

# 电网技术



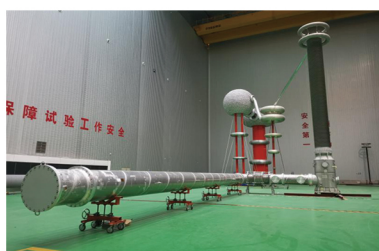
## POWER SYSTEM TECHNOLOGY

第45卷12期  
Vol.45 No.12

### 国家重点研发计划项目“环保型管道输电关键技术” 实现环保气体C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N国产化批量制备 在国际上率先研制无六氟化硫的特高压环保型输电管道样机

面向输变电设备低碳环保化的迫切需求，项目聚焦环保绝缘气体分子设计与制备、气固绝缘体系放电规律及相容性、环保GIL优化设计技术难题，构建了基于量子理论的环保气体分子设计新方法，通过对实验室合成路线的优化，突破了C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N气体的自主批量化制备工艺，彻底打破国外公司技术垄断，填补了国内空白。同时优选并合成了3种新环保绝缘气体，为电气设备用六氟化硫环保替代提供了拥有自主知识产权的潜在方案。

项目提出了满足现场运行的特高压GIL绝缘、通流、结构强度和密封技术参数，在国际上率先成功研制1000kV环保型输电管道样机通过全套型式试验和带电考核，研究成果向低电压等级环保型电力装备辐射应用，研制出广泛使用的10kV环保气体环网柜并已示范应用，温室效应降为SF<sub>6</sub>气体的3%，有效实现碳减排，大幅提升电力装备的环保社会效益。研究成果还将持续应用于后续SF<sub>6</sub>气体绝缘电气设备的环保化升级换代，引领高端智能电力装备技术发展，提升设备的环境友好性，助力实现双碳目标和构建新型电力系统。



特高压环保管道样机型式试验



特高压环保管道样机带电考核



10kV环保气体环网柜示范应用



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：何洁

邮编：100192

电话：18613839392

邮箱：hejie@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 汪懋生  
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

### · 支撑碳达峰、碳中和的能源电力关键技术 ·

高比例新能源接入场景电力系统频率分析模型改进与应用  
..... 龚浩岳, 周勤勇, 郭强, 秦晓辉, 赵珊珊, 苏苏宁, 贺海磊 (4603)

风机故障穿越特性对大规模风电直流外送系统暂态过电压的影响及参数优化  
..... 王熙纯, 刘纯, 林伟芳, 解鸿斌 (4612)

基于多场景模糊集和改进二阶锥方法的配电网优化调度  
..... 陈瑞捷, 鲁宗相, 乔颖 (4621)

计及差异化能量惯性的电-热-气综合能源系统日前优化调度  
..... 葛晓琳, 王云鹏, 朱肖和, 夏澍 (4630)

传统交流电网与高比例新能源电网连锁故障差异性分析  
..... 沈政委, 孙华东, 汤涌, 仲悟之, 王安斯, 赵兵, 徐式蕴 (4641)

余电上网/制氢方式下微电网系统全生命周期经济性评估  
..... 孙彩, 李奇, 邱宜彬, 艾钰璇, 李蕊睿, 黄兰佳, 陈维荣 (4650)

### · 高比例可再生能源并网 ·

基于正交优选粒子群多机参数优化的风电SSO抑制方法  
..... 刘其辉, 洪晨威, 田若菡, 逢思敏 (4660)

含虚拟惯量的双馈风电机组扭振阻尼特性分析与抑制方法研究  
..... 孙正龙, 李浩博, 刘钺, 杨德友, 蔡国伟 (4671)

风电场等效虚拟惯量快速估计方法  
..... 李世春, 徐松林, 李惠子, 舒征宇, 黄森焰, 田冰杰 (4683)

基于混沌CSO优化时序注意力GRU模型的超短期风电功率预测  
..... 孟安波, 陈顺, 王陈恩, 丁伟锋, 蔡涌烽, 符嘉晋, 周华敏 (4692)

