

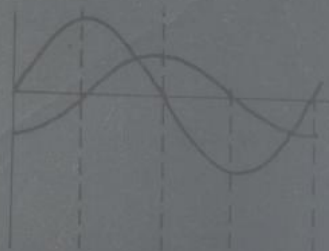


电力电子技术丛书

电力电子技术 与节能

袁昭锬 编著

机械工业出版社



DIANLI DIANZI JISHU CONGSHU

电力电子技术丛书

电力电子技术与节能

袁昭锬 编著



机械工业出版社

本书是《电力电子技术丛书》的一个分册。

自从电力半导体器件及其应用技术发展以来,给电气工程有关各领域的节能创造了极为有利的条件。本书共分七章,主要说明电力电子技术在功率整流、直流传动、交流传动、直流输电、无功功率补偿以及各种晶闸管电源、电力电子开关在节能方面所起的作用及收到的经济效益。书中,对应用电力电子技术所以能实现节能的基本原理和方法作了详尽的叙述,并列出主要的计算公式,以期对读者灵活运用电力电子技术有所裨益。

本书可供从事节能技术的各类人员阅读,也可供大专院校有关专业师生参考。

电力电子技术丛书 电力电子技术与节能

袁昭鐸 编著

责任编辑:严蕊琪 版式设计:霍永明
封面设计:方 芬 责任校对:熊天荣
责任印制:郭 炜

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业登记证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ · 印张 $10 \frac{7}{8}$ · 字数 282 千字

1989年7月北京第一版·1989年7月北京第一次印刷

印数 0,001—3,100·定价:9.50元

ISBN 7-111-01033-7/TM·136

出版者的话

电力电子技术是以晶闸管为主的电力半导体器件及其应用的技术，也是融合“电力”、“电子”和“控制”于一体的技术。由于电力半导体器件具有效率高、控制性能好、体积小、重量轻、使用可靠等优点，它已广泛地应用于电力、冶金、矿山、化工、交通运输、机械、轻工等部门，成为节能最有成效的技术之一。

为了普及与推广电力电子技术，大力促进我国国民经济各部门的发展，在中国电工技术学会电力电子学会组织下，我们决定出版这套《电力电子技术丛书》。

这套丛书包括《电力半导体器件原理》、《电力半导体电路原理》、《电力电子技术与节能》、《直流电动机晶闸管调速系统》、《交流电动机晶闸管调速系统》、《晶闸管斩波器》、《无功补偿与电力电子技术》、《家用电器与电力电子技术》、《晶闸管交流电力控制器》、《电力半导体直流稳定电源》、《不间断供电系统》、《脉冲电镀和脉冲焊电源》等，将陆续出版。

电力电子学会及本丛书编委会对丛书的选题、组稿、审定稿付出了辛勤劳动，还有不少单位对编审稿工作给予了热忱关怀与帮助，在此表示深切的谢意。

机械工业出版社

编委会成员

主任委员 顾廉楚

副主任委员 张明勋 苏文成 张为佐
陈守良 严蕊琪

委员（按姓氏笔划序）

卞敬明 孙流芳 李佑持 沈来仪

张立 张永生 张铁忠 周胜宗

秦祖荫 徐传骧

前 言

以晶闸管为主的电力半导体器件及其应用技术的发展,给电气工程技术带来很大的变化。微处理器的应用,使电力电子装置进入了以计算机为控制工具的崭新阶段,这为国民经济各部门以节能为中心的技术改造,开拓了更加宽阔的前景。

本书概述了将电力电子技术应用于各有关领域内实现节能的基本理论和方法,也包括一些基本的分析和计算;并在各章开始部分介绍了有关变流器的基本原理,以期对读者灵活运用某些技术措施或经验有所裨益。至于更专门的一些技术问题请查阅本丛书其他各分册。

中国电工技术学会和电力电子学会从1980年以来,召开过多次节能技术讨论会,并在《电工技术杂志》和《电力电子技术》中陆续发表了有关论文。本书就是在这个基础上加以综合,摘录补充了有关内容,并总结了本人多年来的实践经验而写成的。

