

智能电网 关键技术研究与应用丛书

电力系统中的 电压源变流器 ——建模、控制和应用

Voltage-Sourced Converters
in Power Systems:
Modeling, Control, and Applications

[加] 阿莫那泽·雅兹达尼 (Amirnaser Yazdani) 著
雷扎·伊拉瓦尼 (Reza Iravani) 著
郝全睿 王淑颖 译

智能电网关键技术研究与应用丛书

电力系统中的电压源 变流器

——建模、控制和应用

Voltage-Sourced Converters in Power Systems:
Modeling, Control, and Applications

[加] 阿莫那泽·雅兹达尼 (Amirnasir Yazdani)
雷扎·伊拉瓦尼 (Reza Iravani)

著

郝全睿 王淑颖

译

机械工业出版社

本书对电压源变流器 (VSC) 系统的基本理论及其在电力系统中的应用进行了全面介绍, 主要内容包括 VSC 系统的基本原理、通用模型、控制器设计、基于空间相量的分析方法、不同类型 VSC 系统的模型和控制以及 VSC 系统在电力系统中的具体应用。

本书适合发电、输电和配电领域的技术人员, 特别是正在从事新能源接入和分布式能源系统运行的电力工程师, 以及高等学校电气工程专业的教师和学生阅读。

Copyright © 2010 by John Wiley & Sons, Inc.

All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled Voltage-Sourced Converters in Power Systems: Modeling, Control, and Applications, ISBN: 978-0-470-52156-4, by Amirnaser Yazdani, Reza Iravani, Published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

本书中文简体字版由机械工业出版社出版, 未经出版者书面允许, 本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。版权所有, 翻印必究。

北京市版权局著作权合同登记 图字: 01-2010-4820 号。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力系统中的电压源变流器——建模、控制和应用/(加) 阿莫那泽·雅兹达尼 (Amirnaser Yazdani), (加) 雷扎·伊拉瓦尼 (Reza Iravani) 著; 郝全睿, 王淑颖译. —北京: 机械工业出版社, 2017. 8

(智能电网关键技术研究与应用丛书)

书名原文: Voltage-sourced converters in power systems: modeling, control, and applications

ISBN 978-7-111-57526-9

I. ①电… II. ①阿… ②雷… ③郝… ④王… III. ①变流器—研究
IV. ①TM46

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 182715 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
策划编辑: 付承桂 责任编辑: 王 荣 责任校对: 樊钟英
封面设计: 鞠 杨 责任印制: 常天培
唐山三艺印务有限公司印刷
2017 年 10 月第 1 版第 1 次印刷
169mm×239mm·22.75 印张·464 千字
0001—2600 册
标准书号: ISBN 978-7-111-57526-9
定价: 99.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换
电话服务 网络服务

服务咨询热线: 010-88361066 机工官网: www.cmpbook.com

读者购书热线: 010-68326294 机工官博: weibo.com/cmp1952

010-88379203 金书网: www.golden-book.com

封面防伪标均为盗版 教育服务网: www.cmpedu.com

译者序

随着电力电子技术的进步和新能源技术的发展,大功率的电力电子变流器系统越来越多地应用于发电、输电和配电领域,电力系统电力电子化的趋势愈加明显。作为电力系统中最常用的变流器,电压源变流器(VSC)广泛应用于柔性交流输电、直流输/配电、可再生能源并网等领域。虽然已经有很多介绍电力电子变流器的拓扑和控制的书籍,但是大多数都是从电力电子的角度针对变流器自身的拓扑和控制来阐述的,没有结合变流器在电力系统的应用场景,针对VSC系统在电力系统中具体应用的中文书籍仍然偏少。

