

# 电网技术

## POWER SYSTEM TECHNOLOGY



第46卷8期

Vol.46 No.8

### 中国电力科学研究院有限公司 一体化性能测试平台

一体化性能测试平台（简称“CEPRI-IPTP”）是一款集测试执行和性能监控于一体的软件性能测试产品，可对软件性能测试的流程进行支撑。该产品通过资源池管理的模式，由主服务对压力节点进行统一管理，通过分布式调度算法，对压力进行合理、科学智能化分配；B/S架构，使测试任务多人协同、测试结果自动归档更加便捷，彻底摆脱软件性能测试对硬件环境的依赖，解决电力行业软件性能测试过程中严重依赖硬件的突出问题，推动电力行业软件性能测试整体效率的大幅提升。该产品的性能指标处于国内先进水平，电力行业多家企事业单位已将该产品作为软件性能测试的主要测试工具平台。



国家电网  
STATE GRID

中国电力科学研究院有限公司  
CHINA ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE

联系人：晁竞健

联系电话：18618268054

联系邮箱：xintong-cjj@epri.sgcc.com.cn

广告

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 薛勇胜

## 目次

### · 海上风电并网新技术 ·

- 大规模海上风电接入电网关键技术与技术标准的研究及应用  
.....樊肖杰, 迟永宁, 马士聪, 范译文, 李琰, 王聪 (2859)
- 适用于海上风电送出的 DR-MMC 混合直流电网自适应下垂控制策略  
.....李贤育, 姚良忠, 程帆, 毛蓓琳, 徐箭, 潘尚智, 周月宾, 吴越 (2871)
- 跟网型海上风电中频汇集柔性直流送出系统的最优频率选择  
.....张哲任, 陈晴, 金砚秋, 殷贵, 王思逸, 徐政 (2881)
- 面向分频海上风电送出的模块化多电平矩阵变换器改进 V/f 解耦控制策略  
.....吴小丹, 董云龙, 钱敏慧, 朱海勇, 裘鹏, 倪晓军 (2889)
- 海上风电分频送出系统可靠性评估模型及方法  
.....王邦彦, 王秀丽, 王碧阳, 黄明煌, 林进钊 (2899)
- 面向低频海上风电送出的模块化多电平矩阵变换器输入输出侧解耦控制  
.....吴小丹 (2909)
- 基于故障录波的海上风电经柔直并网系统阻抗分析方法  
.....宾子君, 袁宇波, 许璠, 孔祥平, 李鹏, 张弛, 邹小明 (2920)
- 海上风电场谐波异常的调查与试验分析  
.....马智泉, 李培, 徐群伟, 朱非白, 吕文韬, 郑鸿儒 (2928)
- 基于超级电容的海上风电柔直送出系统协调惯量支撑策略  
.....朱介北, 史美琦, 张利, 葛磊蛟, 俞露杰, 邓兆顺, 王成山 (2938)

### · 支撑碳达峰、碳中和的能源电力关键技术 ·

- 新型电力系统中光热电站完全替代火电规划研究  
.....孙晓强, 汪莹, 李庆海, 李富春, 杨攀峰, 杨楠, 张小奇, 霍超, 等 (2948)
- 多园区综合能源系统分区自治式能量合作社区及联合优化调度  
.....黄海涛, 陈曦, 查俊吉 (2955)
- 多重不确定性环境下的综合能源系统区间多目标优化调度  
.....崔杨, 郭福音, 仲悟之, 赵钰婷, 付小标 (2964)
- 基于多模式分解和麻雀优化残差网络的短期风速预测模型  
.....陈臣鹏, 赵鑫, 毕贵红, 谢旭, 高敬业, 骆钊 (2975)
- 基于生产可能性边界的含规模风电电力系统网架重构策略  
.....刘艳, 季晨阳, 马艺瑄, 白斌, 于海龙 (2986)
- 基于风险分摊的多风电场机会约束机组组合求解方法  
.....孙艳, 陈雁, 莫东, 李秋文, 凌武能 (2996)
- 基于燃氢燃气轮机的风光火储多能互补优化调度  
.....林俐, 郑馨姚, 周龙文 (3007)
- 电-气综合能源系统供能恢复协调优化决策研究  
.....王川, 郝丽丽, 胡望雨, 李泽, 王昊昊, 杨函煜, 郝思鹏 (3017)
- 综合能源信息物理系统的分层建模和能量-信息流混合计算方法  
.....范宏, 王宏祥, 张树卿 (3028)
- 能源互联网技术标准体系架构设计及需求分析  
.....张晶, 胡纯瑾, 高志远, 张占奎, 于海玉, 白巍, 孙克勃, 景天 (3038)

