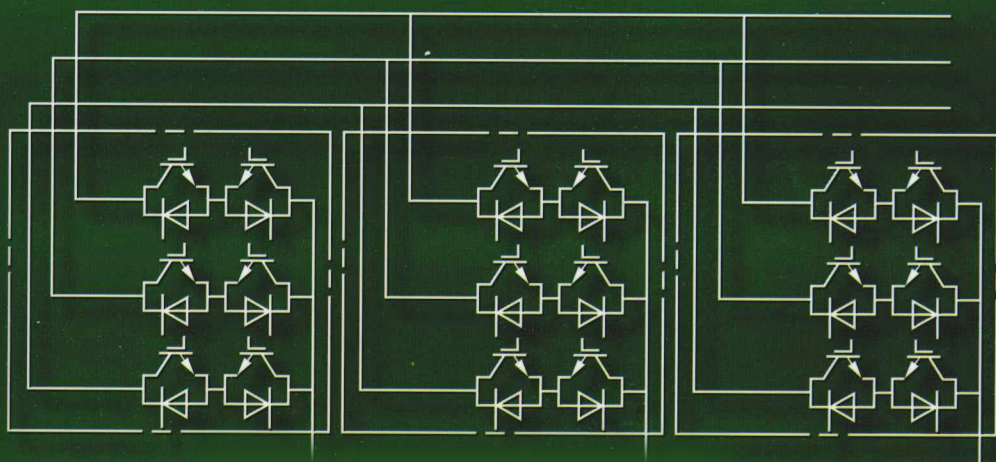


矩阵变换器的 理论与应用

杨喜军 龚幼民 叶芄生 编著



矩阵变换器的理论与应用

杨喜军 龚幼民 叶芄生 编著

机械工业出版社

矩阵变换器是一种高性能通用的变换器,从概念提出之初就倍受重视并展开大量研究,产生了大量优秀成果,其研究早已超出原有的范围,其应用场合也远远超出交流电气传动领域。本书全面、系统、深入地描述了矩阵变换器的基本控制原理、系统组成、结构特点和实现技术,并将矩阵变换原理扩展到整个变换器领域。

本书共分16章,分别为第1章绪论;第2章电力电子变换器波形合成的原理;第3章N相-P相矩阵变换器的原理;第4章开关函数特性与电力电子变换理论的探索;第5章三相-三相矩阵变换器的调制算法;第6章三相-三相矩阵变换器的换流策略;第7章非方阵矩阵变换器的开关函数算法;第8章矩阵变换器与逆变器的调制算法;第9章降压型矩阵整流器的原理;第10章三相-三相矩阵变换器的设计;第11章多电平矩阵变换器的原理;第12章矩阵变换器的软开关技术;第13章矩阵变换器的共模电压抑制技术;第14章矩阵变换器的拓扑扩展;第15章矩阵变换器在电力系统中的应用;第16章矩阵变换器中控制理论的应用。

本书可作为高等学校电气工程系的研究生教材,也可供高等学校教师以及电气设计和运行方面的工程技术人员作为参考书。

图书在版编目(CIP)数据

矩阵变换器的理论与应用/杨喜军,龚幼民,叶芃生编著. —北京:机械工业出版社,2010.10

ISBN 978-7-111-31830-9

I. ①矩… II. ①杨…②龚…③叶… III. ①矩阵电路-变换器
IV. ①TN624

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第176511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:牛新国 责任编辑:赵玲丽 版式设计:霍永明

责任校对:陈延翔 封面设计:姚毅 责任印制:李妍

中国农业出版社印刷厂印刷

2011年1月第1版第1次印刷

184mm×260mm·18.75印张·460千字

0001—2500册

标准书号:ISBN 978-7-111-31830-9

定价:59.00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

社服务中心:(010) 88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

读者服务部:(010) 68993821

封面无防伪标均为盗版

前 言

现代电力电子技术是 20 世纪后半期以来人类社会的重大科学技术进步之一，其发展速度之快、应用覆盖面之广都是前所未有的。实践应用表明，电力电子变换器应用之后，在电能转换、电力环保、节能降耗、提高自动化程度、改善生产工艺、提高产品质量以及扩大产品范围等方面，带来了巨大的经济效益和社会效益。进入 21 世纪，现代电力电子技术朝着更加深远的方向发展，并逐渐深入到各行各业、国民经济和社会生活的每一个方面，发挥着巨大的作用。

矩阵变换器是一类复杂的、高性能的、通用的环保型变换器，在电力电子与电气传动学科专业中一直占有着非常重要的位置。随着功率器件制造技术、微电子技术以及控制理论等的快速发展，矩阵变换器已经突破原有的概念，发展成为一大类变换器，其功能也大大超出了原有的用于交流电气传动应用的交-交变换，其应用场合已经扩展到各类工业、电力补偿、军事、交通以及空间电源等领域，表现出很大的发展潜力。

从概念的提出至今，全世界范围内，对矩阵变换器技术的研究已经获得了大量的优秀成果，对矩阵变换器的研究已经进入了一个崭新的阶段，矩阵变换器已经不再陌生。矩阵变换器技术已经突破原有的单纯的直接三相-三相矩阵变换器强调的安全换流技术和高性能控制算法的范畴，出现了许多新型的变换器形式，如等效交-直-交 PWM 变换器、非方阵矩阵变换器、三相矩阵整流器、间接矩阵变换器、多电平矩阵变换器、矩阵变换器级联多重化技术等，谐振技术和软开关技术的应用、安全换流策略与控制算法的成熟、矩阵变换器的模块化设计、控制理论与数学方法的应用、电力无功补偿应用、开关函数特性的应用以及矩阵变换器思想在其他变换器中的推广应用等，都使得矩阵变换器更加具有活力，更加倍受瞩目。

