

逆变器理论及其 优化设计可视化算法

(第二版)

伍家驹 刘 斌 著



科学出版社

逆变器理论及其优化设计的 可视化算法

(第二版)

伍家驹 刘 斌 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以低压逆变器为例,论述了 SPWM 电压型桥式逆变器和 SPWM 电压型推挽逆变器的工作原理,详细介绍了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,刘斌著.—2 版.—北京:科学出版社,2017.5

ISBN 978-7-03-051850-7

I. ①逆… II. ①伍… ②刘… 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(2017)第 033572 号

责任编辑:余 江 张丽花 / 责任校对:桂伟利

责任印制:吴兆东 / 封面设计:迷底书装



2012 年 12 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2017 年 5 月第 二 版 印张: 22 1/2

2017 年 5 月第二次印刷 字数: 533 000

定价: 116.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

四年前,《逆变器理论及其优化设计的可视化算法》第一版出版仅 8 个多月就售罄,并得到了中国科学院和浙江大学等同行专家的鼓励,也不时有读者的后续相关研究成果见诸各类文献,作者深感欣慰。但同时也为书中的一些疏漏和有待于与时俱进的观点给读者带来了困惑而倍感内疚,隐痛至今。

幸好科学出版社有再版的机制,作者在第二版中尽可能地补充了逆变器最新的前沿动态,并增加了若干新的学术观点于下述各章节:

3.2 节 电感器位于交流侧 LC 滤波器的四维可视化算法;

6.5 节 铁心交流电感器的设计;

6.6 节 旋阀结构可变电感器的概念;

7.4 节 逆变系统自适应谐振控制器设计;

7.6 节 基于平衡点的逆变控制及电感电流低维估计;

第 8 章 基于下垂控制的微电网内逆变控制;

第 9 章 三相并网逆变器的控制及调制。

第二版由初版的九章扩展为十一章,其中 7.4 节、7.6 节、第 8 章和第 9 章由刘斌执笔,其余各章节、附录等均由伍家驹执笔并统稿。本书力求将逆变器基本原理、逆变器优化设计和逆变器研发调试等几大知识浮点簇中离散的学术观点连贯起来,形成知识网络,作者不敢奢望对电力电子学的发展起到促进作用,只求能为同行们带来些许便利和启发。

普通市民在家电售货员的示范下,不到 2 小时即可学会家用变频空调的使用;

电工在技术人员的帮助下,花 2 天时间便可学会工业变频器的简单操作;

工程师们比对着英文说明书和实物,钻研 2 周可发挥变频器的基本功能;

研究生在导师的帮助下,钻研 2 年时间也能自行研制出逆变器。

然而,伍家驹自 1992 年考取国家公派访问学者赴日本国立福井大学系统学习逆变器以来已有 25 年,既有杉本英彦教授的不断指导,又有国内著名学者的热情帮助,尚有 30 多位研究生的教学互动,还仍认为逆变器学无止境,以至于耗时 1 年将近 5 年的新观点以及刘斌十余年的研究成果补充于《逆变器理论及其优化设计的可视化算法》之中,构成第二版向科学出版社交稿之际,却仍战战兢兢,有挂一漏万、名不符实之虑。

国内许多学者都在逆变理论及其优化设计算法上做出了贡献,读者亦博采众家之长。但是浩瀚文献背景各异,学术观点不一,体例参差有别,知识产权保护,论文专利均篇幅较短,很难将诸知识点系统化。科技日新月异,互联网也已普及,而信息筛选和加工远比信息获取占有更为重要,作者将对逆变器的若干研究心得串联起来,或许会给读者带来一些方便。

当今号称知识爆炸的时代,而知识是由事实和联系构成:零散的事实为广度,逻辑的连接为深度。通过微博、微信、研讨和学术报告 PPT 等形式可以快速地获取信息、填补系统化学习的一些空隙,并在诸认知点之间构建起新的联系,从而提高认知的深度,对提高发现问

题解决问题的能力也是有利的。但是,由于碎片化的知识属于事例集合而非逻辑关联的范畴,且具有推演过程简单和路径单一的特征,如果只依赖于获取碎片化的知识,则会逐渐缩小信息网络,无法形成逻辑的认知深度,难以对事物进行更深层次的剖析,弱化认知和创造力。

