

XIANDAI DIANLI DIANZI JISHU
YU YINGYONG

现代电力电子技术 与应用

朱文杰 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

XIANDAI DIANLI DIANZI JISHU
YU YINGYONG

现代电力电子技术 与应用

朱文杰 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书着力介绍了电力电子器件的基本结构、工作原理和工作特性,详细分析了电力电子技术中的各种变换电路以及 PWM、软开关、矢量控制及直接转矩控制。主要内容包括:电力电子技术的概念、发展历史和应用简况;电力电子器件;相控整流电路;直流斩波电路与交流电力控制电路;无源逆变电路;组合变流电路;PWM 控制技术;软开关技术;矢量控制和直接转矩控制;电力电子技术在电力系统中的应用;电力电子技术在交通运输行业中的应用。

本书可作为电气工程及其自动化专业及相关专业本、专科教材,也可作为该专业研究生教学参考用书,还可供从事电力电子技术、电力系统及自动化、运动控制技术等领域的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

现代电力电子技术与应用 / 朱文杰编著. —北京: 中国电力出版社, 2016.1

ISBN 978-7-5123-8124-7

I. ①现… II. ①朱… III. ①电力电子技术 IV. ①TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 179183 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2016 年 1 月第一版 2016 年 1 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 20 印张 476 千字

印数 0001—2000 册 定价 49.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究



前 言



电力电子技术是应用于电力领域的电子技术，是利用电力电子器件对电能进行变换和控制的新兴学科，是目前发展较为迅速的一门学科，是高新技术产业发展的主要基础技术之一，是传统产业改造的重要手段。电力电子技术的发展是以电力电子器件为核心，伴随变换技术和控制技术的发展而发展的。

电力电子技术是以功率和变换为主要研究对象的现代工业电子技术。电力电子技术可以理解为功率强大，可供诸如电力系统那样大的电流、高电压场合应用的电子技术，它与传统的电子技术相比，其特殊之处不仅是因为它能够通过大电流和承受高电压，而且要考虑在大功率情况下，器件发热、运行效率的问题。电力电子技术研究的内容包括电力电子器件、变换器主电路和控制电路三个方面。

当代工、农业等各个领域都离不开电能，离不开表征电能的电压、电流、频率、波形和相位等基本参数的控制和转换，而电力电子技术可以对这些参数进行精确的控制和高效的处理，所以电力电子技术是实现电气工程现代化的重要基础。电力电子技术应用范围十分广泛，国防军事、电力系统、交通运输、能源开采、通信系统、计算机系统、新能源系统以及家用电器等无不渗透着电力电子技术的成果。

本书旨在为消化、传播这一既传统又新型的技术而尽一点绵薄之力，感谢中国电力出版社鼎力出版。但由于编者水平有限，殷切希望广大读者对本书的内容、结构及疏漏、错误之处给予批评、指正。

编 者

2015年12月



目 录

前言

✎ 绪论	1
0.1 电力电子技术的概念	1
0.2 电力电子技术的发展历史	3
0.3 电力电子技术的应用	5
✎ 第1章 电力电子器件	8
1.1 电力电子器件概述	8
1.2 电力二极管	13
1.3 晶闸管及其派生器件	17
1.4 门极可关断晶闸管	24
1.5 电力晶体管 (Giant Transistor, GTR)	28
1.6 功率场效应晶体管	31
1.7 绝缘栅双极型晶体管	35
1.8 其他新型电力电子器件	38
本章小结	40
✎ 第2章 相控整流电路	42
2.1 单相可控整流电路	42
2.2 三相可控硅整流电路	48
2.3 变压器漏感对整流电路的影响	54
2.4 有源逆变电路	55
2.5 电容滤波的不可控整流电路	59
2.6 整流电路的谐波和功率因数	61
2.7 其他可控整流电路	68
本章小结	75
✎ 第3章 直流斩波电路与交流电力控制电路	76
3.1 DC-DC 变换电路概述	76

