

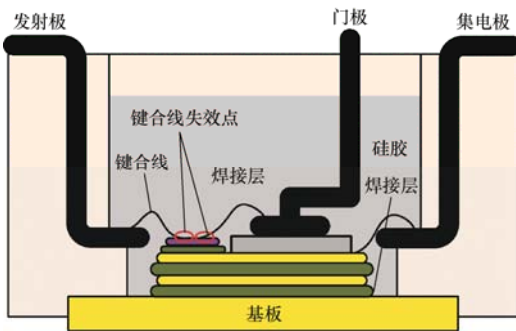
特邀专栏

电力电子器件及系统可靠性

客座主编：杜 雄 教授（重庆大学）
汪 飞 教授（上海大学）
客座编辑：罗皓泽 研究员（浙江大学）
马 柯 教授（上海交通大学）
马铭遥 教授（合肥工业大学）
张晓康 博士（上海大学）
策划编辑：薛丽苗（《电气工程学报》编辑部）

1 电压源型并网变流器状态监测与故障诊断方法综述

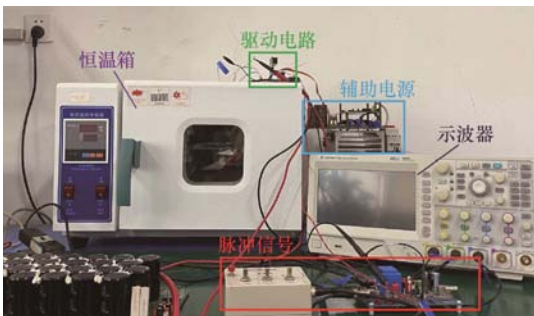
宋少鹏 田艳军 李 欣 徐小奇



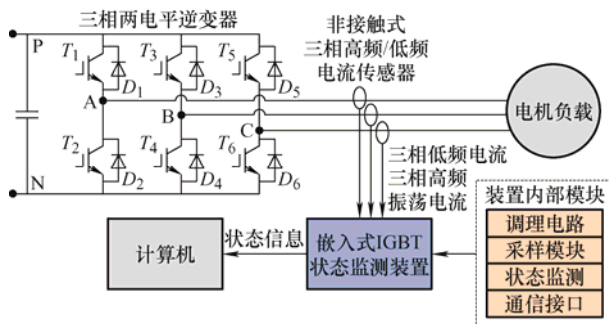
摘要：电压源型变流器(Voltage source converter, VSC)广泛应用于分布式发电和储能单元等并网领域中，VSC 系统严重影响并网系统的稳定运行。开发并网 VSC 潜在故障的健康状态监测和早期观测识别，对于保证变流器持续安全稳定可靠运行具有重要意义。首先，对并网 VSC 的主电路结构及常见电气故障进行了总结和分析，包括 DC-link 电容故障、绝缘栅双极型晶体管(Insulated gate bipolar transistor, IGBT)故障、滤波电感故障、交流侧电流传感器和电压传感器故障等，并阐明了故障发生机理与故障特性；其次，以并网 VSC 状态监测和故障诊断方法为核心，对国内外学者的相关研究进行了分类和归纳，对比总结了不同状态监测和故障诊断方法的优点和不足；最后，对并网 VSC 状态检测和故障诊断技术未来的研究方向进行了展望。

14 IGBT 模块 V-I 特性曲线簇建模及其结温提取应用

刘红涛 王颢棋 张晓康 任林涛 罗 雨 汪 飞



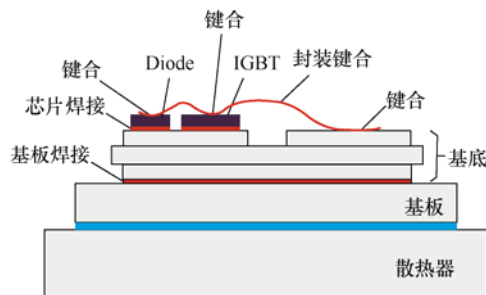
摘要：绝缘栅双极型晶体管(Insulated gate bipolar transistor, IGBT)以其高效率、大容量和低成本等特点在新能源发电及储能、高压直流输电、电力牵引和电气化交通等领域应用非常广泛。然而一旦 IGBT 模块发生故障，将打破相关装置和设备的正常运行状态，引发一系列连锁事故，造成人员伤害和严重的经济损失。根据一项调查统计结果，光伏电站大约 34% 的可靠性问题是由 IGBT 模块故障所引发的，因此，IGBT 模块可靠性问题愈发受到关注。相关研究成果表明，IGBT 模块的结温与模块可靠性问题之间存在密切的关系，如何能够快速准确地获取当前 IGBT 模块的实时结温是 IGBT 模块可靠性研究的关键。通过对 IGBT 模块的 V-I 输出特性曲线进行深入分析和研究，提出一种表征 IGBT 模块导通压降、结温和集电极电流关系的建模方法。利用该方法建立的表征模型可以方便快捷地提取 IGBT 模块结温，并通过试验验证了基于该建模方法的 IGBT 模块结温提取策略的有效性。除此之外，该建模方法考虑到了模块键合线老化的影响，并给出了相应的模型校正方法和结温提取策略。



摘要: 绝缘栅双极型晶体管(Insulated gate bipolar transistor, IGBT)是中大功率电力电子变流器的核心器件。为提高 IGBT 状态监测的安全性与经济性,研究了一种基于高频开关振荡的三相两电平变流器非接触式状态监测技术。采用专用传感器首先通过非接触方式在线测量变流器 PWM 开关电压自激产生的高频振荡电流,然后利用三相高频振荡与基波电流的极性关系在无门极信号条件下实现了变流器中所有 IGBT 开关事件定位,最后根据振荡信号中开关暂态拐点特征检测出 IGBT 关断时间。基于以上技术原理,采用嵌入式平台研发了一套变流器 IGBT 非接触式状态监测装置并在 380 V/3 kW 变频电机对拖平台上开展了技术验证工作。试验结果表明,该装置能对变频器逆变器中 6 个 IGBT 的开关特性及其健康状态实施在线监测,具有安全、准确以及经济等优点。

31 直流微电网 DC/DC 变流器 IGBT 均温控制

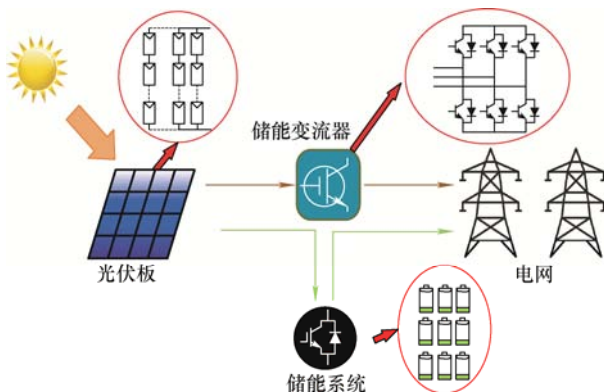
张 波 郭效瑞 刘亚峰 孙英钧 黄 锐 高 远



摘要: 直流微电网并联 DC/DC 变流器中功率器件 IGBT 电热参数以及线路参数存在差异性,使得各并联 DC/DC 变流器中的 IGBT 承受不同的热应力,热应力差异加剧了 DC/DC 变流器 IGBT 疲劳老化失效程度,降低了直流微电网整体供电可靠性。为此,提出一种直流微电网 DC/DC 变流器 IGBT 均温控制策略。首先,建立基于 Foster 热网络模型的 IGBT 热电耦合模型,并计算分析 DC/DC 变流器 IGBT 结温;然后,分析直流微电网并联 DC/DC 变流器 IGBT 结温差异的影响因素,通过在传统下垂控制中引入均温虚拟阻抗,自适应调整流经各 DC/DC 变流器的电流,使得各并联 DC/DC 变流器 IGBT 结温趋于一致,并进行所提策略的稳定性分析,实现 DC/DC 变流器运行可靠性和直流微电网整体稳定性的有效提升;最后,搭建 Matlab/Simulink 与 PLECS/Blockset 联合仿真模型,验证了所提均温控制策略的有效性。

41 储能变流器多时间尺度寿命评估方法

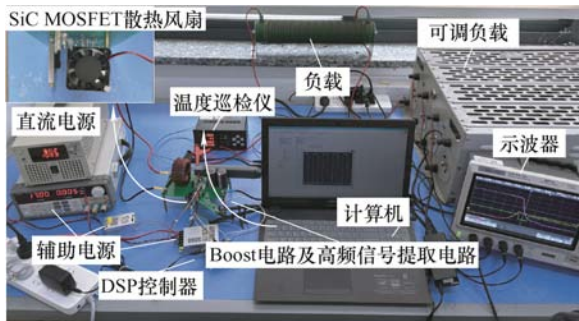
丁朝辉 江 钧 袁 田 王志焕 张 军



摘要: 储能变流器是蓄电池与电网进行电能交互的关键装备,然而由于新能源出力与电力系统负荷的随机性和波动性,储能变流器的可靠性低,亟需对其进行可靠性评估以降低储能变流器非计划停机带来的经济损失,提升电网供电的稳定性和可靠性。然而现有研究多集中在对光伏、风电等新能源出力侧变流器进行可靠性评估,很少有对储能变流器开展寿命评估的研究。基于上述背景,提出一种考虑长时间尺度电力系统负荷和新能源出力任务剖面的储能变流器可靠性评估方法。以 3.5 MW 光伏储能变流器为例,结合结温数值迭代算法和解析寿命模型,评估不同时间尺度热载荷导致的寿命消耗。结果表明,光伏储能变流器中 IGBT 的寿命消耗大于二极管的寿命消耗,并且低频寿命消耗大于基频寿命消耗,因此需要重点减轻低频热载荷引起的 IGBT 寿命消耗,以提高储能变流器预期使用寿命。

