

电气工程



国防科工委「十五」规划专著

静止变流器

陈道炼 著



哈尔滨工业大学出版社

北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社

西北工业大学出版社

哈尔滨工程大学出版社



国防科工委“十五”规划专著·电气工程

静止变流器

陈道炼 著

哈尔滨工业大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社

西北工业大学出版社 哈尔滨工程大学出版社

内容简介

静止变流器是应用电力半导体器件,是将直流电能转换成交流电能的一种装置。在以直流发电机、蓄电池为主直流电源的二次电能变换和可再生能源(太阳能、风能等)的并网发电场合,静止变流器具有广泛的应用前景。

本书在论述了静止变流器现状与发展的基础上,按电气隔离、功率流向、电源性质、相数、模块数、相关技术等几个方面,系统、深入并有创新地论述了低频环节、单向电压源高频环节、高频脉冲直流环节、高频脉冲交流环节、电流源高频环节、直流变换器型高频环节、三相、并联静止变流器以及静止变流器的控制、滤波、机内辅助电源等相关技术。以三态 PWM 电流滞环控制单向电压源高频环节静止变流器、三态 DPM 电流滞环控制单相与三相高频脉冲直流环节静止变流器为例,论述了静止变流器的应用。

本书集新概念、系统性、理论性、工程性于一体,是一本内容十分翔实、理论与工程实践紧密结合的著作,可作为高等学校电气工程学科本科生、硕士生、博士生和教师的参考书,也可供从事静止变流器研究、开发的工程技术人员参考使用,特别是对航空、航天、航海等国防领域电气工程技术人员具有更重要的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

静止变流器/陈道炼著. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2004.12

ISBN 7-5603-2104-6

I. 静… II. 陈… III. 变流器 IV. TM46

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 128492 号

静止变流器

陈道炼 著

责任编辑 杨桦

哈尔滨工业大学出版社出版发行

哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号(150006)

发行部电话:0451-86416203

E-mail:press@0451.com

哈尔滨工业大学印刷厂印刷

开本:850×1168 1/32 印张:12.5 字数:321 千字

2004 年 12 月第 1 版 2004 年 12 月第 1 次印刷 印数:3 000 册

ISBN 7-5603-2104-6/TM·43 定价:20.00 元

国防科工委“十五”规划专著编委会

(按姓氏笔画排序)

主 任:张华祝

副主任:陈一坚 屠森林

编 委:王文生 王泽山 卢伯英 乔少杰
刘建业 张华祝 张近乐 张金麟
杨志宏 杨海成 肖锦清 苏秀华
辛玖林 陈一坚 陈鹏飞 武博祎
侯深渊 凌 球 聂 武 谈和平
屠森林 崔玉祥 崔锐捷 焦清介
葛小春



总 序

国防科技工业是国家战略性产业,是国防现代化的重要工业和技术基础,也是国民经济发展和科学技术现代化的重要推动力量。半个多世纪以来,在党中央、国务院的正确领导和亲切关怀下,国防科技工业广大干部职工在知识的传承、科技的攀登与时代的洗礼中,取得了举世瞩目的辉煌成就。研制、生产了大量武器装备,满足了我军由单一陆军,发展成为包括空军、海军、第二炮兵和其他技术兵种在内的合成军队的需要,特别是在尖端技术方面,成功地掌握了原子弹、氢弹、洲际导弹、人造卫星和核潜艇技术,使我军拥有了一批克敌制胜的高技术武器装备,使我国成为世界上少数几个独立掌握核技术和外层空间技术的国家之一。国防科技工业沿着独立自主、自力更生的发展道路,建立了专业门类基本齐全,科研、试验、生产手段基本配套的国防科技工业体系,奠定了进行国防现代化建设最重要的物质基础;掌握了大量新技术、新工艺,研制了许多新设备、新材料,以“两弹一星”、“神舟”号载人航天为代表的国防尖端技术,大大提高了国家的科技水平和竞争力,使中国在世界高科技领域占有了一席之地。党的十一届三中全会以来,伴随着改革开放的伟大实践,国防科技工业适时地实行战略转



