

现代变流技术与 电气传动

丁荣军 黄济荣 编著



科学出版社
www.sciencep.com

现代变流技术与 电气传动

丁荣军 黄济荣 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书结合作者多年工作和实践经验,收集和介绍了目前世界上最先进的变流和控制技术,同时,结合其在铁路牵引和其他工业领域的应用,分析了各种变流器电路结构的特点和控制方法的优劣,并对永磁同步电机驱动和控制中所存在的问题进行了分析。另外,增加了电磁瞬态效应和电磁兼容性分析,这是过去不为大家关注而在实际应用中又影响系统运营可靠性的知识点,希望能为广大读者在理论分析和实际应用中提供一些帮助。

本书从实际应用出发,汇集最新资料,具有很高的学术价值和使用价值,符合“大力节约能源、加快建设资源节约型、环境友好型社会”的基本国策。

本书既可供从事变流技术、电传动与控制自动化领域研究和开发的科研人员、企业领导和管理人员阅读,亦可作为高等院校相关专业师生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

现代变流技术与电气传动 / 丁荣军, 黄济荣编著. — 北京: 科学出版社, 2008

ISBN 978-7-03-023566-4

I. 现… II. ①丁… ②黄… III. ①变流器 ②电力传动

IV. TM46 TM921

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 190750 号

责任编辑: 杨 凯 / 责任制作: 董立颖 魏 谨

责任印制: 赵德静 / 封面设计: 李 力

北京东方科龙图文有限公司 制作

<http://www.okbook.com.cn>

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009 年 3 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2009 年 3 月第一次印刷 印张: 27

印数: 1 - 4 000 字数: 621 000

定 价: 49.80 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

序

大力节约能源资源、加快建设资源节约型、环境友好型社会是我国的基本国策,也是全世界经济转型的主要目标之一。我国是一个资源相对匮乏的人口大国,人均石油、煤炭可采储量分别仅为世界平均水平的 10% 和 57%,而每万元 GDP 的能耗是世界平均水平的 3 倍以上。所以国家要求单位能耗的产值近期要年均提高 4%。

各种资源从其原始状态转化为可供人类实际应用的过程,均与变流技术密不可分。它也是实现节能降耗的关键技术和转变经济增长方式的一个有力的推进器。变流技术促进发电、输电和配电系统的现代化,清洁能源实用化,并使广泛的应用领域能够实现电能的最佳利用。

“现代变流技术与电气传动”正是在这样的时代背景下与广大读者见面的。本书共分为 8 章,从电力电子半导体的发展出发,综述了近半个世纪以来变流技术的发展状况及最新成果,汇聚了迄今为止经典的和崭露头角的电力电子变流器电路拓扑(第 3 章),详细介绍了变流器的开环控制技术(第 4 章)。针对国民经济各行业的电气传动系统,基于电机模型(第 2 章)阐述相关的控制策略(第 5,7 章),以及现代控制技术在这方面的应用(第 6 章)。本书还就电气传动系统采用变流技术后对环境造成的电磁污染、包括对电网的不良影响作了分析,介绍了防治方法(第 8 章)。

本书的特色之一是汇集了直至近年的大量资料,内容丰富。所介绍的变流器及其控制技术,不仅适用于电气传动系统,而且具有更多广泛的应用范围。开关模式直-直变流器不再只限于斩波器的概念,它不仅可用于直流电机的控制,在太阳能、风能一类不稳定电源的接口变流器中也是不可缺少的;中点箝位多电平或级联的中压逆变器不仅可用于许多特定领域风机、泵类的驱动,也在电能质量控制中发挥重要作用;软开关变流器和矩阵变流器是 20 世纪 70 年代后迅速发展的新的变流器类型,在减少变流器本身的损耗、简化电路拓扑和控制方面都有巨大的潜力;属于更年轻一代的还有阻抗源逆变器。

本书的另一个特色是以应用为目标,从电机的闭环控制推演出一个能够集中反映电气传动特性(如电力机车的牵引和制动)要求的控制变量,以此作为变流器控制器的输入,从而使得该变流器供电的电机产生的输出机械特性(作为电动机)或电特性(作为发电机)满足既定的目标要求。

本书的第三个特色是给读者留下诸多思考空间。读者从本书了解基本信息之后,还可以考虑如何进一步简化和优化软开关变流器电路拓扑、如何解决矩阵变流器的双向导流、双向阻断的器件,以使这种变流器能够走出试验室。另一方面,智能控制和其他现代控制技术,虽然有其独到之处,但应与经典的控制策略相结合使其更臻完美,更具有学术上的和实用上的价值。

