

逆变器理论及其 优化设计与可视化算法

伍家驹 著

南昌航空大学学术文库



科学出版社

逆变器理论及其优化设计的 可视化算法

伍家驹 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书以低压单相逆变器为例,论述了 SPWM 电压型桥式逆变器和 SPWM 电压型推挽式逆变器的工作原理,详细介绍其主回路和控制系统多目标约束条件的优化设计及其多维数据可视化算法。主要内容有桥式逆变器建模、稳定性分析、控制系统设计、推挽式逆变器建模及其吸收回路;三维状态变量的可视化展示、完全四维可视化和五维数据场可视化的实现方法,无源低通输入、输出滤波器的优化设计及其多维数据场可视化算法;系统仿真、计算机硬件系统、程序框图及其主要程序。书中内容既有利于逆变器的理论研习,也可作为多目标约束条件的优化设计提供一种新颖的多维数据场可视化算法,所附的程序亦为再现算例和拓展应用提供了方便。

本书理论分析定量,实验与仿真相吻合,可供从事电类专业研究的学者和工程技术人员参考,也可作为高校相关专业研究生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

逆变器理论及其优化设计的可视化算法/伍家驹著. —北京:科学出版社,2012.12

ISBN 978-7-03-036133-2

I. ①逆… II. ①伍… III. ①逆变器-最优设计-计算方法 IV. ①TM464.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 290536 号

责任编辑:余 江/责任校对:宋玲玲
责任印制:闫 磊/封面设计:迷底书装

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>

北京京华虎彩印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 12 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2012 年 12 月第一次印刷 印张:18 1/2

字数:381 000

定价:74.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

逆变器的应用范围日益广泛,已从用 UPS 和交流调速系统为代表的用电领域,扩展到以智能电网和直流超高压为代表的输配电领域、光伏和风力为代表的分布式发电领域,逆变是电力电子功率变换的主要形式,其作用在电力生产、配送和消费的全过程中都是不可替代的。“电力电子技术”已从前些年的专业课程调整为专业基础课。

作者自 1968 年下放到煤矿当电工以来就一直进行电类知识的学习与实践,主持过大型合成纤维厂电气设备的安装调试。经历了变流装置由苏制电动-发电机组(Г-Д, Генератор-Двигатель)向国产变频器、控制器由磁放大器向计算机、变频器尺度由大衣柜向手提包的转变,虽慵懒迟钝却也幸免见异思迁,沉溺于奇妙的逆向变换之中。20 世纪末到南昌航空大学任教至今,讲授“电力电子技术”、“电源技术”和“交流调速”等课程,指导研究生做实验写论文,并长期担任电源企业的技术顾问。平时因教学、科研和为企业解决技术难题所需,偶有所得付诸期刊/会议。随着学术认知和教学体会的累积,撰著冲动便时有发生,欲将逆变原理与逆变器优化设计联系起来,以求达到贯通原理、优化设计和指导实践的目的。然而,面对着多科整合(multi-interdisciplinary integration)的逆变器,唯学有不逮,未敢轻率动笔。

作者于 1992 年和 1997 年两度以国家公派访问学者身份赴日本国立福井大学深造,师从杉本英彦教授,学习电力电子技术并获得日本工学博士学位。回国后多次得到国内学者提携和基金委的信任,主持了三个国家自然科学基金项目的研究工作,力微任重,如过河小卒,只有勉力向前。感恩国家培养,为振兴科技竭尽绵薄是作者多年的夙愿,总结多年研究心得连同程序全部奉献给读者,是将科研成果转化为生产力服务社会的一种便捷形式。不敢奢望能对电力电子学的发展起到促进作用,但愿能给同行们带来一些方便。

本书以国家自然科学基金项目 No. 50467003-减小单相交流系统静态不确定度的研究、No. 50967003-功率变换器的优化设计及其可视化算法和 No. 51167014-多线圈电子变压器外特性的可视化建模方法研究为背景,论述了逆变器优化设计的可视化算法,给出了部分算例、程序框图和关键性的程序。全书共 9 章,以单相全桥电压型非并网式 SPWM 逆变器和推挽式电压型逆变器为例,对其理论分析和优化设计的相关内容进行了论述,主要内容有:

第 1 章为概论,论及逆变器的范畴、效能和分类,内涵、构成和框图,现状、瓶颈和展望,论述诸研究内容的关联性。

第 2 章为多维数据场的可视化方法,系统地论述了增强型三维可视化、完全四维

数据场可视化和五维可视化的实现方法,支持优化设计的可视化算法。

第3章为直流输入滤波器的优化设计,论述了单相不控整流器直流侧 LC 滤波器的四维可视化设计方法和带直流分量的电感器电感量的测算方法。

第4章为交流输出滤波器的理论分析,论述了 SPWM 波的谐波分量和滤波器的三维状态变量可视化,这是滤波器的设计依据和控制系统的工具。

第5章为交流输出滤波器的优化设计,分别论述了 SPWM 电压型低通滤波器多目标多约束条件优化设计的二维、三维、四维和五维可视化的算法。

第6章为电感器设计的可视化算法,论述了空心电感器的优化设计,磁芯电感器中软磁材料性能、气隙对磁芯电感器参数的影响和永磁体预偏磁电感器。

第7章为桥式 SPWM 逆变器控制系统设计,论述了 PWM 及其死区补偿、状态方程、抑制负载变化导致系统极点飘移的措施、内模原理、调节器设计和仿真实验。

第8章为逆变器的硬件软件,论述了电力电子器件的驱动保护、逆变器诸子回路的关联和可直接用于单片机的主要程序。

第9章为推挽式 SPWM 逆变器,论述了 SPWM 电压型推挽式功率变换器的变压器、回路方程、状态方程和低损耗无源吸收电路。

作者在此向高校教师致敬!知识爆炸、研究生扩招,而研究生教材/参考书却仍滞后。本书理论分析定量、算法提供程序、试验结合故障,还提供了调节器的单片机程序。或许可为研究生教育出点力,也踮脚期盼着能有幸进入大作的文献之列。

作者钦佩研发工程师,既要赶工期,又要面对晦涩的论文公式、网上海量的数据和程序。本书各章节针对性较强,优化设计程序均来自实践,接受推导过程后只要更改程序的部分语句即可结合到具体的项目之中去,便于自学,容易达到事半功倍的效果。

研究生代表着未来,但学完“电力电子技术”并做完全部试验(通常在由各封闭式功能挂箱构成的试验台上进行)后仍无法进入课题研究。本书跨越于理论与实践,可再现的 MATLAB 仿真和具体的优化设计算例可逐步达到解疑释惑的效果。

作者先后指导的 20 多位研究生为本书付出了辛劳,其中的代表有张朝燕、谢波、王文婷、李学勇、纪海燕、于阳、刘文、王祖安和梅开行等,在此向他们致谢!并共同将本书献给南昌航空大学六十周年校庆。

感谢日本国立福井大学杉本英彦教授 20 年来的热情传授和鼓励。

感谢南昌航空大学杨国为教授、赵轲教授、王长坤副教授、李园庭副教授和刘斌副教授对本书不同形式的帮助。

感谢伍步超老先生、严泳兰女士、伍声宇博士和李明杰博士后等亲属的支持。

感谢南昌航空大学科研成果专项资助基金的资助。

特别感谢国家自然科学基金委员会和国家留学基金委员会的资助!