3.2	非隔离型 DC-DC 变换电路	78
3.3	隔离型 DC-DC 变换器原理	90
3.4	有源功率因数校正器	104
3.5	交流电力控制电路和交-交变频电路	105
	本章小结	122
第 4 章	无源逆变电路	123
4.1	无源逆变电路概述	123
4.2	电压型逆变电路	127
4.3	电流型逆变电路	133
4.4	多重化逆变电路和多电平逆变电路	137
	本章小结	146
第 5 章	组合变流电路	147
5.1	间接交流变流电路	147
5.2	间接直流(直-交-直)变流电路	151
	本章小结	159
第 6 章	PWM 控制技术	160
6.1	PWM 控制概述	160
6.2	逆变电路的 SPWM 控制方法	167
6.3	逆变电路的其他 PWM 控制方法	175
6.4	多电平逆变电路的 PWM 控制	179
	本章小结	185
第 7 章	软开关技术	186
7.1	软开关的基本概念	186
7.2	软开关电路的分类	188
7.3	典型的软开关电路	190
	本章小结	195
第 8 章	矢量控制和直接转矩控制	196
8.1	矢量控制	196
8.2	直接转矩控制	212
	本章小结	223
第 9 章	电力电子技术在电力系统中的应用	224
9.1	高压直流输电	224
9.2	静止无功补偿装置	244

9.3	有源电力滤波器	255
9.4	控制同步电动机励磁系统	260
9.5	变速恒频发电技术	269
9.6	统一潮流控制器 UPFC	272
9.7	超导磁体储能系统 SMEC	274
9.8	光伏发电并网装置	278
	第 10 章 电力电子技术在交通运输行业中的应用	286
10.1	电力电子技术在火车中的应用	286
10.2	电力电子技术在磁悬浮列车中的应用	295
10.3	电力电子技术在汽车领域中的应用	299
10.4	电力电子技术在舰船中的应用	305
	参考文献	312

绪 论

绪论介绍什么是电力电子技术，它的发展史、应用概况及主要内容。

0.1 电力电子技术的概念

电力电子技术是应用于电力领域中的电子技术，当今电气控制领域中，主要以 MOSFET 和 IGBT 两种全控型器件为主，PWM 控制、软开关技术不断迅猛发展。

0.1.1 电力电子技术的组成

如图 0-1 所示，电力电子技术是进行电力变换与控制的技术，是电子技术的一个组成部分。我们熟知的模电、数电构成信息电子技术，完成信息处理，是电子技术的另一个组成。

电力电子技术是应用于电力领域的电子技术，是使用电力电子器件，应用电路理论、控制理论对电能进行变换、控制的技术。如图 0-2 所示，电力变换包括交流变直流（整流）、直流变交流（逆变）、直流变直流（斩波）和交流变交流（变压/变频/变相）等四种形式。

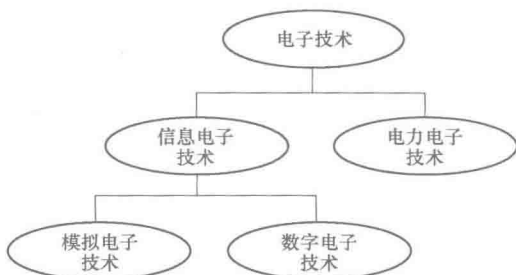


图 0-1 电子技术的组成

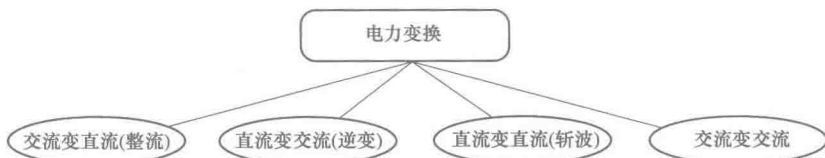


图 0-2 电力变换的形式

电力电子技术或称电力电子学 (Power Electronics)，是结合了电能变换、电磁学、自动控制、微电子及电子信息、计算机等学科的最新成果而迅速发展起来的交叉型综合性学科。

国际电气和电子工程师学会 (IEEE) 将电力电子技术表述为：有效地使用电力半导体器件，应用电路和设计理论及分析开发工具，实现对电能的高效能变换和控制的一门技术，包括电压、电流、频率和波形等方面的变换与控制。

0.1.2 电力电子技术的两大分支

如图 0-3 所示，电力电子技术包括电力电子器件制造技术和变流技术两大分支。



图 0-3 电力电子技术的两大分支

电力电子器件制造技术是电力电子技术的基础；变流技术又称电力电子器件应用技术，是电力技术的核心，包括器件构成的各种电力变换电路，以及控制这些电路的技术。

0.1.3 电力电子技术与其他学科的关系

电力电子技术的研究任务包括：①电力电子器件的工作原理与应用；②电力电子电路的电能变换原理；③控制技术以及电力电子装置的开发与应用。

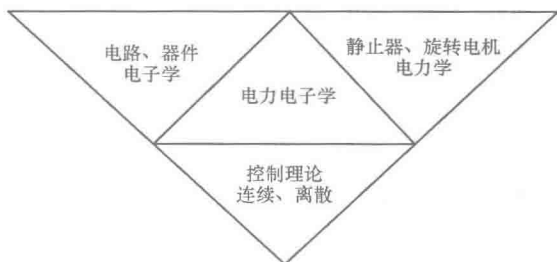


图 0-4 描述电力电子学的倒三角形

电力电子学这一名称是在 20 世纪 60 年代出现的，1974 年美国 W.Newell 用图 0-4 的倒三角形对电力电子学进行了描述，认为它由电力学、电子学和控制理论三个学科交叉形成，是新兴的交叉型综合性学科。