作者长期从事于电力电子和电气传动技术工作,有着丰富的实践经验,且又博览广搜,精辟点评。读此一本书,胜阅千篇文。电力电子和电气传动技术正处于蓬勃发展的阶段,本书对读者的诸多启发,更为传道授业之上乘。技因于势,而书适于时。适时因势,此其是也。谨为序。

汪槩生、钱旦珩 于浙江大学
二〇〇八年八月

前 言

进入 21 世纪以来,能源危机已成为人类共同面对的课题,人们都在采取积极的措施寻求新的能源以应对人类对资源的需求,风能和太阳能成为首选的对象,然而不管是风能还是太阳能,自身均具有不稳定性,如何对自然界这些能源加以有效的转化和合理的控制利用,又成为现实应用中要解决的一个具体问题。大功率半导体器件的发展和计算机控制技术的日趋完善为解决应用中的一些具体问题提供了可能条件。

笔者结合多年来的工作和实践经验,收集和介绍了目前世界上最先进的变流和控制技术,同时,结合其在铁路牵引和其他工业领域的应用,分析了各种变流器电路结构的特点和控制方法的优劣;并且,对永磁同步电机驱动和控制中所存在的问题也进行了分析;另外,本书中增加了电磁瞬态效应和电磁兼容性分析,这部分内容过去不为大家关注而在实际应用中又影响到系统运营的可靠性,希望能为广大读者在理论分析和实际应用中提供一些帮助。

本书共分 8 章。第 1 章、第 2 章和第 3 章由丁荣军编写,第 4 章、第 5 章、第 6 章和第 8 章由黄济荣编写,第 7 章由丁荣军和黄济荣共同编写。在本书的编写过程中得到了浙江大学汪樾生院士和钱照明教授、上海大学陈伯时教授、中国铁道科学研究院吴茂杉研究员的精心指点和大力帮助;株洲电力机车研究所有限公司潘燕、钟锋对全书文字的整理校对付出了大量的心血,在此表示衷心的感谢。

由于变流和控制技术仍处于飞速发展之中,其应用领域也越来越广,本书所提出的思路 and 观点是作者在多年的工作和实践中逐步形成的,旨在促进变流技术和新的控制方法能在各行各业得到更加广泛的应用,造福于人类。

限于作者的学术水平和工作经验,希望读者对书中的缺点和不妥之处提出批评指正,我们将表示衷心的感谢。

作 者

2008 年 12 月于株洲

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 资源、环境与变流技术	1
1.1.1 电能产生与输送	1
1.1.2 电能优化利用	3
1.1.3 保护环境	4
1.2 变流技术与电力电子学	4
1.3 电力电子器件	5
1.3.1 增强平面穿通型 IGBT	7
1.3.2 沟道穿通型 IGBT	8
1.3.3 反向阻断 IGBT	8
1.4 变流技术与电气传动	9
1.4.1 控制直流电机电枢电压的传动系统	11
1.4.2 改变定子频率的电气传动系统	11
1.4.3 改变异步电机滑差的电气传动系统	11
第 2 章 机电能量变换过程的数学描述	13
2.1 机电能量变换的基本概念	13
2.1.1 一般化物理模型与基本频率关系	13
2.1.2 一般化数学模型	14
2.1.3 坐标变换与线性化	17
2.1.4 状态空间的电机数学模型	18
2.1.5 复平面上的电机数学模型	20
2.2 三相交流异步感应电机的数学模型	23
2.2.1 二相等效电机的微分方程式	23
2.2.2 异步感应电机的空间矢量方程式	23
2.2.3 等效电路	23
2.3 永磁同步电机的数学模型	24
2.3.1 永久磁铁及其特性	24
2.3.2 永磁同步电机的物理模型	28
2.3.3 永磁同步电机的等效电路	31