基于OVMD-SSA-DELM-GM模型的超短期风电功率预测方法  
..... 曾亮, 雷舒敏, 王珊珊, 常雨芳 (4701)

大规模光伏发电经串补并网系统次同步振荡机制  
..... 陈武晖, 杨彦霖, 谢永胜, 常喜强, 林勇, 余浩, 张军 (4711)

基于强化学习和组合式深度学习模型的超短期光伏功率预测  
..... 孟安波, 许炫淙, 陈嘉铭, 王陈恩, 周天民, 殷豪 (4721)

### · 能源互联网 ·

基于多智能体深度强化学习的电热联合系统优化运行  
..... 董雷, 刘雨, 乔骥, 王新迎, 王春斐, 蒲天骄 (4729)

考虑分时电价差异性和基于主从博弈的智能楼宇集群能量共享方法  
..... 胡洁, 李培强, 林仕满, 丁俊 (4738)

计及故障率影响含电动汽车的分布式电源选址定容双层协调规划  
..... 马丽叶, 王海锋, 卢志刚 (4749)

一种平抑反弹效应的集群空调负荷控制方法  
..... 刘凤鸣, 杨秀媛, 陈麒宇 (4759)

基于数据驱动的交流配电网分布鲁棒优化调度  
..... 孙旭, 邱晓燕, 张志荣, 任昊, 张明珂 (4768)

基于5G的需求响应通信安全问题分析与应用挑战  
..... 李彬, 赵颖, 祁兵, 孙毅, 陈宋宋 (4778)

基于电力需求响应业务特性的 P 圈保护策略

..... 祁兵, 叶欣, 李彬, 刘林, 陈宋宋, 吴小东 (4789)

· 电力系统 ·

电网调控大数据平台体系架构及关键技术

..... 许洪强, 蔡宇, 万雄, 叶瑞丽, 狄方春, 李立新, 宋旭日 (4798)

基于信息差异图模型的电力调度自动化系统组件故障溯源方法

..... 高欣, 任昺, 张浩, 刘蒙, 李军良, 徐建航 (4808)

一种基于对数区间隔离森林的电力调度数据异常检测集成算法

..... 王锋, 高欣, 贾欣, 任昺, 查森 (4818)

相异模型下 Stacking 集成结构的异常用电用户识别方法

..... 程起鹏, 彭显刚, 曾勇斌, 许方圆 (4828)

高速铁路客货混跑电网耦合系统电气稳定性研究

..... 夏雯, 王浩宇, 孟祥宇, 邓云川, 智慧, 刘志刚 (4837)

基于零序电流与电压相位差变化的灵活接地系统故障选线方法

..... 李建蕊, 李永丽, 王伟康, 宋金钊, 张云柯 (4847)

基于博弈强化学习的电网故障序列搜索及防御策略研究

..... 邓祥力, 王伟, 刘世明 (4856)

双回非全线平行输电线路零序参数测量方法

..... 高明鑫, 胡志坚, 倪识远, 陈锦鹏, 林铭蓉 (4868)

配电网保护快速算法研究

..... 李新雷, 鄢杰, 张川, 鄢奎 (4877)

基于方向自适应检测器的输电线路设备检测方法

..... 刘海莹, 莫文昊, 谈元鹏, 刘佳鑫, 李勇 (4888)

谐振补偿式电流互感器取能方法的研究

..... 程志远, 隋立程, 宋凯, 吴龙飞, 吴晓婷 (4896)

· 直流输电与直流电网 ·

直流电流潮流控制器分步选址与多目标优化定容方法

..... 王谱宇, 甄浩, 杨伟, 张小平 (4903)

考虑元件功率电压特性的混合馈入直流输电系统静态电压稳定分析

..... 李东东, 高晓城, 孙梦显, 林顺富, 徐波 (4912)