伍家驹

2012 年 10 月于南昌航空大学

目 录

前言

第 1 章 逆变器概论	1
1.1 范畴、演绎和分类.....	1
1.1.1 学术的范畴	1
1.1.2 功能的演绎	1
1.1.3 技术的分类	2
1.2 逆变器内涵、构成和框图.....	3
1.2.1 逆变器的内涵	3
1.2.2 逆变器的构成	4
1.2.3 逆变器的框图	6
1.3 逆变器的现状、瓶颈和展望.....	6
1.3.1 基本现状	6
1.3.2 研发瓶颈.....	11
1.3.3 将来展望.....	13
1.4 本章小结.....	15
参考文献	15
第 2 章 多维数据场的可视化方法	18
2.1 科学计算和多维可视化.....	18
2.1.1 逆变器的科学计算问题	18
2.1.2 逆变器科学计算的动态	18
2.1.3 多维可视化算法的思考	19
2.1.4 多维数据可视化的现状	19
2.2 多维数据场的可视化.....	20
2.2.1 三维可视化的增强功能	20
2.2.2 完全四维可视化的实现	20
2.2.3 四维数据可视化的论证	22
2.2.4 四维数据场可视化算法	23
2.2.5 非凸高非线性优化模型的多值性问题	24
2.2.6 完全五维数据场的实现	25
2.3 非线性分度坐标的多维可视化.....	29
2.3.1 对数坐标分度	29

2.3.2 其他坐标分度	30
2.4 逆变器优化设计简介	31
2.4.1 逆变器设计类别	31
2.4.2 逆变器优化设计存在的问题	32
2.5 本章小结	32
参考文献	33
第3章 直流输入滤波器的优化设计	35
3.1 单相 LC 滤波器的四维可视化算法	35
3.1.1 引言	35
3.1.2 整流电压谐波分析及设计条件	36
3.1.3 多目标多约束条件的优化设计	37
3.1.4 仿真与实验	47
3.2 电感器位于交流侧的单相 LC 滤波器的四维可视化算法	49
3.2.1 引言	49
3.2.2 仿真	50
3.2.3 后续研究	51
3.3 有直流磁化电流的电感量测算	52
3.3.1 引言	52
3.3.2 测量计算方法	52
3.3.3 测算实例	53
3.4 本章小结	54
参考文献	55
第4章 交流输出滤波器的理论分析	56
4.1 SPWM 单相逆变桥的谐波分析	56
4.1.1 引言	56
4.1.2 主回路及其调制方式	56
4.1.3 无死区时 SPWM 波的谐波分析	57
4.1.4 有死区无补偿时 SPWM 波的谐波分析	60
4.1.5 有死区有补偿时 SPWM 波的谐波分析	64
4.1.6 小结	65
4.2 三维状态空间可视化	66
4.2.1 引言	66
4.2.2 逆变器主回路及其状态方程	66
4.2.3 u_{AB} 的描述和验证	67
4.2.4 三维状态变量轨迹的可视化	68
4.2.5 小结	74

参考文献	74
第 5 章 交流输出滤波器的优化设计	75
5.1 引言	75
5.2 LC 滤波器优化设计的二维可视化算法	76
5.2.1 谐波、拓扑和转移函数	76
5.2.2 滤波器参数的确定	76
5.3 非对称 T 型滤波器优化设计的三维可视化算法	80
5.3.1 滤波器设计分析	80
5.3.2 滤波器参数设计	82
5.3.3 电感器优化设计	84
5.3.4 实验及设计效果	86
5.4 非对称 T 型滤波器优化设计的四维可视化算法	88
5.4.1 滤波器优化设计表述	88
5.4.2 逆变器系统功率因数	89
5.4.3 低通滤波器阻抗特性	96
5.4.4 低通滤波器频率特性	97
5.4.5 电流负担和电压应力	99
5.4.6 控制对象的稳定裕量	100
5.4.7 低通滤波器设计效果	102
5.5 非对称 T 型滤波器优化设计的五维可视化算法	102
5.5.1 变频器用滤波器的特点	102
5.5.2 实现五维数据场可视化	103
5.5.3 优化设计的五维可视化算法	105
5.5.4 实验验证	107
5.6 本章小结	108
参考文献	109
第 6 章 电感器设计的可视化算法	110
6.1 空心电感器的设计	110
6.1.1 引言	110
6.1.2 设计过程	110
6.1.3 对比其他设计方法	114
6.1.4 小结	116
6.1.5 程序框图	116
6.2 软磁材料的选择	117
6.2.1 引言	117
6.2.2 气隙与平均有效磁导率	117

6.2.3	磁芯材料选择的五维可视化方法	119
6.2.4	小结	121
6.3	磁件气隙的选择	121
6.3.1	引言	121
6.3.2	磁导率与气隙关系的四维可视化表达	121
6.3.3	小结	123
6.4	永磁体预偏磁电感器的设计	124
6.4.1	引言	124
6.4.2	磁路分析	124
6.4.3	优化目标	130
6.4.4	实验分析	132
6.4.5	小结	137
	参考文献	138
第7章	桥式 SPWM 逆变器控制系统设计	140
7.1	SPWM 及其死区补偿	140
7.1.1	引言	140
7.1.2	死区效应分析	140
7.1.3	死区补偿原理	142
7.1.4	实验结果及分析	148
7.1.5	小结	149
7.2	基于数据可视化的 PI 控制器设计方法	149
7.2.1	引言	149
7.2.2	PI 控制器的闭环系统描述	150
7.2.3	PI 控制器参数稳定集计算及参数寻优	151
7.2.4	实际算例	154
7.2.5	小结	158
7.3	基于 LC 滤波器的逆变器控制系统设计	159
7.3.1	引言	159
7.3.2	控制系统设计	159
7.3.3	基于内模原理的调节器设计	163
7.3.4	小结	168
7.4	基于 LCL 滤波器的逆变器控制系统设计	169
7.4.1	引言	169
7.4.2	控制系统设计	169
7.4.3	实验	175
7.4.4	小结	176

7.5 逆变器系统仿真分析	176
7.5.1 引言	176
7.5.2 单相电压型全桥 SPWM 逆变器建模	176
7.5.3 逆变桥的死区效应分析	178
7.5.4 输出电压的频谱构成	178
7.5.5 MATLAB 仿真方案	179
7.5.6 讨论	182
7.5.7 小结	183
参考文献	183
第 8 章 逆变器的硬件软件	185
8.1 硬件系统简介	185
8.1.1 逆变器控制系统	185
8.1.2 电力电子器件	186
8.1.3 驱动和保护电路	187
8.1.4 采样电路	189
8.1.5 小结	194
8.2 逆变器子回路问题	195
8.2.1 引言	195
8.2.2 接地问题	197
8.2.3 逆变器诸子回路的构成	198
8.2.4 诸子回路所带来的问题	204
8.2.5 子回路电量测量的方法	207
8.2.6 小结	209
8.3 逆变器主要程序简介	210
8.3.1 常用离散化方法的比较	210
8.3.2 信息控制环节	215
8.3.3 PI 调节器的汇编语言表达	216
8.3.4 基于内模原理设计调节器的汇编语言	217
8.3.5 给定信号和 SPWM 的表达	219
8.3.6 小结	220
参考文献	221
第 9 章 推挽式 SPWM 逆变器	222
9.1 推挽变压器的电磁分析	222
9.1.1 引言	222
9.1.2 推挽变压器的诸电感分析	223
9.1.3 推挽变压器的电感量测算	227

9.1.4	小结	234
9.2	推挽变压器的一种外特性模型	234
9.2.1	引言	234
9.2.2	有效漏感	235
9.2.3	数学表征	238
9.2.4	仿真实验	239
9.2.5	能量流向	240
9.2.6	小结	242
9.3	低损耗型无源吸收电路	242
9.3.1	引言	242
9.3.2	推挽电路解析	243
9.3.3	吸收电路设计	248
9.3.4	工频磁化分析	251
9.3.5	小结	252
	参考文献	252
附录		254
附录 A	第 3 章公式证明和主要可视化程序	254
A.1	U_{db} 表达式[即式(3-17)]的证明	254
A.2	$i_{\text{d}}(t)$ [即式(3-20)]和 $U_{\text{c}}(t)$ [即式(3-21)]的证明	258
A.3	一个因变量的四维可视化程序[图 3-4(a)]	259
A.4	两个因变量的四维可视化程序[图 3-9(a)]	261
A.5	三个因变量的四维可视化程序(图 3-11)	262
附录 B	第 4 章主要程序	263
B.1	无死区的理想状态输出电压 u_{AB} 的频谱分布程序(图 4-5)	263
B.2	有死区无补偿状态输出电压 u_{AB} 的频谱分布程序(图 4-12)	265
B.3	调制比 M 对频谱的影响程序(图 4-14)	268
B.4	式(4-24)有死区有补偿电压 u_{AB} 的可视化程序	270
B.5	基于计算得出的三维状态轨迹(图 4-21)的程序	271
附录 C	第 5 章主要程序	272
C.1	二维曲线簇可视化算法程序(图 5-2)	272
C.2	增强型三维可视化算法程序 I(图 5-5)	272
C.3	增强型三维可视化算法程序 II(图 5-6)	274
C.4	两种负载下的系统功率因数(图 5-22)	275
C.5	滤波器阻抗与系统功率因数(图 5-28)	276
C.6	截止频率 $\omega_{\text{c}}(L_1、L_2、C)$ 的可视化(图 5-29)	278
C.7	电力电子器件的电流负担(图 5-31)	279