电力电子技术通过控制半导体器件的开通与关断，实现变换电能的功能，得到所需要的

高质量电源，其中电力电子器件对电力电子技术的发展影响最大。

1. 与电子学之间的关系

信息电子学（数电、模电）可分为电子器件和电子电路，分别与电力电子器件和电力电子电路的两大分支相对应。它们的器件制造技术的理论基础（半导体理论）是一样的，它们的材料及大多数制造工艺也是相同的。特别是现代电力电子器件的制造设备都和微电子器件制造设备通用，充分说明两者同根同源。

电力电子电路和电子电路的许多分析方法一致、分析软件相同，只是两者应用目的不同。前者用于电力变换和控制，后者用于信息处理。信息电子技术中，半导体器件既可处于放大状态，也可处于开关状态；而电力电子技术中，为避免功率损耗过大，器件只工作在开关状态，这成为电力电子技术区别于信息电子技术的一个重要特征。

2. 与电力学的关系

电力电子技术广泛用于电力工程，如高压直流输电、静止无功补偿、电力机车牵引、交直流电力传动、电解、电镀、电加热、高性能交直流电源等。电力电子学与电力学的关系十分密切，交集是电路理论。国内外均把电力电子技术归类为电气工程学科的一个分支。

3. 与控制理论的关系

控制理论在电力电子学中应用分为两大类。第一类是控制理论与电力电子学某些具体应用领域相结合，如控制理论在机器人、电力系统、电气传动中的应用，电力电子电路常被近似线性化。第二类是对电力电子电路拓扑结构进行建模，视为一个动态非线性系统并计及负荷特性，利用控制理论来提高和改善电力电子电路本身的某些性能。

如图 0-5 所示，电力电子技术是弱电控制强电的技术，是弱电和强电的接口，而控制理论是这种接口

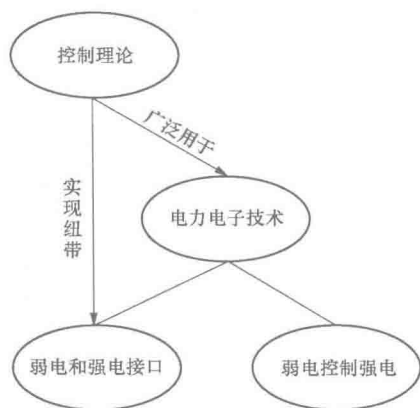


图 0-5 控制理论广泛用于电力电子系统中



的有力纽带，电力电子装置则是自动化技术的基础元件和重要支撑技术。

0.2 电力电子技术的发展历史

如图 0-6 所示，电力电子技术的发展史以电力电子器件的发展史为纲，可以展开为电力电子器件的发展、电力变换电路的发展以及控制技术的发展。

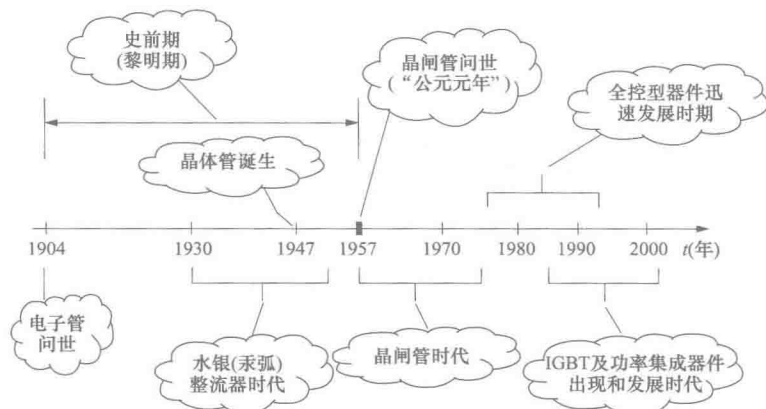


图 0-6 电力电子技术的发展历史

0.2.1 电力电子器件的发展

在整流器时代、逆变器时代和变频器时代之后，20 世纪 80 年代末期出现 MOSFET 和 IGBT 功率半导体复合器件，标志传统电力电子技术进入现代。现代电力电子技术的发展方向，是以传统的低频技术为主，向以现代的高频技术为主的电力电子学方向转变。

