

# 电工技术

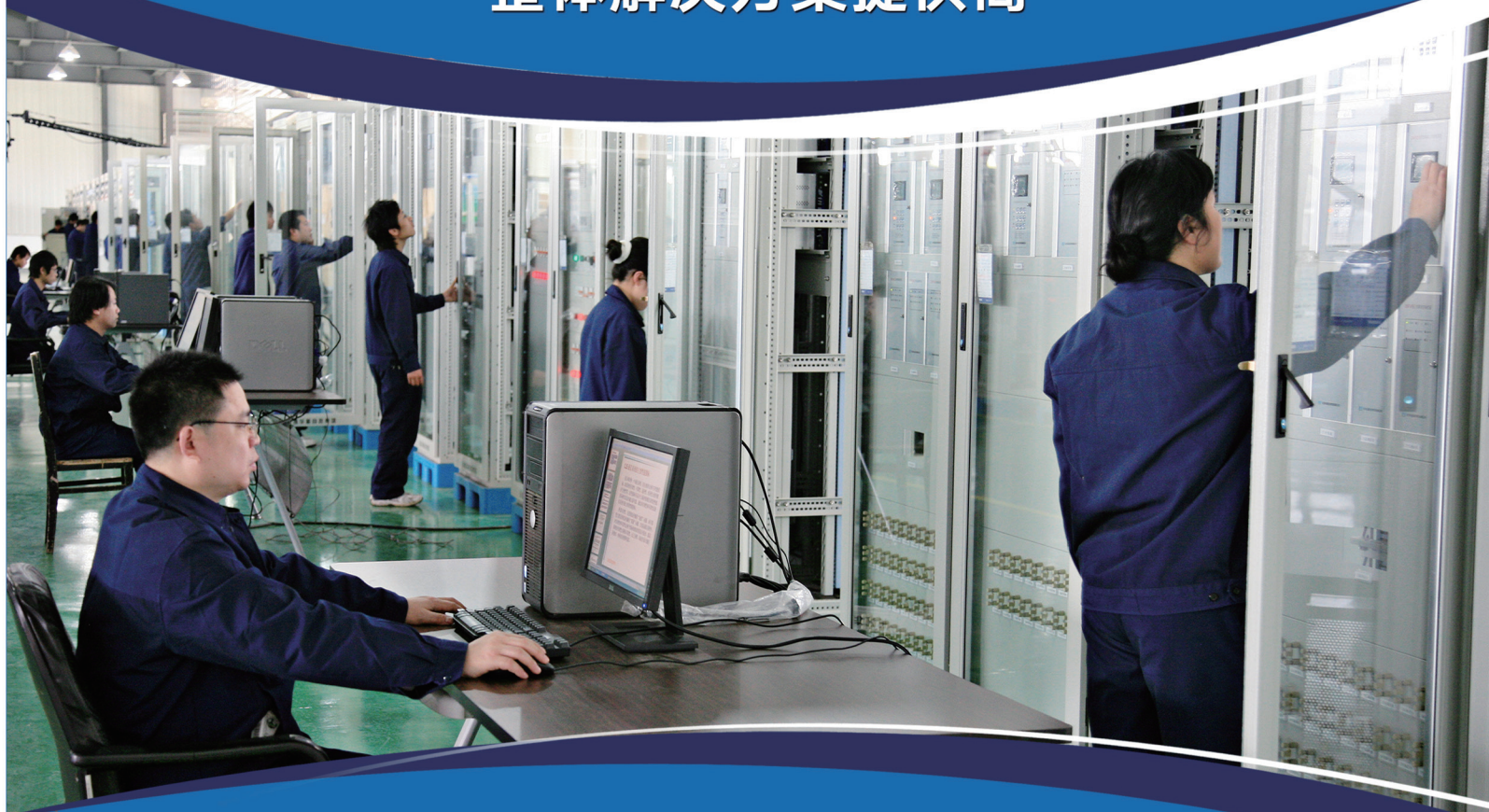
## ELECTRIC ENGINEERING



### 2023/7

### HINAC 华自科技

## 具有总包能力的电力自动化 整体解决方案提供商



方案设计



产品制造



设备安装



增值服务



华自科技股份有限公司 (股票简称: 华自科技 股票代码: 300490)

HINAC TECHNOLOGY CO.,LTD.

