

 OHM

大学参考教材系列

电力电子 电路

(日) 电气学会半导体电力变 编
换系统调查专门委员会
陈国呈 译



科学出版社
www.sciencep.com

OHM 大学参考教材系列

电力电子电路

〔日〕 电气学会半导体电力变 编
换系统调查专门委员会
陈国呈 译

科学出版社
北 京

图字:01-2003-3478 号

Original Japanese language edition

Power Electronics Kairo

Edited by Denki Gakkai • Handotai Denryoku Hen Kan System Chousa Senmon Iinkai

Copyright © 2000 by Denki Gakkai

Published by Ohmsha, Ltd.

This Chinese version published by Science Press, Beijing

Under license from Ohmsha, Ltd.

Copyright © 2003

All rights reserved

パワーエレクトロニクス回路

電気学会 オーム社 2000

图书在版编目(CIP)数据

电力电子电路/(日)电气学会半导体电力变换系统调查专门委员会编;

陈国呈译. —北京:科学出版社,2003

(OHM 大学参考教材系列)

ISBN 7-03-011706-9

I. 电… II. ①日…②陈… III. 电力系统-电子电路-高等学校-教材

IV. TM13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 059271 号

责任编辑 崔炳哲 **责任制作** 魏 谨

责任印制 刘士平 **封面设计** 李 力

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

北京东方科龙图文有限公司 制作

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

科学出版社发行 各地新华书店经销

2003 年 9 月第 一 版 开本: A5(890×1240)

2003 年 9 月第一次印刷 印张: 10 3/4

印数: 1—5 000 字数: 278 000

定 价: 22.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

日本电气学会半导体电力变换系统调查专门委员会

委员名单

委员长	矢野 昌雄	(东洋大学)
干事	松井 千彦	(东京工业大学)
	清水 敏久	(东京都立大学)
委员	池田 吉尧	(横浜国立大学名誉教授)
	石川 忠夫	(财团法人电力中央研究所)
	植田 明照	(爱知工业大学)
	大津 智	(日本电信电话株式会社)
	大边 实	(株式会社明电舎)
	川上 纪子	(株式会社东芝)
	河崎 吉刚	(日新电机株式会社)
	木村 军司	(东京都立大学)
	金 东海	(上智大学)
	黑木 一男	(株式会社富士电机综合研究所)
	楢田 丰	(日本电信电话株式会社)(中途卸任)
	佐藤 则明	(东京工业大学名誉教授)
	渡边 英司	(安川电机株式会社)
	高桥 勲	(长冈技术科学大学)
	比嘉 修	(株式会社东芝)(中途卸任)
	本部 光幸	(株式会社日立制作所)
	松浦 敏明	(三菱电机株式会社)
	松濑 贡规	(明治大学)

(日语五十音顺序)

主要的量符号

量符号	量的名称	量符号	量的名称
e, v, i	瞬时值(电压、电流)	f_s	开关频率、载波频率
E, V, I	交流的振幅或有效值(电压、电流)	f_m	调制波频率
E, E_d, V, V_d, I, I_d	直流的平均值(电压、电流)	f_r	电路的谐振频率
$\dot{E}, \dot{V}, \dot{I}$	相量(复数矢量)(电压、电流)	ω	电源角频率、输出基波角频率
$e_{dq}, v_{dq}, i_{dq}, \phi_{dq}$	$d-q$ 轴上的瞬时值复数矢量(电压、电流、磁通)	ω_s	开关角频率、载波角频率
e, v, i	瞬时空间矢量(电压、电流)	θ	角度
p	瞬时功率、整流电路的脉冲数、极对数	K_f	载波与调制波的频率比
q	瞬时无功功率	K_a	调制度(载波与调制波的振幅比)
P	有功功率(1周期的平均值)	K_c	电流型逆变器 180° 期间的脉冲数
Q	无功功率(1周期的平均值)	M	电压变换率
S	视在功率	d	占空比
$\cos\phi_1, pf_1$	基波功率因数	α	控制角
pf	综合功率因数	β	控制超前角
THD	综合畸变率	γ	裕度角
t	时间	u	重叠角
T	周期	R	电阻
t_{on}, T_{on}	开通时间	L	电感
t_{off}, T_{off}	关断时间	C	电容
f	电源频率、输出基波频率	X	电抗
		dv/dt	电压上升率
		di/dt	电流上升率

