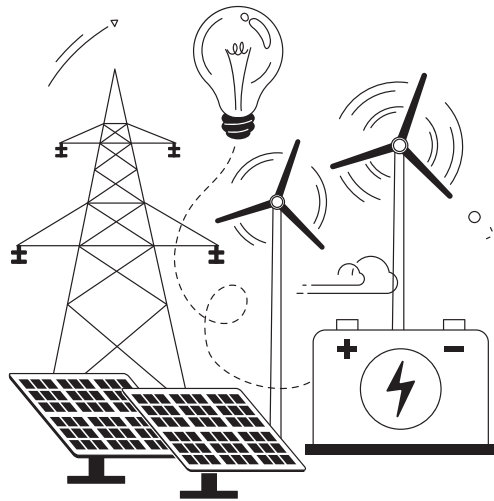


电力技术 与安全管理

Electric Power Technology and Safety Management



ART AND DESIGN PRESS INC.

(626 810 4480)

119 S Atlantic Blvd, Suite 300D

Monterey Park, CA 91754

Copyright © 2025 by ART AND DESIGN PRESS INC.

Complimentary Copy



Editorial Board Member

Bateer Hexi

Inner Mongolia Energy Power Generation Hangjin Power Generation Co., Ltd.

Gaowa Morigeng

Inner Mongolia Electric Power (Group) Co., LTD. Ordos Power Supply Branch.

Juan Wang

Inner Mongolia Electric Power (Group) Co., LTD. Ordos Power Supply Branch.

Chaoshan Xie

Beijing BKC Technology Co., Ltd.

电力技术与安全管理

Electric Power Technology and Safety Management

第2卷 第12期 2025年12月刊

主管 ART AND DESIGN PRESS INC.

主办 ART AND DESIGN PRESS INC.

编辑 《电力技术与安全管理》编辑部

ISSN(O): 2997-3503

ISSN(P): 2997-3473

地址: 119 S Atlantic Blvd, Suite 300D Monterey
Park, CA 91754

网址: <https://www.artdesignnp.com>

本刊说明:

凡向本刊所投稿件, 全体作者需签署论文著作权
转让声明书和论文发表承诺书, 声明、承诺及相关事
项如下:

- 作者将论文的复制权、发行权、网络传播权、翻
译权、汇编权、信息网络传播权、改编权等著作
权在世界范围内免费转让给本刊。
- 论文不侵犯他人著作权和其他权利, 否则作者将
承担由此产生的全部责任, 并赔偿由此给出版单
位造成的全部损失。
- 论文署名作者享有该作品的完全著作权, 署名作
者的身份真实。
- 论文未曾以任何形式公开发表过。
- 作者所投本刊稿件, 本刊编辑部拥有修改权。



- 001 智能化技术在电气工程自动化控制中的应用探讨 肖铭钰, 熊英迪
Discussion on the Application of Intelligent Technology in Automated
Control of Electrical Engineering Xiao Mingyu, Xiong Yingdi
- 004 飞轮储能系统永磁同步电动机设计及其仿真研究 于雅莉
Design and Simulation of the Permanent Magnet Synchronous
Motor/Generator for Flywheel Energy Storage Systems Yu Yali
- 007 基于多场景需求的厂区高效光伏发电系统集成关键技术 李勇, 张军, 连昕宇
Key Technologies of High-efficiency Photovoltaic Power Generation System
Integration Based on Multi-scenario Requirements Li Yong, Zhang Jun, Lian Xinyu
- 010 输电线路通道树障智能监测与差异化清理策略研究 丁卓群, 石珊
Research on Intelligent Monitoring and Differentiated Removal Strategy of
Transmission Line Channel Tree Obstacles Ding Zhuoqun, Shi Shan
- 013 虚拟电厂模式下电力营销市场化定价机制创新研究 朱风华, 谢官山, 张于雷
Innovative Research on Market-based Pricing Mechanism under
Virtual Power Plant Mode Zhu Fenghua, Xie Guanshan, Zhang Yulei
- 016 浅谈路由器的统一配置与调试方法 魏真艳, 王琪, 邵季飞, 李明月, 李怡然, 张丽霞,
王玥, 王丹丹, 江颖, 张庆军, 焦海龙, 徐明
Brief Discussion on the Unified Configuration and Debugging Methods
of Routers Wei Zhenyan, Wang Qi, Shao Jifei, Li Mingyue, Li Yiran, Zhang Lixia,
Wang Yue, Wang Dandan, Jiang Ying, Zhang Qingjun, Jiao Hailong, Xu Ming
- 020 风电和光伏联合并网对电网负荷波动的影响研究 李国强
Study on the Effect of Wind Power and Photovoltaic Combined Grid on
Load Fluctuation of Power Grid Li Guoqiang
- 023 电气工程中电气自动化技术的应用研究 胡锋铭
Application Research of Electrical Automation Technology in
Electrical Engineering Hu Fengming
- 026 配电线路故障处理中配网自动化技术运用分析 倪楠, 沈志文, 赖玮, 孙雪成
Application Analysis of Distribution Network Automation Technology in
Distribution Line Fault Handling Ni Nan, Shen Zhiwen, Lai Wei, Sun Xuecheng
- 029 存量煤电升级之路: 重庆地区某老旧机组等容量替代案例分析 江剑, 林侃
The Path of Upgrading Existing Coal-fired Power Units: A Case Study on Capacity-
equivalent Replacement of an Aging Unit in Chongqing Jiang Jian, Lin Kan
- 032 高比例分布式电源接入下互感器计量误差特性研究 李飞, 史轮, 陈磊, 申洪涛, 武光华, 吴一敌, 申雪韵
Research on the Metering Error Characteristics of Instrument Transformers under High
Penetration of Distributed Generation Li Fei, Shi Lun, Chen Lei, Shen Hongtao,
Wu Guanghua, Wu Yidi, Shen Xueyun
- 035 1000MW 二次再热机组二再单屏超温问题分析、调整及处理措施 欧阳伟基
Analysis, adjustment, and treatment measures for the overheating problem of the
second reheat single screen in a 1000MW secondary reheat unit Ouyang Weiji
- 038 机场柴油发电机组并机逻辑优化与可靠性研究 成华轩
Research on Logic Optimization and Reliability Enhancement for Parallel Operation of
Diesel Generator Sets at Airports Cheng Huaxuan
- 041 基于数字孪生与人工智能的光伏电站安全生产技术体系构建 水华伟
Construction of Safety Production Technology System of Photovoltaic Power Station
Based on Digital Twin and Artificial Intelligence Shui Huawei
- 044 光伏储能一体化在智能建筑电气系统中的集成设计 邬成辉
Integrated Design of Photovoltaic Energy Storage Integration in Electrical
Systems of Intelligent Buildings Wu Chenghui

智能化技术在电气工程自动化控制中的应用探讨

肖铭钰¹, 熊英迪²

1. 国网龙感湖区供电公司, 湖北 黄冈 435503

2. 国网黄冈供电公司, 湖北 黄冈 438000

DOI:10.61369/EPTSM.2025120001

摘 要 : 随着工业4.0进程加快, 智能化技术变成促使电气工程自动化控制升级的关键力量。本文针对智能化技术在此范畴的应用展开探究, 分析应用的意义包含效率改善, 安全保护以及绿色可持续发展等层面, 再整理目前的应用状况并找出成效与短板之处, 给出改进应用策略, 在此过程中发现将人工智能、大数据、物联网科技深深渗透进电气工程自动控制当中能明显加强系统的效能及其管理水平, 给予理论依据及操作方向, 从而让电气工程的自动化管控朝着更加智能, 高效又可靠的途径前进。

关 键 词 : 智能化技术; 电气工程自动化控制; 应用策略

Discussion on the Application of Intelligent Technology in Automated Control of Electrical Engineering

Xiao Mingyu¹, Xiong Yingdi²

1.State Grid Longganhu Power Supply Company, Huanggang, Hubei 435503

2.State Grid Huanggang Power Supply Company, Huanggang, Hubei 438000

Abstract : With the acceleration of Industry 4.0, intelligent technologies have become a key driver in advancing the automation and control of electrical engineering. This paper explores the application of intelligent technologies in this field, analyzing their significance in terms of efficiency improvement, safety protection, and green sustainable development. It then reviews the current state of applications, identifies strengths and weaknesses, and proposes strategies for improvement. The study reveals that deeply integrating artificial intelligence, big data, and IoT technologies into the automation and control of electrical engineering can significantly enhance system performance and management levels, providing both theoretical support and practical guidance. This approach propels the automation and control of electrical engineering toward a more intelligent, efficient, and reliable path.

Keywords : intelligent technology; electrical engineering automation control; application strategies

引言

在现代工业体系当中, 电气工程自动化控制是保证生产稳定、提升产业竞争力的关键环节。传统自动化的技术只是实现了基本流程的自动化, 在面对复杂的工况环境时缺乏实时数据处理能力以及故障精准诊断的能力, 并且不能满足当前工业高效化、精细化、智能化的需求。近几年来, 人工智能、大数据、云计算、物联网等智能化技术快速发展, 为解决这些问题提供了新的可能。这些新技术可以对电气系统的运行数据进行实时采集和分析并做出智能决策, 从而实现从“被动反应”到“主动预测”的转变。本文将全面研究智能化技术在电气工程自动化控制中的应用, 明确其意义, 剖析现状, 提出对策, 希望能给行业提供指导性意见, 助力电气工程自动化控制领域高质量发展。

一、智能化技术应用于电气工程自动化控制的重要意义

(一) 提高电气系统控制精度与运行效率

传统电气工程自动化控制依靠固定程序及人工干预, 当遇到

负荷波动、设备参数变化等复杂情形时, 控制精准度易受干扰, 响应速度相对较慢。智能化技术结合模糊控制、神经网络、遗传算法等人工智能算法后, 可以做到对电气系统运行状况实施即时监测并作出相应调整, 比如电力调度体系当中利用大数据剖析的智能化管控模型可准确预估用电负荷变动趋势, 并按照这种状况

去改良电网运作数值使得电压、频率这些关键指标的掌控精确性提高到15%–20%；电机操控领域采用智能化变频技术以后可以根据实际承担的工作量来自动调节转速速率，从而避免以往那种一味保持恒定速度运转所引发的能量浪费现象出现，在此基础上电机工作效率得以加强，并且有效缩减了生产能耗和花费金额成本方面也得到了改善效果呈现出来^[1]。

（二）提升电气系统的安全性和稳定性

电气工程系统运行牵涉到高电压、大电流，设备出现故障或者操作有误时容易引发安全事故，产生经济损失并导致人员伤亡，智能化技术能够创建起全面的监测与诊断体系来加强系统的安全防护水平，在此方面物联网技术可以对电气设备的关键参数如温度、电流及绝缘状况等实施即时收集，经由边缘计算节点迅速辨别出异常的数据，并立即发出警报；而基于深度学习的故障判定模型则能整合历史上的故障信息和当下的运行情况数据，精确找到故障种类以及具体的受损位置乃至预估可能存在的隐患风险，把查找故障所需的时间从传统数小时压缩成几分钟以内，从而缩减了故障造成的停机时间和事故发生的几率。比如在变电站自动化系统里，智能化巡检机器人融合红外测温技术和图像识别技术之后就能代替人去执行高压设备的巡查任务，这样就可以免除人员遭受触电的风险，并且还能提高整体覆盖范围以及故障识别准确度^[2]。

（三）促进电气工程行业绿色低碳转型

在“双碳”目标背景之下，电气工程行业属于能源消耗与碳排放的关键区域，绿色低碳发展成为必然走向，在智能化技术方面可以改善能源调配状况并缩减能源耗用量，从而助力电气系统达成低碳运行的目的。从能源管理的角度来说，智能化监控系统能够即时追踪到电气设备的能源消耗情形，并且依照生产需求来拟定动态节能策略，以工业厂房为例，在智能照明控制系统的作用下，根据光照强度以及人员分布情况自动调整灯光亮度的做法可将照明能耗削减30%以上。至于可再生能源部分而言，智能化控制技术具备让风电、光伏等可再生资源发电系统同电网之间实现精准对接的功能，进而减小电能波动给电网带来的影响，促使可再生能源使用率得以提高，推动整个电气工程行业发展向清洁能源主导方向转变的趋势出现^[3]。