1. 整流器时代

大功率工业用电由工频（50Hz）交流发电机提供，但约有 20% 的电能以直流形式消费，最典型的是电解（有色金属和化工原料）、牵引（电气机车、电传动内燃机车、地铁机车、城市无轨电车等）和直传动（轧钢、造纸）三大领域。20 世纪 60~70 年代，大功率硅整流管和晶闸管的开发与应用得以很大发展，当时全国掀起了一股大办硅整流器厂的热潮。

2. 逆变器时代

20 世纪 70 年代出现世界范围内的能源危机，交流电动机变频调速因节能效果显著而迅速发展，其关键技术是将直流电逆变为 0~100Hz 的交流电。在 20 世纪 70~80 年代，变频调速装置逐渐普及，大功率逆变用的晶闸管、巨型功率晶体管（GTR）和门极可关断晶闸管（GTO）是当时电力电子器件的主角，应用包括高压直流输出、静止式无功功率动态补偿等。这时的电力电子技术已经能够实现整流和逆变，但工作频率较低，仅局限在中低频范围内。

3. 变频器时代

进入 20 世纪 80 年代后，大规模和超大规模集成电路技术的迅猛发展，为现代电力电子技术的发展奠定了基础。将集成电路技术的精细加工技术和高压大电流技术有机结合，出现了一批全新的全控型功率器件，首先是功率 MOSFET 的问世，导致了中小功率电源向高频化发展，而后绝缘栅双极型晶体管（IGBT）出现，带来大中型功率电源向高频发展。MOSFET 和 IGBT 的相继问世，是传统的电力电子向现代电力电子转化的标志。



1995年年底,功率 MOSFET 和 GTR 在功率半导体器件市场上达到平分秋色的地步,而用 IGBT 代替 GTR 在电力电子领域已成定论。新型器件的发展不仅为交流电动机变频调速提供了较高的频率,使其性能更加完善可靠,而且使现代电子技术不断向高频化发展,为用电设备的高效节材节能,实现小型轻量化、机电一体化和智能化提供了重要的技术基础。世界上著名的变频器厂商有西门子、施耐德、富士、ABB、安圣(华为)等公司。

电力电子器件的发展从结构演化分为半控型、全控型、全控复合型、功率集成模块等阶段。理想器件静态和动态特性应包括:截止状态时能承受高电压;导通状态时具有大电流和很低压降;具有短的开通、关断时间,能承受高的 $\frac{di}{dt}$ 和 $\frac{du}{dt}$, 以及具有全控功能。

0.2.2 电力电子电路的发展

电力电子电路是指利用电力电子器件对工业电能进行变换和控制的大功率电子电路,是一种静止式变流电路(区别于传统的旋转式),它的发展是以电路的类型表现的,和电力电子器件的发展密切相关。

晶闸管推广后,开发了许多电力电子电路,按其功能可分为四种:①AC/DC 整流电路,20 世纪 70 年代前占主导地位;②DC/AC 逆变电路,20 世纪 80 年代日益广泛,同时整流电流仍有重要地位;③AC/AC 变换电路;④DC/DC 变换电路。

按电能转换次数可分为两种:①基本变换电路,一次转换就可实现所需电能变换,又称直接变换电路;②组合变换电路,经多次转换才实现所需电能变换,又称间接变换电路。

按组成电路的器件可分为 3 种:①不控型变换电路,由不控型器件组成,对变换电能无控制能力;②半控型变换电路,具备可关断晶闸管的条件;③全控型变换电路,由自关断器件组成,技术经济指标更佳,但开关容量低于半控型。

按控制方式可分为四种:①相控电路,控制信号的变化表现为控制极脉冲相位的变化;②频控电路,控制信号的变化表现为控制极脉冲重复频率的变化;③斩控电路,控制信号的变化表现为控制极脉宽的变化;④组合控制电路,以前 3 种控制方式组合而成的控制方式。

按电路中开关器件的工作频率可分为两种:①开关元件按电网频率(50Hz 或 60Hz)工作的低频电路;②开关元件以远高于电网频率的载波频率工作的高频电路。

晶体管相控整流电路,消耗无功,产生谐波污染,需要有源电力滤波器进行治理。而高功率因数(可达 1)整流电路,采用自关断器件、PWM 控制,基本不消耗无功,不产生谐波。软开关电路利用谐振原理,使电力电子器件在零电压或零电流条件下开通、关断,理论上可将开关损耗降至零并抑制电磁干扰。可见,电力电子电路是为解决应用实践中存在的问题,沿着新器件、新控制方式、新拓扑结构和新分析方法四个方向而发展。