C.8	两电感参数变化的根轨迹(图 5-34)	279
C.9	五维数据场可视化(图 5-37~图 5-39)	280
附录 D	第 8 章可视化程序	281
D.1	$G(s)$ 转变为 $G(z)$ 的程序	281
D.2	四种离散化效果同图可视化程序	282
后记		284

第 1 章 逆变器概论

1.1 范畴、演绎和分类

1.1.1 学术的范畴

笛卡尔(Descartes)等建立的西方理性主义哲学思想,虽带动了近代科技的发展但也煽起了征服自然的狂妄,其后果是生态破坏、资源枯竭和环境污染。近几十年来儒道两家人与自然和谐相处的思想逐渐被世界有识之士所接受^[1],联合国气候变化框架公约参加国于 1997 年签署了《京都议定书》,使节能减排成为全球共识,我国政府也制定了一系列严厉的节能减排政策。

现代社会在人类活动的各领域几乎都离不开电,而电能的获取、控制和加工则是驾驭电的必要过程。电力电子学自 1957 年晶闸管诞生以来,伴随着微电子技术和控制理论的进步得到了迅猛发展,已从当初以静止变流器、交流调速系统为代表的用电领域,扩展到以高频、直流、方波为代表的新型输配电领域和以光伏、风力为代表的分布式发电领域^[2]。目前发达国家近 80% 的电能需经过电力电子装置加工后再供给负载使用,电力电子技术在改造电力、机械、矿冶、交通、化工、轻纺等传统产业,发展航天、激光、通信、机器人等高新技术和高效利用/转换能源中也有着极其重要的作用,是 21 世纪不可或缺的关键学科之一。

电力电子学可分为电力电子器件及其应用和电力电子系统及其控制两大学科方向。电力电子系统中的电力变化是指使用电力电子器件来改变电能的电压、电流、频率(含直流)、相位、相数和波形等外在特征表述,而输入输出功率却基本不变的加工过程,有 AC/DC、DC/AC、AC/AC 和 DA/DC 之分。其中 AC/DC 是把交流电变为直流电,实现此变化过程的装置被称为整流器(曾被称为顺变器),DC/AC 是把直流电变为交流电,实现该过程的装置叫逆变器(与顺变器对应)。逆变器又常常被特指输出交流电的频率为工频(或某固定频率)的 DC/AC 变换器,而输出交流电的频率可以变化的则被称为变频器。

1.1.2 功能的演绎

逆变器是电力电子功率变换器的基本形式,在发电、输配电和用电,即电能的生产、流通和消费的全过程都将得到更加广泛的应用。使用逆变器可达到节约能源、降低成本、提高综合性能、减小体积和减轻重量的目的。从电力电子装置的基本功能是对电能进行加工上考量,对逆变器可作如下演绎。

1. 恒频恒压

逆变器以稳定电压/电流的频率、幅值和相位恒频恒压(constant voltage constant frequency, CVCF)的形式供电,在不间断电源(uninterruptible power supply, UPS)和分布式发电(distributed generation, DG)的输入能量变化时,可将电池等直流电源变为交流电稳定负载电压;超高压直流输电的落地端也需要通过逆变器以工频的形式与所在电网并联。

2. 变频变压

变频器可以方便地改变输出交流电压/电流的频率、幅值和相位,达到变频变压(variable voltage and variable frequency, VVVF)的目的,为永磁同步机或感应电动机提供大范围的可调电源。目前,开/闭环的交流调速系统的性能价格比已经全面优于直流调速系统,其中起核心作用的就是变频器。VVVF交流调速系统在各传统制造行业和电动汽车等新型行业都得到了广泛应用。在现代照明中也广泛采用VVVF。

3. 有源滤波

电网对用电部门有负载功率因数高、电流谐波分量小等要求,并联有源滤波可以减少负载对电网的污染,其核心部位的基本原理是变频器;现代用电装置对电源有频率稳定、电压稳定且正弦度高等要求,串联有源滤波/电压补偿可以保证供电质量,但其核心部分的基本原理也是变频器。

4. 独立电源

电源频率越高电磁器件的体积越小,但输电成本也越高。输电和用电频率的合理配置可以大大降低输电成本、提高功率密度,在空间较小的舰船、飞机、宇航空间站和大型联合装置等得到广泛应用。如飞机上常采用直流干线馈电,并在每个主要负荷附近都设置400 Hz逆变器的制式来提高系统电气设备功率密度。

5. 焊接电源

每年都有数亿吨的钢材通过焊接工艺构成工件,电焊机在工厂和工地随处可见,焊接电流的波形直接影响着焊缝质量,电流波形视工件材质、焊接过程和工艺要求而随时变化。电焊机有电弧焊、电阻焊、摩擦焊和气体保护焊等多种类别,但其核心部分的基本原理仍然是变频器。

6. 储能电源

现代用电设备对电源有着苛刻的要求,由雷击等自然灾害造成的市电瞬间电压降也会对计算机、半导体材料和机场照明领域等造成重大损失。化学电池、飞轮储能、超级电容和超导储能等长时大能量/短时高功率储能UPS得到广泛应用,其核心部分的基本原理仍然是逆变器。

1.1.3 技术的分类

变频器种类繁多,侧重点不同分类方式亦不相同:

- (1) 从拓扑考量,有推挽、半桥、全桥、单相、多相和多重之分;
- (2) 从输入直流电源的性质考量,有电压源、电流源和 Z 源之分;
- (3) 从输出交流电的运行方式考量,有独立运行和并联、串联运行之分;
- (4) 从和大电网并联与否考量,有孤岛式(非并网式)和并网式之分;
- (5) 从输出交流电波形考量,有正弦波和非正弦波之分;
- (6) 从功率流向考量,有单向逆变和双向逆变之分;
- (7) 从交直流隔离方式考量,有高频和低频之分;
- (8) 从控制方式考量,有模拟控制和数字控制之分;
- (9) 从开关的工作方式考量,有软开关和硬开关之分;
- (10) 从输出频率考量,有工频、中频和变频之分;
- (11) 从滤波前输出电平考量,有双电平、三电平和多电平之分;
- (12) 从控制方式考量,有谐振式、脉冲频率调制(pulse frequency modulation, PFM)、脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)、正弦波脉冲宽度调制(sinusoidal pulse width modulation, SPWM)和空间电压矢量控制(space vector pulse width modulation, SVPWM)等形式;
- (13) 从器件上考量,有半控型器件和全控型器件之分,前者的代表有晶闸管(silicon controlled rectifier, SCR),后者的代表主要有绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)、智能功率模块(intelligent power module, IPM)和集成电力电子模块(power electronic building block, PEBB)等。

随着新材料、新器件的涌现和电力电子学研究的深入,逆变器的分类也会更新。

1.2 逆变器内涵、构成和框图

1.2.1 逆变器的内涵

逆变器包括硬件和软件两大部分。

逆变器的硬件可分为半导体器件、电阻器、电容器和电感器四大类。

半导体器件又可分为信息类弱电器件和功率类强电器件两大类。前者主要由单片机及其周边集成电路构成,程序对逆变器的性能有着至关重要的影响;后者的理论基础是半导体物理,为保证可靠运行不但需要故障检测、散热冷却、过压/过流/过热保护等辅助硬件,还需要有安全工作区域和极限条件等技术规范甚至经验的支持。电阻器和电容器的工作状况较易掌握,有参数齐全的多种类别的商品可供选择。电感器(含变压器、电流/电压互感器)却要复杂得多,绝大多数的电感器都要由研发者自己进行参数设计和外特性测算^[3]。电感器/变压器的功能包括储能、电压转换和隔离,为逆变器所必备的元件,其重量、体积和损耗都约占功率变换器的三分之一。

逆变器内主干软件功效是发布电力电子器件的开关指令,以构成不同的电气子回路来逐步实现从直流电到特定交流电的变换过程,达到瞬态和稳态的性能指标要

求。编写程序的依据是电力变换器的控制方式和逆变器系统的动态静态特性,前者依赖于电力电子学的相控技术或 PWM 技术,后者的基础是现代控制理论。

逆变器控制系统容易受到外界电磁干扰,电力电子装置也会对自身的控制系统、周边的电子设备乃至电网造成电磁干扰 (electromagnetic interference, EMI),因此 EMI 的分析、电磁兼容 (electromagnetic compatibility, EMC)、功率因数校正 (power factor correction, PFC) 和数字滤波技术正在日益引起重视^[4]。

