式变换器	262
6.4.2	全桥式变换器	264
6.5	开关电源的主控元器件	266
6.5.1	开关元件	266
6.5.2	磁性元件和电容器	268
6.5.3	平面变压器	272
6.5.4	集成开关变换器 IC 芯片的原理及应用	274
6.6	软开关技术	278
6.6.1	硬开关和软开关	278
6.6.2	软开关基本技术	280
6.7	同步整流技术	286
6.7.1	同步整流技术的基本原理	287
6.7.2	同步整流管的驱动	287
6.7.3	同步整流电路	289
6.7.4	SR 变换器	289
6.7.5	同步整流技术的应用	291

6.8 分布式电源	292
6.8.1 分布式电源简介	292
6.8.2 分布式电源结构和应用	294
小结	296
思考题及习题	299
参考文献	299
第7章 电力电子变流器设计技术	300
7.1 电力电子器件的性能与选择	300
7.1.1 二极管	301
7.1.2 晶闸管	303
7.1.3 门极关断晶闸管	305
7.1.4 电力场效应晶体管	306
7.1.5 绝缘栅极晶体管	307
7.1.6 功率模块与智能功率模块	308
7.2 电力电子器件的驱动	312
7.2.1 驱动电路概述	312
7.2.2 常用开关器件驱动电路	313
7.3 电力电子器件与变流器的保护	321
7.3.1 过电压保护	321
7.3.2 过电流保护	323
7.3.3 缓冲电路	324
7.3.4 过热保护	327
7.4 电力电子变流器的热设计	328
7.4.1 器件结温和热阻的计算	328
7.4.2 常用冷却方式及使用条件	332
7.4.3 散热器的选择	333
7.4.4 机柜(箱)结构的设计	334
7.5 电力电子变流器的辅助器件设计	335
7.5.1 高频变压器和电感	335
7.5.2 滤波器	342
7.5.3 控制系统组成	349
7.5.4 检测系统与传感器	352
7.6 电力电子变流器的电磁兼容性设计	359
7.6.1 电磁兼容标准与试验	359
7.6.2 变流器谐波的限制和抑制措施	366
7.6.3 电磁兼容设计的相关技术	368
小结	375

思考题及习题·····	376
参考文献·····	377
第 8 章 电力电子技术应用实例·····	378
8.1 SS4 型电力机车牵引整流器供电系统·····	378
8.1.1 SS4 型电力机车牵引整流器·····	378
8.1.2 SS4 改进型电力机车主电路·····	382
8.2 电力牵引传动控制试验系统·····	385
8.2.1 交流传动试验台的功能要求·····	385
8.2.2 交流传动互馈试验平台的组成和特点·····	386
8.2.3 互馈试验台工作原理和控制特性·····	388
8.2.4 实验研究·····	391
8.3 光伏发电并网装置·····	392
8.3.1 光伏发电并网装置的主电路·····	393
8.3.2 光伏发电的最大功率点·····	394
8.3.3 光伏发电并网装置的控制·····	395
8.4 不间断电源·····	397
8.4.1 不间断电源的用途和分类·····	397
8.4.2 在线式 UPS 工作原理简介·····	399
8.4.3 UPS 技术的发展趋势·····	403
8.5 高频高压开关电源在工业烟气脱硫中的应用·····	404
8.5.1 烟气脱硫技术的研究现状·····	404
8.5.2 高频高压脱硫电源的工作原理·····	405
8.5.3 高频高压脱硫电源的应用·····	408
8.6 电力/内燃机车空调电源·····	409
8.6.1 引用标准和技术条件·····	410
8.6.2 空调电源设计·····	412
参考文献·····	416

自 1891 年出现交流输电以来,交流电就成为送达用户端的主要电能形式,但用电负载有直流负载和交流负载两大类,相应的供电电源就需要直流和交流两种形式,因此电能需要变换。

随着越来越多非线性负载的使用,供电质量变得越来越差;而随着各种用电设备或单元的数字化、信息化和多样化发展,需要的电源种类、等级和质量要求却不断提高。因此,更需要对电能进行高质量的变换。