鉴于矩阵变换器技术发展至今已经取得了大量的、多方面的研究成果，急需挖掘整理成书，便于资料查阅和学术交流，考虑到对矩阵变换器专题进行了多年的理论和实现研究，取得了一些成果，同时也收集到了大量的相关文献，因此便产生了编写本书的愿望。

本书题材来源广泛，具有前沿性和先进性，全面、系统、深入地描述了矩阵变换器领域的最新、最实用的发展成果，包括理论分析、仿真研究和实现技术的方方面面。本书遵循深入浅出、循序渐进的写作路线以及理论与实际相结合的原则。书中涉及的公式、方程式及数学表达式都进行较为严格的推导证明，力争准确无误。为了防止体系上的混乱和个别章节的膨胀，本书的编写过程中以专题形式为主线，避免长篇累牍和文字堆砌。

本书大部分章节由上海交通大学杨喜军编著，上海大学教授龚幼民、上海交通大学教授叶芑生负责全书的部分章节的编写、统一规划、审查、修改和补充。

本书适用于高等学校电气工程与自动化、电力电子与电气传动等专业的本科生、研究生和教师的教学、科研参考使用，也可以供相关专业的工程技术人员参考。

由于作者学识水平有限，欠妥和谬误之处在所难免，衷心希望读者批评指正。

作 者

符号说明

1. 本书使用的主要符号

P_i —变换器输入平均有功功率；

p_i —变换器输入瞬时有功功率；

P_o —变换器输出平均有功功率；

p_o —变换器输出瞬时有功功率；

φ_i —变频器输入电流基波分量相对于基波输入电压的角位移；

φ_o —变频器输出电流基波分量相对于基波输出电压的角位移，即负载角；

φ_{iu} —变换器输入电压初相角；

φ_{ii} —变换器输入电流初相角；

φ_{ou} —变换器输出电压初相角；

φ_{oi} —变换器输出电流初相角；

λ —变换器输入功率因数；

μ —变换器输入电流畸变因数；

δ —变换器输入电流位移因数或相移因数，即 $\cos\varphi_i$ ；

$\cos\varphi_i$ —变换器输入电流位移因数；

f_i —变换器输入电源频率；

ω_i —变换器输入电源角频率， $\omega_i = 2\pi f_i$ ；

θ_i —变换器输入电源角位移， $\theta_i = \omega_i t$ ；

f_o —变频器输出基波频率；

ω_o —变换器输出基波电压角频率， $\omega_o = 2\pi f_o$ ；

θ_o —变换器输出基波电压角位移， $\theta_o = \omega_o t$ ；

$\alpha = 120^\circ$ —相量算子；

f_h —谐波电压或电流频率；

ω_s —变换器输出角频率与输入电源基波角频率之和， $\omega_s = \omega_o + \omega_i$ ；

ω_m —变换器输出角频率与输入电源基波角频率之差， $\omega_m = \omega_o - \omega_i$ ；

Ω —电动机转子的机械角速度；

e_a, e_b, e_c —ABC 坐标系中电网三相电动势；

e_{ap}, e_{bp}, e_{cp} —正相序时 ABC 坐标系中电网三相电动势；

e_{an}, e_{bn}, e_{cn} —负相序时 ABC 坐标系中电网三相电动势；

e_d, e_q —dq 坐标系中电网电动势的直轴和交轴分量；

I_{im} —变换器输入电流幅值；

I_{irms} —变换器输入电流有效值；

I_{ipk} —变换器输入电流峰值；

I_{om} —变换器输出电流幅值；

I_{orms} —变换器输出电流有效值；
 I_{opk} —变换器输出电流峰值；
 i_a, i_b, i_c —ABC 坐标系中变换器系统输入端 a 相、b 相与 c 相电流瞬时值；
 i_A, i_B, i_C —ABC 坐标系中变换器系统输出端 A 相、B 相与 C 相电流瞬时值；
 u_a, u_b, u_c —ABC 坐标系中变换器系统的输入端 a 相、b 相与 c 相电压瞬时值；
 u_A, u_B, u_C —ABC 坐标系中变换器系统的输出端 A 相、B 相与 C 相电压瞬时值；
 U_{im} —变换器输入相电压幅值；
 U_{irms} —变换器输入相电压有效值；
 U_{ipk} —变换器输入相电压峰值；
 U_{om} —变换器输出相电压幅值；
 U_{orms} —变换器输出相电压有效值；
 U_{opk} —变换器输出相电压峰值；

i_α, i_β, i_0 — $\alpha\beta$ 坐标系中变换器系统输入端 α 轴、 β 轴与零序电流；
 i_u, i_v, i_0 — $\alpha\beta$ 坐标系中变换器系统输出端 α 轴、 β 轴与零序电流；
 u_α, u_β, u_0 — $\alpha\beta$ 坐标系中变换器系统输入端 α 轴、 β 轴与零序电压；
 u_u, u_v, u_0 — $\alpha\beta$ 坐标系中变换器系统输出端 α 轴、 β 轴与零序电压；
 i_d, i_q —dq 坐标系中变换器系统输入端 d 轴、q 轴电流；
 i_D, i_Q —dq 坐标系中变换器系统输出端 d 轴、q 轴电流；
 u_d, u_q —dq 坐标系中变换器系统输入端 d 轴、q 轴电压；
 u_D, u_Q —dq 坐标系中变换器系统输出端 d 轴、q 轴电压；
 t —时间

$f(t)$ 、 $m(t)$ 、 $M(t)$ —调制函数、存在函数、开关函数（矢量、矩阵）；
 $F(t)$ —开关函数矩阵；
 $f_{ik}(t)$ —开关函数矩阵中对应 i 行（输出相）、 k 列（输入相）的开关函数；
 $f_{ij}(t)$ —开关函数矩阵中对应 i 行（输出相）、 j 列（输入相）的开关函数；
 m 、 $m(t)$ 、 $M(t)$ —调制度、调制度函数；
 d 、 $d(t)$ —占空比、占空比函数；
 f_s —开关频率；
 f_c —载波频率；
 L_i —输入端滤波电感；
 C_i —输入端滤波电容；
 L_o —输出端滤波电感；
 C_o —输出端滤波电容；
 $I_1 \sim I_6$ —输入电流有效矢量或非零矢量；
 $I_7 \sim I_9$ —输入电流零矢量；
 I_R —电流参考矢量；
 I_i —输入电流矢量；
 I_α —输入电流主矢量，与 I_β 构成一对；