逆变器的理论研究及其工程设计涉及半导体物理、电磁学、电路理论、电子学、磁性/绝缘材料、传感器、热力学、控制理论、计算机软硬件、仿真和数学等学科。

1.2.2 逆变器的构成

逆变器的构成可以分为 12 部分。

1. 直流输入滤波

直流电源来自电瓶/直流母线/交流整流/太阳能电池等。对电压源逆变器来说在低通滤波器的出口并联着电解电容器以维持电压基本不变,对电流源逆变器来说在低通滤波器的出口串联着铁心电感器以维持电流基本不变。工频或高频变压器常用来调整电压和电源隔离,并用 EMC 来抑制 EMI,用 PFC 来提高交流输入端的系统功率因数。

2. 电力电子开关

电力电子器件(以目前中小型逆变器的主流器件 IGBT 为例,下同)按主回路拓扑连接而成。在电压型逆变器中为提供续流通路,在其 IGBT 两端反向并联着快恢复二极管;在电流型逆变器中为改善关断条件,IGBT 支路上正向串联着快恢复二极管。在控制电路的作用下,开关频率从几千赫兹 (kHz)到数百千赫兹不等。

3. 交流输出滤波

从电力电子单元输出的高频电力脉冲序列要经过由无源器件构成的低通滤波器才能得到工频或特定频率的正弦交流电。以 SPWM 电压型逆变器为例,独立运行的逆变器常用单 LC 结构,并联或并网运行逆变器为减少环流常用非对称 T 型滤波器(也被称为 LCL 滤波器),有的还用推挽变压器来达到调压和绝缘的双重目的。

4. 控制电路硬件

作用于电力电子开关器件的序列控制脉冲来自控制系统,通过设定、反馈和运算来满足逆变器动态静态特性。控制电路有模拟和数字两种形式,现代逆变器的控制电路常采用数字信号处理器 (digital signal processing, DSP) 或 ARM 单片机 (advanced RISC machines, 高档 RISC 机, reduced instruction set cycles, 简化指令系统周期)。

5. 常用诸传感器

反馈信号常有电压、电流、磁通和温度等,其最终的形式都是电压。电压信号通常来自电磁式传感器或者分压器;电流信号既可出自电磁式传感器或霍尔传感器,也

可用检测电压降的方式来推算电流;磁通信号出自霍尔传感器;温度信号常来自热敏元件。为减小 EMI 的影响,传感器选型、检测位置和信息传输方式等都颇有讲究。

6. 信号转换回路

由于单片机、周边集成块、光耦、传感器及其调理电路、各电力电子器件的驱动/过流信号等的电源电压均有可能不同或必须彼此绝缘,因此相互之间的通信需电平转换;此外,在大容量逆变器 IGBT 的驱动保护中常通过双向光纤通信的形式来实现 EMC,发送接收端均需要光电转换;通信协议和具体数据报文格式的衔接。

7. 辅助电源电路

开关单元通常有若干个电力电子器件构成,每个器件通常需要配备独立直流电源的驱动回路;控制电路的诸电流电压采样电路也需要配备独立直流电源以构成调理电路,模拟电路和 DSP 等计算机控制系统也都需要配备独立的直流电源。辅助电源可采用线性电源和开关电源两种形式,前者用工频变压器隔离,后者用高频变压器绝缘。

8. 诸种保护电路

保护电路有元件和装置两个层级,有过压保护、过流保护之分,过压保护主要是以吸收电路/软开关来抑制高速开关在分布电感两端产生的 Ldi/dt ;过流保护常通过甄别开关管通态压降来实施;电力电子器件串联时需要采取均压措施,并联时需要采取均流措施。整机有输入过压欠压保护、输出过压欠压保护、过负载保护和过热保护。

9. 散热冷却系统

逆变器中的大功率电力电子器件会产生开关损耗,半导体材料的耐热性较差,因此中小功率逆变器的电力电子器件常被固定在铝制散热器上,通过自然或电风扇强迫风冷的办法来疏散热量。大功率逆变器的电力电子器件也有采用水冷却的。此外,变压器/电感器的铁损、铜损所产生的热量会加快绝缘材料的老化进程,也需有散热措施。

10. 电磁兼容措施

为抑制来自市电的 EMI 常在输入端串接无源滤波器;为削减逆变器产生的 EMI,常在市电输入端串接 PFC,常在变压器中加入屏蔽层、在散热器上跨接电容器、在特别敏感部位加装屏蔽罩、更换屏蔽线、光纤通信、采用多层印刷线路板(printed circuit board, PCB)、接入共模/差模滤波器和采用专用接地线等。

11. 内分布式控制

为适应现代逆变器多功能和低故障的需求,将逆变器内部电力电子基本单元有机地整合起来,将多功能、冗余及其容错策略融入基本单元的局部自制、基本单元间的分层递阶控制之中,通过工作拓扑及其相关软件的调整达到改变装置功能或剔除故障器件保证安全运行的目的。

12. 逆变器群控制

在自律分布式逆变器群控制系统中,诸逆变器之间常通过电压型或电流型功率调解器系统(power conditioner system,PCS)和功率路由器(power router,PR)建立起电的联系;在熔融纺丝等大型设备中,诸逆变器之间常通过所驱动或加热的对象建立起间接的联系。诸逆变器的信息采集、通信和协调控制是必不可少的。

1.2.3 逆变器的框图

图像的信息比较丰富。逆变器常用的框图形式包括:①由附带文字说明的子功能框构成的原理框图;②以英文字母表示的参数符号构成的控制系统框图;③由图形符号构成电路图。

逆变器的运行环境和性能指标确定之后,设计者可在原理框图中用文字直接表达子功能块间的相互关联,既利于后续设计又方便学术交流,以电压型 SPWM 非并网逆变器为例绘制的原理框图如 8.2.1 节所示。

将原理框图子功能块中的文字表述付诸实施,便需要选择主回路拓扑进行系统设计和计算机仿真,为了使逆变器有较好的动态、静态特性,控制系统设计也是必不可少的,由参数符号构成的控制系统框图如 7.3.2 节、7.4.2 节和 7.5.2 节所示。

为构建其硬件系统,常将构成逆变器系统的器件分别用图形符号(重复部分或过于复杂的部分亦用文字框图简化)表达,可以得到逆变器电路框图如 8.2 节所示。

1.3 逆变器的现状、瓶颈和展望

1.3.1 基本现状

了解逆变器的基本现状对应用领域的拓宽、新产品的研发、组合式创新,及嫁接其他领域的先进的甚至是成熟的技术来促进逆变器的技术进步都有着重要意义。

1. 电力电子器件

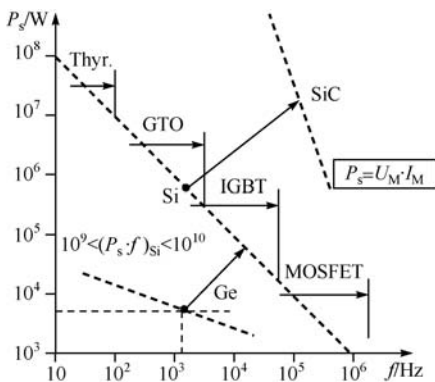


图 1-1 功率半导体器件的功率频率乘积

电力电子器件有不可控、半控和全控三类。二极管是不可控的,SCR 是半控的,可关断晶闸管(gate turn-off thyristor, GTO)、金属氧化物场效应晶体管(metal oxide semiconductor field effect transistor, MOSFET)和 IGBT 均是全控的。SCR 和 GTO 常用作大功率低频开关,MOSFET 常用作小功率高频开关,IGBT 为现代中小型逆变器的主力器件,电压范围为 0.6~6.5kV,电流范围 1~3500A,新型 SiC 开关器件的功率频率乘积将更大。自 1972 年山

