

电网技术

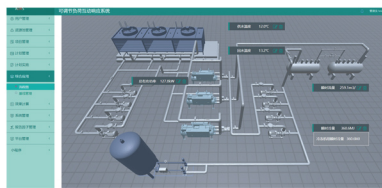


POWER SYSTEM TECHNOLOGY

第45卷10期
Vol.45 No.10

中国电力科学研究院有限公司 需求侧可调节负荷互动响应支撑系统

需求侧可调节负荷互动响应支撑系统主要包括可调节负荷互动响应主站、多元用户互动响应小程序及可调节负荷互动响应终端，为能源互联模式下可调节负荷互动响应提供全方位全流程解决方案。该系统由中国电力科学研究院有限公司自主研发，整体技术达到国际领先水平，可支持工业、商业、居民用户等多种需求响应资源接入，满足削峰、填谷、交易、虚拟电厂等多种业务需求，实现需求响应项目整体负荷分钟级监控。该成果已推广应用于浙江高弹性电网建设、河北电科院空调需求响应示范及新疆电采暖负荷互动响应示范等工程，应用前景广阔，对开展能源互联模式下需求侧负荷精准感知和负荷智能互动、提升我国电力需求侧管理水平具有重要意义。



可调节负荷互动响应系统 (1)



可调节负荷互动响应系统 (2)



可调节互动响应终端



多元用户互动响应客户端小程序



国家电网
STATE GRID

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

单位：中国电力科学研究院有限公司

地址：北京清河小营东路15号

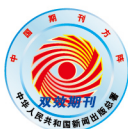
联系人：陈珂

邮编：100192

电话：18513331403

邮箱：824417278@qq.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

· 支撑碳达峰、碳中和的能源电力关键技术 ·

考虑氢气注入的电-气综合能源系统电气设备容量规划
.....高鹏飞, 周孝信, 杨小煜, 李亚楼, 李芳 (3781)

分布式电源集群并网调控: 体系架构与关键技术
.....梁志峰, 叶畅, 刘子文, 李淼, 汪鹏, 曹侃, 赵晋泉 (3791)

热负荷弹性与分时电价需求侧响应协同促进碳减排的电热优化调度
.....朱伟业, 罗毅, 胡博, 罗桓桓, 张寅, 韩越, 汤木易, 童齐栋 (3803)

奖惩机制下的互补发电系统中长期与日前嵌套鲁棒优化调度模型
.....夏依莎, 刘俊勇, 刘继春, 高红均 (3813)

基于储能电站服务的冷热电多微网系统双层优化配置
.....吴盛军, 李群, 刘建坤, 周前, 汪成根 (3822)

基于区块链技术的产消者 P2P 电能智能交易合约
.....单俊嘉, 董子明, 胡俊杰, 黄啟茹, 王飞 (3830)

基于云储能租赁服务的风储参与能量-调频市场竞争策略研究
.....张巍, 缪辉 (3840)

计及储热备用效益的电热综合能源系统优化调度模型
.....李健, 李雪峰, 张娜, 章艳, 吕泉 (3851)

基于 CSO 优化深度信念网络的园区能源需求预测方法
.....吴伟杰, 吴杰康, 雷振, 郑敏嘉, 张伊宁, 李猛, 黄欣, 李逸欣 (3859)

基于深度强化学习的微网储能系统控制策略研究
.....梁宏, 李鸿鑫, 张华赢, 胡子珩, 秦兆铭, 曹军威 (3869)

· 国家重点研发计划 ·

混联直流输电系统送端三相短路故障分析及优化控制
.....连攀杰, 刘文焯, 李霞, 杨泽栋, 许克, 郁舒雁, 汤涌 (3877)

基于 GRU 网络的柔性直流配电线路保护方案
.....杨冬锋, 李绍伟, 刘晓军, 陈盛开 (3885)

利用测量波阻抗欧几里得距离的柔性直流输电线路后备保护方案
.....张大海, 武传健, 和敬涵, 梁晨光, 李猛 (3895)