0.2.3 电力电子控制技术的发展

晶闸管电路的每个晶闸管都需要相应的触发器,于是配合这些电力电子电路出现了许多的触发控制电路。根据所用器件,控制电路大体上可分三代。第一代主要由分立元件(如晶体管、二极管)组成相位控制方式,直到 20 世纪 80 年代后期还有应用。第二代由集成电路构成全控型 PWM 控制方式,自 1958 年出现了世界上第一个集成电路以来,发展异常迅速。第三代是 80 年代后的微机控制方式,高性能单片微机、DSP 构成模拟、数字控制。

对应于电力电子器件经历了工频、低频、中频到高频的发展历程,电力电子电路的控制也从最初的相位控制发展到集成控制器,再到高频开关的计算机控制,并向着更高频率、更



低损耗和全数字化的方向发展。

模拟控制电路存在控制精度低、动态响应慢、参数整定不方便，功耗较大、集成度低、控制不够灵活、通用性不强，以及温度漂移严重、容易老化等缺点。用数字化控制代替模拟控制，消除温度漂移，利于参数调整，便于实现多种新型控制策略及智能化，减少元器件的数目、简化硬件结构，从而提高系统的可靠性。

1. PWM 控制

PWM (Pulse Width Modulation) 控制是通过调节脉冲宽度，以获得所需要的波形的一种控制技术，其理论基础是面积等效原理，即面积相等（等冲量）而形状不同的窄脉冲加在具有惯性的环节上时，环节的输出响应波基本相同。近来随着电力 MOSFET 技术和 IGBT 技术的迅猛发展，为 PWM 技术提供了广阔的发展空间，使其能够直-直、交-交、逆变、整流等所有变流电路都能够使用。

直-直斩波电路是 PWM 应用最成熟的控制电路类型，把直流斩波电路应用于直流电动机控制系统，成为应用最为广泛的直流脉宽调速系统。交-交变流电路中的 PWM 控制技术以斩控式交流调压电路和矩阵式变频电路（易于集成化）为代表。

PWM 控制技术最有代表性的是在逆变电路中的应用，除了超大功率的逆变装置，几乎所有的逆变电路都采用 PWM 控制技术，从而奠定 PWM 控制技术的核心地位。

2. 软开关控制技术

通过电路的高频化可以直接实现电力电子装置轻型化、小型化的要求。但是，电路高频化势必会增加开关损耗，严重影响电路效率，同时增大电磁干扰水平。为了解决这个矛盾，软开关技术迅速发展起来，用于解决开关噪声与开关损耗的问题。

3. 电气控制系统中过电流保护

由于目前电力电子器件小型化、高功率、轻型化的特点，传统保护措施（如快速熔断器、直流快速断路器以及过电流继电器）已无法发挥作用，因此驱动控制信号的自动去除已经成为极具潜力的方向。一般情况下，通过设置专门的过电流保护，检测到过电流后直接调节或驱动电路，或者关断被保护器件。

综上所述，电力电子技术的发展是从低频技术处理问题为传统的电力电子技术向以高频技术处理问题为主的现代电力电子技术方向发展。20 世纪 80 年代以后，以 IGBT 为代表的集高频、高压和大电流于一体的功率半导体复合器件得到迅速发展与应用。当前，电力电子技术作为节能、环保、自动化、智能化、机电一体化的基础，正朝着应用技术高频化、硬件结构模块化、产品性能绿色化的方向发展。

0.3 电力电子技术的应用

以功率半导体器件、电路技术、计算机技术和现代控制技术为支撑的电力电子技术经过半个多世纪的发展，已在新能源开发、电能质量控制和民用产品等许多行业广泛应用。

0.3.1 电力电子技术在电力系统中的应用

直流输电是最成功地应用于电力系统的大功率电力电子技术，20 世纪 80 年代之后，提出了柔性交流输电 (FACTS) 概念，于是电力电子技术在电力系统中的应用研究引起的很大的关注，许多介绍和总结相关设备的基本原理和应用现状层出不穷，相继又出现了多