### · 直流输电与直流电网 ·

- 应对特高压直流大扰动的稳定措施综述  
.....邱威, 贺静波, 樊小伟, 许涛, 于钊, 张剑云, 何飞, 蓝海波, 等 (3049)

张北柔直工程高频谐波振荡机理与抑制方法研究  
 .....杜镇宇, 阳岳希, 季柯, 周啸, 胡应宏 (3066)  
 特高压直流工程换流阀用晶闸管实际运行工况关断时间研究  
 .....盛财旺, 张娟娟, 刘杰, 李婷婷, 杨俊, 孙立波 (3076)  
 基于 VMD-SVD 的多端柔直电网故障测距方案  
 .....杨冬锋, 王鹤, 刘晓军, 王忠义 (3084)  
 考虑用户满意度的风储直流微电网协调控制策略研究  
 .....马越超, 王生铁, 刘瑞明, 刘广忱, 田桂珍 (3094)

· 电力系统 ·

高比例可再生能源接入下与配电系统分层协同的输电系统自适应规划  
 .....刘佳, 唐早, 曾平良, 李亚楼, 吴秋伟 (3105)  
 直流变压器输出侧双极短路故障下的故障穿越方法  
 .....郑涛, 朴勇, 郭勇帆, 杨乐 (3115)  
 基于电流-温度动态映射的新能源直流汇集送出系统串联电弧故障检测  
 .....贾科, 张旻, 温志文, 余磊, 施志明, 毕天姝 (3123)  
 考虑单极转供的直流配用电系统安全性分析  
 .....孟祥坤, 李路畅, 袁栋, 曹文远, 韩民晓 (3132)  
 基于并行粒子群算法的电力系统分区抗差状态估计  
 .....余建树, 李朝霞, 龚雪娇, 王雅宁, 朱坤琳, 杨德昌 (3139)  
 考虑事故频率约束的微网机组组合能效评估方法  
 .....李欣育, 王越, 霍文歌 (3149)  
 基于进化计算的类噪声负荷辨识改进方法  
 .....周晋航, 陆超, 张欣然, 王颖, 吴沛莹, 李东东 (3159)  
 永磁直驱风电机组的构网型控制与黑启动  
 .....桑顺, 齐琛, 张新松, 黄杰杰, 茅靖峰, 顾菊平 (3168)  
 基于轻量级梯度提升机和生成对抗网络的含风电电力系统频率稳定评估  
 .....赵冬梅, 郑亚锐, 谢家康, 郭育村 (3181)  
 基于 GAN 和多通道 CNN 的电力系统暂态稳定评估  
 .....时纯, 刘君, 梁卓航, 李岩松, 陈兴雷 (3191)  
 计及跨区备用共享的多区域电热联合系统分布式协同优化调度  
 .....刘威, 张亚超, 谢仕炜 (3203)  
 死区和限幅环节对简化水电系统负阻尼时切换型振荡的影响  
 .....刘晓博, 熊鸿韬, 王嘉伟, 杨滢, 张建承, 庄文彬, 华文, 薛安成 (3215)  
 基于分布式光纤传感的变压器绕组变形定位技术  
 .....徐征宇, 李鹏, 张书琦, 汪佐宪, 程涣超 (3224)

