

电网技术



POWER SYSTEM TECHNOLOGY

第45卷7期
Vol.45 No.7



股票代码: 600498

烽火通信科技股份有限公司

FiberHome Telecommunication Technologies Co., Ltd.

烽火台区智能终端

— 助力电网智慧台区建设



- ✓ 营销配电贯通, 数据监测一体化
- ✓ 云管边端高效协同, 实现边缘计算
- ✓ 线损细化管理, 运维主动出击
- ✓ 有序用电管理, 均衡能源需求
- ✓ APP容器化部署, 业务高效管理
- ✓ 工业级安全防护, 保障数据安全



扫码关注烽火行业业务公众号

地址: 湖北省武汉市东湖高新开发区高新四路六号

电话: 027-87693766 网址: www.fiberhome.com

ISSN 1000-3673



国家电网有限公司 主办

编辑委员会

主任：周孝信

委员（按姓氏笔画排序）：

丁明 卫志农 王成山 王伟胜
王益民 王海风 韦化 文劲宇
文福拴 艾芊 毕天姝 吕运强
刘健 刘广一 刘开培 刘玉田
刘明波 刘建明 汤涌 孙华东
孙宏斌 严正 李卫东 李亚楼
李成榕 杨胜春 肖先勇 别朝红
何正友 张东霞 张乔根 周浩
周泽昕 段献忠 姚良忠 袁小明
徐政 郭剑波 梅生伟 曹一家
曹均正 盛万兴 康重庆 董新洲
程浩忠 谢小荣 路书军 廖瑞金
穆钢 鞠平

青年委员（按姓氏笔画排序）：

丁一 王蓓蓓 冯双磊 吕泉
刘友波 刘敦楠 齐波 汤奕
孙国强 李勇 李斌 李卫星
李生虎 李建林 吴学智 张宁
张波 张志劲 陆超 易俊
胡伟 胡泽春 郭庆来 涂春鸣
崔杨 焦在滨 裴玮 魏晓光

顾问委员会

主任：郑健超

委员（按姓氏笔画排序）：

马伟明 王锡凡 卢强 朱英浩
刘吉臻 汤广福 杨奇逊 严陆光
吴复立 邱爱慈 余贻鑫 汪槩生
沈国荣 宋永华 陆佑楣 陈清泉
陈维江 罗安 郑宝森 顾国彪
唐任远 黄其励 韩祯祥 程时杰
舒印彪 薛禹胜

目次

· 电力领域数字孪生技术应用研究与实践

（特约专栏主编 邱才明、沈沉、周二专、贺兴）·

基于电热特性融合分析的油浸式变压器匝间短路故障辨识方法
.....张立静, 盛戈峰, 侯慧娟, 江秀臣 (2473)

基于数字孪生驱动的智慧微电网多智能体协调优化控制策略
.....高扬, 贺兴, 艾芊 (2483)

基于特征选择和随机森林的电力系统受扰后动态频率预测
.....李冠争, 李斌, 王帅, 李超, 刘昊, 田杨阳 (2492)

基于数字孪生混合储能的风电功率波动平抑策略
.....刘宇凝, 王迎丽, 徐明文, 张晓珩 (2503)

数字孪生在先进核能领域中的关键技术与应用前瞻
.....胡梦岩, 孔繁丽, 余大利, 杨军 (2514)

· 国家重点研发计划 ·

计及异质气体混合的电-气-热综合能源系统能量流计算方法
.....高鹏飞, 周孝信, 杨小煜, 李亚楼, 李芳 (2523)

多级协同虚拟电厂环境下的无功辅助服务优化出清
.....刘浩文, 刘东, 陈张宇, 徐晓春, 戴欣 (2533)

基于精细化需求响应的虚拟电厂优化调度
.....陈张宇, 刘东, 刘浩文, 尤宏亮, 吴晓飞 (2542)

基于深度神经网络的电力系统快速状态估计
.....俞文帅, 张晓华, 卫志农, 孙国强, 臧海祥, 杨滢璇, 韩月 (2551)