本书由赵家璧、张明勋、陆善文三位同志审稿,在编写过程中刘竞成、金子康、张秀澹等同志曾给予帮助,对此一并表示诚挚的谢意。

因限于水平和篇幅,疏漏和差错之处请于指正。

作者

目 录

前言

第一章 概述	1
第一节 电力电子技术的发展综述	1
一、国际评价和预测	1
二、发展基础与目前水平	3
第二节 电力电子技术应用于节能的效果简介	6
一、大功率整流	6
二、直流传动	7
三、交流传动	9
四、直流输电	11
五、无功功率快速静止补偿	12
六、其他晶闸管电源	13
七、电力电子开关	15
第三节 电力电子技术应用于节能的基本问题	16
一、器件制造技术的开发	16
二、主电路结构和控制技术的开发	18
三、装置应用技术的开发	19
第二章 大功率电解用整流器的节能	22
第一节 整流电路基本原理	22
一、整流电路的术语	22
二、整流器的基本概念和主电路电量的计算	24
三、整流器的换相压降、功率因数和电压调整率	36
四、整流变压器和自耦调压器的额定值	41
第二节 电解用整流器节能的主要问题	46
一、电解直流电源的规模和特点	46
二、整流器主电路联结型式	48
三、整流装置的调压方式和调压范围	49
四、有载分接整流变压器	51

五、有载分接自耦调压器	54
六、变压整流装置	56
七、导电排的配置	58
八、冷却装置	58
九、整流器过电压保护和过电流保护的完善化	60
十、直流电计量装置的健全化	64
第三节 整流装置的变流效率和功率因数计算	66
一、变流效率的定义和标准规定损耗项目	66
二、整流元件的正向损耗	67
三、快速熔断器损耗	69
四、整流器过电压保护系统的损耗	71
五、整流器交、直流导电排损耗	72
六、变压器、调压器与电抗器的损耗	73
七、导电排感抗和整流装置功率因数计算	77
第三章 电力电子技术在直流传动中的应用	80
第一节 电网换相逆变器和斩波器基本原理	80
一、电网换相(他励式)逆变器	80
二、直流斩波器	86
第二节 直流电动机控制原理	105
一、电动机驱动方式	105
二、直流电机基本方程式	106
三、直流变速传动	109
四、直流可逆传动	110
五、带有反馈的控制系统	112
六、微型计算机控制在直流传动中的应用	117
第三节 电气牵引传动	120
一、铁道电力机车	120
二、地铁动车、城市电车和蓄电池车	123
三、斩波调压调速节能分析	128
第四节 工业应用	130
一、工业应用上的考虑	130
二、减少晶闸管整流器相控深度的措施	132

三、直流变磁传动控制系统	134
第四章 电力电子技术在交流传动中的应用	136
第一节 自换相逆变器 and 变频器基本原理	136
一、周波变流器	136
二、包络线周波变流器	151
三、单相中心抽头逆变器	154
四、单相桥式逆变器	158
五、三相桥式逆变器	165
六、恒电流源逆变器	171
七、功率晶体管逆变器	173
八、通过逆变器实现功率反馈	174
第二节 交流电动机基本原理	176
一、同步电机基本方程式	176
二、笼型异步电动机	179
三、绕线型异步电动机	185
第三节 交流传动系统的节能	187
一、交流传动系统节能的基本问题	187
二、异步电动机调压调速或不调速节能	189
三、风机、泵类通过转速控制方式节能	196
四、绕线型异步电动机串级调速	202
五、变频装置在电气传动中的应用和分类	208
六、电压型准矩形波逆变器和PWM逆变器变频调速	210
七、电流型逆变器变频调速	217
八、交-交变频调速的节能	222
九、同步电动机无刷励磁	223
十、交流电动机结构上的革新	226
第五章 电力电子技术在供电系统中的应用	229
第一节 低压控制电器	229
一、无触点开关	229
二、电子交流电力控制器	231
三、晶闸管调压器线路上的改进	234
四、直流快速电子开关	234