第3章 机电能量变换过程控制与变流器	33
3.1 概 述	33
3.1.1 开关函数及其实现	33
3.1.2 变流器电路拓扑	36
3.1.3 变流器数学模型	39
3.2 交-直变流器	48
3.2.1 网侧变流器概述	48
3.2.2 电压型四象限脉冲整流器	51
3.2.3 电流型四象限脉冲整流器	65
3.3 交-直-交变流器	69
3.3.1 采用电压型交-直-交变流器的传动系统主电路	69
3.3.2 直-交变流器(逆变器)	75
3.4 软开关变流器	79
3.4.1 概 述	79
3.4.2 电压源逆变器的软开关技术	81
3.5 直-直变流器	94
3.5.1 PWM直-直变流器的电路拓扑	94
3.5.2 开关模式直-直变流器的一周期控制技术	112
3.6 矩阵变流器	113
3.6.1 自然换流的交-交变流器	114
3.6.2 强迫换流的交-交变流器——矩阵变流器	114
3.6.3 稀疏变流器	129
3.7 多电平变流器	134
3.7.1 概 述	134
3.7.2 基本的多电平逆变器的拓扑	135
3.7.3 多电平变流器的新拓扑	139
3.7.4 多电平逆变器的控制策略	142
3.8 升-降压逆变器	147
3.8.1 升-降压逆变器	148
3.8.2 阻抗源(Z-)逆变器的电路拓扑与工作原理	151
3.8.3 阻抗源(Z-)逆变器的控制	153
3.8.4 阻抗源逆变器的脉宽调制	157
3.8.5 三电平阻抗源(Z-)逆变器	161
3.8.6 阻抗源 B_1 逆变器	162
第4章 变流器开环控制策略与脉宽调制	167
4.1 方波逆变器	167
4.2 脉宽调制(PWM)概述	170
4.2.1 脉宽调制的基本原理	170
4.2.2 电压源逆变器的电压控制 PWM	171

4.3 基于载波的开环脉宽调制	175
4.3.1 分谐波控制与正弦脉宽调制 (SPWM)	175
4.3.2 基于规则采样的脉宽调制	177
4.3.3 空间矢量脉宽调制 SVPWM	177
4.3.4 修正的分谐波控制与广义断续脉宽调制	180
4.3.5 过调制	183
4.3.6 载波型 PWM 与空间矢量 PWM 之间的关系	185
4.4 随机化载波的开环脉宽调制策略	193
4.5 优化的脉宽调制技术	196
4.6 电流控制技术	196
第 5 章 变流器闭环控制策略	199
5.1 概 况	199
5.1.1 控制电压的直流变速电传动	199
5.1.2 控制定子频率的交流变速电传动系统	199
5.1.3 控制异步电机滑差的交流变速传动系统	201
5.2 磁场定向控制	205
5.2.1 转子磁场定向控制	206
5.2.2 定子磁场定向控制	230
5.3 直接转矩控制	234
5.3.1 直接转矩控制的基础理论	234
5.3.2 基于滞环 (bang-bang) 调节器的控制策略	240
5.3.3 离散空间矢量调制的直接转矩控制策略 (DSVM-DTC)	250
5.3.4 异步电机 DTC 控制策略的改进	257
5.4 转子磁场定向控制与直接转矩控制方案的对比	262
第 6 章 现代控制技术	267
6.1 概 述	267
6.1.1 交流电机调速控制中应用现代控制理论的依据	267
6.1.2 现代电机控制技术的数学基础	271
6.1.3 自适应控制	274
6.2 辨识与自适应控制	281
6.2.1 电机参数对控制性能的影响	282
6.2.2 异步感应电机的自适应控制	284
6.2.3 异步感应电机的自校正控制	288
6.3 模糊控制	296
6.3.1 模糊控制	297
6.3.2 人工神经网络控制	308
6.3.3 神经网络-模糊控制	319
6.4 滑模变结构控制	328

6.4.1	基本概念	328
6.4.2	滑模变结构控制在电机调速中的应用	335
6.5	非线性解耦控制	339
6.5.1	非线性几何控制技术	339
6.5.2	磁场定向(矢量)控制的局限性	343
6.5.3	基于微分几何的精确线性化	345
6.5.4	可线性化系统的自适应控制	349
第7章	无速度传感器的电传动系统	353
7.1	异步感应电机的无速度传感器控制系统	353
7.1.1	速度估算方法	353
7.1.2	无速度传感器控制系统一些特殊问题	361
7.1.3	无速度传感器直接转矩控制系统的设计	367
7.2	永磁同步电机无传感器控制系统几个关键问题研究	368
7.2.1	速度和位置检测方法	368
7.2.2	转子初始位置检测策略	371
7.2.3	无速度传感器永磁同步电机传动系统的一些问题	373
第8章	电磁瞬态效应与电磁兼容	375
8.1	低频电磁干扰	377
8.1.1	低频电磁干扰对电网的污染	377
8.1.2	减轻电网污染的措施	378
8.2	高频电磁干扰	380
8.2.1	PWM 电压脉冲波	380
8.2.2	瞬时过电压与电机绝缘	382
8.2.3	轴电压和轴承电流	385
8.2.4	传导电磁干扰	388
8.3	电磁兼容	398
8.3.1	基本概念	398
8.3.2	电磁兼容措施	399
参考文献		405