基于差分分解和误差补偿的短期电力负荷预测方法
.....王增平, 赵兵, 贾欣, 高欣, 李晓兵 (2560)

基于数据驱动和条件概率的调频容量需求计算方法
.....刘礼恺, 胡泽春, 罗浩成, 宁剑 (2569)

数据驱动的用户需求响应行为建模与应用
.....彭大健, 裴玮, 肖浩, 杨艳红, 唐成虹 (2577)

LCC-MMC型混合直流输电系统送端交流故障穿越控制策略
.....李国庆, 娄伟涛, 辛业春, 江守其, 王拓 (2586)

具备故障电流对称清除能力的双向开关钳位式全桥子模块
.....王琛, 陶建业, 王毅, 许同, 魏晓光, 王新颖 (2596)

直流微电网多端口变换器虚拟惯性控制策略
.....曹建博, 王林, 黄辉, 吴金龙, 郭亚秋, 李宪鹏 (2604)

量测装置优化配置下的分布式配电网故障定位方法
.....胡明峰, 刘洋, 华斌 (2616)

· 电力系统 ·

利用注入信号的配电网自适应三相重合闸研究
.....廖宏宇, 康小宁, 袁燕磊, 李珂 (2623)

欧洲大陆同步电网“1-8”解列事故分析及启示
.....孙为民, 张一驰, 张晓涵, 安学民, 屠竞哲, 何剑, 周勤勇 (2630)

次暂态电势固有响应延迟对电压恢复性能影响及应对策略
.....郑超, 舒展, 吕思卓, 蔡霞, 李惠玲, 邓健 (2638)

可再生能源电力系统运行灵活性需求量化及优化调度方法
.....李静轩, 周明, 朱凌志, 孙轶恺, 张利军 (2647)

考虑充电功率衰减的电动汽车两阶段优化调度策略
.....刘向军, 牟明亮, 黄绍模, 刘迪, 孙毅, 张旭东, 李飞 (2656)

计及用电满意度优先级划分的负荷聚合商调度策略研究
.....何沁蔓, 刘晓峰, 王琦, 孙旺青 (2666)

仿射型区间潮流算法应用与展望
.....黄耿业, 邵振国, 黄国皓, 陈飞雄 (2675)

交直流混合配电网改进区间潮流算法.....费迎阳, 江岳文, 洪启腾 (2683)

模块化多电平矩阵变换器一致渐近稳定控制器设计
夏超英, 门旭明, 于佳丽 (2692)
 降低不平衡电网下 PWM 整流器开关频率的顺序模型预测直接功率控制方法
魏昂, 王丹, 武文杰, 王浩亮, 刘陆, 彭周华 (2700)
 基于谐波状态空间的车网耦合系统小信号阻抗建模和稳定性分析
李志远, 吴思奇, 孟祥宇, 刘志刚, 张晗 (2709)
 基于 Bi-LSTM 和特征关联性分析的日尖峰负荷预测
李玉志, 刘晓亮, 邢方方, 温国强, 卢楠滢, 何慧, 焦润海 (2719)
 注入电流馈线分布特征及其在接地故障检测中的应用
刘宝稳, 曾祥君, 张慧芬, 马宏忠 (2731)

· 高比例可再生能源并网 ·

计及风险备用约束的输电网风储容量双层优化
刘若河, 贾燕冰, 付可宁, 韩肖清 (2741)
 弱电网下风电有功出力对次同步振荡特性影响分析及参数调整
郝亚峰, 梁军, 王克文, 吴广禄, 王要强 (2752)
 计及细节层次直接负荷控制的区域综合能源系统多时间尺度优化调度
朱兰, 田泽清, 唐陇军, 李孝均, 崔楷舜 (2763)
 考虑风向和大气稳定度的海上风电功率短期预测
戚创创, 王向文 (2773)
 基于损耗系数的双馈风机系统阻尼控制研究
章艳, 张萌, 高晗 (2781)
 基于“共享储能-需求侧资源”联合跟踪可再生能源发电曲线的市场化消纳模式
刘敦楠, 赵宁宁, 李鹏飞, 刘明光, 许小峰, 邵平, 曹晓峻 (2791)
 基于电转气反应热应用和合作博弈的电转气装置容量规划
张锴, 郭小璇, 韩帅, 孙乐平 (2801)
 基于异质依存网络的电-气区域综合能源系统弹性评估
彭寒梅, 李才宝, 刘健锋, 苏永新, 谭貌 (2811)