五、交流电磁接触器直流运行	238
第二节 高压电源设备	241
一、电压倍增器	241
二、高压硅堆的应用	242
三、高压直流输电	243
第三节 不间断电源和高稳定度电源	246
一、不间断电源	246
二、高稳定度晶闸管电源	248
三、脉宽调制型晶体管开关电源	249
第四节 同步发电机晶闸管励磁和测功机	253
一、同步发电机晶闸管励磁	253
二、脉冲励磁在柴油发电机上的应用	257
三、晶闸管电机测功机	260
第五节 无功功率静止补偿装置	262
一、无功功率补偿的重要性和技术措施	262
二、快速静止无功补偿装置	264
第六章 变流器在感应加热、电焊和其他一些领域的应用	269
第一节 电感应熔炼和加热	269
一、电感应加热用变频器概述	269
二、静止变频器及感应加热系统工况分析	271
三、逆变器输出频率和输出功率的自动调节	273
四、静止变频器与发电机式变频机的比较	276
五、感应加热与节能	277
第二节 电力半导体器件在电焊领域的应用	279
一、电焊机节能的方向	279
二、无铁心高效率交直流电源两用直流弧焊机	281
三、焊接用 5kA 硅整流管的应用	286
第三节 其他加热用晶闸管电源	288
一、离子氮化炉的晶闸管电源	288
二、点燃煤粉用的高能电弧电源	289
第四节 脉冲电镀与快速充电	290
一、功率用脉冲电源	290

二、蓄电池快速充电技术	293
第七章 谐波的限制和消除	297
第一节 谐波的危害和限制的标准	297
一、谐波电流的产生及其危害性	297
二、我国供电系统对谐波电压和谐波电流的限制	299
三、世界上工业化国家对谐波的限制	299
第二节 谐波分析和抑制谐波的措施	302
一、谐波分析的基本理论	302
二、变流器直流侧谐波分量分析	304
三、交流电源侧谐波分量分析	306
四、谐波电流的分配和影响	311
五、滤波器	314
六、对无线电干扰的抑制	317
七、谐波分析实例	318
八、防止移相电容器发生谐振的措施	331
参考文献	335

第一章 概 述

第一节 电力电子技术的发展综述

一、国际评价和预测

电力电子技术是以晶闸管为主的电力半导体器件（包括硅整流管、晶闸管、大功率晶体管和大功率场效应晶体管等）及其应用的技术。电力电子学是电气工程中电力、电子与控制三大主要领域之间的边缘学科。电力电子学与信息电子学在技术上的主要不同点是功效问题。后者涉及信息的检出、传送和处理，多数采用低电平电路，对效率的要求不高（一般不超过15%）；而电力电子技术则应用于电力的变换、传送和控制的功率电路，对效率的要求较高（一般不低于80%）。事实上自从50年代硅整流管和硅晶闸管相继问世，并逐步取代汞弧整流阀以来，上述效率要求普遍都能满足，在一些大功率变流装置中，其效率已接近于电力变压器。因此近10年来对电力电子学节能作用的探讨，已成为国内外的一个重要课题。

从节能的观点出发，国外对电力电子技术评价较高，誉之为80年代的新电气技术和节能的“王牌”，甚至声称“电力电子化即节能”，等等。电力电子技术与节能的紧密联系，首先在于通过电力电子器件实现电力的变换和控制时，本质上是一种通断控制，导通时电压降很小，关断时则因漏电流极小而几乎不消耗能量。其次是由于应用电力电子技术进行控制，能得到快速的响应和精细的调节，装置的主体由于没有转动部件而获得很高的可靠性，从而保证被控制的机器设备效能提高，间接节约了物料和能量。第三是电力电子设备的内涵能少，由于近年在器件的功率化、小型化、组合化和廉价化方面进行革新，使得制造、运输、

安装和维护这些设备所耗费的能量,明显地小于容量相同、功能类似的机电产品。第四,电能是应用最广的二次能源,以电为媒介,而电力电子技术与能源的各个领域联系十分广泛,关系日益深化,对它们的开发、转换、输送、贮存和利用等各方面均发挥重要的作用。

目前各国正在开发的新能源中,有太阳能发电、燃料电池发电、风力发电等。在这些新能源实用化时,某些关键必须依靠电力电子技术来解决,特别是下面两个重大问题: 1) 变流与变频问题。例如太阳能发电、燃料电池所产生的都是直流电,需要用逆变器转换为交流电。又如风力发电,因风力不均,故电压和频率均不稳定,往往采用变频器进行稳频和稳压; 2) 联网问题。网络的电压、频率等参数的控制是涉及电力系统、控制技术和计算机技术的复杂问题,需要应用电力电子技术,以获得现代水平的有效控制。