逻辑地将零散的信息连接成知识网络,可提高认知层次。碎片化的信息好比单词,常处于记忆的表层,因此需要语法将众多零散的单词连成语句,并需要逻辑将众多的语句连成段落才能表达思想。如果只依赖于获取碎片化的知识,就类似于用仅仅背单词的办法来学习外语,由于缺少听说读写译等逻辑环节,碎片化的单词难以与其他知识点相联系,不但难以随时提取,还会被逐渐挤出简单记忆的表层而遗忘掉。显然,书是将零散信息知识化的重要工具。

伍家驹虽慵懒迟钝却也幸免见异思迁,五十年来尽管有电工、学生、电气工程师、电气高级工程师、日本福井大学博士和南昌航空大学教授的经历,但却从未脱离电类专业且总是沉溺于奇妙的逆向变换之中。刘斌自上海交通大学博士毕业后曾在山特公司研发逆变器多年,执教于南昌航空大学之后也仍然从事着光伏发电和智能电网的纵向横向课题。作者近18年来一直在南昌航空大学为研究生、本科生讲授“电力电子技术”,已培养出30多名电力电子专业的研究生,对知识爆炸、研究生扩招和研究生教材/参考书滞后的窘境深有感触,因此,本书坚持“理论分析定量、问题源自项目、算法提供程序、调试结合故障、实验验证仿真”的特色。

各章节内容以国家自然科学基金项目“减小单相交流系统静态不确定度的研究”(50467003)、“功率变换器的优化设计及其可视化算法”(50967003)、“多线圈电子变压器外特性的可视化建模方法研究”(51167014)和“逆变器约束优化及其在线算法的研究”(61463037)为背景。感谢国家自然科学基金委员会及其评审专家的扶掖。

作者门下的研究生们也为本书付出了辛劳,在此向他们致谢!并共同将此书献给南昌航空大学六十五周年校庆。

感谢92岁高龄的伍步超老先生专门题写了书名。

感谢国家留学基金委员会的两次留学派遣!谢谢日本国立福井大学杉本英彦教授20多年来的热情传授和鼓励!

在此向参考文献的作者致敬!这些文献给了我们灵感。作者过于强调优化设计以至于不少学者的突出贡献并未收录到文献中来,导致书中见解屡现偏颇,如蒙赐教,请发往电子邮箱:wujiaj2003@aliyun.com 或 lb98029@sina.com。

作者

2016年12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
1.2 逆变器内涵、构成和框图	4
1.3 逆变器的现状、瓶颈和展望	7
1.4 本章小结	21
第 2 章 多维数据场的可视化方法	23
2.1 科学计算和多维可视化	23
2.2 多维数据场的可视化	24
2.3 非线性分度坐标的多维可视化	32
2.4 逆变器优化设计简介	34
2.5 本章小结	35
第 3 章 直流输入滤波器的优化设计	37
3.1 单相 LC 滤波器的四维可视化算法	37
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	50
3.3 有直流磁化电流的电感量测算	58
3.4 本章小结	60
第 4 章 交流输出滤波器的理论分析	62
4.1 SPWM 单相逆变桥的谐波分析	62
4.2 三维状态空间可视化	71
第 5 章 交流输出滤波器的优化设计	79
5.1 引言	79
5.2 LC 滤波器优化设计的二维可视化算法	80
5.3 非对称 T 型滤波器优化设计的三维可视化算法	83
5.4 非对称 T 型滤波器优化设计的四维可视化算法	91
5.5 非对称 T 型滤波器优化设计的五维可视化算法	104
5.6 本章小结	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
6.2 软磁材料的选择	114
6.3 磁件气隙的选择	119
6.4 永磁体预偏磁电感器的设计	121
6.5 铁心交流电感器的设计	134
6.6 旋阀结构可变电感器的概念	142