上倅三和赤桐行昌关于 IGBT 的发明专利(比 H. W. Becke 的类似专利申请早 11 年)^[5]获批以来,电力电子器件正处在产品发展的高原期,性能虽有改进,但尚无质的飞跃。优良指数(figure of merit, FOM)是衡量电力电子器件的重要指标, $FOM = J_c / (V_{cesat} E_{off})$, 其中 J_c 为硅片电流密度, V_{cesat} 为饱和压降, E_{off} 为关断损耗, 目前第 6 代 IGBT 的 FOM 已经比第 5 代提高了 30% 的功率频率乘积(the power frequency product), 目前的电力电子器件达到 $10^9 \sim 10^{10} \text{ W} \cdot \text{Hz}$, 逆变器常用电力电子器件的 FOM 如图 1-1 所示, 其中用得最多的为 IGBT, 若以 1200V 系列第 1 代产品的 FOM 为 1, 则各代产品相较于第 1 代 IGBT 的 FOM 变化情况如表 1-1 所示。

表 1-1 1200V 各代 IGBT 的 FOM 变化情况

年份	1985	1990	1995	2000	2005	2008	2011~2015
产品代称	1	2	3	4	5	6	7
优良系数	1	1.5	4	8~10	14	18	26

此外, GTR(Giant Transistor, 电力晶体管)常被应用于强调可靠性的航空逆变器中; IGCT(Integrated Gate-Commutated, 集成门极换流晶闸管)电流已达 6kA, 电压已超过 6kV 常被应用于与电力系统相关的逆变器及其派生设备中。

2. 改善开关条件

电力电子器件开关过程的电流电压简约关系如图 1-2 所示, “1”包括 IGBT 本体导通截止过程两条曲线, 提示电流电压均超过额定值 I 、 U 和图中虚线所示的安全工作区(safe operating area, SOA), 由于未采取措施来改善开关环境, 且 di/dt 和 du/dt 均较大, 这种开关过程被称为硬开关。现代逆变器的功率/功率密度均在提高, 器件的开关频率的提高有益于功率密度的提高, 但开关频率的提高也还意味着开关过程的缩短(目前开关时间已降至数十纳秒级), 随之而来的是电流变化率 di/dt 、电压变化率 du/dt 的增大和分布电感分布电容的凸现。 Ldi/dt 和 Cdu/dt 均会恶化电力电子器件的开关环境甚至使半导体失效, 开关过程的损耗也会降低整机效率, 增加散热负担。由二极管、电容器和电感器构成的吸收电路(snubber circuit)可以改善开关环境, 开通吸收电路可以抑制 di/dt , 关断吸收电路可以抑制 du/dt , 图 1-2 中的“2”、“3”和“4”分别为开关特性逐渐变软的吸收电路外特性。理想吸收电路的也称为软开关, 如图 1-2 中的“5”所示。因为在零电流或零电压的状态下完成导通-截止状态的相互转换, 所以开关过程的损耗也可忽略不计。

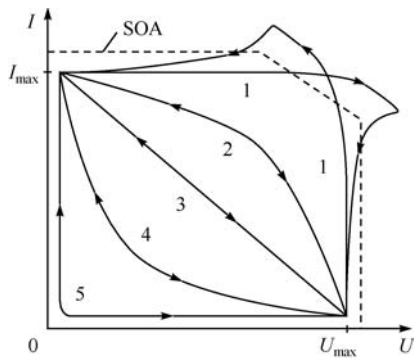


图 1-2 IGBT 的开关过程

电磁兼容、开关损耗、电流电压应力和噪音等问题都与吸收电路/软开关有关, 但

由于吸收电路/软开关存在着需要增加器件、对主回路拓扑及其 PWM 方式均有特定的要求,因此目前行之有效且得到广泛共识的软开关尚属鲜见。

3. 计算机和附件

逆变器计算机控制系统的基本原理是根据交流电压(电流)给定与实际反馈采样值的误差,按照特定的调节规律计算所需的 SPWM 占空比参量,得出电力电子器件的通断控制时刻,完成对交流电路的控制。

单片机种类繁多,适用于各类逆变器的 8 位单片机包括 MCS-51 系列、AVR 系列和 PIC 系列,16 位单片机包括 MCS-96 系列和 DSP 系列,32 位单片机包括 ARM 系列。目前部分 8 位单片机及其外围芯片,如地址锁存器、随机存储器(random access memory, RAM)和电可擦除可编程只读存储器(electrically erasable programmable read only memory, EPROM)等已实现国产化,可以方便地构成计算机硬件系统。DSP 数值计算能力强、功耗低且为电力电子装置的研发配备了 PWM 功能,在各类电力电子变换器中得到了广泛应用,但也存在着 3.3V 电源与周边器件 5V 器件不一致和软件编程复杂等问题。ARM 单片机有 16 位和 32 位两种,也配备了 PWM 功能,应用程序开发较为简便。此外,各大公司还常采用由专用芯片构成的计算机系统。目前 DSP 和 ARM 单片机及其周边芯片都可方便地从市场购得,但也尚未实现国产化。

逆变器全数字控制在整体上比模拟控制优越,但存在着特有的延时问题,包括采样延时、计算延时和采样量化误差。随着 DSP 位数和采样器件位数的提高,延时问题产生的影响正在减轻。单片机系统的硬件构成和程序结构均与设计者的个性密切相关,在提高整机性能、可靠性和 EMC 上均需要较高的技巧。连接各弱电元件构成计算机硬件系统的多层印刷电路板加工也市场化,将单片机及其周边 IC 块焊接组装成系统板出售的形式已被大众接受,QQ 群、E-mail 和快递上门送板的快捷方式为研发者带来了很大的方便。

4. 电容器电感器

电容器可储存电能、电感器可储存磁能,都是电路中广泛采用的无源器件。用于中小功率变频器的无极性电容器和电解电容器我国基本上都能生产。最近我国研制出高能镍碳超级电容器,它将活性炭材料引入镍氢电池负极,即一个电极采用电极活性炭电极,而另一个电极采用电容电极材料或电池电极,实现了普通超级电容器与电池结合为一体,从而兼有一般超级电容器和蓄电池的优异性能,具有能量密度大、功率密度高、充放电效率高、高低温性能好、循环寿命长、安全环保、性价比高等诸多特点^[6]。

电感器包括变压器、电感器,磁性元件的关键是磁芯材料和导体绕组,近 20 年来磁件工艺实现了以平面、片式和薄膜结构为代表的三次飞跃^[7],不同磁性材料的组合设计也取得一定成效。微加工技术也开始应用于磁件加工中,随着微机电系统(micro electro mechanical systems, MEMS)和三维非硅材料为主的准 LIGA 技术(光刻、电铸和注塑, lithographie galvanofornung abformung)的发展,空间尺度为毫米及

以下级的微型电感器件应运而生。

变频器的负面效应是有大量的高次谐波注入电网, PFC 环节可提高功率因数减小谐波电流。其关键问题是需高频损耗低、饱和磁感应强度大的铁心。随着开关频率的提高, 硅钢的高频损耗太大, 铁氧体高频损高温大功率时稳定性不好等问题日渐突出。非晶纳米晶软磁合金同时具有高饱和磁感应和很低的高频损耗, 且热稳定性好^[8]。

5. 功率集成模块

电力电子集成模块 IPEM (intergrated power electronics modules) 为三维结构, 功率密度高, 电气性能好, 且可以机械化生产。IPEM 可分为有源 IPEM 和无源 IPEM, 前者集成了多个电力电子器件、连接件和驱动保护, 后者集成了多个线圈和磁芯材料且追求扁平尺度。有源 IPEM 的功率密度已达 $1000\text{W}/\text{in}^3$ ($1\text{in}=2.54\text{cm}$), 无源 IPEM 的功率密度达 $400\text{W}/\text{in}^3$, 显然, 高功率密度和小尺度的结构给散热和电磁兼容等优化设计提出了更高的要求。在各种标准的规范下, 为设计、研发、生产和学术交流都带来了很大的方便, 代表着逆变器的发展方向。

6. 电磁兼容认知

在功率变流器/电机传动的电磁干扰建模及抑制技术、EMI 滤波器的寄生效应、PCB 优化设计布局以及 EMI 的数值分析等方面取得了一些尚处于研究室阶段的成果^[4], 对 PCB 板和子系统的 EMI 的认知达到波长厘米级, 可依据经验和软件对子系统采取 EMC 措施, 以期达到国际电工委员会、技术委员会 (international electrotechnical commission technical committee, IEC TC65) 制定的越来越苛刻的 EMC 标准^[9]和国内军标的相关要求。目前, 在传导电磁干扰、有/无源器件的建模、PCB 寄生参数提取和负载系统等方面已有些软件支持, 但元器件之间的近场耦合电磁辐射干扰却研究得甚少^[4]。在 EMC 方面, 常采用传导干扰反相抵消技术和低共模干扰变流器, 采用软开关技术已达到了降低开关损耗和高频 EMI 的效果。