第1章 绪论

第1章 绪论

建设能源节约型和环境友好型社会正面临诸多问题:资源储量不足、利用效率低下、环境污染日益严重和经济安全。我国目前的能源结构中,对煤炭、石油等传统化石能源的依存度太高。所以,必须加速开发和利用新能源。新能源是在新技术基础上发展起来的非常规能源,包括风能、太阳能、海洋能、地热能、生物质能、氢能、核聚变能、天然气水合物能等。这些新能源都是清洁能源,除氢能和核能外大多是可再生能源。在可以预见的未来,可再生的清洁能源将逐步占领能源体系格局的重要位置。

1.1 资源、环境与变流技术

1.1.1 电能产生与输送

各种资源从其原始状态转化为可供人类实际应用的过程,均与变流技术密不可分,它也是实现节能降耗的关键技术和转变经济增长方式的一个有力的推进器。变流技术可以促进发电、输电和配电系统的现代化,推广清洁能源实用化,并可以在广泛的应用领域内使电能得到最佳利用。一般说来,资源的利用必须经历如下过程:资源转化、存储、能量转化、辅助能量存储、功率控制。各种资源转化为能源的方式不同,将其送到用户或电网时,必须通过变流技术进行调整。图 1.1 表示各种不同资源的转化过程,以及变流器在这当中的地位与作用。

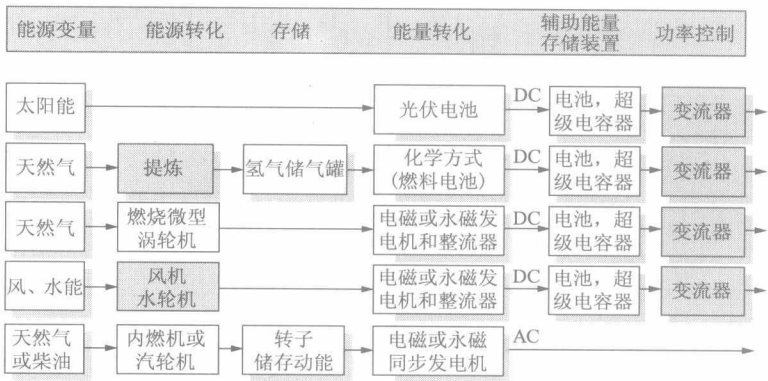
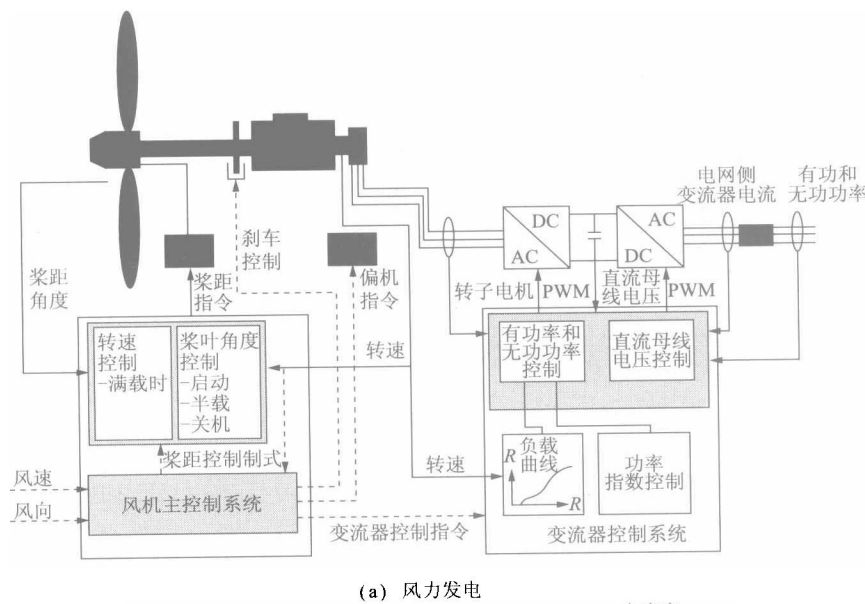