- I_{β} —输入电流主矢量，与 I_{α} 构成一对；
 $U_1 \sim U_6$ —输出电压有效矢量；
 U_7 、 U_8 —输出电压零矢量或无效矢量；
 U_R —输出电压参考矢量；
 U_o —输出电压矢量；
 U_{μ} —输出电压主矢量，与 U_{γ} 构成一对；
 U_{ν} —输出电压主矢量，与 U_{μ} 构成一对；

2. 术语

- APF: 有源电力滤波器；
 APFC: 有源功率因数校正；
 CMC、TMC: 传统矩阵变换器；
 CSI: 电流源逆变器；
 CSR: 电流源整流器；
 DF: 位移因数 (Displacement Factor)，相移因数，输入电流基波分量相移角的余弦值；
 Dis. F: 畸变因数 (Distortion Factor)，输入电流基波分量有效值与总有效值之比；
 Existence Function: 存在函数，函数自变量的值在某一范围内为 1，在此范围之外变量的值为 0 的函数，存在函数用数学的方法描述变换器电路中各个功率开关的状态，1 表示开关闭合，0 表示开关关断；
 Existence Matrix: 存在矩阵，元素为存在函数的矩阵；
 Forced Commutation: 强迫换流，变换器电路中功率开关的电流依靠辅助的强迫手段关断的过程；
 Hard Transition/Switching: 硬开关，功率器件在开通与关断过程中伴随高电压（额定电压）或大电流（额定电流）；
 IMC: 间接矩阵变换器；
 MC: 矩阵变换器 (Matrix Converter)；
 Modulation Function: 调制函数，描述存在函数对于它的静态角位置的角变化量，规定了变换器中功率开关的工作，从而也就规定了构成输出电压波形的方法；
 Natural Commutation: 自然换流，变换器电路中功率开关的电流转换无需强迫手段来完成；
 PF: 功率因数 (Power Factor)，输入有功功率与输入视在功率之比，或位移因数与畸变因数之积；
 PFC: 功率因数校正；
 PPFC: 无源功率因数校正；
 SF: 开关函数；
 SMC: 稀疏矩阵变换器；
 Soft Transition/Switching: 软开关，功率器件在开通与关断过程中伴随低电压或小电流；
 THD_i: 总谐波电流畸变率 (Total Harmonic Distortion): 总的谐波电流有效值与基波电流有效值之比；

UPFC: 单位功率因数控制;

Voltage Gain: 电压增益, 输出电压幅值与输入电压幅值之比;

Voltage Transfer Ratio: 电压比, 输出电压幅值与输入电压幅值之比;

VSI: 电压源逆变器;