为了弥补电力系统负荷高峰与低谷的差异,迫切需要发展储能技术。现在正在研究超导磁体储能,即系统中有剩余电能时,先整成直流向超导材料构成的电磁装置充电,当系统负荷高峰时,电磁装置释放能量,通过逆变器转换成交流供给电网。这样比抽水蓄能简便。可见,电力电子技术已渗透到能源利用的各个领域。

自1973年在美国召开的首次以电力电子学命名的专家会议以来,世界各国对电力电子学发展前景所作的一些预测归纳如下:

1) 采用电力半导体器件的电力电子装置将继续发展,并出现从未开拓的新领域;

2) 借助于电子计算机,电路分析与器件模拟的技术将进一步发展,使系统设计成为可能,而电力电子学将因此成为一门学科;

3) 电力半导体器件经过研究和发展,将和小信号元件同样取得突飞猛进;

4) 规格化的、一般用途的开关模块(组件),将进一步向

廉价、可靠、多功能发展，模块中还将包含控制电路在内；

5) 高压及快速半导体器件将继续提高性能并降低价格；

6) 交流调速技术将不断发展和普及；

7) 引入微电子技术之后，系统的控制性能将进一步提高；

8) 降低无功功率消耗及抑制高次谐波的技术将得到发展；

9) 在直流输电、新能源转换为电能和并网方面，电力电子技术的应用将得到发展；

10) 电车和超高速铁道等车辆方面，斩波器的应用将得到发展；

11) 电力用高频振荡技术将得到发展；

12) 在高等学校中将出现电力电子学专业，国家将要求某些大学设立这门学科；

13) 本学科内，有关专业（如器件与电路）之间的交流协作将会加强，并出现有关电力电子学的专业人才。

上面这些预测和估计，已为近10年来发达国家的实践所证实，其中不少也在我国成为现实。如果我们能从电力电子技术与微电子技术本质上的共同点和应用上的紧密关系来观察问题，对推动国民经济以节能为中心的技术改造和人民生活水平的迅速提高，将有很大裨益。

二、发展基础与目前水平

电力电子学的形成有两个关键的因素：一是汞弧变流器为变流技术提供了一定的发展基础；另一是晶闸管的出现使变流技术有了根本的转折。因此，电力电子学既是当代一些新技术综合发展的结果，又具有长期的发展基础。

就发展基础而言，本世纪初诞生的汞弧整流器，适应了电化学和电力牵引对直流电的需要，得到迅速的发展。20年代之后，静止“伦纳德”（Leonard）发挥了再生制动和精密控制转速的强大威力，在轧钢等领域逐步取代了电动发电机组。整流和有源逆变电路的理论，以及与变流器配套的整流变压器、电抗器的设计技术，随着大规模工业实践而趋于完备。

50年代中硅整流器出现后,首先在整流领域中取代汞弧整流器。而1957年第一只晶闸管的诞生,则为电子学进入电力系统开辟了新的纪元。随着硅整流管和晶闸管的电压、电流参数和性能的不断提 高,不仅变流器的单台容量迅速增大,并出现紧凑的变压整流器结构;而且还发展许多新的电力电子电路和实用装置。例如:斩波器(直-直变频器)、周波变流器(交-交变频器)、具有中间直流环节的变频器(交-直-交变频器)。为了改善逆变后的波形,又出现了脉宽调制器(PWM)等种种新的设备。在控制系统所用的部件方面,从汞弧整流器时代的真空管和磁放大器开始,屡经改进,已经出现了向第四代的变迁,即50年代后期的晶体管,60年代后期的集成电路,和70年代中期的大规模集成电路和微处理机。应用微型计算机的直接数字控制(DDC),为电力电子学的发展开辟了一个崭新的时代。它与晶体管或单结晶体管