二、智能化技术在电气工程自动化控制中的应用现状

（一）核心技术应用成效显著

目前，人工智能、大数据、物联网这些核心智能化技术在电气工程自动化控制领域已有部分落地应用并取得良好效果，在人工智能技术上模糊控制技术被大量应用于电机调速、电力系统稳定控制等领域解决了传统控制技术难以解决的非线性、不确定性问题；深度学习技术对电气设备故障诊断起到重要作用利用其建立故障特征模型实现了对变压器、断路器等关键设备故障准确识别诊断准确率达90%以上^[4]。大数据技术方面，电力企业搭建数据平台，把电网运行数据、用户用电数据等海量信息整合起来，做到对用电负荷准确预测以及电网调度改良，国家电网某个省级

电力公司利用大数据分析，使短期用电负荷预估误差维持在5%以内，明显改善了电网运作效能，在物联网技术方面，智能传感器，无线通讯部件之类的东西被广泛运用于电气设备监测当中，达成即时感知并远距离观测这些设备的运转情况，削减人力巡查费用^[5]。

（二）行业应用普及程度不均衡

虽然智能化技术在电气工程自动化控制领域的应用有了部分发展，但行业内部的应用推广程度依然有明显的不均等现象，在企业规模上大型电力公司、工业集团因资金充裕、技术研发能力较强可以优先采用先进的智能化技术和设备来创建完整的自动化控制系统。比如华能、大唐这样的大型发电企业已经完成了电厂的智能化运作；中小型电气企业受到资金和技术实力限制下推进智能化改造的速度较慢，一些小公司仍然依靠传统的自动化控制方法，很难跟上行业的进步步伐^[6]。从应用领域看，智能化技术在电力系统、大型工业制造等领域应用较深，在民用电气、中小型工业设备等领域应用相对落后，比如在民用建筑电气系统中，智能化控制技术主要集中在空调、照明等部分设备上，并未实现全系统的智能化整合，从而限制了整体智能化水平的提升。

（三）技术融合与创新存在短板

智能化技术与电气工程自动化控制的融合过程中，还存在着技术协同不够、创新能力不强等问题。一方面不同智能化技术之间缺乏有效的整合，比如物联网技术采集的大体量数据和人工智能算法之间的对接存在障碍，数据格式不对齐以及数据传输延迟等情况使数据的价值不能得到完全发挥；部分企业引进的智能化系统同原先自动化的控制系统衔接性差，在此情况下就会产生“信息孤岛”现象，从而无法达成共享并做到共同调控的目的。另一方面是核心技术创新能力欠缺，我国在智能化技术的基础理论研究、关键核心器件研发等方面与国际先进水平仍存有差距，像高端智能传感器、核心控制芯片等依赖进口的现象依然存在，这就限制了智能化技术深入应用于电气工程自动化控制之中；此外针对电气工程领域特定需求开展的智能化技术创新也相对较少，通用化技术和行业实际需求之间缺乏适配性，从而影响到其应用效果^[7]。

三、智能化技术在电气工程自动化控制中的优化应用策略

（一）强化核心技术研发与自主创新

为了突破技术瓶颈，促使智能化技术在电气工程自动化控制领域深入应用，就要加强对核心技术的研发和自主创新力度。政府要给予政策扶持并投入更多资金，创建专门的研究开发基金，推动高校、科研机构同企业展开合作，在智能传感器，核心控制算法以及自主可控芯片这些关键技术方向上着力，突破技术壁垒，提高国产化的核心器件和技术比例，可以支持高校同电力公司一同创建“电气工程智能化控制实验室”，围绕电网调度，设备故障诊断等场景去研究专用的算法，并且形成一种技术攻关同盟，把优势资源集中在解决“卡脖子”难题之上，企业也要巩固

创新主体的地位，加大研发投入所占的比例，组建自己的研发团队^[8]。根据自身的业务情况来做技术创新工作，创造出适合电气工程自动化控制情景使用的智能化产品及方案，针对中小型电气企业来打造成本低而且方便使用操作的智能化控制模块，以此降低其运用门槛；还要加强与上下游企业的技术协作，塑造起一条完整的创新产业链条，从而改善整体的技术革新水平。

（二）促进行业应用均衡发展

针对智能化技术应用普及度不均衡的问题，需采取多举措推动行业应用均衡化。从政策层面，政府应出台差异化扶持政策，对中小型电气企业的智能化改造给予补贴与税收优惠，降低企业改造成本；同时，搭建公共技术服务平台，为中小企业提供技术咨询、方案设计、人员培训等服务，例如组织专家团队为企业制定个性化改造方案，开展免费技术培训课程，培养企业内部技术骨干，助力其加快智能化转型。从市场层面，鼓励大型电气企业发挥技术与资源优势，通过产业链合作、技术输出等方式，带动中小企业实现智能化升级，例如大型电力设备制造商可为中小企业提供智能化设备租赁、运维托管等服务，降低中小企业的前期投入；同时，推动建立行业联盟，促进企业间的技术交流与资源共享，例如举办智能化技术应用展会，展示成功案例，为中小企业提供学习借鉴的平台。从应用领域看，要加大民用电气、中小型工业设备等领域的智能化技术推广力度，根据不同的需求开发相应的解决方案，在民用建筑里推行智能电气控制系统，做到照明，空调，安防等系统的联动控制，改善居住的舒适感并提高能源利用效率；在农业电气方面，研发智能灌溉，温室温控之类的电气系统，促使农业生产朝着智能化方向转变^[9]。

（三）智能化协同管理体系的构建

为解决技术融合不足、信息孤岛，需要创建起智能化协同管理系统，做到不同技术，不同系统之间的协作运转。第一是统一

数据标准和接口规范，制订电气工程自动化控制方面的数据采集，传送，存储，剖析等环节的标准体系，制定智能传感器的数据格式标准，系统通信协议标准之类的东西，保证各个设备，各个系统的数据可以互相打通；而且要形成起来数据品质评定机制，定时对数据的准确度，完备性加以检测，让数据的价值得到充分表现出来，第二步就是搭建一体化的智能化管理平台，融合物联网，大数据，人工智能这些技术之后，就能达成对电气系统运作数据的集中化经营，随时分析并作出聪明决策的事情了，比如创建一个电力系统智能化经营平台，把电网运作数据，设备监测数据以及用户用电情况之类的资料全部纳入其中，凭借大数据来完成电网调度改良，设备出现故障时提前发出警报，应对用户的用电器具用电需求等的功能都能实现，这个平台还要具有灵活扩充的能力，按照企业的实际需求添加新的功能板块，适应不同类型大小的企业或者领域里的电气系统。最后加强跨领域协同合作，推动电气工程行业和信息化行业、互联网行业的融合创新，在行业内引入跨界技术以及管理经验^[10]。例如与互联网企业共同打造云平台，对电气系统进行远程监控及云端维护工作，从而提升系统在管理工作上的灵活性与效率性。

四、结束语

综上所述，智能化技术给电气工程自动化控制领域带来了前所未有的发展机会，它在改善控制精确度，保证系统安全，助力绿色发展等方面的重要性已被实际验证，当下，虽然智能化技术在这一领域的应用取得了部分成果，不过仍然碰上普及不均匀，技术和使用融合不够等难题，经由加大核心技术开发力度，促使应用更加均衡，创建协同管理架构等方式可以有效地解决问题，从而做到智能化技术和电气工程自动化控制的深入整合。

参考文献

- [1]王福宁. 智能化技术在电气工程及其自动化控制中的应用分析[J]. 流体测量与控制, 2024, 5(06): 15-17+22.
- [2]张婷婷, 黄雨纯. 人工智能技术在电气工程中的应用分析[J]. 中国轮胎资源综合利用, 2024, (12): 160-162.
- [3]肖睿君. 智能化技术在建筑电气工程中的应用及优化措施[J]. 新城建科技, 2024, 33(11): 31-33.
- [4]彭竞达. 智能技术在自动化控制系统中的应用[J]. 集成电路应用, 2024, 41(11): 262-263.
- [5]陈玉超. 智能化技术在电气工程自动化系统中的应用研究[J]. 科技资讯, 2024, 22(21): 70-72.
- [6]李书奎. PLC技术在电气工程及自动化控制中的应用[J]. 电子产品世界, 2024, 31(11): 58-60+64.
- [7]王瑞, 俞孙泽, 常田. 电子技术在电气工程自动化控制中的应用[J]. 数字技术与应用, 2024, 42(11): 238-240.
- [8]刘自洋. 智能化技术在电气工程及自动化领域的运用分析[J]. 张江科技评论, 2024, (10): 48-50.
- [9]韩萌, 吴晓蕊. 内燃机的电气工程自动化控制研究[J]. 内燃机与配件, 2024, (20): 84-86.
- [10]李武强. 智能化技术在电气工程自动化控制中的应用[J]. 电子元器件与信息技术, 2024, 8(10): 74-76.

飞轮储能系统永磁同步电动发电机设计及仿真研究

于雅莉

哈尔滨工程大学机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001

DOI:10.61369/EPTSM.2025120002

摘 要 : 为有效地解决目前的能源问题, 应该在开发可再生资源及新型能源基础上, 引入新技术来提高能源利用率, 这也是目前此领域的研究热点。飞轮储能具有使用寿命长、储能密度大、功率密度高、充放电次数没有限制、储能成本低、环境友好等方面优势, 目前在储能受到广泛关注。本文具体分析了这种储能系统对发电机的要求, 设计飞轮储能用永磁同步电动发电机。仿真分析储能飞轮系统转子固有频率和振型, 仿真计算永磁同步电机的电磁振动, 得到激振力各阶谐波, 分析了其空载激振力波的主要组成分量, 有助于今后分析定、转子结构参数对电机激振力波的影响, 进一步优化电机结构和电磁参数。以提升储能飞轮系统整体性能。

关 键 词 : 飞轮储能; 电动发电机; 永磁同步电机; 激振力波; 电磁振动

Design and Simulation of the Permanent Magnet Synchronous Motor/Generator for Flywheel Energy Storage Systems

Yu Yali

College of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001

Abstract : At present, to face the energy crisis not only to develop renewable resources such as wind and solar energy and new energy sources, but also to save energy and improve energy efficiency. Flywheel energy storage has the advantages of long service life, high energy storage density, high power density, unlimited charge and discharge times, low energy storage cost, and no damage to the environment. Therefore, flywheel energy storage is a new type of storage technology with broad application prospects. According the requirements of the motor/generators in the flywheel energy storage system are reviewed, the PMSM/generator for flywheel energy storage has been designed. The simulation analysis of the natural frequency and vibration modes of the rotor in the energy storage flywheel system was conducted. The electromagnetic vibration of the PMSM was simulated to obtain the harmonic components of the excitation force. The main components of the no-load excitation force wave were analyzed, which can be used for future studies on the influence of stator and rotor structural parameters on the motor's excitation force wave. This will further optimize the motor structure and electromagnetic parameters to enhance the overall performance of the energy storage flywheel system.