· 面向新一代电力系统和能源互联网的人工智能技术 ·

基于深度学习的输电线路螺栓检测技术
张姝, 王昊天, 董晓翀, 李玉容, 李辉, 王新迎, 孙英云 (2821)
 基于强化学习理论的输电网扩展规划方法
王渝红, 胡胜杰, 宋雨妍, 江粟, 沈力 (2829)
 基于时间序列的配电网数据清理和融合方法研究
朱有产, 梁玮轩, 王英姿 (2839)

· 直流输电与直流电网 ·

半桥-全桥子模块混合型 MMC 的换流阀损耗分析方法
赵宇含, 王鑫, 赵成勇, 杨琳 (2847)
 高频变压器技术研究综述
叶志军, 林晓明, 谭锴佳, 罗继亮, 郝亮亮 (2856)
 直流感地极入地电流引起的高速铁路系统不同位置变压器直流电流分布规律
张华志, 宋伟, 黄军, 陈争, 李晨琨, 张波 (2871)
 考虑交直流谐波交互影响的高压直流开关函数建模
丁天皓, 汪娟娟, 叶运铭, 陈威, 傅闯 (2879)

· 高电压技术 ·

基于新奇检测的两级电气故障声纹识别算法
孙汉文, 李喆, 林睿, 江一, 盛戈峰, 江秀臣 (2888)
 激光清除硅橡胶伞裙污秽及老化表层技术研究
袁田, 龚宇佳, 张锦, 王昱晴, 童悦, 杨国泰 (2896)
 自然环境下覆冰绝缘子长串交流闪络电压及电弧发展现象
何昱葵, 张志劲, 傅海涛, 武剑, 郑凯, 蒋兴良 (2904)
 快速开关多场协同仿真下的应力与形变研究
王汝凡, 王德全, 邱军, 尹红阳, 冷彤, 廖敏夫 (2913)

· 广告索引 · (2924)

《工程索引》(EI) 收录核心期刊
 2015 和 2017 年度中国“百强报刊”
 中国最具国际影响力学术期刊
 中国百种杰出学术期刊
 中国精品科技期刊
 全国中文核心期刊
 RCCSE 中国权威学术期刊
 《科学文摘》(SA) 收录期刊
 《文摘杂志》(AJ) 收录期刊
 中国科学引文数据库 (CSCD)
 中国期刊方阵双效期刊
 电力行业优秀科技期刊

《电网技术》(月刊)

第 45 卷 第 7 期 (总第 452 期)

主 管: 国家电网有限公司
 主 办: 国家电网有限公司
 编 辑: 中国电科院期刊中心
 《电网技术》编辑部
 出 版: 《电网技术》杂志社有限公司
 主 编: 郭剑波
 副主编: 汤 涌、康重庆、孙华东
 编辑部副主任: 李兰欣 010-82812543
 广告发行: 韩 迪 010-82812465
 闫 岷 010-82812430
 编 辑: 010-82812523/2672/2981/2982
 网上投稿: <http://www.dwjs.com.cn>
 电力系统内部电话: 91862+后四位
 传 真: 010-82812980
 地 址: 100192 北京清河小营东路 15 号
 中国电力科学研究院有限公司内
 印 刷: 北京科信印刷有限公司
 北京市昌平区北清路马连店甲 6 号
 总发行: 北京报刊发行局
 国外发行: 中国国际图书贸易总公司
 订 阅: 全国各地邮局
 国内定价: 每期 80 元, 全年 960 元
 邮发代号: 国内 82-604 国外 1474M
 中国标准连续出版物号: ISSN 1000-3673
CN 11-2410/TM
 广告发布登记号: 京海市监广登字 20170131 号

