



QK1935909

# 电力自动化设备

Electric Power Automation Equipment

中文核心期刊 中国科技核心期刊 CSCD 核心期刊 美国《工程索引》(Ei) 核心期刊 英国 SA/INSPEC、俄罗斯 AJ、美国 CSA、荷兰 Scopus 收录期刊

**EPAE** 电力自动化设备杂志社  
EPAE Periodical Press

## 综合能源系统

### 安全分析与优化控制技术 专辑

Security Analysis and Optimization Control Technology of Integrated Energy System

随着电、气、冷、热等异质能源系统的耦合日益深入,关于综合能源系统的安全性分析研究亟待展开。“互联网+智慧能源”理念的推进为此提供了新思路,多能开放互联特征使得不同能源子系统的综合规划、协同运行、统一调控、一体化安全控制成为发展趋势。本期专辑从综述与展望、综合建模与仿真技术、安全分析与可视化技术、规划与优化配置技术、优化调度与运行技术等方面,汇集了综合能源系统安全分析与优化控制领域的相关研究成果,为新形势下综合能源系统的理论研究与工程实践提供技术参考和启发。

ISSN 1006-6047



771006 604196  
万方数据

南京电力自动化研究所有限公司  
国电南京自动化股份有限公司

主办

**2019 8**  
第39卷 第8期  
Vol.39 No.8



# 电力自动化设备

DIANLI ZIDONGHUA SHEBEI

(月刊,1973年创刊)



8月  
2019年  
第39卷第8期  
(总第304期)  
2019年8月10日出版

## 编辑委员会

主任委员	王宏志
副主任委员	张东晓 周顺宏 胡红升 王凤蛟 经海林
名誉编委	(按姓氏笔画排序) 王维俭 王锡凡 卢强 严璋 杨以涵 杨奇逊 吴青华 吴复立 余贻鑫 辛耀中 宋永华 宋璇坤 张丽英 张伯明 陈陈 陈德树 罗安 周有庆 周孝信 洪佩孙 贺家李 钱清泉 徐文远 韩英铎 韩祯祥 程时杰 舒印彪
编委	(按姓氏笔画排序) 丁明 于继来 卫志农 王成山 王守相 王克文 王增平 韦化 文劲宇 文福拴 尹项根 艾芊 艾欣 卢志刚 朱守真 刘天琪 刘玉田 刘向杰 刘明波 刘俊勇 刘宪林 刘健 江全元 孙元章 孙宏斌 毕天姝 阮新波 严干贵 严正 李生虎 李永丽 李庚银 李斌 束洪春 别朝红 何正友 闵勇 张尧 张兴 张波 张保会 张道农 陆于平 陈星莺 陈维荣 陈皓勇 邵能灵 林中达 林湘宁 和敬涵 周浩 周维维 赵争鸣 赵建国 赵剑锋 赵晋泉 胡家兵 胡敏强 段献忠 袁越 贾宏杰 夏清 徐丙垠 徐政 徐殿国 高仕斌 高厚磊 郭效军 唐炬 涂春鸣 黄学良 曹一家 康重庆 康勇 董新洲 程浩忠 曾祥君 曾嵘 谢少军 蔡泽祥 廖瑞金 颜汉荣 薄志谦 穆钢 鞠平
主编	郭效军