移,大量军工技术转向民用,为发展国民经济做出了重要贡献。

国防科技工业是知识密集型产业,国防科技工业发展中的一切问题归根到底都是人才问题。50多年来,国防科技工业培养和造就了一支以“两弹一星”元勋为代表的优秀的科技人才队伍,他们具有强烈的爱国主义思想和艰苦奋斗、无私奉献的精神,勇挑重担,敢于攻关,为攀登国防科技高峰进行了创造性劳动,成为推动我国科技进步的重要力量。面向新世纪的机遇与挑战,高等院校在培养国防科技人才,传播国防科技新知识、新思想,攻克国防基础科研、高技术研究难题和生产当中,具有不可替代的作用。国防科工委高度重视,积极探索,锐意改革,大力推进国防科技教育特别是高等教育事业的发展。

高等院校国防特色专业教材及专著是国防科技人才培养当中重要的知识载体和教学工具,但受种种客观因素的影响,现有的教材与专著整体上已落后于当今国防科技的发展水平,不适应国防现代化的形势要求,对国防科技高层次人才的培养造成了相当不利的影响。为尽快改变这种状况,建立起质量上乘、品种齐全、特点突出、适应当代国防科技发展的国防特色专业教材体系,国防科工委全额资助编写、出版200种国防特色专业重点教材和专著。为保证教材及专著的质量,在广泛动员全国相关专业领域的专家学者竞投编著工作的基础上,以陈懋章、王泽山、陈一坚院士为代表的100多位专家、学者,对经各



单位精选的近 550 种教材和专著进行了严格的评审,评选出近 200 种教材和学术专著,覆盖航空宇航科学与技术、控制科学与工程、仪器科学与工程、信息与通信技术、电子科学与技术、力学、材料科学与工程、机械工程、电气工程、兵器科学与技术、船舶与海洋工程、动力机械及工程热物理、光学工程、化学工程与技术、核科学与技术等学科领域。一批长期从事国防特色学科教学和科研工作的两院院士、资深专家和一线教师成为编著者,他们分别来自清华大学、北京航空航天大学、北京理工大学、华北工学院、沈阳航空工业学院、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、上海交通大学、南京航空航天大学、南京理工大学、苏州大学、华东船舶工业学院、东华理工学院、电子科技大学、西南交通大学、西北工业大学、西安交通大学等,具有较为广泛的代表性。在全面振兴国防科技工业的伟大事业中,国防特色专业重点教材和专著的出版,将为国防科技创新人才的培养起到积极的促进作用。

党的十六大提出,当人类社会跨入 21 世纪的时候,我国进入全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的新的发展阶段。全面建设小康社会的宏伟目标,对国防科技工业发展提出了新的更高的要求。推动经济与社会发展,提升国防实力,需要造就宏大的人才队伍,而教育是奠基的柱石。全面振兴国防科技工业必须始终把发展作为第一要务,落实科教兴国和人才强国战略,推动国防科技工业走新型工业化道路,加快国防科技工业科技创



新步伐。国防科技工业为有志青年展示才华,实现志向,提供了缤纷的舞台,希望广大青年学子刻苦学习科学文化知识,树立正确的世界观、人生观、价值观,努力担当起振兴国防科技工业、振兴中华的历史重任,创造出无愧于祖国和人民的业绩。祖国的未来无限美好,国防科技工业的明天将再创辉煌。

张华祝



前 言

随着电力电子技术的迅猛发展,静止变流器广泛应用于航空、航天、航海等国防领域和电力系统、交通运输、邮电通信、工业控制等民用领域。特别是,随着石油、煤和天然气等主要能源日益紧张,新能源的开发和利用越来越得到人们的重视。利用新能源的关键技术——静止变流技术,能将蓄电池、太阳能电池和燃料电池等其他新能源转化而来的直流电能变换成交流电能与电网并网发电。因此,静止变流器在新能源开发和利用领域有至关重要的地位。

