

电网技术

POWER SYSTEM TECHNOLOGY

6

2021

第45卷6期

Vol.45 No.6

国家电网公司电池储能技术实验室

——中国电力科学研究院有限公司电力储能检测评价服务

中国电科院是全国电力储能标准化技术委员会和中国电机工程学会电力储能专业委员会秘书处单位。由储能与电工所负责建设及运行管理的电池储能技术实验室（Battery Energy Storage Technology Laboratory）是国家电网公司重点实验室及“新能源与储能运行控制国家重点实验室”组成部分。具备电力储能领域CMA/CNAS试验检测资质，覆盖储能电池等核心部件、储能系统并网等多类检测对象。建立了储能产品性能等级评价服务体系，提出了储能全链条全环节质量与安全检测认证与等级评价整体解决方案，可提升储能设备投运前的标准化规范化水平、降低储能设备运行过程中风险发生概率，可为涉网运行储能设备的事前、事中、事后技术监督提供技术服务。



实验室与检测能力



电池储能质量与安全全链条全环节技术监督检测整体解决方案



储能电池产品性能等级评价证书



6MW移动式储能并网试验装置



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：官亦标

邮编：100192

电话：010-82814411

邮箱：BestLab@epri.sgcc.com.cn

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 强
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

· 图计算、知识图谱、图机器学习在能源互联网中的应用

（特约专栏主编 刘广一、刘俊勇、蒲天骄、丁立健、贾嵘）·

电力图计算平台及其在能源互联网中的应用

..... 刘广一，戴仁昶，路轶，杨小磊，汤亚宸，范宏，谭俊，刘婷婷（2051）

电力系统预想故障分析 GPU 并行和图并行计算的比较研究

..... 戴仁昶，王亚伟，刘广一，路轶，阚博文，张翔，魏龙飞（2064）

节点图和边图切换卷积驱动的快速静态安全分析方法

..... 杨梅，刘俊勇，刘挺坚，邱高，刘友波，刘凯（2070）

电力领域知识图谱的构建与应用

..... 蒲天骄，谈元鹏，彭国政，徐会芳，张中浩（2080）

电网故障处置知识图谱构建研究与应用

..... 郭榕，杨群，刘绍翰，李伟，袁鑫，黄香鸿（2092）

基于知识图谱的配电网故障辅助决策研究

..... 王骏东，杨军，裴洋舟，詹祥澎，周挺，谢培元（2101）

基于图注意力网络的配电网故障定位方法

..... 李佳玮，王小君，和敬涵，张永杰，张大海（2113）

基于图注意力深度网络的电力系统暂态稳定评估

..... 钟智，管霖，苏寅生，姚海成，黄济宇，郭梦轩（2122）

融合知识图谱与神经张量网络的需求响应智能推荐

..... 阮聪，齐林海，王红（2131）

基于深度学习的电力实体信息识别方法

..... 蒋晨，王渊，胡俊华，徐积全，陈琰，王雅雯，马国明（2141）

基于图卷积网络的配电网无功优化

..... 廖文龙，于赞，王煜森，陈洁婧（2150）

面向输电线路覆冰厚度辨识的多感受野视觉边缘智能识别方法研究

..... 马富齐，王波，董旭柱，罗鹏，王红霞，周胤宇（2161）

· 高比例可再生能源并网 ·