译者序

电力电子技术的应用已深入到工农业生产、交通运输、空间技术、现代国防、医疗卫生、环境保护,以及家用电器、航空管理、办公自动化等各个领域。与此同时,电力电子装置所引起的谐波污染、功率因数下降、电磁干扰等公害也日益严重。为了维护“绿色”电源,人们研究了各种电力滤波的拓扑结构,还提出了软开关电力变换技术。另一方面,为了节约能源,走可持续发展道路,人们注意到太阳能、风能、潮汐、地热、燃料电池等各种新能源的开发应用,这些能源也只有通过电力变换才能被实际应用或馈送到电网。为此,近年来在电力电子学上出现了繁多的电路拓扑和控制方法,专业术语也相当混乱。

本书正是在上述背景下,对复杂多变和高难度的半导体电力变换技术及有关的专业术语进行了分类、整理和比较。本书的前身是《半导体电力变换电路》(日本),出版于1987年3月,这次改版时又充实了很多新内容,使得本书更完整、更深刻,这对于从事电力电子变换技术的研究人员是一个很好的指导。比如坐标变换问题,在迄今为止的学术文献中,关于变换矩阵的系数有取 $\sqrt{2/3}$ 的,也有取 $2/3$ 的,旋转坐标的旋转方向有取顺时针方向的,也有取逆时针方向的,随意性很大,究竟利弊如何,很少有人关心过。本书明确指出不同选择方法的优缺点,使读者对坐标变换问题有一个完整的认识。书中还有相当部分的内容是近几年来最新的研究成果和研究动向,这对读者来说也是一个很好的启迪。

翻译时,译者竭力准确描述原著的内涵,并力求简练。

对一些比较混乱的专业术语的择意采取忠于原著的原则。比如コンバータ(converter),当用于AC-DC变换时,根据国标称“变流器”较为合适,但该词除了DC-AC变换外,几乎用于所有变换场合,此时统称“变流器”颇感牵强。而如果根据不同应用场合逐一选择相应术语又感非常零乱,不如按原著译成“变换器”更加简单明了,读者也深明其义。又如インバータ(inverter),其原意是DC-AC变换,早期的DC-AC变换是用于驱动电动机,使之频率可调,国内称之为“变频器”。但DC-AC变换也并不尽是调整频率,在并网发电时,只生成一种与电网同步的频率,因此,与其译成“变频器”,不如译成“逆变器”更贴切。类似的情况还有,マトリクスコンバータ(matrix converter),DCリンク(link)等,为避免混乱,本书还是取矩阵式变换器和DC环节,而舍去其他译意。

本书的出版,得到了科学出版社北京东方科龙图文有限公司的大力协助,并且在本书的翻译中得到了台达电力电子科教发展基金的支持。书稿的全部文字输入得到了黄跃杰、吴春华、许春雨三位同志的全力帮助,其中许春雨同志还完成了书稿的整理工作,译者谨借此机会向以上各位表示真诚的谢意。

如果本书的出版能对读者有所启迪,将是译者的莫大荣幸。限于译者自身的学识水平、时间和精力,书中可能存在疏忽、误解和欠妥之处,恳请读者不惜批评指正,不胜感激。

陈国呈

上海大学自动化系 14 信箱 (200072)

前 言

随着功率半导体技术、控制技术、各种电气装置及材料技术的进步,电力电子技术获得了稳步发展,并在各个领域得到广泛应用。为了预测如此多样化的应用领域,并对各种电路拓扑结构和控制方法进行技术分类,对专业术语加以整理,1983年日本成立了半导体电力变换技术调查专门委员会。该委员会的成就之一是,出版了《半导体电力变换电路》一书,并经多次反复重印,已成为一部颇受科技工作者青睐的专业基础参考书,整整奉献了10年;成就之二是,在这10年间,在半导体电力变换技术委员会之下,分设了多个调查专门委员会,对近年来的技术动向作了详细调查和总结。在此基础上,对《半导体电力变换电路》一书的技术内容和技术体系要求重新评估的呼声日益高涨。