电话: 0731-88238888转8402

网址: www.cshnac.com 邮箱: hnac@cshnac.com

地址: 湖南省长沙市高新区麓谷麓松路609号

关注官方微信号, 回复“杂志”赢礼品!

ISSN 1002-1388



9 771002 138237

0.7>



电工技术 官网微信

主管单位: 重庆西南信息有限公司  
(原科技部西南信息中心)

主办单位: 重庆西南信息有限公司  
重庆市电机工程学会

编辑出版: 《电工技术》编辑部

协办单位: 重庆市电源学会

社长: 陈伟

总编: 徐书令

编委会(按姓氏拼音排列)

主编:

谢开贵

委员:

白锐 曹永兴 陈艳波 程杉  
董张卓 杜雄 房兆源 郭成  
郝占军 何山 侯兴哲 汲胜昌  
贾科 李辉 李勇 李振华  
李志军 刘健 吕干云 梅生伟  
朴昌浩 齐波 谭向宇 唐震  
王志新 魏刚 杨博 杨国华  
杨仕友 张星晓 张志劲 郑涛  
曾宇

执行委员:

安小宇 陈民武 邓军 樊启高  
郝建 李军徽 李永福 李元  
凌志斌 刘铖 刘刚 刘继权  
刘小康 马红波 马志钦 彭庆军  
陶果 汪可 王洪彬 王少华  
王小宇 谢旭琛 熊连松 杨海马  
杨涛 伊力哈木·亚尔买买提  
由佳欣 张施令 张懿议 朱孟兆

执行主编: 何欣 (023)67039610

编辑部主任: 陈胜 (023)67039613

编辑部: (023)63502993

E-mail: diangong@chinaet.net

市场部: (023)67039610

E-mail: matrevhx@sina.com

发行部: (023)63501714

地址: 重庆市渝北区洪湖西路18号

邮编: 401121

网址: www.chinaet.net

印刷: 重庆紫石东南印务有限公司

发行: 重庆市邮政局(国内外公开发行)

订阅: 全国各地邮局

邮发代码: 78-61

每期定价: 30.00元 \$5.00

国际标准连续出版物号: ISSN 1002-1388

国内连续出版物号: CN 50-1072/TM

广告经营许可证: (渝新两江)广准字(19)第007号

版权所有 不得转载

本刊常年法律顾问: 重庆百君律师事务所 刘凡强

律师办公电话: (023)67621818

地址: 重庆市渝北区洪湖东路财富大道2号财富A座7楼

凡发表在本刊的文章, 若没有特别声明, 均视作者同意将信息网络传播权及转授权授予本刊

如有质量问题, 请与重庆紫石东南印务有限公司联系退换

地址: 重庆市北碚区蔡家岗镇嘉德大道99号(盈田·蔡家工谷27-2)

邮编: 400707

# EE 电力电气 电工技术 DIAN GONG JI SHU

半月刊1980年创刊

2023/7期(总第589期) 2023年4月10日出版

## 目次

### 专栏 面向“双碳”目标的综合能源系统关键技术

特邀编审 陈艳波教授(华北电力大学) 陈民武教授(西南交通大学) 程杉教授(三峡大学)

