

电网技术

POWER SYSTEM TECHNOLOGY

9

2020

第44卷9期

Vol.44 No.9



国家电网
STATE GRID

山东电工电气集团有限公司

SHANDONG ELECTRICAL ENGINEERING & EQUIPMENT GROUP CO., LTD.

以高品质电力装备、以整体解决方案 支撑电力建设

国内大型的电力装备及整体解决方案供应商之一，拥有世界上单厂产能超大规模的变压器生产基地和国内一流的高压开关、铁塔、线缆生产线，主营产品包括全系列变压器和电抗器、铁塔、线缆、组合电器（GIS/GIL）、配网设备、智能装备等板块，可提供综合能源、运维检修、电力工程设计及总承包等业务。



变压器



组合电器



铁塔



线缆

- 输变电业务
- 配电自动化业务
- 综合能源业务
- 运维检修业务

综合能源业务



配电自动化



地址：山东省济南市市中区英雄山路101号

电话：400-604-8288

邮箱：marketing@sdee.sgcc.com.cn

网址：http://www.sdee.sgcc.com.cn



ISSN 1000-3673



9 771000 367202
万方数据



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 汪飏生
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 薛禹胜

目 次

· 多能源电力系统互补协调调度与控制 ·

- 含风-光-水的多能源系统的同质化耦合模型
.....叶林, 屈晓旭, 马明顺, 么艳香, 王伟胜, 庄红山, 董凌 (3201)
- 考虑风光出力波动性的实时互补性评价方法
.....刘永前, 王函, 韩爽, 阎洁, 鲁宗相 (3211)
- 计及源荷匹配的风光互补特性分析与评价
.....万家豪, 苏浩, 冯冬涵, 赵诣, 范越, 于冰 (3219)
- 大规模风光并网条件下水电灵活性量化及提升方法
.....张俊涛, 甘霖, 程春田, 李刚, 李秀峰, 赵珍玉, 张楠男 (3227)
- 考虑灵活性供需平衡的源-储-网一体化规划方法
.....杨修宇, 穆钢, 柴国峰, 严干贵, 安军 (3238)
- 含风电-光伏-光热-水电-火电-储能的多能源电力系统时序随机生产模拟
.....朱睿, 胡博, 谢开贵, 朱清, 赵东宁, 牛涛, 李春燕, 孙悦 (3246)
- 基于每时晴空指数的大规模光伏电站出力多维时间序列模拟
.....李国庆, 李欣彤, 边竟, 牛继涛, 丁煌, 陈卫东 (3254)
- 多能互补发电系统储电和储热容量分层优化规划方法
.....史昭梯, 王伟胜, 黄越辉, 李湃, 董凌, 范越 (3263)
- 考虑中长期电量不确定性的可再生能源系统嵌套运行优化
.....林戈莎, 孙荣富, 鲁宗相, 乔颖 (3272)
- 基于电源聚合-分解模型的新能源电力系统月度发电计划优化方法
.....李湃, 范越, 黄越辉, 孙谊嫔, 王伟胜, 刘纯 (3281)
- 马尔科夫修正的组合模型在新疆风电中长期可用电量预测中的应用
.....刘大贵, 王维庆, 张慧娥, 丘刚, 郝红岩, 李国庆, 肖桂莲 (3290)
- 基于双向电价补偿的含氢储能风电和梯级水电联合优化调度
.....李成善, 杨宇翔 (3297)
- 考虑光热电站和直联联络线灵活性的高比例新能源互联系统优化运行
.....沙韵, 周明, 杨宏基, 刘斯伟, 李庚银, 戚庆茹 (3306)
- 基于源荷匹配的异质能源互补发电调度
.....张歆萌, 陈仕军, 曾宏, 韩晓言, 马光文 (3314)
- 基于强化学习的增量配电网实时随机调度方法
.....李捷, 余涛, 潘振宁 (3321)
- 考虑新能源不确定性和点对点交易的配网产消者分布式优化调度
.....陈修鹏, 李庚银, 周明, 夏勇 (3331)
- 考虑火电机组储热改造的电力系统低碳经济调度
.....彭元, 姜素华, 范越, 吴耀武, 梁书豪 (3339)
- 考虑碳捕集系统的综合能源系统“源-荷”低碳经济调度
.....田丰, 贾燕冰, 任海泉, 白云, 黄涛 (3346)
- 两时点在线滚动实时控制优化决策方法
.....张昊天, 徐泰山, 马晓磊, 汪马翔, 杨洪志, 陈堂龙 (3355)
- 联合粒子滤波和卷积神经网络的电力系统状态估计方法
.....刘晓莉, 曾祥晖, 黄翊阳, 董凌, 张昊天, 等 (3361)
- 不平衡电网下自同步虚拟同步机拓展功率控制策略研究
.....王仰铭, 孙丹, 年珩, 王霄鹤 (3368)
- 基于风险控制的新能源纳入电力系统备用方法
.....张振宇, 王文倬, 马晓伟, 张小东, 褚云龙, 等 (3375)