在上述背景下,为了给科技工作者提供有益的技术指导,对于极其多样化和高难度的半导体电力变换系统,一方面尊重原书的旨意,另一方面站在当今的时代观测点上对技术体系进行重新评估,对专业术语进行分类、整理和再版,1997年10月设立了半导体电力变换系统调查专门委员会。此后的两年里,进行了详细的调查研究,达成了如下共识,总结编写本书。

1. 专业术语以电气专门用术语集《电力电子》(1998年2月发行)为准。
2. 谐波分析、坐标变换等作为控制分析理论进行总结。
3. 把重点放在PWM逆变器的新控制方法和交流变换电路的新的直接变换电路的整理上。

4. 谐振变换电路要重新进行分类,对术语要进行大量整理。

本书在执笔时,承蒙在从事电力电子技术科研第一线的、具有丰富经验的各位专家和学科带头人的鼎力相助,终于铸成了本书的问世。电力电子技术的发展是日新月异的,但现阶段的整理工作已到此告终,可以认为基本上达到了原先既定的目标。

作者寄厚望于,本书今后能成为学生学习电力电子的好教科书,能成为从事电力电子工作的各位同仁的好伴侣。

最后,谨借此机会向全力支持本委员会的半导体电力变换技术委员会的各位致以衷心的感谢。

电气学会半导体电力变换系统调查专门委员会
委员长 矢野昌雄

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 电力电子技术及其发展	1
1.2 电力变换电路方式的技术分类	4
参考文献	8
第 2 章 结构要素	9
2.1 阀器件	9
2.1.1 半导体开关	9
2.1.2 阀器件的功能分类	11
2.1.3 主要阀器件的种类和特性	13
2.2 阀器件的驱动电路	19
2.2.1 晶闸管的门极驱动电路	20
2.2.2 GTO 的门极驱动电路	20
2.2.3 功率晶体管的驱动电路	22
2.2.4 IGBT 的驱动电路	23
2.3 换相方式与缓冲器	24
2.3.1 换相方式的分类	24
2.3.2 缓冲器	33
参考文献	42
第 3 章 电力电子电路的控制与理论分析	45
3.1 输入输出波形变换的基础理论	45
3.1.1 输入输出波形	45

3.1.2	开关函数及其应用	56
3.2	特性分析的基础理论	65
3.2.1	特性的基本要素	65
3.2.2	电力电子引发的弊害	68
3.2.3	坐标变换与瞬时空间矢量	75
3.2.4	系统旋转坐标系的设定方法	86
3.2.5	利用 $d-q$ 坐标的电压型变换器的建模	88
3.2.6	状态平均化法	91
	参考文献	94
第4章	交直变换电路	97
4.1	整流电路(顺变换电路)	97
4.1.1	他励式整流电路	98
4.1.2	自励式整流电路	104
4.1.3	复合整流电路	108
4.1.4	多重整流电路	111
4.2	逆变器(逆变电路)	114
4.2.1	他励式逆变器	114
4.2.2	高频环节逆变器	118
4.3	无功功率补偿装置、有源电力滤波器	120
4.3.1	无功功率补偿装置	120
4.3.2	有源电力滤波器	125
	参考文献	137
第5章	自励式逆变器	139
5.1	自励式逆变器的主电路方式	139
5.1.1	电压型逆变器	139
5.1.2	电流型逆变器	157
5.1.3	电压型与电流型的特性比较	162

5.2	逆变器的控制方法	164
5.2.1	电压型逆变器的控制方法	164
5.2.2	电流型逆变器的控制方法	192
5.3	PWM 逆变器应用上的问题	207
5.3.1	谐波引发的噪声、转矩脉动和损耗增大的问题	207
5.3.2	高速开关动作造成的漏电流、轴承电流问题	211
5.3.3	高速开关动作引起的过电压(绝缘老化)问题	214
	参考文献	218
第 6 章	交流变换电路	221
6.1	直接变换电路	222
6.1.1	交交变频器	222
6.1.2	矩阵式变换器	227
6.1.3	交流功率调整电路	231
6.2	交流间接变换电路	236
6.2.1	直流环节变换电路	236
6.2.2	高频环节变换电路	239
6.2.3	应用例	242
	参考文献	253
第 7 章	直流变换电路	255
7.1	直流斩波器	255
7.1.1	直流斩波器的基本电路	255
7.1.2	复合斩波电路	271
7.2	DC-DC 变换器	275
7.2.1	DC-DC 变换器的分类和动作原理	275