Keywords : flywheel energy storage; motor/generator; PMSM; electromagnetic force; electromagnetic vibration

引言

目前各国为有效地解决能源问题, 开始大力发展可再生资源及新型能源, 且引入各种新技术来有效提高能源利用率^[1]。此外很多国家还制定了相关政策来促进新型能源技术的开发利用, 并取得一系列重要进展。能量存储是有效利用能源的重要手段, 对提高能源利用效率, 发挥其价值也有重要意义^[2]。目前储能方式有很多种, 其中典型的包括抽水蓄能、蓄电池、飞轮储能等, 其各有一定优缺点和适用范围。飞轮储能的优势在于成本低, 寿命长、储能密度大, 环境友好, 因而表现出广阔的应用前景, 也是未来此领域的重点研究方向^{[3]-[6]}。

飞轮储能主要是将电能以机械能方式存储起来, 其中最关键的部件为电动发电机, 其可实现这两种能量的相互转换。为更好的满足实际应用性能要求, 其采用的电动发电机应尽可能满足如下需求: 可逆性, 速度调节范围大; 转换效率高, 且转子的机械性能好, 可承受高转速载荷, 环境适应性高, 调速性能好; 转子损耗低, 输出功率大^[2]; 使用寿命长, 可在复杂恶劣环境下长时间可靠运行; 造价低, 电机结构简单、方便使用和维护, 较大温度区间内都可良好运行^[7]。

一台永磁电机质量可通过多种指标进行评价, 其中最重要的就是振动指标, 振动容易引起噪声, 此外也可通过振动信号来判断电机结构是否出现显著的变化, 进而预测其使用寿命。因此很有必要对这种部件的振动特性进行深入研究, 这对制定应对策略来改善其性能、延长使用寿命具有重要意义。

一、储能飞轮用永磁同步电机设计

以10kWh飞轮储能单机系统为对象,根据相关资料可知其关键参数主要如下:最大储能量10kWh,放电深度为0.75,转速8000~16000rpm,转子转动惯量是25.7kgm²。

为设计符合上述要求的发电机,应该在理论分析基础上结合设计经验,确定出飞轮与电机的参数传递关系。由于这种关系主要和转动惯量有关,因而需要先建立能量与角速度的关系式。根据相关物理学知识可知,瞬时的角速度与能量存在如下关系:

$E = \frac{1}{2} J \omega_x^2$, 其中, E 为能量, ω_x 为瞬时的角速度。由于这种系统的最大储能量 E_{max} 为10kWh, 转动惯量 $J = 25.7 \text{kgm}^2$, 由此可得飞轮最高角速度 ω_{max} 为: 1675.5rad/s。设定飞轮最低转速为8000rpm, 则放电深度 λ 的计算如下: $\lambda = 1 - \frac{\omega_{min}^2}{\omega_{max}^2} = 1 - \frac{n_{min}^2}{n_{max}^2} = 0.75$ 。其中, ω_{max} 是飞轮最大角速度, n_{min} 是飞轮最低角速度, n_{max} 是飞轮最大转速, ω_{min} 是飞轮最低转速。

飞轮储存能量总量 ΔE 与角速度的关系为: $\Delta E = \frac{1}{2} J \cdot \omega_{max}^2 - \frac{1}{2} J \cdot \omega_{min}^2 = 7.5 \text{kWh}$ 。用放电深度表示的形式为: $\Delta E = \frac{1}{2} \lambda \cdot J \cdot \omega_{max}^2$ 。设发电机及变换电路效率 η_g 为0.9, 则飞轮转子有效储能量 E_{out} 可以表示为: $E_{out} = \Delta E \cdot \eta_g = 6.75 \text{kWh}$ 。

(一) 电动状态指标解析

电动状态输出功率 $P_{m2} = 130 \text{kW}$, 假定系统上升期间功率保持130kW, 这样就可确定出能量与充电时间正相关。对应的关系可表示为: $E_{m2} = P_{m2} \cdot t_{m2}$, 代入数据计算出储能为10.4kWh > $E_{max} = 10.8 \text{kWh}$ 。根据此结果可判断出, 电动机转轴输出的机械能大于最大储能量, 可满足飞轮指标要求。设电动机效率 η_m 为0.93, 则其输出 P_{m1} 为140kW。额定电压为 U_{rate} 为: $U_{rate} = \frac{P_{m1}}{\sqrt{3} \times I_{rate}} = 700 \text{V}$, 根据这些参数对驱动器容量进行合理选择。在选择时需要确保过压、过流值至少达到额定值的1.1倍, 这样才可以满足工作性能要求。

(二) 发电状态指标解析

放电时间 $t_g = 180 \text{s}$, 假定下降期间保持恒功率, 发电机输出 P_{g2} 为135kW, 输入 P_{g1} 为50kW, 代入相关数据计算出, 其输入能量 E_{g1} 为: $E_{g1} = P_{g1} \cdot t_g = 7.5 \text{kWh} \leq \Delta E$ 。这也反映出, 输入能量 E_{g1} 略低于对应的储存总能量 ΔE , 因而飞轮性能指标都满足。

上述核算假定系统整个运行中都保持功率不变, 不过实际情况下, 对应的电流和转速等参数都存在一定的波动性, 因而上述理想的假定条件并不成立。在转速由0增加到峰值期间, 驱动器最大电流为250A, 实际启动时需要适当的降低电流, 从而满足安全性相关要求。此外还需要给储能系统设计余量, 将最高转速设定为: $n_{max} = 16000 \text{rpm}$ ($\omega_{max} = 1675.5 \text{rad/s}$), $n_{min} = 8000 \text{rpm}$ ($\omega_{min} = 837.8 \text{rad/s}$); 电动发电机的功率保守定为: $P_{m2} = 150 \text{kW}$ 。

二、飞轮储能系统转子动力学分析

根据数学和物理学相关知识可知, n 自由度运动方程的状态空间可描述为:

$$\begin{bmatrix} C + \Omega G & M \\ M & 0 \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{Bmatrix} q \\ \dot{q} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & -M \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q \\ \dot{q} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix}, \text{ 设 } z = \begin{Bmatrix} q \\ \dot{q} \end{Bmatrix}, \text{ 则}$$

简化为: $A\dot{z} + Bz = 0$

分析以上的方程可知, 其中的系数 A 和 B 均取决于转速 Ω , 这样求解转子系统固有频率的问题可转变为求解 $K\bar{Z} = \lambda M\bar{Z}$ 的特征值, 而其振型则可通过求解特征向量确定出。前一个问题采用 Wilson- θ 法进行求解^[8]。主要研究无阻尼状态下结构的振动特性以及与此相关的影响因素, 然后详细讨论陀螺效应对转子系统涡动的影响, 代入数据进行计算后, 确定出转子系统的特征值, 其虚部对应于系统的固有频率。

在不转动条件下, 固有频率是成组出现的, 分析可知其原因主要是, 转子在 X 、 Y 方向非耦合, 对应的惯性量和刚度保持一致。但系统在运行过程中, 随着转速的提高, 达到3000rpm条件下, 会产生很明显的陀螺效应, 在此因素影响下系统的固有频率每对分开了。因系统阻尼为零, 这样此时的特征值的实部为零。图1对这种分叉现象进行明确的显示: 一个随转速的提高而不断增加, 其中随转速的提高而提高为正向涡动, 即陀螺效应提高了系统的刚度; 反之对于反向涡动, 陀螺效应降低了系统的刚度。

在上述计算基础上确定出的特征向量即为转子振型。在本次求解时, 为方便处理而将模态振型的阶数设为前6阶, 然后代入数据进行计算就确定出转子的各阶振型, 对所得结果进行可视化处理如图2。分析此图可发现, 其中第一、四阶是锥形涡动, 第二、三阶是平行涡动, 其余的两个为复合振型。

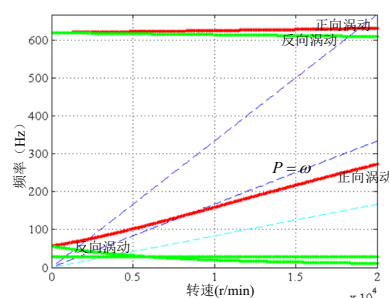


图1 轴承无阻尼时转子系统的固有频率图

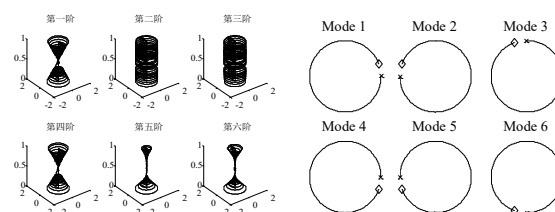


图2 轴承无阻尼时转子系统振型图

图3 转子系统振型轴向图

具体分析图2可发现, 每个节点的轴心轨迹为圆周, 在此运动过程中振型是沿着转轴不断的变化。飞轮节点轨迹的轴向图见图三, 分析此图可发现其中模态1、3和5是反向涡动; 其余三个为正向涡动。

三、振动分析

飞轮储能系统结构复杂, 为确保其可长期有效运行, 需要确保其中的电机性能达到较高水平, 特别是需要功率质量比较高。不过这也增加电机的电流、磁密度, 同时减小其体积。不过根据大量的经验可知, 电机功率增加过程中, 对应的振动和噪声也显著增加。根据相关资料可知, 目前我国用电机的振动与噪声控制水平还不高, 和实际的飞轮系统需求相比, 存在较大差距。随着科技的

进步和生活质量的不断提高，未来需要电机的振动与噪声都被有效地控制，这也是此领域的主要发展趋势之一。相关理论和实验研究发现，电机的噪音主要包括三类，其中电磁噪声是主要成分，因而也是需要重点控制的。磁场谐波含量小，阶数高，其频率和定子的固有频率差异很明显。电磁振动主要和电磁激振力波有关，因而在解决这类噪音时需要重点考虑到与此相关的振动波。

电磁振动计算时可选择的方法主要包括解析法和有限元法，其各有一定适用范围，目前有限元法的应用范围更广。电磁振动的产生原因为电机气隙磁场作用于电机铁心后形成激振，解析法在求解过程中需要分析定转子磁动势和气隙磁导，以及对应的激振力波。而有限元法主要是利用计算机工具来求解，需要考虑到齿槽的结构参数。以一台4极36槽永磁同步电机为例，电机基本参数如表1所示：

表1 电机参数表

| | | | |
|------------|-------|-----------|------|
| 功率 (kW) | 150 | 槽口宽度 (mm) | 6 |
| 转速 (rpm) | 16000 | 转子内径 (mm) | 50 |
| 定子外径 (mm) | 400 | 极弧系数 | 0.82 |
| 定子内径 (mm) | 280 | 剩磁密度 (T) | 1.23 |
| 转子外径 (mm) | 273 | 极对数 | 2 |
| 气隙长度 (mm) | 3.5 | 定子槽数 | 36 |
| 永磁体厚度 (mm) | 7 | 轴向长度 (mm) | 79 |
| 轴径 (mm) | 50 | | |

图4为有限元方法计算得到的电机径向气隙磁通密度。图5为电机径向气隙磁通密度FFT分解后的结果。具体数值如表2所示，由快速傅立叶分解确定出，基波幅值最大，约为0.89T，其中还有奇次谐波（表中只列出35次谐波结果），其中次数为3次，9次，7次，19次谐波幅值相对较大。

径向气隙磁通密度波形中的谐波量少，幅值低，则认为电机的质量越高。为有效地减小电机振动，可控制其中谐波次数不变，降低正弦性畸变率，以及对应的谐波幅值。

应用气隙磁密的谐波畸变率计算公式，将表3中数值高于0.02T的谐波磁密参与计算，得到谐波畸变率为21.95%。

$$B_{rTHD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=3}^{35} B_{rn}^2}}{B_{r1}} \times 100\% = \sqrt{\sum_{n=3}^{35} \left(\frac{B_{rn}}{B_{r1}}\right)^2} \times 100\%$$

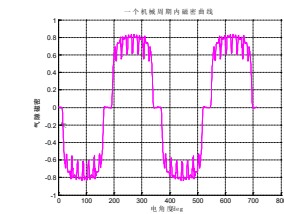


图4 径向气隙磁通密度

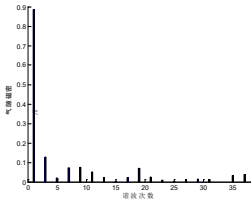


图5 径向气隙磁通密度 FFT分解

参考文献

[1] 于雅莉. 储能飞轮动发一体机电磁关键问题及温度场的研究 [D]. 哈尔滨工程大学, 2012.
[2] 杨志轶. 飞轮电池储能关键技术研究 [D]. 合肥工业大学, 2002.
[3] 汤平华. 磁悬浮飞轮储能电机及其驱动系统控制研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2010.
[4] 韩邦成. 单轴飞轮储能 / 姿态控制系统的仿真及其实验研究 [D]. 中国科学院研究生院 (长春光学精密机械与物理研究所), 2004.
[5] 汤双清. 飞轮电池磁悬浮支承系统理论及应用研究 [D]. 华中科技大学, 2004.
[6] 刘治华. 双功能飞轮控制方法的研究 [D]. 中国科学院研究生院 (长春光学精密机械与物理研究所), 2006.
[7] A.S.Nagorny, N.V.Dravid, R.H.Jansen, et al. Design Aspects of a High Speed Permanent Magnet Synchronous Motor/Generator for Flywheel Applications, Electric Machines and Drives, 2005 IEEE International Conference, 2005:635-641P
[8] 刘静娜. 飞轮储能系统电磁轴承—转子动力学特性研究 [D]. 哈尔滨工程大学, 2014