· 电力市场 ·

- 计及电能质量的电力市场多主体博弈模型
.....向悦萍, 杨健维, 臧天磊, 廖凯, 何正友 (3383)
- 电力市场技术支持系统高并发访问技术研究
.....黄龙达, 庄卫金, 徐攀, 潘加佳, 叶飞 (3394)
- 面向虚拟电厂能量管理的点对点市场交易机制与模型
.....单俊嘉, 胡俊杰, 吴界辰 (3401)

基于 CNN-QRLightGBM 的短期负荷概率密度预测

.....许佳辉, 王向文, 杨俊杰 (3409)

基于 CNN-GRU 混合神经网络的负荷预测方法

.....姚程文, 杨苹, 刘泽健 (3416)

· 可再生能源发电与综合消纳技术 ·

考虑源荷不确定性的风电-光热-碳捕集虚拟电厂协调优化调度

.....仲悟之, 黄思宇, 崔杨, 许加凯, 赵钰婷 (3424)

计及热电耦合的太阳能联产系统功率协调控制

.....杨挺, 于亚利, 张亚健, 赵黎媛 (3433)

直驱风机直流母线电压控制对系统功率振荡的影响分析及改进方法

.....舒展, 熊华强, 蔡霞, 冯双, 陈波, 程思萌, 陶翔, 王克 (3441)

基于风机运行边界分析的电网频率控制方法

.....赵熙临, 林震宇, 付波 (3450)

多时间断面电-气综合能源系统状态估计

.....董雷, 王春斐, 李烨, 王新迎, 董骁, 孙英云, 蒲天骄 (3458)

面向端对端电能交易的直流微电网运行控制策略研究

.....王丹, 马喜然, 张子阳, 陈竟成, 于建成, 张晨鹏, 孟欣, 朱彦斌 (3466)

· 电力系统 ·

秒级响应电网在线分析软件平台

.....周二专, 冯东豪, 严剑峰, 周孝信 (3474)

G1-熵权-独立性权法在电网发展态势感知中的应用

.....艾欣, 赵旭州, 胡寰宇, 王智冬, 彭冬, 赵朗 (3481)

电力用户用电特征选择与行为画像

.....赵晋泉, 夏雪, 刘子文, 徐春雷, 苏大威, 闪鑫 (3488)

基于数据驱动的用电行为分析方法及应用综述

.....朱天怡, 艾芊, 贺兴, 李昭昱, 孙东磊, 李雪亮 (3497)

基于稀疏自动编码器神经网络的负荷曲线分类方法

.....林顺富, 顾乡, 汤继开, 李东东, 符杨 (3508)

一种用于含直流馈入的受端电网故障筛选与排序方法

.....邱威, 贺静波, 谭真, 徐式蕴, 刘娜, 颜云松, 邵德军, 邹鑫 (3516)

不对称电网电压下 MMC-HVDC 系统控制优化方法

.....陈继开, 李林, 张程, 李国庆, 辛业春 (3525)

一种基于专家调研和 G1 法的继电保护综合评价方法

.....刘一民, 章家欢, 杨心平, 牛四清, 郑少明, 薛安成 (3533)

电缆-架空线混合线路行波故障测距算法研究

.....邢志杰, 田行军, 刘宇晰, 李久, 高强, 刘红国 (3540)

