

# 电网技术

## POWER SYSTEM TECHNOLOGY

**1**  
**2019**

第43卷1期

Vol.43 No.1

QK1864987

股票代码: 603666

亿嘉和科技股份有限公司

# 2019



室外巡检



室内巡检



管廊巡检



管廊灭火

公司致力于电力、石化、市政、能源、医疗、社区、制造等行业特种机器人的研发、制造和推广应用,拥有一系列智能机器人技术和产品,可为各行业提供多样化的智能产品和服务。

电话: 025-83168166 / 传真: 025-83168160 / 邮箱: yijahe@yijahe.com / 网址: www.yijahe.com



ISSN 1000-3673



万方数据



国家电网公司 主办



## 《电网技术》

### 编辑委员会

主 任：刘振亚

委 员（按姓氏笔画排序）：

Wei-Jen Lee 丁 明 尹积军 文福拴

王 敏 王成山 王相勤 王益民

Haifeng Wang（王海风） 韦 化

帅军庆 伍 萱 刘广迎 刘开俊

刘开培 刘玉田 刘建明 印永华

孙 昕 汤 涌 纪延超 吴 云

吴玉生 Qinghua Wu（吴青华）

张文亮 张丽英 张启平 张运洲

张春城 张智刚 李卫东 李文毅

李向荣 李庆林 李成榕 李群湛

杜至刚 杨 庆 肖世杰 肖立业

陈 峰 陈月明 周 浩 郑宝森

K L Lo（罗国麟）段献忠 赵庆波

Wilsun Xu（徐文远） 索南加乐

栾 军 郭剑波 康重庆 曹一家

曹均正 曹志安 黄 强 程浩忠

舒印彪 葛正翔 路书军 廖瑞金

穆 钢 鞠 平

### 顾问委员会

主 任：陆延昌

副主任：周孝信 郑健超

委 员（按姓氏笔画排序）：

马伟明 王锡凡 卢 强 孙才新

朱英浩 严陆光 余贻鑫 宋永华

Felix Wu（吴复立）杨奇逊 汪轶生

沈国荣 邱爱慈 陆佑楣 陈清泉

赵遵廉 唐任远 顾国彪 黄其励

程时杰 韩祯祥 潘家铮 薛禹胜

## 目 次

### · 综合能源系统风险分析与控制（特约专栏主编 丁一）·

信息物理深度融合背景下综合能源系统可靠性分析评述

.....加鹤萍, 丁一, 宋永华, 胡怡霜, 尚楠, 刘月琴 (1)

面向新一代能源系统的风险评估研究现状及展望

.....严超, 别朝红, 王灿, 王春晓 (12)

考虑关键故障筛选的电-气互联综合能源系统混合控制方法

.....梅建春, 卫志农, 张勇, 马洲俊, 陈胜, 孙国强 (23)

考虑天然气系统影响的电力系统连锁故障评估

.....包铭磊, 杨阳, 丁一, 邵常政, 桑茂盛 (32)

极端事件下电-气混联综合能源系统的恢复力分析

.....齐世雄, 王秀丽, 邵成成, 卞艺衡, 王一飞, 姚力 (41)

计及静态安全因素与热电最优潮流的综合能源系统联合运行优化模型

.....潘益, 梅飞, 郑建勇, 何桂雄 (50)

电-气耦合系统概率 Pareto 最大负荷裕度及灵敏度分析

.....秦佳倩, 马瑞 (58)

基于 K-means 聚类技术改进的多线性蒙特卡洛概率能流算法

.....靳康萌, 张沛, 邓晓洋, 谢桦 (65)

区域综合能源系统冷-热-电-气概率多能流计算.....杨家豪 (74)

电-热互联综合能源系统区间潮流计算方法

.....王文学, 胡伟, 孙国强, 梁硕, 汪春, 卫志农, 陈胜 (83)

电-热综合能源系统能流的区间计算算法

.....伍惠敏, 王洋, 刘宽, 陈宇杰, 丁梦妮, 王巍璋 (91)

基于价格引导的气电联合系统双层优化模型

.....舒康安, 艾小猛, 方家琨, 姚伟, 文劲宇 (100)

基于机会约束规划的楼宇综合能源系统经济调度

.....张宇帆, 艾芊, 郝然, 孙树敏, 林琳, 袁帅 (108)