- 1 电气化铁路接入弱电网电能质量特性测试与分析 何兴隆
- 4 共直流母线混合储能的协调控制策略 徐福聪
- 7 基于多类型储能协同的新型电力系统调节能力建设 于硕
- 10 市域铁路典型牵引变电所电能质量测试与评估 隋延民
- 13 基于荷电状态图权重的储能系统电池网络重构研究  
赵航 张旭 刘欢 等
- 19 基于灵敏度的变流器弱电网适应能力评估方法研究\*  
周倩怡 杨树德 徐佳 等
- 22 金沙江流域典型区域风-光-水互补特性研究 张迪雅 杨海
- 25 汽车厂能源 PLC 控制系统的无线通信\* 朱海铭 白锐 吕永津 等
- 29 山区风电场进场道路平面改造设计研究\* 王习进 胡文喜 张丙文 等
- 33 风电高渗透率下豫西电力系统节点频率稳定性研究\*  
郭辉 郑帅 张东海 等
- 39 弱电网下光伏场站并网谐波特性实测分析 任毅 张楠 郭斌 等
- 42 级联式电池储能系统在线间歇放电检测方案 隋国正 刘向军

### 理论研究

- 46 基于磁路-电路耦合模型的变压器空载过励磁电流计算与分析 陈耀峰 田自强
- 52 不平衡电网下 MMC 控制策略\* 强国栋 吴德民
- 56 低压台区电动机起动的动态电压分析方法\* 林堉澍 杨家豪 罗伟哲
- 60 典型因素耦合影响下电容式电压互感器频率特性分析与仿真研究  
李宾宾 罗沙 黄杰 等
- 64 基于机器视觉的网络变压器绕组绝缘缺陷检测系统 张玲
- 67 基于营配数据分析的台区窃电识别和线损评估方法的研究 孙文川
- 72 基于瞬态能量函数法的电力系统暂态稳定性分析\*  
王晓晖 黄阮明 李灏恩 等
- 75 具有功率解耦功能的光伏并网微逆变器 李康洁
- 79 暂态电压稳定裕度计算方法综述 韩圣泽
- 84 基于时间序列的柴油发电机组故障录波数据增量式挖掘算法  
何洋 赵江
- 88 基于误差聚类及时空性风电预测研究 田鑫培

## 输配电工程

92 城市轨道交通直流暂态短路计算	曲延璐 郑 侃
97 基于 Ansys-Workbench 的微风环境下架空输电线路动态特性分析*	李家俊 吴建军 龙玉雪 等
100 输电走廊场景激光点云 LOD 生成方法研究	宋 宇 王 成 王 濮 等
104 基于输电杆塔的无人机精细化巡检研究*	蔡佳澄 束庆霏 宋 政 等
107 海上油田岸电工程海上变电站选址	张 昊 高 璇 穆思叶
109 基于无线智能振动传感器的地理电缆防外破监测预警系统设计	汤向华 施雄杰 虞晓磊 等
112 配电网继电保护装置不停电更换及试验新模式研究*	周自强 李华龙 黄云龙 等
115 配网自愈的技术路线研究与实现*	何 滔
117 配电终端联调失败案例分析	魏榆扬 杨新春 董 恒 等
121 中压配电网电力电缆的故障定位方法	王纪东 周 宁 代 聪 等

## 电气设备

124 基于 IEC 61850 通信技术的直流控制保护录波网关装置的系统实现	田 萍 张自朋
128 基于激光光声光谱的变压器油中溶解气体在线监测预警装置研制*	樊新鸿 谢延凯 张彦凯 等
132 基于相似性原理的变压器温度预警方法	连应华 杨 力 李文炜 等
137 母线电压不平衡问题暂态分析方法研究	黎宏飞 高宗宝 吴 达 等
142 秦二厂#3、#4机组发电机氢气纯度问题探析	徐 勇 董俊斌
145 湿热地区户内变电站就地控制柜精准送风系统应用研究	刘启达 唐卫华
148 500 kV 断路器保护改造中二次安全措施探讨	沙晟田 刘雪飞
150 中压型再生逆变装置应用及改进	杨镇华
154 基于 EMC 的网关机串口通信可靠性优化研究	苏乾辉 李 宁 张留杰 等
157 动车组辅助变流器接地故障检测保护方式比较	陈建峰 付 磊 姜新生
160 基于 STM32 的配电终端在线监测及重启装置设计	蒯枫翔 沈 兵 罗文祥
163 基于交直流充放电协同控制技术的移动储能车电源快速连接装置研究	杨 坚 周 晨 汤义勤 等
167 假负载测试技术在数据中心的应用	王燕松
175 晶闸管压接用大载荷碟簧应力松弛可靠性研究	宋 戈 姚 宁 杨懿功 等
179 直流系统蓄电池均衡管理及有效性检测技术研究	海云飞 樊予胜 郎巍振 等