早期,把交流电变换为直流电经历了机械整流器、闸流管整流器和引燃管整流器的阶段。1900 年,美国纽约地铁列车供电电源就采用机械整流器从交流电网中获取直流电源。1928 年,实用化的闸流管整流器使直流输出端的电压可以不随交流输入电压的波动而变化,随后闸流管和引燃管整流器的应用得到很大重视。1935 年,高压直流输电在美国纽约得以实现。在整个 30 年代直到 40 年代后期,这两种器件大量应用于高功率变换的场合。

1957 年,美国通用电气公司发明了硅可控整流器(silicon controlled rectifier, SCR),简称可控硅,后被国际电工学会正式命名为晶闸管(thyristor)。晶闸管的问世,不仅可把交流电变换为直流电,还能把直流电变换为交流电和其他特殊的电能形式。从此,新型电力电子器件不断涌现,性能不断提高,并各具电气特性和使用特点,以适应不同的应用领域和电能变换电路的设计要求。

把各种电力电子器件实用、高效、可靠地应用于电能变换系统,是电力电子应用技术的研究任务。

2000 年,IEEE 终身会士、美国电力电子学会前主席 Thomas G. Wilson 给电力电子技术重新下了一个定义:电力电子技术是通过静止的手段对电能进行有效的变换、控制和调节,从而把可利用的输入电能形式变成所希望的输出电能形式的技术(power electronics is the technology associated with the efficient conversion, control and conditioning of electric power by static means from its available input form into the desired electrical output form)。IEEE 电力电子学会在网站上(网址为 <http://www.pels.org>)给出的定义是:电力电子技术是把电子电路应用到电能变换中的技术。它包括电子器件的使用、电路理论的研究和设计技术的应用,以及为提高变换效果所需各种分析工具的开发。

从定义可见,电力电子技术与电力电子应用技术的研究内容似乎没有什么区别。本书把电力电子元器件的设计、制造和封装等归入电力电子技术的范畴,而不归入电力电子

应用技术的范畴。所以,本书重在研究电力电子元器件的合理使用,使其高效、实用、可靠地控制电能变换;重在对电能变换电路的设计、电力电子系统的控制以及电力电子技术在工业中应用的研究。

1.1 电力电子应用技术的主要内容

电力电子应用技术,是关于各种电能变换的拓扑电路、控制理论和工业应用技术,是变换装置的设计技术,是分析设计工具的开发利用技术。

1. 电能变换的基本形式与电路拓扑

在电力电子应用技术中,不同的电能变换形式要求不同的拓扑电路。根据电能变换的输入输出形式,可以分为直流-直流变换器(DC-DC)、直流-交流变换器(DC-AC)、交流-直流变换器(AC-DC)和交流-交流变换器(AC-AC)4种基本形式。

DC-DC变换器常见的有 Buck 变换器(常称降压斩波器)、Boost 变换器(常称升压斩波器)、Buck/Boost 变换器(常称升降压斩波器)、Cuk 变换器、隔离式的 Buck 变换器(正激变换器、推挽变换器、桥式变换器)以及隔离式的 Buck/Boost 变换器(反激变换器)等。

DC-AC 变换器常称为逆变器,按直流中间环节的特点有电压型逆变器和电流型逆变器两种类型;按输出交流电的相数又分为单相逆变器和三相逆变器。三相逆变器是三个单相逆变器进行同步控制的组合,以便输出相位上互差 120° 的三相电。

AC-DC 变换器习惯称为整流器,广泛地用作电力电子系统的前级变换器。电力电子系统的前级变换器应与电力线路“友好”接入,这意味着整流器应具有高功率因数、低输入电流谐波畸变和低电磁干扰发射等特点。目前,在谐波治理的严峻形势下,各种高级 AC-DC 变换器已得到发展,如有源功率因数校正(power factor correction, PFC)整流器,三相脉宽调制(pulse width modulation, PWM)Boost PFC 整流器,三相 Buck PFC 整流器等。

