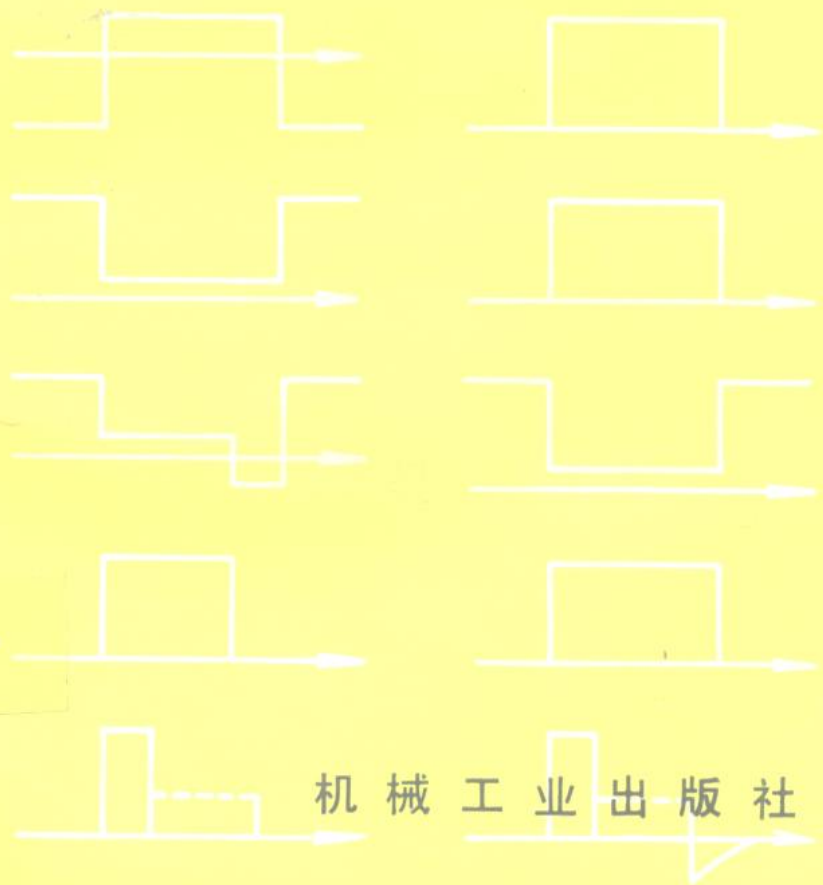


电力半导体变流电路

日本电气学会 电力半导体变流方式调研专门委员会



电力半导体变流电路

日本电气学会 电力半导体变流方式调研专门委员会

王兆安 张良金 译

孙流芳 校



机械工业出版社

(京)新登字054号

本书由日本电力电子技术专家们，在收集了日本和其他国家大量资料的基础上，集体编写而成。它反映了日本电力电子技术的最高水平，是日本在这一领域内的一部权威性著作。本书以自关断器件构成的开关为基本元件，用新的观点对种类繁多的电力电子电路进行了归纳和整理，较详尽地论述了各种电路形式和控制方式的工作原理、特点和分析方法，还给出了应用实例。