50 基于电压下降时间的 SiC MOSFET 结温在线检测方法

樊祖威 魏伟伟 徐国卿



摘要: 随着功率器件在航天航空、轨道交通和电动汽车等领域的广泛应用,其可靠性问题备受关注,准确估计器件结温是确保电力电子装置运行可靠性的关键因素,同时也是实现 SiC MOSFET 器件寿命预测和健康管理的基础。以 SiC MOSFET 为研究对象,研究 SiC MOSFET 开通过程漏源极电压下降时间(t_{fv})与结温的关系,提出一种基于电压下降时间的结温测量方法;设计基于高频信号的电压下降时间检测电路和驱动电阻可切换的结温检测系统。试验结果表明,大驱动电阻下 SiC MOSFET 电压下降时间在结温表征方面具有温度灵敏度高、线性度好的优势,可作为温敏电参数测量 SiC MOSFET 结温;所设计的检测电路提取的电压下降时间具有很高的准确度,能够有效提取电压下降时间;所搭建的结温检测系统能够实现在线检测结温。

60 基于 PWM 高频开关振荡的超级电容 SOH 在线监测

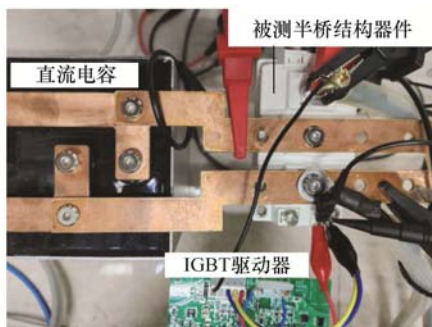
高健 向大为 李豪 谢强



摘要: 超级电容的健康状态会直接影响其性能表现,因此对健康状态进行在线监测具有重要的意义。针对现有超级电容器健康状态在线监测技术存在的问题,如监测精度不高、容易过拟合及测量过程复杂等,提出一种基于 PWM 高频开关振荡的新方法。所提方法利用变换器在运行过程中由 PWM 开关电压自激产生的高频振荡电流,并采用快速傅里叶变换结合半功率带宽法来提取振荡信号中的固有频率和阻尼比特征,进而在线估计超级电容器的高频阻抗。通过预先标定高频阻抗与 SOH 之间的关系,可以实现对超级电容器 SOH 的准确量化。为了验证所提方法的可行性和有效性,构建了一个小型超级电容器储能试验系统。试验结果显示,该方法能够有效地监测到超级电容器 SOH 的变化情况,且具备安全性高、灵敏度好以及支持连续监测的优点。

70 基于运输系数的 IGBT 开通瞬态过程耦合规律分析

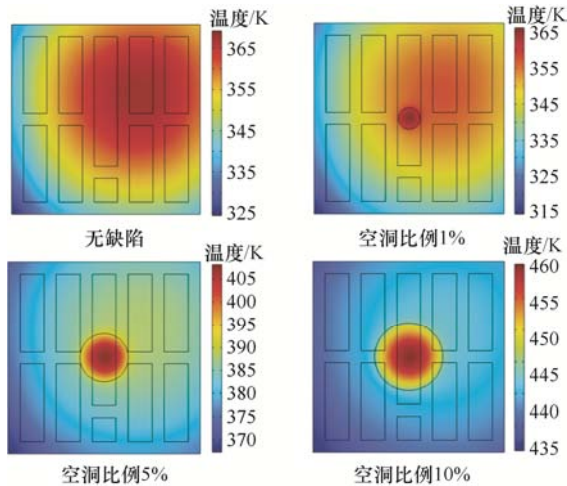
袁文迁 季一润 袁茜 槐青 高岩峰 宋鹏



摘要: 驱动回路和主回路参数共同决定了 IGBT 开通瞬态过程行为,分析驱动回路和主回路的耦合规律对于研究电路参数对瞬态过程的影响,以及开展 IGBT 状态监测研究具有指导意义。从功率器件非线性特征及其与电路参数耦合规律分析的基础上,通过运输系数建立主回路和驱动回路方程的关联并建立开通瞬态过程分析模型,比较器件电压与芯片电压的差异,分析电路参数变化对瞬态过程的影响。开通电流上升过程主要受驱动参数、测试电压和寄生参数的影响,测试电压影响运输系数进而影响电流上升速率。反向恢复过程主要受驱动参数、负载电流和寄生参数的影响,负载电流影响载流子抽取过程反向恢复电压上升速度。寄生电感对开通电流上升过程和反向恢复过程电流上升速度有抑制作用。驱动参数影响反向恢复电流上升速度,因此反向恢复过程是 IGBT 和续流二极管的共同行为。

84 考虑高海拔环境及焊料层缺陷的 IGBT 芯片温升与识别模型

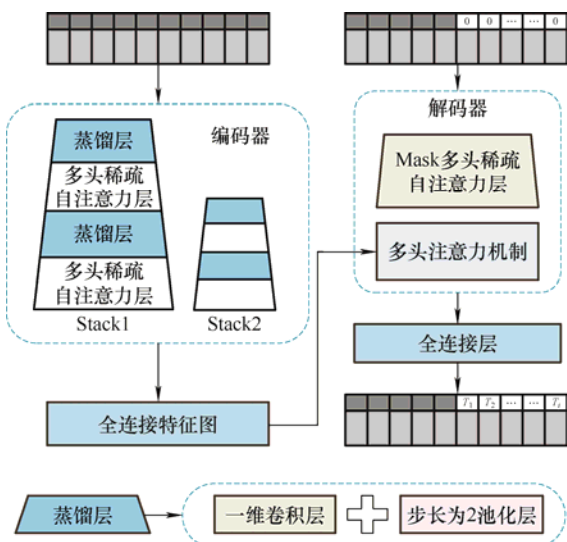
王炳强 律方成 张春阳 刘洪春 平措顿珠 刘轩仪 袁成 徐文扣 王平 耿江海 刘云鹏
杜娟 曾俊 次德吉



摘要: 针对焊接型 IGBT 模块缺少相应的高海拔地区的电热耦合模型, 同时有关高海拔地区由于焊料层缺陷导致芯片失效的研究也少之又少。根据 IGBT 模块内部电场、热场的耦合作用关系, 以焊接型 IGBT 为研究对象, 建立芯片焊料层不同缺陷类型及缺陷比例的高海拔地区焊接型 IGBT 电热耦合模型, 分析了海拔高度以及焊料层空洞、裂纹以及脱落缺陷对焊接型 IGBT 最大结温的影响, 并从机理上做出相应解释, 同时提出了高海拔地区焊接型 IGBT 焊料层缺陷识别模型。研究表明, 不同的海拔高度对芯片温度的影响程度不同, 高海拔地区芯片温升较低海拔地区明显; 不同的缺陷类型、缺陷比例对芯片温度的影响程度也不同, 当缺陷比例超过 5% 后, 脱落对芯片温度的影响程度远大于裂纹缺陷和空洞缺陷, 同时, 所提缺陷识别模型能准确地获取芯片焊料层的缺陷类型和比例, 对焊料层的健康状况进行评估。本文研究为高海拔地区焊接型 IGBT 焊料层健康状态检测, 提高 IGBT 模块运行稳定性提供了理论指导。

98 基于 TPE-Informer 模型的铁路继电器寿命预测

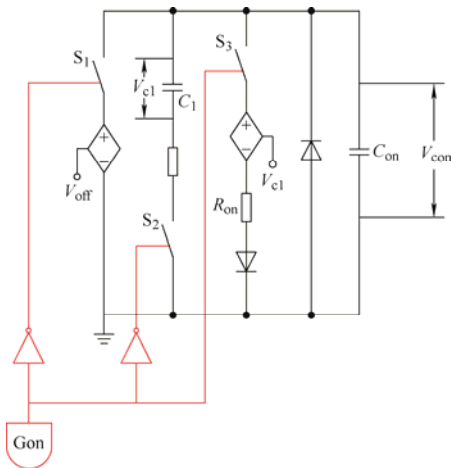
聂靖杰 刘树鑫 邢朝健 许静 李艳凯



摘要: 针对如何准确、高效地预测铁路继电器寿命问题, 提出一种基于 TPE-Informer 模型的铁路继电器寿命预测方法。首先, 搭建铁路继电器电寿命试验平台, 获取其整个生命周期的退化数据, 从中提取出能够反映其运行状态的特征参数; 其次, 将提取的特征参数输入 Informer 模型进行训练, 利用多头稀疏自注意力机制挖掘特征信息前后状态的关联性; 最后, 利用非标准贝叶斯优化算法(Tree-structured parzen estimator, TPE)优化 Informer 模型超参数, 以获得更好的预测性能。采用试验平台采集数据对模型验证, 并与其他三种深度学习算法进行结果对比。试验结果表明, 所提预测模型比 RNN、LSTM 和 Informer 模型预测精度高, 平均精度达到 96.52%, 误差率小, 稳定性好, 证明了该预测模型应用的可行性。

107 高压直流断路器中的IGCT 功能性模型仿真研究

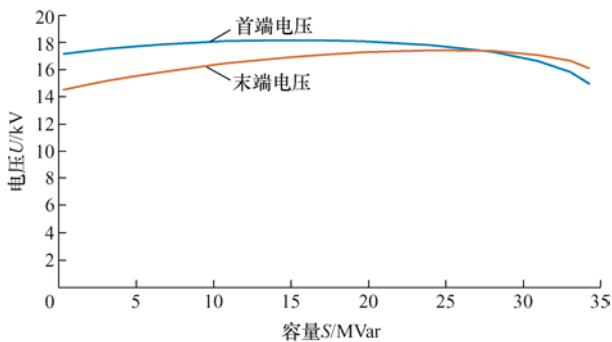
鞠鲁峰 何燕华 王群京 陈忠 张倩 陈权



摘要: 高压直流断路器在柔性直流输电系统中起着至关重要的作用，其中集成门级换流晶闸管(Integrated gate commutated thyristors, IGCT)是保障高压断路器正常分断的关键器件之一。因此，研究 IGCT 开通和关断时的电压电流暂态特性模型，是高压断路器系统研究中的一个重要内容。对 PSCAD 中的自带 IGCT 模型进行了二次开发，建立一种 IGCT 开、断暂态的功能性模型。首先，采用电气等效、曲线拟合的方法，实现电路仿真中 IGCT 的不同运行状态。其次，在 PSCAD 中用所提出的模型搭建了仿真测试电路，并与器件手册进行对比分析。最后，将该模型嵌入到组合式直流断路器中进行仿真验证。仿真结果验证了 IGCT 功能性模型的有效性与其正确性，为进一步研究高压断路器中半导体模块的应力分析打下了基础，具有较高的工程价值和研究意义。