种设备。

1. 在发电环节中的应用

发电机组的多种设备在电力系统的发电环节都会被涉及,如何改善这些设备的运行特性就需要电力电子技术参与应用。

(1) 大型发电机的静止励磁控制。静止励磁结构简单、可靠性高以及造价相对较低,采用晶闸管整流自并励方式,在世界的各大电力系统被广泛采用。省去励磁机这个中间惯性环节,能快速调节。控制规律和方法也更加先进、效果更加良好。

(2) 水力、风力发电机的变速恒频励磁。水头压力和流量决定水力发电的有效功率,抽水蓄能机组最佳转速随着水头的变化而变化。风力发电的有效功率与风速的立方成正比,随风速变化,风车捕捉最大风能的转速也发生变化。所以机组变速运行,即调整转子励磁电流的频率,使其与转子转速叠加后保持定子频率即输出频率恒定,从而获得最大有效功率,变频电源是此项应用的技术核心。

(3) 太阳能发电的独立系统。开发利用无穷尽的洁净新能源——太阳能,是调整未来能源结构的一项重要战略措施。大功率太阳能发电,无论是独立系统还是并网系统,通常需要将太阳能电池阵列发出的直流电转换为交流电,具有最大功率跟踪功能的逆变器是系统的核心。

(4) 发电厂风机水泵的变频调速。为了节能,在低压或高压变频器使用时,使风机水泵变频调速,从而减少电量的消耗。目前低压变频器技术已达到一定水平,国内外厂商比较多。但是高压大容量变频器设计和生产的企业还是比较少,需要院校和企业抓紧联合开发。

(5) 在大气污染治理中的应用。电力电子技术作为一项重要的支撑技术,在高压静电除尘、烟气脱硫脱氮和空气净化技术中得到应用。

2. 在输电环节中的应用

“硅片引起的第二次革命”就是电力电子器件应用于高压输电系统,这样使得电力网的稳定运行特性大幅度地改善。

(1) 直流输电(HVDC)和轻型直流输电(HVDC Light)技术。直流输电容量大、稳定性好、控制调节灵活,对于远距离输电、海底电缆输电及不同频率系统的联网,高压直流输电拥有独特的优势。20世纪70年代取代汞弧阀换流器,世界上第一项晶闸管换流器试验工程在瑞典建成,是电力电子技术应用于直流输电的里程碑。

(2) 柔性交流输电(FACTS)技术。20世纪80年代后期,FACTS技术的概念问世,这是项基于电力电子技术与现代控制技术对交流输电系统的阻抗、电压及相位实施灵活快速调节的输电技术,可以灵活控制交流输电功率潮流,使得电力系统的稳定水平大大提高。

90年代后,国外在研究开发的基础上开始将FACTS技术用于实际电力系统工程。其设备结构简单、控制方便、成本较低,所以应用较早。

3. 在配电环节中的应用

如何加强供电可靠性和提高电能质量是配电系统迫切需要解决的问题,电能质量控制既要抑制各种瞬态的波动和干扰,还要满足对电压、频率、谐波和不对称度的要求,FACTS各项成熟技术的基础上发展起来的电能质量控制新技术就是用户电力技术(Custom Power Technology)或称DFACTS技术,它是大功率电力电子技术和现代控制技术在配电系统中的应用。其实FACTS设备的缩小版就是DFACTS设备,因其原理、结构、功能相似。由于市



场较大的需求,所以使用会日益广泛,再加上电力电子器件价格日益降低,可以预计 DFACTS 设备产品将迅速进入快速发展期。

4. 在节能环节中的应用

(1) 变负荷电动机调速运行。电动机本身挖掘节电潜力只是节电的一个方面,通过变负荷电动机的调速技术节电是另一个方面,只有将两者结合起来,电动机节电方较完善。目前,交流调速在冶金、矿山等部门及社会生活中得到了广泛的应用。首先是风机、泵类等变负荷机械中采用调速控制代替挡风板或节流阀控制风流量和水流量具有显著效果。国外变负荷的风机、水泵大多采用了交流调速,我国正在推广应用。

变频调速的优点是调速范围广、精度高、效率高,能实现连续无级调速。在调速过程中转差损耗小,定子、转子的铜耗也不大,节电率一般可达 30%左右。但也有缺点:主要是成本高,产生高次谐波污染电网。

(2) 减少无功损耗,提高功率因数。电力系统中不仅要保持有功平衡,还应保持无功平衡,否则系统电压降低、设备破坏、功率因数下降,严重时引起电压崩溃、系统解裂,造成大面积停电事故。所以,当电力网或电气设备无功容量不足时,应考虑增装电力电子技术的无功补偿设备,提高设备功率因数。