期刊基本参数: CN 11-2410/TM * 1957 * M * A4 * 451 * zh * P * ¥80.00 * 20000 * 48 * 2021-7 版权所有 未经许可不得转载及上网

POWER SYSTEM TECHNOLOGY

2021, Vol. 45 No. 7 (Ser. 452)

Contents

• Digital Twin Technology and Its Application in Power Industry •

- Detection Method of Interturn Short-circuit Faults in Oil-immersed Transformers Based on Fusion Analysis of Electrothermal Characteristic ZHANG Lijing, SHENG Gehao, HOU Huijuan, JIANG Xiuchen (2473)
- Multi Agent Coordinated Optimal Control Strategy for Smart Microgrid Based on Digital Twin Drive GAO Yang, HE Xing, AI Qian (2483)
- Dynamic Frequency Prediction of Power System Post-disturbance Based on Feature Selection and Random Forest LI Guanzheng, LI Bin, WANG Shuai, LI Chao, LIU Hao, TIAN Yangyang (2492)
- Wind Power Fluctuation Smooth Strategy Based on Digital Twin Hybrid Energy Storage LIU Yuning, WANG Yingli, XU Mingwen, ZHANG Xiaoheng (2503)
- Key Technology and Prospects of Digital Twin in Field of Advanced Nuclear Energy HU Mengyan, KONG Fanli, YU Dali, YANG Jun (2514)

• National Key Research and Development Program of China •

- Energy Flow Calculation of Integrated Electricity, Natural Gas and Heating Systems Considering Mixtures of Gas With Alternative Qualities GAO Pengfei, ZHOU Xiaoxin, YANG Xiaoyu, LI Yalou, LI Fang (2523)
- Optimal Reactive Power Service Clearing Based on Multilevel Cooperative VPP LIU Haowen, LIU Dong, CHEN Zhangyu, XU Xiaochun, DAI Xin (2533)
- Optimal Dispatching of Virtual Power Plant Based on Refined Demand Response CHEN Zhangyu, LIU Dong, LIU Haowen, YOU Hongliang, WU Xiaofei (2542)
- Fast State Estimation for Power System Based on Deep Neural Network YU Wenshuai, ZHANG Xiaohua, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, ZANG Haixiang, YANG Yingxuan, HAN Yue (2551)
- Short-term Power Load Forecasting Method Based on Difference Decomposition and Error Compensation WANG Zengping, ZHAO Bing, JIA Xin, GAO Xin, LI Xiaobing (2560)
- Data-driven Based Regulation Reserve Capacity Requirement Calculation Using Conditional Probability LIU Likai, HU Zechun, LUO Haocheng, NING Jian (2569)
- Data-driven Consumer Demand Response Behavior Modelization and Application PENG Dajian, PEI Wei, XIAO Hao, YANG Yanhong, TANG Chenghong (2577)
- AC Fault Ride-through Control Strategy for Sending End of LCC-MMC Hybrid DC Transmission System LI Guoqing, LOU Weitao, XIN Yechun, JIANG Shouqi, WANG Tuo (2586)
- Bidirectional Switch Clamp Full Bridge Submodule With Fault Current Symmetrical Clearing Capability WANG Chen, TAO Jianye, WANG Yi, XU Tong, WEI Xiaoguang, WANG Xinying (2596)
- Virtual Inertia Control Strategy of Multi-port Converter Used in DC Micro-grid CAO Jianbo, WANG Lin, HUANG Hui, WU Jinlong, GAO Yaqiu, LI Xianpeng (2604)
- Distributed Fault Location for Distribution Networks Under Optimal Configuration of Measuring Devices HU Mingfeng, LIU Yang, HUA Bin (2616)