VSR: 电压源整流器。

目 录

前言

符号说明

第 1 章 绪论 1

1.1 现代电力电子变换技术的现状 1

1.1.1 电力半导体器件的发展历程 1

1.1.2 电力电子变换器的技术水平 3

1.2 矩阵变换器的发展现状 6

1.2.1 交流变频电气传动的意义 6

1.2.2 高性能矩阵变换器的优势 7

1.2.3 矩阵变换技术的发展状况 8

1.3 矩阵变换器的发展空间 12

1.3.1 矩阵变换器的应用状况 12

1.3.2 矩阵变换器的思想发展 13

参考文献 13

第 2 章 电力电子变换器波形合成的

原理 15

2.1 波形高频合成概念的提出 15

2.1.1 电力电子变换器的波形合成 15

2.1.2 电力电子变换器的工作状态 18

2.2 波形高频合成的存在定理 20

2.2.1 波形高频合成变换器结构 20

2.2.2 波形高频合成的存在定理 22

2.3 波形高频合成的建模原理 23

2.4 波形高频合成技术的应用 24

2.4.1 低频开关函数矩阵函数元素的 确定 24

2.4.2 载波频率与滤波器陷波频率的 确定 26

参考文献 26

第 3 章 N 相-P 相矩阵变换器的原理 28

3.1 交-交周波变换器开关函数的提出 28

3.2 电流初相角与负载角相反的开关 函数 29

3.3 电流初相角与负载角相同的开关 函数 31

3.4 电流初相角正负可调的开关函数 32

3.5 N 相-P 相矩阵变换特性的物理解释 34

3.5.1 电压比 34

3.5.2 电流比 36

参考文献 37

第 4 章 开关函数特性与电力电子变换

理论的探索 38

4.1 开关函数特性的提出 38

4.1.1 功率开关组的确立 38

4.1.2 电力电子变换原型的提出 40

4.1.3 开关函数特性的提出 41

4.2 电力电子变换理论的探索 43

4.2.1 电力电子变换理论的讨论 43

4.2.2 开关函数算法的特点 43

4.3 开关函数特性的应用 44

4.3.1 三电平电压源逆变器 44

4.3.2 基本 DC-DC 变换器 45

4.3.3 单相 AC-DC 变换器 45

4.3.4 两电平电压源逆变器 46

4.3.4.1 逆变器开关函数的通式 46

4.3.4.2 正弦波 PWM 控制算法 47

4.3.4.3 谐波注入 PWM 控制算法 47

4.3.4.4 准梯形波 PWM 控制算法 48

4.3.4.5 损耗最小 PWM 控制算法 49

4.3.4.6 电压 SVPWM 控制算法 51

参考文献 53

第 5 章 三相-三相矩阵变换器的

调制算法 55

5.1 矩阵变换器的调制算法 55

5.2 开关函数算法 56

5.2.1 最大电压比为 1/2 的开关函数 56

5.2.2 最大电压比为 $\sqrt{3}/3$ 的开关函数 58

5.2.3 最大电压比为 3/4 的开关函数 59

5.2.4 最大电压比为 $\sqrt{3}/2$ 的开关函数 60

5.2.5 最大电压比为 1 的开关函数 61

5.3 双空间矢量调制算法 63

5.3.1 等效交-直-交变换器结构 63

5.3.2 输入电流空间矢量算法 64

5.3.3 输出电压空间矢量算法 67

5.3.4 空间矢量合成与电压利用率	69	8.1 矩阵变换器与电压源逆变器	111
5.4 三线与双线电压调制算法	71	8.1.1 拓扑演化	111
5.4.1 三线电压调制算法	72	8.1.2 输入相电压初相角为零时	112
5.4.2 双线电压调制算法	73	8.1.3 输入相电压初相角为非零时	113
5.4.3 电压区间划分原则	74	8.2 矩阵变换器与电流源逆变器	115
5.5 输出滞环电流调制算法	75	8.2.1 输出相电压初相角为零时	115
5.5.1 两电平滞环电流调制算法	75	8.2.2 输出相电压初相角为非零时	116
5.5.2 三电平滞环电流调制算法	77	8.3 电压源逆变器调制算法的联系	118
5.5.2.1 虚拟整流器的矢量选择	77	8.3.1 电压空间矢量算法的原理	118
5.5.2.2 虚拟逆变器的矢量选择	78	8.3.2 开关函数算法到电压空间 矢量算法	120
5.5.3 基于 SVM 的滞环电流调制算法	79	8.3.3 电压空间矢量算法到开关 函数算法	121
5.6 四种调制算法的简单总结	81	参考文献	123
参考文献	82	第 9 章 降压型矩阵整流器的原理	124
第 6 章 三相-三相矩阵变换器的 换流策略	86	9.1 矩阵整流器概念的提出	124
6.1 换流策略的发展	86	9.2 输入电压平衡时的开关函数算法	126
6.2 半软化四步安全换流策略	89	9.2.1 正相序时开关函数算法	126
6.3 半软化四步换流策略的实现	91	9.2.1.1 最大电压比 1/2	127
6.4 半自然两步安全换流策略	91	9.2.1.2 最大电压比 $\sqrt{3}/3$	128
6.5 强迫一步安全换流策略	93	9.2.1.3 最大电压比 3/4	129
6.6 三种换流策略的性能比较	94	9.2.1.4 最大电压比 $\sqrt{3}/2$	130
参考文献	95	9.2.1.5 矩阵整流器的输入电流	130
第 7 章 非方阵矩阵变换器的开关 函数算法	97	9.2.2 负相序时开关函数算法	131
7.1 单相-单相矩阵变换器	97	9.2.3 功率因数可调的开关函数	132
7.1.1 常规的开关函数算法	97	9.3 输入电压不平衡时的开关函数算法	133
7.1.2 通用的开关函数算法	99	9.3.1 开关函数算法的一般推导	133
7.2 单相-三相矩阵变换器	101	9.3.2 输入电压波形畸变时	135
7.3 升压型单相-单相矩阵变换器	103	9.3.3 输入电压幅值不平衡时	136
7.3.1 拓扑与工作原理	103	9.3.4 输入电压初相角不相等时	137
7.3.2 四区间换流策略	104	9.4 电流空间矢量调制算法	138
7.3.3 两区间换流策略	104	9.4.1 输入电压平衡时输入电流空间 矢量调制算法	138
7.4 三相-单相矩阵变换器	106	9.4.2 输入电压平衡时两种调制算法 的等效原理	140
7.4.1 零式三相-单相矩阵变换器	107	9.4.3 输入电压不平衡时输入电流空 间矢量调制算法	141
7.4.2 桥式三相-单相矩阵变换器	107	9.4.4 共模电压抑制的电流空间矢量 调制算法改进	143
7.4.2.1 最大电压利用率为 1/2	107	9.5 矩阵整流器的电路 DQ 分析	144
7.4.2.2 最大电压利用率为 $\sqrt{3}/3$	108	9.5.1 矩阵整流器的电路分解	144
7.4.2.3 最大电压利用率为 3/4	109	9.5.2 矩阵整流器系统的 DC 特性	
7.4.2.4 最大电压利用率为 $\sqrt{3}/2$	109		
参考文献	110		
第 8 章 矩阵变换器与逆变器的 调制算法	111		