本书可供从事电力电子技术及电气传动的工程技术人员参考，也可供高等学校工业自动化、电力电子技术等专业的师生参考或作为研究生教材。

半导体电力变换回路

1987年3月25日 印 刷

1987年3月31日 初版发行

编辑兼
发行者 社团法人 电气学会

代表者 天野良男

电力半导体变流电路

日本电气学会 电力半导体变流方式调研专门委员会

王兆安 张良金 译

孙流芳 校

责任编辑：牛新国 版式设计：霍永明

封面设计：肖 晴 责任校对：熊大荣

责任印制：王 国 光

机械工业出版社出版（北京阜成门内百万庄大街一号）

邮政编码：100037

（北京市书刊出版业营业登记出字第117号）

机械工业出版社京丰印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经销

开本 850×1168¹/₃₂·印张 12¹/₈·字数 311 千字

1993年1月北京第1版·1993年1月北京第1次印刷

印数 00,001—2,4000·定价：13.00元

ISBN 7-111-03348-5/TM·419

译者的话

电力电子技术是近年来发展很快的一门技术。特别是由于自关断器件的广泛应用和采用了微处理机控制,使电力电子技术发展到了一个新的水平。

日本在电力电子技术方面是居世界领先地位的国家之一。本书是日本电气学会下设的电力半导体变流方式调研专门委员会在收集了日本和其他国家大量资料的基础上集体编写的。其各部分内容的执笔者都是对电力电子技术的发展作出重要贡献的专家。因此,本书反映了日本电力电子技术的最高水平,是日本在这一领域内的一部权威性著作。本书1987年出版以来,受到了日本电力电子学界的普遍欢迎,成为从事电力电子技术人员的必备参考书。

在内容的编排组织上,本书以自关断器件构成的开关为基本元件,用新的观点对种类繁多的电力电子电路进行了归纳和整理。本书详尽地论述了各种电路形式和控制方式的工作原理、特点和分析方法,也给出了不少应用实例。因此,虽然电力电子技术发展迅速,本书仍然能在相当长的时间内具有重要的参考价值。

本书第I、II篇由西安交通大学电气系王兆安翻译,第III、IV篇由西安电力整流器厂张良金翻译,全书由机械电子工业部机械科学技术情报研究所孙流芳校订。在翻译过程中,还得到了南京电力电子学会理事长张明勋高级工程师的许多指导和帮助,在此谨表示衷心的感谢。

本书可供我国从事电力电子技术的工程技术人员参考,也可作为高等院校工业自动化、电力电子等专业的研究生教材,或者作为本科高年级选修课教材或教学参考书。

由于水平所限,译文中难免有不妥之处,欢迎读者批评指正。

译者

1991年11月

前 言

以晶闸管为中心的电力电子技术，经过 20 多年的实践和发展，已经从最初的电力变流渗透到所有的电力应用领域。特别是最近，具有自关断能力的大功率双极型晶体管、GTO、电力金属氧化物半导体场效应晶体管（MOSFET）等各种半导体器件相继问世，再加上微处理机的应用，使半导体电力变流装置的控制性能提高到一个新的水平，其应用范围也日益扩大。

以节能、省力和机器人的应用为背景，采用快速开关器件的自换相逆变器构成的交流电机调速系统、给计算机及其附属设备供电的不间断电源（UPS）、以及开关调节器等的应用范围在不断扩大。进而，对作为将来主要应用范围之一，在太阳能电池、燃料电池等直流发电新能源系统中使用的逆变器，吸收谐波的电力有源滤波器等各个方面，也在进行着深入的研究。

随着应用范围的日益扩大，在对各种最佳电路的研究中，由于电力半导体器件性能的改善，产生了各种新的电路及控制方式。因为对这些电路特点的认识尚不明确，所以出现了名称相同而内容各异、方式不同，以及同一方式名称却不同的混乱现象。

根据这种情况，日本电气学会于 1983 年 4 月设立了半导体电力变流方式调研专门委员会进行调查，每年召开约 10 次会议，于 1986 年 3 月完成了这项工作。本书就是根据该委员会历时三年的调研成果总结而成的。本书并非是调研成果的简单罗列，而是按照新的观点，对电路方式和控制方式进行系统的分类和整理。这样，就能使本书在较长的时间内，对有关专业的研究人员和技术人员具有参考价值。

本书由 4 篇组成。第 I 篇是变流电路及控制方式的基础，该篇把传统的以晶闸管为中心的整流电路和换相电路的分类，以及使用自关断器件的变流电路的分类结合起来，进行统一处理。以前的有关技术书籍大多是先论述整流电路和外部换相逆变器，然