变频器的交流输入端常采用简单的二极管不控整流和无源滤波, 其输入电流不是正弦波, 具有功率因数低和谐波分量大的特点, 对电网和用户都有很大的危害。现代的变频器常在市电交流输入端采用 PFC 电路, 以期达到功率因数为 1、谐波分量为 0 的终极要求。

7. 研发应用软件

仿真可以加快研发进程, 导致各种商品软件及其升级改良版本层出不穷, 目前被广泛采用的代表性软件有^[10]:

(1) MATLAB 擅长科学计算和仿真, 其中的 Simulink 可用于控制系统设计和电力电子元件级和系统级的仿真, 在仿真阶段调试好的程序还可直接移植到 DSP 系统板;

(2) HSPICE 可用于由电路元件、集成电路和功率模块构成的电路分析;

(3) Ansoft Maxwell 可用于磁性器件的电磁场计算, 并以三维数据可视化的形式展现磁件周围的场强;

- (4) PowerEsim 可用于开关电源的设计;
- (5) ATP 可用于电气传动系统分析;
- (6) CCAD、StatMoc、Saber PSPICE 等可设计印刷电路板,还可预测电磁辐射水平;
- (7) PSIM 是专门为电力电子和电动机控制设计的;
- (8) SABER 可从半导体器件的模型出发,进而扩展到控制系统;
- (9)在单片机上常采用 C 和汇编语言进行开发。

8. 逆变器的应用

1) 开环变频调速

目前各类电动机用电量占全国用电量的六成多,“十一五”期间推广变频调速使得运行效率提高了 2%,年节电 200 亿 kW·h,因此,不但应该继续在泵类风机类负载中继续推广开环变频调速,还要继续扩大国产变频器的所占比例、提高市场占有率并积极出口,逆变器在开环调速系统中正值数量普及扩张期。

2) 闭环变频调速

在现代闭环调速系统中,使用 VVVF 与永磁同步机/感应电机构成的交流调速系统的性能价格比已经全面超过了直流调速系统,但是能量可回馈电网的双向交流调速系统的普及率不到 2%,因此,正继续在电梯类负载的交流调速系统中推广能量回馈技术,在节能减排的宏观政策下,逆变器在闭环调速系统中也正值数量普及扩张期。

3) 直流输电配电

直流输电向用户端延伸在当今能源危机的时代具有特殊意义,在汽车、飞机、舰船和车间等独立电源系统也常用直流馈电,由逆变器群等构成的电源系统正在普及,30 年前一台逆变器带多台电动机属高端装备,目前已是多台逆变器驱动/伺服一台设备,逆变器在现代直流馈电系统中起着直接向用电设备提供交流电的关键作用。

4) 现代智能电网

在由火力、水力、原子能等传统发电厂、交直流高压输电、柔性输配电、有源滤波、太阳能发电、风力发电、UPS、飞轮/超导储能电源和不同用户构成的智能电网中,计算机对诸传感器来的信息进行分析判断,以逆变器为代表的功率变换器则起到能量互转换、调配和平衡的作用,位于智能电网的重要执行环节。

5) 各类微电网

以直流极微电网(DC nano-grid)和微电网(micro-grid)为例,其能源常来自太阳能、风力、潮汐、蓄电池和内燃机等,对初级电能进行加工使之成为较为稳定的双向工频电源的装置是逆变器;在由微源-组合源-微电网-分布式电网构成的分层整合式分布电源系统中,能给负载和电网提供较稳定交流电的仍然是逆变器。直流微/极微电网广泛应用于火车、舰船、飞机、美国的空间站和我国的天宫 1 号等独立电源系统中。

6) 电作动系统

在飞机车船等独立系统中,混合动力和纯电动模式正在迅速推广。以电作动系统取代机械传动系统,不但可方便机构的位移操作,而且可为电磁发射等新概念武器提供强劲动力;以若干个小功率原动机-发电-变频器-电动机构成的并联动力系统取代大功率原动机,可以显著节约能源。电作动系统的中心环节便是逆变器。

7) 可再生能源

全球煤炭、石油和天然气等资源的加速枯竭,2011年福岛反应堆的天灾人祸使日本等国家几乎放弃了核电,不少国家都在调整能源政策,学者们正加紧研究各种可再生能源发电技术,目前国内不少风力发电场已经开始盈利。西班牙光伏电价已与电网峰时电价持平,为 $0.2\text{€}/(\text{kW}\cdot\text{h})$,到2020年欧盟可再生能源将占总能源消耗的20%,美国光伏发电将占总发电量的15%,日本光伏发电将比2008年增加十倍^[11]。我国可再生能源发电量将达到总发电量的6.7%,2011年风力发电容量增加了26%,总容量60GW稳居世界第一。而将随机的风能、太阳能变为稳定电能的关键装备就含逆变器,如交流组件逆变器(AC module inverter, ACMI)。

1.3.2 研发瓶颈

1. 核心技术缺乏

主流开关器件IGBT尚未国产化,其瞬间极限运行安全区域也有待研究;控制系统中的DSP和ARM单片机均依赖进口,有的国外公司甚至使用专用芯片,并有严格的加密措施;仿真软件MATLAB和Ansoft等均为英文版;商品出口受制于发达国家日益苛刻的EMC标准,就连不少电路拓扑和器件连接方式等也常被国外专利所限制;全数字智能控制技术较差,装置可靠性低,高端产品整机的90%和电力电子器件的95%仍然依靠进口,电力电子产业结构空洞,产业链十分脆弱。

2. 无源器件落后

高速开关高频功率序列的波长已接近器件尺度,导致空间能量分布失衡^[12],分布参数间的能量交换很难精准地映射到由集中参数构成的传统模型上^[13~15];磁件具有多值非线性,对温度、频率、气隙的依赖性,品种繁杂和瞬态参数测量难等特性,常令人困惑^[3],其设计准则、外特性、应力、散热和噪声的关系等仍尚无共识,有关参数常来自早年的外文资料,不少关键磁件尚需进口。电解电容器寿命太短,造成连锁浪费;电容器中的电解液不能适应高空/真空的负压环境。

3. 控制策略局限

逆变器为非线性控制系统,现有基于小信号交流方程、状态空间的建模方法和离散化的处理手法只能用于低频域的稳定性分析,基于分岔理论的建模方法过程烦琐、系统性差;控制策略仍然以传统的PID和滞环控制为主,不少现代控制理论的新型控制策略的应用尚处于实验室阶段^[16];包括PI调节器在内其参数的选取仍然采用试凑的方法,达不到优化设计的要求。逆变器的单元数量和层级急剧增多,具有网络

特征,但单元之间的组网方式、通信协议、控制功能的分层协调、容错技术和协调方式等分布式控制的标准化规范尚未形成,应用系统控制技术和系统控制软件水平较低。

4. 稳定分析欠缺

飞机、舰船和大型工作机械中往往是采用由直流母线加分布式逆变器群及其负载构成的独立电源系统,独立电源系统的稳定性分析尚无有效方法,而所沿用的基于 Lyapunov 理论的暂态能量函数(transient energy function, TEF)的分析方法,虽然广泛用于电力系统大扰动分析,但不适用于独立电源系统。文献[17]采用输入-状态稳定(input-to-state stability, ISS)理论解决独立电源系统的稳定性问题,但是,该方法要成为普遍接受的设计准则还需要大量工程实践的支持。

5. 瞬态拓扑稀缺

现有的各类拓扑都是在诸半导体器件完全导通或截止的理想状态构建的,研发时再根据拓扑中所涉及的电源、电阻器、电感器和电容器的排列组合,组成等效电路,建立相应的电路微分方程和状态方程。在不少仿真软件中也是将半导体器件当做非 0 即 1 的开关来运行的。然而,随着开关频率的不断提高,器件开关时间虽然越来越短,但开关时间在器件工作时间中所占的比例却越来越大,研发过程中暴露出的不少问题均表明再将这一客观存在的过渡过程忽略将无法进一步提高整机的性价比。