第 7 章 桥式 SPWM 逆变器控制系统设计	151
7.1 SPWM 及其死区补偿	151
7.2 基于数据可视化的 PI 控制器设计方法	159
7.3 基于 LC 滤波器的逆变器控制系统设计	168
7.4 逆变系统自适应谐振控制器设计	176
7.5 基于 LCL 滤波器的逆变器控制系统设计	187
7.6 基于平衡点的逆变控制及电感电流低维估计	193
7.7 逆变器系统的仿真分析	200
第 8 章 基于下垂控制的微电网内逆变控制	207
8.1 微电网逆变器的收敛性研究	207
8.2 存在功率滤波的微电网逆变的收敛性研究	216
第 9 章 三相并网逆变器的控制及调制	228
9.1 基于预测控制的三相并网逆变器控制系统	228
9.2 基于网侧电流修正的 LCL 三相并网逆变控制系统	239
9.3 三相三电平逆变器的断续调制	250
第 10 章 推挽式 SPWM 逆变器	258
10.1 推挽变压器的电磁分析	258
10.2 推挽变压器的一种外特性模型	270
10.3 低损耗型无源吸收电路	282
第 11 章 逆变器的硬件软件	291
11.1 硬件系统简介	291
11.2 逆变器子回路问题	300
11.3 逆变器主要程序简介	313
参考文献	324
附录	326
附录 A 第 3 章公式证明和主要可视化程序	326
附录 B 第 4 章主要程序	334
附录 C 第 5 章主要程序	342
附录 D 第 11 章可视化程序	351

第 1 章 逆变器概论

1.1 范畴、演绎和分类

1.1.1 学术范畴

笛卡儿(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》,2016 年 11 月 4 日《联合国气候变化框架公约》正式生效,全世界开启了可持续发展的道路,停止了走向气候灾难的脚步,使节能减排成为全球共识。我国政府也制定了一系列节能减排政策。

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,更是节能减排的重要环节。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的发展,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。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/转换能源和低碳低排放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、相位且恒频恒压(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)的基本能量转换形式,将电池电能、太阳能和风能等

变为工频交流电;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、机器人、电作动和电动汽车等新型行业都得到了广泛的应用。在以发光二极管(Light Emitting Diode, LED)为代表的现代照明中也采用了逆变技术。

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地降低输电成本、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的应用。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,但其核心的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 得到广泛的应用,其核心的部分的基本原理仍然是逆向变化。

7. 柔性输电

负载要求电源稳频稳压正弦度高,串联有源滤波/电压补偿可保证供电质量;柔性交流输电系统(Flexible Alternative Current Transmission Systems, FACTS)具有静止无功补偿、可控串联补偿、可控并联电抗器、静止同步补偿器和统一潮流控制器等功能,其基本原理均是逆向变化的逆变器。

8. 无线传输

无线传输已从广播、电视、和通信等信息传播领域扩展到能量领域,无线电能传输是移动设备的理想供电方式,它涉及机械、材料、电能变换、电磁场、检测技术、数字通信等多个学科,其必不可少的环节仍是高频及超高频变频器。为了提高电能传输功率和效率,降低电磁辐射的影响,实现系统安全和可靠运行,有不少问题仍有待于解决。

9. 固态变压器

固态变压器(Solid State Transformer, SST)可望替代电力变压器,将在混合微网得到广泛应用,它不但具有电力变压器的电压变换、隔离的功能,还电能质量调节、故障隔离、直流变压器等功能。能源互联网已从建立概念,发展到国家电网设置专门机构实施的阶段,固态变压器被认为是其电能路由器的理想设备和核心设备之一,变频器却是其技术基础。