表1-1 国外电力半导体器件的品种及其生产和研制水平

品 种	生 产 水 平	研 制 水 平
普通整流管	3500 A 3000 V, 5000 A 1000 V	8000 A 3000 V
快速整流管	1000 A 3000 V 10 kHz	2500 A 3000 V 300 ns
肖特基势垒二极管	60 A 40 V 0.23 μ s	800 A 1000 V
普通晶闸管	3000 A 4000 V 400 μ s	3500 A 6500 V, 4000 A 5000 V
快速晶闸管	1500 A 1200 V 20 μ s 5 kHz	1000 A 2500 V 30 μ s, 400 A 1200 V 4 μ s
门极辅助关断晶闸管	400 A 1200 V 8 μ s 10 kHz	500 A 2500 V 20 μ s
非对称晶闸管	2400 A 1800 V, 1900 A 2000 V	1000 A 2500 V
光控晶闸管	—	3500 A 4000 V (10 mW), 1200 A 8000 V 450 μ s
逆导晶闸管	1000 A 2500 V / 400 A 30 μ s	—
双向晶闸管	300 A 1000 V	1000 A 1200 V
可关断晶闸管	400 A 2500 V	2400 A 4500 V
场控晶闸管	—	2500 A 4000 V
双向光控晶闸管	—	200 A 800 V
功率晶体管	200 A 900 V, 1200 A 80 V	400 A 1000 V
功率静电感应晶体管	10 A 1200 V	—

表1-2 电力变换电路的形式及其主要应用

变 换 电 路 形 式		通 用				目 前 的 最高效率	
		用 途	电压范围		容 量		
			输 入	输 出			
直 流 负 载	交-直变换	从恒压、恒频的交流电源 变换成电压可调的直流电源	电解、电镀、充电、牵引 等直流电源，晶闸管伦纳德 电源	100~4000 V	100~4000 V	1 kW~ 130 MW	85~98%
	直-直变换	从恒压的直流电源变换成 电压可调的直流电源	晶闸管斩波电源（如电车 以及叉式升降机）	32~1500 V	32~1500 V	5~2400 kW	80~92%
交 流 负 载	直-交变换	从恒压或电压可调的直流 电源（包括从恒压、恒频交 流电源变换成的直流电源） 变换成可变电电压、可变频 率的交流电源	逆变电源	200~1000 V	200~1000 V	1 kVA~ 8000 kVA	80~92%
			晶闸管电动机电源（也包 括晶闸管起动用电源）	200~20kV	200~20kV	10kVA~ 20MVA	83~95%
	交-交变换	从恒压、恒频的交流电源 直接变换成可变电电压、可变 频率的交流电源	周波变流器电源	200~3300 V	200~3300 V	10kVA~ 10MVA	83~95%
			相位控制电源（如晶闸管 交流电压调整器）	200~440 V	200~440 V	1~100kVA	80~85%

的模拟信号触发方式相比,能更精确地实施相位控制,减少高次谐波的产生,和上一级计算机也能更好地配合。至此,电力电子技术已进入电力、电子与控制三者密切结合的新阶段。

从装置来看,电力电子技术在交流传动、直流输电、无功补偿方面已经进入实用阶段。应用日广的日用电器,也提供了最大的潜在应用市场。可以说,从小小的日用电器到庞大的直流输电系统,无一不渗透着电力电子技术的新成就,而这些发展和成就都与节能有着密切的关系。

表1-1列出国外电力半导体器件的生产和研制水平,表1-2列出电力变换电路的主要应用。由于新技术的发展非常迅速,因而在具体应用表列参数时,必须参考最新信息,加以修正或补充。

第二节 电力电子技术应用于节能的效果简介

一、大功率整流

过去沿用的汞弧整流器单机容量小(600 V、6000 A, 825 V、5000 A),电耗高(仅弧压降一项就在20 V左右),维护困难(需要抽真空和定期解体检修),且有汞汽引起的污染。所以,50年代中硅整流二极管问世之后,不久便在牵引变电所和电解工厂变流站取代汞弧整流器。60年代诞生的晶闸管,由于能够调节电压并通过门极脉冲进行电子控制,在电解、电镀领域的直流电源设备中得到了广泛的应用。

电解食盐水溶液制备烧碱和氯气,以及通过电解的方法精炼铝、铜、锌、铅等有色金属,需要大量的电,产品成本中电费占的比例很高,因而,提高电源设备的效率、节省电能是降低产品成本的一个重要课题。而且化工和冶金电解消耗的电量约占全国发电量的5~6%,这个领域的节电,就电力供应而言也是一个重要课题。特别是电解厂直流电源的容量往往很大,虽然电压多不超过800 V,但一个系统的电流可达200~450 kA,单一机组电流可达100 kA以上。用电如此集中,怎样确定变流站受电电压等级、调压方式和调压范围、变压器和整流器的总体结构方案、如