本书以两种最基本的VSC——两电平VSC和三电平NPC为研究对象,主要从VSC在电力系统中的应用角度对VSC系统的相关问题展开论述。本书内容广泛,基本涵盖了VSC系统在设计和运行中所关注的主要问题。本书使用了大量的例子详细介绍了VSC系统的建模、控制器设计和性能评估,以循序渐进的方式使读者了解VSC系统的设计和工作过程。虽然本书没有涉及VSC家族中的最新成员——模块化多电平变流器(MMC),但是书中给出的分析和设计方法对MMC系统仍然有很强的借鉴意义。因此,译者历时一年将本书翻译出来,希望对读者有所帮助。

翻译过程中,我的老师——浙江大学的徐政教授给了大量的建议和指导,对此深表感谢。另外,李正、尹晓东、满九方、陈域、李博伟和孙一凡等同学做了大量工作,对此同样深表谢意。限于译者水平,书中难免存在用词不当或概念偏差之类的翻译错误,恳请广大读者予以批评指正。译者联系方式:电子邮箱 haoquanrui@sdu.edu.cn。

译者

于山东大学电气工程学院

原书序

电力电子（静态）功率变换的概念已经在电力系统应用方面赢得了广泛认可，正因为如此，电力电子功率变换器越来越多地被用于功率变换和调节、无功补偿及有源滤波。分布式能源（DER）在电力系统中的渗透率持续增长，以及微电网、主动配电网和智能电网等新概念和趋势逐渐被认可，同样预示着电力电子变流器将在电力系统中发挥更广泛的作用。

现在有很多关于各种电力电子变流器的拓扑及其运行原理的书籍，但是在电力系统背景下电力电子变流器的建模、分析和控制方面尚属空白。本书填补了这方面的空白，内容主要关于功率变换和调节方面的应用，并提出了针对一类特定的大容量电力电子变流器——三相电压源变流器（VSC）的分析和控制器设计方法。本书系统性地、全面地、统一及细致地涵盖了相关内容。

本书适合电气工程专业的在校本科生和研究生、从事电网接入和 DER 系统运行的工程技术人员、设计人员以及发电、输电、配电领域的研究人员阅读。本书没有涉及控制器具体的实现方法，但为系统分析和控制器设计人员提供了足够多的详细信息，并且

- 描述了 VSC 在电力系统中可以实现的各种功能；
- 介绍了 VSC 在电力系统中的不同应用；
- 提出了不同应用场合下 VSC 的系统性建模方法；
- 全面和细致地介绍了 VSC 系统在各种应用场合下的控制器设计方法；
- 基于计算机的时域仿真举例说明了控制器的设计流程并对其性能进行了评估。

本书分为 13 章。第 1 章简要介绍了电力系统中最常用的电力电子开关和变流器拓扑。本书其余章节分为两部分。第 1 部分为第 2~10 章，主要介绍相关理论及建模和控制器设计的基本方法。第 2 部分为第 11~13 章，主要内容为相关理论和控制器设计方法的应用，具体通过选择的三个应用实例：静止补偿器（STATCOM）、强制换相的背靠背 HVDC 系统和基于双反馈异步电机的变速风

力发电系统展开论述。第 2 部分本来可以包括更多的应用场景，但因为篇幅所限，只能给出三种典型应用来强调主要概念。书中的大部分时域仿真结果都是基于 PSCAD/EMTDC 软件包得出的。我们想要强调的是，书中给出大量例子的目的是为了强调相关的概念和控制器设计方法，正因为如此，例子中一些参数的数值可能与特定应用场合下的典型数值不完全一致。

本书读者应该在电路、电机、电力系统基础、经典（线性）控制方面至少具有本科生水平的知识背景，熟悉电力电子和系统的空间状态表示方法更好（但不是必需的）。书中引用了许多相关的参考文献，方便读者参阅相关内容的出处。虽然我们力图全面，但鉴于技术文献的丰富性和所涉及主题的深度，我们很可能遗漏了某些重要的文献。为了进一步完善本书，我们真诚感谢来自读者的意见和反馈。