计及电转气精细化模型的综合能源系统鲁棒随机优化调度

.....朱兰, 王吉, 唐院军, 刘仲, 黄超 (116)

计及多个独立运营商的综合能源系统分布式低碳经济调度

.....史佳琪, 胡浩, 张建华 (126)

### · 国家重点研发计划 ·

输电网鲁棒规划研究综述与展望

.....刘盾盾, 程浩忠, 刘佳, 曾平良, 张建平, 陆建忠 (135)

交流潮流约束机组组合的交替方向乘法

.....程颖, 刘明波, 陈鸿琳, 郑佳滨 (143)

利用全桥 MMC 注入特征信号的直流自适应重合闸方法

.....宋国兵, 王婷, 张晨浩, 吴磊 (149)

### · 电力系统 ·

张北柔性直流电网盈余功率问题的机理分析及控制方法

.....郭贤珊, 梅念, 李探, 李高望, 魏争, 苑宾 (157)

计及电转气技术的天然气-电力耦合系统运行研究综述

.....窦迅, 赵文浩, 郎伊紫禾, 李扬, 高赐威 (165)

电力弹簧研究进展：原理、拓扑结构、控制和应用

.....尹发根, 王洋 (174)

## 基于 Kriging 模型的综合能源系统规划方法

.....刘迪, 吴俊勇, 林凯骏, 李德智, 龚桃荣 (185)

## 提高电力系统稳定性的直流附加阻尼与发电机励磁非线性协调控制

.....从兰美, 李啸聪, 徐俊华, 陈登义 (193)

## 多区域互联电力系统静止同步串联补偿器自适应反步滑模控制器设计

.....陈登义, 李啸聪, 刘松 (200)

## 高比例水电送出系统超低频频率振荡风险及影响因素分析

.....王歆, 张怡, 王官宏, 余锐, 张健, 孙华东, 罗煦之, 褚晓杰, 张书瑀, 彭龙 (206)

## 考虑负荷特性的解列后受端电网频率控制策略

.....姜源媛, 蒋若蒙, 钱峰, 段秦刚, 罗钢, 伍双喜, 刘俊磊, 张子泳, 孙英云 (213)

## 兼顾一次调频性能和超低频振荡抑制的水轮机调速器 PID 参数优化

.....史华勃, 陈刚, 丁理杰, 韩晓言, 张宇栋, 陈振, 张华, 刘畅 (221)

## 电能路由器接入电力电子化配电网稳定性初步分析

.....段青, 盛万兴, 李振, 赵彩虹, 王建华 (227)

## 一种基于功率谱密度的发电机机械功率扰动源定位方法

.....李尚远, 甘德强, 梁某德 (236)

## 一种采用等效传输阻抗法的新型电气距离计算方法及其应用

.....鲍海, 房国俊 (244)

## 功率硬件在环仿真系统性能分析

.....杨向真, 孙麒, 杜燕, 苏建徽, 汪飞 (251)

## 配用电大数据分布式计算集群负载均衡框架

.....张令涛, 赵林, 张亮, 田国辉, 孙湃 (259)

## 基于多目标离散粒子群算法的电容隔直装置优化配置

.....宋雨妍, 王渝红, 刘天宇, 李瑾, 张文韬 (266)

## 减小电容容值的 H 桥级联型 STATCOM 电容取值分析与直流电压控制

.....杜少通, 谭兴国, 周娟 (275)

## · 可再生能源发电与综合消纳技术 ·

## 基于停电序列多状态模型的含微网配电系统可靠性评估

.....唐巍, 闫涛, 王越, 张先亮 (285)

## 考虑可控光伏系统的配电网有功-无功协调优化

.....刘兆元, 王萍, 郑能, 赵颖, 丁晓群, 缪辉, 胡瑞馨, 管志成 (293)

## 基于开关序列的光伏储能双向 DC-DC 变换器预测电流控制方法

.....杨惠, 晁凯悦, 孙向东, 张琦, 骆珊 (300)

## 基于快速过采样主成分分析法的光伏阵列故障诊断

.....李元良, 丁坤, 陈富东, 丁汉祥 (308)

## 基于负荷分类增长的分布式风电源与电容器联合动态规划

.....邵尤国, 赵洁, 方俊钧, 陈寅, 刘涤尘, 王林宏, 刘琦, 杨桥伟 (316)