具有电压自恢复特性的独立直流微电网控制策略研究

.....蒋伟明, 赵晋斌, 高明明, 毛玲, 屈克庆 (3547)

基于动态虚拟电流前馈的预同步 VSG 功率二阶解耦策略

.....戚军, 李袁超, 童辉, 周丹, 张有兵 (3556)

I-M²C 型单级式电力电子变压器

.....裴忠晨, 林霖, 应鸿, 蔡国伟, 刘闯, 宋晓民 (3565)

不同调速器死区特性对系统频率稳定的影响分析

.....高琴, 刘清晨, 陈亦平, 李崇涛, 张勇, 杜旭 (3575)

针对嵌入式终端安全威胁的电力工控系统自愈体系

.....王宇, 李俊娥, 周亮, 王海翔, 余文豪, 卢新岱 (3582)

· 工程应用 ·

含新能源接入的双极柔性直流电网运行特性研究与工程实践

.....刘泽洪, 郭贤珊 (3595)

高压大容量柔性直流换流阀可靠性提升关键技术研究与应用

.....刘泽洪, 郭贤珊 (3604)

· 广告索引 ·

..... (3614)

《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 44 卷 第 9 期 (总第 442 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: 闫 嶝 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: 京海市监广登字 20170131 号

期刊基本参数: CN 11-2410/TM * 1957 * M * A4 * 413 * zh * P * ¥ 80.00 * 20000 * 49 * 2020-09 版权所有 未经许可不得转载及上网

POWER SYSTEM TECHNOLOGY

2020, Vol. 44 No. 9 (Ser. 442)

Contents

• Complementary Coordinated Dispatching and Control of Multi-energy Power System •