Amirnaser Yazdani
Reza Iravani

目录

译者序
原书序

第 1 章	电力电子功率变换	1
1.1	引言	1
1.2	电力电子变流器和变流器系统	1
1.3	电力电子变流器在电力系统中的应用	2
1.4	电力电子开关	4
1.4.1	开关分类	4
1.4.2	开关特性	6
1.5	变流器的分类	6
1.5.1	基于换相过程的分类	7
1.5.2	基于端电压和电流波形的分类	7
1.6	电压源变流器 (VSC)	8
1.7	基本结构	8
1.7.1	多模块 VSC 系统	8
1.7.2	多电平 VSC 系统	10
1.8	本书的范围	13

第 1 部分 基本原理

第 2 章	DC-AC 半桥变流器	16
2.1	引言	16
2.2	变流器结构	16

2.3	工作原理	17
2.3.1	脉宽调制 (PWM)	17
2.3.2	变流器波形	18
2.4	变流器的开关模型	20
2.5	变流器的平均值模型	22
2.6	非理想半桥变流器	27
2.6.1	非理想半桥变流器的分析: 正向交流侧电流	27
2.6.2	非理想半桥变流器的分析: 反向交流侧电流	31
2.6.3	非理想半桥变流器的平均值模型	31

第3章 半桥变流器的控制 35

3.1	引言	35
3.2	半桥变流器的交流侧控制模型	35
3.3	半桥变流器的控制	36
3.4	前馈补偿	39
3.4.1	对启动暂态的影响	39
3.4.2	对变流器系统与交流系统间动态耦合的影响	40
3.4.3	对抗干扰能力的影响	43
3.5	正弦指令跟踪	44

第4章 空间相量与二维坐标系 52

4.1	引言	52
4.2	三相对称函数的空间相量表示	53
4.2.1	空间相量的定义	53
4.2.2	改变三相信号的幅值和相角	55
4.2.3	幅值/频率可控的三相信号的产生	59
4.2.4	谐波的空间相量表示	61
4.3	三相系统的空间相量表示	62
4.3.1	非耦合的三相对称系统	62
4.3.2	耦合的三相对称系统	65
4.3.3	三相不对称系统	66
4.4	三相三线制系统中的功率	66
4.5	三相信号与系统在 $\alpha\beta$ 坐标系中的表示和控制	68
4.5.1	空间相量在 $\alpha\beta$ 坐标系中的表示	68
4.5.2	信号发生器/调节器在 $\alpha\beta$ 坐标系中的实现	70

4.5.3	$\alpha\beta$ 坐标系中的功率表达式	72
4.5.4	$\alpha\beta$ 坐标系中的控制	72
4.5.5	$\alpha\beta$ 坐标系中系统的表示	74
4.6	三相系统在 dq 坐标系中的表示和控制	76
4.6.1	空间相量在 dq 坐标系中的表示	76
4.6.2	dq 坐标系中的功率表达式	79
4.6.3	dq 坐标系中的控制	79
4.6.4	dq 坐标系中系统的表示	80

第 5 章 三相两电平电压源变流器 87

5.1	引言	87
5.2	两电平电压源变流器	87
5.2.1	电路结构	87
5.2.2	运行原理	88
5.2.3	非理想两电平 VSC 的功率损耗	89
5.3	两电平 VSC 的模型和控制	90
5.3.1	两电平 VSC 的平均值模型	90
5.3.2	两电平 VSC 在 $\alpha\beta$ 坐标系中的模型	92
5.3.3	两电平 VSC 在 dq 坐标系中的模型和控制	94
5.4	VSC 系统的分类	96

第 6 章 三相三电平中性点钳位型电压源变流器 97

6.1	引言	97
6.2	三电平半桥 NPC	98
6.2.1	生成正的交流电压	99
6.2.2	生成负的交流电压	99
6.3	用于三电平半桥 NPC 的 PWM 方案	100
6.4	三电平半桥 NPC 的开关模型	102
6.4.1	交流端电压	102
6.4.2	直流端电流	102
6.5	三电平半桥 NPC 的平均值模型	103
6.5.1	交流端平均电压	103
6.5.2	直流端平均电流	104
6.6	三电平 NPC	104
6.6.1	电路结构	104