AC-AC 变换器传统上用于只调电压的交流调压器和只调频率的周波变换器(也称循环变换器),现在发展比较快的矩阵变换器也是一种 AC-AC 变换器。

为了减小开关损耗和功率变换器的电磁干扰,达到重量轻、体积小且高效节能的目的,在上述 4 种基本形式变换器的基础上,新的电路拓扑和软开关技术及其应用得以迅速发展。

2. 控制理论和调节手段

电力电子系统是一种非线性、变结构、电压电流突变的离散系统,特别是与电机构成的系统更是强耦合、多变量、具有分布参数特征系统,呈现重复瞬态和非正弦性等特点,这就决定了在电工领域中长期采用的以相量为基础的控制理论不再适用。经典的电路理论和控制理论无法直接处理电力电子系统的控制问题,发展和应用新的控制理论势在必行。

电力电子应用技术的核心部分都是开关控制器,它是以开关方式运行的非线性元件,因此以离散系统为基础的开关控制理论成为主要的调节手段。将控制理论应用于电力电子控制的前提是对其网络拓扑进行建模。主要使用的建模方法有状态空间平均法、数据采样建模法、PWM 开关平均法、等效电路模型法等。对软开关电路的建模还在探索之中,目前已经提出了高频网络平均法、脉冲波形积分法等几种方法。

电力电子系统控制的目标主要是效率和电源质量。电源质量有动态响应、谐波质量和鲁棒性要求等。现代控制理论的应用,为实现电力电子系统目标提供了有力手段。日新月异的微处理器技术的发展,为现代控制理论的应用提供了硬件基础。数字信号处理器(DSP)已经在电力电子控制领域得到了普遍应用,而系统级芯片 SoC(system on chip)技术和网络技术的发展,也将极大的推动电力电子应用技术的进步。智能控制理论由于具有本质非线性、并行处理、自组织、自学习等能力,在电力电子用于技术控制中也有着巨大的潜力。

3. 变换装置的设计技术

电力电子应用技术的基本任务是要设计出满足功能要求且运行可靠的电能变换装置。一个性能良好的变换装置设计,应该包括功能设计、电磁兼容设计、散热设计和结构亲和性设计等方面。

(1) 功能指标设计

主要要满足输出电压(或电流)和功率的指标。同时,为了使装置能正常和可靠地工作,还要缜密地考虑其他一些显性和隐性的功能指标。如,主电路防冲击电流的控制设计,控制电路的电复位和断电保护设计,装置的过电流、过电压和欠电压保护,过热保护、短路保护,甚至还要考虑过功率保护。功能设计的方法是多种多样的,总的来说,应选择保护效果好,同时又简单节能的设计方法。

(2) 电磁兼容设计

电力电子电路的基本特征是,电路总是工作在开关模式的变换之中,在两个或几个不同的结构之间不断切换。开关的通断在电路中引起的电压和电流变化率,是电磁干扰(EMI)的本质,解决好电磁兼容问题是电力电子应用技术的一大任务。电能变换装置的电磁干扰分三类:外部干扰源对装置的干扰(incoming),装置内部的干扰源对系统外部的干扰(outgoing),装置内部的相互干扰(internal)。解决前两类的干扰通常采用滤波的办法;解决第三类干扰的途径较多,如采用电磁屏蔽、电气隔离,主电路合理采用低电感结构方式等等。控制电路的电磁兼容设计一般从导线传导耦合、公共阻抗耦合、电感性耦合、电容性耦合和电磁场耦合5个方面考虑。

(3) 系统散热设计

电力电子开关器件在工作时产生的损耗(最主要的是通态损耗和开关损耗)都以热量的形式表现出来。同时,工作在高频状态下的磁性组件(变换器中电感和变压器)其损耗也比较大。因此,散热设计是电力电子应用技术的重要任务。一般来说,散热设计包括对散热介质、散热路径和散热器热阻的设计计算。良好的设计不仅散热效果好,而且散热系统简单。例如,通过改进 IGBT 模块的封装材料和散热方式,混合电动汽车或燃料电池汽车,可以不必专门设置牵引变流器的冷却(散热)系统而直接共享汽车上原有的冷却系统。常见的5种散热器,按散热效果逐次升级排序为:①自冷式散热器,②风冷式散热器,③水冷(油冷)式散热器,④沸腾式散热器,⑤热管散热器。