115 基于储能型铁路功率调节器的弱牵引网电压越限抑制措施研究

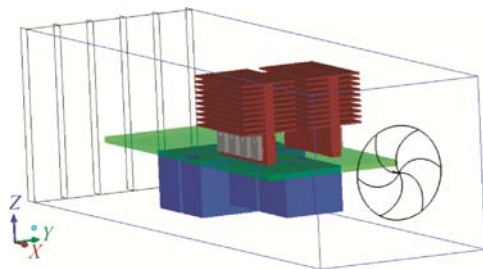
李腾 马永刚 侯凤娟 梁泽镛



摘要: 针对弱电网条件下，牵引网压越限导致的机车不能正常运行问题，采用一种储能型(Energy storage, ES)模块化多电平(Modular multilevel converter, MMC)的铁路功率调节器(Railway power conditioner, RPC)，即 ES-MMC-RPC，来抑制网压越限。较传统的系统扩容、电容器组的无功补偿电压治理方案，在分区所加装了 ES-MMC-RPC，较传统的跟网型电流补偿控制，装置采用了动态性能更好的构网型或三维度支撑控制进行两侧供电臂的功率平衡；装置中的储能也采用了构网型控制，以进一步支撑电压。最后，提出在弱牵引网条件下 S-MMC-RPC 装置的三层能量管理策略，通过有功平衡、装置自身及储能的功率支撑对网压进行三重支撑。经仿真验证，改进的构网型控制的 ES-MMC-RPC 能确保弱电地区的牵引网压的稳定。

128 功率变换器风冷系统优化的仿真研究

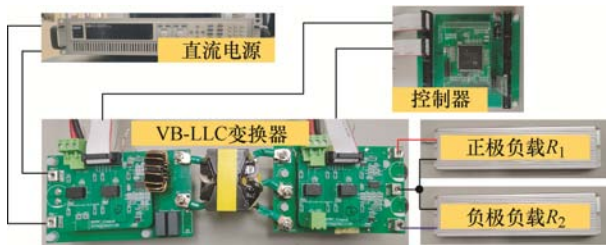
巩飞 郭鸿浩 刘泽远



摘要: 针对高功率密度半导体开关器件的温升问题，研究了功率变换器的风冷系统散热性能表现，基于 ANSYS ICEPAK 仿真分析了热界面材料(Thermal interface material, TIM)对分立式 SiC MOSFET 温升以及散热器热阻的影响作用，提出了三种风道设计方案，从风机效率、降温效果、多器件温度一致性三个方面给出综合评价。研究表明，TIM 热导率越高，SiC 芯片温度越低，但温度的下降存在极限，氮化铝陶瓷垫片与常规硅胶片相比可降温约 14.2%；散热器热阻与 TIM 热导率呈变化率递减的非线性关系，过高热导率的实际意义有限，应结合热设计成本综合考虑 TIM 选择；合理分配风机风量比单纯提高气流速度的散热效果更佳，混合射流的变截面双风道设计方案具备更高的风机效率以及良好的温度一致性，与无风道相比芯片温度可再次降低约 13.7%，其综合表现最优。研究工作为后续开展功率开关器件的热管理试验提供了参考依据。

137 集成电压平衡功能的三绕组 LLC 谐振变换器

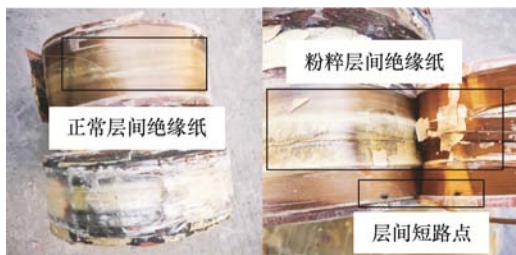
胡士礼 吴尧 雷宇 黄艳辉 刘飞



摘要: 当正负极母线之间功率不平衡时, 双极直流配电系统面临着电压不平衡的挑战, 需要电压平衡器进行均压。然而, 额外电压平衡组件的引入增加了设备体积与成本, 降低了变换器转换效率。提出一种用于两极直流配电系统集中式电压平衡的三绕组 LLC 谐振变换器, 采用频率和移相的调制方式来传输功率。重要的是, 它可以自动均衡两极电压, 并且对负载侧的不平衡电流进行重新分配。对于所提变换器, 分析其工作特性, 包括均压原理、不平衡电流分配过程、软开关、损耗和器件应力。除此之外, 还提出了预防变压器饱和和的磁通平衡控制策略。最后, 通过仿真验证变换器均压能力以及磁通平衡控制的有效性。

149 基于三相 4PT 接线方式的 PT 短路故障特征量分析

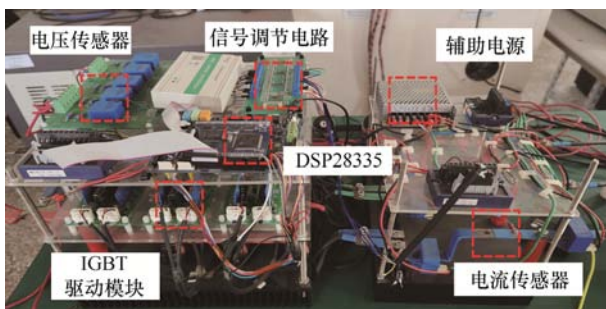
匡红刚 胡宗军 李晓斌 龚灿 姚远 杜青云 冯毅威 董守龙



摘要: 针对基于三相 4PT(Potential transformer, PT)接线方式的 PT 短路故障特征量进行分析, 并得出变化规律。首先, 对 4PT 接线方式下, 二次三相电压、零序电压值进行理论分析; 其次, 根据 PT 的设计参数, 建立有限元模型, 仿真计算绕组相关的电容、电感、电阻等参数, 并根据参数构建精细化等值电路模型; 再次, 基于三相 4PT 接线方式下, 对 PT 短路故障现象及发生短路故障后各 PT 电气特征量变化进行详细分析; 最后, 结合精细化电路模型, 通过 Matlab 建模仿真对 PT 短路故障后电气特征量变化规律进行验证, 证实电气特征量变化规律的正确性。研究结果为 PT 短路故障在线监测方法提供重要依据, 有利于在不退出操作或拆卸的情况下实时准确地监测 PT 的健康状况。

159 Vienna 整流器改进无差拍混合控制策略研究

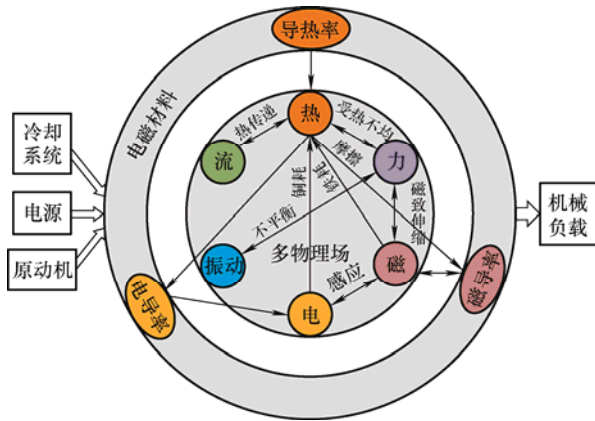
徐文希 郭强 贾勇 张越飞 郑洪建



摘要: 三相 Vienna 整流器发生负载突变时, 将导致直流侧输出电压波动。针对此问题, 提出一种基于线性自抗扰控制的改进无差拍混合控制策略。首先, 在建立三相 Vienna 整流器数学模型的基础上, 电流内环引入改进无差拍控制算法, 将预测电流推迟至 $k+2$ 时刻, 以此来消除网侧电流谐波, 实现对网侧电流的精准跟踪控制, 使系统网侧电流总谐波畸变率由 4.33% 降至 2.06%。其次, 电压外环引入线性自抗扰控制, 将模型参数变化作为系统内部扰动, 通过 LESO 实时估计扰动并补偿, 解决了负载突变工况下直流侧输出电压波动过大的问题。最后, 搭建 Vienna 整流器仿真模型以及 10 kW 试验样机对所提混合控制策略进行验证。仿真与试验结果表明, 所提混合控制策略在系统带载启动、负载变化等场景具有较好的稳态、动态性能。

169 磁性材料的磁滞建模研究综述

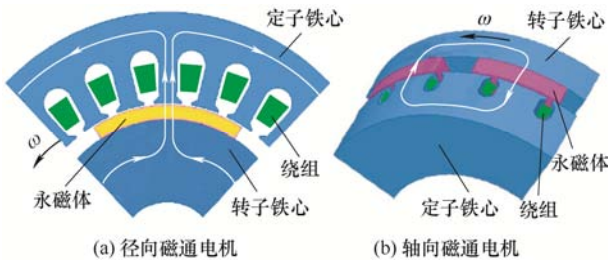
常 勇 包广清 杨巧玲 何 婷



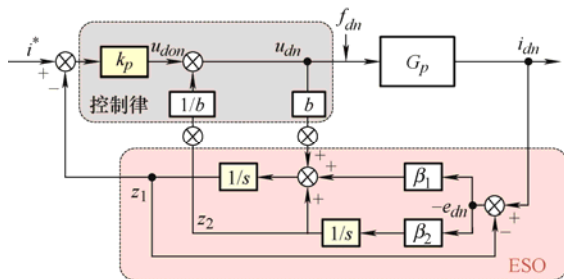
摘要: 磁性材料作为电机设备能量转换的核心部件,对提升设备效率、稳定运行具有重要意义。新型高功率密度电机的设计对所用磁性材料的磁滞特性模拟预测精度提出了更高的要求,磁滞模型为电机损耗计算、充/去磁曲线分析、磁化饱和分析及在线调磁提供理论支撑。目前从物理建模和唯象建模两种角度出发,提出了多种描述磁滞特性的模型,典型的模型有 Preisach、Jiles-Atherton(J-A)、Stoner-Wohlfarth 等。分别介绍现有各类磁滞模型的基本原理及研究现状,分析各种磁滞模型的局限性和适用范围,同时阐述磁滞建模在电机设计中的意义,最后分析磁滞特性模拟面临的问题和未来的发展趋势。通过不断改进磁滞建模方法,精确地模拟磁性材料的磁滞特性,以便在新型电力设备、高效能新型电机设计中实现产业化应用。