静止变流器的具体应用领域主要有:(1)以直流发电机、蓄电池为主直流电源的二次电能逆变,如航空静止变流器(27V 或 270VDC/115V 400Hz AC)、通信静止变流器(48VDC/220V 50Hz AC)等;(2)以变频或恒频交流电为主交流电源的二次电能逆变,如飞机变速恒频电源(变频交流电/115V 400Hz AC)、变频电源(220V 50Hz AC/115V 400Hz AC 或 115V 400Hz AC/220V 50Hz AC)等;(3)不间断交流电源的供电;(4)电压、电流功率放大;(5)太阳能、风能等可再生能源的并网逆变;(6)交流电机的运动控制等场合。

本书力图按照电气隔离、功率流向、电源性质、相数、模块数、相关技术等几个方面,来论述静止变流器的概



念、电路结构、电路拓扑族、控制策略、原理特性、参数设计、应用以及控制、滤波、机内辅助电源等相关技术。渴望读者从中有所受益,并有可能地获得一些创新思路,从而进一步推动静止变流器的发展。

本书共分 15 章进行论述。第一章系统地论述了静止变流器的现状、发展与应用领域;第二章论述了方波、阶梯波合成、脉宽调制低频环节静止变流器的原理、参数设计、输出电压调节与谐波分析;第三章深入论述了单向电压源高频环节静止变流器的电路结构、拓扑族、调制方式、原理特性和参数设计;第四章在论述了单级 DC-DC 变换器、单级 DC-AC 逆变器软开关技术的基础上,首次提出了综合软化技术新概念,即高频脉冲直流环节静止变流器电路结构与拓扑族,并深入论述了其控制策略、占空比扩展原理;第五章在论述了正激变换器磁复位技术的基础上,深入分析研究了(并联交错)有源箝位正激式高频脉冲直流环节静止变流器的稳态、小信号与大信号动态特性;第六章论述了高频脉冲直流环节静止变流器关键电路参数的设计,并给出了设计准则和设计实例;第七章提出了高频脉冲交流环节静止变流器拓扑,并深入论述了其控制策略、原理特性、参数设计与试验结果;第八章提出了电流源高频环节静止变流器拓扑,并深入论述了其原理特性、控制策略、参数设计与试验结果;第九章提出了直流变换器型高频环节静止变流器电路结构与拓扑族,并深入论述了其原理、控制策略、参数设计与仿真结果;第十章论述了三相静止变流器的构成原理、控制



策略、输出电压对称度、负载特性、参数设计,深入分析研究并设计了一种性能优良的单相/三相基准正弦波发生器;第十一章论述了并联静止变流器的环流抑制、均流与同步技术;第十二章论述了电压型与电流型线性控制技术、单周期非线性控制技术,特别是对迟滞环宽峰/谷值电流控制技术进行了深入的分析研究,并给出了应用实例;第十三章提出并深入论述了静止变流器输入与输出滤波器的设计;第十四章论述了基于电流控制 RCD 箝位、有源箝位反激变换器的静止变流器高频开关机内辅助电源的原理特性、关键电路参数设计,并给出了设计实例;第十五章深入系统地论述了三态 PWM 电流滞环控制单向电压源高频环节静止变流器、三态 DPM 电流滞环控制单相与三相高频脉冲直流环节静止变流器的系统构成、参数设计、试验结果、性能比较。

南京航空航天大学电气工程系博士生导师陈道炼教授为本书的惟一著者。为了全面、系统地反映静止变流器的全貌,书中内容按三类层次著述:(1)多年来,作者主持的多项航空基础科学基金、中国及江苏省博士后科学基金项目的创新成果;(2)作者多年的科学研究成果和积累;(3)一些传统的内容(如方波、多重移相叠加阶梯波合成、脉宽调制低频环节静止变流器)。

本书作者自 1986 年开始攻读硕士学位至今,一直从事电力电子技术的应用基础和应用研究,先后主持国家自然科学基金、江苏省自然科学基金、航空基础科学、中国及江苏省博士后科学、台达电力电子科教发展基金等 8 个项目,