后再把自换相逆变器等电路并列起来论述。本书的想法是把以自关断器件为中心的半导体开关作为构成变流电路的基本元件，所以先把使用直流开关的直流斩波器安排在第Ⅱ篇。第Ⅱ篇是直流电源供电的变流电路，在直流斩波器之后接着论述自换相逆变器和负载换相逆变器。在自换相逆变器中，PWM逆变器迄今尚未得到很充分的研究，名称也很混乱，本篇特别叙述了对PWM逆变器的详细调研成果，对其名称也进行了明确的分类和整理。第Ⅲ篇论述交流电源供电的变流电路，包括整流电路、外部换相逆变电路、自换相逆变电路、周波变流器和交流电力控制电路，也论述电力有源滤波器、调相电路以及自换相周波变流器。最后的第Ⅳ篇论述了组合变流电路，它包括交流变成直流、再变成交流的变压变频（VVVF）逆变器等间接交流变流电路，以及直流变成交流、再变成直流的开关调节器等间接直流变流电路。

本书各章是分别独立的，但是前面各章的内容又为后面各章的说明作了准备，因此如果按照各章的顺序阅读，便容易理解。

随着电力变流装置的应用领域不断扩展，人们还为提高装置的性能而努力。现在，变流电路的改进方案和新的控制方式仍在不断涌现。本书在基本原理上对变流电路进行了归纳，论述了设计各种电路的基本思想方法、各种电路的工作特性以及应用实例。因此作者希望，即使情况不断变化，本书仍不失为从事电力电子技术工作的研究人员、技术人员的良好伴侣，并为电力电子技术的发展作出贡献。

承担本书执笔的都是对电力电子技术的发展作出贡献的，并活跃在第一线的有丰富经验的专家。本书的出版发行是令人欣喜的。在此，谨对在百忙中积极参与本书撰写的各位执笔者表示衷心的感谢。

最后，对全力支持本委员会工作的半导体电力变流技术委员会委员长、干事及各位委员表示衷心的感谢。

日本电气学会
电力半导体变流方式调研专门委员会

委员长 矢野昌雄

1987年3月

电气学会 电力半导体变流方式 调研专门委员会

- 委员长 矢野昌雄（三菱电机株式会社）
F 事 木村军司（东京都立大学）
松瀬贡规（明治大学）
助理干事 松浦敏明（三菱电机株式会社）
委员 （按日语发言顺序）
井村辉夫（株式会社 富士电机综合研究所）
池田春男（日本国有铁道）
池田吉尧（横滨国立大学）
石川忠夫（电力中央研究所）
植田明照（株式会社 日立制作所）
大桥靖生（日本电信电话株式会社）
加藤宜夫（株式会社 东芝）
数野 宽（山梨大学）
北村觉一（中央大学）
金 东海（上智大学）
久米常生（株式会社 安川电机制作所）
佐藤则明（东京工业大学）
西条隆繁（芝浦工业大学）
田中日出男（株式会社 明电舍）
高桥 动（长冈技术科学大学）
西台 惇（日新电机株式会社）
正田英介（东京大学）
三桥 刚（东洋电机制造株式会社）
- 调研协作者
荻原义也（日新电机株式会社）
松桥忠男（芝浦工业大学）

凡 例[⊖]

1. 学术用语原则上使用日本文部省规定的术语，以及日本电气学会专门用语集《半导体电力变流装置》和日本工业标准中采用的术语。

2. 单位符号原则上使用国际单位制。

3. 图、表及公式的序号按照章和节的序号来编号。

4. 图形符号的使用原则上按照日本工业标准《JIS C 0301 电气图形符号》的规定，和主要图形符号相对应的文字符号如表 1 所示。

5. 单位符号和物理量符号的使用按照日本工业标准《JIS Z 8202 物理量符号、单位符号及化学符号》的规定，物理量符号用斜体字，如 V 、 I 、 Φ ，单位符号用正体字，如 V 、 A 、 W_b 。

另外，空间矢量用黑斜体字表示，如 B ，复数以及相量用 \dot{V} 、 \dot{I} 表示，其绝对值用 V 、 I 表示。表示瞬时值的符号用小写斜体字，如 v 、 i 。主要物理量符号如表 2 所示。

6. 在物理量之后附加单位符号时，为了使两者明确区别开，把单位符号写在括号内，(例) $V[V]$ 、 $I[A]$ 。

7. 用英文字母表示虚线、器件、物体等时，用正体字，(例) 点 P 、线圈 C 、电压表 V 。

8. 运算符号按照日本工业标准《JIS Z 8201 数学符号》，原则上用正体字表示，(例) \sin 、 d 、 Σ 、自然对数 \ln 、常用对数 \log 、虚数单位 j 。