基于自适应时段聚合算法的能-水联结系统联合优化运行

..... 赵红阳，王秀丽，王一飞，王茂春，李乃亮，匡熠（2170）

可再生能源与火电集成耦合的协同性能及组合设计研究

..... 程光，徐飞，胡博，郝玲，陈磊，周桂平，闵勇（2178）

考虑风电减载调频的高比例风电电力系统优化调度方法

..... 欧阳金鑫，袁毅峰，李梦阳，庞茗予，蒋航，钟路（2192）

高风电渗透率系统恢复中环网并列合闸角的最优调控

..... 周光奇，顾雪平，李少岩，柴文化（2201）

基于数据增强的分布式光伏电站群短期功率预测(二)：网格化预测

..... 乔颖，孙荣富，丁然，黎上强，鲁宗相（2210）

· 电力市场 ·

山西电力现货与深度调峰市场联合优化机制设计与实践

..... 丁强，任远，胡晓静，邹鹏，燕争上，李鸣镝，蔡帆，薛艳军（2219）

考虑收益公平性的分布式光储系统基于动态费率的共享模式研究

..... 王蓓蓓，谢明成，张汀荟，吴敏（2228）

基于区块链的配电侧多微电网电能去中心化交易模型

..... 马腾，刘洋，许立雄，陈涛（2237）

电动公交区域调度计划与有序充电策略研究

..... 蔡子龙，束洪春，杨博，单节杉（2246）

· 能源互联网 ·

综合能源系统优化调度综述

..... 黎静华，朱梦姝，陆悦江，黄玉金，吴彤（2256）

考虑最优弃能率的风光火储联合系统分层优化经济调度
 叶泽, 李湘旗, 姜飞, 陈磊, 王亚莉, 戴双凤 (2270)
 含超短期风功率预测增强处理的风储系统超前滚动优化控制策略
 李滨, 邓有雄, 陈碧云 (2280)
 面向提高风电接纳能力的智慧建筑能量管理策略
 李泽宁, 苏粟, 靳小龙, 陈厚合, 韦存昊, 赵梓期 (2288)
 基于不同利益主体协调优化的主动配电网日前-实时能量管理方法
 黄张浩, 张亚超, 郑峰, 林佳壕, 安学利, 史晗 (2299)
 考虑相变储能与建筑蓄能特性的微网分布鲁棒优化调度
 朱兰, 李孝均, 唐陇军, 田泽清, 崔楷舜 (2308)
 集群电动汽车充电行为的深度强化学习优化方法
 赵星宇, 胡俊杰 (2319)

· 电力系统 ·

计及模式可观度的阻抗网络聚合方法
 占颖, 谢小荣, 王艳辉, 罗永志, 唐健 (2328)
 主导负荷参数类噪声辨识的数据处理方法
 吴沛莹, 叶洪波, 崔勇, 陆超, 王颖, 王伟红, 顾军 (2335)
 考虑风电出力状态转移和直流线路功率调整的 AC/UHVDC 系统静态可靠性及其灵敏度评估 李生虎, 张楠, 张浩 (2342)
 基于 Levenberg-Marquardt 算法的鞍结分岔点快速计算
 林立亨, 董树锋, 唐坤杰, 毛航银, 宋永华 (2352)
 考虑不同接线方式的多电压等级直流配电网潮流计算方法
 王肖肖, 韩民晓, 曹文远, 谢文强, 于家英, 李蕊, 秦剑华 (2359)
 基于电压数据 SVM 分类的有源配电网故障判别及定位
 刘科研, 董伟杰, 肖仕武, 魏佳, 赵伟 (2369)
 计及核心元件的继电保护装置 Markov 模型及其影响因素分析
 薛安成, 章家欢, 李伟, 张逸帆, 刘慧海, 李宽, 王昕 (2380)
 一种防止换流变压器阀侧单相接地时差动保护误闭锁的方案
 张艳霞, 张富贺, 卢静怡, 毕安露 (2388)
 一种非隔离型无桥臂直通的集成升压光伏逆变器
 张宇佳, 胡雪峰, 江顺德, 程赫, 林鑫 (2396)