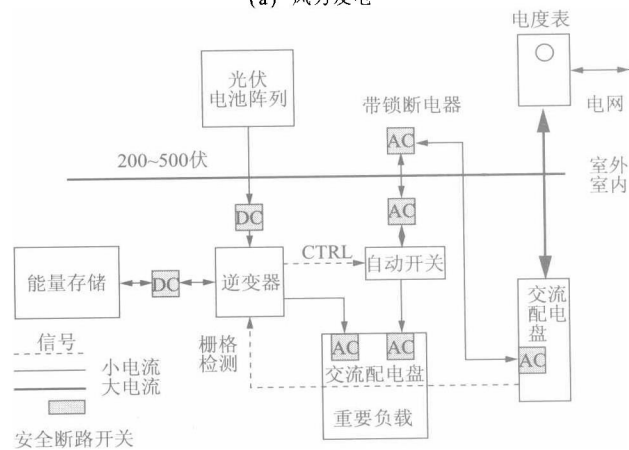
图 1.1 资源转化过程与变流器

图中天然气和柴油虽然不是可再生资源,但它们通过燃烧转化为电能的过程,对生物质能(沼气)同样适用;同时天然气通过提炼生成氢气制成的燃料电池,也是清洁能源之一。

可再生能源产生的能量大都是不稳定的,如一年四季或日夜之间风力不同、太阳辐照强度差异,其直接产生的能量通常是不稳定的。以风能为例,并网型风力发电是许多台大容量风力发电机并联工作的,由于风场风力的不稳定性,如果在并网时不进行控制和调节,可能对电网造成冲击。同时为了保证把尽可能多的有功能量送入电网,风力发电系统中必须应用储能环节和解决存储能量再次转化的问题。这些过程都必须利用电力电子变流技术对其进行控制。此外,可再生能源分布在不同地域,可以就近建成分布式发电单元并通过电力电子变流器接口联成微电网($<10\text{MW}$)供给特定地区(如偏僻山区)的用户或与大电网连接并参与电能质量调节。



(a) 风力发电



(b) 太阳能发电

图 1.2 可再生发电单元与电力电子变流器接口

因为可再生能源可能是直流电,也可能是不稳定的交流电,所以必须通过变流器产生与电网或用户适配的电能形式,以并入电网或直接使用。可以说,几乎所有可再生资源发电系统都涉及一系列大功率、高效、高品质的能量转换、存储与控制。

除了电能的生产以外,电能的传输与分配也需要变流技术(图 1.2)。传统的交流输电技术与变流技术相结合,催生了柔性交流输电技术(FACTS)。FACTS 对电网的运行参数(电压、电流、功率、品质因数、损耗角、阻抗等)或运行状态(异步互联、潮流控制、短路电流限制)从刚性控制(断续动作、慢速、欠准确和不够灵活的机电型)提升为柔性控制(快速、准确、平滑、灵活的电力电子装置),从而使得规模不断拓大、运行条件复杂和运行难度加大的情况下,提高电力系统稳态性能,而且极大地改善了动态响应能力。

图 1.3 是 FACTS 的基本组成与功能。其中 ESI(蓄能器接口)控制有功功率;TCPST(晶闸管控制的移相变压器)可快速控制相角变化;SVC(静止无功补偿器)和 STATCOM(静止同步补偿器)分别控制电压和无功功率;TCSC(晶闸管控制的串联补偿器)和 SSSC(静止同步串联补偿器)分别控制输电线电抗和沿线总无功电压降;UPFC(统一功率潮流控制器)是 STATCOM 和 SSSC 的串并联组合,主要用于潮流或电压的控制;CSC(转换静止补偿器)是对 UPFC 的拓展,它用变电所中的 1 台 STATCOM 同时控制多条输电线上的 SSSC,从而从“输电线控制”扩大到“电网控制”,功能更强大。从上述不难看出,FACTS 是伴随电力电子技术发展起来的,构成 FACTS 的主要部分都是变流器家族的成员。另一方面,与大电厂、长距离输电、多级配电的传统电网相比,由一些分布式发电系统(风能、太阳能、燃料电池、微型涡轮发电机)、储能系统和负载构成,并通过电网控制中心管理的微电网,可以利用变流技术有效地提高电能质量,对解决大系统问题提供支持。

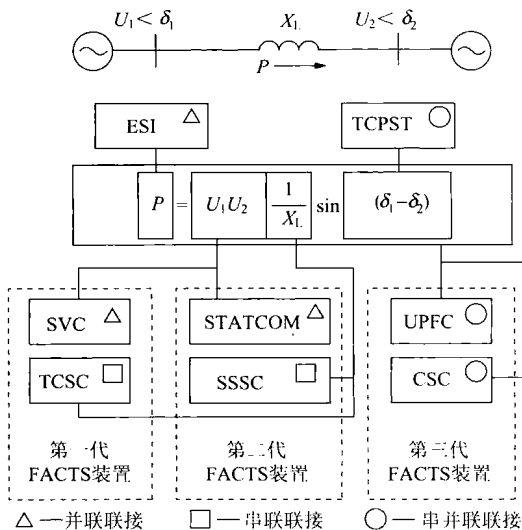


图 1.3 FACTS 的基本组成与功能

1.1.2 电能优化利用

提高能源利用效率是解决能源问题的另一个重要方面。以至于节能被称为继煤炭、石油、可再生能源、核能之后的第 5 能源,也有人把节能称为“负瓦特革命”,即减少瓦特的革命。