190 横向磁通电机研究状况综述

孙 强 龚鹏程



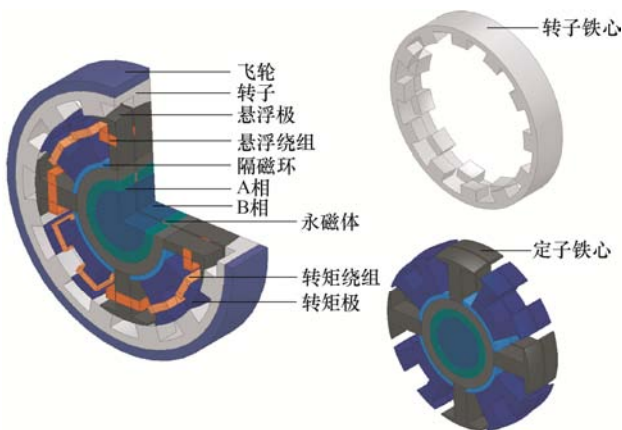
摘要: 以当前的横向磁通电机研究为目标,从不同角度介绍分析了横向磁通电机研究所取得的成果,对今后的研究工作具有较强的参考价值。首先从横向磁通电机实现了磁路和电路的解耦出发,指出其可获得比传统径向磁通电机和轴向磁通电机更高的转矩密度和功率密度,且易实现低速大转矩,拥有良好的应用前景,因此受到各国研究者的高度重视;其次,介绍了当前已有横向磁通电机的主要类型及其基本结构,总结分析了它们的共性规律和个性差别;对横向磁通电机的设计与分析方法、驱动系统的基本控制策略、转矩(或推力)脉动抑制、漏磁抑制等关键技术进行了综述,阐述了多种电机优化方法,探讨了多种容错控制策略,介绍了该电机系统在交通运输、工业生产和军事等领域的应用;最后对横向磁通电机系统需要研究的重点进行了展望。



摘要：双三相永磁同步发电机(Dual three-phase permanent magnet synchronous generator, DTP-PMSG) 具有高功率密度、高容错性和高可靠性等特点, 广泛适用于高端装备领域。但由于电机气隙磁场畸变及整流器开关器件死区时间等非线性因素的影响, 导致双三相永磁同步发电机定子绕组中通常含有大量谐波电流。谐波电流会增加系统损耗, 降低发电机效率, 影响发电系统性能, 特别是映射到 x - y 谐波子平面上的 5、7 次谐波, 由于该平面对应的阻抗较小, 因此即使很小的谐波电压扰动都会引起较大的 5、7 次谐波电流。为抑制定子绕组中的谐波电流, 提出基于双环路同步旋转的自抗扰谐波电流抑制策略。所提策略利用双环路同步旋转坐标变换将 x - y 谐波子空间的 5、7 次谐波分别映射到与其同步的旋转坐标系中, 在各自环路中采用自抗扰控制器将 12 倍频交流分量视为系统总扰动的一部分观测出来并对其补偿, 从而实现对多维谐波电流的有效控制。最后, 通过试验验证了所提控制策略的正确性和优越性。

220 轴向球面磁悬浮飞轮电机磁热固耦合分析

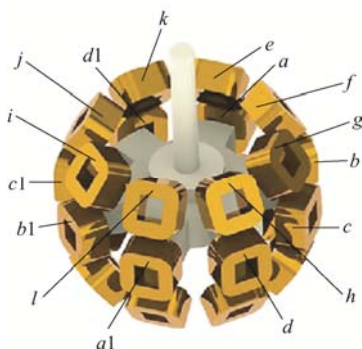
朱志莹 孟凡浩 徐政安 聪焦金帅



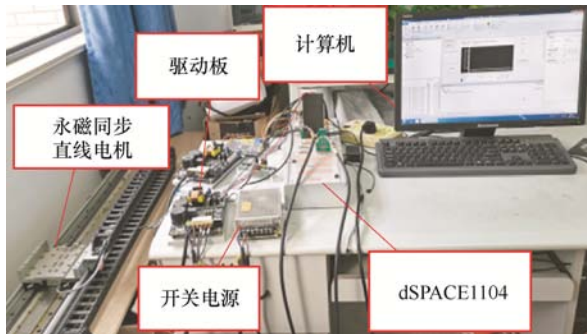
摘要：针对轴向球面磁悬浮飞轮电机(Axially spherical bearingless flywheel machine, AS-BFM)在电磁、温度和应力耦合作用下的温升和形变问题, 提出磁热固耦合的温度场分布和部件形变求解分析方法。该方法基于轴向球面磁悬浮飞轮电机的电磁损耗分析, 确立各部件的热参数和应力参数, 并建立电机三维有限元分析模型; 在此基础上, 求解得到电机在不同转速下的损耗和温度场分布特性, 并将温度场结果作为载荷导入应力场分析求解电机各部件形变规律; 最后, 通过耦合仿真分析揭示了电机不同转速对温升和形变的影响规律, 三维有限元分析结果验证了磁热固耦合分析方法的有效性, 为电机的散热设计、结构优化以及材料选择提供了依据。

228 基于恒转矩控制的磁阻型球形电机转矩脉动抑制研究

冯友亮 王群京 鞠鲁峰 李国丽 周睿



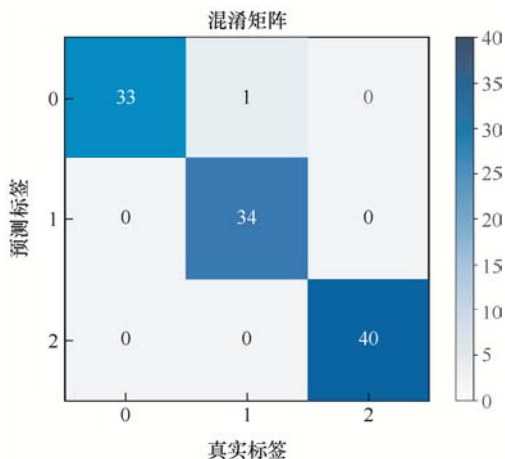
摘要：与永磁球形电机不同, 磁阻型球形电机的设计灵感来源于开关磁阻电机, 双凸极结构的存在会导致它产生较大的转矩脉动, 从而影响电机的稳定运行。为了抑制磁阻型球形电机的转矩脉动, 从控制角度出发, 提出一种恒转矩控制方法, 通过对其自旋、倾斜和任意方向运动的分析研究, 实现了磁阻型球形电机在自旋、倾斜和任意方向运动时的转矩脉动抑制。主要工作如下: 首先, 分析磁阻型球形电机的运动过程与通电情况, 提出一种求解驱动电流的方法——转矩电流拟合多项式法; 然后利用恒转矩控制方式实现了对磁阻型球形电机自旋、倾斜和任意方向运动时的转矩脉动抑制; 最后, 分别通过仿真和试验对不同位置的转矩脉动抑制进行了验证, 验证结果表明了所研究方法的有效性。



摘要: 为减少永磁同步直线电机调速系统对模型的依赖, 以及降低外部扰动对控制性能的影响, 提出一种基于新型超局部模型的永磁同步直线电机滑模控制策略。根据永磁同步直线电机在旋转坐标系下参数摄动时的数学模型, 建立对应仅利用系统输入输出数据不需要其他参数的转速环的新型超局部模型, 以削弱对电机精确模型的依赖。结合滑模控制原理设计基于新型超局部模型的滑模速度控制器, 通过 Lyapunov 稳定性理论证明该控制器的稳定性。考虑新型超局部模型中的未知量, 设计内模扰动观测器进行估计并前馈补偿, 实现对新型超局部模型的实时更新。通过与传统 PI 控制进行仿真及半实物试验对比结果表明, 所提方法改善了永磁同步直线电机控制系统的动态响应性能和适应能力, 具有较强的鲁棒性。

248 基于定子电流和电磁转矩双信号融合的齿轮故障智能诊断

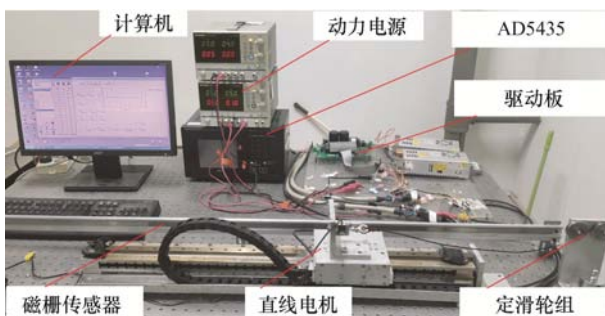
李巍 袁响东 陈伟 刘军



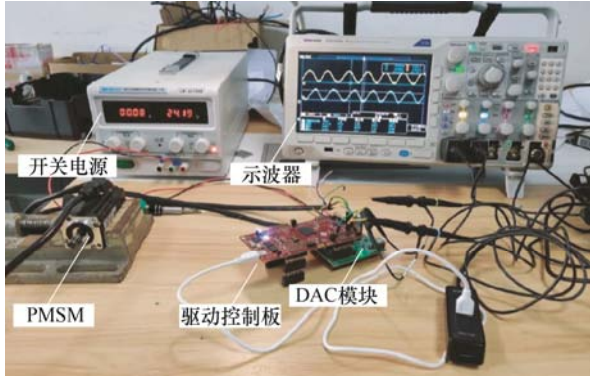
摘要: 在电机驱动的齿轮传动系统中, 电机本体具有传感器的特性, 因此可以通过电机的定子电流、电磁转矩信号来进行齿轮故障分析, 由于受转速和负载转矩的影响, 使得故障诊断结果的准确率较低。针对此问题, 提出一种基于双信号融合与反向传播神经网络相结合的齿轮故障诊断方法。对电机齿轮传动系统一体化建模, 进行电机齿轮传动系统联合仿真。对齿轮的不同故障进行模拟, 得到电机侧定子电流和电磁转矩的故障信号, 采用双树复小波变换来分析齿轮故障频段信号, 提取故障特征量, 建立了丰富的齿轮故障样本库。搭建反向传播神经网络并提出改进的自适应学习率算法, 实现了对齿轮断齿、磨损故障的精确分类。为了验证所提方法的有效性, 搭建齿轮故障试验平台, 对相应齿轮故障进行诊断。结果表明, 所提方法能够在不同转速和负载转矩条件下准确辨识齿轮的故障类型, 相较于只采用定子电流和电磁转矩中一种信号对齿轮进行故障诊断, 该方法准确率更高。