获2项中国专利、国防科学技术二、三等奖各1项,在国内外重要期刊上发表学术论文50余篇。特别是,作者以高频环节静止变流器为研究对象,倾注了大量的心血,取得了许多重要研究成果。多年来,作者与静止变流器结下了不解之缘,具有十分浓厚的感情;将多年的研究成果和积累加以科学总结,并以此书奉献给广大读者,是作者多年来的夙愿。如果此书有助于提高广大读者的理论和技术水平,对静止变流器的发展能起到较大的促进作用,作者将甚感欣慰。

本书书稿的文字录入、绘图、排版与校稿工作,由著者指导的博士研究生李磊、硕士研究生王伟、张海涛、王宇鹏、章建峰、李旭、朱玲莉、何豁然、张蓉、宋晨、汤雨、宋海峰、汪超、王建华等同学完成。对他们的辛勤劳动,致以诚挚的谢意。

本书的出版得到了国防科工委重点教材建设计划申请受理办公室、哈尔滨工业大学出版社、南京航空航天大学教务处和自动化学院的大力支持,特此致谢。

由于作者水平有限,加之时间仓促,书中难免有疏漏和不妥之处,恳请读者批评指正。

著者 陈道炼

南京航空航天大学电气工程系

邮编:210016 电话:13851603868

E-mail: chendaolian@hotmail.com

2004年1月

目 录

第一章 静止变流器的现状与发展	1
1.1 何谓静止变流器	1
1.2 静止变流器的现状与发展	2
1.3 静止变流器的技术指标与应用领域	10
本章小结	12
第二章 低频环节静止变流器	13
2.1 引 言	13
2.2 低频环节静止变流器电路结构与拓扑族	13
2.3 方波静止变流器	15
2.4 阶梯波合成低频环节静止变流器	21
2.5 脉宽调制低频环节静止变流器	28
本章小结	33
第三章 单向电压源高频环节静止变流器	35
3.1 引 言	35
3.2 单向电压源高频环节静止变流器电路结构与拓扑族	35
3.3 前置DC-DC变换级的稳态原理特性	41
3.4 后置DC-AC逆变器级的稳态原理特性	49
本章小结	56
第四章 高频脉冲直流环节静止变流器拓扑族与控制策略 ..	57
4.1 引 言	57
4.2 单级DC-DC变换器的软开关技术	58
4.3 单级DC-AC逆变器软开关技术	65
4.4 高频脉冲直流环节逆变器电路结构与拓扑族	69
4.5 高频脉冲直流环节逆变器控制策略	75



本章小结	78
第五章 有源箝位正激式高频脉冲直流环节静止变流器	
原理特性	80
5.1 引 言	80
5.2 正激变换器的磁复位技术	80
5.3 有源箝位正激式高频脉冲直流环节静止变流器稳态分析	104
5.4 有源箝位正激式高频脉冲直流环节静止变流器的小信号特性	108
5.5 有源箝位正激式高频脉冲直流环节静止变流器的大信号特性	117
本章小结	124
第六章 高频脉冲直流环节静止变流器关键电路参数的设计	
.....	125
6.1 引 言	125
6.2 关键电路参数的设计	125
6.3 设计实例	134
本章小结	135
第七章 高频脉冲交流环节静止变流器	136
7.1 引 言	136
7.2 高频脉冲交流环节静止变流器电路结构与拓扑族	137
7.3 单极性移相控制高频脉冲交流环节静止变流器	138
7.4 双极性移相控制高频脉冲交流环节静止变流器	152
本章小结	167
第八章 电流源高频环节静止变流器	168
8.1 引 言	168
8.2 电流源高频环节静止变流器电路结构与拓扑族	168
8.3 电流源高频环节静止变流器的稳态原理特性	171
8.4 电流源高频环节静止变流器控制原理	179
8.5 电流源高频环节静止变流器的设计与实现	182