表2 径向气隙磁通密度 FFT 分解结果

| 谐波次数 | 磁密幅值 T | 谐波次数 | 磁密幅值 T | 谐波次数 | 磁密幅值 T |
|------|--------|------|--------|------|--------|
| 1 | 0.8852 | 13 | 0.0235 | 25 | 0.0037 |
| 3 | 0.1274 | 15 | 0.0040 | 27 | 0.0116 |
| 5 | 0.0209 | 17 | 0.0222 | 29 | 0.0139 |
| 7 | 0.0720 | 19 | 0.0701 | 31 | 0.0120 |
| 9 | 0.0743 | 21 | 0.0258 | 33 | 0.0025 |
| 11 | 0.0511 | 23 | 0.0103 | 35 | 0.0336 |

切向气隙磁通密度幅值较低，所以一般情况下，可以忽略切向气隙磁通密度对电磁力的作用。图8为某时刻空载激振力波的波形图，图9为激振力波的快速傅立叶变换，其各阶谐波的幅值如表3所示，从表中可以看出，有限元计算结果与理论分析相一致，激振力波谐波主要分量为4次，8次，12次，……。

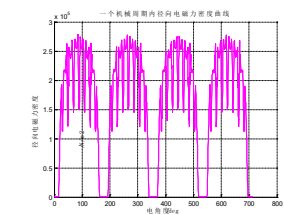


图6 单位面积的电磁力曲线图

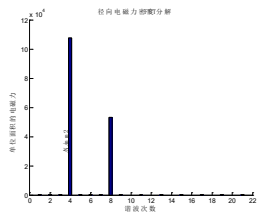


图7 单位面积的电磁力 FFT 分解

表3 单位面积电磁力幅值 FFT 分解结果

| 谐波次数 | 力密度幅值 *1.0e+005 | 谐波次数 | 力密度幅值 *1.0e+005 | 谐波次数 | 力密度幅值 *1.0e+005 |
|------|-----------------|------|-----------------|------|-----------------|
| 1 | 0.0009 | 8 | 0.5306 | 15 | 0.0009 |
| 2 | 0.0003 | 9 | 0.0008 | 16 | 0.0350 |
| 3 | 0.0009 | 10 | 0.0008 | 17 | 0.0008 |
| 4 | 1.0752 | 11 | 0.0008 | 18 | 0.0010 |
| 5 | 0.0016 | 12 | 0.2445 | 19 | 0.0013 |
| 6 | 0.0013 | 13 | 0.0010 | 20 | 0.0810 |
| 7 | 0.0003 | 14 | 0.0010 | 21 | 0.0012 |

四、结论

为满足储能飞轮系统对电动发电机的要求，设计永磁同步电动机，建立飞轮储能系统的参数传递关系。仿真分析储能飞轮系统转子固有频率和振型，仿真计算永磁同步电机的电磁振动，得到激振力各阶谐波，有助于今后分析定、转子结构参数对电机激振力波的影响，进一步优化电机结构和电磁参数。以提升储能飞轮系统整体性能。

基于多场景需求的厂区高效光伏发电系统集成关键技术

李勇, 张军, 连昕宇

大唐陕西发电有限公司延安热电厂, 陕西 延安 716000

DOI:10.61369/EPTSM.2025120003

摘 要 : 伴随着全球清洁能源转型的持续推进以及“双碳”目标逐步实现, 厂区作为工业能源消耗的主要场所, 一方面存在着传统化石能源依赖所造成的高运营成本、高碳排放的难题, 另一方面由于各个功能区生产工艺、运行时段的不同, 呈现出明显的多场景差异化用能需求, 单一的光伏配置不适合于适配不同负载波动、空间限制, 不能实现高效利用。对厂区高效光伏发电系统集成关键技术应用意义和要点加以研究, 期望可以提升发电效能, 稳固供电情况, 削减运营成本以及碳排放, 为厂区能源结构优化带来一些参考。

关 键 词 : 多场景需求; 厂区; 光伏发电系统

Key Technologies of High-efficiency Photovoltaic Power Generation System Integration Based on Multi-scenario Requirements

Li Yong, Zhang Jun, Lian Xinyu

Datang Shaanxi Power Generation Co., Ltd. Yan 'an Thermal Power Plant,

Yan 'an , Shaanxi 716000

Abstract : As the global clean energy transition progresses and the "dual carbon" goals are gradually achieved, industrial plants—being primary energy consumption hubs—face dual challenges. Traditional fossil fuel dependence results in high operational costs and carbon emissions, while distinct production processes across functional zones create diverse energy demands. Single photovoltaic configurations prove inadequate for accommodating load fluctuations and spatial constraints, leading to inefficient utilization. This study investigates key technologies for integrated high-efficiency photovoltaic systems in industrial plants, aiming to enhance power generation efficiency, stabilize power supply, reduce operational costs and carbon emissions, and provide insights for optimizing plant energy structures.

Keywords : multi-scenario demand; plant area; photovoltaic power generation system

引言

在全球大力推动清洁能源转型的形势下, 光伏发电受到了诸多关注并得以广泛应用。多场景需求指厂区内不同功能区域因生产工艺、运行时段、负荷特性形成的差异化的用能需求, 厂区光伏发电系统是适应工业负荷特性的分布式能源供应单元, 系统集成则是通过技术手段实现各个组件和场景需求的有机融合。厂区作为能源消耗的主要场所, 传统化石能源的依赖会增加运营成本, 也加大了环境压力。光伏系统应用可以缓解该问题, 但是厂区多场景负荷波动、空间限制等因素, 使得单一光伏配置不能满足高效运行的要求。集成技术破解场景适配难题, 发电效能和稳定性得到提升, 厂区能源结构改善、碳排放下降意义重大, 也为工业领域清洁能源替代出了一种可能的途径。

一、光伏发电系统概述

光伏发电系统 (photovoltaic generation system), 简称光伏 (photovoltaic), 是指利用光伏电池的光生伏特效应, 将太阳辐射能直接转换成电能的发电系统, 由太阳电池组件 (方阵)、

控制器、储能蓄电池 (组)、直流 / 交流逆变器等部分组成, 可用于边远无电地区的生活供电, 也广泛用于交通、通信石油、海洋、气象、航天等领域。光伏发电系统分为独立光伏发电系统和光伏发电并网系统, 核心部件是太阳电池组件, 具有可靠性高, 使用寿命长, 不污染环境, 既能独立发电又能并网运行等特点。

二、基于多场景需求的厂区高效光伏发电系统集成技术应用意义

（一）适配负荷波动，保障能源供应稳定性

厂区各个场所的用电负荷存在着较大差异，生产车间因为生产班次的安排出现日间高峰和夜间低谷，办公区域的负荷集中在工作时间，仓储及辅助设施需要持续低负荷供电^[1]。传统独立光伏系统，由于光伏输出受光照的影响较大，很难与多场景负荷变化相匹配，易出现供电不足或者盈余浪费的情况。集成技术用负荷预测、智能调控、储能这些手段，将光伏输出和多场景负荷动态匹配起来。负荷高峰时段，系统协调调用光伏发电和储能释放的电能，弥补供电缺口；负荷低谷时段，将盈余的光伏电力储存在储能系统中，避免弃光损失。适配性调整提高了厂区能源供应的连续性、稳定性，减少由于供电不稳定造成的生产流程的干扰，为厂区连续生产提供可靠的能源保障。

（二）优化能源结构，降低运营成本压力

工业生产是能源消耗的主要领域，厂区运营中能源成本占比较高，传统以化石能源为主的能源结构易受国际能源价格波动的影响，为企业带来较大的成本压力^[2]。根据不同场景的特点实现光伏能源精准分配和高效利用，以达到最大程度替代化石能源消耗的目的。通过集成设计将光伏系统与各个场景用电设备充分融合，实现“自发自用”为主的方式，减少从电网购电，直接降低电费。在系统集成阶段对光伏组件、储能设备和控制装置进行统筹规划、合理配置，可以防止单一设备重复建设造成资源浪费，提高设备的利用效率。光伏能源的清洁性能够帮助企业减少碳排放相关的费用，例如碳交易费用等，从多方面减轻企业的运营成本压力。

（三）提升电网适配性，助力能源协同调度

厂区属于电网的重要用电终端，其用电负荷的波动性会对电网的稳定运行造成一定的冲击，传统光伏系统并网运行时，输出的间歇性也会加大电网负荷的波动。多场景集成技术是以构建厂区内微电网系统为目的，实现光伏能源内部消化、合理调配的一种方式，进而减少对公共电网的直接冲击。集成系统中设置智能调度模块，可对各个场景的负荷以及光伏输出状态实施实时监测，并且与电网调度系统展开信息交流，在保证厂区内内部用能需求的基础上，恰当调节并网功率。电网负荷紧张的时候，系统优先保证厂区内部的用能，减少并网功率，在电网能够接纳电力时，将剩余电能平稳并入电网。协同调度能力既可以提高厂区光伏系统对电网的适应性，又可以为电网削峰填谷提供支持，促进源网荷储协同发展。

（四）推动产业升级，践行绿色发展理念

在“双碳”目标引领下，工业领域绿色转型已经成为必然趋势，厂区能源系统清洁化升级是产业转型的重要内容。根据多场景需求的光伏集成技术，对厂区闲置的屋顶、停车场顶棚等进行高效利用，实现清洁能源就地生产，就地使用，减少化石能源燃烧造成的碳排放和环境污染。系统集成过程中用到的智能控制、储能管理等技术，可以促进厂区能源管理模式从传统粗放式向精

细化、智能化转变，提高企业的能源管理水平^[3]。光伏集成系统的建设与运营可以促进光伏组件制造、储能设备研发、智能控制技术服务等一系列产业链的发展。企业利用该集成技术不仅可以提高自身绿色形象，也可以为行业内其他厂区提供一个可以借鉴的转型经验，从而推进整个工业领域绿色发展理念。

三、基于多场景需求的厂区高效光伏发电系统集成关键技术

（一）多场景适配性光伏组件选型与布局设计技术

多场景适配性设计是保证厂区光伏系统正常工作的基础，核心就是根据不同的场景空间条件、光照特征、负荷需求，选择合适的组件并进行布局。组件选择要根据效率以及环境适应性来判定，屋顶、开阔场地等不同的安装地点选择不一样的产品^[4]。屋顶场景承重有限，采用轻质高效的单晶组件620Wp级单晶组件，功率密度高，在相同面积基础上提高装机量；开阔场地无承重要求，采用大功率组件降低单位装机成本。布局设计要遵照场景光照规律、建筑结构来分区域。对生产车间的屋顶，沿屋顶坡度平行布置，不遮挡；对停车场顶棚，采用“光伏+停车”一体化设计，组件倾角取当地最佳倾角，提高采光效率。对于部分场景出现的局部遮挡问题，采用串并联优化和MPPT分区控制相结合的方式，将光伏方阵分成多个独立单元，每个单元配置一个独立的MPPT控制器，当某个单元被遮挡时，不会影响其他单元的工作。通过这项技术可以使不同的光伏组件发电效率达到设计值的较高水平，为系统整体高效运行打下基础^[5]。

（二）多源协同智能控制技术

多源协同智能控制技术是光伏系统与厂区多场景负荷精准匹配的关键，利用感知、决策、调节三个层次，将光伏发电、储能系统、各场景负荷信息整合，实现全局优化。感知层主要是采用不同传感器对光伏组件输出功率、储能的SOC（State of Charge）和各场景用电负荷进行实时采集，数据传输采用工业通信协议保证实时和可靠。决策层依靠获取的实时数据以及历史负荷曲线，用LSTM神经网络搭建负荷预测模型，提前24小时预估各个场景的负荷变动趋向，融合天气预报信息来预估光伏的输出功率^[6]。调控层按照决策结果实行具体的控制策略，采取分层控制的方式，站级层面接受电网调度指令、制订整体的功率分配方案，舱级层面根据各个场景负荷需求分配光伏与储能出力比，设备级层面控制逆变器、储能充放电模块等设备即时响应。当生产车间出现突发负荷上升的时候，系统可以在短时间之内调节储能放电功率来补充光伏供电的不足；而当办公区域的负载下降时，则及时将多余的光伏电力存储进储能系统，保障供电稳定性。