10. 智能电网

智能电网(Smart Grid)是能源革命的关键环节^[2],逆变器在其中的位置和功能如图1-1、图1-2所示。

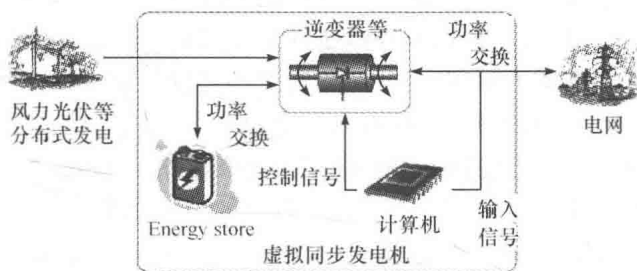


图 1-1 逆变器的位置

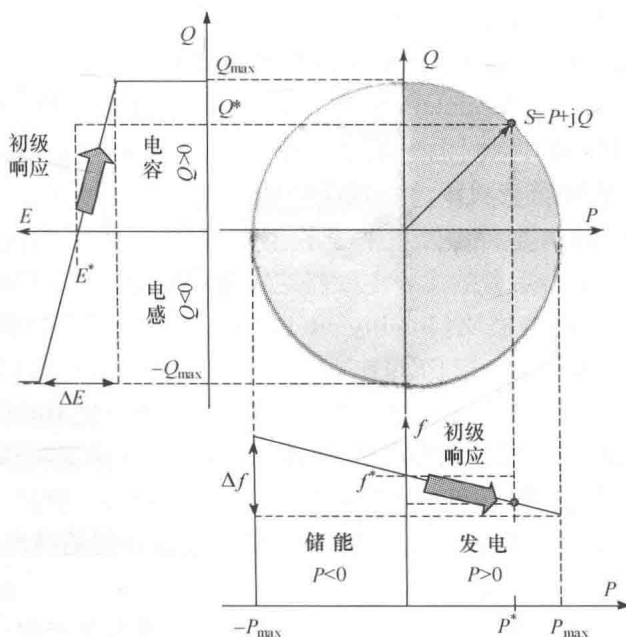


图 1-2 逆变器的功能

根据经济效益或其他优化目标定点地传输电能量,以适应电力系统配电将从现在的一对多的构架向多对多的形式转变,实现其核心功能仍然少不了逆变器。

1.1.3 技术分类

变频器种类繁多,侧重点不同分类方式亦不相同。

- (1) 从拓扑考量可有推挽、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) 从与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) 从交直流端连接与否来判断,有隔离型和非隔离型之分；
- (8) 从交直流隔离方式上考量,有高频隔离和低频隔离之分；
- (9) 从隔离变压器电流来判断,有电流连续性和电流断续型之分；
- (10) 从控制方式考量,有模拟控制和数字控制之分；
- (11) 从开关的工作方式考量,有软开关和硬开关之分；
- (12) 从输出频率考量,有工频、中频和高频之分；
- (13) 从滤波前输出电平考量,有双电平、三电平和多电平之分；
- (14) 从多电平的形式考量,又进一步可以有两电平(Two Level)、中性点嵌位(Neutral Point Clamped, NPC)、H桥级联(Cascaded H-bridge, CHB)和飞跨电容(Flying Capacitor)型之分；
- (15) 多电平逆变器中按嵌位的形式来分,又有电容器嵌位、二极管嵌位、有源中性点嵌位和混合嵌位等多种基本及其衍生形式；
- (16) 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)、空间电压矢量控制(Space Vector Pulse Width Modulation, SVPWM)和多电平PWM等形式；
- (17) 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；
- (18) 从电流电压等级考量又有常规、中高压和低压大电流之分；
- (19) 此外还有根据应用领域来分类的,如家电变频器、电梯变频器、电焊变频器和伺服变频器、牵引变频器、风电变频器和光伏变频等。

随着新材料、新器件的涌现和电力电子学研究的深入,特别是逆变器应用领域的拓展,其分类也会不断更新。

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类别。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。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 SPWM 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。

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

逆变器的构成可分为 13 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

由电力电子器件(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,基于功率印制电路板连接是常用的一种工艺形式。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 kHz 到数百 kHz 不等。在器件连接方式上有串联、并联和多电平等形式,还有基本拓扑及其衍生拓扑之分。

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. 常用传感器类

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;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 ,过流保护厂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、采用多层印制电路板 (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的有机地整合起来,将多功能、冗余及其容错策略融入到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、辅助拓扑及其相关软件的调整达到改变装置功能;或者在线地快速准确地剔除故障器件、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 PCS(Power Conditioner System, 功率调解器系统)和 PR(Power Router, 功率路由器)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,实现低成本的互为冗余。诸逆变器的信息采集、通信和协调控制是必不可少的。