7.2.2 基本电路的动作说明	277
7.2.3 同步整流电路	284
参考文献	289

第 8 章 谐振型变换电路 291

8.1 谐振型变换电路的分类	292
8.2 负载谐振型变换电路	293
8.2.1 串联谐振型变换电路	294
8.2.2 并联谐振型变换电路	298
8.3 准谐振型变换电路	301
8.3.1 谐振开关及其分类	301
8.3.2 谐振开关的应用举例	305
8.3.3 复谐振型变换电路	313
8.4 伪谐振型变换电路	316
8.4.1 使用谐振电感产生滞后电流的方式	316
8.4.2 辅助谐振换相极型逆变器	317
8.5 谐振环节型变换电路	319
8.5.1 谐振 AC 环节型逆变电路	319
8.5.2 谐振 DC 环节型逆变电路	323
参考文献	329

第 1 章 绪 论

1.1 电力电子技术及其发展

电力电子虽已发展到今天,但其发源点可以追溯到 1957 年晶闸管的出现。

“电力电子”一词虽然从 1960 年就开始使用,但是正式使用该词是从 1973 年美国的 Newell 解释了“将功率(静止机、旋转机)、电子学(器件、电路)、控制(连续、离散)等三个技术领域完全融为一体”(如图 1.1 所示)之后开始的^[1]。

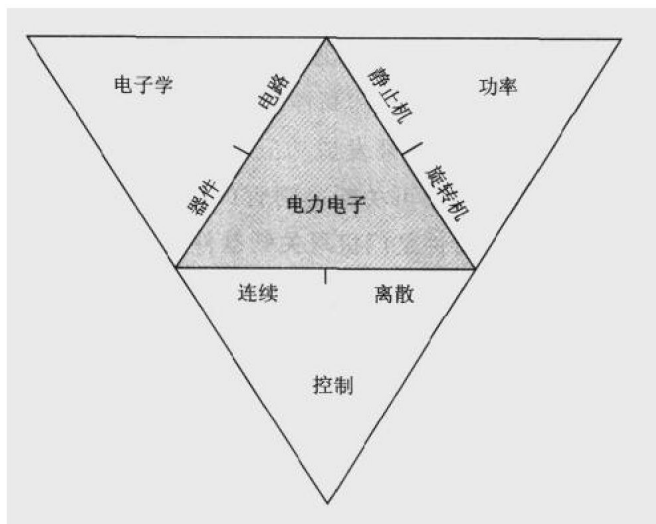


图 1.1 电力电子的结构领域

本词汇没经正式定义就一直用到现在,但在最近的专业术语汇编里定义为“综合了功率、电子与控制技术,与电力变换及电力开闭相关的技术领域”。

而且,与电力电子有着密切关系的《(半导体)电力变换》一书上定义为“使用(半导体)阀器件,将电压、电流、频率(包括直流)、相位、相数、波形等电气特性中的一个以上特性进行实质上的无功率损耗变换”^[2]。

这里所谓“阀器件”是指具有单方向无实质性功率损耗导电功能,用于电力变换的最小单位(半导体)器件。而且,不是说把晶闸管、功率晶体管、IGBT等器件本身称作阀器件,这些器件还是功率半导体器件,而当其用于电力变换装置时,才成为阀器件。

在电力变换中,要实现“无实质性功率损耗”,阀器件只做导通状态和关断状态的切换工作。功率晶体管等器件是可以工作在线性放大区的器件,但在电力变换中没有使用这种条件,而是在饱和状态和截止状态之间切换使用,以此来实现“无实质性功率损耗”。

电力电子的发展与功率半导体器件的进步有着密切相关。

作为半导体阀器件,最早得到应用的是硅二极管,但在电力电子学发展的前半过程中担任主角的还是晶闸管。晶闸管在1957年经GE公司推出之后,在大容量化和高性能化方面得到了长足的发展,品种也向多样化发展。即相继开发成功三端双向晶闸管和反向导通晶闸管等复合元件,以及门极可关断晶闸管(GTO)、光晶闸管等。在发展的后半过程中,核心器件是门极可关断器件(自消弧器件)。开始时是(双极)功率晶体管,此后,GTO、IGBT、功率MOSFET等发展得很快。