通过现代电力电子技术进行电能变换,可从合适、经济的输入获得最佳、符合要求的输出,减少过程损耗,提高效率。此外,变流技术还提高了设备的功率因数,减少电流波

形中的谐波,在产生相同有功功率的同时减少无功功率和附加损耗。

以我国电机传动系统为例,降耗节能空间很大,但任重道远。电机系统是一个面广量大的应用产业。我国电机系统用电量占全国用电量的60%左右,其中风机、泵类、压缩机和空调制冷机的用电量在2003年分别占全国用电量的10.4%、20.9%、9.4%和6%。从全球范围看,电机用电量平均占世界各国社会总用电量的一半以上,占工业用电量的70%左右。我国电机传动系统效率比发达国家低10%~30%,以2003年的年耗电10000亿kW·h计,每年多消费电能几千万亿kW·h,相当于几个三峡电站的年发电量。采用电力电子变流技术和变频调速技术可以大幅提高电机传动系统效率,降低电能消耗量;我国发电厂自用电(主要是3kV或6kV电机驱动的风机、水泵)占其发电量的8%~10%(国外只有4%~5%),大大增加了发电成本,减少了商品电量;水泥厂把依赖活门调节风量的风机改由变流器供电后,1年节省的电费就足以抵偿改造所花的全部资金;电力机车由相控整流器和直流牵引电机改为采用交-直-交电压型变流器和交流电机之后,从牵引接触网来看,电力机车的功率因数可从85%(额定负载下)、甚至70%或更低(部分负载下)提高至95%以上,几乎接近于1,并减少了接触网中产生的谐波电流和无功分量;采用变频空调、冰箱也为用户节省可观的电费;利用太阳能提供建筑用热、用光、用冷、用电、通风和调湿等,可以实现建筑有效节能。据统计,可节约能源70%以上。

提高能源效率、大力节能、控制需求总量、发展清洁能源技术、加快开发利用可再生能源,是优化能源结构、填补传统能源缺口、保护环境的重要途径,是实现可持续发展的必由之路。节能或发展新能源的关键之一,是能流的变换与优化控制。对电机传动来说,是机电能量变换过程的控制。电力电子学和现代变流技术的发展,为此提供了完善的、无可替代的技术手段。

1.1.3 保护环境

首先,在电能的产生、传输到应用的过程中,在工农业设备到民生生活各层次中的降耗提效,使得在需求总电量不变的前提下,可减少社会总发电量和装机容量,这样不仅节省资源,而且可显著减少发电厂的排污量,降低空气污染和温室效应。这是电力电子学在环境保护上的首要贡献。其次,作为可再生资源发电不可缺少的接口,变流技术将为保护环境作出新的贡献。最后,由于应用电力电子技术和变流技术使设备降低了电磁辐射水平,从而保护人类环境不受或少受电磁的污染和噪声的骚扰。

1.2 变流技术与电力电子学

1. 电力电子学

20世纪50年代pn结和晶体管的出现,开拓了半导体物理学的新领域,人类开始步入现代固态电子学的时代。1956年发明了pnpn晶体管(晶闸管)。此后,集成电路时代来临,这意味着,固态半导体器件开始进入人类生活的方方面面。

20世纪70年代初提出的新的边缘学科——电力电子学,涉及半导体(电力电子和微电子)、能量变换(静止变流器和旋转的机电能量变换器)和控制(模拟控制和数字控制)。以今天的观点,电力电子学是一门涉及材料、能源和信息的边缘学科。

2. 电力电子与微电子

固态电子带来了第一次电子革命,而电力电子带来了第二次电子革命。电力电子装置用来处理发电、输电、配电和用电系统中的能流或功率流,如用晶闸管、GTO、IGBT 等电力电子器件构成的变流器;微电子装置用来处理信息、控制系统中的信号流,如各类逻辑门、运算器、处理器等。电力电子器件的电压达几百至几千伏、电流达几百至几千安,工作频率为几十至几百千赫兹。目前欧洲交通装备上用的 IGBT,定额达到 6500V、600~1200A,而微电子器件则是几十伏、毫安或微安级的,但工作频率可达兆赫兹。

3. 变流技术

由电力电子器件组成各种电路拓扑的变流器,在有目的、精确的控制下,实现能量形式变换(如把交流电变为直流电或把直流电变为交流电)、相数变换(如把 3 相变为单相、2 相或更多相)、频率变换(如把标准的 50Hz 变为 0 至任意赫兹)、幅值变换、相位变换(如把电流相位变换为与网压成 $\pm 90^\circ$ 的电流)。