(4) 结构亲和性设计

变换器装置的结构形式应该对人具有良好的“亲和力”——不仅外表美观宜人、结构紧凑、便于测试和装卸,而且具有功能分区设计、模块化设计和子系统集成设计等内容。

电力电子产品或电路设计正向着模块化、集成化的方向发展。具有各种控制功能的专用芯片不断开发和应用。IPM 以 IGBT 作功率开关,将控制、驱动、保护、检测电路都封装在一个模块内。由于外部接线、焊点减少、产品体积小,可靠性显著提高。美国 VICOR 公司生产的第 2 代电源模块达到高度集成化和全面计算机化,内含组件仅为第 1 代产品的 1/3,由 115 个减为 35 个。电路集成的进一步发展方向是系统集成。美国电力电子系统中心(Center for Power Electronics Systems, CPES)已经提出了系统集成的设想:将信息传输、控制与功率半导体器件全部集成在一起,采用三维空间热耗散散热,从而可能实现将功率从数百瓦做到几千瓦以上。系统集成可以改变现在的半自动化、半人工的组装工艺而达到完全自动化生产,从而降低成本,有利于大规模推广应用。

4. 分析设计工具的使用开发

对于某一特定的电能变换要求,为了更好地接近所追求的目标,一般要解决好电力电子应用技术的仿真、分析和设计等几个关键问题。它们具体包括:电路拓扑和系统控制策略的确定、开关器件和控制方法的选择、装置内部的散热和电磁兼容性设计、可靠性预估和参数最优化等等,所有这些问题,都需要分析设计工具来辅助解决。随着计算机和软件技术的发展,分析工具也越来越丰富。在全软件的分析设计工具中,有电力电子电路理论和控制理论分析仿真工具 Matlab, Mathematica, Mathcad 等;电力电子拓扑及其控制的仿真分析工具 Simulink, Microsim(Pspice), Powersim 等;电力电子分析设计的 EDA 辅助工具 Saber, 以及 Cadence, Mentor, Synopsis 等公司的相关软件包,如 workbench 等;电力电子三维热场和电磁场分析工具 Ansys, Ansoft 等。

为适应特定电路设计分析的需要,有时需要在具体使用软件工具时补充和开发其中的一些模型和功能,有时需要对已有的软件进行改进,甚至需要另行开发软件。另外,在有的场合,如数学模型非常复杂时,软件的仿真分析需要花很长时间;在有的场合,硬件系统及其各部分相互作用极其复杂,甚至无法建立分析仿真的数学模型等,此时软件分析设计工具难于发挥很好的作用。这时,建立软件和硬件相结合的混合仿真系统,或建立全硬件的仿真、设计和开发平台就成为必不可少的工具。因此,基于仿真、分析和设计的软硬件平台或专家系统,可使系统设计性能最优、设计制造费用最省,是电力电子应用技术的重要内容之一。

5. 电力电子元件的使用

电力电子应用技术的主要内容莫过于合理可靠地使用电力电子元件。半导体开关器件、磁性元件和电容器等,各类元件产品型号众多、特性各异、应用条件差异性很大。而且每一种新器件的诞生,都伴随着电能变换技术的重大突破。所以使用好电力电子元件十分重要。

半导体开关器件按控制方式来分,有 3 大类:不控型器件(如二极管),半控型器件(如能控制导通不能控制关断的晶闸管),全控型器件(如 GTO、VDMOS、BJT(GTR)、IGBT、IGCT 等)。

常见的二极管分为 3 种。其一,普通二极管,常用在工频电路或晶闸管等频率不高的电路中;其二,快速恢复二极管,它利用特殊工艺制造,反向恢复电流和时间都很短,常用在 IGBT 或 VDMOS 等高速开关器件的电路中和高频整流电路中;其三,肖特