考虑自适应实时调度的多电压等级直流配电网能量优化方法
.....金国彬, 潘狄, 陈庆, 石超, 李国庆 (3906)

基于贝叶斯全解析模型与多因素降维的有源配电网分布式故障区段定位方法
.....李钰洋, 王增平, 赵乔 (3917)

基于馈线终端装置信息畸变校正的有源配电网故障区段定位
.....郑涛, 马龙, 李博文 (3926)

独立型微电网源荷协调配置优化
.....邵志芳, 赵强, 张玉琼 (3935)

基于改进 K-means 聚类 and SBR 算法的风电场景缩减方法研究
.....赵书强, 要金铭, 李志伟 (3947)

基于迭代离散时间傅里叶变换插值的高精度频率估计
.....杨超, 李波, 胡绪权, 付志红 (3955)

基于迁移学习和特征融合的复合绝缘子憎水性等级判别方法
.....谢军, 肖朝轩, 张思刚, 刘力卿, 律方成, 谢庆 (3964)

· 电力市场 ·

欧洲跨境输电容量分配机制及对我国的启示
.....张粒子, 高勇, 胡朝阳, 付智宇 (3972)

集中式电力现货市场风险规避机制机理分析及建设路径
.....肖云鹏, 关玉衡, 张兰, 蔡秋娜, 刘思捷, 林少华 (3981)

中长期市场下发电企业发电与购煤安排两阶段决策模型
 王旭东, 高赐威 (3992)
 基于内嵌增广拉格朗日函数 Q-learning 方法的虚拟电厂市场博弈策略
 刘天奇, 韩冬, 汪延德, 董晓天 (4000)
 基于 Stackelberg 多站融合双寡头利润分配机制研究
 谢哲, 汤红卫, 韩新阳, 张晨, 孙轶恺 (4009)
 耦合日合同分解及日前市场竞价的梯级水电站短期鲁棒优化调度
 于旭光, 李刚, 李亚鹏, 王帮灿, 程春田 (4016)

· 直流输电与直流电网 ·

高压大容量 MMC 子模块下部 IGBT 损耗优化方法
 许彬, 李景波, 宁志彦, 王高勇, 周军川, 贺之渊 (4025)
 考虑不同运行状态的多端口直流断路器可靠性模型
 杨墨缘, 欧阳森, 张真, 陈义森, 王天霖 (4037)
 基于改进模糊层次分析法的交直流受端电网交流故障筛选与排序
 王长江, 李本新, 姜涛, 陈厚合, 李雪, 刘福锁 (4047)
 改进型串联电压换相换流器及其控制策略
 陈斌超, 周小平, 罗安, 邓凌峰, 洪乐荣 (4057)
 基于临界故障时刻的换相失败预测方法
 张艳霞, 卢静怡, 张富贺, 毕安露 (4066)

· 电力系统 ·

双馈异步风力发电机低电压连锁故障暂态特性精确分析及穿越方案
 姜惠兰, 王绍辉, 李希钰, 肖瑞 (4076)
 计及光伏出力波动的交直流混合配电网安全域模型
 裴蕾, 卫志农, 陈胜, 赵景涛, 尹宏旭 (4084)
 考虑风电预测误差相关性的负荷恢复鲁棒优化
 顾雪平, 周光奇, 李少岩, 王璞诗 (4092)
 基于 U-I 轨迹曲线精细化识别的非侵入式居民负荷监测方法
 汪颖, 杨维, 肖先勇, 张姝 (4104)
 TSC 与 STATCOM 串联复合系统及其控制方法
 彭星, 姜飞, 涂春鸣, 郭祺, 侯玉超, 卢柏桦 (4114)
 车网互动过程的系统动力学分析
 程宏波, 商子轩, 郭源曦, 康琛, 曾伟 (4125)
 少器件数量和低开关管电压应力的 ZVS 高增益光伏直流模块
 田民, 秦岭, 周磊 (4134)
 一种穿越频率自适应的四阶广义积分锁频环
 吕世轩, 郑丽君, 王子鹏, 宋建成 (4142)
 基于采样值状态估计的配电网虚拟量测特性与网络化保护方法
 蔡煜, 蔡泽祥, 李晓华, 赵维兴, 宁楠 (4152)
 基于 CT 饱和准确识别的零序方向元件改进方案
 刘益青, 武凯, 徐明阳, 唐涛南 (4161)
 基于高压频域介电响应的交流 500kV 交联聚乙烯海缆绝缘老化状态检测
 与分析 郝建, 戴锡泽, 高震, 简政, 郑新龙, 彭维龙 (4172)