分析	146	12.1.2 基于辅助谐振换流极的软 开关技术	198
9.6 矩阵整流器的双线电压合成算法	147	12.1.3 基于辅助谐振开关的软开关 技术	202
9.6.1 三线电压合成算法	147	12.2 不平衡供电条件下算法改进	204
9.6.2 双线电压合成算法	148	参考文献	208
9.6.2.1 输入电压区间“X”形 划分	148	第13章 矩阵变换器的共模电压 抑制技术	209
9.6.2.2 输入电压区间“S”形 划分	149	13.1 共模电压抑制的调制算法	209
9.7 矩阵整流器与电流源整流器的关系	150	13.1.1 改进零矢量分布模式的 SVM 算法	209
9.8 矩阵整流器功率损耗的计算	151	13.1.2 引进额外非零矢量的 SVM 算法	212
9.8.1 开关函数算法	151	13.1.3 基于开关函数的零共模电压 算法	215
9.8.2 传统电流 SVPWM 算法	151	13.1.4 电压注入抵消的共模电压抑制 技术	217
9.8.3 共模电压抑制电流 SVPWM 算法	152	13.1.5 零矢量期间采用输入中值输入 电压方案	218
9.9 矩阵整流器与传统可控整流器的 比较	152	13.2 集成无源 EMI 滤波器的共模电压 抑制	220
参考文献	154	参考文献	223
第10章 三相-三相矩阵变换器的 设计	156	第14章 矩阵变换器的拓扑扩展	225
10.1 功率模块与电源电路的设计	156	14.1 三相四线制矩阵变换器	225
10.1.1 功率模块的设计	156	14.1.1 四路输出的公用电源矩阵 变换器	225
10.1.2 电源电路的设计	160	14.1.2 三相四线制交流链路矩阵 变换器	226
10.2 缓冲电路与区间电路的设计	163	14.2 高频交流链路矩阵变换器	227
10.2.1 缓冲电路的设计	163	14.2.1 高频链路的大功率电信开关 电源	227
10.2.2 区间电路的设计(相序检测)	165	14.2.2 高频链路矩阵变换器在 VSCF 中应用	230
10.3 输入与输出滤波电路的设计	169	14.2.2.1 功率电路拓扑的描述	230
10.4 控制电路与逻辑电路的设计	173	14.2.2.2 三相-单相矩阵变换器的 PWM 控制策略	231
参考文献	176	14.2.2.3 单相-三相矩阵变换器的 PWM 控制策略	233
第11章 多电平矩阵变换器的原理	179	14.2.2.4 高频变压器的设计	233
11.1 电压源逆变器的多电平技术	179	14.3 其他高频链路的矩阵变换器	234
11.1.1 二极管钳位型多电平变频器	179	14.4 两级矩阵变换器	236
11.1.2 电容飞跨钳位型多电平 变频器	180	14.4.1 间接矩阵变换器(IMC)	236
11.1.3 多级串联多电平变频器	181		
11.1.4 不对称级联型多电平变频器	182		
11.2 H桥开关的多电平矩阵变换器	184		
11.3 电容飞跨的多电平矩阵变换器	188		
11.4 多级串联的多电平矩阵变换器	193		
参考文献	196		
第12章 矩阵变换器的软开关技术	198		
12.1 谐振软开关技术的工作原理	198		
12.1.1 谐振软开关技术的提出	198		

14.4.2 稀疏矩阵变换器 (SMC)	236	16.3 永磁同步电动机系统的非线性自适应 后退控制	259
参考文献	238	16.3.1 谐波电流减少的调制策略	259
第 15 章 矩阵变换器在电力系统中的 应用	241	16.3.2 自适应后退控制器的设计	261
15.1 矩阵变换器在 FACTS 中的应用	241	16.4 异步电动机系统的非线性模型和扰动 观测器	262
15.1.1 电压源矩阵变换器的电网链接 功能	241	16.4.1 采用自适应观测器无传感器矢量 控制	262
15.1.2 电流源矩阵变换器的电网链接 功能	242	16.4.2 对换流延时时间的影响	263
15.1.3 电压源矩阵变换器的统一潮流 控制器	242	16.4.3 对开关导通损耗的影响	264
15.1.4 电压源矩阵变换器的有源电力 滤波器	244	16.4.4 采用径向基底函数网络的扰动 观测器	264
15.2 矩阵变换器在再生能源中的应用	247	16.5 矩阵变换器系统的滑模控制	266
15.2.1 矩阵变换器在太阳能发电中的 应用	247	16.5.1 矩阵变换器系统的模型	266
15.2.2 矩阵变换器在双馈发电机中的 应用	248	16.5.2 矩阵变换器系统的空间矢量	267
15.2.3 矩阵变换器在交流励磁发电机 中的应用	249	16.5.3 输出电压滑模控制器设计	267
15.2.4 矩阵变换器在笼型异步发电机 中的应用	250	16.5.4 输入电流滑模控制器设计	269
参考文献	251	16.6 永磁同步电动机系统的离散控制	270
第 16 章 矩阵变换器中控制理论的 应用	254	16.6.1 权函数定义和方程离散	270
16.1 矩阵变换器系统的稳定性分析	254	16.6.2 开关状态的寻优计算	272
16.1.1 检测输入电压过零点的策略	254	16.7 矩阵变换器系统的电路 DQ 变换 技术	272
16.1.2 检测瞬时输入电压的策略	255	16.7.1 矩阵变换器电路系统子电路 DQ 变换	273
16.1.3 检测输入电压过零点的稳定性 分析	255	16.7.2 矩阵变换器电路系统 DQ 变换与 分析	276
16.1.4 检测瞬时输入电压策略的 稳定性	256	16.7.2.1 静态分析/直流分析	277
16.1.5 改变输入滤波器结构改善 稳定性	257	16.7.2.2 瞬态分析/交流分析	277
16.2 矩阵变换器系统的自抗扰控制	257	参考文献	278
		附录	281
		附录 A 高频合成引理与高频合成定理的 证明	281
		附录 B 高频合成建模定理的证明	282
		附录 C 常用数学公式	283

第1章 绪 论

本章首先介绍现代电力电子变换技术的发展现状，包括器件、拓扑、算法等；接着引出矩阵变换器的发展现状，包括调制算法、安全换流、应用场合等，最后对矩阵变换器的发展空间给予展望，包括本身的应用前景、变换思想的应用前景以及间接矩阵变换器的研究等。

1.1 现代电力电子变换技术的现状

1.1.1 电力半导体器件的发展历程

电力电子融合了电力、电子和控制密不可分的三大方面，其中控制是用来解决闭环系统的稳态特性和动态特性，电力是关系到静止和旋转电力装备，包括发电、输电、变电、配电和用电设备，电子是涉及固态器件和电路，用于信号处理，以便满足期望的控制目标。电力电子可以定义为应用固态电子实现电力的控制与变换。

电力电子主要的基础是电力半导体器件的开通与关断动作，随着电力半导体器件制造技术的发展，电力电子器件的电力处理能力和开关速度获得了相当大的进展。微处理器和微控制器制造技术的巨大发展对电力半导体器件的控制与波形合成起到了非常大的推动作用，现代电力电子设备可以说是以电力半导体器件为肌肉、以微电子为大脑。