总之,电力系统是电力电子技术应用的一个重要领域,只有不断的加大已有研究成果的技术应用和运行投入,不断改善经济可行性,才能大幅度提高电力系统的稳定水平。

0.3.2 电力电子技术在其他行业中的应用

1. 重轻工业

电力电子技术可用于控制大型同步轧钢电动机、隐极同步电动机、直流电动机、异步电动机、高频感应加热电源设备。

2. 交通运输

在火车、汽车、飞机、轮船等各种运输工具中,动力装置是核心,它逐渐由机械化向机电一体化、电气化、自动化方向发展,其中电力电子技术起着越来越重要的作用。20 世纪 60 年代,大功率硅整流器研制成功,并应用于机车制进。

3. 在国民生活的应用

我国电力电子技术的应用不仅在国民经济的发展中起着重要作用,而且也是国民生活不可缺少的重要组成部分。

一是电子装置电源的应用,如 SCR 中频电源,以满足不同电压等级的直流电源供电的需要。在各种电子装置中,由于高频开关电源体积小、质量轻、效率高,逐渐取代了线性电源。通信设备中的程控交换机所用的直流电源已大部分采用全控型器件的高频开关电源,大型计算机所需的工作电源、微型计算机内部的电源现在也都全部采用高频开关电源。

二是家用电器的应用,和我们的生活变得十分贴近,在改变日常生活方式的同时,也提高了我们的生活质量。电力电子照明电源体积小、发光效率高、可节省大量能源,正逐步取代传统的白炽灯和荧光灯。变频空调器是家用电器中应用电力电子技术的典型例子;电视机、音响设备、家用计算机等电子设备的电源部分都需要电力电子技术。



第1章

电力电子器件

晶体管和集成电路等电子器件是电子技术的基础,而电力电子器件是电力电子电路的基础。本章讲述电力电子器件的概念、特点和分类等问题;介绍常用电力电子器件的工作原理、基本特性、主要参数以及选择和使用中应注意的问题。

1.1 电力电子器件概述

1.1.1 电力电子器件的概念和特征

1. 概念

主电路 (Power Circuit): 在电气设备或电力系统中,直接承担电能的变化或控制任务的电路。

电力电子器件 (Power Electronic Device): 直接用于处理电能的主电路中,以开关方式实现电能的变化或控制的电子器件。

2. 分类

电力电子器件分为电真空器件和半导体器件,前者如汞弧整流器、闸流管,后者主要材料为硅,如二极管、晶体管、晶闸管等。

3. 特征

电力电子器件是功率半导体器件,和处理信息的电子器件相比具有以下特征。

(1) 电力电子器件所处理电功率的大小,是最重要的参数,一般远大于处理信息的电子器件的值。

(2) 电力电子器件因处理电功率大,为减小本身损耗、提高效率,一般都工作在开关状态。

(3) 电力电子器件在实际应用中往往由信息电子电路来控制,信息电子电路是电力电子器件的驱动电路。

(4) 电力电子器件尽管工作在开关状态,但自身功率损耗通常仍远大于信息电子器件,为了保证不至于因损耗散发的热量导致器件温度过高而损坏,不仅在器件封装上考虑散热设计,而且在工作时一般都还需要设计安装散热器。

1.1.2 电力电子器件的基本类型

对电力电子器件进行分类有几种方法。

1. 按照电力电子器件的可控程度

按照器件控制信号的控制程度,电力电子器件可分为三类:



(1) 不可控器件。一般为两端器件，一端阳极、另一端阴极。与电子电路中二极管一样，具有单向导电性，如功率二极管（Power Diode）。开关操作仅取决于主电路中施加于阳、阴极间的电压和流过它的电流，正向电压时导通，负向电压时关断，流过它的电流是单方向的。不可控器件不能用控制信号来控制电流的通断，因此不需要驱动电路。

(2) 半控型器件。指晶闸管（Thyristor）及其大部分派生器件，有三端口，除阳、阴二极外，还有一个控制门极。半控型器件也具有单向导电性，但开通不仅需要阳、阴极间施加正向电压，而且还必须在门、阴极间施加正向控制电压。门极控制电压控开不控关，器件关断由主电路中承受的电压和电流决定。

(3) 全控型器件。也是一种带有控制门极的三端器件，不仅可以控制开通，还能控制关断。如门极关断晶闸管（GTO）、功率晶体管（GTR）、功率场效应管（功率 MOSFET）、绝缘栅双极晶体管（IGBT），常用的是后两种。

