

国家电网有限公司主管

国网能源研究院有限公司
中国电机工程学会 主办
全球能源互联网研究院有限公司

中文核心期刊 中国科技核心期刊
中国科学引文数据库(CSCD)核心期刊
Scopus收录期刊

ISSN 1004-9649
CN 11-3265/TM

中国电力

ELECTRIC POWER



祥龙献瑞 新春纳福

推荐阅读:

- 专栏: 虚拟电厂构建与运营
特约主编: 清华大学陈启鑫教授、上海交通大学艾芊教授、中国电力科学研究院陈宋宋高工、清华大学高洪超博士
- 专栏: 新型电力系统低碳规划与运行
特约主编: 重庆大学任洲洋副教授、清华大学钟海旺副教授、燕山大学马锴教授、西安交通大学曹晓宇副教授、澳门大学李辉博士
- 专栏: 面向碳达峰碳中和目标的清洁高效发电技术
特约主编: 长沙理工大学赵斌教授、暨南大学王卫良教授、山东大学何锁盈副教授

1

2024

ISSN 1004-9649



9 771004 964247



《中国电力》编辑委员会

名誉主任委员 舒印彪

主任委员 欧阳昌裕

副主任委员(按姓氏笔画排序)

王成山 叶 泽 朱法华 汤广福
吴云喜 陈维江 康重庆

顾问委员(按姓氏笔画排序)

王志轩 王锡凡 史玉波 刘吉臻
杜祥琬 余贻鑫 张运洲 岳光溪
周孝信 郭剑波 黄其励 程时杰
薛禹胜

委 员(按姓氏笔画排序)

丁 磊 王伟胜 王守相 王继业
王蓓蓓 王耀华 文福拴 艾 芊
帅 永 叶 林 冯冬涵 朱金大
汤 奕 孙献斌 严干贵 李 鹏
李东东 李明节 李庚银 李美成
吴红斌 吴俊勇 别朝红 邱忠涛
何金良 余 军 沈 沉 张乃强
张明锐 陈 新 林济铿 和敬涵
周原冰 周勤勇 庞 辉 单葆国
房 方 赵 斌 荆朝霞 姚良忠
骆仲泱 袁小明 袁铁江 徐 政
徐 箭 郭庆来 郭经红 曹一家
彭勇刚 彭道刚 程浩忠 焦在滨
鲁宗相 颜 伟 潘学萍 薛安成

青年委员(按姓氏笔画排序)

于 安 于 浩 万 灿 王 灿
王 彬 王 琦 王卫良 王宇飞
王晓卫 牛 耕 文云峰 孔令国
叶宇剑 付学谦 付德义 白 章
宁 剑 朱忠亮 任洲洋 华昊辰
刘含笑 许 寅 许德智 杜 炜
李云丰 李国倡 李知艺 杨知方
杨德昌 肖 浩 何锁盈 张 宁
张沈习 张洪财 陈 健 陈向荣
陈奇芳 邵成成 尚 策 金 丽
周 强 周建力 宗炫君 郝润龙
胡俊杰 钟海旺 姚 伟 郭春义
唐志远 黄碧斌 阎 洁 梁营玉
景 锐 雷顺波 廖小兵

国际顾问(以姓名英文字母为序)

Kevin DU (Canada) Laili LAI (UK)
Wei-jen LEE (USA) Hao LIU (Canada)
Kwok Lun LO (UK) Xiaofeng ZHANG (USA)
Henry ZHAO (USA) Suyan ZHOU (France)