## 高压与绝缘技术

182 搭接塑料薄膜的架空线路交流闪络特性实验研究	王晓飞
188 特高压多端混合直流输电工程电子式电流互感器测量异常分析	徐焕焕 张宝红
192 500 kV 输电线路绕击雷影响因素及防范措施研究	樊长海
195 500 kV 输电线路自然积污特性统计分析	全 浩 张志劲 张 行 等
199 纳米氧化锌气敏传感器应用于变压器油中溶解微量氢气检测*	宋子豪 霍政界 张 馨 等
203 特高压柔直换流站增加极充电逻辑分析	周世威 卢 堃 任昊翰
207 特高压直流输电换流阀 TFM 板误触发原因分析及解决方案	张 娟 崔 斌 王 潇
210 直流输电换流阀外冷水池高密封可靠性浮球设计研究	李 阳 刘志强 周国恩 等

## 发电厂

214 抽水蓄能电站调速器控制策略和故障处理	张中弛
217 某电厂 220 kV 变压器乙炔异常的分析及处理	王志鑫 毛庆波 刘 导 等
220 核电厂辅助蒸汽分配系统疏排水优化设计	许克凤 陈晓霞 杜 广
224 某水电厂 500 kV 变压器绝缘损坏的原因分析和防范措施	谢仁桃

# ELECTRIC ENGINEERING

(Electric Power) No.7

## CONTENTS

### Key Technologies of Integrated Energy System for "Double Carbon" Goals

- 1 Power Quality Characteristic Testing and Analysis of Electrified Railroad Grid Connection with Weak Grid ..... HE Xinglong  
4 Coordinated Control Strategy of Hybrid Energy Storage with Common DC Bus ..... XU Fucong  
7 Construction of New Power System Regulation Capacity Based on Multi-type Energy Storage Collaboration ..... YU Shuo  
10 Test and Evaluation of Power Quality in Typical Traction Substation of Urban Railway ..... SUI Yanmin  
13 Research on Battery Network Reconstruction for Energy Storage Systems Based on Charge State Diagram Weight ..... ZHAO Hang ZHANG Xu LIU Huan et al  
19 Research on Evaluation Method for the Adaptability of the Converter to Weak Grid Based on Sensitivity \* ..... ZHOU Qianyi YANG Shude XU Jia et al  
22 Study on Wind-Light-Water Complementary Characteristics in Typical Region of Jinsha River Basin ..... ZHANG Diya YANG Hai  
25 Wireless Communication of PLC Control System for Automobile Factory Energy \* ..... ZHU Haiming BAI Rui LV Yongjin et al  
29 Research on Plane Reconstruction Design of Wind Farm Approach Road in Mountain Area \* ..... WANG Xijin HU Wenxi ZHANG Bingwen et al  
33 Study on Frequency Stability of Power System Under High Permeability of Wind Energy in Western Henan Province \* ..... GUO Hui ZHENG Shuai ZHANG Donghai et al  
39 Measurement and Analysis of Grid-Connected Harmonic Characteristics of Photovoltaic Stations under Weak Current Network ..... REN Yi ZHANG Nan GUO Bin et al  
42 On-line Intermittent Discharge Detection Scheme of Cascade Battery Energy Storage System ..... SUI Guozheng LIU Xiangjun