本章小结	184
第九章 直流变换器型高频环节静止变流器	186
9.1 引 言	186
9.2 单向直流变换器型高频环节静止变流器	187
9.3 双向直流变换器型高频环节静止变流器	192
9.4 双向正反激组合直流变换器型高频环节静止变流器	197
本章小结	204
第十章 三相静止变流器	205
10.1 引 言	205
10.2 三相全桥式静止变流器	205
10.3 三相半桥式静止变流器	209
10.4 有源箝位谐振直流环节三相四桥臂静止变流器	211
10.5 组合式三相静止变流器	216
10.6 单相/三相基准正弦波发生器	222
本章小结	228
第十一章 并联静止变流器	230
11.1 引 言	230
11.2 并联静止变流器的类型与发展趋势	231
11.3 并联静止变流器的均流技术	236
11.4 并联静止变流器的同步技术	241
11.5 共用电压调节器的电流型控制并联静止变流器	241
本章小结	242
第十二章 静止变流器控制技术	244
12.1 引 言	244
12.2 电压型控制技术	245
12.3 峰/谷值电流型控制技术及其应用	247
12.4 平均值电流型控制技术及其应用	267
12.5 单周期控制技术及其应用	270
本章小结	273



第十三章 静止变流器输入与输出滤波器	274
13.1 引 言	274
13.2 单级 LC 与单电容输入滤波器	275
13.3 两级 LC 输入滤波器	277
13.4 单级 LC 输出滤波器	290
13.5 可控谐振阻尼 LC 输出滤波器	293
13.6 谐振型 LC 输出滤波器	297
本章小结	299
第十四章 静止变流器机内辅助电源	300
14.1 引 言	300
14.2 电流控制 RCD 箝位反激变换器高频开关机内辅助电源	301
14.3 电流控制有源箝位反激变换器高频开关机内辅助电源	306
本章小结	327
第十五章 三态电流滞环控制高频环节静止变流器的设计与实现	328
15.1 引 言	328
15.2 1kVA 27VDC/115V 400Hz AC 三态 PWM 电流滞环控制 单向电压源高频环节静止变流器	329
15.3 750VA 27VDC/115V 400Hz AC 三态 DPM 电流滞环控制 单相高频脉冲直流环节静止变流器	343
15.4 3kVA 27VDC/200V 400Hz AC 三态 DPM 电流滞环控制 三相高频脉冲直流环节静止变流器	361
15.5 高频环节静止变流器的技术性能比较	374
本章小结	375
参考文献	377

第一章 静止变流器的现状与发展

1.1 何谓静止变流器

一、静止变流器的概念

DC-AC 逆变器是将直流电能转换成交流电能的变流装置,供交流负载用电。若通过直流电动机-交流发电机组来实现这种电能的逆变,则称为旋转变流机;若通过功率半导体器件来实现这种电能的逆变,则称为静止变流器。由于静止变流器在体积、重量、变换效率、可靠性、电性能等方面均比旋转变流机优越,因此,静止变流器必将并且正在逐步取代旋转变流机。

航空静止变流器(aviation static inverter)是应用功率半导体器件,将飞机直流发电机或蓄电池产生的主电源直流电 27 V 或 270 V 转换成恒压恒频交流电 115 V 400 Hz、36 V 400 Hz 或 26 V 400 Hz 的一种静止变流装置,作为飞机二次电源使用。

二、静止变流器的分类

静止变流器的种类繁多,可按输出能量的去向、功率流动的方向、输入电源的性质、输出与输入的电气隔离、功率电路的拓扑结构、功率电路的器件、占空比的控制方式、控制技术、输出电压电平、输出电压波形、输出电压相数、输出电压频率以及功率开关的工作方式等方面加以分类:无源、有源逆变,单向、双向逆变,电压源、电流源逆变,非隔离型、低频环节、高频环节逆变,推挽式、半桥式、全桥式逆变,SCR、GTR、GTO、MOSFET、IGBT、IGCT、混合器件逆