6.6.2	工作原理	105
6.6.3	中点电流	106
6.6.4	带有外接直流电压的三电平 NPC	110
6.7	直流侧带有电容分压器的三电平 NPC	111
6.7.1	直流侧电压漂移现象	112
6.7.2	直流侧电压平衡	112
6.7.3	直流侧电流的推导	117
6.7.4	三电平 NPC 和两电平 VSC 的统一模型	117
6.7.5	直流电容电压纹波对交流侧谐波的影响	119

第 7 章 电网定频的 VSC 系统：在 $\alpha\beta$ 坐标系中的控制 123

7.1	引言	123
7.2	电网定频 VSC 系统的结构	123
7.3	有功/无功功率控制器	124
7.3.1	电流型控制和电压型控制	124
7.3.2	有功/无功功率控制器的动态模型	125
7.3.3	有功/无功功率控制器的电流型控制	127
7.3.4	直流母线电压等级的选择	130
7.3.5	现实的考量和权衡	135
7.3.6	含三次谐波注入的 PWM 调制	135
7.4	基于三电平 NPC 的有功/无功功率控制器	141
7.4.1	基于三次谐波注入 PWM 的三电平 NPC 中点 电流	147
7.5	直流电压受控的功率端口	148
7.5.1	直流电压受控的功率端口模型	149
7.5.2	直流电压受控功率端口的直流母线电压控制	153
7.5.3	简化和精确模型	157

第 8 章 电网定频的 VSC 系统：在 dq 坐标系中的控制 161

8.1	引言	161
8.2	电网定频 VSC 系统的结构	162
8.3	有功/无功功率控制器	163
8.3.1	电流型控制与电压型控制	163
8.3.2	空间相量在 dq 坐标系中的表示	164
8.3.3	有功/无功功率控制器的动态模型	165

8.3.4	锁相环 (PLL)	166
8.3.5	PLL 的补偿器设计	168
8.4	有功/无功功率控制器的电流型控制	173
8.4.1	VSC 的电流控制	173
8.4.2	直流母线电压等级的选择	176
8.4.3	交流侧等效电路	179
8.4.4	三次谐波注入 PWM	182
8.5	基于三电平 NPC 的有功/无功功率控制器	184
8.6	直流电压受控的功率端口	185
8.6.1	直流电压受控的功率端口模型	186
8.6.2	直流电压受控功率端口的控制	188
8.6.3	简化模型和精确模型	193

第 9 章 频率受控的 VSC 系统 195

9.1	引言	195
9.2	频率受控的 VSC 系统结构	195
9.3	频率受控的 VSC 系统模型	197
9.4	电压控制	201
9.4.1	自主运行	208

第 10 章 变频 VSC 系统 215

10.1	引言	215
10.2	变频 VSC 系统的结构	215
10.3	变频 VSC 系统的控制	217
10.3.1	异步电机	218
10.3.2	双馈异步电机	230
10.3.3	永磁同步电机	245

第 2 部分 应 用

第 11 章 静止补偿器 (STATCOM) 250

11.1	引言	250
11.2	直流电压受控的功率端口	250
11.3	STATCOM 的结构	251

11.4	PCC 电压控制的动态模型	252
11.4.1	PCC 电压动态的大信号模型	252
11.4.2	PCC 电压动态的小信号模型	254
11.4.3	稳态工作点	256
11.5	PCC 电压动态特性的近似模型	257
11.6	STATCOM 的控制	258
11.7	PCC 电压控制器的补偿器设计	259
11.8	模型评估	259

