

# 电网技术



## POWER SYSTEM TECHNOLOGY

第46卷7期

Vol.46 No.7

中电赛普

求实 公正 科学 进取



自愿性产品认证



碳中和认证



服务认证



国推认证



人员认证

### 10kV配网不停电作业服务认证

已开展山东省24家、江苏省61家省管产业单位的服务认证工作  
助力提升供电服务能力及配网供电可靠性

#### 依据标准

CEPRI-BS-401-01/2020 《配网不停电作业服务认证要求》

CEPRI-BS-201-01/2020 《配网不停电作业服务认证实施规则》

### 电网无人机巡检服务认证

已率先发放全国电网无人机巡检服务认证证书  
持续推进电网无人机巡检作业标准化、规范化

#### 依据标准

CEPRI-BS-402-01/2021 《电网无人机巡检服务要求》

CEPRI-BS-202-01/2021 《电网无人机巡检服务认证实施规则》



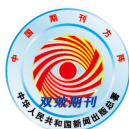
国家电网  
STATE GRID

中电赛普检验认证(北京)有限公司  
CHINA POWER CEPRI INSPECTION AND CERTIFICATION (BEIJING) CO., LTD

中电赛普检验认证(北京)有限公司

地址:北京市海淀区小营东路15号 邮编:100192 电话:010-82812398

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 汪懋生  
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

### · 负荷调控三年行动计划 ·

负荷侧可调节资源市场交易机制分析与探讨

.....耿建, 周竞, 吕建虎, 郭晓蕊, 王珂, 杨胜春 (2439)

基于条件时序生成对抗网络的楼宇空调负荷场景生成方法

.....曾爽, 丁屹峰, 李香龙, 白晶, 马麟, 陈平, 焦然, 杨婷 (2448)

### · 国家重点研发计划 ·

数字孪生技术在船舶综合电力系统中的应用前景与关键技术

.....庞宇, 黄文焘, 吴骏, 贺兴, 邵能灵, 胡思哲 (2456)

基于变工况模型的综合能源系统源-荷互动多目标优化调度

.....李云鹤, 刘吉臻, 马素玲, 胡阳 (2472)

考虑风险的交直流混联系统鲁棒备用优化

.....陈哲, 华文, 石博隆, 董炜 (2483)

无锁相环直接功率控制下双馈风电与VSC-HVDC互联系统高频振荡抑制技术

.....年珩, 童豪, 胡彬, 李萌, 廖玉茗 (2492)

基于深度残差网络的电力系统暂态电压稳定评估

.....季佳仲, 吴俊勇, 王彦博, 史法顺, 李宝琴 (2500)

优化储能VSG动态特性的d轴电流微分前馈控制

.....姜静雅, 王玮, 唐芬, 吴学智, 杨正文 (2510)

考虑火-储深度调峰容量二次分配的含风电电力系统分层优化调度

.....崔杨, 修志坚, 薄利明, 刘新元, 赵钰婷, 郑惠萍 (2520)

全环氧固封高频变压器散热优化设计研究

.....靳艳娇, 乔光尧, 邓占锋, 李芳义, 李卫国, 赵国亮, 刘海军 (2531)

### · 面向新型电力系统和能源互联网的人工智能技术 ·

基于标签传播算法的电网主动解列断面快速定位方法

.....张松涛, 张东霞, 李宗翰, 乔骥, 王新迎, 古思丽, 任汉涛, 陈二松 (2538)

基于深度强化学习组合优化的配电网拓扑控制研究

.....闫冬, 彭国政, 高海龙, 陈盛, 周钰山 (2547)

考虑区间构造的改进极限学习机短期电力负荷区间预测

.....曾林俊, 许加柱, 王家禹, 梁志宏, 李芸, 钟朝峰 (2555)

基于NL2SQL实现电力数据智能交互

.....张中正, 王蓓, 赵建保, 胡学勇, 郑勇锋, 王承宇 (2564)

基于编解码器的电力施工场景可控图像字幕生成

.....杨润霞, 邵洁, 罗岩, 白万荣 (2572)