基(Schottky)二极管,因为它不是PN结导电特性,导通电压降小,且几乎没有反向恢复时间,常用在开关电源等低电压输出的高频整流电路中。

常见的晶闸管分为5种:普通晶闸管、快速晶闸管和高频晶闸管、逆导晶闸管、双向晶闸管、光控晶闸管。普通晶闸管,容量等级大,目前它常用在大功率整流电路和周波变换器中。快速晶闸管和高频晶闸管,它利用特殊工艺制造,关断时间小于 $50\mu\text{s}$,主要用在感应加热的中频电源中。逆导晶闸管(RCT),它是将一个晶闸管和一个二极管反并联集成在同一硅片上面构成的组合器件,常用在直流斩波器、倍频式中频电源及三相逆变器电路中。双向晶闸管(Triac),它把两个反并联的晶闸管集成在同一硅片上,是控制交流功率的理想器件,主要用在交流无触点继电器、交流相位控制电路中。光控晶闸管,它不用电压电流触发,而是用光触发晶闸管导通,主要应用在电力系统等高电压大电流场合。

理想的全控型器件在瞬间完成导通或关断,没有过渡过程;正向导通电压降和关断后的漏电流都是零。而实际的器件既存在开通和关断时间,又有导通电压降和漏电流。因此,一个实际的全控型器件,其性能的优劣就在于它在多大程度上接近这些理想特性。各种不同类型的器件存在的差异很大,GTO和IGCT等晶闸管型器件,去掉正向导通脉冲它们仍能保持导通,只有施加反向关断脉冲时器件才关断;而VDMOS,BJT和IGBT等晶体管型器件,一旦撤走开通脉冲,器件就立即关断,施加反向脉冲只是为了避免干扰造成误导通。GTO,IGCT和BJT等是电流型器件,VDMOS和IGBT等是电压型器件,它们的控制驱动电路设计要区别对待。即使同是电流型器件,如GTO和BJT,由于器件的特性不一样,其控制驱动的要求也很不一样。为了让每一种器件的特性发挥到最佳,电路的设计者须根据器件特点和使用要求合理选用驱动电路。

磁性元件主要指变压器和电抗器。随着电力电子技术的高频化,磁性元件的工作频率不断提高,就需要能高频工作且损耗小的软磁性材料。这些磁性材料有软磁合金(铁镍合金、铁铝合金、铁钴钒合金等)、铁氧体(锰锌铁氧体、镁锌铁氧体、镍锌铁氧体等)、新型非晶和微晶软磁材料(铁基非晶、钴基非晶、铁基微晶、钴基微晶等)。即使同一种材料,如果所含成分不同,性能、价格和适用条件(频率和温度范围)差别很大。如日本TDK的锰锌铁氧体材料,根据其性能指标和适用条件不同,就分为PC20,PC30,PC40等多种。另一方面,为了适应小功率开关电源的需要,磁性元件的结构不断向超薄型、平面型发展。如平面变压器以单层或多层印刷电路板代之铜导线,因而厚度远低于常规变压器,能够直接制作在印刷电路板上。其突出优点是能量密度高,因而体积大大缩小,相当于常规变压器的20%;效率通常高达97%~99%;工作频率高,从50kHz到2MHz;具低漏感(小于0.2%)和低电磁干扰(EMI)。

电容器是与磁性元件对偶的一种储能和滤波元件。直流电容器以铝电解和钽电解电容器为主。交流电容器根据电压等级、容量和使用频率的不同,种类繁多,如云母电容器、纸介质电容器、聚苯乙烯电容器、聚丙烯电容器、涤纶电容器、复合介质电容器、独石电容器等等。

铝电解电容器的工作温度范围一般是 85°C ,当工作温度每升高 10°C 其寿命就减短一半。由于电力电子装置内部的环境温度相对较高,为了电容器的寿命能与装置的其他元器件寿命相匹配,需要采用 105°C 的电解电容器,而不是 85°C 的电容。超容电容器是近年