13. 故障诊断系统

重要的逆变器在正式运行前及其运行中还需要对其进行状况评估、故障检测和寿命预测。主要采用正常工况下的输出相应、Miner 线性损伤理论和专家系统,构筑经验模型和物理模型,推导出正常状态下的预期输出,再对实际观察值进行数字信号处理,实时有效地提取特征参数,实现故障诊断;并通过历次检测数据的分析作出逆变器的寿命预测。

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。

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。

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。

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拓宽应用领域、新产品的研发、组合式创新和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

SCR 和可关断晶闸管(Gate Turn-Off thyristor, GTO)常用作大功率低频开关,金属氧化物场效应晶体管(Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor, 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 年山上倭三和赤桐行昌关于 IGBT 的发明专利(比 H. W. Becke 的类似专利申请早 11 年)^[3] 获批以来,电力电子器件正处在发展阶段的高原期,性能虽有改进,但尚无质的飞跃。优良指数 FOM(Figure of Merit)是衡量电力电子器件的重要指标, $FOM = J_c / (V_{cesat} E_{off})$, J_c 为硅片电流密度、 V_{cesat} 为饱和压降、 E_{off} 为关断损耗,第 6 代 IGBT 的 FOM 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 1-3 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。

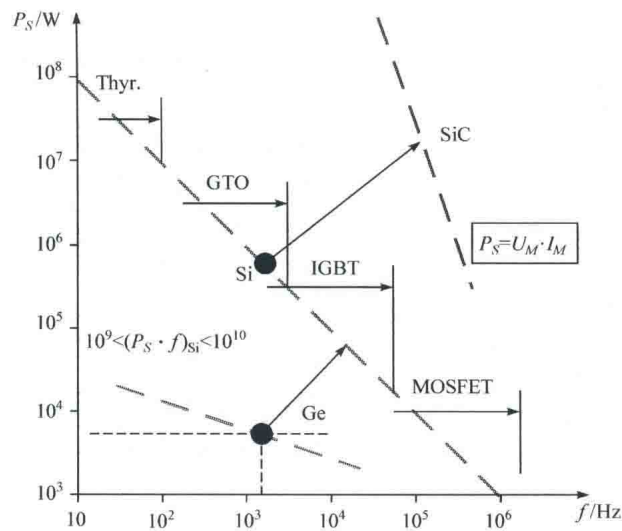


图 1-3 功率半导体器件的功率频率乘积

表 1-1 1200V 各代 IGBT 的 FOM 变化情况

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

最大结温越来越高也是功率半导体器件商品升级的另一重要标志,如第 5 代的 IGBT 为 150℃,而第 6 代的 IGBT 则为 175℃. 由于 IGBT 是由许多半导体单元压接并联而成,故过载能力较单晶元的晶闸管差,IGBT 的损坏 99%都是出在封装和压接上。

此外,电力晶体管(Giant Transistor,GTR)常被应用于强调可靠性的航空逆变器中;集成门极换流晶闸管(Integrated Gate-Commutated,IGCT)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。功率模块 IPEM(Integrated Power Electronics Modules)为三维结构,功率密度高电气性能好。有源 IPEM 集成多个电力电子器件、连接件和驱动保护,功率密度达 1000W/in³ (1in³=1.63871×10⁻⁵m³);无源 IPEM 集成多个磁件且追求扁平尺度,功率密度达 400W/in³;高功率密度的结构给散热和电磁兼容等优化设计提出来更高的要求。IPEM 代表着器件的发展方向,高性能组合集成器件简化了逆变器的回路接线,降低了装置的故障率和成本。为适应高速计算机电源正朝低电压方向发展,电压仅为 1V,电流却达数百安培,效率已超过 95%。

SiC 和 GaN 绝缘强度、热传导率分别是 Si 材料的 10 倍和 3 倍,导通电阻只有 Si 的 0.1%,开关速度和频率,是 Si 器件的 20 倍,工作温度可达 600℃,而 Si 器件仅为 150℃,将大大改善人们对半导体器件不耐温不耐压的传统印象,将大幅提高逆变器的电能转换效率、提高功率密度。尽管目前 SiC 等新型器件的市场价格是 Si 器件的近 10 倍,但是学界业界都对其大幅度降价仍然是充满着有根据的期待。

