

逆变器理论及其 优化设计可视化算法

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

28

TM464.2
1

XC

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诸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,也可多目标诸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:速底书装

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設計工具。

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_{do} 表达式[即式(3-17)]的证明	254
A.2 $i_d(t)$ [即式(3-20)]和 $U_c(t)$ [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 $\omega_c(L_1, L_2, C)$ 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400Hz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、中频和高频之分;
- (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。