6. 综合认知不足

逆变器的工作电压越来越高、输出功率和功率密度均越来越大,对 di/dt 为 $10^3 \text{ A}/\mu\text{s}$, du/dt 为 $10^4 \text{ V}/\mu\text{s}$ 环境下大尺度电力电子装置的 EMI 难以准确测量和计算,EMC、噪声、应力和热设计仍处于经验和摸索阶段,特别是对瞬间以极大功率释放极高能量的功率脉冲系统中电力电子器件的选型仍处于裕量过大的浪费状态,电力电子器件极限应用的理论和失效机理认知不足。缺乏复杂激励下的电力电子系统电磁学-力学-声学-热学的耦合模型、优化设计方法和标准规范,试凑、仿制、上网和查手册等常常为研究开发过程中的无奈选择。

7. 数学建模艰难

在功率变换的分析、控制系统设计和吸收电路/软开关的配置等研发过程都依赖于各类数学模型。逆变器为强非线性系统,但由于建模艰难现行研究总是采用各种方法来进行线性化,而忽略其非线性行为^[18]。文献[14]、[15]提出按能量的流向来建立推挽变压器的模型,文献[19]系统地论述了状态空间平均法、大信号模型、小信号模型、平均开关模型、统一电路模型和离散影射模型,文献[20]提出可解析描述具有 N 个状态变量、一个开关周期内 M 次拓扑变化的模型。但现行的模型有的过于复杂,有的适用范围有严格限制,且普遍存在着相似度差的问题;在十纳秒级开关过程和十万赫兹级脉冲功率序列的作用下,器件三维分布参数间的能量转换过程很难恰当地映射到平面模型上;根本原因是实际电容和实际电感在本质上是分数阶的,而现行模型却基本上都是整数阶的,而具有普适性的分数阶数学模型有不少数学物理问题仍有待于解决^[21];数学表达中普遍存在的病态数学问题又使得当参数初始值等

输入数据有微小扰动时会引起解的大扰动,即使改变多种算法仍无济于事,阻碍着逆变器理论研究和高水平新产品的开发。

8. 优化设计极少

在电力电子学的科学计算过程中往往没有解析解,以非线性最优化为例,其数学模型由目标函数的极值 $\min f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, 约束条件 s. t. $g_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq 0$ 和 $h_j(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$ 构成。因 m 个不等式 g_i 、 l 个等式 h_j 和目标函数 f 的组合通常是非线性的,其数学模型常常没有解析解,而数值解的寻优结果却又与初值解的设定有直接关系,既稳定且又有实用价值的全局最优数值解往往很难觅得。

这些科学计算中常出现的上述问题在电力电子学中表现得尤为突出^[22~25],因此研发过程的多目标多约束条件的优化可行设计多优化设计极少^[3];目前逆变器研发阶段仍然停留在可行设计的水平,虽然容易获取方程解但顾此失彼导致整机性能价格比低;样机仿制、从网上或商品软件上获取数据、子程序和功能块也常被研发人员普遍采用,但是优化设计仍然是自主研发的必经之路。

9. 能量平衡不易

大电网的惯性巨大,而逆变器的动态响应却为毫秒级,并网后构成的复杂系统,在数百毫秒级的闪变大扰动下已涌现出不少新问题;DC 极微电网/微电网均是一种动态响应快的理想电源模式,它连及微电源、储能、负载和大电网,通过能量控制中心(energy control center, ECC)操纵双向逆变器构筑稳定可靠的供电系统。但该系统的适度模型、控制策略、保护措施、长寿命的逆变器、逆变器直流输入阻抗和交流输出阻抗等电源特征的智能测量等都尚不完善,难以实现系统的能量动态平衡^[26]。

1.3.3 将来展望

1. 新型开关器件

碳化硅器件可达 10kV/5kA,将在高压大电流领域,氮化镓器件在数百伏数十安培的领域取代 IGBT,这些功率器件具有低通态电阻、低通态压降和可在 600℃ 温度下稳定工作的显著特点,特别是由碳化硅 MOS 与碳化硅二极管反向并联构成的开关器件甚至不存在反向恢复电流,方便吸收电路/软开关的设计,将为逆变器的发展带来显著的变化。如日本某公司研制的 11kW 逆变器,采用碳化硅器件后损耗和体积均减少了七成,采用碳化硅器件后光伏逆变器的效率达到 98%,成本正在不断降低^[27]。开关器件走出高原期后,将可望给逆变器带来一系列质的变化。

2. 完善开关过程

半导体器件的开关过程引入功率变换器拓扑分析中来,瞬态拓扑簇得到建立和推广,与之相适应的适度数学模型和仿真软件得到普及,软开关理论和实践都得到完善,其硬件被集成到开关器件的半导体基片上。

3. 新型电解电容

兼有高功率密度、高能量密度和能在极短时间内提供/吸收高峰值电流等可贵特

点的电容器^[5]将得到普及,广泛用于抑制浪涌电压、光伏/风力的稳定供电、电网的削峰填谷和有源滤波等技术层面中。电解电容器和逆变器的寿命都数倍延长。

4. 新型电路元件

忆阻器(memristor)的阻值依赖于通过它的电荷,是电阻、电感和电容之外的第四种基本电路元件,具有其他三种基本元件的任意组合都不能复制的特性,将在模型分析、基础电路设计、电路设计和提高装置功率密度等方面改变电力电子学^[28]。

5. 新型电磁材料

磁性材料朝着高频、高磁导率、高饱和磁感应强度、耐高温和低损耗的方向发展;超导材料朝着高温、常温和简化附属装置的方向发展;电容器材料向高频低阻抗、低损耗、无电解液和内芯胞体串并联特性稳定等方向发展。

6. 新型磁件结构

在非晶纳米晶软磁合金等新型材料的不断涌现,软磁之间、软硬磁之间的最佳组合,叠层片式乃至薄膜式电磁复合器件的共同作用下,变压器电感器等磁件的体积或重量中所占比例从目前的三分之一左右,降至五分之一以下。

7. EMI 和 EMC

对逆变器完整系统的 EMI 的认知达到毫米级波长,对 EMI 的测量不受尺度限制;集优化设计、EMC 与专家系统为一体的软件商品化;普及纳米级透明电磁材料屏蔽;软开关附属器件已集成于器件之中,对 EMI 的抑制可达全频段(含热损耗)。

8. 高集成度器件

采用更先进的封装对电力电子开关器件、吸收电路/软开关、有源 IPEM 和无源 IPEM 进行三维综合集成^[29],为研发人员提供高效、高功率密度,低热量、低 EMI 的功能集成块,实现市场采购从单一器件向功能模块的转变。

9. 多功能积木化

功率变换器通过触摸屏设置即可方便地选择 AC/DC、DC/AC、AC/AC 和 DA/DC 的变化过程,实现功能多样化;大功率高电压的功率变换器可以快捷地由标准化的单件功率模块组建而成;研发对象由元件、装置级发展到较大独立系统级。

10. 分布电源系统

高效长寿命多功能双向逆变器能迅速获取逆变器电气特征的智能仪表和具有人工智能现代控制策略的 ECC 等瓶颈得到突破,DC 极微电源和微电源将以分布式网络化的形式得到普及,实现发电、输配电和用电的潮流双向流动。

11. 普适模型算法

不但考虑多值非线性、连续/断续、采用分数阶的数学模型得到深入的研究,而且能有效地模拟、延伸和扩展人脑信息处理^[30],实现标准化,可实现元件级、功能块级和系统级的上下兼容,研发人员不用重复建模,可根据研发的需要方便地进行不同程度的简化,以满足各不同层级的相似度要求;对模型适应性强、优化品质受应用背景和求解环境影响小的算法得到普及^[31]。

12. 新型仿真软件

系统级电力电子设计/仿真软件由诸元件级和功能块级子系统封装块构成,复合磁性材料、分布参数、损耗、电磁场、热和应力均被考量,满足拓扑选择、布局方式、母排设计、结构设计、散热设计、开关环境改善、PCB 和 EMC 设计等多方面的需求。

13. 构成标准体系

与网络技术结合,建立简明、高效和开放的各层体系的标准描述和规范的设计/仿真软件;建立系统、模型和算法的测试评估方法与标准。人类的成果共享,避免重复研究和无序竞争带来人力物力的巨大浪费,缩短研发周期,提高逆变器的性能价格比。

1.4 本章小结

研制逆变器需要电力电子技术/电力电子学的支持,所涉及的一级学科为电力电子与电力传动,有电力电子器件及其应用,电力电子系统及其控制两大学科方向。从逆变器的基本功能上可演绎出恒频恒压、变频变压、有源滤波、独立电源、焊接电源和储能电源等类别;从技术上可按主回路拓扑、直流电源性质、交流运行模式、输出波形、功率流向、隔离方式、控制策略、器件工作方式、调制方式和器件类别等来分类。