### Theoretical Research

- 46 Calculation and Analysis of Transformer No-load Over-excitation Current Based on Magnetic Circuit-circuit Coupling Model ..... CHEN Yaofeng TIAN Ziqiang  
52 MMC Control Strategy under Unbalanced Power Grid \* ..... QIANG Guodong WU Deming  
56 Dynamic Voltage Analysis Method for Motor Starting in Low-voltage Station Area \* ..... LIN Yushu YANG Jiahao LUO Weizhe  
60 Analysis and Simulation of Frequency Characteristics of Capacitor Voltage Transformer Under the Influence of Typical Factor Coupling ..... LI Binbin LUO Sha HUANG Jie et al  
64 Network Transformer Winding Insulation Defect Detection System Based on Machine Vision ..... ZHANG Ling  
67 Research on Electric Theft Detection and Line Loss Evaluation Method Based on Marketing and Distribution Data Analysis ..... SUN Wenchuan  
72 Transient Stability Analysis of Power System Based on Transient Energy Function Method \* ..... WANG Xiaohui HUANG Ruanming LI Haoen et al  
75 Photovoltaic Grid-connected Micro-inverter with Power Decoupling ..... LI Kangjie  
79 Survey of Transient Voltage Stability Margins ..... HAN Shengze  
84 Incremental Mining Algorithm for Fault Recorded Data of Diesel Generator Based on Time Series ..... HE Yang ZHAO Jiang  
88 Wind Power Prediction Based on Error Clustering and Spatiotemporal Characteristics ..... TIAN Xinpei

### Power Transmission and Distribution Engineering

- 92 Calculation of DC Transient Short Circuit of Urban Rail Transit ..... QU Yanlu ZHENG Kan  
97 Dynamic Characteristics Analysis of Overhead Transmission Lines in Breezy Environment Based on Ansys-Workbench \* ..... LI Jiajun WU Jianjun LONG Yuxue et al  
100 Study on LOD Generation of LiDAR Point Cloud in Transmission Corridor Scenes ..... SONG Yu WANG Cheng WANG Pu et al  
104 Research on Fine Inspection of UAV Based on Transmission Tower \* ..... CAI Jiacheng SHU Qingfei SONG Zheng et al  
107 Site Selection of Offshore Substations for Shore-Based Power Projects in Offshore Oil Fields ..... ZHANG Hao GAO Xuan MU Siye  
109 Design of Monitoring and Early Warning System for Underground Cable Breakage Prevention Based on Wireless Intelli-

- gent Vibration Sensor ..... TANG Xianghua SHI Xiongjie YU Xiaolei et al  
 112 Research on Novel Mode of Uninterrupted Replacement and Test of Relay Protection in Distribution Network \* .....  
 ..... ZHOU Ziqiang LI Hualong HUANG Yunlong et al  
 115 Research and Implementation of Technical Route of Distribution Network Self-healing \* ..... HE Tao  
 117 A Case Analysis of Distribution Automation Terminal Joint Commissioning Failure .....  
 ..... WEI Yuyang YANG Xinchun DONG Heng et al  
 121 Fault Location Method for Power Cables in Medium Voltage Distribution Network .....  
 ..... WANG Jidong ZHOU Ning DAI Cong et al