主 编 汤广福 王耀华

副 主 编 康重庆 朱法华 方 彤

本期执行主编 李 博 方 彤

责任编辑 张重实 蒋东方 于静茹 王文诗
许晓艳 杨 彪

发行广告 王文诗

中国电力

ZHONGGUO DIANLI

第 57 卷第 1 期 2024 年 1 月

目 次

虚拟电厂构建与运营

- 特约主编寄语..... 陈启鑫, 艾芊, 陈宋宋, 高洪超 (1)
- 虚拟电厂规模化灵活资源聚合调控框架研究与思考
..... 宋天琦, 吕志鹏, 宋振浩, 马韵婷, 张智慧, 周珊, 李昊 (2)
- 面向虚拟电厂运营的温度敏感负荷分析与演变趋势研判
..... 周颖, 白雪峰, 王阳, 邱敏, 孙冲, 武亚杰, 李彬 (9)
- 基于负荷台阶的工业需求响应用户优选方法
..... 苏湘波, 吕睿可, 郭鸿业, 陈启鑫 (18)
- 基于外特性等值的虚拟电厂灵活性资源价值评估
..... 朱睿, 欧乙丁, 李筱天, 雷星雨, 周宇晴, 张珀扬, 欧睿 (30)
- 基于信息差距决策理论的虚拟电厂报价策略
..... 谢蒙飞, 马高权, 刘斌, 潘振宁, 商云峰 (40)
- 基于风电分时电价的虚拟电厂参与清洁供暖运营优化方法
..... 冯云辰, 加鹤萍, 闫敏, 李根柱, 刘乐, 刘敦楠 (51)
- 虚拟电厂参与能量与辅助服务市场的协同优化策略
..... 周挺, 谭玉东, 孙晋, 文明, 廖菁, 李杨, 刘玗, 刘敦楠 (61)
- 适用于多虚拟电厂交易的改进拜占庭容错算法共识机制
..... 张书涵, 艾芊, 李晓露, 王帝 (71)
- 基于目标级联法的虚拟电厂日前调频容量计算方法
..... 张颖, 文艳, 季宇, 左娟, 王文博 (82)
- 基于改进深度 Q 网络的虚拟电厂实时优化调度
..... 张超, 赵冬梅, 季宇, 张颖 (91)
- 考虑电-气-热耦合和需求响应的虚拟电厂优化调度策略
..... 王世杰, 冯天波, 孙宁, 何可, 李嘉文, 杨程, 崔昊杨 (101)

新型电力系统低碳规划与运行

- 考虑多能互补的电力电量平衡优化调度策略
..... 孙志媛, 彭博雅, 孙艳 (115)
- 考虑高比例多元调节资源互动的配电网无功优化降损方法
..... 马喜平, 李亚昕, 梁琛, 董晓阳, 徐瑞 (123)

“国家期刊奖”获奖期刊
中文核心期刊
中国期刊方阵期刊
中国科学引文数据库(CSCD)核心期刊
中国科技核心期刊
《能源电力领域高质量科技期刊分级目录》收录期刊
《电气工程领域高质量科技期刊分级目录》收录期刊
RCCSE中国核心学术期刊(A)
Scopus收录期刊
DOAJ收录期刊
英国《科学文摘》(SA, INSPEC)收录期刊
俄罗斯《文摘杂志》(AJ of VINITI)收录期刊
美国《剑桥科学文摘》(CSA)收录期刊
乌利希国际期刊指南收录
中国科技论文统计源期刊
中文科技期刊数据库收录期刊
中国电力报刊协会优秀期刊

基于 STIRPAT 模型的大连市全流程碳足迹溯源
..... 张娜, 赵琳, 商文颖, 吉星, 李佳, 黄玉辉 (133)

基于改进交替方向乘子法的配电网柔性负荷分层集群调控方法
..... 张俊成, 黎敏, 刘志文, 谭靖, 陶毅刚, 罗天禄 (140)

构建新型电力系统背景下的微电网鲁棒简化建模
..... 王大兴, 宁妍, 汪敬培, 徐洋, 毕峻, 周铭标, 王鹏 (148)

基于动态孤岛的主动配电网多阶段故障恢复策略
..... 龚逊东, 郭维嘉, 杨晨, 周力, 董晓峰, 朱俊澎 (158)

基于加权最小绝对值状态估计的有源配电网拓扑辨识方法
..... 马光, 朱文, 顾慧杰, 赵化时, 何锡祺, 陈世杰 (167)

面向碳达峰碳中和目标的清洁高效发电技术

基于 CCER 规则的抽水蓄能碳减排计算方法
..... 徐三敏, 张弓, 王放, 蒲雷 (175)