第 12 章 背靠背 HVDC 变换系统

12.1	引言	267
12.2	HVDC 系统结构	267
12.3	HVDC 系统模型	269
12.3.1	电网和连接变压器模型	269
12.3.2	背靠背变换系统的模型	270
12.4	HVDC 系统控制	274
12.4.1	锁相环 (PLL)	274
12.4.2	dq 坐标系电流控制方案	276
12.4.3	PWM 门控信号发生器	279
12.4.4	直流侧分压的平衡	279
12.4.5	潮流控制	279
12.4.6	直流母线电压调节	281
12.5	不对称故障下 HVDC 系统的性能	283
12.5.1	不对称故障下的 PCC 电压	283
12.5.2	不对称故障下 PLL 的运行特性	285
12.5.3	不对称故障下 dq 坐标系电流控制器的运行特性	286
12.5.4	不对称故障下直流母线电压的动态	288
12.5.5	不对称故障下低次谐波的产生	292
12.5.6	不对称故障下的稳态潮流	295
12.5.7	不对称故障下的直流母线电压控制	296

第 13 章 变速风力发电系统

13.1	引言	308
13.2	恒速和变速风力发电系统	308

13.2.1	恒速风力发电系统	308
13.2.2	变速风力发电系统	309
13.3	风力机特性	310
13.4	变速风力发电系统的最大功率捕获	312
13.5	基于双馈异步电机的变速风力发电系统	315
13.5.1	基于双馈异步电机的风力发电系统的结构	315
13.5.2	变频 VSC 系统的电机转矩控制	316
13.5.3	直流电压受控的功率端口的直流母线电压控制	318
13.5.4	直流电压受控的功率端口的补偿器设计	321

附录

附录 A	对称三相电机的空间相量表示	331
A.1	引言	331
A.2	对称三相电机的结构	331
A.3	电机的电气模型	332
A.3.1	端电压/电流方程	332
A.3.2	定子磁链的空间相量表示	333
A.3.3	转子磁链的空间相量表示	334
A.3.4	电机电磁转矩	334
A.4	电机的等效电路	335
A.4.1	电机的动态等效电路	335
A.4.2	电机的稳态等效电路	336
A.5	永磁同步电机 (PMSM)	337
A.5.1	永磁同步电机的电气模型	337
A.5.2	永磁同步电机的稳态等效电路	339
附录 B	VSC 系统的标幺值	340
B.1	引言	340
B.1.1	交流侧参数的基准值	340
B.1.2	直流侧参数的基准值	340

参考文献

参考文献	343
------------	-----

第 1 章

电力电子功率变换

1.1 引言

电力电子变流器过去主要用于家用电器、工业和信息技术领域。然而，随着功率半导体和微电子技术的发展，电力电子变流器在电力系统中的应用在过去的 20 年中受到了广泛关注，被越来越多地应用于功率调节、无功补偿和电力滤波等场合。

电力电子变流器包括电源电路和控制/保护系统两部分，其中电源电路由电力电子开关和无源器件组合而成，两者通过门控/开关信号和反馈控制信号关联。本章将简要介绍最常见的高压大功率电力电子变流器电路。接下来的两章将会详细介绍两种具体的拓扑结构：两电平电压变流器（Voltage-Sourced Converter, VSC）和三电平中性点钳位（Neutral-Point Clamped, NPC）变流器。本书的主要内容为两电平 VSC 和三电平 NPC 变流器的建模与控制。不过，本章介绍的分析技术和控制设计方法在原理上对其他类型的电力电子变流器同样适用。

1.2 电力电子变流器和变流器系统

在本书中，定义电力电子（或静态）变流器为一个多端口电路，该电路由半导体器件（电子）开关组成，也包含一些辅助器件和设备，例如，电容器、电感器和变压器。该变流器的主要功能是根据预定的性能指标以期望的方式完成两个（或多个）子系统间的能量交换。在电压/电流的波形、频率、相角和相数方面，这些子系统通常具有不同的属性，因此在没有电力电子变流器的情况下，这些子系统难以直接相连。例如，风力发电机接入公用电网时，也就是一个变频变压的机电电子系统连接另一个恒频恒压的机电电子系统时，就需要用到电力电子变流器。