特别可喜的是,近年来采用国产 IGBT 器件所制造的逆变器已在动车组、风力发电、风机水泵、UPS、SVC 和高频电焊机等领域得到应用。但是,在 SiC 和 GaN 器件方面与国外仍有较大的差距。

功率半导体器件除了有图 1-3 所示的分类之外,最近在同种类中又按其应用领域的电压电流等级和主回路拓扑的特点有不同的封装,以分别适应家电、通用设备、中高压、低压大电流、伺服、电梯、UPS、有源滤波、电焊机、风力发电、光伏、电动汽车、铁路和矿山等不同领域用逆变器的特殊需求。

在高铁、航母和直流输电等领域,逆变器的电压越来越高电流越来越大,现有电力电子器件已无法满足工程需要,除了串并联之外,各类多电平逆变器也得到了长足的发展。多电平逆变器可产生 M 层阶梯输出电压,所得 SPWM 波的谐波分量少、滤波负担小、一次动作的电压变化率只有两电平逆变器的 $1/(M-1)$,并且损耗也较低。

我国的生产的晶闸管种类齐全,质量可靠,技术水平已居世界前列,特别是在 2015 年 10 月研制出了具有世界最高电压等级 6500V 200A 的 IGBT。但是,从整体来看,以 IGBT 为代表的全控器件却仍处于品种不全、成品率低和国际竞争力不足的亟待取得突破的状态。如光伏电站出现的问题中,有 50%是由器件所造成的。

2. 改善开关条件

电力电子器件的开关过程的电流电压简约关系如图 1-4 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),由于未加吸收电路来改善开关环境,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 1-4 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,理想的吸收电路的也称为软开关,如图中的“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。

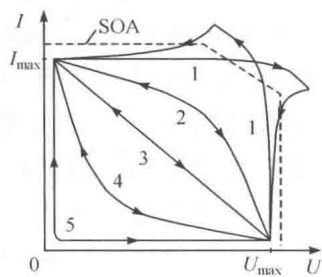


图 1-4 IGBT 的开关过程

通常厂家所提供的 SOA 是指功率半导体器件本身的安全工作区,器件装入主回路后,受杂散电感等的影响功率半导体器件的安全工作区将会减小,也就是说在实际使用时应该考量主回路安全工作区;当电力电子器件并联或串联时,其安全工作区也要缩小,如 2 个 IGBT 并联单管静态安全工作电流通常要降低 10%,而 4 个 IGBT 并联时单管安全工作电流要降低 20%;如图 1-2 所示由于功率半导体器件在导通时会产生过电流、截止时会产生过电压,故深入研究尚有关断安全工作区、短路安全工作区和反向恢复安全工作区之分。

电磁兼容、开关损耗、电流电压应力和噪音等问题都吸收电路/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,完成对变流电路的控制。

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、RAM(Random Access Memory,随机存储器)和 EPROM(Electrically Erasable Programmable Read Only Memory,电可擦除可编程只读存储器)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的应用,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。单片机电源电压越来越低,目前已降到 1 伏,给周边 IC 集成块的选区提出了更高的电压要求。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,但尚未实现完全国产化。

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。但是,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制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家接受,互联网+和快递上门送货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,决定着逆变器主回路的电磁惯性,对检测、控制和保护回路的性能也有着重要影响。逆变器的效率、功率密度、串/并联模块的不均匀度和谐波分量不仅与主回路构成以及上述电力电子开关器件的产品性能和使用条件有关,而且与电容器电感器等无源器件有着密切的关系。

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。常用的电容器的有关特性如表 1-2 和图 1-5 所示^[4]。

表 1-2 电容器的能量密度和功率密度

	薄膜电容器	铝电解电容器	电双重电容器	锂离子电容器	锂离子电池
最高电压	2400V	450V	2.5V	3.8V	4.2V
充放次数	数十万次	数十万次	数十万次	十万次	一万次
环境温度	-40~155℃	-40~105℃	-25~85℃	-20~80℃	-20~60℃
充放速度	快	较快	较快	较慢	慢
充放控制	不要	不要	不要	必要	必要
脉冲功率	大	较大	一般	小	小