## 面向新能源消纳的需求侧聚合负荷协同控制

.....祁兵, 曾璐琨, 叶秋子, 孙毅, 李彬, 陈宋宋, 杨斌 (324)

## 改进 LMD 算法在微电网电能质量扰动信号检测中的应用

.....徐艳春, 高永康, 李振兴, 席磊 (332)

## · 高电压技术 ·

## 高海拔真型塔 110 kV 绝缘子雷击闪络试验及判据研究

.....张垚琦, 韩永霞, 杨杰, 阮耀萱, 刘刚, 蔡汉生, 李立涅 (340)

## 特高压交流输电线路跨越 500 kV 塔顶带电作业电场特性及安全防护研究

.....霍锋, 卢威, 黄道春, 南敬, 邱志斌, 黄从鹏 (349)

## 接地装置冲击接地电阻测试方法

.....王森, 张波, 张健, 于义亮, 李英奇, 李志忠 (356)

《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 43 卷 第 1 期 (总第 422 期)

主管: 国家电网公司

主办: 国家电网公司

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: 张文亮

副主编: 郭剑波 汤涌

编辑部副主任: 李兰欣 010-82812543

广告部经理: 齐华 010-58386112

发行: 闫 颀 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

北京市昌平区七北路马连店甲 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

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

广告经营许可证号: 京海工商广字第 0168 号

期刊基本参数: CN 11-2410/TM \* 1957 \* M \* A4 \* 362 \* zh \* P \* ¥80.00 \* 20000 \* 44 \* 2019-01 版权所有 未经许可不得转载及上网

# POWER SYSTEM TECHNOLOGY

2019, Vol. 43 No. 1 (Ser. 422)

## Contents

### • Risk Analysis and Control of Ingegrated Energy Systems •

#### Review of Reliability Analysis for Integrated Energy Systems With Integration of Cyber Physical Systems

..... Jia Heping, Ding Yi, Song Yonghua, Hu Yishuang, Shang Nan, Liu Yueqin (1)

Risk Assessment Studies for New Generation Energy System ..... Yan Chao, Bie Zhaohong, Wang Can, Wang Chunxiao (12)

#### Hybrid Control of Integrated Power and Gas Energy Systems Based on Significant Contingency Screening

..... Mei Jianchun, Wei Zhinong, Zhang Yong, Ma Zhoujun, Chen Sheng, Sun Guoqiang (23)

#### Assessment of Cascading Failures in Power System Considering Effects of Natural Gas System

..... Bao Minglei, Yang Yang, Ding Yi, Shao Changzheng, Sang Maosheng (32)

#### Resilience Analysis of Integrated Electricity and Natural Gas Energy System Under Extreme Events

..... Qi Shixiong, Wang Xiuli, Shao Chengcheng, Bian Yiheng, Wang Yifei, Yao Li (41)

#### Operation Optimization Model for Multi-Integrated Energy Systems Considering Static Security and Optimal Energy Flow

..... Pan Yi, Mei Fei, Zheng Jianyong, He Guixiong (50)

#### Probability Pareto Maximum Load Margin and Sensitivity Analysis for Electricity-Gas Coupling System

..... Qin Jiaqian, Ma Rui (58)

#### Improved Multi-Linear Monte Carlo Probabilistic Energy Flow Calculation Method Based on K-Means Clustering Technique

..... Jin Kangmeng, Zhang Pei, Deng Xiaoyang, Xie Hua (65)

#### Probabilistic Multi-Energy Flow Calculation for Regional Integrated Energy System Containing Cooling, Heating, Electricity and Gas

..... Yang Jiahao (74)

#### Interval Energy Flow Calculation Method of Integrated Electro-Thermal System

..... Wang Wenxue, Hu Wei, Sun Guoqiang, Liang Shuo, Wang Chun, Wei Zhinong, Chen Sheng (83)

#### An Interval Energy Flow Calculation Method for Integrated Electro-Thermal Energy System

..... Wu Huicheng, Wang Chun, Liu Kuan, Chen Yujie, Ding Mengni, Wang Weizhang (91)

#### Bi-Level Optimal Model for Integrated Power and Gas System Based on Price Signals

..... Shu Kang'an, Ai Xiaomeng, Fang Jiakun, Yao Wei, Wen Jinyu (100)

#### Economic Dispatch of Integrated Energy System at Building Level Based on Chance Constrained Programming

..... Zhang Yufan, Ai Qian, Hao Ran, Sun Shumin, Lin Lin, Yuan Shuai (108)