下面围绕日本回顾一下应用领域的发展历史。

首先,从昭和30年代¹⁾开始,采用大容量硅二极管的地铁用整流装置及电解用电源装置已投入使用。从昭和40年代初,驱动轧钢机

1) 昭和30年等于1955年,昭和30年代相当于1955年~1964年。——译者注

的电动机控制也使用了大容量晶闸管。此后,又开发成功了用于地铁的斩波控制器及不停电电源逆变器的高速晶闸管和反向导通晶闸管,晶闸管的品种也越来越多。甚至用于直流输电的大容量光触发晶闸管也投入使用。

从昭和 50 年代开始,门极可关断器件已经活跃在市场上。此前以晶闸管为中心的电力电子终因斩波器和逆变器所需要的换相电路太复杂而得不到推广应用。但是,如果使用门极可关断器件,就不需要换相电路,电路也简单了。因此,中小容量的逆变器装置广泛使用功率晶体管,而大容量的斩波器和逆变器则广泛使用 GTO。

门极可关断器件的应用为电力变换装置带来了划时代的变革。那就是高频 PWM 控制技术的实用化,以及使用高频 PWM 控制的交流调速系统的广泛应用。

对于电动机驱动,以往在需要高精度控制的领域主要使用直流电动机,而对于风机等只需要固定速度运行的领域,则主要使用交流电动机。可是,直流电动机在维护和可靠性方面存在缺点,以及其转速和容量受到限制,因此,人们期待着交流调速驱动系统的实现。但是,在当时还没有可以与控制直流电动机相媲美的交流电动机的控制方法,而且,即使在使用交流电动机定速运行的领域,从节能的角度考虑,仍希望使用变速驱动,且呼声很高。应以上两者的需求,出现了交流调速系统的控制技术。加上矢量控制变频调速技术的确立,促使交流电动机的控制性能胜过直流电动机,并在许多使用领域取代了直流电动机。

电力电子技术能够吸纳高难度的控制技术也是微电子学领域的微型计算机、DSP、LSI,以及数字化控制技术的一大贡献。

如今,交流调速技术和逆变器技术不但在产业领域,还在百姓生活中如家电、住宅空调、冰箱、日光灯照明等方面都得到应用,成为主流技术。

近来的动向是,大容量电气装置上也采用了自动式变换装置。此前,数十兆伏安级的电气装置专门使用采用电源换相晶闸管的交交变

频等他励式变换装置,但随着门极可关断器件的大容量化和性能的改善,现在,磁悬浮列车用的变频器、可变速扬水发电机的励磁装置等都已投入使用。

而且,由于电力系统对装置容量和可靠性要求很高,因此,半导体电力变换装置只用在直流输电或无功功率补偿等有限的领域。但是,可以认为今后电力系统方面电力电子的应用会更加广泛。这种大力采用电力电子提高电力系统控制性能的系统称为**柔性交流传输系统**(FACTS: Flexible AC Transmission System)。主要的 FACTS 装置有晶闸管控制的串联电容和晶闸管控制的调相等。另外,兼备有调相器和无功功率补偿装置功能的**统一功率流控制器**(UPFC: Unified Power Flow Controller)目前也在研究中。

从 20 世纪末到 21 世纪前半阶段,最大问题是地球环境问题。随着能量消耗的增大,二氧化碳和其他废气排放量的增加是个大问题。为了既继续保持生活的便捷性又能减轻对环境的负担,人们普遍看好电力电子将发挥越来越重要作用。比如汽车,以前是作为靠汽油引擎运行的机械发展起来的,但随着废气排放法规的严格执行,“绿色”电动车的研发工作正在积极开展中。人们看好,将来电动车将代替汽油引擎车辆成为汽车的主流。但是,电动车所必需的电池性能目前还不过关,作为过渡期,目前引擎/电动混合型汽车充当着电动车的角色。

1.2 | 电力变换电路方式的技术分类

所谓**电力变换**是指在电源和负载之间,将电压、电流、频率(包括直流)、相位、相数、波形等电气特性中的一个以上特性进行实质性的无损耗变换。电力变换这个词初听起来像是将电力变换为其他的能量,其实除了变换装置内部的损耗和能量存储(或释放)外,变换装置的输入输出功率是相等的。

作为改变电气特性的方法,例如,使晶体管工作在线性放大区,就