· 自动化 ·

基于 Hi3559A 的变电站人员闯入智能检测系统
 钱宇骋, 朱大云, 曹旭航, 黎瑞, 龚恩, 王健 (4181)
 基于 DNA 识别串码的配电自动化终端程序版本一致性管控机制
 陈洁, 关石磊, 尹惠, 古凌云, 周菲嫣 (4189)

· 工程应用 ·

±500kV 张北柔性直流电网工程系统设计
 郭铭群, 梅念, 李探, 乐波 (4194)
 快速动态响应同步调相机励磁系统故障分析
 郭贤珊, 黄金军, 付文林, 李璐, 兰琦, 刘琛浩 (4205)

· 广告索引 · (4212)

《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 10 期 (总第 455 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

期刊基本参数: CN 11-2410/TM * 1957 * M * A4 * 431 * zh * P * ¥80.00 * 20000 * 46 * 2021-10 版权所有 未经许可不得转载及上网

POWER SYSTEM TECHNOLOGY

2021, Vol. 45 No. 10 (Ser. 455)

Contents

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

- Optimal Capacity Planning of Power-to-gas in the Integrated Electricity and Natural Gas Systems Considering Hydrogen Injections**
.....GAO Pengfei, ZHOU Xiaoxin, YANG Xiaoyu, LI Yalou, LI Fang (3781)
- Grid-connected Scheduling and Control of Distributed Generations Clusters: Architecture and Key Technologies**
.....LIANG Zhifeng, YE Chang, LIU Ziwen, LI Miao, WANG Peng, CAO Kan, ZHAO Jinquan (3791)
- Optimized Combined Heat and Power Dispatch Considering Decreasing Carbon Emission by Coordination of Heat Load Elasticity and Time-of-use Demand Response**..... ZHU Weiye, LUO Yi, HU Bo, LUO Huanhuan, ZHANG Yin, HAN Yue, TANG Muyi, TONG Qidong (3803)
- Medium Long-term and Day-ahead Nested Robust Optimal Scheduling for Complementary Power Generation Systems Under Reward-punishment Mechanism**..... XIA Yisha, LIU Junyong, LIU Jichun, GAO Hongjun (3813)
- Bi-level Optimal Configuration for Combined Cooling Heating and Power Multi-microgrids Based on Energy Storage Station Service**
..... WU Shengjun, LI Qun, LIU Jiankun, ZHOU Qian, WANG Chenggen (3822)
- P2P Smart Power Trading Contract Based on Blockchain Technology**SHAN Junjia, DONG Ziming, HU Junjie, HUANG Qiru, WANG Fei (3830)
- Bidding Strategies of Wind Power and Energy Storage Participating in Energy and Frequency Regulation Market Based on Cloud Energy Storage Leasing Services**..... ZHANG Wei, MIAO Hui (3840)
- Optimal Dispatch Model of Electricity-heat Integrated Energy System Considering Reserved Benefits of Heat Storage**
.....LI Jian, LI Xuefeng, ZHANG Na, ZHANG Yan, LÜ Quan (3851)
- Park Energy Demand Forecasting Based on CSO Optimized Deep Belief Network**
..... WU Weijie, WU Jiekang, LEI Zhen, ZHENG Minjia, ZHANG Yining, LI Meng, HUANG Xin, LI Yixin (3859)
- Control Strategy of Microgrid Energy Storage System Based on Deep Reinforcement Learning**
..... LIANG Hong, LI Hongxin, ZHANG Huaying, HU Ziheng, QIN Zhaoming, CAO Junwei (3869)