计及电转气-风-火-核-碳捕集的多源联合系统优化调度
..... 晁文浩, 袁至, 李骥 (183)

基于掺氢燃气轮机的综合能源系统热经济学性能研究
..... 黄呈帅, 梁健, 李波, 杨亚欣, 胡杨, 姚尔人 (195)

基于压缩空气储能与增强型地热的三联产系统热力学分析
..... 梁健, 王蒙, 杨亚欣, 胡杨, 姚尔人 (209)

粉量分布不均对 1000 MW 机组对冲锅炉的影响及调整
..... 葛铭, 姜志成, 吕智嘉, 王佳杨, 仇召宏, 张守玉 (219)

电网

能源互联网中的数字孪生技术体系、应用与挑战
..... 刘翌, 孙庆凯, 许泽凯, 吴潇雨, 王小君, 吕金玲 (230)

花瓣型配电网区域备自投系统控制策略优化研究及应用
..... 冯宝成, 金震, 侯炜, 徐光福 (244)

基于哈希和编辑距离算法的 SCD 双层向量量化与变更校验技术
..... 叶远波, 王吉文, 汪伟, 毛玉荣, 王志华 (255)

中国电力

(月刊, 1956 年创刊)

第 57 卷第 1 期(总第 662 期)
2024 年 1 月 28 日出版

主管单位: 国家电网有限公司
主办单位: 国网能源研究院有限公司
中国电机工程学会
全球能源互联网研究院有限公司

编辑出版:《中国电力》编辑部

地 址: 北京市昌平区北七家镇未来科学城滨河大道 18 号“国家电网公司”园区 B315

邮政编码: 102209

电 话: 010-66603808 (编辑部)
010-66603806 (广告、发行)

传 真: 010-66603578

网上投稿: www.electricpower.com.cn

印 刷: 北京科信印刷有限公司

总 发 行: 北京市报刊发行局

订 购: 全国各邮局

国内邮发代号: 2-427

国内定价: $\frac{50.00 \text{ 元/期}}{600.00 \text{ 元/年}}$

国外发行代号: M-276

国外总发行: 中国国际图书贸易总公司
(北京 399 信箱)

中国标准连续出版物号: $\frac{\text{ISSN } 1004-9649}{\text{CN } 11-3265/\text{TM}}$

广告登记号: 京昌市监广登字 20190011

声明

本刊已与相关数据库合作, 许可在其数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文, 该数据库著作权使用费与本刊稿酬一并支付。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意本刊上述声明。

ELECTRIC POWER

Vol. 57 No. 1 January 2024

MAIN CONTENTS

Construction and Operation of Virtual Power Plants

- Research and Thinking on the Aggregation and Dispatching Control Framework of Virtual Power Plant's Large Scale Flexible Resources SONG Tianqi, LV Zhipeng, SONG Zhenhao, MA Yunting, ZHANG Zhihui, ZHOU Shan, LI Hao (8)
- Analysis and Evolution Trend of Temperature-Sensitive Loads for Virtual Power Plant Operation ZHOU Ying, BAI Xuefeng, WANG Yang, QIU Min, SUN Chong, WU Yajie, LI Bin (17)
- A Method for Optimal Selection of High-Capacity Industrial Users for Demand Response Based on Load Step Data Processing Mode SU Xiangbo, LYU Ruike, GUO Hongye, CHEN Qixin (29)
- Evaluation of Virtual Power Plant Flexibility Resources Based on External Characteristic Equivalence ZHU Rui, OU Yiding, LI Xiaotian, LEI Xingyu, ZHOU Yuqing, ZHANG Poyang, OU Rui (39)
- Virtual Power Plant Quotation Strategy Based on Information Gap Decision Theory XIE Mengfei, MA Gaoquan, LIU Bin, PAN Zhenning, SHANG Yunfeng (50)
- Operation Optimization Method for Virtual Power Plant Participating in Clean Heating Based on Time-of-Use Tariff of Wind Power FENG Yunchen, JIA Heping, YAN Min, LI Genzhu, LIU Le, LIU Dunnan (60)
- Collaborative Optimization Strategy for Virtual Power Plant Participating in Energy and Ancillary Service Market ZHOU Ting, TAN Yudong, SUN Jin, WEN Ming, LIAO Jing, LI Yang, LIU Gong, LIU Dunnan (70)
- Improved PBFT Consensus Mechanism for Multi-virtual Power Plant Transactions ZHANG Shuhan, AI Qian, LI Xiaolu, WANG Di (157)
- Calculation of Day-Ahead Frequency Regulation Capacity for Virtual Power Plants Based on Analytical Target Cascading Method ZHANG Ying, WEN Yan, JI Yu, ZUO Juan, WANG Wenbo (90)
- Real Time Optimal Dispatch of Virtual Power Plant Based on Improved Deep Q Network ZHANG Chao, ZHAO Dongmei, JI Yu, ZHANG Ying (100)
- Optimal Scheduling Strategy for Virtual Power Plant Considering Electricity-Gas-Heat Coupling and Demand Response WANG Shijie, FENG Tianbo, SUN Ning, HE Ke, LI Jiawen, YANG Cheng, CUI Haoyang (114)