万方数据

## 目次 Contents

### “综合能源系统安全分析与优化控制技术”专辑

- 1 特约主编寄语 卫志农,王丹,孙国强
- ▶▶ 综述与展望
- 3 电-气互联综合能源系统安全分析与优化控制研究综述 陈胜,卫志农,孙国强,等
- 12 综合能源系统运行可靠性评估综述及展望 李更丰,黄玉雄,别朝红,等
- ▶▶ 综合建模与仿真技术
- 22 综合能源系统多能流准稳态分析与计算 钟俊杰,李勇,曾子龙,等
- 31 基于数据驱动的电-热互联综合能源系统线性化潮流计算 卫志农,仲磊磊,薛溪枫,等
- 38 含DFIG风电场电-气耦合系统的概率连续混合潮流方法及其负荷裕度分析 马瑞,秦佳倩
- 47 面向电-热综合能源系统的双线性抗差状态估计方法 陈艳波,姚远,杨晓楠,等
- 55 基于GMM及多点线性半不变量法的电-热互联综合能源系统概率潮流分析 廖星星,吴奕,卫志农,等
- ▶▶ 安全分析与可视化技术
- 63 面向区域综合能源系统的安全域模型 刘柳,王丹,贾宏杰,等
- 72 计及多能存储和综合需求响应的多能源系统可靠性评估 路红池,谢开贵,王学斌,等
- 79 先进绝热压缩空气储能热电联供模式下的运行可行域分析 白珈于,薛小代,陈来军,等
- 86 考虑双向耦合的电-气综合能源系统时序故障恢复方法 陈玮,丁筱,施云辉,等
- 95 基于灵敏度分析的综合能源系统运行安全性的研究 陈厚合,张鹏,姜涛,等
- 104 基于复杂网络的电-气-热综合能源系统健壮性分析 潘华,肖雨涵,梁作放,等
- 113 计及输气系统延时特性的电-气互联系统可用输电能力计算 陈厚合,尚聪,王丹,等
- 120 输配一体化综合能源系统的运行多指标评估方法 何宇斌,张伊宁,马光,等
- 128 考虑电-气耦合系统连锁故障的多阶段信息物理协同攻击策略 曹茂森,王蕾报,胡博,等

国家科委(90)国科发情字796号文批准

## ►► 规划与优化配置技术

- 137 计及  $N-1$  安全准则的能量枢纽优化配置 林紫菡, 刘祚宇, 文福拴, 等
- 144 考虑电转气设备和风电场协同扩建的气电互联综合能源系统规划  
刘天琪, 曾红, 何川, 等
- 152 基于配置-运行协同优化的分布式能源站选型与定容规划  
王丹, 孟政吉, 贾宏杰, 等
- 161 计及电转气热回收的综合能源系统蓄热罐容量规划与运行策略  
李东森, 高赐威, 赵明
- 169 考虑不确定性及电/热储能的综合能源系统两阶段规划-运行联合优化方法  
雷金勇, 郭祚刚, 陈聪, 等
- 176 计及不确定性的区域综合能源系统双层优化配置规划模型  
仇知, 王蓓蓓, 贵树俊, 等
- 186 计及需求响应的综合能源系统容量经济配置及效益分析  
蔡含虎, 向月, 杨昕然
- 195 考虑联络线峰谷差和电网运行效益的综合能源系统规划  
张筱慧, 李佳馨, 张璐, 等

## ►► 优化调度与运行技术

- 203 综合能源系统混合时间尺度运行优化 顾伟, 陆帅, 姚帅, 等
- 214 基于机会约束目标规划的风-光-水-气-火-储联合优化调度  
李志伟, 赵书强, 刘金山
- 224 基于综合需求响应的负荷聚合商最优市场交易策略  
刘珮云, 丁涛, 贺元康, 等
- 232 考虑多风电场出力耦合特性的热电联合优化调度  
潘杨, 石立宝, 姚诸香, 等
- 239 考虑电能共享的综合能源楼宇群日前协同优化调度  
胡鹏, 艾欣, 杨昭, 等
- 246 计及中长期合同电量分解和风电不确定性的电-气综合能源系统日前优化调度  
吴刚, 刘俊勇, 向月, 等
- 254 计及人体舒适度和柔性负荷的综合能源协同优化调度  
江岳春, 曾诚玉, 郇嘉嘉, 等
- 261 考虑联合热电需求响应与高比例新能源消纳的多能源园区日前经济调度  
刘天琪, 卢俊, 何川, 等
- 269 含电、气、热3种储能的微网综合能源系统经济优化运行  
施泉生, 丁建勇, 刘坤, 等
- 277 计及需求侧管理的多电-气互联综合能源系统分散协调调度  
魏震波, 黄宇涵
- 286 园区综合能源系统互联安全性与运营模式研究  
王旭东, 丁一, 马世乾, 等
- 294 基于自适应步长 ADMM 的电-气混联系统多时间尺度优化调度  
赵波, 倪筹帷, 李志浩, 等