⊖ 本凡例中略去了原书中的 3、5 条，其余各条序号有变动。

表 1 主要图形符号和文字符号

序号	名称	图形符号	文字符号	
1	电阻或电阻器		R	
2	电感或电感器		L	
3	互感或变压器		M	
4	静电电容或电容器		C	
5	交流电源		(例) 三相50 Hz, 200 V	
6	直流电机			电动机 发电机
7	同步电机	(单线图用) 		电动机 发电机 (多线图用)
8	感应电机	(单线图用) 		电动机 发电机 (多线图用)
9	变压器		Tr 一次用大写字母 二次用小写字母	
10	斩波部件		Ch	
11	整流装置		REC	
12	逆变装置		INV	
13	直接直流变流装置			
14	间接直流变流装置			
15	直接交流变流装置			
16	间接交流变流装置			

(续)

序号	名称	图形符号	文字符号
17	开关		S
18	整流管	(阳极) (阴极) 	D
19	晶闸管	(阳极) (阴极) (门极)	T
20	可关断晶闸管 (GTO)		G
21	SI 静电感应 (SI) 晶闸管		T
22	pnp 晶体管		Q
23	nnp 晶体管		Q
24	MOS FET 绝缘栅增强型 场效应晶体管		Q

表 2 主要物理量符号

序号	变量符号	内 容	序号	变量符号	内 容
1	$V_{R,S,T}$	相电压有效值(电源侧)	11	P	瞬时功率
2	$I_{R,S,T}$	相电流有效值(电源侧)	12	pf	总功率因数
3	$V_{U,V,W}$	相电压有效值(负载侧)	13	pf_1	基波功率因数
4	$I_{U,V,W}$	相电流有效值(负载侧)	14	ω	电源角频率
5	$v_{R,S,T}$	相电压瞬时值(电源侧)	15	ω_s	开关角频率
6	$i_{R,S,T}$	相电流瞬时值(电源侧)	16	ω_1	输出基波角频率
7	P	有功功率	17	f	电源频率
8	S	表观功率	18	f_s	开关频率
9	Q	无功功率	19	f_1	输出基波频率
10	W	能量	20	V_s	单相电源电压

目 录

译者的话
前言
凡例

第 I 篇 电力变流电路及控制方式

第 1 章 绪论——半导体电力变流电路及其背景	1
§ 1.1 半导体电力变流技术及其进步	1
1.1.1 电力电子技术和半导体电力变流技术	1
1.1.2 电力电子技术的发展	2
1.1.3 应用范围的扩大	3
§ 1.2 电力变流电路及控制方式的技术动向	5
1.2.1 对电力变流技术的要求	5
1.2.2 直流变流	6
1.2.3 整流	7
1.2.4 逆变	7
1.2.5 交流变流	8
参考文献	8
第 2 章 电力变流电路的基本构成	9
§ 2.1 电力变流的基本方式	9
§ 2.2 半导体开关和电力半导体器件	12
§ 2.3 电力变流电路和半导体开关	13
§ 2.4 电力半导体器件的种类和特性	21
2.4.1 不可控器件	21
2.4.2 导通可控器件	21
2.4.3 导通·关断可控器件(自关断器件)	24
§ 2.5 门极、基极驱动电路	27
2.5.1 门极、基极驱动电路的构成和条件	27
2.5.2 晶闸管的门极驱动电路	28

2.5.3	GTO、GATT 的门极驱动电路	30
2.5.4	电力双极型晶体管、电力MOSFET 的驱动电路	31
2.5.5	电力 SIT、SI 晶闸管门极驱动电路	33
	参考文献	33
第 3 章	电力变流器换相方式	34
§ 3.1	换相方式分类	34
§ 3.2	外部换相	35
3.2.1	电网换相	35
3.2.2	负载换相	37
§ 3.3	自换相	38
3.3.1	器件换相	38
3.3.2	脉冲换相	39
§ 3.4	缓冲电路	43
	参考文献	49
第 4 章	电力变流器的输入输出波形和变流方式	50
§ 4.1	输入输出波形	50
4.1.1	电压型和电流型	50
4.1.2	输出波形的名称	52
4.1.3	串联多重和并联多重	55
§ 4.2	变流方式基础	59
4.2.1	开关函数和变流方式	59
4.2.2	输入输出波形的控制和脉冲宽度调制	63
4.2.3	电力变流方式基础	69
	参考文献	77