• National Key Research and Development Program of China •

- Analysis and Optimal Control of Three-phase Short Circuit Faults at Sending End of Hybrid-HVDC**
.....LIAN Panjie, LIU Wenzhuo, LI Xia, YANG Zedong, XU Ke, YU Shuyan, TANG Yong (3877)
- Protection Scheme for Flexible DC Distribution Lines Based on GRU Network**
..... YANG Dongfeng, LI Shaowei, LIU Xiaojun, CHEN Shengkai (3885)
- Backup Protection Scheme for Flexible DC Transmission Lines by Measuring Wave Impedance Euclidean Distance**
..... ZHANG Dahai, WU Chuanjian, HE Jinghan, LIANG Chenguang, LI Meng (3895)
- Energy Optimization Method of Multi-voltage-level DC Distribution Network Considering Adaptive Real-time Scheduling**
..... JIN Guobin, PAN Di, CHEN Qing, SHI Chao, LI Guoqing (3906)
- Distributed Fault Section Location for ADN Based on Bayesian Complete Analytic Model and Multi-factor Dimension Reduction**
.....LI Yuyang, WANG Zengping, ZHAO Qiao (3917)
- Fault Section Location of Active Distribution Network Based on Feeder Terminal Unit Information Distortion Correction**
.....ZHENG Tao, MA Long, LI Bowen (3926)
- Source Side and Load Side Coordinated Configuration Optimization for Stand-alone Micro-grid**
.....SHAO Zhifang, ZHAO Qiang, ZHANG Yuqiong (3935)
- Wind Power Scenario Reduction Based on Improved K-means Clustering and SBR Algorithm**ZHAO Shuqiang, YAO Jinming, LI Zhiwei (3947)
- High-precision Frequency Estimation Based on Iterative DTFT Interpolation**..... YANG Chao, LI Bo, HU Xuquan, FU Zhihong (3955)
- A Determination Method for Hydrophobicity Class of Composite Insulator Based on Transfer Learning and Feature Fusion**
.....XIE Jun, XIAO Chaoxuan, ZHANG Sigang, LIU Liqing, LÜ Fangcheng, XIE Qing (3964)

• Electricity Market •

- European Cross-border Capacity Allocation Mechanism and Its Implications for China**
.....ZHANG Lizi, GAO Yong, HU Zhaoyang, FU Zhiyu (3972)
- Analysis and Construction Path of Risk Hedging Mechanism in Centralized LMP-based Electricity Spot Market**
.....XIAO Yunpeng, GUAN Yuheng, ZHANG Lan, CAI Qiuna, LIU Sijie, LIN Shaohua (3981)
- Two-stage Decision-making Model of Power Generation and Coal Purchase Arrangement for Power Generation Companies in Medium - and Long-term Market**..... WANG Xudong, GAO Ciwei (3992)
- Strategies of Market Game Behavior of Virtual Power Plants Based on Q-learning With Augmented Lagrange Function**
..... LIU Tianqi, HAN Dong, WANG Yande, DONG Xiaotian (4000)
- Duopoly Benefit Distribution Mechanism Under Multi-station Integration Based on Stackelberg Model**
..... XIE Zhe, TANG Hongwei, HAN Xinyang, ZHANG Chen, SUN Yikai (4009)
- Short-term Robust Optimization Scheduling of Cascade Hydropower Stations Coupled With Daily Contract Decomposition and Day-ahead Market Bidding**..... YU Xuguang, LI Gang, LI Yapeng, WANG Bangcan, CHENG Chuntian (4016)

• HVDC Transmission & HVDC Grid •

Loss Optimization for Bottom IGBT of Submodule in High-voltage and Large-capacity Modular Multilevel Converter

..... XU Bin, LI Jingbo, NING Zhiyan, WANG Gaoyong, ZHOU Junchuan, HE Zhiyuan (4025)

Reliability Model of Multi-terminal DC Circuit Breaker Considering Different Operation States