直流微网母线电压稳定控制策略

..... 张继红, 赵锐, 高雷, 冀伟成, 杨培宏, 吴振奎 (4922)

基于行波主频率跃变的柔性直流电网自适应重合闸策略

..... 梁晨光, 张大海, 李猛, 张秋芳, 韩柳, 冯腾, 和敬涵 (4930)

· 高电压技术 ·

稳态电压加速应力下晶闸管特征参数退化规律及失效机理分析

..... 李杰, 庞磊, 陈炫宇, 张康, 王鑫冰, 张乔根 (4941)

持续低温环境对复合绝缘子硅橡胶材料介电特性的影响

..... 张志劲, 梁田, 李晨, 蒋兴良, 卢明, 高超, 张世尧 (4949)

基于改进奇异值与经验小波分解的局放去噪算法

..... 毕潇文, 钟俊, 张大堃, 周电波, 阮莹 (4957)

绞合型碳纤维复合芯导线的弧垂特性研究

..... 沈楚莹, 尹芳辉, 燕秀, 王黎明, 廖永力, 龚博, 黄增浩 (4964)

高温对配电网带电作业用绝缘毯沿面闪络特性的影响

..... 黎鹏, 刘畅, 李慧慧, 黄银, 吴田, 普子恒, 方春华 (4971)

第 45 卷 (2021) 总目次 ..... (1)

General Catalogue of Vol.45, (2021) ..... (13)

· 广告索引 · ..... (28)

《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 12 期 (总第 457 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

编辑部主任: 李兰欣 010-82812543

广告发行: 韩 迪 010-82812465

闫 颀 010-82812430

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

ISSN 1000-3673

中国标准连续出版物号: CN 11-2410/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 \* 376 \* zh \* P \* ¥80.00 \* 20000 \* 40 \* 2021-12 版权所有 未经许可不得转载及上网

# POWER SYSTEM TECHNOLOGY

2021, Vol. 45 No. 12 (Ser. 457)

## Contents

### • Key Technologies of Power and Energy Systems for Supporting Peak Carbon Dioxide Emissions and Carbon Neutrality •

- Improvement and Application of Frequency Analysis Modules for Power System in High Proportion of Renewable Energy Situation**  
..... GONG Haoyue, ZHOU Qinyong, GUO Qiang, QIN Xiaohui, ZHAO Shanshan, SU Lining, HE Hailei (4603)
- Influence of Wind Turbine Fault Ride-through Characteristics on Transient Overvoltage of Large-scale Wind Power DC Transmission Systems and Parameter Optimization** ..... WANG Xichun, LIU Chun, LIN Weifang, XIE Hongbin (4612)
- Optimal Dispatch Based on Multi-scene Ambiguity Set and Modified Second-order Cone Algorithm for Distribution Network**  
..... CHEN Ruijie, LU Zongxiang, QIAO Ying (4621)
- Day-ahead Optimal Scheduling for Integrated Power, Heat and Gas Energy System Considering Differentiation Energy Inertia**  
..... GE Xiaolin, WANG Yunpeng, ZHU Xiaohe, XIA Shu (4630)
- Analysis of Cascading Failure Differences Between Traditional AC Power Grid and High-proportion New Energy Power Grid**  
..... SHEN Zhengwei, SUN Huadong, TANG Yong, ZHONG Wuzhi, WANG Ansi, ZHAO Bing, XU Shiyun (4641)
- Economic Evaluation of Whole Life Cycle of the Micro-grid System Under the Mode of Residual Power Connection/Hydrogen Production**  
..... SUN Cai, LI Qi, QIU Yibin, AI Yuxuan, LI Ruirui, HUANG Lanjia, CHEN Weirong (4650)