鉴于电力电子器件在电力电子变换器中的基础作用，下面对其发展历程和特性给予描述：

电力电子技术的历史可以追溯到1900年的汞弧整流器，历经了金属罐整流器、可控栅极真空管整流器、汞弧半波整流器、热阴极充气二极管和闸流管，直到20世纪50年代才用于实际电力控制。

第一次电子变革开始于1948年贝尔电话实验室的硅晶体管的发明，接下来的一次重大突破是1956年贝尔电话实验室的PNPN触发晶体管，即普通晶闸管（SCR）[⊙]。第二次电子变革开始于1958年的通用电气公司开发的商用晶闸管，揭开了电力电子技术发展的新纪元，从此以后出现了不同类型的电力半导体器件和变换技术。微电子的发展使得以不可思议的速度对大量信息进行处理成为可能，电力电子技术的发展使得对大量的电力进行变换和控制成为可能，而且转换效率日益增加。由于电力电子技术和微电子技术的结合，电力电子技术的潜在应用层出不穷。

从1957~1970年，只有SCR独一无二地用于工业场合的电力控制，1970年以后出现了多种基于硅或碳化硅的电力半导体器件，鉴于后者大体上仍然处于研发阶段，现有主要器件由硅制作而成，并大体上划分为三类：功率二极管、晶闸管和晶体管，包括6种：功率

⊙ 普通晶闸管（Triode Thyristor）曾称为硅可控整流器（SCR）为方便起见，往往仍沿用SCR代表普通晶闸管。

二极管、各种晶闸管、电力双极结型晶体管 (BJT、GTR)、金属氧化物半导体场效应晶体管 (MOSFET)、绝缘栅双极型晶体管 (IGBT) 和静态感应晶体管 (SIT)。

功率二极管为双端器件: 阴极和阳极, 具有单向导电性, 分为三类: 通用型、高速型 (快恢复型) 和肖特基型。通用型容量达到 $6\text{kV}/4.5\text{kA}$; 高速型容量达到 $6\text{kV}/1.1\text{kA}$, 反向恢复时间达到几十纳秒到 $5\mu\text{s}$; 肖特基型容量达到 $100\text{V}/300\text{A}$, 具有低的导通电压和纳秒级的反向恢复时间。新型碳化硅 (SiC) 肖特基二极管反向恢复时间可以忽略不计, 开关速度更快, 能够提升电路变换效率。额定电流为 10A 、耐压 1200V 的碳化硅二极管已经得到应用。

晶闸管为三端 (阴极、阳极和门极) 电流控制型器件, 包括 12 类: ①强迫换流晶闸管、②电源换流晶闸管、③门极关断 (GTO) 晶闸管[⊖]、④逆导晶闸管 (RCT)、⑤静态感应晶闸管 (SITH)、⑥门极辅助关断晶闸管 (GATT)、⑦光控晶闸管 (LASCR)、⑧MOS 关断晶闸管 (MTO)、⑨发射极关断晶闸管 (ETO)、⑩集成门极换流晶闸管 (IGCT)、⑪MOS 可控晶闸管 (MCT)、⑫对称门极换流晶闸管 (SGCT)。其中自然换流或电源换流的晶闸管的容量高达 $6\text{kV}/4.5\text{kA}$, 容量高达 $3\text{kV}/3.6\text{kA}$ 的高速反向阻断晶闸管的关断时间可达 $10\sim 20\mu\text{s}$ 。RCT 可视为反向并联有二极管的晶闸管, 用于高速开关场合, 容量高达 $4\text{kV}/2.0\text{kA}$, 可以用于电力牵引。GATT 的容量高达 $1.2\text{kV}/0.4\text{kA}$, 开关速度为 $8\mu\text{s}$, 用于高速开关场合, 也可以用于电力牵引。LASCR 的容量高达 $6\text{kV}/1.5\text{kA}$, 可用于高压电力系统, 如 HVDC (高压直流输电)。TRIAC 可视为两只晶闸管反向并联, 共用一个门极, 双向导通, 广泛用于加热控制、灯光控制、电动机控制以及交流开关。GTO 为自关断晶闸管, 用于强迫换流的变换器, 容量高达 $6\text{kV}/6.0\text{kA}$ 。SITH 为自关断晶闸管, 用于中等功率的变换器, 容量高达 $1.2\text{kV}/0.3\text{kA}$ 。MTO 视为 GTO 与 MOSFET 的组合, 保留了 GTO 的优点, 可以用于大功率应用场合, 变换器容量高达 $1\sim 20\text{MVA}$ 。ETO 为 MOS-GTO 的混合器件, 保留了 MOSFET 和 GTO 的优点, 具有双门极: 开通门极和关断门极, 容量高达电压 6kV , 电流达 4.0kA 。IGCT 与 SGCT 的容量高达 $6.5\text{kV}/0.8\text{kA}$ 或 1.5kA 。MCT 的容量高达 $4.5\text{kV}/0.25\text{kA}$ 。

功率晶体管分为 4 类: ①BJT 或 GTR; ②功率 MOSFET; ③IGBT; ④SIT。BJT 为三端器件: 基极、发射极和集电极, 电流控制型, 大功率 BJT 一般用于频率低于 10kHz 、功率上限为 $1.2\text{kV}/0.4\text{kA}$ 的电力变换器, 正向导通压降在 $0.5\sim 1.5\text{V}$ 之间。功率 MOSFET 为电压控制型, 用于高速、功率上限为 $1\text{kV}/0.1\text{kA}$ 的变换器, 开关频率达到兆赫级。IGBT 为电压控制型, 开关速度介于 BJT 和 MOSFET 之间, 最高开关频率已经达到 120kHz , 容量达到 $1.7\text{kV}/2.4\text{kA}$ 。CoolMOS 是一种新型高压 MOSFET, $600\text{V}/47\text{A}$ 的器件的通态电阻仅为 $70\text{m}\Omega$, 新型 CoolMOS 的通态电阻可以做到几毫欧。SIT 为大功率高频器件, 目前容量可达 $0.6\text{kV}/0.3\text{kA}$, 开关速度达到 100kHz , 适用于音频、VHF/UHF 和微波放大器。