257 基于反馈变换与积分反演 PMSLM 强鲁棒位置控制

陈晨 赵静 朱龙 董菲



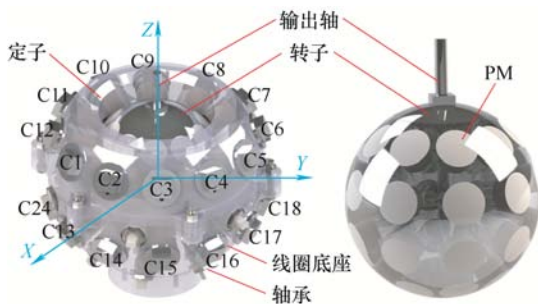
摘要: 为提高永磁同步直线电机位置控制系统的鲁棒性能, 设计基于反馈线性化变换解耦系统的积分反演控制器。首先定义新的中间状态变量, 通过状态反馈将永磁同步直线电机系统线性化解耦变换为带有非线性扰动状态的串联积分系统, 避免常规反馈解耦时未知系数扰动状态无法补偿的问题; 其次依据 Lyapunov 稳定条件设计反演控制器, 在各级子系统的中间虚拟控制量的设计中加入积分环节, 提高系统控制精度, 并利用稳定条件设计扰动自适应律, 估计并补偿系统扰动, 提高永磁同步直线电机控制系统的鲁棒性能。最后搭建基于半实物仿真控制系统的试验平台, 通过试验验证所提方法的正确性和有效性。



摘要：针对永磁同步电机(Permanent magnet synchronous motor, PMSM)矢量控制系统速度外环使用分数阶比例积分(Fractional-order proportional-integral, FOPI)调节器时难以满足系统动态响应速度快、鲁棒性强等要求,提出利用海洋捕食者算法(Marine predator algorithm, MPA)优化FOPI调节器参数。通过搜索到最优适应度的捕食者所在位置来得到调节器最优组合参数,其中目标适应度函数选择常用伺服系统评价指标时间乘以误差绝对值积分。以提升MPA效率为目标,对其位置更新公式进行改进。对MPA调节FOPI、改进MPA调节FOPI的电机调速性能进行试验对比。搭建TMS320F28335为核心的PMSM伺服系统试验平台进行验证,相较于MPAFOPI调节器,改进了MPAFOPI调节器的系统显示出其转速动态响应更优、抗扰能力更强的优点,在新能源汽车等电驱动方向展现其优势。试验结果表明,采用改进MPAFOPI的调节器具有增强系统鲁棒性和减小超调量的优势。

274 降低永磁球形电机铜耗的通电策略研究

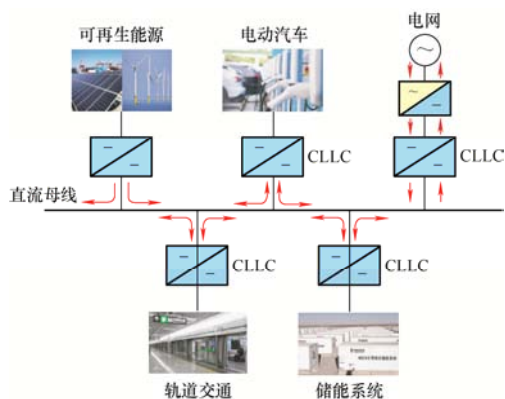
许扬帆 李国丽 孙泽辉 王群京 文彦



摘要：连续运行模式下,针对永磁球形电机(Permanent-magnet spherical motor, PMSpM)恶劣的通风、冷却条件影响电机可靠运行和使用寿命的问题,提出了几种能够精确输出目标转矩并避免局部过热的自旋通电策略。建立了基于有限元分析(Finite-element analysis, FEA)的单线圈电流有效值-稳态温度($I_{RMS}-T_{steady}$)模型,提出使用高精度电流传感器间接测量线圈温度的方法,以验证模型的准确性。基于此分析了偏心自旋、最小电流和、固定励磁线圈三种通电策略。后两种策略采用改进的粒子群优化(Particle swarm optimization, PSO)算法优化驱动电流,算法通过参数方程限制粒子产生与更新以精确输出目标转矩,并分别尝试通过减少粒子维度和指定线圈组合来进一步降低铜耗。策略对比结果表明,固定励磁线圈策略能够在输出目标转矩的前提下大大降低铜耗且避免了局部热点出现。

286 面向城市灵活供电的高频隔离双向 DC/DC 变换器的启动分析与优化

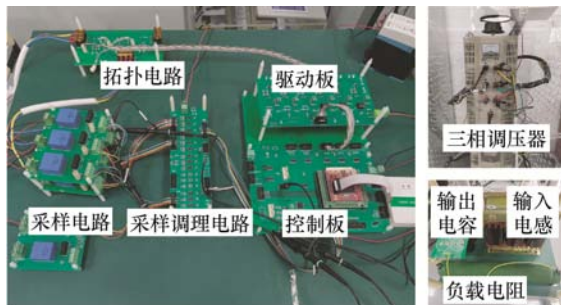
凌 或 包维瀚 陆 超 张 宁 周 特 李姚旺 王 鹏



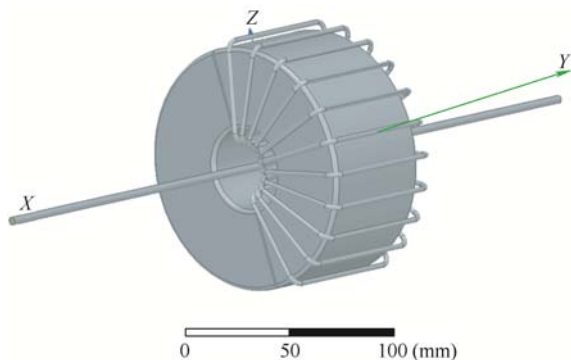
摘要：高频隔离双向 DC/DC 变流器是基于直流配电的城市灵活供电系统的重要枢纽设备。CLLC 变换器作为典型的拓扑，具有效率高、功率对称性强等优点，但由于其启动过程较为复杂，接入直流配电系统时需要进行分析与优化。针对 CLLC 启动时可能直接接入直流母线，或带电阻型、电容型负载等工况，首先对已有的软启动方法进行了研究，然后针对现有方法存在的问题提出了一种不对称改变占空比的新软启动方法，最后通过 Matlab/Simulink 对不同软启动方法进行对比。仿真结果表明，所提方法能有效抑制启动瞬间的电流尖峰，避免了由寄生电容充放电引起的谐振电流高频波动，且始终保证整流侧一半的二极管实现 ZCS 关断。所提方法具有工作模式简单、容易实现的优点，可有效指导工程实践。

295 三相 Vienna 整流器无模型预测直接电压控制

杨 奥 于新红 许立斌 黄东晓 柯栋梁 汪凤翔



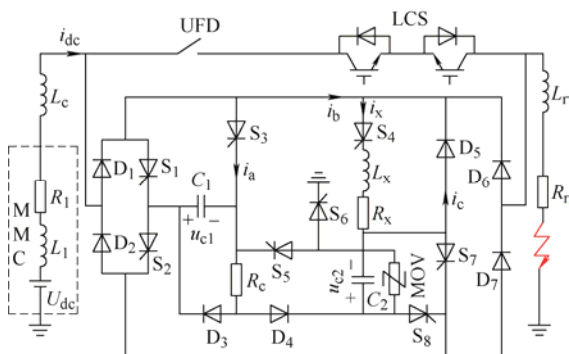
摘要：为提高三相 Vienna 整流器响应速度以及在复杂环境下系统控制性能，提出一种无模型预测直接电压控制 (Model-free predictive direct voltage control, MFPDVC) 策略。首先，分析三相 Vienna 整流器数学模型，构建不依赖系统物理参数的超局部模型，增强控制系统鲁棒性；其次，对超局部模型离散化得到系统预测方程，同时设计包含电压、功率以及中点电位的成本函数，实现用单个环路控制多个目标，突破传统双闭环级联型控制结构内外环带宽限制，提升系统响应速度。最后，设计 Luenberger 观测器估计电压和功率超局部模型中的未知部分，并实时补偿预测模型，进一步提升抗扰动性能，实现无模型预测直接电压控制算法。仿真与试验结果表明，相比传统有限集模型预测功率控制方法，所提控制策略具有更优的鲁棒性和动稳态性能。



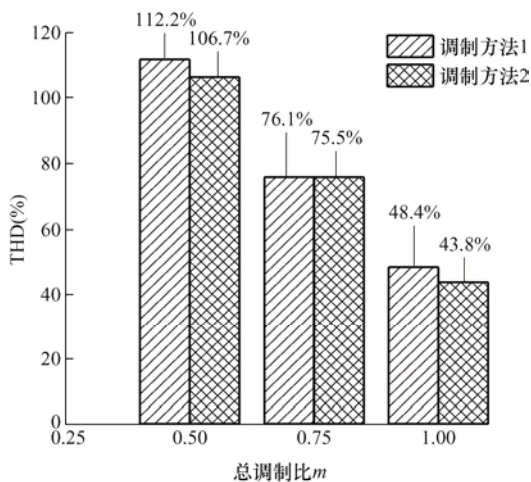
摘要: 基于厄流线圈取电装置提出了一种防止铁磁磁心饱和的方法,该方法使用旁路泄流电路将流入电流互感器过多的电流引入到旁路电路中消耗掉,将输出功率作为反馈值来调节旁路电路中开关管的关断,通过控制输出的功率大小,输电线路在宽范围电流内实现恒功率输出和防止电流互感器磁心到达饱和。根据电流互感器各方面的要求,建立电流互感器 3D 模型,将 3D 模型导入到 Maxwell 中对电流互感器本身进行有限元仿真分析,得到电流互感器内部各项参数,再将经过有限元分析的电流互感器模型导入到 ANSYS 中与外部电路组成取电电路进行联合仿真,通过仿真结果验证电流互感器的取电能力。再加入本次对电流互感器取电优化部分,通过电流互感器二次侧谐振的方式增加一次侧输电线路的等效阻抗,考虑到电流互感器磁心饱和的问题,采用旁路泄流电路将过多的电流通过旁路绕过电流互感器一次侧回到输电线路当中的方法解决。