• Power System •

- Adaptive Three-phase Reclosing Device of Distribution Network Based on Injected Signals LIAO Hongyu, KANG Xiaoning, YUAN Yanlei, LI Ke (2623)
- Analysis and Lessons of Disconnection Accident of Synchronous Power Grid in Continental European Area (on January 8, 2021) SUN Weimin, ZHANG Yichi, ZHANG Xiaohan, AN Xuemin, TU Jingzhe, HE Jian, ZHOU Qinyong (2630)
- Influence of Inherent Response Delay of Subtransient Potential on Voltage Recovery Performance and Its Countermeasures ZHENG Chao, SHU Zhan, LÜ Sizhuo, CAI Xia, LI Huiling, DENG Jian (2638)
- Flexibility Requirement Quantifying and Optimal Dispatching for Renewable Integrated Power Systems LI Jingxuan, ZHOU Ming, ZHU Lingzhi, SUN Yikai, ZHANG Lijun (2647)
- Two-stage Optimal Scheduling Strategy of Electric Vehicle Considering Charging Power Decay LIU Xiangjun, MU Mingliang, HUANG Shaomo, LIU Di, SUN Yi, ZHANG Xudong, LI Fei (2656)
- Scheduling Strategy of Load Aggregator Considering Priority Classification of Electricity Consumption Satisfaction HE Qinman, LIU Xiaofeng, WANG Qi, SUN Wangqing (2666)
- Application and Prospect of Interval Power Flow Algorithm Based on Affine Arithmetic HUANG Gengye, SHAO Zhenguo, HUANG Yuanhao, CHEN Feixiong (2675)
- Improved Interval Power Flow Algorithm for AC/DC Hybrid Distribution Network FEI Yingyang, JIANG Yuewen, HONG Qiteng (2683)
- Design of Global Asymptotical Stable Control Scheme for Modular Multilevel Matrix Converter XIA Chaoying, MEN Xuming, YU Jiali (2692)
- Sequential Model Predictive Control to Reduce the Switching of PWM Rectifier Under Unbalanced Grid-side Conditions WEI Ang, WANG Dan, WU Wenjie, WANG Haoliang, LIU Lu, PENG Zhouhua (2700)
- Harmonic State-space Based Small Signal Impedance Modeling and Stability Analysis of Vehicle-grid Coupling System LI Zhiyuan, WU Siqi, MENG Xiangyu, LIU Zhigang, ZHANG Han (2709)