第 II 篇 直流电源供电的变流电路

第 5 章	直流斩波器	79
§ 5.1	直流斩波器的基本电路	79
5.1.1	降压斩波电路	79
5.1.2	升压斩波电路	86
5.1.3	升降压斩波电路(反极性斩波电路)	92
5.1.4	Cuk 变流电路	93
5.1.5	电阻斩波电路	95

§ 5.2 复合斩波电路	96
5.2.1 电流可逆斩波电路 (两象限斩波电路)	96
5.2.2 电压可逆斩波电路 (两象限斩波电路)	97
5.2.3 桥式可逆斩波电路 (四象限斩波电路)	99
§ 5.3 负载电流多重化斩波电路	100
5.3.1 多相多重斩波电路	100
5.3.2 多相多重斩波电路的特点	102
§ 5.4 带有电源切换的斩波电路	103
5.4.1 串并联斩波电路	103
5.4.2 电源串并联切换斩波电路	103
5.4.3 多段串并联切换斩波电路	104
5.4.4 多段切换斩波电路	105
§ 5.5 带有负载切换的斩波电路	105
5.5.1 分压两相斩波电路	105
5.5.2 二分割两相斩波电路	106
参考文献	108
第6章 自换相逆变器	109
§ 6.1 自换相逆变器的主电路形式	109
6.1.1 电压型逆变器	109
6.1.2 电流型逆变器	112
§ 6.2 多重逆变器	114
6.2.1 多重逆变器的原理	114
6.2.2 电压型多重逆变器	115
6.2.3 电流型多重逆变器	127
§ 6.3 PWM逆变器	128
6.3.1 PWM逆变器基础	128
6.3.2 非同步式PWM逆变器	132
6.3.3 同步式PWM逆变器	150
6.3.4 跟踪型PWM逆变器	168
6.3.5 电流型PWM逆变器	178
参考文献	183
第7章 负载换相型逆变器	185

§ 7.1 负载电压换相型逆变器	185
7.1.1 基本工作原理	185
7.1.2 并联谐振型逆变器	186
7.1.3 由同步电动机换相的方式	187
7.1.4 无换向器电动机的各种方式	189
§ 7.2 串联谐振型逆变器	190
7.2.1 电压型串联谐振逆变器	190
7.2.2 电流型串联谐振逆变器	194
7.2.3 时间分割式高频逆变器	197
参考文献	200

第 III 篇 交流电源供电的变流电路

第 8 章 整流电路及外部换相逆变器	201
§ 8.1 基本整流电路	201
8.1.1 单拍整流电路	201
8.1.2 双拍整流电路	209
§ 8.2 多重整流电路	217
8.2.1 移相多重联结	217
8.2.2 顺序控制多重联结	222
8.2.3 非对称控制多重联结	223
§ 8.3 特殊整流电路	224
8.3.1 倍压整流电路	224
8.3.2 用附加开关改善功率因数	224
8.3.3 用平衡电抗器的二次绕组降低谐波	225
§ 8.4 外部换相逆变器	227
参考文献	230
第 9 章 自换相变流电路	231
§ 9.1 自换相变流电路概要	231
§ 9.2 自换相整流电路	235
9.2.1 改善波形用的变流电路	235
9.2.2 调整功率因数用的变流电路	238
9.2.3 应用例	249
§ 9.3 逆变器电路	252