（三）高密度预制舱式集成技术

高密度预制舱式集成技术采用模块化设计，将光伏系统主要设备集成在一起，克服传统厂区光伏系统建设工期长、占地多、运维难的弊端。以标准集装箱为载体，根据厂区不同场景的装机容量需求，选用20英尺或者40英尺的预制舱，在工厂内完成逆变器、储能电池、配电柜、智能控制系统等设备的集成安装和预

调试，现场只需完成电缆连接和固定就可以投入使用^[7]。舱体内部分为三层，能量转换层装有碳化硅逆变器，开关损耗小、效率高，电能分配层用环氧树脂浇注母线，减少线缆损耗，智能控制层装有 PLC 控制柜和数据采集单元，实现集中控制。舱体上装有完备的环境适应性保障系统，采取空调、热管、风扇三者结合的温控方式，维持舱内温度在适宜范围内，保证设备的稳定运行，防护等级为 IP65，可以适应厂区粉尘多、湿度大等恶劣的环境^[8]。在某厂区的案例中发现，采用此技术以后，系统建设周期比传统方案缩短了很多，单位面积装机容量明显提高，故障处理时间缩短到 15 分钟以内，提高系统建设和运维效率。

（四）高效储能系统集成与管理技术

高效储能系统集成与管理技术是光伏间歇性、多场景负荷波动性的重要支撑，储能系统和光伏、负荷深度融合，实现电能的时空转移、优化配置。储能系统选型要适配厂区多场景需求，采用锂电池加超级电容的混合储能结构，锂电池负责长时间、大容量的电能存储，100kW/200kWh 级储能装置可以满足大多数厂区的储能需求，超级电容利用充放电速度快的特点，平抑光伏输出与负荷波动的短时冲击。集成设计采取“光储一体化”的方式，将储能系统同光伏逆变器、控制器等设备的控制联合起来，达成充放电策略的自动改进。管理技术核心就是按照 SOC（电池剩余电量占比）情况来智能地控制充放电，用 BMS（电池管理系统）实时监测每一节电池的电压、温度等参数，防止过充过放，延长电池寿命，锂电池循环寿命可达 3000 次以上。根据各个场景的负荷特征制定不同的策略，在生产车间日间负荷高峰时，储能系统先放电保证供电；夜间负荷低谷时，使用光伏盈余电力或电网谷电充电；办公区域按照工作时段调节充放电节奏，保证工作时间储能处于高 SOC 状态^[9]。这种技术有效提升光伏电能的利用率，减少弃光损失与电网购电成本。

（五）复杂环境适应性防护与运维技术

复杂环境适应性防护与运维技术针对厂区粉尘、高温、机械

振动等复杂环境，采用防护设计和智能运维保障系统来保证系统长期稳定运行。防护技术采取分级防护策略，设备级上光伏组件用防腐蚀、防冲击的钢化玻璃盖板，边框用防腐蚀的铝合金材质并做防腐处理；预制舱体用双层保温结构，内层为岩棉保温层，外层为防腐钢板，耐火极限达到 2 小时以上，并装有脉冲式自清洁滤网，当粉尘浓度超标时自动启动反吹清洁^[10]。从系统级上做凝露设计，采用湿度传感器和除湿装置联动的方式，使舱内湿度控制在 50%RH 以下，防止设备受潮。智能运维技术以数字化理念为基础，在云端建立系统虚拟模型，依靠 500 余个传感器实时采集设备运行数据，达到物理系统与虚拟模型的同步映射。利用 AI 算法对运行数据进行分析，实现故障预测和预警；配备 AR 远程运维系统，运维人员通过 AR 眼镜可以查看设备实时数据和故障位置，远程指导现场维护。这种方式降低了复杂环境为系统带来的影响，平均故障停机时间处于较低水平，提高系统的运维效率和可靠性。

四、结束语

厂区高效光伏发电系统多种场景的整合，是清洁能源在工业领域深度利用的重要方式，技术发展和推广符合全球能源转型和工业绿色升级双方面的需求，其改变了传统光伏系统场景适应性差、效率低、不能精准对接能源供应和用电需求的现状。针对行业发展而言，随着技术不断更新，光伏系统与厂区生产流程的融合度会越来越紧密，智能化、集成化的程度也会不断提高，未来需要进一步增强技术创新与场景应用相互配合的能力，促成技术标准体系的健全，让厂区转变为能源生产消费端，为达成“双碳”目的提供技术支撑。

参考文献

[1] 李晓野. 光伏发电系统现场调试技术研究 [J]. 2025(15): 1-3.
[2] 陈骏, 于国清, 陈天康. 光伏发电特性与加热电阻的关系研究 [J]. 建模与仿真, 2025, 14(10): 9.
[3] 孙东阳, 申文强, 周凯, 等. 电网同步振荡对光伏发电系统的影响分析及抑制策略研究 [J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(23): 9262-9274.
[4] 魏良如, 光超, 丁鹏. 新能源风力光伏发电系统的集成优化及电力生产效率评估 [J]. 现代建筑工程技术, 2024, 1(1): 64-66.
[5] 李春玲. 分布式光伏发电系统中的电池储能技术优化分析 [J]. 微型计算机, 2024(1): 106-108.
[6] 王光明, 谷礼君, 王陆加. 新能源光伏发电系统技术分析 [J]. Mechanical & Electronic Control Engineering, 2024, 6(3).
[7] 魏芳宜, 李艳, 田野, 等. 应用于光伏发电系统的高效双路径变换器研究 [J]. 太阳能学报, 2024, 45(4): 468-474.
[8] 张鹏, 桂思睿. 光伏发电系统故障诊断与远程监控技术创新研究 [J]. 产业科技创新, 2024, 6(5): 37-40.
[9] 李忠文, 吴龙, 程志平, 等. 参与微电网频率调节的光伏发电系统模糊自适应功率控制 [J]. 电机与控制学报, 2023, 27(9): 126-138.
[10] 刘可真, 陈雪鸥, 陈镭丹, 等. 光伏发电系统动态离散等值模型研究 [J]. 上海交通大学学报, 2023, 57(4): 412-421.

输电线路通道树障智能监测与差异化清理策略研究

丁卓群, 石珊

国网武汉供电公司输电运检分公司, 湖北 武汉 430000

DOI:10.61369/EPTSM.2025120004

摘 要： 输电线路通道树障属于造成线路跳闸、停电事故的重要原因，对于电网安全稳定运行造成严重威胁。传统的树障检测依靠人工巡检，存在效率低、成本高、隐患发现滞后的缺点。本文以输电线路通道树障治理为对象，研究智能监测技术和差异化清除方法相结合的应用途径。通过分析无人机巡检、激光雷达、在线监测系统等智能技术的应用特点，建立树障风险等级评估体系，给出基于风险等级的差异化清理时机、方式、范围选择方案。经过研究得知，智能检测可以准确发现树障隐患并且对其进行动态跟踪，差异化的清理能有效地保障电网的安全性，在运维成本和生态破坏等方面也具有明显优势。

关 键 词： 输电线路通；道树障智能监测；差异化清理策略

Research on Intelligent Monitoring and Differentiated Removal Strategy of Transmission Line Channel Tree Obstacles

Ding Zhuoqun, Shi Shan

Transmission Operation and Inspection Branch of State Grid Wuhan Power Supply Company, Wuhan, Hubei 430000

Abstract： Tree obstacles in line channels are one of the important reasons for line tripping and power outage accidents, posing a serious threat to the safe and stable operation of the power grid. Traditional tree obstacle detection on manual patrol inspection, which has the disadvantages of low efficiency, high cost, and delayed discovery of hidden dangers. This paper takes the treatment of tree obstacles in transmission line channels as object, and studies the application of intelligent monitoring technology and differentiated removal methods. By analyzing the application characteristics of intelligent technologies such as UAV patrol inspection, laser radar, and online monitoring, a tree obstacle risk level assessment system is established, and a differentiated removal timing, method, and scope selection scheme based on the risk level is given. Through the research it is known that intelligent detection can accurately detect tree obstacle hidden dangers and dynamically track them, and differentiated removal can effectively guarantee the safety of the power grid, and it also has advantages in operation and maintenance costs and ecological damage.

Keywords： transmission line channel; tree obstacle intelligent monitoring; differentiated removal strategy

引言

输电线路是电网能源输送的主要通道，输电线路的安全稳定运行关系到社会经济发展和民生。输电线路通道内树木生长超出安全距离，在大风、暴雨、冰雪等恶劣天气时容易引起线路对地放电、相间短路等故障，引发大面积停电事故。据统计每年因为树障造成的输电线路跳闸事故占总跳闸数的30%以上，并且有逐年上升的趋势。传统的树障治理采取“一刀切”的全范围清理方式，运维成本高，容易与林权所有者产生矛盾，造成不必要的生态破坏。随着智能电网的建设，需要引入智能监测技术，建立科学高效的差异化清理方法，实现树障隐患早发现、早评估、早治理，由被动抢修到主动预防，提高输电线路通道树障治理的精确性以及经济性。

一、输电线路通道树障概述

（一）树障定义与分类

输电线路通道树障指的是在输电线路的保护区范围内，由于

树木和竹子等植物生长超过国家及行业的安全规定距离，对线路安全运行构成威胁的现象。按照植物种类分乔木类树障（杨树、柳树、松树等），灌木类树障（酸枣丛、荆条等），竹类树障（毛竹、慈竹等）；按照风险状况分紧急风险树障（已突破安全距离，

作者简介：

丁卓群（1994.05—），男，汉族，湖北省武汉市人，硕士，工程师，研究方向：输电运检；

石珊（1997.10—），女，汉族，湖北省武汉市人，硕士，研究方向：变电运维。

随时发生故障），高风险树障（距离安全阈值不足 1 米，短时间内会突破），中风险树障（距离安全阈值 1－3 米，中期有风险），低风险树障（距离安全阈值 3 米以上，长期监控即可）^[1]。

（二）传统树障监测方式及局限性

传统的树障监测大都是依靠人工巡查、地面望远镜观测。人工巡检需要运维人员沿线路步行或者乘坐车辆巡查，对通道内树木生长情况进行目测并做记录。该方式存在的明显缺点有：一是效率低，在山区、林区等复杂地形条件下，每人每天巡检里程为 5-8 公里，很难实现全面高频次的检测；二是精度低，人眼测量无法准确测量出树木到电线杆之间的距离以及树木生长速度，容易造成隐患漏判、误判；三是时效性差，人工巡查周期长，一般为一到三个月，不能及时发现突然长出来的树状隐患；四是安全性低，在山区、高空作业时存在坠落、被野生动物攻击的安全风险^[2]。

（三）树障智能监测技术发展现状

近几年来，智能监测技术在输电线路树障监测中得到快速的应用。无人机巡检技术依靠它自身灵活、敏捷的特点，能在复杂多样的地形上穿行，携带高清摄像头、红外热像仪等设备进行树障图像采集，经过图像识别算法来判定树障的风险等级；激光雷达（LiDAR）技术发射出激光脉冲以获取树木的三维坐标，进而精确测出树与线路间的距离及其生长趋势；在线监测系统会在杆塔上安放传感器，可以对树木的生长数据和气象情况实行实时的采集，所以可以实现树障隐患的 24 小时动态监控^[3]。目前，智能监测技术已经由单一的监测发展为“空天地”一体化的监测，为树障的精益化治理打下了技术基础。

二、输电线路通道树障智能监测与差异化清理的意义

（一）保障电网安全稳定运行的核心需求

电网安全是能源安全的一个组成部分，由树障引起的事故导致的线路跳闸将会对电网运行的连续性造成影响。智能监测技术可以做到树障隐患的早发现、准定位，使运维人员随时了解隐患情况；差异化清理策略依据树障风险等级来制定清理方案，先清除高风险隐患，防止发生事故。借助“智能监测+差异清理”，把树障隐患消灭在萌芽之中，削减线路跳闸几率，保证电网在复杂环境下的安全稳定运行，优化供电可靠性。

