

# 大功率电力电子变换器技术及其应用专辑 特邀主编评述

查晓明,段善旭  
(武汉大学,华中科技大学)

大功率电力电子变换技术在提高大型互联电网运行可靠性、中高压大容量电力负荷供电与驱动、新能源中高压并网发电、电能质量治理以及大规模电力储能有着广泛的应用前景。近年来,中高压大功率电力电子变换器在拓扑结构、调制方式、控制策略及系统构成等方面取得了长足进展,有效地解决了大功率电力电子变换器应用系统的稳定性和系统鲁棒性问题,提升了大功率电力电子变换器自身运行的安全性和可靠性。此外新技术、新材料及新器件的应用也大大提升了大功率电力电子变换器的变换效率及运行极限。为了总结近年来大功率电力电子技术变换方面取得的成果,梳理大功率电力电子变换技术的发展方向,《电源学报》特别推出“大功率电力电子变换器技术及应用”专辑。专辑征文得到了各高校和企业同行的大力支持与积极响应,经过认真细致的评审,收录 18 篇论文。本专辑论文反映了大功率电力电子变换器方向研究的热点问题。其中,涉及到大功率多端口及多电平变换器拓扑结构方面论文 12 篇,包括多端口变换器 2 篇、模块化级联与多电平变换器 6 篇和高增益 DC-DC 变换器 4 篇;涉及到应用系统的功率控制及能量管理方面论文 6 篇,包括各种变流器系统功率控制策略 4 篇和能量管理 2 篇。

大功率多端口变换器的拓扑研究逐渐成为研究热点,随着配网电力系统互联互通、新能源多端口接入以及工业现场高压电机群变频控制等应用越来越广泛,其研究将会更加深入。武汉大学宫金武和查晓明等对多端口变换器拓扑方面的最新研究进行了总结和归纳,结合智能电网的需求,从容量、效率、成本、可靠性方面分析了各种多端口拓扑的优缺点和适用范围,并在此基础上展望了大容量多端口变换器的拓扑构造方法,在保证足够的控制自由度和能量传输路径条件下,通过器件或者模块复用的方式,简化主回路结构,达到减小体积、成本、变换级数和损耗的目的;查晓明、王盼和刘飞等提出了一种基于九开关逆变器单元级联的多端口能量回馈型高压变换器,该变换器降低了能量回馈压力,大幅减少了开关、电容以及变压器绕组数量,提高了系统可靠性。端口扩展灵活,对于多负荷工况具有较强的适应性。

模块化级联多电平变换器采用子模块级联形式,具有损耗低、波形质量好、安装维护容易、可冗余容错,可靠性高等诸多优点,是近年来研究的热点课题。西安交通大学史书怀、王丰等研究了基于 MMC 的高升压比直流变压器调制策略,针对基于模块化多电平变换器构建的 face-to-face 拓扑在不同高压大功率领域的应用特点,提出了一种不依赖变压器变比的调制策略。该调制策略可灵活改变

电压变比,兼顾升压、降压功能,对 MMC 的高升压比系统设计有一定的指导意义。

三电平功率变换器一直以开关器件少、电路结构简单等优点,也是大功率电力电子技术开展工程应用研究的方向之一。华中科技大学李含其等针对传统 LLC 谐振变换器难以适应宽电压范围输出应用的问题,提出了一种采用移相控制拓宽三电平 LLC 电压增益范围的方法,并提出了三电平 LLC 谐振变换器电感比的设计原则,不仅拓宽了输出电压范围,还提高了全负荷范围内的系统效率;王涛等将简化三电平矢量调制(SVM)应用到三相三线 Vienna 整流器中,提出了一种数字化实现方式,简化了数字化实现过程中的算法流程和计算难度,具有很好的工程指导意义;肖梁乐针对 Vienna 整流器中点电压不平衡的问题,研究了三电平空间矢量调制对 Vienna 整流器中点电压产生的影响,并提出了一种中点电压波动的抑制策略。所提策略不仅解决了中点电压不平衡的问题,还大幅提高了输入电流的波形质量。同济大学朱琴跃等针对 NPC 三电平逆变器单相桥臂半导体器件的开路故障,通过分析各类故障特征提出了相应的故障后逆变器状态空间模型,由此构建状态观测器,可以快速检测故障发生,并能准确识别故障器件和类型,达到了预期目标。

级联多电平拓扑结构是大功率应用系统首选的典型拓扑,更多关注是面对实际应用出现的各种问题。南昌工程学院和许继集团有限公司张扬和章顺华等采用充电电源和补能电源相结合的全直流供电系统构建了一种新型的 STATCOM 试验平台。该平台有效降低了 STATCOM 接入电网的要求,为解决高压大容量链式 STATCOM 的全功率试验提供了一种新的方法。

高增益 DC-DC 变换器在新能源发电汇集等领域应用前景较好,实现高效率、高功率密度及高可靠性是关注的热点。华中科技大学肖阔等针对 Boost 变换器在非额定工作状态下的稳态性能与动态性能较差的问题,提出了一种滑模变结构控制与 PI 控制器相结合的控制策略,通过在滑模控制器中引入指数趋近律,提高了 Boost 变换器在宽范围工作下的稳定性及动态性能。辽宁工程技术大学荣德生等提出了一种具有开关电容/电感的改进型交错并联高增益 Boost 变换器,该变换器具有电压增益高、磁性元件体积小、电感电流纹波小、开关电压应力低等优点,为 boost 变换器的设计提出了一条新思路;郭瑞等提出了一种组合式双输入高增益 Boost 变换器,通过磁集成技术减小了变换器的体积和重量,并通过对称拓扑概念提出了组合式高增益 Boost 变换器,降低了开关管电压应力及电流