Low-Carbon Planning and Operation for New-Type Power Systems

- Optimal Dispatch Strategy of Power and Electricity Balance Based on Multi-Energy Complementation SUN Zhiyuan, PENG Boya, SUN Yan (122)
- Reactive Power Optimization for Loss Reduction of Distribution Network Considering Interactions of High Penetration Level of Multiple Regulating Energy Resources MA Xiping, LI Yaxin, LIANG Chen, DONG Xiaoyang, XU Rui (132)
- Whole Process Carbon Footprint Traceability of Dalian City Based on STIRPAT Model ZHANG Na, ZHAO Lin, SHANG Wenyang, JI Xing, LI Jia, HUANG Yuhui (139)
- Hierarchical Cluster Control Method for Flexible Load in Distribution Network Based on Improved Alternating Direction Multiplier Method ZHANG Juncheng, LI Min, LIU Zhiwen, TAN Jing, TAO Yigang, LUO Tianlu (147)
- Robust Simplified Modeling of Microgrid in the Context of Constructing New Power Systems WANG Daxing, Ning Yan, WANG Jingpei, XU Yang, BI Jun, ZHOU Mingbiao, WANG Peng (157)
- Multi-stage Fault Recovery Strategy for Active Distribution Networks Based on Dynamic Islanding GONG Xundong, GUO Weijia, YANG Chen, ZHOU Li, DONG Xiaofeng, ZHU Junpeng (166)
- Topology Identification Method for Active Distribution Network Based on Weighted Minimum Absolute Value State Estimation MA Guang, ZHU Wen, GU Huijie, ZHAO Huashi, HE Xiqi, CHEN Shijie (174)

Clean and Efficient Power Generation Technology for Carbon Peak and Carbon Neutrality

- Carbon Emission Reduction Calculation Method for Pumped Storage Based on CCER Rules XU Sanmin, ZHANG Gong, WANG Fang, PU Lei (182)
- Optimal Dispatch of Power System with P2G-Wind-Thermal-Nuclear-Carbon Capture Units CHAO Wenhao, YUAN Zhi, LI Ji (194)
- Study on the Thermo-economic Performance of a Integrated Energy System Based on Hydrogen-fueled Gas Turbine HUANG Chengshuai, LIANG Jian, LI Bo, YANG Yaxin, HU Yang, YAO Erren (208)
- Thermodynamic Analysis of CCHP with Compressed Air Energy Storage and Enhanced Geothermal Technology LIANG Jian, WANG Meng, YANG Yaxin, HU Yang, YAO Erren (218)
- The Influence of Unevenly Distributed Powder on a 1000 MW Opposed Firing Boiler and the Counter Measures GE Ming, JIANG Zhicheng, LV Zhijia, WANG Jiayang, QIU Zhaohong, ZHANG Shouyu (229)