（二）降低运维成本的现实选择

传统的“一刀切”树障清理方式造成了严重的浪费，对于低风险、无风险树木的过度清理造成了大量的人力、物力和资金的浪费。智能监测可以减少人工巡检工作量、提高巡检效率，降低巡检成本；差异化清理通过精准划分治理范围，避免无效清理，减少树木砍伐数量和清理费用。据算，采用智能监测和差异化清理模式以后，输电线路树障运维成本能够下降 40% 以上，明显改善运维资金的利用效率，达成电网运维降本增效的目的^[4]。

（三）践行生态环保理念的重要举措

树木对于涵养水源、保持水土、净化空气、维护生态平衡有重要的作用，传统的树障清理方式容易造成生态破坏。智能监测可以准确识别出对线路安全构成威胁的树木，避免出现宁可错砍

一千，也不能放过一棵的粗放式治理；差异化清理根据树木的种类、生态价值制定出不同的清理方案，对于生态价值较高的树木采用移栽、修剪等方式代替砍伐，最大程度上保护通道内的植被。电网安全和生态保护在模式之下可以一同发展，践行绿水青山就是金山银山的理念。

三、输电线路通道树障智能监测与差异化清理策略

（一）树障智能监测数据采集与处理

树障智能监测数据采集要创建“空天地”一体化监测网络。空中层面采用多旋翼和固定翼无人机结合的方式，多旋翼无人机载 5000 万像素高清摄像头、红外热像仪，对山区、跨河等复杂地段进行近距离细致巡视，固定翼无人机载激光雷达模块，实现百公里线路通道快速全覆盖扫描，采集频率根据风险等级调整，高风险区段每月 1 次，中低风险区段每季度 1 次。地面层面针对重点杆塔设置激光测距传感器以及气象站，对树木和导线距离、风速、温度、降水等信息进行每五分钟的数据采集^[5]。数据传输使用的是 5G 加边缘计算的方式，现场完成图像预处理、筛选工作，只把异常数据和重要图像上传到云端平台。数据处理阶段用 YOLO 目标检测算法识别树木种类，用点云数据拟合树木生长曲线，结合历史数据预测生长速度，最后生成包含树障位置、类型、风险等级、生长趋势的可视化监测报告，为后续评价提供准确的数据支持^[6]。

（二）树障风险等级评估体系构建

树障风险等级评定体系以科学量化、全面覆盖为原则，选取五个主要评价指标。一是距离指标，用激光雷达测量的树木顶端最外侧枝干与导线的最小直线距离，按照距离安全阈值的比重来量化计分；二是生长速度指标，通过连续 6 个月的监测数据计算月平均生长量，速生树种（杨树、毛竹）的权重高于慢生树种（松树、柏树）；三是树木类型指标，乔木权重最高（0.3），竹类次之（0.25），灌木最低（0.1）；四是线路重要性指标，特高压线路权重为 0.3，500kV 线路权重为 0.25，220kV 线路权重为 0.2，110kV 及以下线路权重为 0.15；五是环境风险指标，根据历年气象数据的统计结果，将台风、暴雨、覆冰等恶劣天气多发的地区权重提高 0.1 到 0.2。利用层次分析法确定各个指标的权重，用模糊综合评价法构建隶属度矩阵，将评价结果分成四个风险等级，紧急风险（≥ 0.8 分）、高风险（0.6-0.79 分）、中风险（0.4-0.59 分）、低风险（< 0.4 分），形成标准化的评价流程，保证评价结果的客观公正^[7]。

（三）差异化清理时机选择

清理时点依据风险等级及环境变迁而定。紧急风险树障采取即时响应的方式，收到监测预警之后，运维队伍 2 小时内到达现场，6 小时内完成清理作业，优先采用机械作业缩短处置时间，防止故障发生。高风险的树障实行限时处理，清理窗口期控制在 15 日内，根据树木生长的特点进行选择，落叶树避开落叶期，常绿树避开高温干旱期，避开暴雨、大风等恶劣天气，作业前提前查看气象预报，保证施工的安全。中风险树障“季节化清理”，春

季（3-4月）清理萌芽生长的树木，夏季（6-7月）清理速生树种，秋季（9-10月）完成全年收尾清理，避开冬季低温、夏季高温。低风险树障实行周期性观测，半年检测一次，根据树种生长速度来调整测量时间间隔，快速种类缩短到3个月测一次。在迎峰度夏、春节保电等特殊时段前，对所有的高中风险树障开展专项排查工作，提前完成清理工作，保证供电安全^[8]。

（四）差异化清理方式制定

根据不同的风险等级、场景来制订个性化的清理方式。紧急风险树障采取“彻底清除法”，对超出安全距离的树木全部砍掉，枝干及时运走，防止倒伏碰到导线，砍伐后在树桩上喷洒防萌芽剂，阻止二次生长。高风险树障采用精准修剪法，对不能砍伐的位置关键的树木，用高空作业车修剪靠近导线的枝干，修剪后枝干与导线距离不小于安全阈值的1.2倍；成片树木采用定向砍伐方式，控制树木倒向远离线路侧。中风险树障用生态友好型方式处理古树名木、公益林树木，由林业部门组织移栽，选择春秋季节带土球移栽，成活率不低于90%；普通树木疏枝修剪，保留主体枝干，控制生长高度。低风险树障采用“生长调控法”，喷施环保型生长抑制剂，抑制顶端生长，有效期1-2年，减少清理次数；对偏远山区低风险树障采用“自然隔离”方式，清理树下藤蔓、低矮灌木，扩大安全缓冲带。同时建立林权沟通机制，提前与林权所有者沟通协商，签订清理协议，保障清理工作开展^[9]。

（五）清理效果评估与动态调整

清理效果评价实行“三维一体”全流程监管。安全效果评定采取无人机巡检+现场实测，清理完毕后3日内展开无人机复查，测定树木同导线的距离，保证符合安全标准，没有遗漏的危险，按月统计线路跳闸率，对比清理前后线路跳闸率的数据，评价安

全改善情况。经济效果评价，计算里程清理费用、人工费、设备损耗等，用传统清理方法对比，分析成本降低率，核算投资回报率。生态效果评估调查清理区域植被覆盖率、野生动物活动情况，评估树木砍伐对生态环境的影响，对生态破坏较大的方式及时优化。评估周期安全评估每月1次，经济和生态评估每季1次。在动态调整方面，建立评价结果反馈机制，对安全效果不好地区域增加监测频率，改善清修办法；对成本高方案改换作业方式，机械化代替人工降低费用；根据树种生长周期和天气变化每年修改评价指标及整治时间，把典型案例归入治理数据库中形成监测-评估-清理-反馈-优化的闭环管理体系，使治理水平得到不断提高^[10]。

四、结束语

综上所述，输电线路通道树障智能监测与差异化清理是电网精益化运维的重要内容，对保障电网安全稳定运行、降低运维成本、保护生态环境具有重要意义。本文依托“空天地”一体化智能监测网络，搭建树障风险等级评价体系，给出依循风险等级而定的差别化清理时刻、手段和结果评判策略，塑造起“监测-评判-清理-回馈”的全过程治理形式。经过实践证明，此模式可解决传统树障治理效率低、成本高、生态破坏大的问题。人工智能、大数据、5G等技术发展之后，智能监测技术在树障治理中需要更深层次、更广泛地开发和利用，改进风险评价模型及差别化清除策略，使树障治理朝着精准的智能化管理方向前进，为安全、高效、绿色智能电网的创建保驾护航。

参考文献

[1]曾令宇,张海林,曾滢,等.城市道路无障碍环境提升策略研究——以广州市主城区为例[J].交通工程,2024,24(10):25-31

[2]焦海民,张栋,韩萍.基于影响权重的城市道路无障碍出行设施改善对策[J].城市道桥与防洪,2024,(10):28-31+12.

[3]李刚,杜亚波,杨庆贺,等.基于多尺度特征融合和注意力机制的矿区道路障碍检测[J].中国安全科学学报,2024,34(09):87-98.

[4]陈琪玲,韩亚楠,周梓艾,等.城市道路无障碍环境轮椅使用者出行偏好与适应性道路改善策略研究[J].景观设计学(中英文),2024,12(04):26-45.

[5]陈鹏.市政道路天桥及地道无障碍设计研究[J].工程建设与设计,2024,(14):71-73.

[6]李海涛.城市道路工程设计中无障碍设计的实施分析[J].产品可靠性报告,2024,(04):86-87.

[7]李翔宇,张雯宝.市政道路设计中的无障碍技术研究[J].交通世界,2024,(12):83-85.

[8]陈森,余新梁.市政道路无障碍设施的应用原则及设计要点[J].运输经理世界,2024,(03):40-42.

[9]徐志红.城市道路无障碍设施优化提升策略研究[J].城市道桥与防洪,2024,(01):78-80+13-14.

[10]于永亮.无障碍设计理念在市政道路设计中的应用[J].运输经理世界,2024,(02):41-43.

虚拟电厂模式下电力营销市场化定价机制创新研究

朱风华¹, 谢官山¹, 张于雷²

1. 国网荆州供电公司城区供电中心, 湖北 荆州 434000

2. 荆州三新供电服务有限公司, 湖北 荆州 434400

DOI:10.61369/EPTSM.2025120005

摘 要 : 虚拟电厂是把分布式能源、需求响应资源聚合起来形成的新型电力系统形态,是推进电力市场化改革、新能源消纳的重要途径。目前虚拟电厂参与电力营销的定价机制还存在着基准单一、协同不足、激励失衡等问题,限制了其市场化运作的效果。本文以虚拟电厂“源网荷储”协同性为出发点,对电力营销市场化定价现状及瓶颈进行分析,从定价基准、定价模型、激励机制、监管保障四个方面提出创新性策略,试图解决传统定价和虚拟电厂灵活调度、多元价值不匹配的问题。研究可以给虚拟电厂的市场竞争力提升,电力市场化定价体系的完善提供理论参考,助力能源转型以及“双碳”目标实现。

关 键 词 : 虚拟电厂模式; 电力营销市场化; 定价机制创新策略

Innovative Research on Market-based Pricing Mechanism under Virtual Power Plant Mode

Zhu Fenghua¹, Xie Guanshan¹, Zhang Yulei²

1. Urban Supply Center of Jingzhou Power Supply Company of State Grid, Jingzhou, Hubei 434000

2. Jingzhou Sanxin Power Supply Service Co., Ltd. Jingzhou, Hubei 434400

Abstract : Virtual power plant is a new form of power system aggregates distributed energy and demand response resources, and it is an important way to promote the reform of power marketization and new energy consumption. At present, there are still problems such single benchmark, lack of coordination and imbalance of incentives in the pricing mechanism of virtual power plant participating in power marketing, which limits the effect of its market-oriented operation. This takes the coordination of "source, network, load and storage" of virtual power plant as the starting point, analyzes the current situation and bottleneck of market-oriented pricing of power, and proposes innovative strategies from four aspects: pricing benchmark, pricing model, incentive mechanism and regulatory guarantee, trying to solve the problem of mismatch between traditional pricing and flexible dispatching of power plant and multi-value. The research can provide theoretical reference for the improvement of market competitiveness of virtual power plants and the improvement of power market pricing system, and help the energy and the realization of "double carbon" goals.