· 高电压技术 ·

特高压多端柔直换流站直流场均压屏蔽金具电场分布仿真分析与差异化优化方法 刘鹏, 吴泽华, 程建伟, 史然, 郭伊宇, 彭宗仁 (2405)
 计及架空地线的配电线路雷电感应过电压模型及应用
 祁润晗, 蔡汉生, 廖民传, 贾磊, 刘刚, 刘宇 (2413)
 环氧树脂绝缘子合模缝对水扩散试验的影响
 樊浩楠, 刘育豪, 王黎明, 张福增, 王婷婷, 曾向君 (2420)
 双断口真空断路器开断速度对电压分布的影响
 张豪, 符一凡, 董华庆, 陈占清, 廖敏夫 (2427)
 基于边际谱图像和深度残差网络的变压器局部放电模式识别
 高盎然, 朱永利, 张翼, 蔡炜豪 (2433)
 基于截断奇异值分解的局部放电去噪方法
 孙飒爽, 李珊君, 舒勤, 陈敏维, 周电波, 张大堃 (2442)
 基于均值漂移的局部放电边缘计算方法研究
 田嘉鹏, 宋辉, 罗林根, 盛戈皞, 江秀臣 (2449)

· 工程应用 ·

柔直联于弱交流系统分析和仿真试验研究
 杨万开, 张书瑞, 于华龙, 刘斌 (2457)
 特高压断路器开断大容量高抗时的电磁暂态特性
 徐文佳, 郑彬, 项涛涛, 班连庚, 杜宁, 张媛媛, 杨大业, 崔博源, 等 (2465)

· 广告索引 · (2472)

《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 6 期 (总第 451 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

广告部经理: 李慧东 010-82812429

发 行: 闰 邨 010-82812465

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: $\frac{\text{ISSN } 1000-3673}{\text{CN } 11-2410/\text{TM}}$

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 * 421 * zh * P * ¥80.00 * 20000 * 46 * 2021-6 版权所有 未经许可不得转载及上网

POWER SYSTEM TECHNOLOGY

2021, Vol. 45 No. 6 (Ser. 451)

Contents

• Application of Graph Computing, Knowledge Graph, Graph Machine Learning in Energy Internet •

Electric Power Graph Computing Platform and Its Application in Energy Internet

..... LIU Guangyi, DAI Renchang, LU Yi, YANG Xiaolei, TANG Yachen, FAN Hong, TAN Jun, LIU Tingting (2051)

Research on GPU Based and Graph Computing Based Contingency Analysis

..... DAI Renchang, WANG Yawei, LIU Guangyi, LU Yi, KAN Bowen, ZHANG Xiang, WEI Longfei (2064)

Switching Convolution of Node Graph and Line Graph-driven Method for Fast Static Security Analysis

..... YANG Mei, LIU Junyong, LIU Tingjian, QIU Gao, LIU Youbo, LIU Kai (2070)

Construction and Application of Knowledge Graph in the Electric Power Field

..... PU Tianjiao, TAN Yuanpeng, PENG Guozheng, XU Huifang, ZHANG Zhonghao (2080)

Construction and Application of Power Grid Fault Handling Knowledge Graph

..... GUO Rong, YANG Qun, LIU Shaohan, LI Wei, YUAN Xin, HUANG Xianghong (2092)

Distribution Network Fault Assistant Decision-making Based on Knowledge Graph

..... WANG Jundong, YANG Jun, PEI Yangzhou, ZHAN Xiangpeng, ZHOU Ting, XIE Peiyuan (2101)

Distribution Network Fault Location Based on Graph Attention Network

..... LI Jiawei, WANG Xiaojun, HE Jinghan, ZHANG Yongjie, ZHANG Dahai (2113)

Power System Transient Stability Assessment Based on Graph Attention Deep Network

..... ZHONG Zhi, GUAN Lin, SU Yinsheng, YAO Haicheng, HUANG Jiyu, GUO Mengxuan (2122)

Intelligent Recommendation of Demand Response Combined With Knowledge Graph and Neural Tensor Network

..... RUAN Cong, QI Linhai, WANG Hong (2131)

Power Entity Information Recognition Based on Deep Learning

..... JIANG Chen, WANG Yuan, HU Junhua, XU Jiquan, CHEN Min, WANG Yawen, MA Guoming (2141)

Reactive Power Optimization of Distribution Network Based on Graph Convolutional Network

..... LIAO Wenlong, YU Yun, WANG Yusen, CHEN Jiejing (2150)

Receptive Field Vision Edge Intelligent Recognition for Ice Thickness Identification of Transmission Line