第三届全国期刊奖提名奖获奖期刊

中国国际影响力优秀学术期刊

中文核心期刊

《工程索引》(EI) 核心期刊

中国科学引文数据库 (CSCD) 核心期刊

中国科技核心期刊

RCCSE 中国权威学术期刊

英国《科学文摘》(SA, INSPEC) 收录期刊

美国《剑桥科学文摘》(CSA) 收录期刊

俄罗斯《文摘杂志》(AJ, VINITI) 收录期刊

美国《乌利希期刊指南》(UPD) 收录期刊

荷兰《文摘与引文数据库》(Scopus) 来源期刊

第四届华东地区优秀期刊

中国电力报刊协会优秀期刊

**EPAE** 电力自动化设备杂志社  
EPAE Periodical Press

主管单位 中国华电集团有限公司

主办单位 南京电力自动化研究所有限公司

国电南京自动化股份有限公司

编辑出版 《电力自动化设备》编辑部

地址 南京高新技术产业开发区星火路8号

邮政编码 210032

社长 康鲁豫

编辑部主任 李育燕

编辑部副主任 李莉、李玲

广告部主管 张芳芳

发行部主管 于娜娜

本期栏目统筹 李玮

美术编辑 卞金晶

电话 (025) 51859278 (社长室)

(025) 83537347, 51859279 (编辑部)

(025) 83537349 (广告部)

(025) 51859280 (发行及读者服务部)

(025) 51183898 (平面设计部)

网址 [www.epae.cn](http://www.epae.cn)

电子信箱 [epae@sac-china.com](mailto:epae@sac-china.com)

发行范围 国内外公开发行

印刷 中闻集团南京印务有限公司

国内发行 江苏省邮政局

邮发代号 28-268

订阅处 全国各地邮局

国内定价 每期35.00元, 全年420.00元

海外发行 中国国际图书贸易集团有限公司  
(100048)

海外发行代号 MO-4802

中国标准连续出版物号 ISSN 1006-6047  
CN 32-1318/TM

国际刊名代码 (CODEN) DZSHFK



关注微信



访问官网

广告发布登记通知书编号: 广登32010000078

# Electric Power Automation Equipment (EPAE)

Vol.39 No.8(Sum No.304)

Aug. 2019

## CONTENTS

### Special Issue: Security Analysis and Optimization Control Technology of Integrated Energy System

#### REVIEW AND OUTLOOK

- 11 Review on security analysis and optimal control of electricity-gas integrated energy system  
*CHEN Sheng, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al.*
- 21 Review and prospect of operational reliability evaluation of integrated energy system  
*LI Gengfeng, HUANG Yuxiong, BIE Zhaohong, et al.*

#### INTEGRATED MODELING AND SIMULATION TECHNOLOGY

- 30 Quasi-steady-state analysis and calculation of multi-energy flow for integrated energy system  
*ZHONG Junjie, LI Yong, ZENG Zilong, et al.*
- 37 Linearization flow calculation for integrated electricity-heat energy system based on data-driven  
*WEI Zhinong, ZHONG Leilei, XUE Mingfeng, et al.*
- 46 Probabilistic continuous hybrid flow method for electricity-gas coupling system integrated with DFIC wind farm and its load margin analysis  
*MA Rui, QIN Jiaqian*
- 54 Bilinear robust state estimation method for integrated electricity-heat energy systems  
*CHEN Yanbo, YAO Yuan, YANG Xiaonan, et al.*
- 62 Probabilistic power flow analysis of integrated electricity-heat energy system based on GMM and multi-point linear cumulant method  
*LIAO Xingxing, WU Yi, WEI Zhinong, et al.*