· 面向新型电力系统和能源互联网的人工智能技术 ·

基于改进生成对抗网络的台区采集数据修复  
 .....刘科研, 周方泽, 周晖, 王存平 (3231)  
 基于 GMM-PSO 混合算法的电磁暂态模型参数校正方法  
 .....郭艺潭, 贾洪岩, 宋炎侃, 寇建, 沈沉 (3240)  
 基于元学习动态选择集成的电力调度数据异常检测方法  
 .....傅世元, 高欣, 张浩, 刘蒙, 李军良, 徐建航 (3248)  
 基于残差双重注意机制网络的电力数据压缩与高精度重建  
 .....吴毓峰, 李富盛, 余涛, 潘振宁, 刘前进, 李捷, 李卓环 (3257)  
 基于 FPA-VMD 和 BiLSTM 神经网络的新型两阶段短期电力负荷预测  
 .....张淑清, 李君, 姜安琦, 黄娇, 刘海涛, 艾洪克 (3269)

· 广告索引 · ..... (3280)

《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 46 卷 第 8 期 (总第 465 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 颀 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. 8 (Ser. 465)

## Contents

### • New Technology for Offshore Wind Power Grid Integration •

- Research and Application of Key Technologies and Technical Standards for Large-scale Offshore Wind Farms Connecting to Power Grid**  
..... FAN Xiaojie, CHI Yongning, MA Shicong, FAN Yiwen, LI Yan, WANG Cong (2859)
- Self-adaptive Droop Control Strategy of DR-MMC Hybrid DC Grid for Offshore Wind Power Transmission**  
..... LI Xianyu, YAO Liangzhong, CHENG Fan, MAO Beilin, XU Jian, PAN Shangzhi, ZHOU Yuebin, WU Yue (2871)
- Optimal Operation Frequency for Medium Frequency Grid-following Offshore Wind Farm Integrated by MMC-HVDC**  
..... ZHANG Zheren, CHEN Qing, JIN Yanqiu, YIN Gui, WANG Siyi, XU Zheng (2881)
- Improved V/f Decoupling Control Strategy for Modular Multilevel Matrix Converter for Fractional Offshore Wind Power Transmission**  
..... WU Xiaodan, DONG Yunlong, QIAN Minhui, ZHU Haiyong, QIU Peng, NI Xiaojun (2889)
- Reliability Evaluation Model and Method of Offshore Wind Power Fractional Frequency Delivery System**  
..... WANG Bangyan, WANG Xiuli, WANG Biyang, HUANG Minghuang, LIN Jintian (2899)
- Input/output Side Decoupling Control of Modular Multilevel Matrix Converter for Low-frequency Offshore Wind Power Transmission**  
..... WU Xiaodan (2909)
- Impedance Analysis of Offshore Wind Farms With VSC-HVDC Systems Based on Fault Record Data**  
..... BIN Zijun, YUAN Yubo, XU Jin, KONG Xiangping, LI Peng, ZHANG Chi, ZOU Xiaoming (2920)
- Investigation and Experimental Analysis of Harmonic Anomaly in Offshore Wind Farm**  
..... MA Zhiqian, LI Pei, XU Qunwei, ZHU Feibai, LÜ Wentao, ZHENG Hongru (2928)
- Supercapacitor-based Coordinated Inertia Support Strategy for Offshore Wind Farms Integration via VSC-HVDC**  
..... ZHU Jiebei, SHI Meiqi, ZHANG Li, GE Leijiao, YU Lujie, DENG Zhaoshun, WANG Chengshan (2938)