基于异质边图注意力网络的电力系统振荡评估模型

.....朱思婷, 管霖, 郭梦轩, 黄济宇, 陈臻凯, 钟智 (2581)

基于改进Faster R-CNN的太阳能电池板缺陷识别

.....张文彪, 马永华, 白晓静, 谈元鹏, 皮宇啸 (2593)

基于条件互信息与LSTNet的特高压变压器顶层油温预测方法

.....缪希仁, 林蔚青, 肖洒, 江灏, 陈静, 庄胜斌 (2601)

基于变分模态分解和多模型融合的用户级综合能源系统超短期负荷预测

.....叶剑华, 曹旌, 杨理, 罗凤章 (2610)

### · 电力市场 ·

市场机制下推动风电参与电力市场的实践总结与启示

.....程建东, 赵浩然, 韩明哲 (2619)

面向分布式电力交易的区块链算法应用研究综述

.....李彬, 杨帆, 赵燕玲, 祁兵, 孙毅 (2632)

基于合作博弈论的日前自备电厂与风电发电权交易模型

.....刘文霞, 王丽娜, 张帅, 李承泽, 王斯娴, 王月汉 (2647)

面向区域调频辅助服务市场的南方电网统一调频控制区设计与策略优化

.....陈静鹏, 张鸿轩, 张勇, 杨林, 楼楠, 王科, 莫熙, 胡亚平 (2657)

· 电力系统 ·

配电网精准投资理论与关键技术综述

.....王泽祺, 刘友波, 任鹏哲, 付云琦, 李健, 于汀, 向月, 刘俊勇 (2665)

基于广域响应的电力系统暂态失步判据综述

.....朱存浩, 马世英, 郑超, 李鹏华, 陈长胜 (2677)

一种用于电力系统低频振荡抑制的新能源电站阻尼注入控制器设计及特性分析

.....熊鸿韬, 汪宗恒, 尚磊, 董旭柱 (2690)

考虑道路交通模型的电动汽车聚合商短时调度策略和响应激励设计

.....朱兰, 王坤, 唐陇军, 丁雨佳, 杨鑫宇, 陈子墨 (2699)

基于非对称纳什谈判的多微网电能共享运行优化策略

.....吴锦领, 楼平, 管敏渊, 黄宇宙, 张炜鑫, 曹元成 (2711)

基于多主体博弈和强化学习的多微网系统协同优化研究

.....刘俊峰, 王晓生, 卢俊波, 曾君 (2722)

考虑空调负荷和柔性热负荷响应的综合能源系统储能鲁棒优化配置

.....张宏业, 吴杰康, 蔡锦健, 王瑞东, 蔡志宏, 刘国新 (2733)

基于向前逐步回归的高损线路窃电检测

.....殷涛, 苏盛, 刘爱国, 舒一飞, 薛阳, 杨艺宁 (2742)

基于低频波动挖掘和高频校正的风电超短期预测

.....韩丽, 李梦洁, 乔妍 (2750)

瞬时功率聚合传输的低电容值大功率级联型风力发电系统

.....张永磊, 朱朋, 原熙博, 彭新, 李炎, 伍小杰 (2759)

计及后备保护优化级数的改进阻抗修正反时限过流保护整定方法

.....黄景光, 李浙栋, 张宇鹏, 张员宁, 陈勇, 翁汉珺, 李振兴, 林湘宁 (2768)

基于火焰燃烧模型的输电线路山火跳闸风险分布评估

.....周恩泽, 樊灵孟, 黄勇, 周游, 周文涛, 陈维捷 (2778)

特殊地形下输电线路等值覆冰厚度计算模型有效性分析和改进研究

.....郝艳捧, 魏发生, 王斌, 阳林, 王俊镠, 黄增浩, 李昊 (2786)

换流变压器阀侧绕组故障分析

.....张艳霞, 韩悦, 成雅超, 刘凯祥 (2794)

· 高电压技术 ·

隔离断路器对供电可靠性影响分析

.....刘有为, 肖燕, 方燕虹 (2804)