## Electrical Equipment

- 124 Implement of DC Control and Protection Recording Gateway Device Based on IEC 61850 Communication Technology  
 ..... TIAN Ping ZHANG Zipeng  
 128 Development of On-line Monitoring and Early Warning Device for Dissolved Gas in Transformer Oil Based on Laser  
 Photoacoustic Spectroscopy \* ..... FAN Xinhong XIE Yankai ZHANG Yankai et al  
 132 Transformer Temperature Warning Method Based on Similarity Principle .....  
 ..... LIAN Yinghua YANG Li LI Wenwei et al  
 137 Research on Transient Analysis Method for Bus Voltage Unbalance ..... LI Hongfei GAO Zongbao WU Da et al  
 142 Analysis on Hydrogen Purity of Generator of the Qinshan No. 2 Plant 3&4 Units ..... XU Yong DONG Junbin  
 145 Application and Research on Precise Air Supply System for Local Control Cabinet of Indoor Substation in Hot and Hu-  
 mid Areas ..... LIU Qida TANG Weihua  
 148 Discussion on Secondary Security Measures of 500 kV Circuit Breaker Protection Transformation .....  
 ..... SHA Shengtian LIU Xuefei  
 150 Application and Improvement of Medium Voltage Regenerative Inverter ..... YANG Zhenhua  
 154 Research on Reliability Optimization of Serial Communication of Gateway Machine Based on EMC .....  
 ..... SU Qianhui LI Ning ZHANG Lijie et al  
 157 Comparative of Detection and Protection Methods of Earthing Fault for Auxiliary Converter of EMU .....  
 ..... CHEN Jianfeng FU Lei JIANG Xinsheng  
 160 Design of Online Monitoring and Restart Device of Power Distribution Terminal Based on STM32 .....  
 ..... KUAI Fengxiang SHEN Bing LUO Wenxiang  
 163 Research on Mobile Energy Storage Vehicle Power Quick Connection Device Based on AC/DC Charge and Discharge  
 Collaborative Control Technology ..... YANG Jian ZHOU Chen TANG Yiqin et al  
 167 Application of Dummy Load Test Technology in Data Center ..... WANG Yansong  
 175 Research on Stress Relaxation Reliability of Disc Spring with Large Load for Thyristor Crimping .....  
 ..... SONG Ge YAO Ning YANG Yigong et al  
 179 Research on Battery Balance Management and Effectiveness Detection Technology in DC System .....  
 ..... HAI Yunfei FAN Yusheng LANG Weizhen et al

## High Voltage and Insulation Technology

- 182 Experimental Study on AC Flashover Characteristics of Overhead Transmission Line with Lap Plastic Film .....  
 ..... WANG Xiaofei  
 188 Analysis of Abnormal Measurement of Electronic Current Transformer in UHV Multi-terminal Hybrid DC Transmis-  
 sion Project ..... XU Huanhuan ZHANG Baohong  
 192 Study on the Influencing Factors and Preventive Measures of Shielding Lightning for 500 kV Transmission Lines .....  
 ..... FAN Changhai  
 195 Statistical Analysis of Natural Pollution Accumulation Characteristics of 500 kV Transmission Lines .....  
 ..... QUAN Hao ZHANG Zhijin ZHANG Hang et al  
 199 Nano ZnO Gas Sensitive Material Used to Detect Trace Hydrogen in Transformer Oil \* .....  
 ..... SONG Zihao HUO Zhengjie ZHANG Xin et al  
 203 Logic Analysis of Additional Pole Charging in UHV Flexible DC Converter Station .....  
 ..... ZHOU Shiwei LU Kun REN Haohan  
 207 Cause Analysis and Solution of Mis-triggering of TFM Board on UHVDC Converter Valve .....  
 ..... ZHANG Juan CUI Bin WANG Xiao  
 210 Study on the Design of High Seal Reliability Floating Ball in External Cold Tank of DC Transmission Transducer .....  
 ..... LI Yang LIU Zhiqiang ZHOU Guoen et al

## Power Plant

- 214 Control Strategy and Fault Treatment of Governor in Pumped Storage Power Station ..... ZHANG Zhongchi  
 217 Analysis and Treatment of Abnormal C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> in 220 kV Power Transformer of a Power Plant .....  
 ..... WANG Zhixin MAO Qingbo LIU Dao et al  
 220 Drainage Optimization Design of Auxiliary Steam Distribution System in Nuclear Power Plants .....  
 ..... XU Kefeng CHEN Xiaoxia DU Guang  
 224 Cause Analysis and Preventive Measures for Insulation Damage of 500 kV Transformer in a Hydropower Plant .....  
 ..... XIE Rentao