#### Robust Stochastic Optimal Dispatching of Integrated Energy Systems Considering Refined Power-to-Gas Model

..... Zhu Lan, Wang Ji, Tang Longjun, Liu Shen, Huang Chao (116)

#### Distributed Low-Carbon Economy Scheduling for Integrated Energy System With Multiple Individual Energy-Hubs

..... Shi Jiaqi, Hu Hao, Zhang Jianhua (126)

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

#### Review and Prospects of Robust Transmission Expansion Planning

..... Liu Dundun, Cheng Haozhong, Liu Jia, Zeng Pingliang, Zhang Jianping, Lu Jianzhong (135)

#### Alternating Direction Multiplier Method for AC Power Flow Constrained Unit Commitment

..... Cheng Ying, Liu Mingbo, Chen Honglin, Zheng Jiabin (143)

#### Adaptive Auto-Reclosing of DC Line Based on Characteristic Signal Injected By FB-MMC

..... Song Guobing, Wang Ting, Zhang Chenhao, Wu Lei (149)

### • Power System •

#### Study on Solution for Power Surplus in Zhangbei VSC-Based DC Grid Mechanism Analysis and Control Method

..... Guo Xianshan, Mei Nian, Li Tan, Li Gaowang, Wei Zheng, Yuan Bin (157)

#### A Review of Operation of Natural Gas-Electricity Coupling System Considering Power-to-Gas Technology

..... Dou Xun, Zhao Wenhao, Lang Yizihe, Li Yang, Gao Ciwei (165)

Review of Electric Spring: Principle, Topologies, Control and Applications ..... Yin Fagen, Wang Chun (174)

#### A Planning Method of Integrated Energy System Based on Kriging Model

..... Liu Di, Wu Junyong, Lin Kaijun, Li Dezhi, Gong Taorong (185)

Coordinated Nonlinear Control of HVDC Supplementary Damping With Generator Excitation for Enhancing Stability of Power System ..... Cong Lanmei, Li Xiacong, Xu Junhua, Chen Dengyi (193)

#### Adaptive Backstepping Sliding Mode Controller Design for Multi-Region Interconnected Power System With SSSC

..... Chen Dengyi, Li Xiacong, Liu Song (200)