315 一种双电容换流型混合式直流断路器

陶彩霞 王文博 李泰国 姜 璐 张建刚



摘要: 混合式直流断路器可以快速、准确隔离线路故障,在直流电网故障清除难题中发挥重要作用。为解决直流断路器开断能力要求高、限流能力弱、制造成本大、故障隔离速度慢等问题,提出一种双电容换流型混合式直流断路器(Double capacitor commutated hybrid DC circuit breaker, D-C-DCCB)拓扑。构建断路器时,巧妙利用自充电通路实现电容预充电及反向充电后电容能量的耗散。通过电容反向充电与阻感限流支路降低故障电流上升速率及峰值,利用限流电阻与二极管组实现限流电感,完成限流工作后被短路及储存能量耗散,加快故障隔离速度的同时,有效减少了避雷器吸收能量。对所提断路器的拓扑结构及工作原理进行分析及推导,在 PSCAD/EMTDC 中对所提断路器拓扑进行了四端直流电网仿真验证,与现有的直流电网故障清除拓扑在性能及经济性方面进行了对比,证明了所提断路器具有性能好、经济性高的优点。

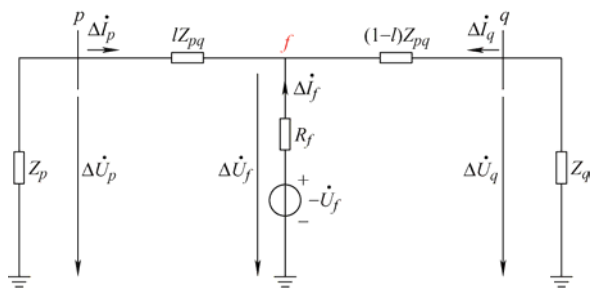


摘要: 矩阵变换器在通过输入电压高频调制合成输出电压过程中不可避免地会出现高频谐波, 该谐波不仅影响输出侧性能, 也会通过矩阵变换器双向开关的切换降低输入侧性能。针对上述问题, 提出一种混合式调制方法用以改善矩阵变换器输出侧性能。首先, 详细分析了抑制幅值最大相频繁开通调制方法的工作原理及在抑制输出侧高频谐波方面的不足; 其次, 提出通过对输入输出扇区的判断, 在不同扇区内分别采用减少开关管切换次数和避免幅值最大相频繁切换的混合式调制方法, 分析并推导该调制方法下的开关序列分布规律及作用时间表达式; 最后, 搭建样机进行试验验证, 试验结果表明利用所提混合式调制方法来进一步抑制输出侧高频谐波是可行且有效的。

电力系统及其自动化

334 基于有限个 μ PMU 和压缩感知理论的主动配电网复故障定位方法

施泽慧 牟龙华



摘要: 主动配电网(Active distribution network, ADN)动态行为相较传统电网更为复杂, 亟需解决其故障检测和定位问题。针对配电网系统中微型同步相量测量装置(Micro phasor measurement unit, μ PMU)的运用, 提出基于有限个 μ PMU 的复故障定位策略。首先, 根据任意线路故障下全网可观的 μ PMU 优化配置方案建立短路、断线故障线路等效模型, 通过分析模型将电流故障分量等效至相邻两端节点形成虚拟注入电流向量。其次, 利用压缩感知理论求解故障网络节点电压方程, 根据重构电流向量中非零元素的位置得到可疑故障节点, 并基于可疑故障节点及 μ PMU 配置位置划分动态候选故障域。最后, 先分别构建短路、断线区域判据, 确定故障区间, 再进一步根据区域两端推算电压构造线路判据, 精确判断故障线路及类型。基于改进的 IEEE 33 节点配电网系统进行仿真分析, 仿真结果表明, 基于有限个 μ PMU 的复故障定位策略是可行的, 该策略能够有效判断故障的精确位置。

343 基于三维激光点云的输电线路带电作业全过程组合间隙测算

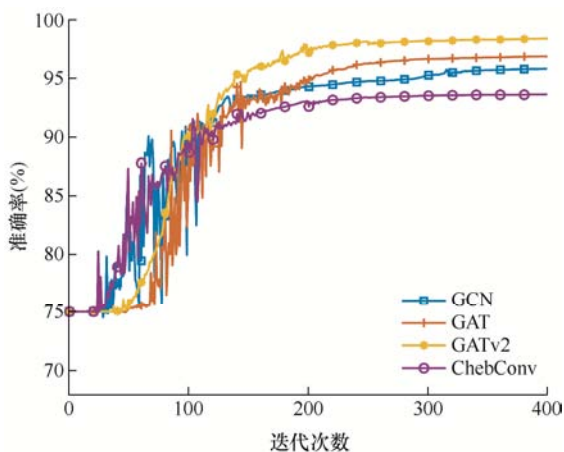
张海涛 王英 吕强 马周贵



摘要: 输电线路带电作业是保障输电线路可靠运行的有效手段之一。针对传统带电作业实施过程中存在的不安全问题, 提出利用地面激光雷达采集点云数据, 基于金字塔数据结构的瓦片结构完成点云数据的存储、调用。采用改进的双向滤波算法快速区分地物信息, 获取现场三维模型。结合带电作业特征及数据读取、查询速度方面考虑, 使用基于八叉树的最近点搜索算法, 实时测算规划路径中各点的安全距离, 并与规程规定值进行比较分析得出作业方式的安全性, 实现作业方案辅助决策。以“吊篮摆入法”为例, 开展了实际工况模拟, 试验结果表明, 建立的三维模型能够满足现场作业全过程管控, 取得了实际效果。

353 基于 GATv2 模型的虚假数据注入攻击检测方法

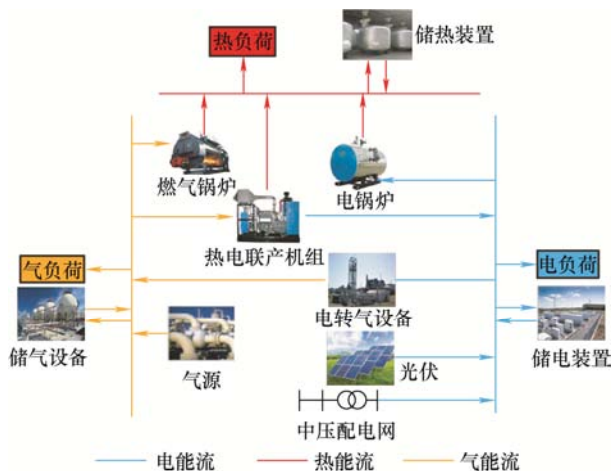
罗小元 耿艺帆 吴莉艳 王新宇



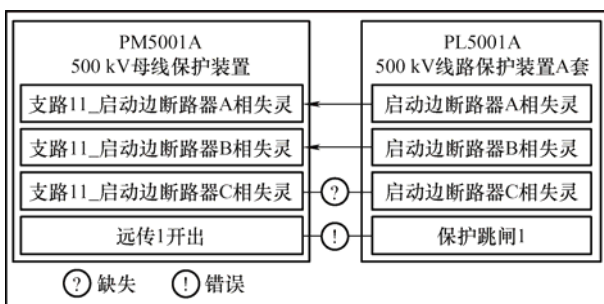
摘要: 虚假数据注入攻击(False data injection attack, FDIA)能够躲避传统不良数据检测器, 给智能电网的稳定运行带来了挑战。因此, 提出了一种基于改进图注意力网络(Graph attention network v2, GATv2)模型的 FDIA 检测方法。首先, 基于电力系统结构和 FDIA 的特性, 构建模型所需数据集; 然后, 根据电力系统的拓扑信息和运行信息建立图数据; 设计基于 GATv2 的检测模型对电网图数据的空间特征进行提取, 进而检测注入的虚假数据攻击; 最后, 在 IEEE 14 节点和 IEEE 118 节点系统上验证了 GATv2 模型的有效性, 且仿真结果表明 GATv2 模型检测性能优于其他模型, 检测准确率达到 98% 以上, 在不同攻击节点数和不同攻击强度情况中都具有较好的鲁棒性。

362 高光伏渗透下考虑源荷不确定性的含分布式储能的综合能源系统规划

顾佳琪 郭左 孙翔宇 顾阳 岳付昌 李红 李光熹

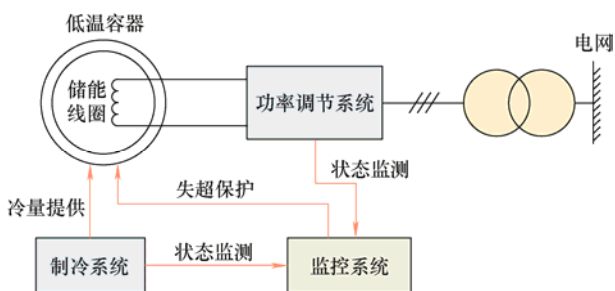


摘要: 随着光伏接入配电网的渗透率越来越高, 传统的综合能源系统规划方法由于忽略对光伏和负荷不确定性考虑以及本身方法的问题, 难以充分发挥综合能源系统优势应对高光伏渗透率配电网。为此, 在高光伏渗透配电网的基础上, 考虑光伏和负荷不确定因素的影响, 从配电网和用户两个层面, 构建了一种考虑光伏和负荷不确定性的综合能源系统两阶段规划模型。第一阶段模型是以综合能源系统并网的最小数量为目标函数确定综合能源系统最佳并网位置和数量; 第二阶段模型是在第一阶段的基础上以综合能源系统自适应鲁棒经济调度成本为目标函数确定综合能源系统并网的最佳容量; 运用灰狼优化算法完成两阶段规划模型求解, 确定综合能源系统最佳的并网位置和并网容量。通过算例仿真验证所提综合能源系统规划模型的有效性。