#### SECURITY ANALYSIS AND VISUALIZATION TECHNOLOGY

- 71 Security region model for regional integrated energy system  
*LIU Liu, WANG Dan, JIA Hongjie, et al.*
- 78 Reliability assessment of multi-energy system considering multi-storage and integrated demand response  
*LU Hongchi, XIE Kaigui, WANG Xuebin, et al.*
- 112 Operation feasible region analysis of advanced adiabatic compressed air energy storage under thermal-electric co-generation mode  
*BAI Jiayu, XUE Xiaodai, CHEN Laijun, et al.*
- 94 Sequential fault restoration method for electricity-gas integrated energy system considering two-way coupling  
*CHEN Wei, DIN Xiao, SHI Yunhui, GUO Chuangxin*
- 103 Security analysis based on sensitivity analysis for integrated electric and gas energy system  
*CHEN Houhe, ZHANG Peng, JIANG Tao, et al.*
- 112 Robustness analysis of electricity-gas-heat integrated energy system based on complex network  
*PAN Hua, XIAO Yuhua, LIANG Zuofang, et al.*
- 119 Available transfer capability calculation of integrated electricity and natural-gas systems considering delay characteristics of gas transmission system  
*CHEN Houhe, SHANG Cong, WANG Dan, et al.*
- 136 Multi-index evaluation for integrated energy system operation connecting transmission and distribution levels  
*HE Yubin, ZHANG Yining, MA Guang, et al.*
- 136 Coordinated cyber-physical multi-stage attack strategy considering cascading failure of integrated electricity-natural gas system  
*CAO Maosen, WANG Leibao, HU Bo, et al.*

#### PLANNING AND OPTIMIZING CONFIGURATION TECHNOLOGY

- 231 Optimal placement of energy hubs considering  $N-1$  security criterion  
*LIN Zihan, LIU Zuoyu, WEN Fushuan, et al.*
- 151 Planning of integrated gas and electricity system considering coordinated expansion of power-to-gas facilities and wind farms  
*LIU Tianqi, ZENG Hong, HE Chuan, et al.*
- 160 Siting and sizing planning for distributed energy station based on coordinated optimization of configuration and operation  
*WANG Dan, MENG Zhengji, JIA Hongjie, et al.*

**Competent Authorities** China Huadian Corporation Ltd.

**Sponsor** Nanjing Electric Power Automation Research Institute Co., Ltd.

Guodian Nanjing Automation Co., Ltd.

**Chairman** WANG Hongzhi

**Editor in Chief** GUO Xiaojun

**Web Site** www.epae.cn

**Publication Number** ISSN 1006-6047

**Editor and Publisher** Electric Power Automation Equipment

Editorial Department

**Add** 8 Xinghuo Road, Pukou District, Nanjing, China

**Post Code** 210032

**Tel** 86-25-51859278, 83537347, 83537349

**E-mail** epae@sac-china.com

168 Capacity planning and operating strategy of heat accumulator for integrated energy system considering heat recovery of power-to-gas  
LI Dongsen,GAO Ciwei,ZHAO Ming

175 Two-stage planning-operation co-optimization of IES considering uncertainty and electrical / thermal energy storage  
LEI Jinyong,GUO Zuogang,CHEN Cong,et al.

185 Bi-level optimal configuration planning model of regional integrated energy system considering uncertainties  
QIU Zhi,WANG Beibei,BEN Shujun,et al.

194 Economic capacity allocation and benefit analysis of integrated energy system considering demand response  
CAI Hanhu,XIANG Yue,YANG Xinran

202 Integrated energy system planning considering peak-to-valley difference of tie line and operation benefit of power grid  
ZHANG Xiaohui,LI Jiaxin,ZHANG Lu,et al.