### • Key Technologies of Power and Energy Systems for Supporting Peak Carbon Dioxide Emissions and Carbon Neutrality •

- Planning of Solar Thermal Power Station Completely Replacing Thermal Power in New Power System**  
..... SUN Xiaoqiang, WANG Ying, LI Qinghai, LI Fuchun, YANG Panfeng, YANG Nan, ZHANG Xiaoqi, HUO Chao, et al (2948)
- Partition Autonomous Energy Cooperation Community and Its Joint Optimal Scheduling for Multi-park Integrated Energy System**  
..... HUANG Haitao, CHEN Xi, ZHA Junji (2955)
- Interval Multi-objective Optimal Dispatch of Integrated Energy System Under Multiple Uncertainty Environment**  
..... CUI Yang, GUO Fuyin, ZHONG Wuzhi, ZHAO Yuting, FU Xiaobiao (2964)
- SSA-Res-GRU Short-term Wind Speed Prediction Model Based on Multi-model Decomposition**  
..... CHEN Chenpeng, ZHAO Xin, BI Guihong, XIE Xu, GAO Jingye, LUO Zhao (2975)
- Production-possibility Frontier-based Network Reconfiguration Strategy for Power System Integrated With Scaled Wind Farm**  
..... LIU Yan, JI Chenyang, MA Yixuan, BAI Bin, YU Hailong (2986)
- Joint Chance Constrained Unit Commitment With Wind Farms Based on Risk Sharing**  
..... SUN Yan, CHEN Yan, MO Dong, LI Qiuwen, LING Wuneng (2996)
- Wind-PV-thermal-storage Multi-energy Complementary Optimal Dispatching Based on Hydrogen Gas Turbine**  
..... LIN Li, ZHENG Xinyao, ZHOU Longwen (3007)
- Collaborative Optimization Decision-making of Energy Supply and Restoration in Power-gas Integrated Energy System**  
..... WANG Chuan, HAO Lili, HU Wangyu, LI Ze, WANG Haohao, YANG Hanyu, HAO Sipeng (3017)
- Hierarchical Modeling and Energy-information Flow Hybrid Calculation of Integrated Energy Cyber Physical System**  
..... FAN Hong, WANG Hongxiang, ZHANG Shuqing (3028)
- Architecture Design and Requirement Analysis of Technical Standard System for Energy Internet**  
..... ZHANG Jing, HU Chunjin, GAO Zhiyuan, ZHANG Zhankui, YU Haiyu, BAI Wei, SUN Chongbo, JING Tian (3038)

### • HVDC Transmission & HVDC Grid •

- Overview on Stability Measures for Large Disturbances of UHVDC**  
..... QIU Wei, HE Jingbo, FAN Xiaowei, XU Tao, YU Zhao, ZHANG Jianyun, HE Fei, LAN Haibo, et al (3049)
- High Frequency Harmonic Resonance and Suppression in Zhangbei Project**..... DU Zhenyu, YANG Yuexi, JI Ke, ZHOU Xiao, HU Yinghong (3066)
- Thyristor Turn-off Time Under Actual Operational Condition in UHVDC Project Converter Valve**  
..... SHENG Caiwang, ZHANG Juanjuan, LIU Jie, LI Tingting, YANG Jun, SUN Libo (3076)
- Fault Location Scheme for Multi-terminal MMC-HVDC System Based on VMD-SVD**  
..... YANG Dongfeng, WANG He, LIU Xiaojun, WANG Zhongyi (3084)
-

---

**Research on Coordinated Control Strategy of DC Microgrid With Wind-energy Storage Considering User's Satisfaction**

.....MA Yuechao, WANG Shengtie, LIU Ruiming, LIU Guangchen, TIAN Guizhen (3094)

• **Power System** •

**Adaptive Planning of Transmission Network Coordinating Distribution Networks in a Hierarchical Manner With High Penetration of Renewable Energy**

.....LIU Jia, TANG Zao, ZENG Pingliang, LI Yalou, WU Qiuwei (3105)