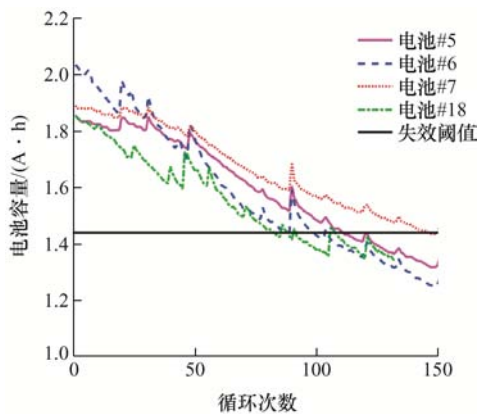


摘要: 针对智能变电站中虚回路人工校验效率低下、依赖于变电站配置描述(Substation configuration description, SCD)文件中虚端子定义不规范等问题, 提出一种基于改进双向长短时记忆网络(Bi-directional long short-term memory, Bi-LSTM)的虚回路自动校验方法。首先, 利用 Word2vec 模型对虚端子描述文本进行向量化编码, 解决了虚端子描述文本的非结构化问题, 使其能够在后续处理中被有效识别和分析。然后, 引入了注意力机制与 Bi-LSTM 网络相结合的方式, 以更全面地提取虚端子描述文本的语义特征。通过对比非标准虚端子与标准虚端子之间的相似度, 实现了非标准虚端子的智能匹配, 并建立了一个标准虚端子库作为基础数据支持。接着, 利用经过验证的 SCD 文件与标准虚端子库, 构建了虚回路模板库, 该模板库能够有效存储并管理各类智能变电站设备的虚回路信息。最终, 基于虚回路模板库实现了虚回路的自动校验, 显著提升了虚回路校验过程的效率和准确性。试验结果表明, 所提方法不仅提升了智能变电站虚回路校验的自适应性和精确度, 还能够有效降低人工校验的工作量, 显著提高智能变电站的自动化运行水平。该研究为未来智能变电站的虚回路校验和管理提供了重要的技术参考。

新能源发电与电能存储



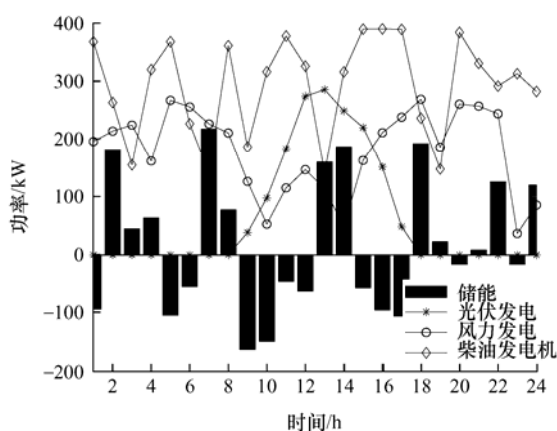
摘要: 大规模可再生能源发电并网给电力系统安全稳定运行带来了新的挑战, 储能技术是解决这一问题的重要手段。为了满足新型电力系统应用场景的多样化需求, 储能技术呈现百花齐放、多元化发展新态势。其中, 功率型储能技术具有功率密度高、响应速度快、循环寿命长等优势, 在新型电力系统的电力调频、平滑新能源波动、负荷跟踪等领域应用具有重要的应用价值。剖析了电化学电容器、飞轮储能、超导磁储能等功率型储能的技术原理和性能特征, 梳理了各类功率型储能技术未来发展规划, 总结了功率型储能在新型电力系统的应用技术研究工作, 同时列举了目前国内外功率型储能的工程示范应用典型案例。最后针对各类功率型储能未来在电力系统应用面临的挑战进行了分析, 提出未来功率型储能技术未来发展方向, 旨在为功率型储能技术研究和产业发展提供参考。



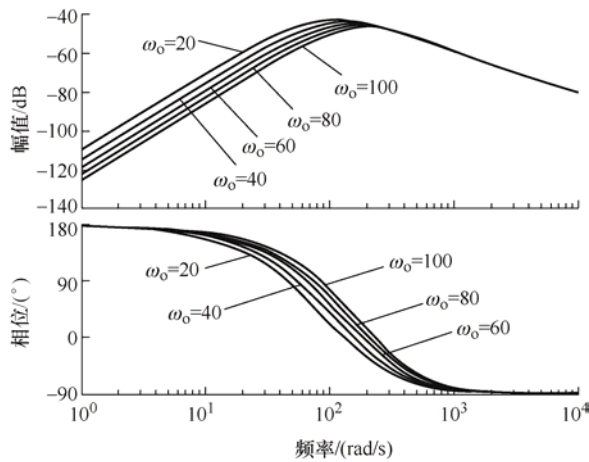
摘要: 锂离子电池剩余使用寿命(Remaining useful life, RUL)的准确预测对于提高电池循环使用寿命,避免安全事故的发生,起着至关重要的作用。为此,提出了一种结合改进鲸鱼优化算法(Improved whale optimization algorithm, IWOA)和最小二乘支持向量机(Least squares support vector machine, LSSVM)的锂离子电池 RUL 预测模型。首先从充放电电压、电流、温度及容量增量(Incremental capacity, IC)数据中分析并构建表征锂离子电池容量衰减的特征参数,利用 Spearman 和 Pearson 分析法分析所构建的特征参数与容量间的相关性,分析并筛选出表征容量衰减的两个关键特征参数;其次基于所建立的关键特征参数提出了一种 IWOA 优化 LSSVM 的预测模型,其中通过引入正弦函数搜索路径以及自适应权重方法解决了 WOA 易陷入局部最优解的问题,提高了模型预测精度;最后利用美国航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)所提供的公开锂离子电池数据集对所建模型进行验证,同时与 SVM 和 WOA-LSSVM 模型预测结果进行对比分析。结果表明,当前 80 次循环数据作为训练集时,所提出的 IWOA-LSSVM 模型中平均绝对误差(Mean absolute error, MAE)在 $0.011 \text{ A} \cdot \text{h}$ 以内,均方根误差(Root mean squared error, RMSE)值在 $0.013 \text{ A} \cdot \text{h}$ 以内,所提模型估计误差更小,具有更高的预测精度。

412 计及负荷预测的风光柴储联供型微网系统的运行优化

唐秀明 朱欣科 陈君 袁荣湘



摘要: 微电网系统优化运行能够有效推进落实“双碳战略”,但微电网运行时未考虑负荷的动态变化及运行的多目标特性,限制了系统运行优化和可再生能源的消纳能力。针对该问题,建立由运行成本费用和环境治理费用构成的微电网总运行成本最低,以及可再生能源消纳最大化的多目标优化运行模型;针对电网负荷的动态变化,采用 Holt-winters 模型预测微电网系统负荷变化;最后用改进的多目标粒子群算法对微电网模型进行求解。为验证算法的可行性,以 IEEE 数据库中高比例新能源 HRP-38 标准系统和华东地区微电网为研究对象。算例表明,计及负荷预测下两类微电网系统中风电利用率分别提高了 8.13%、5.23%,光伏利用率分别提高了 8.59%、6.49%,系统总运行成本分别降低了 8.29%、8.89%。因此,所提方法既能有效提高系统对可再生能源的消纳能力,又能降低系统的总运行成本,同时实现环境效益最大化,对微电网运行具有指导意义。

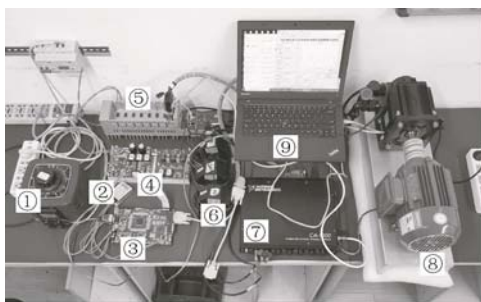


摘要: 针对光储微电网中直流母线电压波动较大、抗扰性能较差的问题, 提出一种基于改进线性自抗扰控制(Linear active disturbance rejection control, LADRC)的混合储能控制策略。首先, 搭建光储微电网系统, 根据超级电容和蓄电池的充放电特性, 利用低通滤波器, 将波动的功率在两者之间分配, 由蓄电池承担电压环输出信号的低频分量, 超级电容承担高频分量。然后, 建立双向 DC-DC 变换器的数学模型, 基于常规的双闭环控制, 对电压环采用改进 LADRC, 并且对改进 LADRC 进行频域分析, 该改进 LADRC 将总扰动微分信号引入了扩张状态观测器(Extended state observer, ESO)中, 有效增强了 ESO 观测扰动的能力, 能够更快地跟踪系统的总扰动, 增强系统抗扰能力。最后, 搭建时域仿真模型, 结果表明, 相比于传统 PI 和传统 LADRC, 改进 LADRC 的超调量更小, 响应速度更迅速, 提高了直流母线电压的抗扰性能。

/// 电气化交通 ///

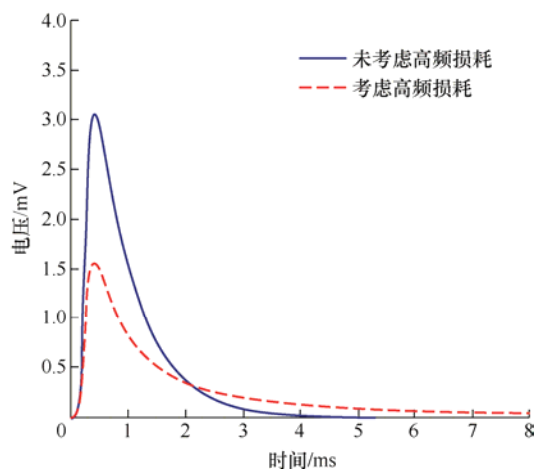
432 基于 EMD-BPNN 的逆变器 IGBT 开路故障诊断方法

钱存元 吴 昊 陈昊然



① 变压器 ② 220 V 转 5 V 电源 ③ 控制板 ④ 功率板
⑤ 采集系统控制器 ⑥ 电流传感器 ⑦ 信号调理箱
⑧ 三相异步电机 ⑨ 计算机

摘要: 绝缘栅双极性晶体管(Insulated gate bipolar transistor, IGBT)作为逆变器的主要组成部分, 其工作的稳定性与可靠性对逆变器的正常工作有着重要的影响。针对三相电机牵引逆变器 IGBT 常见的单管和双管开路故障, 提出一种基于经验模态分解(Empirical mode decomposition, EMD)和误差反向传播神经网络(Back propagation neural network, BPNN)相结合的故障诊断方法。首先分析逆变器 IGBT 单管和双管开路故障的波形特征, 采用 EMD 方法对逆变器输出的三相电流进行分解; 在此基础上构造故障特征向量, 采用 BPNN 对特征向量进行训练并实现故障诊断; 其次针对 EMD 方法存在的“模态混叠”问题, 采用互补集合经验模态分解(Complementary ensemble empirical mode decomposition, CEEMD)对诊断方法进行了优化; 最后在小型试验平台上进行了试验, 试验结果表明, 基于 CEEMD-BPNN 的故障诊断方法能够有效诊断出故障功率管。