4. 变流技术的社会性

在国民经济的各个领域、从军工到民间衣食住行,都离不开电力电子技术,离不开变流技术。变流技术在实现现代化、强化节约和高效利用资源中,几乎无处不在。

电力电子装置以其独特的单位体积能流比和精确的可控制性向特定的机械(负载)提供可调节电能,使这些机械以最佳方式实现自己的功能,满足人们设定的各种目标。如大功率风扇直接启动时,由于电流冲击使电压瞬时下陷,以致电灯突然暗淡,采用软启动可避免这种情况;提供几万甚至几十万安培电流的整流器为冶炼工业实现了炼铝、炼铜的现代化;高压晶闸管的出现催生了高压整流器和逆变器,使高压乃至超高压直流输电成为现实;没有现代变流技术和交流传动系统,几乎接近轮—轨体系极限的 350 km/h 的高速列车只能是一个梦;机器人也不会如此快速地日臻“成熟”,因为其每一个部位都有巧妙的伺服系统,包括驱动器(变流器)和控制器等。

1.3 电力电子器件

电力电子器件是电力电子变流技术的出现和发展的基础。如果把基于气体中和真空中的导电现象也算作电力电子器件(如汞弧整流器)的话,历史将前移到 20 世纪初。我国在 20 世纪 60 年代投入使用的 6Y2 干线铁路电力机车就是用的这种装置。20 世纪 50 年代固态物理学和半导体物理学的发展,催生了现代电力电子开关器件和电力电子学。

当前电力电子半导体器件的性价比不断增强,最新发展表现在:

(1) 由于允许阻断电压(至 12 kV)和通向电流(至 6 kA)的增大、安全工作区(SOA)的扩大,开断能力高达数兆瓦级。新型半导体材料对改进制造工艺以及促进封装技术的进步起了重大作用。

(2) 通态损耗和开关损耗降低,允许开关频率增大。

(3) 机械和电气结构的优化提高了可靠性,元件内部断面温度均匀。

(4) 改进了损坏元件的可更换性。

(5) “集成度”加大。

(6) 功率密度由 $0.15\text{W}/\text{cm}^3$ 增大到 $>5\text{W}/\text{cm}^3$ (目标为 $30\text{W}/\text{cm}^3$),允许工作温度范

围为 $-45^{\circ}\text{C}\sim+175(200)^{\circ}\text{C}$ 。

(7) 降低了维护服务费用。

(8) 提高了与电路的兼容性。

如同微电子学一样,电力电子学也具有莫尔(Moore)增长定律的特点,开关频率和功率密度约每 4~5 年翻一番。

基于不同的工艺特点,适用于大功率变流技术的电力电子器件有两类主要产品(表 1.1):

(1) 在晶闸管制造工艺相兼容($3\sim5\mu\text{m}$)的基础上进行改进或革新引发出的产品,如 GTO、IGCT。GTO 是具有很细梳条状门极结构的晶闸管。为了导通,门极控制单元(GU)向门极提供几安培的控制电流;为了关断,GU 从门极吸收很大的电流(约为 GTO 关断电流的 1/5)。耗尽载流子后,门极成为高欧姆的,可靠关断 GTO,而且 GU 应保持门极上有约 -15 V 的电压。IGCT 是集成的门极换流晶闸管,采用缓冲层透明射极的“穿通型”结构和采用印刷电路板连接门极驱动装置和主管。前者使器件关断更均匀、快速,使硅片厚度约减少 30%,有利于降低损耗,并提高抗宇宙辐射能力(梯形电场分布);后者将半导体元件与门极电路合成一体,大大减少了门极回路的电感,简化了门极驱动装置的结构。封装为低电感的,实现了硬关断,缩短了下降时间,降低了关断损耗。IGCT 适用于大功率高压变流器,特别是电力补偿器、有源滤波器、电机驱动装置、可再生资源发电系统、电力牵引装置等。

表 1.1 迄今主要电力电子器件

晶闸管型	晶体管型
不对称快速晶闸管	BJT
GTO (Gate Turn-Off thyristor)	IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)
ETO(Emitter Turn-Off thyristor)	IPM(Intelligent Power Module)
IGTT(IGBT mode Turn-off Thyristor)	IPM(Integrate Power Module)
IGCT(Integrated Gate-Commutated Thyristor)	IEGT(Injection Enhanced Gate Transistor)

除了 IGCT 之外,受到关注的还有注入增强型门极晶体管(IEGT)、射极关断晶闸管(ETO)等,它们在开关和通态性能上,门极驱动单元和 SDA 方面都得到肯定,但没有得到推广。20 世纪末,日本用 IEGT 试制并试验了 Shinkansen 牵引变流器样机,并进行了装车试验。开关频率 1140Hz,与 GTO 比较,损耗下降到 69%。