Power System

- System, Applications and Challenges of Digital Twin Technology in Energy Internet LIU Zhao, SUN Qingkai, XU Zekai, WU Xiaoyu, WANG Xiaojun, LV Jinling (243)
- Research and Application of Control Strategy Optimization for Regional Standby Automatic Switching System of Petal-Type Distribution Network FENG Baocheng, JIN Zhen, HOU Wei, XU Guangfu (254)
- SCD Two-Layer Vectorization and Change Verification Technology Based on Hash and Edit Distance Algorithm YE Yuanbo, WANG Jiwen, WANG Wei, MAO Yurong, WANG Zhihua (262)

ELECTRIC POWER (Monthly) Vol.57 No.1 (Ser.662) January 2024

Competent Authorities: State Grid Corporation of China
Sponsors: State Grid Energy Research Institute Co., Ltd.
Chinese Society for Electrical Engineering
Global Energy Interconnection Research Institute Co., Ltd.
Editor and Publisher: Editorial Department of Journal
Editor-in-Chief: TANG Guangfu, WANG Yaohua
Publication Number: ISSN 1004-9649

General Distribution: Beijing Office of Postal Service
Distributed Abroad: China International Book Trading Corporation,
P.O. Box 399 Beijing, China
Add: Tower B, SGCC, Future Science Park, Beijing 102209, China
Web Site: <http://www.electricpower.com.cn>
Tel: +86-10-66603801
Fax: +86-10-66603578



国家电网
STATE GRID

国网能源研究院有限公司
STATE GRID ENERGY RESEARCH INSTITUTE CO., LTD.



主管：国家电网有限公司
主办：国网能源研究院有限公司
中国电机工程学会
全球能源互联网研究院有限公司

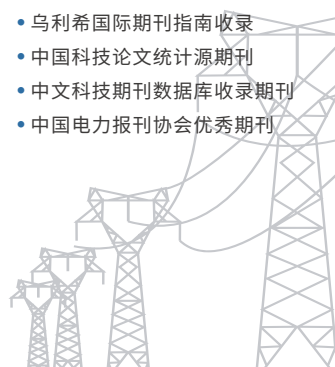
期刊概要

《中国电力》(月刊)创刊于1956年,由国家电网有限公司主管,国网能源研究院有限公司、中国电机工程学会、全球能源互联网研究院有限公司主办,国内统一连续出版物号 CN 11-3265/TM,国际标准连续出版物号 ISSN1004-9649。被北大中文核心期刊、中国科技核心期刊、中国科学引文数据库(CSCD)核心期刊等多种国内外著名文献数据库收录。《中国电力》面向能源电力行业,注重理论的超前研究和技术的创新应用,重点报道和展示发电、输电、配电、用电等领域理论研究和技术的先进成果,致力于搭建国内外广大专家学者的交流平台,分享和传播能源电力前沿研究成果,为政府电力主管部门、电网企业、发电企业、科研单位、高等院校等提供服务。

主 编 汤广福 王耀华
副 主 编 康重庆 朱法华 方 彤
常务副社长 方 彤

获奖及收录

- “国家期刊奖”获奖期刊
- 中文核心期刊
- 中国科技核心期刊
- 中国期刊方阵期刊
- 中国科学引文数据库(CSCD)核心期刊
- 《能源电力领域高质量科技期刊分级目录》收录期刊
- 《电气工程领域高质量科技期刊分级目录》收录期刊
- RCCSE 中国核心学术期刊(A)
- Scopus 收录期刊
- DOAJ 收录期刊
- 英国《科学文摘》(SA,INSPEC) 收录期刊
- 俄罗斯《文摘杂志》(AJ of VINITI) 收录期刊
- 美国《剑桥科学文摘》(CSA) 收录期刊
- 乌利希国际期刊指南收录
- 中国科技论文统计源期刊
- 中文科技期刊数据库收录期刊
- 中国电力报刊协会优秀期刊



广告 封底

中国标准连续出版物号: ISSN 1004-9649
CN 11-3265/TM

国内邮发代号: 2-427
国外发行代号: M-276

国内定价: 50.00元/期
600.00元/年

广告登记号: 京昌市监广登字20190011