摘要: 在实际的电路系统中,电感和电容具有分数阶特性,若完全用整数阶模型去描述,会存在误差,同时,现有方法对轨道电路端接频变负载、考虑由集肤效应引起的高频损耗问题,具有处理难度大、耗时长缺陷。基于此,提出一种在复频域内对 ZPW-2000A 型轨道电路接收端轨面电压的求解方法。首先,建立轨道电路分数阶传输线模型;其次,利用节点导纳法结合商差(Quotient-difference, Q-D)算法对轨面电压进行求解;最后,通过与时域有限差分法对比验证了所提方法的正确性,分析了在不同暂态信号激励下轨道电路受电端过电压的影响规律。结果表明,轨道电路分数阶传输线模型符合轨面电压传播规律,为轨道电路的准确建模提供了理论参考。

- 1 **Review of Condition Monitoring and Fault Diagnosis Methods for Grid-connected VSC**
SONG Shaopeng TIAN Yanjun LI Xin XU Xiaoqi
- 14 **V-I Curve Modeling of IGBT Modules and Applications for Junction Temperature Extraction**
LIU Hongtao WANG Haoqi ZHANG Xiaokang REN Lintao LUO Yu WANG Fei
- 23 **Research on Non-contact Condition Monitoring of Converter IGBTs Based on High-frequency Switching Oscillations**
CAO Yueyang XIANG Dawei LI Hao
- 31 **IGBT Temperature Equalization Control of DC/DC Converter in DC Microgrid**
ZHANG Bo GUO Xiaorui LIU Yafeng SUN Yingjun HUANG Rui GAO Yuan
- 41 **Multi-time Scale Life Assessment Method for Energy Storage Inverters**
DING Chaohui JIANG Jun YUAN Tian WANG Zhihuan ZHANG Jun
- 50 **Online Detection of SiC MOSFET Junction Temperature Based on Voltage Fall Time**
FAN Zuwei WEI Weiwei XU Guoqing
- 60 **Online Monitoring of Supercapacitor SOH Using PWM High-frequency Switching Oscillations**
GAO Jian XIANG Dawei LI Hao XIE Qiang
- 70 **Analysis of the Coupling Relationship of IGBT Turn on Transient Process Based on Transport Coefficient**
YUAN Wenqian JI Yirun YUAN Xi HUAI Qing GAO Yanfeng SONG Peng
- 84 **Temperature Rise and Identification Model of IGBT Chips Considering High Altitude Environment and Solder Layer Defects**
WANG Bingqiang LÜ Fangcheng ZHANG Chunyang LIU Hongchun PING Cuodunzhu
LIU Xuanyi YUAN Cheng XU Wenkou WANG Ping GENG Jianghai LIU Yunpeng DU Juan
ZENG Jun CI Deji
- 98 **Life Prediction of Railway Relays Based on TPE-Informer Model**
NIE Jingjie LIU Shuxin XING Chaojian XU Jing LI Yankai
- 107 **Simulation Study on IGBT Functional Model in HVDC Circuit Breaker**
JU Lufeng HE Yanhua WANG Qunjing CHEN Zhong ZHANG Qian CHEN Quan
- 115 **Research on Voltage Overlimit Suppression Measures for Weak Traction Networks Based on Energy Storage Type Railway Power Conditioner**
LI Teng MA Yonggang HOU Fengjuan LIANG Zerong
- 128 **Simulation Research on Optimization of Air-cooling System for Power Converter**
GONG Fei GUO Honghao LIU Zeyuan
- 137 **Three-winding LLC Resonant Converter with Integrated Voltage Balancing**
HU Shili WU Yao LEI Yu HUANG Yanhui LIU Fei

- 149 **Analysis of PT Short-circuit Fault Characteristics Based on Three-phase 4PT Wiring Method**
 KUANG Honggang HU Zongjun LI Xiaobin GONG Can YAO Yuan DU Qingyun FENG Yiwei
 DONG Shoulong
- 159 **Study on Improved Deadbeat Hybrid Control Strategy for Vienna Rectifier**
 XU Wenxi GUO Qiang JIA Yong ZHANG Yuefei ZHENG Hongjian
- 169 **Review of Research on Hysteresis Models for Magnetic Materials**
 CHANG Yong BAO Guangqing YANG Qiaoling HE Ting
- 190 **Survey Overview of Transverse Flux Motor**
 SUN Qiang GONG Pengcheng
- 208 **Adaptive Disturbance Rejection Control Harmonic Current Suppression of Dual Three-phase Permanent Magnet Synchronous Generator Based Double-loop Synchronous Rotation**
 XU Dezhi GONG Kai HE Yang ZHAO Wenxiang
- 220 **Magneto-thermal-solid Coupling Analysis of an Axially Spherical Bearingless Flywheel Machine**
 ZHU Zhiying MENG Fanhao XU Zheng AN Cong JIAO Jinshuai
- 228 **Research on Torque Ripple Suppression of Reluctance Spherical Motor Based on Constant Torque Control**
 FENG Youliang WANG Qunjing JU Lufeng LI Guoli ZHOU Rui
- 238 **Sliding Mode Control of Permanent Magnet Linear Synchronous Motor Based on a Novel Ultra-local Model**
 SHEN Yanxia LUO Changxi
- 248 **Intelligent Gear Fault Diagnosis for Dual-signal Fusion Based on the Stator Current and the Electromagnetic Torque**
 LI Wei YUAN Xiangdong CHEN Wei LIU Jun
- 257 **Robust Position Control of PMSLM Based on Feedback Transform and Integral Backstepping**
 CHEN Chen ZHAO Jing ZHU Long DONG Fei
- 266 **Design of PMSM Regulator Based on Improved Marine Predator Algorithm**
 ZHOU Yanhua HAN Yaohui ZENG Guohui FU Xiuwei
- 274 **Research on Energization Strategy to Reduce the Copper Loss of the Permanent-magnet Spherical Motor**
 XU Yangfan LI Guoli SUN Zehui WANG Qunjing WEN Yan
- 286 **Startup Analysis and Optimization of High Frequency Isolated Bidirectional DC/DC Converter for Urban Flexible Power Supply**
 LING Yu BAO Weihai LU Chao ZHANG Ning ZHOU Te LI Yaowang WANG Peng
- 295 **Model-free Predictive Direct Voltage Control of Three-phase Vienna Rectifier**
 YANG Ao YU Xinhong XU Libin HUANG Dongxiao KE Dongliang WANG Fengxiang
- 306 **Anti-saturation Online Power Acquisition Method Based on Constant Power**
 FAN Bishuang ZOU Yang

- 315 **A Double Capacitor Commutated Hybrid DC Circuit Breaker**
TAO Caixia WANG Wenbo LI Taiguo JIANG Lu ZHANG Jiangang
- 325 **Hybrid Modulation-based Harmonic Suppression Method for a Matrix Converter**
XU Yuxiang CAI Zhiduan LEI Nengwei LI Xiaoguang
- 334 **Complex Fault Location Method of Active Distribution Network Based on Finite Number μ PMU and Compression Perception Theory**
SHI Zehui MU Longhua
- 343 **Measurement of Combined Gap in Whole Process of Transmission Lines' Live Working Based on 3D Laser Point Cloud**
ZHANG Haitao WANG Ying LÜ Qiang MA Zhougui
- 353 **Detection of False Data Injection Attack Based on GATv2 Model**
LUO Xiaoyuan GENG Yifan WU Liyan WANG Xinyu
- 362 **Integrated Energy System Planning with Distributed Energy Storage Considering Source Load Uncertainty under High PV Penetration**
GU Jiaqi GUO Zuo SUN Xiangyu GU Yang YUE Fuchang LI Hong LI Guangxi
- 377 **Research on Virtual Circuit Automatic Verification Method Based on Improved Bi-LSTM**
CAO Haiou ZHANG Yue GE Yaming SHEN Jiaoxiao TANG Changfeng REN Xuchao CHEN Hengxiang
- 385 **Review of Power-type Energy Storage Technology and Application**
ZHANG Xiaohu ZHANG Xiong WANG Kai SUN Xianzhong MA Yanwei
- 399 **Remaining Useful Life Prediction for Lithium-ion Batteries Based on IWOA-LSSVM**
LI Cheng CHEN Qiu YU Yingying CHEN Chaoheng QIAO Supeng
- 412 **Operation Optimization of Wind-solar-diesel-storage Hybrid Power System Considering Load Forecasting**
TANG Xiuming ZHU Xinke CHEN Jun YUAN Rongxiang
- 423 **Energy Storage Control Strategy for Photovoltaic Microgrid Based on Active Disturbance Rejection Control**
WANG Yuqi ZHAO Xingyong LAI Jianzhong GAO Lanxiang SONG Lingyan LI Guijun
- 432 **Open-circuit Fault Diagnostics Method for IGBT of Inverter Based on EMD-BPNN**
QIAN Cunyuan WU Hao CHEN Haoran
- 443 **Transient Analysis of ZPW-2000A Rail Circuit Based on Fractional Order Transmission Line Theory**
AN Yi ZHAO Bin