在相关技术文献中，变流器的分类主要取决于其连接的子系统的电气类型，即

交流 (AC) 或直流 (DC)。变流器的主要类型有:

- DC-AC 变流器: 将一个直流子系统接入一个交流子系统。
- DC-DC 变流器: 连接两个直流子系统。
- AC-AC 变流器: 连接两个交流子系统。

根据以上分类, DC-AC 变流器等同于 AC-DC 变流器。因此, DC-AC 变流器和 AC-DC 变流器在本书中可以互换使用。传统的二极管桥式整流器就是一种 DC-AC 变流器。如果 DC-AC 变流器的平均功率从交流侧流入直流侧, 则该变流器称作**整流器**。反之, 如果平均功率从直流侧流入交流侧, 该变流器称作**逆变器**。某些特定类型的 DC-AC 变流器可以实现功率的双向传输, 也就是说, 这类变流器既可以作为整流器运行, 也可以作为逆变器运行。其他类型的变流器, 例如, 二极管桥式变流器只能用作整流器。

DC-DC 变流器和 AC-AC 变流器也可以分别称作**直流变流器**和**交流变流器**, 直流变流器可以直接连接两个直流子系统, 或者采用中间为交流的连接方式。在第二种情况下, 变流器由两个背靠背的 DC-AC 变流器组成, 两者通过各自的交流侧彼此连接。类似地, 交流变流器可以直接连接两个交流子系统, 或者采用中间为直流的连接方式。后者由两个背靠背的 DC-AC 变流器组成, 两者通过各自的直流侧彼此连接。这种类型又称作 **AC-DC-AC 变流器**, 广泛应用于交流电机驱动器和变速风电机组中。

在本书中, 我们定义**电力电子变流器系统** (或变流器系统) 为一个 (或多个) 电力电子变流器和一套控制/保护方案的组合。两者通过半导体开关器件的门控信号和反馈信号建立联系。因此, 变流器中的能量传输是以总体设计性能、监控指令和众多系统变量的反馈为基础, 按照控制方案适当地导通和关断半导体开关器件来实现的。

本书主要讨论一种特定的变流器系统——VSC 系统的建模与控制。本书将在 1.6 节中介绍该系统。

1.3 电力电子变流器在电力系统中的应用

在很长一段时间内, 大功率变流器系统在电力系统中的应用只限于高压直流 (High-Voltage Direct Current, HVDC) 输电系统, 还有很少量的传统静态无功补偿器 (Static VAR Compensator, SVC) 和同步电机的电子励磁系统。从 20 世纪 80 年代后期起, 大功率变流器系统在发电、输电、配电和电力传输等各方面的应用得到了越来越多的关注^[1-6], 主要原因有以下几点:

- 电力电子技术和各种类型大功率半导体开关器件持续快速地发展。
- 微电子技术的不断进步使得各种应用场合下复杂的信号处理、控制策略和算

法得以实现。

- 电力事业部门的变革趋势要求采用电力电子装置来处理线路潮流阻塞等诸多问题。

- 不断增长的能源需求导致电力基础设施几乎达到使用极限，需要采用电力电子装置增强系统稳定性。

- 为了应对全球变暖和集中式发电引发的环境问题，能源利用逐渐倾向于绿色能源。随着近年来技术的进步，这种趋势愈加明显，同时新能源，特别是可再生能源的经济和技术可行性得到了验证。这些新能源通常通过电力电子变流器接入电力系统。

除此之外，诸如微网、主动网络 and 智能电网等新的运营概念与策略的发展^[7]，同样预示着电力电子在电力系统中的作用与重要性将会显著增长。可以预见，电力电子变流器未来在电力系统中会起到以下作用：