Multi-energy System Homogeneous Coupling Model Considering Wind-photovoltaic-hydro Power Generations	YE Lin, QU Xiaoxu, MA Mingshun, YAO Yanxiang, WANG Weisheng, ZHUANG Hongshan, DONG Ling (3201)
Real-time Complementarity Evaluation Method for Real-time Complementarity of Wind and Solar Power Considering Their Volatility	LIU Yongqian, WANG Han, HAN Shuang, YAN Jie, LU Zongxiang (3211)
Analysis and Evaluation of the Complementarity Characteristics of Wind and Photovoltaic Considering Source-load Matching	WAN Jiahao, SU Hao, FENG Donghan, ZHAO Yi, FAN Yue, YU Bing (3219)
Quantification and Promotion of Hydropower Flexibility With Large-scale Wind and Solar Power Incorporated Into Grid	ZHANG Juntao, GAN Lin, CHENG Chuntian, LI Gang, LI Xiufeng, ZHAO Zhenyu, ZHANG Nannan (3227)
Source-storage-grid Integrated Planning Considering Flexible Supply-demand Balance	YANG Xiuyu, MU Gang, CHAI Guofeng, YAN Gangui, AN Jun (3238)
Sequential Probabilistic Production Simulation of Multi-energy Power System With Wind Power, Photovoltaics, Concentrated Solar Power, Cascading Hydro Power, Thermal Power and Battery Energy Storage	ZHU Rui, HU Bo, XIE Kaigui, ZHU Qing, ZHAO Dongning, NIU Tao, LI Chunyan, SUN Yue (3246)
Multi-dimensional Time Series Simulation of Large-scale Photovoltaic Power Plant Output Based on Hourly Clear Sky Index	LI Guoqing, LI Xintong, BIAN Jing, NIU Jitao, DING Huang, CHEN Weidong (3254)
Hierarchical Optimization Planning for Electrical Energy and Heat Storage Capacity in Multi-energy Complementary Generation System	SHI Zhaodi, WANG Weisheng, HUANG Yuehui, LI Pai, DONG Ling, FAN Yue (3263)
Medium- and Long-term Nested Scheduling for Renewable Energy System Considering Electricity Uncertainty	LIN Yisha, SUN Rongfu, LU Zongxiang, QIAO Ying (3272)
Monthly Generation Scheduling Method of Renewable Energy Power System Based on Power Plant Aggregation & Decomposition Models	LI Pai, FAN Yue, HUANG Yuehui, SUN Yiqian, WANG Weisheng, LIU Chun (3281)
Application of Markov Modified Combination Model Mid-long Term Available Quantity of Electricity Forecasting in Xinjiang Wind Power	LIU Dagui, WANG Weiqing, ZHANG Huie, QIU Gang, HAO Hongyan, LI Guoqing, XIAO Guilian (3290)
Optimization Dispatching for Joint Operation of Hydrogen Storage-wind Power and Cascade Hydropower Station Based on Bidirectional Electricity Price Compensation	LI Xianshan, YANG Yuxiang (3297)
Interconnected Power System Optimal Operation With Renewable Generation Considering Flexibility of Concentrating Solar Power Plants & HVDC Tie-line	SHA Yun, ZHOU Ming, YANG Hongji, LIU Siwei, LI Gengyin, QI Qingru (3306)
Heterogeneous Energy Complementary Power Generation Dispatching Based on Output-load Matching	ZHANG Xinchuo, CHEN Shijun, ZENG Hong, HAN Xiaoyan, MA Guangwen (3314)
Real-time Stochastic Dispatch Method for Incremental Distribution Network Based on Reinforcement Learning	LI Jie, YU Tao, PAN Zhenning (3321)
Distributed Optimal Scheduling for Prosumers in Distribution Network Considering Uncertainty of Renewable Sources and P2P Trading	CHEN Xiupeng, LI Gengyin, ZHOU Ming, XIA Yong (3331)
Low-carbon Economical Dispatch of Power System Considering Thermal Energy Storage in Thermal Power Units	PENG Yuan, LOU Suhua, FAN Yue, WU Yaowu, LIANG Shuhao (3339)
"Source-load" Low-carbon Economic Dispatch of Integrated Energy System Considering Carbon Capture System	TIAN Feng, JIA Yanbing, REN Haiquan, BAI Yun, HUANG Tao (3346)
Novel Online Real-time Scheduling Decision-making Approach With Adjacent Time-point Rolling	ZHANG Haotian, XU Taishan, MA Xiaolei, WANG Maxiang, YANG Hongzhi, CHEN Tanglong (3355)
State Estimation Based on Particle Filtering and Convolutional Neural Networks for Power Systems	LIU Xiaoli, ZENG Xianghui, HUANG Yiyang, DONG Ling, ZHANG Haotian, et al (3361)
Extended Power Control Strategy of Self-synchronized Virtual Synchronous Generator Under Unbalanced Power Grid	WANG Yangming, SUN Dan, NIAN Heng, WANG Xiaohe (3368)
Reserve of Power System Considering Renewable Energy Based on Risk Control	ZHANG Zhenyu, WANG Wenzhuo, MA Xiaowei, ZHANG Xiaodong, CHU Yunlong, et al (3375)
• Electricity Market •	
Multi-agent Game Model in Electricity Market Considering Power Quality	XIANG Yueping, YANG Jianwei, ZANG Tianlei, LIAO Kai, HE Zhengyou (3383)
High Concurrent Access Technology in Electricity Market Technical Support System	HUANG Longda, ZHUANG Weijin, XU Pan, PAN Jiajia, YE Fei (3394)
Peer-to-peer Market Trading Mechanism and Model for Virtual Power Plant Energy Management	Shan Junjia, Hu Junjie, Wu Jiechen (3401)
Short-term Load Density Prediction Based on CNN-QRLightGBM	XU Jiahui, WANG Xiangwen, YANG Junjie (3409)
Load Forecasting Method Based on CNN-GRU Hybrid Neural Network	YAO Chengwen, YANG Ping, LIU Zejian (3416)

• Renewable Energy Generation and Integration •

W-S-C Capture Coordination in Virtual Power Plant Considering Source-load Uncertainty

..... ZHONG Wuzhi, HUANG Siyu, CUI Yang, XU Jiakai, ZHAO Yuting (3424)

Coordination Control for Integrated Solar Combined Cycle With Thermoelectric Coupling

..... YANG Ting, YU Yali, ZHANG Yajian, ZHAO Liyuan (3433)

Influence of DC Bus Voltage Control of Direct-drive PMSG on Power Oscillation and Its Improvement

..... SHU Zhan, XIONG Huaqiang, CAI Xia, FENG Shuang, CHEN Bo, CHENG Simeng, TAO Xiang, WANG Ke (3441)