Keywords : virtual power plant mode; power marketing marketization; pricing mechanism innovation

引言

在双碳目标的指引以及电力市场化的深化之下,分布式光伏、风电等新能源大量接入,给传统的电力系统源随荷动模式带来严峻的挑战。虚拟电厂利用先进的信息技术聚合分布式能源、储能设备、可调负荷等资源,达到荷随源动的灵活调度,是解决新能源消纳难题、提高电力系统稳定性的主要途径。但是,目前电力营销市场化定价机制大多是根据传统发电主体设计的,不能很好地体现虚拟电厂的多种价值和调节能力,造成虚拟电厂市场参与积极性低、收益回报不确定。本文以虚拟电厂模式下电力营销市场化定价机制创新为研究内容,从分析定价现状入手,提出创新的意义,提出具体的策略,为虚拟电厂深度参与市场竞争、构建高效协同的电力市场生态提供支持,对推动电力行业高质量发展有重要的现实意义。

一、虚拟电厂与电力营销市场化定价机制概述

（一）虚拟电厂的核心内涵与运作逻辑

虚拟电厂并不是真实的电厂，它是以信息技术为核心，利用通信网络和智能调度系统，把地理上分散的分布式能源、储能装置、工业可调负荷、电动汽车充电桩等聚合起来，形成具备“源网荷储”协同能力的虚拟发电主体。其运行逻辑是以聚合、调度、交易这三个环节为核心展开的：通过资源聚合来突破分布式能源单机容量小、出力不稳定的局限性；通过智能调度来达到资源优化配置、供需平衡调节的目的；通过参与电力市场交易来将多元价值转化成经济利益^[1]。

（二）电力营销市场化定价的基本框架

电力营销市场化定价以市场决定价格为原则，以成本导向、价值导向为双重原则，包含上网电价、输配电价、销售电价三个主要部分。目前我国电力市场化定价体系已经基本建立起来，形成了中长期交易电价、现货市场电价、辅助服务电价等多元化的定价体系。其主要目的就是利用价格信号来引导资源的优化配置，促使市场主体参与到电力供需调节中来，同时也要保证电力系统的安全、经济以及可持续^[2]。

（三）虚拟电厂模式下定价机制的发展现状

随着全国各地对虚拟电厂试点的推行，虚拟电厂的定价机制也取得了一定的成果。部分地区通过中长期交易、辅助服务市场等途径，让虚拟电厂参与到电价形成当中，但是总体上还是处于起步阶段。目前定价模式以成本加成为主，结合少量调节服务溢价，还没有形成成熟的价值量化体系。在试点实践中，虚拟电厂多参与调峰、备用等辅助服务定价，电能量市场定价话语权较弱，多元价值不能完全体现^[3]。

二、虚拟电厂模式下电力营销市场化定价机制创新的意义

（一）助力能源转型，提升新能源消纳效能

创新定价机制可以依靠价格信号来聚合更多的分布式新能源资源，从而解决新能源“并网难、消纳难”的问题。合理的定价策略可以促进虚拟电厂更好的进行调度，减缓新能源出力的波动，提高电力系统接纳新能源的能力，有利于风电、光伏等清洁能源在能源中占比的提升，对实现“双碳”目标起到重要的作用。

（二）优化资源配置，降低电力系统成本

虚拟电厂的主要优势就是把分散的闲置资源整合在一起产生规模效应，而创新定价机制可以发挥出这一优势的价值。精确定价可以准确体现各种资源的边际成本与调节价值，促使电力资源流向效益更高的地方，削减电力系统中不必要的备用容量投入，节约发电侧和电网侧的投资支出，而且依靠需求响应定价来推动用户错峰用电，进而优化整个电力系统的运行状况^[4]。

（三）完善市场体系，激发电力市场活力

虚拟电厂作为电力市场新的主体，其定价机制创新属于电力市场化改革的内容。建立适合于虚拟电厂的定价机制，可以丰富

电力市场交易品种以及定价方式，打破传统发电主体对于市场的垄断局面，形成多元主体平等竞争的市场环境。同时定价机制灵活可以提高市场对供需变化的反应能力，提高电力市场韧性与活力。

三、虚拟电厂模式下电力营销市场化定价机制创新策略

（一）构建多元价值导向的定价基准体系

多元价值导向的定价基准体系的构建，要冲破传统单一起点为成本的定价思路，表现虚拟电厂的多种价值。应该建立以基础电量和调节服务双维度的定价基准，基础电量参照电力现货市场实时价格来计算，保证虚拟电厂基础收益的稳定性，调节服务价格依据调峰、备用、调频等不同服务类型的技术要求、响应速度、调节效果而异，对响应更快、调节更准的服务适当提高溢价。引入新能源消纳价值系数，以虚拟电厂聚合的新能源发电量、消纳率、弃电率等指标作为核算依据，对高消纳能力的虚拟电厂给予额外的价格补贴，引导其加大新能源资源聚合力度。结合区域电力供需差异实行分区域定价机制，在电力供需紧张的负荷中心区域，适当提高调节服务定价水平，激励虚拟电厂优先向该区域提供调节资源；在电力盈余的新能源富集区域，侧重设置新能源消纳激励定价，鼓励虚拟电厂多渠道消纳本地新能源。建立动态调整机制，依据电力市场供需状况变化、新能源出力波动情况、国家能源政策导向等，按季度或者半年度修改定价基准参数，使价格信号能够及时、准确的反映市场实际状况，提高定价机制的适应性和灵活性^[5]。

（二）创新智能技术驱动的定价模型构建

创新智能技术驱动的定价模型，要依靠先进的技术手段来解决虚拟电厂定价中多主体、多维度、动态化的核算难题^[6]。以大数据技术为基础，创建多主体成本核算模型，包含分布式能源发电成本，储能设备运维成本，智能调度系统运营成本，用户需求响应成本等诸多方面，利用数据清洗，关联分析等方法，对各个参与方的成本予以精确核算，给定价赋予扎实的数据根基。采用人工智能算法对定价预测模型进行优化，用机器学习、深度学习等算法分析历史电价数据、气象预测数据、负荷变化数据和政策调整数据等^[7]。建立多因素耦合的价格预测模型，提高虚拟电厂参与市场交易价格预判能力，为交易决策提供科学依据。利用区块链技术创建透明的定价交易平台，把定价核算依据、交易过程数据、收益分配情况等上链存储，保证数据的不可篡改和实时共享，有效防止定价过程中信息不对称和道德风险的发生，保障各个参与主体的公平权益，降低交易摩擦成本^[8]。建立源网荷储协同定价模型，把电网安全运行约束、发电侧出力特性、用户侧用能需求、储能设备调节能力等各方面因素纳入定价考虑范围，采用多目标优化算法实现发电侧、电网侧、用户侧、储能侧的利益平衡，使定价机制可以促进各主体协同联动，提高整个电力系统的运行效率和稳定性^[9]。

（三）完善供需互动的激励型定价机制

完善供需互动的激励型定价机制，就是要依靠差异化的定价

刺激每一个参与者的积极性，形成“供需互动、互利共赢”的态势。按照用户削减负荷量、响应启动速率、连续响应时长、调节准确度等重要指标，将需求响应分为紧急响应、重要响应、常规响应等等级，不同等级采取不同的收费标准，给响应速度快、调节效果好的用户较高的响应报酬，促使用户更深层次的参与到需求响应中来。设计一个中长期合约和现货市场联动的定价激励模式，使得虚拟电厂和电力用户、电网公司可以签订中长期交易合同，固定基本电量的交易价格，保证主要收入稳定，同时也支持虚拟电厂参加电力现货市场交易，从现货市场价格变动中获得额外收益，实现收益稳定和市场灵活之间的平衡。采用阶梯式奖励定价机制，为虚拟电厂设置年度调节服务总量、新能源消纳总量、用户响应参与户数等阶梯目标，达到基础目标后给予基础奖励，超出基础目标之后按超额比例给予递增式奖励，激励虚拟电厂不断扩大资源聚合规模、提高服务能力。形成跨主体利益共享的定价机制，确定虚拟电厂运营方、分布式资源所有者、参与需求响应的用户等主体的收益分配比例，分配比例根据各主体投入的资源规模、承担的风险程度、提供的服务贡献大小进行动态调整，保证各参与方均分定价创新带来的收益，形成稳定的长期合作关系^[10]。

（四）健全规范有序的定价监管保障机制

健全规范有序的定价监管保障机制，对于保证定价机制创新平稳落地，市场公平有序运行有着很重要的支撑作用。建立定价审核监管机制，由能源监管部门、电力交易中心、行业协会组成定价审核组，对虚拟电厂定价方案、成本核算报告、收益分配明细等进行严格的审核，审核定价依据的真实性、定价标准的合理性、收益分配的公平性，严禁采用价格垄断、恶意低价竞争、虚报成本骗取收益等非法手段。完善信息披露制度，确定虚拟电厂

信息披露的内容清单，包括资源聚合规模、各类型资源占比、调度执行情况、定价核算参数、收益分配结果等主要信息，要求虚拟电厂定期通过电力交易平台披露，保障市场其他主体知情权和监督权，提高定价过程的透明度。创建风险对冲监管体系，鼓励虚拟电厂借助电力期货，期权等衍生品工具来对冲价格波动风险，而且电力交易中心要搭建起价格异常波动警报体系，当市场价格脱离正常范围的时候马上发出警报，随即采取临时限价，增多交易频率等调控手段，防止市场价格剧烈波动造成系统性风险。创建跨部门合作监管机制，将能源监管、市场监管、工业和信息化、发展和改革等部门监管职能加以整合，确定各部门在定价监管中的作用划分，创建监管信息共享平台以及联合执法机构，达成定价制定、交易实施、利益分配、违规处置全程的监管闭环，给定价机制革新打下牢固的制度基础，保证电力市场公平竞争格局。

四、结束语

综上所述，虚拟电厂模式下电力营销市场化定价机制创新，是能源转型和电力市场化改革的必然要求，也是释放虚拟电厂多元价值、构建新型电力系统的支撑。本文通过对定价机制现状及瓶颈的分析，从定价基准、模型构建、激励机制、监管保障四个方面提出创新策略，为解决当前的定价难题提供可行的路径。随着技术不断发展、市场逐步完善，虚拟电厂定价机制还要进一步加强多主体协同、精准价值量化、风险防控，不断发挥价格信号的引导作用。依靠定价机制不断更新，能帮助虚拟电厂更好的进入电力市场之中，促进整个电力体系向清洁、高效、市场的方向变化，给社会经济发展提供坚实的能源支撑。

参考文献

[1]于连祥,董子君,齐剑,等. 电力市场背景下供电企业电力营销策略创新 [J]. 电力设备管理, 2024, (24): 273-275.
[2]孟丽娟. 电力市场改革下的供电企业营销管理措施 [J]. 现代企业文化, 2023, (36): 13-16.
[3]赵伟, 蒋炜. 浅论以市场为导向的电力营销管理模式及创新 [J]. 营销界, 2023, (24): 20-22.
[4]赵雨. 电力市场化背景下电力营销管理与优质服务措施研究 [J]. 电气技术与经济, 2023, (09): 240-242.
[5]顾阿龙. 新形势下电力市场化过程中电力营销的创新模式思考 [J]. 电气技术与经济, 2023, (07): 208-210.
[6]张强, 沈映鑫. 远程用电检查技术应用于电力营销中的重要性分析 [J]. 电工技术, 2024, (S2): 466-468.
[7]张健. 物联网与大数据融合的电力营销系统研究 [J]. 中国宽带, 2024, 20(12): 147-149.
[8]马成杰. 电力营销信息系统提升客户服务体验的方法研究 [J]. 信息与电脑, 2024, 36(24): 27-29.
[9]孔德勇. 基于大数据技术的电力营销群体划分研究 [J]. 信息与电脑, 2024, 36(24): 154-156.
[10]任超. 基于电力营销技术的电力设备制造与营销系统设计 [J]. 城市建筑空间, 2024, 31(S2): 418-419.