纹波,经验证,组合式双输入 Boost 变换器与传统的变换器相比具有较高的电气性能;此外,作者还采用交错并联磁集成可扩容理论,深入研究了适用于大功率系统的六相交错型非隔离全耦合双向功率变换器,不仅降低了每个通道的电流应力、增大功率输出容量、降低总电压电流纹波,而且同时改善了变换器的动态响应特性,适用于要求较高的大功率直流系统。

功率控制策略是大功率电力电子变换器应用系统功能和性能实现的重要途径,也是系统稳定性、安全性和可靠性的重要保证。华东交通大学宋平岗等针对 MMC-MTDC 系统,提出了一种基于滑模控制理论的 MMC 自适应下垂控制策略,所提控制策略可有效避免暂态过程中裕度较小的可能工况,同时提高系统动态性能和响应速度,其研究成果可对 MMC 控制器设计提供参考。华中科技大学肖阔等针对 Boost 变换器在非额定工作状态下稳态性能与动态性能较差问题,提出了一种滑模变结构控制与 PI 控制器相结合的控制策略。所提控制策略在滑模控制器中引入指数趋近律,提高了 Boost 变换器在宽范围工作下的稳定性能及动态性能。同济大学朱琴跃等基于滑模变结构原理,对应用于牵引变流器网侧电流控制策略开展研究。其电流控制策略具有较好的网侧谐波抑制效果,且提高了电流跟踪控制精度,具有一定借鉴意义。湖南大学张志文等提出一种基于功率预测的三相电压型 PWM 整流器直接功率控制策略。该策

略针对功率跟踪存在的稳态偏差采取了误差反馈校正以优化模型、提高精度,并通过估算电网电压实现了无电压传感器的控制策略,有效节约了系统成本、提高了系统鲁棒性。

能量管理策略是满足不同应用场景需求的关键,大功率电力电子变换器应用系统在多源互补、多元互动方面表现出较强的发展势头,其研究也必将得到深入。西南交通大学杨继斌等研究了一类以电网、动力电池和超级电容为动力电源的储能式混合动力有轨电车系统,提出了一种基于系统工作模式的逻辑门限式能量管理策略,并对影响列车动力性能的主要控制参数进行了优化,其研究成果可为电源的冗余配置提供参考。湖北工业大学杨雯、熊兰等研究了一种带有储能的混合级联光伏逆变器结构,提出了基于特定谐波消去(SHE)与载波移相(PS-PWM)调制的协同调制方法,有效地降低了输出电压中低次谐波含量与总谐波畸变率(THD),为其能量管理策略的研究奠定了基础。

本专辑介绍了大功率电力电子变换器技术及应用的最新研究成果与进展,且多数论文具有仿真和实验验证,有较好的参考价值。希望通过本专辑的出版能对大功率电力电子变换技术发展起到一定的推动作用。最后,由衷感谢各位作者对本专辑的贡献以及各位专家学者在本次专辑征文、投稿和评审过程中给予的大力支持!

## 特邀主编介绍



**查晓明**,博士,武汉大学电气工程学院教授、副院长、博士生导师,中国电源学会常务理事,IEEE 会员,武汉电源学会副理事长,湖北电机工程学会副理事长,中国电力电子与电力传动学科高校学术年会组织委员,中国电机工程学会直流输电专委会委员。2014 年入选武汉市

“黄鹤英才计划(专项)”。

主要研究方向:电力电子功率变换及系统、智能电网及新能源发电中的电力电子技术应用、电能质量分析与控制、高压大功率电机的变频调速技术等。主持和参与国家自然科学基金重点项目、国家重点研发计划项目课题、国防 973 专题、科技部 973 项目课题、国家自然科学基金重大项目等多个项目,公开发表论文 100 余篇,其中 SCI 收录论文 26 篇,EI 收录论文 60 余篇,授权发明专利 20 余项。曾获军队科技进步奖一等奖、湖北省科技进步二等奖、湖北省技术发明二等奖、湖北省优秀博士论文等奖励。

已产业化的研究成果包括大功率电机用的高压变频器、动态无功补偿装置(静止同步补偿器 SVG)、有源电力滤波器(APF)、以及应用于电力系统及新能源领域测试专用的各种高电压大功率试验电源等。



**段善旭**,工学博士,华中科技大学电气与电子工程学院教授、博士生导师。IEEE 高级会员、中国电机工程学会高级会员、中国电工技术学会高级会员,湖北省高级专家协会会员、中国电工技术学会电力电子学会理事。曾获教育部新世纪优秀人才、湖北省新世纪高层次人才工程人选“中达学者”、“华中学者”等称号。

主要研究方向:电力电子与电力传动专业的教学、理论和应用研究。在国内外重要刊物、国际会议上发表 SCI/EI 等收录的科技论文 200 余篇,出版专著、教材 2 本,授权中国专利 30 余项,研究成果曾获得省、部级科学技术进步奖二等奖 4 项、三等奖 2 项。

已结合国家重点研究计划、国家自然科学基金以及省部委攻关计划等项目,在新型电力电子电路与系统、电力电子变换器模块化并联运行控制机理及应用、基于可再生能源的分布式混合发电系统能量变换与并网控制、高性能船用电能变换与控制装置研究、电力电子装置的电磁兼容技术、电力系统电能质量控制技术等领域取得了一系列具有创新性的研究成果,取得了良好的社会效益和经济效益。