逆变器硬件可分为半导体器件、磁件(含变压器、电感器和传感器)、电容器和电阻器四大类;逆变器由输入/出滤波、EMC、PFC、电子开关、控制回路、采样调理电路、辅助电源和保护散热等单元构成,常用原理框图、控制系统框图和电路图来表述。逆变器软件的作用是为满足系统动/静态特性而提供开关指令。逆变器涉及半导体、电磁学、磁性材料、传感器、热学、控制理论、计算机软硬件和数学等学科。

IGBT、DSP、ARM、精细磁件和超级电容器等新型器件正支撑/改变着逆变器,但 EMC 功能尚不完善;IGBT 和 DSP 不能国产化、控制策略甚少、对 EMI/应力/热/声的设计粗放和方程求解困难等为研发瓶颈;随着碳化硅/氮化镓半导体、超级电容器、忆阻器和非晶纳米晶等软磁合金新材料新器件的涌现,随着对 EMI/EMC 研究的深入和独立系统级仿真/设计软件的面世,具有高效率、多功能、高集成度模块化、高密度、低污染低损耗和免维护特点的智能型逆变器将在电力生产消费的全过程中发挥日益重要的作用。

参考文献

- [1] 伍振鹭. 中国教育思想与人类前途. 教育资料与研究(台),2005,63:171~182
- [2] 電気学会技術報告. 新しい配電システムを構築するパワーエレクトロニクス技術. 2010, 53~60
- [3] 张占松,蔡宣三. 开关电源的原理与设计(修订版). 北京:电子工业出版社,2004:102
- [4] 钱照明,陈恒林. 电力电子装置电磁兼容研究最新进展. 电工技术学报,2007,22(7):1~11

- [5] 戸倉規仁. 四半世紀にわたる IGBT の開発の軌跡. 電気学会論文誌, 2011, 131(1):1~6
- [6] 刘红梅. 由专利信息透视超级电容器电极材料的研究进展. 电子元件与材料, 2011, 8:76~82
- [7] 電気学会技術報告. 磁気応用におけるシミュレーション技術. 2010:12~43
- [8] McLyman C W T. Transformer and Inductor Design Handbook. 3rd ed. New York: Marcel Dekker, Inc. 2004
- [9] IEC/TC65: Industrial-process measurement, control and automation. <http://www.iec.ch>
- [10] 電気学会技術報告. パワーエレクトロニクスシステムにおけるモデリングとシミュレーション技術. 2008
- [11] 康聚梅, 蒋云飞, 等. 主要国家和地区的太阳能产业发展综述(译文). 中国高新技术产业发展年鉴, 2011:396~462
- [12] 赵争鸣, 白华, 等. 电力电子学中的脉冲功率瞬态过程及其序列. 中国科学 E 辑, 2007, 37(1):60~69
- [13] Wu J J, HIDEHIKO Sugimoto. Indirect parameter estimate of electronic transformer. Transaction of China Electrotechnical Society, 2006, 21(12):26~34
- [14] 伍家驹, 等. 推挽变压器的漏感的一种间接测算方法. 中国电机工程学报, 2005, 25(23):129~137
- [15] 伍家驹, 等. 推挽变压器的一种外特性模型. 电工技术学报, 2011, 23(3):123~128
- [16] 電気学会技術報告. 電動機制御系のアドバンスト制御. 1999:3~45
- [17] Wu S Y, Mei S W, Zhang X M. Estimation of LISS(local input-to-state stability) properties for nonlinear system. Science in China(Series, E), 2010, 52(4):909~917
- [18] 王学梅, 张波, 丘东元. H 桥正弦逆变器的快变和满变稳定性及其混沌行为研究. 物理学报, 2009, 58(4):2248~2254
- [19] 徐德鸿. 电力电子系统建模及控制. 北京:机械工业出版社, 2005:6
- [20] 雷博, 肖国春, 吴旋律. 一种数字控制单相全桥逆变电路运动行为分析方法研究. 物理学报, 2012, 61(9):090501-1~11
- [21] 王发强, 马西奎. 电感连续模式下 Boost 变换器的分数阶建模与仿真分析. 物理学报, 2011, 60(7):070506-1~8
- [22] 伍家驹, 等. 单相不控整流器直流侧 LC 滤波器的四维可视化设计. 中国电机工程学报, 2011, 31(36):53~61
- [23] 伍家驹, 等. 非对称 T 型滤波器设计的一种五维可视化算法. 中国电机工程学报, 2010, 30(33):30~36
- [24] Wu J J, et al. The design method based on data visualization technique to optimize performance of T-network filter used in inverter. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(24):13~19
- [25] 伍家驹, 等. 一种用于 PWM 逆变器的非对称 T 型滤波器的设计方法. 中国电机工程学报, 2005, 25(14):35~40
- [26] Boroyevich D, et al. Future electronic power distribution systems a contemplative view //IEEE 2010 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment. New York, 2010:1369~1380
- [27] Mitsubishi Electric. Advanced power semiconductor technologies and their trends. Invited Talk at

- IEEE-ISIE, Hangzhou, 2012
- [28] Williams S. How we found the missing memristor. IEEE Spectrum, 2008, 45 (12):24~31
- [29] Lee F C. Evaluation of Power Electronics Technologies. Invited Talk at IEEE-ISIE, Hangzhou, 2012
- [30] 杨国为. 人工脑信号处理模型及其应用. 北京:科学出版社, 2011:295
- [31] 黎明, 李军华. 噪声环境下遗传算法的性能评价. 电子学报, 2010, 38(9):2090~2094

第 2 章 多维数据场的可视化方法

2.1 科学计算和三维可视化

2.1.1 逆变器的科学计算问题

主回路拓扑、无源滤波器和电子变压器决定着逆变器的效率、功率密度和电磁兼容性,建模、参数辨识和控制系统设计决定着逆变装置的电源调整率、输出调整率、输出精度、动态静态性能、并联模块间的不均流度和性能价格比^[1,2]。研发时常用到的数学工具是非线性优化设计,其数学模型由目标函数的极值 $\min f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, 及其约束条件 $s. t. g_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq 0$ 和 $h_j(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$ 构成。因 m 个不等式 g_i 、 l 个等式 h_j 和目标函数 f 的组合通常是非线性的,其数学模型常无解析解,而数值解的寻优结果却又与初值解的设定强相关,稳定且又有实用价值的全局最优解往往很难觅得^[3]。

逆变器研发过程中常常须要分析实验数据组、分析电路磁路电磁场、建立数学模型、设计电磁元件、设计散热系统、设计控制系统、将非线性方程线性化和实现 t 、 s 、 ω 、 z 域之间的相互转换等,这些都涉及基本的方程问题,然而科学计算中的方程往往也是没有解析解的,既稳定且又有工程价值的全局最优的数值解也同样很难觅得,阻碍着逆变器乃至电力电子功率变换器的优化设计。

平面的状态变量轨迹在逆变器控制系统设计过程中得到广泛应用,但它只适用于二阶系统的分析,不能适应电力电子学发展的需要。如非对称 T 型滤波器 LCL 结构中的输出端电感可调节逆变器内阻抗,从而达到减少并联模块不均流度的目的,但因其状态变量是三维的,平面的状态变量轨迹图就无法利用^[4]。

2.1.2 逆变器科学计算的动态

美国李泽元(Fred C. Lee)教授在 IEEE PESC 和 IEEE IPEDC 上多次强调了设计工作的重要性:复杂系统应模块化,以降低电子功率变换器的制作成本提高其功率密度和可靠性;设计过程应模式化,以减少研发成本缩短研发时间^[1]。

电子功率变换器的优化设计成了近年的研究热点,仅在 IEEE Transactions 上发表的论文就达数十篇之多,学者们在电力电子学的不同领域用优化设计都取得了不少成果,例如,文献[5]用遗传算法对用途广泛的单级 LC 直流滤波器和电感器的线圈结构铁心材料/气隙等进行了优化设计,大幅度提高了传统器件的功率密度;文献[6]在 DC-DC 和 DC-AC 变换器系统设计中用分段线性化、多重 Lyapunov 函数并结合凸函数优化来判断鲁棒性,提高了系统品质;文献[7]在可再生电源控制系统设计中,提出一种改进的信息熵粒子流优化算法,兼顾了种群选择性和多样性,提高了搜