<b>Research on Ultra-Low Frequency Oscillation Risk and Influencing Factors of High-Ratio Hydroelectric Transmission System</b>	Wang Xin, Zhang Yi, Wang Guanhong, Yu Rui, Zhang Jian, Sun Huadong, Luo Xuzhi, Chu Xiaojie, Zhang Shuyu, Peng Long (206)
<b>Frequency Control Strategy After Receiving-End Power Grid Splitting Considering Load Characteristics</b>	Lou Yuanyuan, Jiang Ruomeng, Qian Feng, Duan Qingang, Luo Gang, Wu Shuangxi, Liu Junlei, Zhang Ziyong, Sun Yingyun (213)
<b>PID Parameter Optimization of Hydro Turbine Governor Considering the Primary Frequency Regulation Performance and Ultra-Low Frequency Oscillation Suppression</b>	Shi Huabo, Chen Gang, Ding Lijie, Han Xiaoyan, Zhang Yudong, Chen Zhen, Zhang Hua, Liu Chang (221)
<b>Stability Analysis of Power Routers Connected to Power Electronic Distribution Grid</b>	Duan Qing, Sheng Wanxing, Li Zhen, Zhao Caihong, Wang Jianhua (227)
<b>A Novel Method for Locating Forced Oscillation Source in Mechanical Power Based on Power Spectral Density</b>	Li Shangyuan, Gan Deqiang, Luan Moude (236)
<b>A New Method of Electrical Distance Calculation and Its Applications Used the Equivalent Transmission Impedance Method</b>	Bao Hai, Fang Guojun (244)
<b>Performance Analysis of Power Hardware-in-Loop Simulation</b>	Yang Xiangzhen, Sun Qi, Du Yan, Su Jianhui, Wang Fei (251)
<b>Load Balancing Framework for Big Data Distributed Computing Cluster in Power Distribution and Consumption Systems</b>	Zhang Lingtao, Zhao Lin, Zhang Liang, Tian Guohui, Sun Pai (259)
<b>Optimal Configuration of Capacitor Blocking Devices Based on Multi-Objective Discrete PSO</b>	Song Yuyan, Wang Yuhong, Liu Tianyu, Li Jin, Zhang Wentao (266)
<b>Capacitor Value Selection Analysis and DC Voltage Control for Cascaded H-Bridge STATCOM With Reduced Capacitance Value</b>	Du Shaotong, Tan Xingguo, Zhou Juan (275)
<b>• Renewable Energy Generation and Integration •</b>	
<b>Reliability Evaluation of Distribution Network Containing Microgrids Based on Multi-State Power Interruption Sequence Model</b>	Tang Wei, Yan Tao, Wang Yue, Zhang Xianliang (285)
<b>Coordinated Active-Reactive Power Optimization of Distribution Network Considering Controllable Photovoltaic System</b>	Liu Zhaoyuan, Wang Ping, Zheng Neng, Zhao Ying, Ding Xiaoqun, Miao Hui, Hu Ruixin, Guan Zhicheng (293)
<b>Predictive Current Control Method of Photovoltaic Energy Storage for Bidirectional DC-DC Converter Based on Switching Sequence</b>	Yang Hui, Chao Kaiyue, Sun Xiangdong, Zhang Qi, Luo Shan (300)
<b>Fault Diagnosis Method of PV Array Based on Fast OS-PCA</b>	Li Yuanliang, Ding Kun, Chen Fudong, Ding Hanxiang (308)
<b>Integrated Dynamic Planning of Distributed Wind Generation and Capacitor Based on Load Classification Growth</b>	Shao Youguo, Zhao Jie, Fang Junjun, Chen Yin, Liu Dichen, Wang Linhong, Liu Qi, Yang Qiaowei (316)
<b>Cooperative Control of Aggregated Loads at Demand Side for Accommodating New Energy</b>	Qi Bing, Zeng Lukun, Ye Qiuzi, Sun Yi, Li Bin, Chen Songsong, Yang Bin (324)
<b>Application of Improved LMD Algorithm in Signal Detection of Power Quality Disturbance in Microgrid</b>	Xu Yanchun, Gao Yongkang, Li Zhenxing, Xi Lei (332)
<b>• High Voltages •</b>	
<b>Lightning Flashover Performance Test and Flashover Criterion Study of Insulators in a 110 kV True Type Tower at High Altitude Areas</b>	Zhang Yaqi, Han Yongxia, Yang Jie, Ruan Yaoxuan, Liu Gang, Cai Hansheng, Li Licheng (340)
<b>Study on Electric Field Distribution Characteristics of Live-Working and Protection for Crossing Project of 1000kV-Over-500kV AC Transmission Lines</b>	Huo Feng, Lu Wei, Huang Daochun, Nan Jing, Qiu Zhibin, Huang Congpeng (349)
<b>Measurement Method of Impulse Grounding Impedance of Grounding Device</b>	Wang Sen, Zhang Bo, Zhang Jian, Yu Yiliang, Li Yingqi, Li Zhizhong (356)

**Sponsor:** State Grid Corporation of China

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

**Chairman of Editorial Committee:** Liu Zhenya

**Editor-in-Chief:** Zhang Wenliang

**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





国家电网  
STATE GRID

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

# 输变电工程研究所

输变电工程研究所是中国电力行业内从事输变电工程机械力学领域科研、技术服务和试验检测的专业研究机构，是全国架空线路标准化技术委员会、中国电机工程学会输电专业委员会、中国钢结构协会塔桅钢结构分会的挂靠单位。

输变电工程研究所主要业务范围包括杆塔结构研究与试验检测，导地线与金具研究、产品研发与试验检测，输电线路微风振动、次档距振荡、舞动防治，地基基础研究与试验检测，输变电构筑物及重要电气设施抗震减振研究、产品研发与试验检测，输电线路状态监测与评估技术研究，输变电工程施工技术和工艺研究、施工装备及工器具研究、设计技术研究等。

输变电工程研究所将继续秉承“努力超越、追求卓越”的企业精神，坚持“中国的电力、我们的事业”的企业理念，以先进的技术、精良的设备、丰富的经验、科学的管理提供更优质的服务，努力为我国的电力事业作出更大的贡献。



地址：北京市西城区广安门南滨河路33号华亨大厦（100055）

联系人：李军辉

电话：010-58386104

网址：[www.epri.sgcc.com.cn](http://www.epri.sgcc.com.cn)