考虑最佳 VFTO 抑制效果的螺旋管式阻尼母线电感特性研究

.....吴细秀, 冯晓彤, 胡云枫, 完朋朋, 王翰, 冯宇, 王欢, 侯慧 (2812)

干式铁心电抗器电磁-热-结构多物理场耦合仿真及协同优化研究

.....袁发庭, 吕凯, 唐波, 姜发, 韩毅凛, 黄力 (2823)

考虑地形地貌影响的云南省落雷孕灾环境敏感性分析

.....周仿荣, 潘浩, 马仪, 邓治强, 王羽, 黄顺勇 (2834)

· 工程应用 ·

烟墩-天山 750kV 双回线路不平衡电流的计算与分析

.....王晓彤, 项祖涛, 宋新立, 梁思聪, 李山, 王崇, 符廷罡 (2842)

一种基于 252kV 快速真空断路器的限流技术及其工程实践

.....张汉花 (2850)

· 广告索引 · (2858)

《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47卷 第7期 (总第464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

编辑部主任: 李兰欣 010-82812543

广告发行: 韩迪 010-82812465

闫頔 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

# POWER SYSTEM TECHNOLOGY

2022, Vol. 46 No. 7 (Ser. 464)

## Contents

### • Three-year Action Plan of Load Dispatching and Control •

#### Analysis and Discussion on Transaction Mechanism of Load Side Adjustable Resources in Electricity Market

.....GENG Jian, ZHOU Jing, LÜ Jianhu, GUO Xiaorui, WANG Ke, YANG Shengchun (2439)

#### Scenario Generation of Air Conditioning Loads in Buildings Based on Conditional TimeGAN

.....ZENG Shuang, DING Yifeng, LI Xianglong, BAI Jing, MA Lin, CHEN Ping, JIAO Ran, YANG Ting (2448)

### • National Key Research and Development Program of China •

#### Application Prospect and Key Technologies of Digital Twin for Shipboard Integrated Power System

.....PANG Yu, HUANG Wentao, WU Jun, HE Xing, TAI Nengling, HU Sizhe (2456)

#### Source-load Interactive Multi-objective Optimal Dispatching of Integrated Energy System Based on Off-design Model

.....LI Yunzhi, LIU Jizhen, MA Suling, HU Yang (2472)

#### Risk-based Robust Reserve Scheduling for Hybrid AC-DC Systems via Analytical Target Cascading

.....CHEN Zhe, HUA Wen, SHI Bolong, DONG Wei (2483)

#### High Frequency Resonance Suppression of Doubly Fed Induction Generator Connected to VSC-HVDC System Based on Direct Power Control Without Phase-locked Loop

.....NIAN Heng, TONG Hao, HU Bin, LI Meng, LIAO Yuming (2492)

#### Power System Transient Voltage Stability Assessment Based on Deep Residual Network

.....JI Jiashen, WU Junyong, WANG Yanbo, SHI Fashun, LI Baoqin (2500)

#### Current Differential Feedforward Control of $d$ -axis for Improving Dynamic Characteristics of Energy Storage Virtual Synchronous Generator

.....JIANG Jingya, WANG Wei, TANG Fen, WU Xuezhi, YANG Zhengwen (2510)

#### Hierarchical Optimal Scheduling of Power Systems With Wind Generation Considering Secondary Allocation of Thermal-storage Deep Peaking Capacity

.....CUI Yang, XIU Zhijian, BO Liming, LIU Xinyuan, ZHAO Yuting, ZHENG Huiping (2520)

#### Heat Dissipation Optimization Design of Epoxy Resin Sealing High Frequency Transformer

.....JIN Yanjiao, QIAO Guangyao, DENG Zhanfeng, LI Fangyi, LI Weiguo, ZHAO Guoliang, LIU Haijun (2531)

### • Artificial Intelligence Technology Application in New Generation Power System and Internet •

#### Fast Location Method for Controlled Splitting Sections of Power Grid Based on Label Propagation Algorithm

.....ZHANG Songtao, ZHANG Dongxia, LI Zonghan, QIAO Ji, WANG Xinying, GU Sili, REN Hantao, CHEN Ersong (2538)