### • High Share of Renewable Energy Integration •

- Parameter Optimization of Multi-DFIGs for SSO Mitigation Based on Orthogonal Design and Particle Swarm Optimization**  
..... LIU Qihui, HONG Chenwei, TIAN Ruohan, PANG Simin (4660)
- Torsional Oscillation Damping Characteristics and Suppression Methods of Doubly-fed Induction Generator With Virtual Inertia**  
..... SUN Zhenglong, LI Haobo, LIU Cheng, YANG Deyou, CAI Guowei (4671)
- Rapid Estimation of Equivalent Virtual Inertia of Wind Farm**  
..... LI Shichun, XU Songlin, LI Huizi, SHU Zhengyu, HUANG Senyan, TIAN Bingjie (4683)
- Ultra-short-term Wind Power Prediction Based on Chaotic CSO Optimized Temporal Attention GRU Model**  
..... MENG Anbo, CHEN Shun, WANG Chen'en, DING Weifeng, CAI Yongfeng, FU Jiajin, ZHOU Huamin (4692)
- Ultra-short-term Wind Power Prediction Based on OVMD-SSA-DELM-GM Model**  
..... ZENG Liang, LEI Shumin, WANG Shanshan, CHANG Yufang (4701)
- SSO Mechanism of Large-scale PV Generation Connected to Series-compensated Power System**  
..... CHEN Wuhui, YANG Yanji, XIE Yongsheng, CHANG Xiqiang, LIN Yong, YU Hao, ZHANG Jun (4711)
- Ultra Short Term Photovoltaic Power Prediction Based on Reinforcement Learning and Combined Deep Learning Model**  
..... MENG Anbo, XU Xuancong, CHEN Jiaming, WANG Chenen, ZHOU Tianmin, YIN Hao (4721)

### • Energy Internet •

- Optimal Dispatch of Combined Heat and Power System Based on Multi-agent Deep Reinforcement Learning**  
..... DONG Lei, LIU Yu, QIAO Ji, WANG Xinying, WANG Chunfei, PU Tianjiao (4729)
- Energy-sharing Method for Smart Building Clusters Considering Differences of Time-of-use Prices and Based on Master-slave Game**  
..... HU Jie, LI Peiqiang, LIN Shiman, DING Jun (4738)
- Double-layer Coordinated Planning for Location and Capacity of Distributed Power Supply With Electric Vehicles Considering Failure Rate**  
..... MA Liye, WANG Haifeng, LU Zhigang (4749)
- Control Method for Suppressing Rebound Effect of Air Conditioning Loads** ..... LIU Fengming, YANG Xiuyuan, CHEN Qiyu (4759)
- Distributed Robust Optimal Dispatching of AC/DC Distribution Network Based on Data Driven Mode**  
..... SUN Xu, QIU Xiaoyan, ZHANG Zhirong, REN Hao, ZHANG Mingke (4768)
- Security Issues and Application Challenge of 5G Based Demand Response** ..... LI Bin, ZHAO Ying, QI Bing, SUN Yi, CHEN Songsong (4778)
- P-Cycle Protection Strategy Based on Power Demand Response Service Characteristics**  
..... QI Bing, YE Xin, LI Bin, LIU Lin, CHEN Songsong, WU Xiaodong (4789)

### • Power System •

- Architecture and Key Technologies for Big Data Platform in Power Grid**  
..... XU Hongqiang, CAI Yu, WAN Xiong, YE Ruili, DI Fangchun, LI Lixin, SONG Xuri (4798)