Daily Peak Load Prediction Based on Correlation Analysis and Bi-directional Long Short-term Memory Network	LIU Yuzhi, LIU XiaoLiang, XING Fangfang, WEN Guoqiang, LU Nanyan, HE Hui, JIAO Runhai (2719)
Distribution Model of Injection Current in Feeder and Its Application in Single Phase to Ground Fault Detection	LIU Baowen, ZENG Xiangjun, ZHANG Huifen, MA Hongzhong (2731)
• High Share of Renewable Energy Integration •	
Double-layer Optimization for Wind and Energy Storage Capacity Configuration in Transmission Network Considering Security Reserve Constraints	LIU Ruohe, JIA Yanbing, FU Kening, HAN Xiaoqing (2741)
Influence of Active Power Output of Full-converter Wind Farm on Subsynchronous Oscillation Characteristics and Parameter Adjustment in Weak Grid	HAO Yafeng, LIANG Jun, WANG Kewen, WU Guanglu, WANG Yaoqiang (2752)
Multi-time-scale Optimal Dispatch of Regional Integrated Energy System Considering Level of Detail Direct Load Control	ZHU Lan, TIAN Zeqing, TANG Longjun, LI Xiaojun, CUI Kaishun (2763)
Short-term Prediction of Offshore Wind Power Considering Wind Direction and Atmospheric Stability	QI Chuangchuang, WANG Xiangwen (2773)
Damping Control for Grid Connected DFIG System Based on Dissipated Energy Coefficient	ZHANG Yan, ZHANG Meng, GAO Han (2781)
Market-oriented Consumption Model Based on the Joint Tracking of Renewable Energy Generation Curve of “Shared Energy Storage & Demand Side Resources”	LIU Dunnan, ZHAO Ningning, LI Pengfei, LIU Mingguang, XU Xiaofeng, SHAO Ping, CAO Xiaojun (2791)
Capacity Planning of Power-to-gas Devices Considering Reaction Heat Recovery and Cooperative Game	ZHANG Kai, GUO Xiaoxuan, HAN Shuai, SUN Leping (2801)
Resilience Assessment of Electricity-gas Regional Integrated Energy System Based on Heterogeneous Interdependent Network	PENG Hanmei, LI Caibao, LIU Jianfeng, SU Yongxin, TAN Mao (2811)
• Artificial Intelligence Technology Application in New Generation Power System and Energy Internet •	
Bolt Detection Technology of Transmission Lines Based on Deep Learning	ZHANG Shu, WANG Haotian, DONG Xiaochong, LI Yurong, LI Ye, WANG Xinying, SUN Yingyun (2821)
Transmission Expansion Planning Based on Reinforcement Learning	WANG Yuhong, HU Shengjie, SONG Yuyan, JIANG Li, SHEN Li (2829)
Research on Data Cleaning and Fusion in Distribution Power Grid Based on Time Series Technology	ZHU Youchan, LIANG Weixuan, WANG Yingzi (2839)
• HVDC Transmission & HVDC Grid •	
Converter Valve Loss Analysis Based on Half Bridge-full Bridge Sub-module Hybrid MMC	ZHAO Yuhan, WANG Xin, ZHAO Chengyong, YANG Lin (2847)
Review of High Frequency Transformer Technology	YE Zhijun, LIN Xiaoming, TAN Kaijia, LUO Jiliang, HAO Liangliang (2856)
DC Current Distribution Law of Transformers at Different Positions in High-speed Railway System Caused by Ground Return Current From HVDC Grounding Electrode	ZHANG Huazhi, SONG Wei, HUANG Jun, CHEN Zheng, LI Chenkun, ZHANG Bo (2871)
Switching Function Modeling of HVDC Converter Taking Into Account AC/DC Harmonic Interaction	DING Tianhao, WANG Juanjuan, YE Yunming, CHEN Wei, FU Chuang (2879)
• High Voltages •	
Two-stage Voiceprint Recognition Algorithm of Electrical Faults Based on Novelty Detection	SUN Hanwen, LI Zhe, LIN Rui, JIANG Yi, SHENG Gehao, JIANG Xiuchen (2888)
Technology of Removing Pollution and Aging Surface of Silicone Rubber Shed	YUAN Tian, GONG Yujia, ZHANG Jin, WANG Yuqing, TONG Yue, YANG Guotai (2896)
AC Flashover Voltage and Arc Development of Long Insulators Strings in Natural Icing Environment	HE Yushen, ZHANG Zhijin, FU Haitao, WU Jian, ZHENG Kai, JIANG Xingliang (2904)
Research on Stress and Deformation Under Multi-field Cooperative Simulation of Fast Switch	WANG Rufan, WANG Dequan, QIU Jun, YIN Hongyang, LENG Tong, LIAO Minfu (2913)

Sponsor: State Grid Corporation of China

In Cooperation with: China Electric Power Research Institute (CEPRI)

Chairman of Editorial Committee: Zhou Xiaoxin

Editor-in-Chief: Guo Jianbo

Editor and Publisher: Power System Technology Press

Associate Director of Editorial Board: Li Lanxin

Publication Number: ISSN 1000-3673

CODEN: DIJIES **Devey#:** 621.31

Address: China Electric Power Research Institute, Qinghe, Beijing 100192, China

Tel/Fax: 86-10-82812980

E-mail: pst@epri.sgcc.com.cn <http://www.dwjs.com.cn>

Agent of Subscriptions Abroad: China International Book Trading Corporation (GUOJISHUDIAN) P.O.Box 399, Beijing, China