OPTIMIZED SCHEDULING AND OPERATION TECHNOLOGY

213 Hybrid time-scale operation optimization of integrated energy system  
GU Wei,LU Shuai,YAO Shuai,et al.

223 Coordinated optimal dispatch of wind-photovoltaic-hydro-gas-thermal-storage system based on chance-constrained goal programming  
LI Zhiwei,ZHAO Shuqiang,LIU Jinshan

231 Optimal trading strategy for load aggregator based on integrated demand response  
LIU Peiyun,DING Tao,HE Yuankang,et al.

238 Optimal scheduling of combined heat and power system considering coupling characteristics of multiple wind farm outputs  
PAN Yang,SHI Libao,YAO Zhuxiang,et al.

245 Day-ahead optimal scheduling for cluster building with integrated energy system considering power sharing  
HU Peng,AI Xin,YANG Zhao,et al.

253 Day-ahead optimal scheduling of integrated electricity and natural gas system with medium- and long-term electricity contract decomposition and wind power uncertainties  
WU Gang,LIU Junyong,XIANG Yue,et al.

260 Integrated energy collaborative optimal dispatch considering human comfort and flexible load  
JIANG Yuechun,ZENG Chengyu,HUAN Jiajia,et al.

268 Day-ahead economic dispatch of multi-energy parks considering integrated thermo-electric demand response and high penetration of renewable energy  
LIU Tianqi,LU Jun,HE Chuan,et al.

293 Economic optimal operation of microgrid integrated energy system with electricity,gas and heat storage  
SHI Quansheng,DING Jianyong,LIU Kun,et al.

285 Decentralized coordinated dispatch for multiple integrated electricity-gas energy systems considering demand side management  
WEI Zhenbo,HUANG Yuhan

293 Research on interconnection security and operation mode of park level integrated energy system  
WANG Xudong,DING Yi,MA Shiqian,et al.

299 Multi-time scale optimal scheduling of electricity-gas hybrid system based on adaptive step size ADMM  
ZHAO Bo,NI Chouwei,LI Zhihao,et al.

《电力自动化设备》2019 年度重点专题

《电力自动化设备》2019 年度重点推出“综合能源系统安全分析与优化控制技术”专题( 专题特约主编:河海大学卫志农教授、天津大学王丹副教授、河海大学孙国强副教授)与“大型交直流混联电网运行控制与保护”专题( 专题特约主编:清华大学董新洲教授、中国电科院汤涌教授级高工、中国电科院卜广全教授级高工、清华大学王宾副研究员),集中展现相关领域科学技术的最新研究进展。敬请关注!

“综合能源系统安全分析与优化控制技术”专题

- 1) 面向安全分析的综合能源系统建模仿真技术;
- 2) 综合能源系统状态估计和态势感知技术;
- 3) 综合能源系统关键故障辨识与筛选技术;
- 4) 综合能源系统连锁故障机理与安全防御控制技术;
- 5) 综合能源系统安全域观测与可视化技术;
- 6) 高比例可再生能源并网的综合能源系统安全稳定分析;
- 7) 数据攻击下的综合能源系统安全分析与防御策略;
- 8) 计及需求侧响应的综合能源系统安全评估方法;
- 9) 计及不确定性的综合能源系统安全分析方法。