---

<b>Component Fault Tracing of Power Dispatching Automation System Based on Information Difference Graph Model</b>	GAO Xin, REN Bing, ZHANG Hao, LIU Meng, LI Junliang, XU Jianhang (4808)
<b>An Anomaly Detection Ensemble Algorithm for Power Dispatching Data Based on Log-interval Isolation</b>	WANG Feng, GAO Xin, JIA Xin, REN Bing, ZHA Sen (4818)
<b>An Abnormal Power User Recognition Method for Stacking Integrated Structures With Different Models</b>	CHENG Chaopeng, PENG Xiangang, ZENG Yongbin, XU Fangyuan (4828)
<b>Vehicle-grid Coupling System Electrical Stability for High-speed Railways With Mixed Passenger and Freight Traffic</b>	XIA Wen, WANG Haoyu, MENG Xiangyu, DENG Yunchuan, ZHI Hui, LIU Zhigang (4837)
<b>Fault Line Detection Method for Flexible Grounding System Based on Changes of Phase Difference Between Zero Sequence Current and Voltage</b>	LI Jianrui, LI Yongli, WANG Weikang, SONG Jinzhao, ZHANG Yunke (4847)
<b>Research on Searching of Fault Sequence and Defense Strategy in Power Grid Based on Game Reinforcement Learning</b>	DENG Xiangli, WANG Wei, LIU Shiming (4856)
<b>Zero Sequence Parameter Measurement of Double-circuit Non-full Parallel Transmission Lines</b>	GAO Mingxin, HU Zhijian, NI Shiyuan, CHEN Jinpeng, LIN Mingrong (4868)
<b>Rapid Algorithm of Distribution Network Protection</b>	LI Xinlei, YAN Jie, ZHANG Chuan, YAN Kui (4877)
<b>Oriented Object Detector for Transmission Line Equipment Detection</b>	LIU Haiying, MO Wenhao, TAN Yuanpeng, LIU Jiabin, LI Yong (4888)
<b>Resonance Compensation Current Transformer Energy Extraction</b>	CHENG Zhiyuan, SUI Licheng, SONG Kai, WU Longfei, WU Xiaoting (4896)

• **HVDC Transmission & HVDC Grid** •

<b>Sequential Site Selection and Multi-objective Optimal Capacity of DC Current Flow Controller</b>	WANG Puyu, ZHEN Hao, YANG Wei, ZHANG Xiaoping (4903)
<b>Steady-state Voltage Stability Analysis of Hybrid Infeed HVDC System Considering Power and Voltage Characteristics of System Components</b>	LI Dongdong, GAO Xiaocheng, SUN Mengxian, LIN Shunfu, XU Bo (4912)
<b>DC Bus Voltage Stability Control Strategy for DC Microgrid</b>	ZHANG Jihong, ZHAO Rui, GAO Lei, JI Weicheng, YANG Peihong, WU Zhenkui (4922)
<b>Domain Frequency Jumping Characteristic-based Adaptive Reclosing Strategy for Flexible DC Power Grids</b>	LIANG Chenguang, ZHANG Dahai, LI Meng, ZHANG Qiufang, HAN Liu, FENG Teng, HE Jinghan (4930)

• **High Voltages** •

<b>Degradation Law and Failure Mechanism Analyses of Thyristor Characteristic Parameters Under Steady State Voltage</b>	LI Jie, PANG Lei, CHEN Xuanyu, ZHANG Kang, WANG Xinbing, ZHANG Qiaogen (4941)
<b>Influence of Continuous Low Temperature Environment on Dielectric Properties of Silicone Rubber of Composite Insulator</b>	ZHANG Zhijin, LIANG Tian, LI Chen, JIANG Xingliang, LU Ming, GAO Chao, ZHANG Shiyao (4949)
<b>Improved Singular Value and Empirical Wavelet Decomposition Algorithm in Partial Discharge Denoising</b>	BI Xiaowen, ZHONG Jun, ZHANG Dakun, ZHOU Dianbo, RUAN Ying (4957)
<b>Sag Characteristics of Stranded Carbon Fiber Composite Core Conductor</b>	SHEN Chuying, YIN Fanghui, YAN Xiu, WANG Liming, LIAO Yongli, GONG Bo, HUANG Zenghao (4964)
<b>Influence of High Temperature on Surface Flashover Characteristics of Insulating Blankets Used in Live Working of Distribution Lines</b>	LI Peng, LIU Chang, LI Huihui, HUANG Yin, WU Tian, PU Ziheng, FANG Chunhua (4971)

---

**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

**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