..... MA Fuqi, WANG Bo, DONG Xuzhu, LUO Peng, WANG Hongxia, ZHOU Yinyu (2161)

• High Share of Renewable Energy Integration •

Energy-water Nexus System Joint Optimization Model Based on Adaptive-time-clustering Algorithm

..... ZHAO Hongyang, WANG Xiuli, WANG Yifei, WANG Maochun, LI Nailiang, KUANG Yi (2170)

Synergistic Performance and Combination Design of Coupling of Renewable Energy and Thermal Power

..... CHENG Guang, XU Fei, HU Bo, HAO Ling, CHEN Lei, ZHOU Guiping, MIN Yong (2178)

Optimal Dispatching Method of High-proportion Wind Power Systems Considering Wind Power Reserve for Frequency Adjustment

..... OUYANG Jinxin, YUAN Yifeng, LI Mengyang, PANG Mingyu, JIANG Hang, ZHONG Lu (2192)

Optimal Control of Standing Phase Angle During High Wind Power Penetration System Restoration

..... ZHOU Guangqi, GU Xueping, LI Shaoyan, CHAI Wenhua (2201)

Distributed Photovoltaic Station Cluster Short-term Power Forecasting Part II: Gridding Prediction

..... QIAO Ying, SUN Rongfu, DING Ran, LI Shangqiang, LU Zongxiang (2210)

• Electricity Market •

Design and Practice of Joint Optimization Mechanism for Spot Market and Deep Peak Shaving Regulation Market of Shanxi in China

..... DING Qiang, REN Yuan, HU Xiaojing, ZOU Peng, YAN Zhengshang, LI Mingdi, CAI Zhi, XUE Yanjun (2219)

Sharing Pattern of Distributed Optical Storage System Based on Dynamic Rate Considering Income Equity

..... WANG Beibei, XIE Mingcheng, ZHANG Tinghui, WU Min (2228)

Energy Decentralized Transaction Model of Multi-microgrid in Distribution Side Based on Blockchain

..... MA Teng, LIU Yang, XU Lixiong, CHEN Tao (2237)

Research on Regional Dispatching Plan and Coordinated Charging Strategy of Electric Bus

..... CAI Zilong, SHU Hongchun, YANG Bo, SHAN Jieshan (2246)

• Energy Internet •

Review on Optimal Scheduling of Integrated Energy Systems..... LI Jinghua, ZHU Mengshu, LU Yuejiang, HUANG Yujin, WU Tong (2256)

Hierarchical Optimization Economic Dispatching of Combined Wind-PV-thermal-energy Storage System Considering the Optimal Energy

Abandonment Rate..... YE Ze, LI Xiangqi, JIANG Fei, CHEN Lei, WANG Yali, DAI Shuangfeng (2270)

Advanced Rolling Optimization Control Strategy for Wind Storage System With Enhanced Ultra-short-term Wind Power Prediction

..... LI Bin, DENG Youxiong, CHEN Biyun (2280)

Energy Management Strategy of Smart Buildings for Improving Wind Power Accommodation Ability

..... LI Zening, SU Su, JIN Xiaolong, CHEN Houhe, WEI Cunhao, ZHAO Ziqi (2288)