9.3.1	系统连接用逆变器	254
9.3.2	在与系统连接时逆变器输出的有功功率和无功功率	256
9.3.3	整流-逆变双向运行	257
9.3.4	应用例	258
§ 9.4	电力有源滤波器	264
9.4.1	电力有源滤波器的基本原理	265
9.4.2	电力有源滤波器电路	267
	参考文献	279
第10章	周波变流器	281
§ 10.1	基本结构和工作原理	281
§ 10.2	门极控制方法和输出波形	284
§ 10.3	输入输出特性	286
10.3.1	输入功率因数	286
10.3.2	谐波	286
10.3.3	输出频率上限	287
§ 10.4	周波变流器的电路方式	288
10.4.1	方式分类	288
10.4.2	正弦波输出周波变流器	290
10.4.3	环流式周波变流器	293
10.4.4	非对称控制周波变流器	295
10.4.5	复合结构周波变流器	297
§ 10.5	应用例	300
	参考文献	303
第11章	交流电力控制电路	305
§ 11.1	基本结构和工作原理	305
§ 11.2	交流开关的结构	307
§ 11.3	交流开关的控制方式和功能	309
11.3.1	导通相位角控制	309
11.3.2	交流斩波控制	315
11.3.3	交流电路的开关控制	317
11.3.4	电流截断控制	323
§ 11.4	应用例	324
11.4.1	交流电力控制	324
11.4.2	电压控制电路	325

11.4.3 快速、频繁开关	326
参考文献	328

第IV篇 组合变流电路

第12章 间接交流变流电路	329
§ 12.1 基本结构	329
12.1.1 采用电压型逆变器的变流电路	329
12.1.2 采用电流型逆变器的变流电路	330
§ 12.2 使用电压型逆变器的电压电流调节电路	331
12.2.1 无再生反馈功能的变流电路	331
12.2.2 有再生反馈功能的变流电路	334
§ 12.3 使用电流型逆变器的电压电流调节电路	335
12.3.1 使用电流型晶闸管逆变器的变流电路	335
12.3.2 使用电流型GTO逆变器的变流电路	337
§ 12.4 应用例	341
12.4.1 VVVF逆变装置	341
12.4.2 CVC装置	344
参考文献	347
第13章 间接直流变流电路	348
§ 13.1 分类	348
§ 13.2 电路结构和工作原理	349
13.2.1 传输型变流电路	349
13.2.2 升压型变流电路	352
13.2.3 回扫型变流电路	354
13.2.4 Ćuk型变流电路	354
13.2.5 谐振型变流电路	355
§ 13.3 基极驱动电路	357
§ 13.4 整流电路	359
§ 13.5 应用例	361
13.5.1 多输出变流电路	362
13.5.2 恒流输出变流电路	365
13.5.3 高压输出变流电路	367
13.5.4 零纹波输出变流电路	367
13.5.5 交流输入变流电路(整流器)	369
参考文献	370

第 I 篇 电力变流电路 及控制方式

本篇是基础篇，其主要目的是使读者对第 II 篇以后的各种变流电路容易理解。同时，也试图把以前分别独立说明的各种变流电路的共性加以归纳和分析。因此，不仅对于缺乏半导体电力变流基本知识的读者，就是对于有丰富实践经验的读者，也能够以新的观点整理自己的知识，从全局上把握本书的内容。

第 1 章 绪论——半导体电力 变流电路及其背景

§ 1.1 半导体电力变流技术及其进步

§ 1.1.1 电力电子技术和半导体电力变流技术

电力电子技术这个名词从 60 年代初就开始使用了，但至今还没有明确的定义。一般认为，它是指使用晶闸管等电力半导体器件进行电力变流、控制以及接通和断开电力电路及其应用的技术。例如，美国的 Newell（纽厄尔）把它表示成图 1.1.1 所示的那样，即认为电力电子技术是建立在电力技术（旋转电机、静止器）、电子学（器件、电路）及联系这两者的控制理论（连续、离散）这三门基本技术之上的技术〔1〕。

半导体电力变流技术是使用电力半

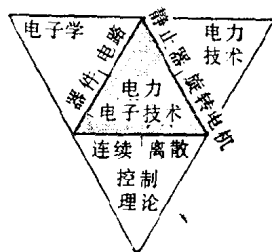


图 1.1.1 电力电子技术
的构成