- 增强现有发电、输电、配电和电力输送设施的效率和可靠性。
- 将大规模可再生能源和储能系统接入电网。
- 接入分布式能源，主要指在二次输电系统和配电网电压等级下的分布式发电和分布式储能单元接入。
- 最大化分布式可再生能源的渗透率。

电力电子变流器系统在电力系统中主要用于：

- **有源滤波**：基于电力电子技术的有源滤波器的主要功能是合成并向主网注入（或吸收）特定的电流或电压谐波，以提升主网的电能质量。参考文献[8]对有源滤波器的相关概念和控制方法进行了全面的论述。

- **无功补偿**：电力电子（静止）补偿器的作用是提升输电线路或配电线路的输电能力，使输电效率最大化，增强电压和相角的稳定性，改善电能质量，或者综合实现上述目标。大量文献已经在柔性交流输电（Flexible AC Transmission Systems, FACTS）和自定义功率控制器的框架下深入研究了多种静止无功补偿技术^[1-6]。FACTS 控制器包括静止同步补偿器（Static Synchronous Compensator, STATCOM）、静止同步串联补偿器（Static Synchronous Series Compensator, SSSC）、线间潮流控制器（Intertie Power Flow Controller, IPFC）、统一潮流控制器（Unified Power Flow Controller, UPFC）和单向晶闸管移相等。

- **有功功率调节**：电子功率调节器的主要功能是在两个电气（或是机电）子系统之间按照一定的控制方式传输功率。功率调节器通常需要满足对子系统中诸如频率、电压幅值、功率因数和电机转速的特定要求。电力电子功率调节系统的应用包括但不限于：

- 1) 连接两个同步或不同步，甚至频率不同的交流子系统的背靠背 HVDC 系统^[9]。

- 2) 通过直流联络线在两个相距遥远的交流子系统间传输功率的 HVDC 整流

器/逆变器系统^[10,11]。

3) 从频率不断变化的风力发电机组向公用电网传送功率的 AC-DC-AC 变流器系统。

4) 将直流功率从诸如太阳能光伏 (Photo Voltatic, PV) 阵列、燃料电池或者蓄电池单元等直流分布式电源 (Distributed Energy Resource, DER) 注入公用电网的 DC-AC 变流器系统^[12,13]。

1.4 电力电子开关

电力电子半导体开关 (或电子开关) 是电力电子变流器的主要组成部分。电力电子开关是一种通过门控信号来导通或阻断主电路中支路电流的半导体装置^①。电力电子开关的工作原理不同于依靠如机械臂动作等机械过程完成导通/关断状态切换的机械开关。机械开关具有以下特点:

- 动作缓慢, 不适用于重复开关场合。
- 基本上都有动作机构, 开关动作会影响其使用寿命, 因而与电子开关相比, 机械开关动作次数有限。

• 开关导通时的功率损耗较小, 所以实际上可以近似为理想开关。

相比而言, 电子开关具有以下特点:

- 动作速度快, 适用于连续开关场合。
- 没有动作机构, 因而开关动作过程不会影响其使用寿命。
- 会产生开关损耗和导通损耗。

上述机械开关与电子开关的特性表明, 在某些场合下, 机械和电子开关的组合可以作为平衡开关速度和功率损耗的最优方案。电力电子开关的发展趋势^[14,15]是电子开关的应用越来越广泛。增加最大允许开关频率和最小化开关及导通损耗则是电力电子半导体工业研究和发展的主要任务。

1.4.1 开关分类

电力电子变流器的特性主要取决于其半导体开关器件的类型, 因此有必要简要回顾一下不同的开关类型。更多关于常用开关原理与特性的内容可以参阅参考文献^[16, 17]。

1.4.1.1 不可控开关器件

功率二极管具有两层半导体结构, 是唯一不可控的开关器件, 这是因为其电流的通断时刻取决于主电路。功率二极管在电力电子变流器中应用广泛, 主要作为独

① 唯一的例外是二极管, 其通断电流取决于主电路的情况而不是门控信号。