

一、提名类别：技术发明奖

二、项目名称：功率变流器可靠运行与状态监测方法

三、提名单位（专家）：重庆大学

四、项目简介：

本项目属于电气工程学科。

功率变流器的可靠性与变流器各个元件的可靠性有关，英国 EPSRC 资助项目对工业领域中功率变流器可靠性的调查统计结果表明，变流器中半导体器件的故障比例占 34%，是变流器中最容易失效的元件之一。应用于高可靠性领域中的功率变流器，由于所处理功率的波动性、间歇工作状态以及工作环境的变化，导致变流器电、热应力不均衡，在运行过程中易产生热疲劳老化，降低可靠性。

在国家自然科学基金、校企合作等项目资助下，本项目深入研究了功率器件的失效机理和功率循环加速老化试验方法，疲劳老化失效关键特征量的在线提取方法，基于端部电热特征量的非侵入型变流器状态监测方法，以及多时间尺度下计及寿命消耗的主动热管理控制策略等关键问题。从加速老化试验、非侵入性在线监测和热平衡管理的新视角发明了一套功率变流器的可靠运行和状态监测方法，研究成果在行业得到了应用，解决了困扰了行业发展的瓶颈性问题，取得了较好的经济与社会效益。

五、主要完成单位及创新推广贡献：

重庆大学、同济大学、北京空间飞行器总体设计部为项目主要完成单位。

1 功率循环加速老化试验平台

本项目组发明了功率器件加速老化试验平台，实施方法中主要解决了以下两个关键问题：一是如何提高老化速度；二是如何保证测量精度。提出了多功率模块老化试验电路，通过旁路开关有序通断，完成了各模块独立功率老化试验。提出了一种基于实时结温反馈的散热器动态性能优化数值算法，据此完成了散热器优化设计。为降低杂散参数对老化特征量测量精度的影响，完成了功率模块、驱动及检测电路的一体化设计。发明了由设备控制层（PLC）和集中控制层（WinCC）构成的分层监控系统，实现了多老化特征量的自动测试和数据处理压缩，进一步保证了测量精度及一致性。

2 基于温敏电参数的功率器件结温测量方法

项目组基于功率器件模型、参数温度特性及器件开通关断过程分析探索确定温敏电参数。依据功率模块在不同结温下的栅极开通实测波形，其米勒平台电压随结温升高而下降；根据不同功率模块开通米勒平台电压与结温的自标定结果，线性拟合度均在 0.998 及以上，结温变化率为 $-7\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ 左右。开通米勒平台电压作为功率器件温敏电参数均具有优良的温线性度和敏感度，而且不受模块疲劳老化影响。在此基础上，发明了一种恒压恒流复合驱动电路，实现了基于米勒平台电压的结温在线估测，估测结果与红外直接测量结果之间的平均误差小于 2.5°C 。

3 非侵入型功率变流器在线状态监测方法

项目组揭示了功率变流器关键器件的疲劳老化失效模式与端部电热特征量之间的作用规律，仔细分析了特征参数的失效耦合特性、失效敏感性和在线监测实现的影响因素，提出了非侵入型功率变流器在线状态监测方法。其核心思想是在线实现状态监测为目标，进行状态监测特征量的甄选，将失效模式与特征量的表征进行解耦分析，排除各种复杂因素对特征量的影响，提升特征参数的失效敏感性。针对不同的失效模式，将失效解耦的在线状态监测方法落实到了实施中，发明了基于谐波监测、短路电流和降温曲线的一整套在线状态监测方法。

4 多时间尺度下主动热管理控制策略

项目组功率变流器关键部件的失效主要受热载荷影响，而热载荷又包括变流器工作频率、负荷波动频率、外部环境温度频率等多时间尺度。不同时间尺度的热载荷将对功率变流器关键部件的结温产生不同的冲击，将导致不同的寿命消耗。常规的热载荷管理方法缺乏必要的宏观策略，热载荷控制目标较为模糊，且易对变流器的运行产生负面影响。本发明技术从功率变流器热载荷分析入手，在揭示实际工况下变流器寿命消耗分布规律的基础上，一方面从宏观管理的角度平滑变流器低频热载荷，另一方面从结温管理的角度减小关键部件的结温波动，达到功率变流器热载荷的平滑变化，延长变流器的使用寿命。