..... YANG Moyuan, OUYANG Sen, ZHANG Zhen, CHEN Yisen, WANG Tianlin (4037)

A Contingency Screening and Ranking Method Based on Improved Fuzzy Analytic Hierarchy Process for AC/DC Receiving-end Power Grid AC Faults

..... WANG Changjiang, LI Benxin, JIANG Tao, CHEN Houhe, LI Xue, LIU Fusuo (4047)

Improved Series Voltage Commutation Converter and Its Control Strategy

..... CHEN Binchao, ZHOU Xiaoping, LUO An, DENG Lingfeng, HONG Lerong (4057)

Commutation Failure Prediction Considering Critical Fault Moment.....ZHANG Yanxia, LU Jingyi, ZHANG Fuhe, BI Anlu (4066)

• Power System •

Accurate Analysis of Transient Characteristics and Ride-through Scheme Under DFIG Low and High Voltage Cascading Fault

.....JIANG Huilan, WANG Shaohui, LI Xiyu, XIAO Rui (4076)

Security Region of Variable Photovoltaic Generation in AC-DC Hybrid Distribution Power Networks

..... PEI Lei, WEI Zhihong, CHEN Sheng, ZHAO Jingtao, YIN Hongxu (4084)

Robust Optimization of Load Restoration Scheme Considering Wind Power Prediction Error Correlation

..... GU Xueping, ZHOU Guangqi, LI Shaoyan, WANG Pushi (4092)

Non-intrusive Residential Load Monitoring Method Based on Refined Identification of U-I Trajectory Curve

..... WANG Ying, YANG Wei, XIAO Xianyong, ZHANG Shu (4104)

TSC and STATCOM Series Composite System and Its Control Method

.....PENG Xing, JIANG Fei, TU Chunming, GUO Qi, HOU Yuchao, LU Baihua (4114)

Research on Vehicle-to-grid Process Based on System Dynamics

.....CHENG Hongbo, SHANG Zixuan, GUO Yuanxi, KANG Chen, ZENG Wei (4125)

ZVS High Voltage Gain Photovoltaic DC-module With Reduced Number of Components and Lower Voltage Stress

..... TIAN Min, QIN Ling, ZHOU Lei (4134)

Fourth-order Generalized Integrator Frequency-locked Loop With Crossover Frequency Adaptation

..... LÜ Shixuan, ZHENG Lijun, WANG Zipeng, SONG Jiancheng (4142)

Distribution Network Virtual Measurement Characteristics and Communication-assisted Protection Method Based on Sampling Value State Estimation

..... CAI Yu, CAI Zexiang, LI Xiaohua, ZHAO Weixing, NING Nan (4152)

Improved Scheme of Zero-sequence Direction Element Based on Accurate Recognition of CT Saturation

.....LIU Yiqing, WU Kai, XU Mingyang, TANG Taonan (4161)

Detection and Analysis of Insulation Aging State of AC 500kV XLPE Submarine Cable Based on High Voltage Frequency Dielectric Response

.....HAO Jian, DAI Xize, GAO Zhen, JIAN Zheng, ZHENG Xinlong, PENG Weilong (4172)

• Automation •

Intelligent Detection Technology for Human Intrusion in Substation Based on Hi3559A

..... QIAN Yucheng, ZHU Taiyun, CAO Xuhang, LI Rui, GONG En, WANG Jian (4181)

Version Consistency Control Mechanism of Distribution Automation Terminal Program Based on DNA Identification String

..... CHEN Jie, GUAN Shilei, YIN Hui, GU Lingyun, ZHOU Feiyan (4189)

• Engineering Applications •

System Design of ± 500 kV Zhangbei VSC-based DC Grid Project.....GUO Mingqun, MEI Nian, LI Tan, YUE Bo (4194)

Excitation System Failure Analysis of Fast Dynamic Response Synchronous Condenser

.....GUO Xianshan, HUANG Jinjun, FU Wenlin, LI Lu, LAN Qi, LIU Chenhao (4205)

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