电力电子器件还可以按照下述方法分类: ①开通与关断不可控, 如二极管; ②开通可控, 关断不可控, 如 SCR; ③开通与关断均可控, 如 BJT、MOSFET、GTO、SITH、IGBT、SIT 和 MCT; ④要求连续控制 (基、栅) 极信号, 如 BJT、MOSFET、IGBT 和 SIT; ⑤要求脉冲控制极信号, 如 SCR、GTO 和 MCT; ⑥双极电压承受能力, 如 SCR 和 GTO; ⑦单极电压承受能力, 如 BJT、MOSFET、IGBT 和 MCT; ⑧双向电流导通能力, 如 TRIAC 和 RCT;

[⊖] 门极关断晶闸管又称为 GTO 晶闸管, 为方便起见, 往往用 GTO 代表门极关断晶闸管。

⑨单向电流导通能力,如SCR、GTO、BJT、MOSFET、MCT、IGBT、SITH、SIT和二极管;如果获得更多的变换能力,一般需要基本的器件与二极管进行组合,比如由两只二极管和两只IGBT可以构造出双向可控功率开关。

理想的电力电子器件即超级电力电子器件,其特征为:具有零导通压降,能关断无限高电压和承受无限大电流,具有开关零时间即无限开关速度,具体描述如下:

1) 在导通的状态(On-state),开关器件能够承受高的正向电流,趋向于无穷大。其正向导通压降足够低,趋向于零;导通电阻足够低,趋向于零;导通损耗趋向于零。

2) 在断开的状态(Off-state),开关器件能够承受高的正向与反向电压,趋向于无穷大。其断态漏电流足够低,趋向于零;关断电阻足够高,趋向于无穷大;关断损耗趋向于零。

3) 在开通(Turn-on)与关断(Turn-off)过程中,开关器件能够瞬时开通与关断,以便能够工作在高频状态。具有低的延时时间,趋向于零;低的上升时间,趋向于零;低的存储时间,趋向于零;低的下降时间,趋向于零。

4) 对于开通与关断过程,具有低的控制极[⊖]驱动功率趋向于零;低的控制极驱动电压趋向于零;低的控制极驱动电流趋向于零。

5) 开通与关断过程必须是受控的,一种控制极信号使之开通(正电压),另一种控制极信号使之关闭(零电压和负电压)。

6) 对于开通与关断过程,只需要窄脉冲信号,脉冲宽度趋向于零。

7) 能够承受高的 du/dt ,趋向于无穷大,能够承受电压的快速切换。

8) 能够承受高的 di/dt ,趋向于无穷大,能够承受电流的快速上升。

9) 内部PN结到环境的热阻足够低,趋向于零,便于热处理。

10) 具有长时间保持故障电流的能力,具有足够高的 i^2t ,趋向于足够大。

11) 导通电流具有负的温度系数,便于电流共享和器件并联。

12) 电力电子器件的价格应该低廉。

1.1.2 电力电子变换器的技术水平

下面简述与电力电子变换器有关的诸多方面,可以反映出现代电力电子变换器的发展现状和发展趋势:

1. 开关阵列或开关矩阵

任何一个电力电子变换器都包含一个功率电路,这个功率电路即包括开关阵列或开关矩阵,由分立电力电子器件、电力电子器件模块、智能功率模块(IPM)、功率集成模块(PIM)等构成,便于安装和解决散热问题,已经用于各种变频器和功率因数校正器(PFC),其中IPM中还包括驱动用HVIC(高压集成电路)和LVIC(低压集成电路),其发展方向是高频化、大功率化、低热阻、良好的电EMC。为了增加耐压能力或提高通流能力,电力电子器件需要进行串联和并联使用,为此引出了并联均流和串联均压问题。

2. 电力电子电路的类型

开关矩阵配置上合适的输入与输出滤波器或无源储能元件或高频、低频变压器等,构成

⊖ 不同电力电子器件起控制作用的电极有叫门极(如SCR)、栅极(如MOSFET和IGBT)、基极(如BJT)等,这里泛称时统称为“控制极”。

的功率电路就是电力电子电路，目前已经出现了难以计数的电路拓扑。电力电子电路大体可以分为6类。

1) 二极管整流器，按照被整流相数划分包括单相、三相和多相整流，按照整流方式划分包括半波、全波、全桥整流和同步整流；

2) AC-DC 变换器、一般指可控整流器，包括电流型和电压型、升压型和降压型等；

3) AC-AC 变换器，包括 AC 电压控制器、周波变换器、直接矩阵变换器、间接矩阵变换器等；

4) DC-DC 变换器，包括 DC 斩波器、各种开关电源（SMPS）等，能够升压、降压和升降压；

5) DC-AC 变换器，主要指逆变器，高频电源等；

6) 静态开关：电力电子开关可以作为静态开关或接触器，分断交流或直流电源，这种开关分为直流开关和交流开关，有别于有触点的低压断路器或接触器，在开关过程中无火花出现，而且有些开关即使烧毁也不会出现火花（如 GTO），属于本安型器件。其他功率电路大体可以由前6种基本电路型式构造出来，例如 AC-DC-AC 变换器和 DC-AC-DC 变换器。