#### Research on Distribution Network Topology Control Based on Deep Reinforcement Learning Combinatorial Optimization

.....YAN Dong, PENG Guozheng, GAO Hailong, CHEN Sheng, ZHOU Yushan (2547)

#### Short-term Electrical Load Interval Forecasting Based on Improved Extreme Learning Machine Considering Interval Construction

.....ZENG Linjun, XU Jia Zhu, WANG Jiayu, LIANG Zhihong, LI Yun, ZHONG Chaofeng (2555)

#### Realization of Power Data Intelligent Interaction Based on NL2SQL

.....ZHANG Zhongzheng, WANG Bei, ZHAO Jianbao, HU Xueyong, ZHENG Yongfeng, WANG Chengyu (2564)

#### Controllable Image Caption Generation Based on Encoder-decoder for Power Construction Scene

.....YANG Runxia, SHAO Jie, LUO Yan, BAI Wanrong (2572)

#### Power System Oscillation Evaluation Model Based on Heterogeneous Edge Graph Attention Network

.....ZHU Siting, GUAN Lin, GUO Mengxuan, HUANG Jiyu, CHEN Liukai, ZHONG Zhi (2581)

#### Defect Identification of Solar Panels Using Improved Faster R-CNN

.....ZHANG Wenbiao, MA Yonghua, BAI Xiaojing, TAN Yuanpeng, PI Yuxiao (2593)

#### Forecasting Method for Top Oil Temperature in Ultra-high Voltage Transformers Based on Conditional Mutual Information and LSTNet

.....MIAO Xiren, LIN Weiqing, XIAO Sa, JIANG Hao, CHEN Jing, ZHUANG Shengbin (2601)

#### Ultra Short-term Load Forecasting of User Level Integrated Energy System Based on Variational Mode Decomposition and Multi-model Fusion

.....YE Jianhua, CAO Jing, YANG Li, LUO Fengzhang (2610)

### • Electricity Market •

#### Practice Summary and Enlightenment of Promoting Wind Power to Participate in Power Market Under Market Mechanism

.....CHENG Jiandong, ZHAO Haoran, HAN Mingzhe (2619)

#### A Review on the Application of Blockchain Algorithms for Distributed Power Transactions

.....LI Bin, YANG Fan, ZHAO Yanling, QI Bing, SUN Yi (2632)

#### Cooperation Game Theory-based Model for Trading of Power Generation Rights Between Former Captive Power Plants and Wind Power

.....LIU Wenxia, WANG Lina, ZHANG Shuai, LI Chengze, WANG Sixian, WANG Yuehan (2647)

#### Design and Strategy Optimization of Unified Frequency Control Areas in China Southern Power Grid for Regional Frequency Regulation Auxiliary Service Market

.....CHEN Jingpeng, ZHANG Hongxuan, ZHANG Yong, YANG Lin, LOU Nan, WANG Ke, MO Xi, HU Yaping (2657)