(2) 以超大规模集成电路工艺($0.25\mu\text{m}$)为基础研制新的器件,如 IGBT(绝缘门极双极型晶体管)。IGBT 是一种双极型晶体管,用加在绝缘栅极和发射极之间的电场来控制,属于电压控制型器件,一般仅需小的控制电流对控制栅极电容充电或放电。在开通和关断集电极-发射极之间部分时,可用栅极电压特性曲线来控制电流上升率和电压上升率。IGBT 不需要吸收回路,但由于电流和电压在工作区重叠,IGBT 开关损耗较大。大功率 IGBT 的开关动作时间为 $1\sim2\mu\text{s}$ 。

满电流时 IGBT 的导通电压约为 4V。虽然它比用 GTO 的要高些,但在较高脉冲重复频率时,IGBT 变流器从空载至满载时的损耗仍比 GTO 变流器的要小;过流时 IGBT 去饱和,电压远大于 4V,大的损耗功率可能损坏 IGBT。为防护过流,门极驱动单元必须监控集电极-发射极电压,在临界状态时立即关断电路。与 GTO 不同,IGBT 防止击穿的最后手段是用保护关断电路防止过电流。为防止变流器中间电路的过电压,通过 IG-

BT 接入负荷电阻作为短时瞬间电压限制器或作为阻尼电阻。

由于导通电压的正温度系数,IGBT 并联电路是热稳定的,这也是大功率时所需要的。通过并联电路中的对称阻抗,力求电流有尽可能均匀的分布。

相对压力接触式平板元件的结构形式,大功率的 IGBT 也采用了模块结构形式。它提供了冷却面和装配面有效部分的绝缘。

由于如下几方面的因素,IGBT 取代 GTO 已成为不争的事实:第一,选择热胀冷缩系数更接近的材料作为器件中的衬底和底板,减少了因焊接结构带来的故障,提高了可靠性;第二,电压驱动型代替电流驱动型,简化了门极驱动装置及其供电电源结构;第三,阻断电压级别(6.5kV)和电流容量得到提高,已在应用上与 GTO 并驾齐驱。世界牵引传动设备及其他工业产品的主要制造商正倾注全力研制高电压、大功率的 IGBT 变流器以取代 GTO 变流器,已取得成功。

作为开关器件,IGBT 已在大功率变流技术、交流传动和工业领域得以广泛应用。IGBT 的功能如同一个 MOSFET 供给基极电流的双极型晶体管,具有一些显著的优点:①MOS 输入,消耗很少的功率;②高速换流,提高开关频率(可达 20kHz 以上);③低的稳态损耗;④高电压和大电流;⑤很高的承受短路的能力;⑥易于并联。用 GTO 的技术只能做到③、④两点,而其余的则需依赖双极型工艺。目前在市场上有采用传统的平面结构(照相工艺)的非穿通(NPT)和穿通(PT)型 IGBT,也有采用沟道结构(挖掘工艺)的非穿通和穿通型沟道门极 IGBT。表 1.2 给出 4.5~6.5kV 等级 IGBT 与 IGCT 的综合比较。

表 1.2 4.5~6.5kV 等级 IGBT 与 IGCT 的综合比较

比较点	绝缘栅双极晶体管(IGBT)	集成门极换流晶闸管(IGCT)
控制方式	栅极电压控制	门极电流控制
芯片结构	MOS 控制的 3 层结构晶体管	门极硬开关的 4 层结构晶闸管
制造技术	0.35 μm 的超大规模 IC 加工技术	3~5 μm 的 GTO 器件加工技术
封装结构	多芯片的串、并联结构,多股焊接引出线	单芯片结构,平板压接式引出
通态压降	5~6V	3~4V
频率特性	500Hz~20kHz	500~1000Hz
高端产品	900A/4.5kV,600A/6.5kV	4kA(可关断电流)/4.5kV,4kA(可关断电流)/6.5kV
研发样品	7.2kV	2kA/10kV
器件可靠性	FIT 比:2.3	FIT 比:1
电压适应性	1~6.5kV	3.3~6.5kV
串并联应用	适于功率模块串并联	适于串联工作
核心技术	芯片制造风险高	芯片制造国内已能实现
应用技术	应用比较成熟	应用比较成熟
制造厂家	三菱, Eupec, ABB, ...	三菱, ABB, 株洲电力机车研究所

1.3.1 增强平面穿通型 IGBT

增强平面穿通型 IGBT 的集电区是一个在 n 型单晶硅上约 100 μm 的散层, n 一层厚度的设计,允许断态期间加上额定电压时耗尽层拓展到 p 一集电极。n 一层比传统的平面