**Fault Ride-through of Bipolar Short-circuit Fault on Output Side of DC Transformer**

.....ZHENG Tao, PIAO Yong, GUO Yongfan, YANG Le (3115)

**Series-arc Fault Detection of New Energy DC Collection and Delivery System Based on Current-temperature Dynamic Mapping**

.....JIA Ke, ZHANG Yang, WEN Zhiwen, YU Lei, SHI Zhiming, BI Tianshu (3123)

**Safety Analysis for DC Distribution System Considering Monopole Transfer**

.....MENG Xiangkun, LI Luchang, YUAN Dong, CAO Wenyuan, HAN Minxiao (3132)

**Robust State Estimation of Power System Based on Parallel Particle Swarm Optimization and Partition Calculation**

.....YU Jianshu, LI Zhaoxia, GONG Xuejiao, WANG Yaning, ZHU Kunlin, YANG Dechang (3139)

**A Method for Microgrid Unit Commitment Efficiency Assessment Adware of Contingency Frequency Constraints**

.....LI Xinyu, WANG Yue, HUO Wenge (3149)

**Improved Method of Ambient Signal Load Identification Based on Evolutionary Calculation**

.....ZHOU Jinhang, LU Chao, ZHANG Xinran, WANG Ying, WU Peixuan, LI Dongdong (3159)

**Grid-forming Control and Black Start of PMSG-based Direct-driven Wind Turbine**

.....SANG Shun, QI Chen, ZHANG Xinsong, HUANG Jiejie, MAO Jingfeng, GU Juping (3168)

**Frequency Stability Evaluation of Power System Containing Wind Power Based on Light Gradient Boosting Machine and Generative Adversarial Network**

.....ZHAO Dongmei, ZHENG Yarui, XIE Jiakang, GUO Yucun (3181)

**Transient Stability Assessment of Power System Based on GAN and Multi-channel CNN**

.....SHI Chun, LIU Jun, LIANG Zhuohang, LI Yansong, CHEN Xinglei (3191)

**Distributed Coordinated Optimal Scheduling of Multi-regional Combined Heat and Power System Considering Cross-regional Reserve Sharing**

.....LIU Wei, ZHANG Yachao, XIE Shiwei (3203)

**Influence of Dead Zone and Limiting Link on Switching-type Oscillation of Simplified Hydropower Generator System With Negative Damping**

.....LIU Xiaobo, XIONG Hongtao, WANG Jiawei, YANG Ying, ZHANG Jiancheng, ZHUANG Wenbin, HUA Wen, XUE Ancheng (3215)

**Transformer Winding Deformation Location Based on Distributed Optical Fiber**

.....XU Zhengyu, LI Peng, ZHANG Shuqi, WANG Zuoxian, CHENG Huanchao (3224)

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

**Missing Data Imputation in Transformer District Based on Improved Generative Adversarial Network**

.....LIU Keyan, ZHOU Fangze, ZHOU Hui, WANG Cunping (3231)

**Parameter Correction for Electromagnetic Transient Simulation Model Based on GMM-PSO Hybrid Algorithm**

.....GUO Yitan, JIA Hongyan, SONG Yankan, KOU Jian, SHEN Chen (3240)

**Anomaly Detection for Power Dispatching Data Based on Meta-learning Dynamic Ensemble Selection**

.....FU Shiyuan, GAO Xin, ZHANG Hao, LIU Meng, LI Junliang, XU Jianhang (3248)

**Power Data Compression and High-precision Reconstruction Based on Residual Dual Attention Mechanism Network**

.....WU Yufeng, LI Fusheng, YU Tao, PAN Zhenning, LIU Qianjin, LI Jie, LI Zhuohuan (3257)

**A Novel Two-stage Model Based on FPA-VMD and BiLSTM Neural Network for Short-term Power Load Forecasting**

.....ZHANG Shuqing, LI Jun, JIANG Anqi, HUANG Jiao, LIU Haitao, AI Hongke (3269)

---

**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