---

## • Power System •

- Review of Key Technologies and Theories of Cost-effective Investment Orienting to Distribution Networks**  
..... WANG Zeqi, LIU Youbo, REN Pengzhe, FU Yunqi, LI Jian, YU Ting, XIANG Yue, LIU Junyong (2665)
- Review of Transient Out-of-step Criterion for Power Systems Based on Wide Area Response**  
..... ZHU Cunhao, MA Shiyong, ZHENG Chao, LI Penghua, CHEN Changsheng (2677)
- Damping Injection Controller of Renewable Energy for Power System Low Frequency Oscillation Mitigation and Its Dynamic Characteristics Analysis**  
..... XIONG Hongtao, WANG Zongheng, SHANG Lei, DONG Xuzhu (2690)
- Electric Vehicle Aggregator Dispatch Strategy and Response Incentive Mechanism Based on Road Traffic Model**  
..... ZHU Lan, WANG Kun, TANG Longjun, DING Yujia, YANG Xinyu, CHEN Zimo (2699)
- Operation Optimization Strategy of Multi-microgrids Energy Sharing Based on Asymmetric Nash Bargaining**  
..... WU Jinling, LOU Ping, GUAN Minyuan, HUANG Yuzhou, ZHANG Weixin, CAO Yuancheng (2711)
- Collaborative Optimization of Multi-microgrid System Based on Multi-agent Game and Reinforcement Learning**  
..... LIU Junfeng, WANG Xiaosheng, LU Junbo, ZENG Jun (2722)
- Robust Optimal Allocation of Energy Storage in Integrated Energy System Considering Demand Response of Air Conditioning Load and Flexible Heating Load**  
..... ZHANG Hongye, WU Jiekang, CAI Jinjian, WANG Ruidong, CAI Zhihong, LIU Guoxin (2733)
- Electricity Theft Detection of High-loss Line With Forward Stepwise Regression**  
..... YIN Tao, SU Sheng, LIU Aiguo, SHU Yifei, XUE Yang, YANG Yining (2742)
- Ultra-short-term Prediction of Wind Power Based on Low-frequency Fluctuation Mining and High-frequency Correction**  
..... HAN Li, LI Mengjie, QIAO Yan (2750)
- Low-capacitance High-power Cascaded Wind Turbine System With Instantaneous Power Convergence and Transition**  
..... ZHANG Yonglei, ZHU Peng, YUAN Xibo, PENG Xin, LI Yan, WU Xiaojie (2759)
- Setting Optimization of Improved Impedance Correction Inverse Time Overcurrent Protection Considering Backup Protection Optimization Series**  
..... HUANG Jinguang, LI Zhedong, ZHANG Yupeng, ZHANG Yuanning, CHEN Yong, WENG Hanli, LI Zhenxin, LIN Xiangning (2768)
- Risk Distribution Assessment of Wildfire-induced Trips in Transmission Line Based on Flame Combustion Model**  
..... ZHOU Enze, FAN Lingmeng, HUANG Yong, ZHOU You, ZHOU Wentao, CHEN Weijie (2778)
- Research on Validity Analysis and Improvement of Calculation Model of Equivalent Icing Thickness of Transmission Lines Under Special Terrain**  
..... HAO Yanpeng, WEI Fasheng, WANG Bin, YANG Lin, WANG Junke, HUANG Zenghao, LI Hao (2786)
- Fault Analysis for Valve Side Winding of Converter Transformer**  
..... ZHANG Yanxia, HAN Yue, CHENG Yachao, LIU Kaixiang (2794)

## • High Voltages •

- Influence of Disconnecting Circuit-breaker on Power Supply Reliability** ..... LIU Youwei, XIAO Yan, FANG Yanhong (2804)
- Inductor Characteristics of Spiral Tube Damping Busbar Based on Optimal VFTO Suppression Effects**  
..... WU Xixiu, FENG Xiaotong, HU Yunfeng, WAN Pengpeng, WANG Han, FENG Yu, WANG Huan, HOU Hui (2812)
- Coupling Simulation and Collaborative Optimization of Electromagnetic, Thermal and Structural Multi-physical Fields for Dry-type Core Reactor**  
..... YUAN Fating, LÜ Kai, TANG Bo, JIANG Fa, HAN Yilin, HUANG Li (2823)
- Sensitivity Analysis on Hazard-pregnant Environment of Lightning Activity in Yunnan Province Considering Effects of Topography**  
..... ZHOU Fangrong, PAN Hao, MA Yi, DENG Yejiang, WANG Yu, HUANG Shunyang (2834)

## • Engineering Applications •

- Calculation and Analysis on Unbalanced Currents of Yandun-Tianshan 750kV Double-circuit Transmission Lines**  
..... WANG Xiaotong, XIANG Zutao, SONG Xinli, LIANG Sicong, LI Shan, WANG Chong, FU Tinggang (2842)
- Short Circuit Current Limiting Technology and Engineering Application Based on 252kV Fast Vacuum Circuit Breaker**  
..... ZHANG Hanhua (2850)

---

**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

**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