2. 按控制信号的性质分类

按控制信号的性质，电力电子器件可分为以下两类：

(1) 电流驱动型器件。驱动信号加在器件控制端和公共端之间，通过从控制端注入或抽出电流来实现器件导通或者关断的控制，称为电流驱动型器件或电流控制型器件。

(2) 电压驱动型器件。通过施加在控制端和公共端之间的电压信号来实现器件导通或者关断的控制，称为电压驱动型器件或电压控制型器件。

3. 按参与导电的情况分类

按照器件内部电子和空穴两种载流子参与导电的情况，电力电子器件分为三类：

(1) 由一种载流子参与导电的器件称为单极型器件。

(2) 由电子和空穴两种载流子参与导电的器件称为双极型器件。

(3) 由单极型和双极型器件集成混合而成的器件称为复合型器件。

典型电力电子器件的分类和用途见表 1-1。

表 1-1 典型电力电子器件的分类和用途

载流子导电	器件名称	英文名	用途	说明
双极型器件	二极管	Diode	整流、能量回馈、续流	分整流和快速
	功率晶体管	GTR	已被 IGBT 代替	—
	普通晶闸管	Thyristor, SCR	整流、逆变	高压大容量
	门极关断晶闸管	GTO	大容量逆变	已被 IGCT 替代
单极型器件	功率场效应晶体管	MOSFET	DC/DC 变换	小功率，高功率密度
混合型器件	绝缘栅双极型晶体管	IGBT	逆变、DC/DC 变换、整流	应用十分广泛
	集成门极换向晶闸管	IGCT	大容量逆变	GTO 的进化

1.1.3 电力电子器件的模块化与集成化

早期电力电子设备用单管结构的分立元器件（Discrete Devices）组成，功率器件安装在散热器上，附近安装驱动、检测、保护等印制电路板（PCB），还有分立的无源元件。这时设计周期长、加工劳动强度大、结构松散、体积大、可靠性差、成本也高。

因此电力电子产品逐步向模块化、集成化方向发展，先后经历功率模块、单片集成式模



块、智能功率模块（IPM）等发展阶段。目的是使结构紧凑，实现电力电子系统小型化，缩短设计周期，减小互连导线的寄生参数，提高可靠性并降低成本等。

电力电子器件归总见表 1-2。

表 1-2 电力电子器件归总

类 型		名 称	
		中文	英文
分立器件	不可控器件	电力二极管	Power Diode
	半可控器件	晶闸管（可控硅）	Thyristor (SCR)
	电流型控制器件	电力晶体管（双极型晶体管）	GTR (BJT)
门极可关断晶闸管		GTO	
全控型器件	电压型控制器件	电力场效应晶体管	Power MOSFET
		绝缘栅双极型晶体管	IGBT
		场控晶体管	MCT
		静电感应晶体管	SIT
		静电感应晶闸管	SITH
集成模块		功率模块	Power Module
		单片集成模块	System on the Chip
		智能功率模块	IPM

1. 功率模块

电力电子变换器常常需要多个功率器件组成，例如一个双向开关至少需要两个功率器件和两个二极管；考虑串并联，单相、三相半桥或全桥开关电路要用几个、甚至几十个功率器件和一些辅助器件（如快速二极管 FD）组成。电力电子变换器的功率器件间的互连引线多，寄生电感大。为了使其结构紧凑、体积小、加工方便，更为了缩短开关器件间的互连导线、减小电感，功率器件必须实现模块化、集成化，称为功率模块。如一个三相全桥整流模块有 3 个输入接线端，接三相电源；有 2 个输出接线端，接负载。

将若干功率开关器件和快速二极管组合成标准的功率模块（Power module），是集成电力电子技术发展进程中最初步的集成化、模块化，但这种功率模块没有与驱动、控制、保护、检测、通信等功能集成。现在国内外已经开发出功率 MOS 管、可控整流元件或晶闸管（SCR）、双极型功率晶体管以及 IGBT 等功率模块。

最简单的功率模块是单相功率因数校正用的 Boost PFC 功率模块，包含一个 IGBT（或功率 MOS 管）与一个 Boost 二极管、电感、电容以及 4 个整流管组成的单相桥，有 8 个接线端。

变频器主电路也有专用的功率器件标准模块，可以灵活地组装成各种单相、三相半桥或全桥逆变器。

在双向开关的基础上，德国 EUPEC 公司研制成功矩阵变换器专用的开关矩阵模块，日本富士电机开发了矩阵变换器专用的逆阻型 IGBT 模块（可承受较高反向电压并处于阻断状态）。普通 IGBT 承受反向电压的能力较弱，很容易被击穿，常串联一个二极管。一个 3×3