3. 电力电子器件的驱动、保护与缓冲

电力电子器件的驱动大体包括两种：隔离驱动或直接驱动，一般都需要驱动器，前者借助（快速）光耦合器、光纤或脉冲变压器传输和驱动脉冲，用于功率电路与控制电路之间隔离或电力电子器件之间隔离；后者主要用于不需要电气隔离系统和单管系统，如单相有源 PFC、Buck 型 DC-DC 变换器等。驱动电源包括多电源驱动和单电源驱动，例如大功率三相逆变器可以采用6电源驱动，中小功率三相逆变器可以采用4电源驱动或单电源驱动。此外，电流控制型电力电子器件需要电流型驱动器，电压控制型电力电子器件需要电压型驱动器。电力电子器件的保护含义比较广泛，可以利用硬件保护和软件保护相结合的手段，包括过电流保护、过载保护、短路保护、过热保护、过电压保护、驱动电源欠电压保护等；电力电子器件的缓冲一般指过电压保护，分为有源缓冲和无源缓冲，有损耗缓冲和无损耗缓冲，利用附加电路吸收电压尖峰或限制电力电子器件的端电压，防止电力电子器件承受过电压而损坏。

4. 微处理器或可编程逻辑器件

除了功率电路之外，电力电子变换器离不开控制电路，而控制电路的核心部分就是控制器，它可分为模拟控制器和数字控制器，它们各有优点和不足，都将得到长久的使用，适用于不同的应用场合。数字控制器包括数字信号处理器（DSP）、微控制器（MCU）、微处理器（MPU）以及各种可编程逻辑器件，如现场可编程门阵列（FPGA）、复杂可编程逻辑器件（CPLD）等。前者能够完成复杂的调制算法、控制策略和工艺流程，后者能够完成复杂的逻辑运算。目前，微处理器或可编程逻辑器件的厂商和产品众多。功率开关与控制器集成在一起，就形成了 PIC（Power IC，功率集成电路），PIC 产品在开关电源等领域得到了广泛的应用。

5. 调制算法或控制策略

电力电子变换器输入一种电力特征，得到另一种电力特征，完成这种变换需要的就是调制算法或控制策略，通过微处理器的处理，将调制算法或控制策略转换为脉宽调制（PWM）脉冲信号，并送入电力电子变换器驱动其电力电子开关，通过电力电子开关的开关动作将信号调制解调出来，经过适当滤波，得到期望的波形。调制算法与控制策略有所区别，前者作

用能够得到基本的变换功能,后者作用能够得到改进和可控的变换功能。前者包括各种各样的 PWM 算法,如正弦波 PWM、非正弦波 PWM 和开关函数算法等,涉及开环控制系统。后者包括自动控制领域各种各样的控制策略,电力电子变换器本身都是能控、能观和能达的,涉及闭环系统:古典控制、现代控制和智能控制,仅就单相有源 PFC 而言,就已经出现了如下控制策略:比例积分 (PI) 控制、比例积分微分 (PID) 控制、单周期控制、自适应控制、 Δ - Σ 控制、模糊控制、遗传控制、内模控制、神经网络控制、预测控制等。调制算法还应考虑到电磁干扰 (EMI) 抑制,模拟控制器能够实现简单 EMI 抑制措施,如单相有源 PFC 中的开关频率的正弦半波调制、Buck 电路采用的蔡氏电路的开关频率混沌调制等,数字控制器即微处理器,借助其灵活性和快速化趋势,能够完成复杂的 EMI 抑制算法,如单随机 PWM 和双随机 PWM 算法等。

6. 研究手段与研究方法

针对电力电子变换器的研究手段与研究方法已经非常系统和实用,包括理论分析、仿真分析、实验验证、产品研发、EMC 测试和生产流通。对于理论分析,出现了许多研究方法,如平均电路模型、DQ 电路模型、ABC 坐标系、dq 坐标系、瞬时功率分析等方法,并且采用了非线性电路控制手段和转化后的线性电路手段。另外,将许多其他学科的理论分析方法引入进来,最简单的例子就是调制概念和开关频率随机调制技术。许多数学工具都得到充分的使用,包括快速傅里叶变换 (FFT)、小波分析、三角函数变换、拉普拉斯 (简称为拉氏) 变换、z 变换以及各种电路转换,如 Park 变换和 Clarke 变换。仿真分析成为一种重要的前期研究手段和后期补充研究手段,通过仿真分析,可以验证思路、开拓思路、发现新的拓扑和验证新的想法,与电力电子变换器有关的仿真工具也越来越多,功能越来越完善,性能越来越优秀,利用它们可以完成各种分析,如 DC 分析、AC 分析、瞬态分析、最坏分析、参数扫描分析和统计分析等。仿真工具大体包括 3 类:电路分析、热路分析和 EMC 分析,其中前者包括 Saber2004、Orcad10.0、Matlab7.0/Simulink6.0、Protel、Multisim、Pscad、PSIM 和 dSPACE 等软件,它们当中有基于电路级的,有基于系统级的,有针对实现设计的。热路分析和 EMC 分析的软件也非常多。电力电子变换器产品设计的最后几个阶段就是实验验证、产品研发、EMC 测试和进入生产流通。总之,要求从事电力电子变换器的研发人员的素质越来越高,知识面越来越宽。

7. 电路形式趋于多样化

电力电子变换器早已脱离单级变换结构,向两级变换、多级变换、多电平变换、并联运行、级联操作、并联交错、串联交错等方向发展,未来的电力电子变换器将是一个庞大的系统,涉及分布式发电、变电、配电、用电、储能以及能量形式转化等诸多方面。这样的系统将包容各种各样特征的变换器:电流型、电压型、功率型、阻抗变换型等,单个变换器的功率等级覆盖几瓦到几十兆瓦,为此需要新的理论支持,将会出现许多新的研究方向和研究方法,最优控制技术将得到普遍应用,以便解决其安全运行、稳定运行和功率稳定性等难点问题。其中将强调系统以及子系统的电磁兼容性 (EMC) 问题,包括电磁干扰 (EMI) 和电磁敏感度 (EMS) 两大方面。

8. 研究内容与开关硬度

电力电子变换器的研究内容不外乎是实现变换器期望的基本功能,即希望的输入与输出电力特征的实现和技术指标的获得,包括静态特性和动态特性以及并联、并网能力。此外,