六、推广应用情况:

研究成果涉及系统仿真、样机研制和产品系列化等，先后应用于我国国防军工领域，应用于多家大型企业的相关产品研发项目中，研制出的相应产品广泛应用于国内外电力系统装置、电动汽车充电桩、风电并网发电、光伏并网发电、电源老化测试等领域，促进了行业的发展。

七、本项目成果曾获科技奖励情况:

无

八、主要知识产权证明目录:

知识产权类别	知识产权具体名称	授权号	权利人	发明专利有效状态
发明专利	基于数值迭代的功率器件散热器动态响应性能优化方法	ZL201510761224.9	重庆大学	有效
发明专利	多 IGBT 模块综合老化特征量测量装置	ZL201610318578.0	重庆大学	有效
发明专利	IGBT 耦合热阻抗的离散化方波提取方法及装置	ZL201610156973.3	重庆大学	有效
发明专利	具有多功能的 IGBT 驱动电路	ZL201610057013.1	重庆大学	有效
发明专利	三相系统直流母线电容的在线监测方法	ZL201610058177.6	重庆大学	有效
发明专利	一种变流器功率二极管结温测量系统与方法	ZL201510527128.8	同济大学	有效
发明专利	IGBT 老化状态检测系统	ZL201610368682.0	重庆大学	有效
发明专利	基于观测器的变换器参数在线辨识方法	ZL201610452198.6	重庆大学	有效
发明专利	变流器电解电容的监测方法	ZL201610368295.7	重庆大学	有效
发明专利	基于驱动电路自适应调节的功率模块热管理装置及方法	ZL201510069108.0	重庆大学	有效

九、主要完成人情况表

第一完成人：杜雄，教授，工作单位：重庆大学，完成单位：重庆大学。在项目中负责项目总体管理，制定技术路线定和协调项目顺利完成；在该项目研究中投入的工作量占本人总工作量的80%。其创造性贡献主要有：提出了基于降温曲线的热网络参数辨识方法，提出了宏观长时间尺度下主动热管理的思路，提出了多老化特征量快速自动测量方法。

第二完成人：孙鹏菊，教授，工作单位：重庆大学，完成单位：重庆大学。在项目中负责协助研究总体方案、制定技术路线、协调项目完成；在该项目研究中投入的工作量占本人总工作量的70%。其创造性贡献主要有：提出了基于短路电流的IGBT模块在线状态监测方法；提出了不受老化影响的结温在线测量方法；提出了直流母线电容的在线监测方法。

第三完成人：罗全明，教授，工作单位：重庆大学，完成单位：重庆大学。在本项目中主要负变流器参数的辨识和可靠性设计。在该项目研究中投入的工作量占本人总工作量的70%。其创造性贡献主要有：提出了基于观测器的变换器参数在线辨识方法；提出了基于关断轨迹调整的主动结温控制策略。

第四完成人：向大为，副教授，工作单位：同济大学，完成单位：同济大学。在项目中主要负责结温测量方法的研究。本项目研究中投入的工作量占本人总工作量的60%。其创造性贡献主要有：提出了变流器功率模块结温测量的自标定方法；提出了一种基于谐波监测的变流器功率模块在线故障诊断方法。

第五完成人：张晓峰，工作单位：北京空间飞行器总体设计部，完成单位：北京空间飞行器总体设计部。在项目中负责项目主动热管理控制策略的应用技术；在该项目研究中投入的工作量占本人总工作量的40%。其创造性贡献主要有：

第六完成人：周维维，教授，工作单位：重庆大学，完成单位：重庆大学。在本项目中主要负责综合热管理控制技术的研究。在该项目研究中投入的工作量占本人总工作量的40%。其创造性贡献主要有：提出了平滑结温波动的综合热管理控制策略；提出了IGBT老化状态监测方法及装置和用于IGBT结温估计的驱动装置及方法。