“大型交直流混联电网运行控制与保护”专题

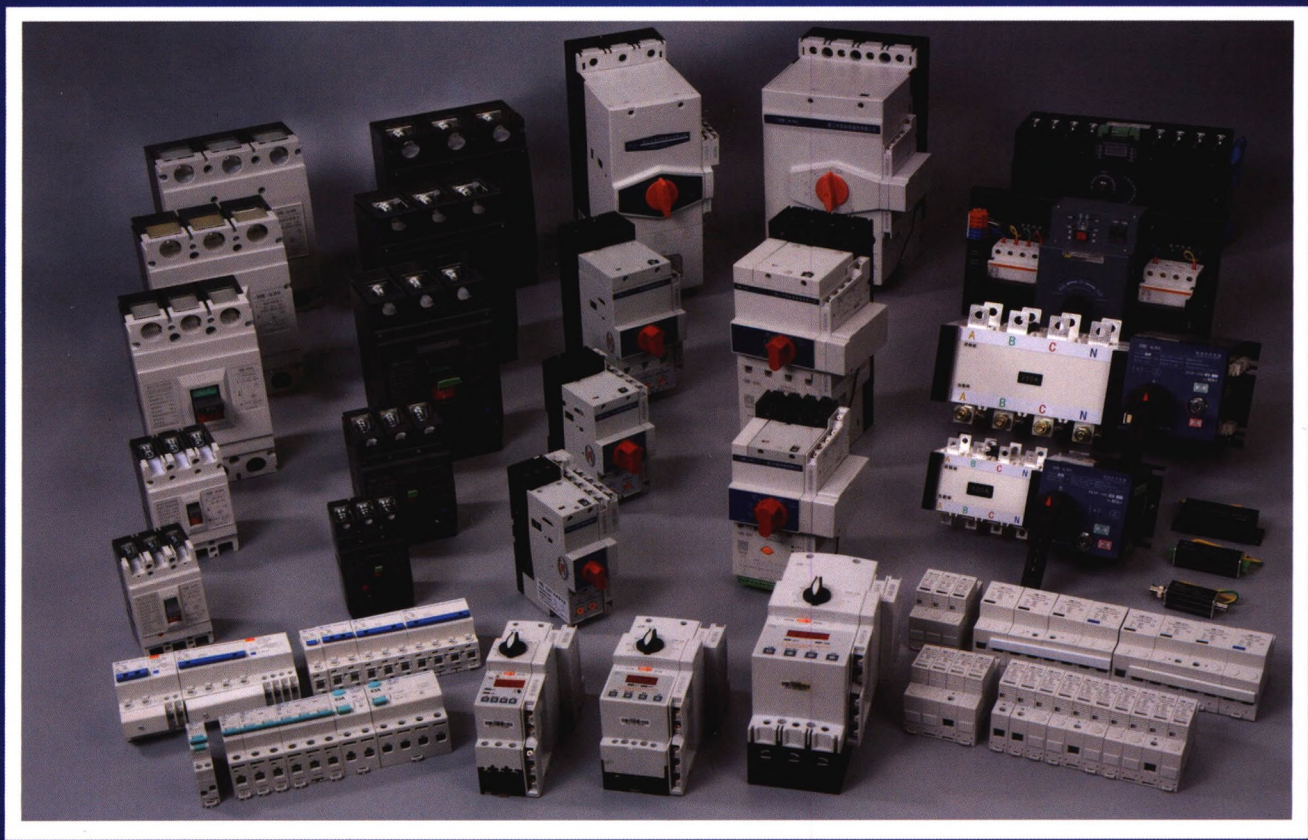
- 1) 交直流混联电网动态建模及仿真技术;
- 2) 高比例可再生发电规模化控制与保护技术;
- 3) 高压直流输电系统连续换相失败机理及抑制技术;
- 4) 交直流混联电网动态等值及故障分析技术;
- 5) 交直流混联电网中传统继电保护技术适应性分析;
- 6) 行波保护新技术;
- 7) 面向系统安全的交直流混联电网保护控制技术。



中凯股份 ( 证券代码 : 832430 )

中凯KB0是CPS多功能电器的

**创造者和开拓者**



中凯微信公众平台



中凯官网二维码

浙江中凯科技股份有限公司  
Zhejiang Zhongkai Science Technology Stock Co., Ltd.

销售热线 : 0577-62771926    销售传真 : 0577-6277423  
地址 : 浙江省乐清市柳市镇东风工业区奋进路9号  
网址: [www.KB0.cn](http://www.KB0.cn)    电子邮箱: [zhongkai@KB0.cn](mailto:zhongkai@KB0.cn)  
全国24小时免费客户服务热线 : **400-826-8770**

ISSN 1006 - 6047  
CN 32-1818/TM  
万方数据

邮发代号 国内 28-268  
国外 MO-4802

国内定价 35.00 元/期  
420.00 元/年