Day-ahead and Real-time Energy Management for Active Distribution Network Based on Coordinated Optimization of Different Stakeholders	HUANG Zhanghao, ZHANG Yachao, ZHENG Feng, LIN Jiahao, AN Xueli, SHI Han (2299)
Distributionally Robust Optimal Operation for Microgrid Considering Phase Change Storage and Building Storage	ZHU Lan, LI Xiaojun, TANG Longjun, TIAN Zeqing, CUI Kaishun (2308)
Deep Reinforcement Learning Based Optimization for Charging of Aggregated Electric Vehicles	 ZHAO Xingyu, HU Junjie (2319)
• Power System •	
Aggregation of Impedance Network Model Considering Modal Observability	ZHAN Ying, XIE Xiaorong, WANG Yanhui, LUO Yongzhi, TANG Jian (2328)
Data Processing Method of Ambient Signal-based Dominant Load Parameter Identification	WU Peixuan, YE Hongbo, CUI Yong, LU Chao, WANG Ying, WANG Weihong, GU Jun (2335)
AC/UHVDC System Reliability and Sensitivity Evaluation Considering State Transition of Wind Power and Power Adjustment of UHVDC	LI Shenghu, ZHANG Nan, ZHANG Hao (2342)
Fast Calculation of Saddle-node Bifurcation Point via Levenberg-Marquardt Algorithm	LIN Liheng, DONG Shufeng, TANG Kunjie, MAO Hangyin, SONG Yonghua (2352)
Research on Power Flow Calculation Method for Multi-voltage DC Distribution Network Considering Different Connection Modes	WANG Xiaoxiao, HAN Minxiao, CAO Wenyuan, XIE Wenqiang, YU Jiaying, LI Rui, QIN Jianhua (2359)
Fault Identification and Location of Active Distribution Network Based on SVM Classification of Voltage Data	LIU Keyan, DONG Weijie, XIAO Shiwu, WEI Jia, ZHAO Wei (2369)
Markov Model of Relay Protection Device Considering Core Components and Analysis of Its Influencing Factors	XUE Ancheng, ZHANG Jiahuan, LI Wei, ZHANG Yifan, LIU Huihai, LI Kuan, WANG Xin (2380)
Novel Solution to Prevent Differential Protection Mal-blocking of Converter Transformer at Single-phase Grounding Fault at Valve Side	ZHANG Yanxia, ZHANG Fuhe, LU Jingyi, BI Anlu (2388)
Non-isolated Integrated Boost Photovoltaic Inverter Without Shoot-through	ZHANG Yujia, HU Xuefeng, JIANG Shunde, CHENG He, LIN Xin (2396)
• High Voltages •	
Simulation Analysis and Differentiated Optimization Methods of Electric Field Distribution for Shielding Devices in UHV Multi-terminal Flexible DC Converter Station	LIU Peng, WU Zehua, CHENG Jianwei, SHI Ran, GUO Yiyu, PENG Zongren (2405)
Lightning Induced Over-voltage Model and Application in Distribution Lines With Overhead Ground Wires	QI Ruihan, CAI Hansheng, LIAO Minchuan, JIA Lei, LIU Gang, LIU Yu (2413)
Influence of Closing Joints of Epoxy Resin Insulator on Water Diffusion Test	FAN Haonan, LIU Yuhao, WANG Liming, ZHANG Fuzeng, WANG Tingting, ZENG Xiangjun (2420)
Effect of Opening Speed on Voltage Distribution of Double-break Vacuum Circuit Breaker	ZHANG Hao, FU Yifan, DONG Huaqing, CHEN Zhanqing, LIAO Minfu (2427)
Pattern Recognition on PD Images of Power Transformers Based on Marginal Spectrum and Deep Residual Network	GAO Angran, ZHU Yongli, ZHANG Yi, CAI Weihao (2433)
Partial Discharge Denoising Method Based on Piecewise Singular Value Decomposition	SUN Sashuang, LI Shanjuan, SHU Qin, CHEN Minwei, ZHOU Dianbo, ZHANG Dakun (2442)
Edge Computing Method of Partial Discharge Based on Mean-shift	TIAN Jiapeng, SONG Hui, LUO Lingren, SHENG Gehao, JIANG Xiuchen (2449)
• Engineering Applications •	
System Analysis and Simulation Experimental Research of VSC-MMC HVDC Connected to AC Weak System	YANG Wankai, ZHANG Shuyu, YU Hualong, LIU Bin (2457)
Electromagnetic Characteristics of UHV AC Circuit Breakers Switching High Voltage Shunt Reactor With Large Capacity	XU Wenjia, ZHENG Bin, XIANG Zutao, BAN Liangeng, DU Ning, ZHANG Yuanyuan, YANG Daye, CUI Boyuan, et al (2465)

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