Frequency Control Method in Grid Based on Boundary Analysis of Wind Turbine Operation

..... ZHAO Xilin, LIN Zhenyu, FU Bo (3450)

Multi-snapshot State Estimation of Electric-gas Integrated Energy System

..... DONG Lei, WANG Chunfei, LI Ye, WANG Xinying, DONG Xiaochong, SUN Yingyun, PU Tianjiao (3458)

Research on Operation Control Strategy of DC Microgrid for Peer to Peer Electricity Trading

..... WANG Dan, MA Xiran, ZHANG Ziyang, CHEN Jingcheng, YU Jiancheng, ZHANG Niepeng, MENG Xin, ZHU Yanbin (3466)

• Power System •

A Software Platform for Second-order Responsiveness Power Grid Online Analysis

..... ZHOU Mike, FENG Donghao, YAN Jianfeng, ZHOU Xiaoxin (3474)

G1-entropy-independence Weight Method in Situational Awareness of Power Grid Development

..... AI Xin, ZHAO Xuzhou, HU Huanyu, WANG Zhidong, PENG Dong, ZHAO Lang (3481)

User Electricity Consumption Feature Selection and Behavioral Portrait

..... ZHAO Jinqian, XIA Xue, LIU Ziwen, XU Chunlei, SU Dawei, SHAN Xin (3488)

An Overview of Data-driven Electricity Consumption Behavior Analysis Method and Application

..... ZHU Tianyi, AI Qian, HE Xing, LI Zhaoyu, SUN Donglei, LI Xueliang (3497)

Power Load Profile Classification Method Based on Neural Network of Sparse Automatic Encoder

..... LIN Shunfu, GU Xiang, TANG Jikai, LI Dongdong, FU Yang (3508)

Contingency Screening and Ranking for Receiving-end Power Grid With Infeed HVDC

..... QIU Wei, HE Jingbo, TAN Zhen, XU Shiyun, LIU Na, YAN Yunsong, SHAO Dejun, ZOU Xin (3516)

Optimization Control Method of MMC-HVDC System Under Asymmetrical Network Voltage

..... CHEN Jikai, LI Lin, ZHANG Cheng, LI Guoqing, XIN Yechun (3525)

Comprehensive Evaluation of Relay Protection Based on Expert Investigation and G1 Method

..... LIU Yimin, ZHANG Jiahuan, YANG Xinping, NIU Siqing, ZHENG Shaoming, XUE Ancheng (3533)

Research of Traveling Wave Fault Location Algorithm for the Overhead Line-cable Hybrid Line

..... XING Zhijie, TIAN Xingjun, LIU Yuxi, LI Jiu, GAO Qiang, LIU Hongguo (3540)

Control Strategy With Voltage Self-recovery Characteristic for Autonomous DC Microgrid

..... JIANG Weiming, ZHAO Jinbin, GAO Mingming, MAO Ling, QU Keqing (3547)

Second-order Power Decoupling Control in Pre-synchronized VSG Based on Dynamic Virtual Current Feedforward Control

..... QI Jun, LI Yuanchao, TONG Hui, ZHOU Dan, ZHANG Youbing (3556)

Single-stage Power Electronic Transformer Based on Isolated Modular Multilevel Converter (I-M²C)

..... PEI Zhongchen, LIN Lin, YING Hong, CAI Guowei, LIU Chuang, SONG Xiaomin (3565)

Influence of Different Deadbands on the Frequency Stability

..... GAO Qin, LIU Qingchen, CHEN Yiping, LI Chongtao, ZHANG Yong, DU Xu (3575)

A Self-healing Architecture for Power Industrial Control Systems Against Security Threats to Embedded Terminals

..... WANG Yu, LI June, ZHOU Liang, WANG Haixiang, YU Wenhao, LU Xindai (3582)

• Engineering Applications •

Operating Characteristics Research and Engineering Application of Voltage Source Converter Based DC Grid With Renewable Source Connected

..... LIU Zehong, GUO Xianshan (3595)

High-voltage Large-capacity VSC Valve Reliability Enhancement

..... LIU Zehong, GUO Xianshan (3604)

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