浅谈路由器的统一配置与调试方法

魏真艳, 王琪*, 邵季飞, 李明月, 李怡然, 张丽霞, 王玥, 王丹丹, 江颖, 张庆军, 焦海龙, 徐明

国网河南省电力公司超高压公司, 河南 郑州 450000

DOI:10.61369/EPTSM.2025120006

摘 要 : 研究路由器的统一配置与调试方法, 目前路由器的调试与配置方法可以分为本地配置、远程配置和自动配置三大类。其中本地配置通过命令行界面配置以及图形用户界面配置, 远程配置则通过使用网络管理软件配置和基于云端的配置管理。自动配置则通过即插即用配置和基于零配置技术的配置。因当前路由器存在厂家繁多, 型号种类多的问题, 不同厂家的设备在配置和功能上存在差异, 调试过程中需要针对不同设备进行适配, 调试厂家使用自己安装的调试工具存在安全漏洞、木马、病毒等不安全因素。所以, 本文研究路由器的统一配置与调试方法, 可以供给现场运维人员使用统一的、安全的调试设备保证路由器安全稳定运行, 保障网络安全、涉网设备安全及电网安全。

关 键 词 : 路由器; 统一; 配置; 调试

Brief Discussion on the Unified Configuration and Debugging Methods of Routers

Wei Zhenyan, Wang Qi*, Shao Jifei, Li Mingyue, Li Yiran, Zhang Lixia, Wang Yue, Wang Dandan,

Jiang Ying, Zhang Qingjun, Jiao Hailong, Xu Ming

State Grid Henan Electric Power Company UHV Company, Zhengzhou, Henan 450000

Abstract : Research on unified configuration and debugging methods for routers. At present, the debugging and configuration methods of routers can be divided into three categories local configuration, remote configuration and automatic configuration. Among them, local configuration is configured through command line interface and graphical user interface, remote configuration is configured by using network management software and cloudbased configuration management, and automatic configuration is configured through plug-and-play configuration and configuration based on zero-configuration technology. Due to the current situation of multiple manufacturers and various models routers, there are differences in configuration and function between different manufacturers' equipment. In the process of debugging, it is necessary to adapt to different equipment. The use of debugging tools by the manufacturer has unsafe factors such as security vulnerabilities, Trojans, and viruses. Therefore, this paper studies the unified configuration and debugging methods of routers, which can provide onsite operation and maintenance personnel with unified and secure debugging equipment to ensure the safe and stable operation of routers and safeguard network security, network equipment security, and power grid security.

Keywords : router; unified; configuration; debugging

前言

路由器在计算机网络中起着至关重要的作用, 路由器能够连接多个不同的网络, 实现局域网 (LAN) 与局域网、局域网与广域网 (WAN) 之间的互联互通。路由器会根据网络地址 (如 IP 地址) 来转发数据包。它通过查找路由表, 为每个数据包选择最佳的传输路径, 以确保数据能够准确、高效地到达目的地。当网络拓扑发生变化或出现故障时, 路由器能够自动调整路由, 重新选择合适的路径, 保证数据传输的连续性。路由器通常具备 NAT 功能, 它可以将局域网内私有 IP 地址转换为合法的公网 IP 地址, 使得多个内部网络设备能够共享一个公网 IP 地址访问互联网。这不仅解决了公网 IP 地址短缺的问题, 还增强了网络的安全性, 隐藏了内部网络的拓扑结构。路由器支持访问控制列表 (ACL) 等安全功能, 通过设置规则, 可以限制特定 IP 地址、端口或协议的数据包进出网络, 从而防止未经授权的访问, 保护网络的安全。此外, 一些路由器还具备防火墙功能, 能够检

作者简介: 魏真艳 (1995.08-), 女, 汉族, 河南周口人, 工程师, 硕士研究生, 主要研究方向: 电网调度自动化;

通讯作者: 王琪 (1991.09-), 男, 汉族, 河南永城人, 高级工程师, 硕士研究生, 主要研究方向: 继电保护及电网调度自动化。

测和阻止常见的网络攻击，如黑客入侵、病毒传播等。^[1]但是在路由器的现场调试过程中，设备需连接到现网中进行配置。由于调试人员工作水平存在差异，会出现部分人员不清楚调试配置的流程，或者不熟悉方法输入错误的调试命令代码，会给电力数据网络运行带来安全隐患等问题。所以，目前需要重点研究路由器的统一配置与调试方法，可以供给现场运维人员使用统一的、安全的调试设备保证路由器安全稳定运行，保障网络安全、涉网设备安全及电网安全。^[2]

一、路由器的统一配置与调试方法重点研究内容

路由器的统一配置与调试方法研究重点内容为协议与标准的兼容性、调试命令的智能提示识别、标准化作业流程，研究如何支持多种网络协议（如 SNMP、CLI、REST API 等），确保工具能够与不同厂商的设备进行兼容和交互；研究自动化配置、监控和故障处理功能利用机器学习和数据技术分析技术自动检测异常并进行初步处理；同时设计简洁明了的图形用户界面，使得用户能够方便的进行设备配置和监控，实现一键配置和批量处理功能以提升用户效率。^[3]

二、路由器传统调试方法及配置流程^[4]

（一）首先检查路由器硬件配置及软件版本。

硬件需满足2个主控板、2个2端口2M接口板卡，2个3层4端口以太网板卡，2个交流电源模块，而且软件版本应过检。

（二）路由器配置

配置电脑连接路由器 console 接口，启动配置界面，键入 syste-view 进入全局模式，可输入后按 Tab 键，路由器会自动补全命令，键入 quit 为退出。

```
<huawei>system-view
```

命令执行后则会进全局配置模式，如下：

[huawei] 进入全局配置模式后需更改路由器名称，输入 sys-name+ 名称即可。

配置实时、非实时 vpn 实例。

开启实时 vpn 实例

```
ip vpn-instance vpn-rt
```

```
ipv4-family
```

设置 RD 值

```
route-distinguisher XXXXX:X
```

设置 RT 值

```
vpn-target XXXXX:XXX export-extcommunity
```

```
vpn-target XXXXX:XXX import-extcommunity
```

开启非实时 vpn 实例

```
ip vpn-instance vpn-nrt
```

```
ipv4-family
```

设置 RD 值

```
route-distinguisher XXXXX:X
```

设置 RT 值

```
vpn-target XXXXX:XXX export-extcommunity
```

```
vpn-target XXXXX:XXX import-extcommunity
```

路由器上联接口配置 IP 地址和 MPLS 参数

配置虚拟接口 IP 地址，此接口 IP 地址为路由器 ID，也是 OSPF、BGP 协议路由 ID。

进入虚拟接口

```
interface loopback1
```

设置接口 IP 地址及掩码

```
ip address X.X.X.X XXX.XXX.XXX.XXX
```

配置 MPLS 参数

设置路由 ID 为 loopback1 地址

```
mpls lsr-id X.X.X.X
```

全局开启 MPLS 服务

```
mpls
```

```
mpls ldp
```

配置上联接口参数

进入互联接口

```
interface Serial X/X/X/X
```

设置互联接口 ip 地址掩码

```
ip address X.X.X.X X.X.X.X
```

开启互联接口 MPLS 服务

```
mpls
```

```
mpls ldp
```

配置与交换机互联端口，并绑定 VPN 实例

配置实时交换机接口

进入以太网板卡子接口

```
interface Ethernet X/X/X/X
```

子接口绑定 vlan

```
dot1q termination vid XX
```

绑定 VPN 实例

```
ip binding vpn-instance vpn-rt
```

设置与交换机互联接口 IP 地址

```
ip address X.X.X.X X.X.X.X
```

配置非实时交换机接口

进入以太网板卡子接口

```
interface EthernetX/X/X/X
```

子接口绑定 vlan

```
dot1q termination vid XX
```

绑定 VPN 实例

```
ip binding vpn-instance vpn-rt
```

设置与交换机互联接口 IP 地址

```
ip address X.X.X.X X.X.X.X
配置 OSPF 路由协议参数
开启 OSPF 服务、设置 OSPF 协议路由 ID
ospf 1 router-id X.X.X.X
设置区域号
area 1
宣告路由信息
network X.X.X.X X.X.X.X
network X.X.X.X X.X.X.X
配置 BGP 路由协议参数
举例地址 X.X.X.X 的 IP 地址为对端设备 loopback1 接口地址
开启 BGP 协议
bgp XXXXX
设置邻居 IP 地址
peer X.X.X.X as-number XXXXX
设置路由协议源接口
peer X.X.X.X connect-interface LoopBack1
设置 ipv4 单播地址族视图
ipv4-family unicast
使能与邻居交换路由信息
peer X.X.X.X enable
进入 vpnv4 地址族视图
ipv4-family vpnv4
使能与邻居交换路由信息
peer X.X.X.X enable
VPN-NRT 实例与 ipv4 地址族关联
ipv4-family vpn-instance vpn-nrt
引入直连路由
import-route direct
VPN-RT 实例与 ipv4 地址族关联
ipv4-family vpn-instance vpn-rt
引入直连路由
import-route direct
配置 ssh 远程管理
生成 RSA 密钥对
rsa local-key-pair create
配置虚拟终端
user-interface vty X X
设置为用户名密码模式登陆
authentication-mode aaa
允许 ssh 和 terminal 服务使用
protocol inbound ssh terminal
创建用户及密码
aaa local-user (用户名) password irreversible-cipher (密码)
设置用户权限为 XX
local-user (用户名) privilege level XX
```

允许 ssh 和 terminal 服务使用此用户

```
local-user (用户名) service-type ssh terminal
```

指定用户的认证方式为 password

```
ssh user (用户名) authentication-type password
```

用户绑定服务为 ssh

```
ssh user (用户名) service-type stelnet
```

开启 ssh 服务

```
stelnet server enable
```

验证

通过 ping 命令测试互联地址

```
ping X.X.X.X
```

通信正常说明对上链路正常，可长 ping 查看延迟、丢包率，延迟一般 60 毫秒以下，并且无丢包。如果延迟大，丢包严重，需要先检查站内物理链路，站内无异常时再对上逐级检查。

（三）路由器上架更换流程

设备更换前需向调度专网运维联系获取设备原配置信息，根据原设备配置信息完善上述配置流程。^[5]

联系调度自动化报开工，申请更换路由器，更换路由器会造成两级调度单平面通讯中断。待批准后拆除原有设备，将新设备上架。

检查路由器上联通道通信正常后，与调度专网运维联系，测试设备是否可正常管控。路由器更换完成后，核实各业务通信是否正常。

三、路由器的统一配置与调试方法研究的关键和难点

研究路由器的统一配置与调试方法的关键是是标准化和兼容性，网络环境中常常有来自不同厂商的路由器和设备，统一调试工具必须能够支持不同的通信协议和标准（如 SNMP、CLI、REST API 等）^[6]；确保工具能兼容各种路由器的硬件和软件版本。另外一点就是安全性，实施强有力的身份验证、访问控制和数据加密，确保配置和监控数据的安全性；实时监控和报告网络中的安全风险，防止潜在的攻击和入侵。还有一点是自动化和智能化，能够实现配置、监控和故障处理的自动化，减少人工干预；利用机器学习等技术，进行异常检测和性能预测，提升工具的智能化水平^[7]。研究的难点是技术的复杂性，多协议支持集成多种网络协议的解析和处理，增加了工具的技术复杂性。以及数据隐私与合规性，不同地区的法律法规可能对数据存储和处理有不同的要求，工具必须确保符合这些规定；在收集和分析数据时，确保用户的隐私得到保护，防止数据泄露。路由器统一调试工具的研究面临诸多挑战，关键在于实现标准化、多协议兼容、用户友好、安全性及智能化。应对这些挑战需要跨学科的技术整合和不断的创新，以提升网络管理的效率和准确性。

四、路由器的统一配置与调试方法的理论依据

路由器的统一配置与调试方法的理论依据是为协议与标准的

兼容性、调试命令的智能提示识别、标准化作业流程^[8]，研究如何支持多种网络协议^[9]（如 SNMP、CLI、REST API 等），确保工具能够与不同厂商的设备进行兼容和交互；研究自动化配置、监控和故障处理功能利用机器学习和数据技术分析技术自动检测异常并进行初步处理；同时设计简洁明了的图形用户界面，使得用户能够方便的进行设备配置和监控，实现一键配置和批量处理功能以提升用户效率。通过命令库的构建将不同类型的命令进行分析、例如基础命令、配置命令、监控命令等并为每个命令提供详细的实例和可用参数以使用户理解其用法，使用自然语言处理技术分析用户输入、识别意图和命令，支持模糊查询、是的即使用户输入的命令不完全正确也能提供相关建议^[10]；自动补全功能在用户输入命令时实时提供可能得命令补全建议，根据当前的上下文（例如已输入的命令、当前模式等）提供相关的命令建议；用户行为学习通过机器学习记录用户的输入习惯和常用命令是的机器学习算法不断优化命令提示，提供个性化的命令推荐；多平台支持，跨设备兼容确保智能识别功能在不同品牌和型号的路由器都能有效工作，适配不同的命令行界面。网络管理框架基于 ISO/OSI 模型的网络管理理论，强调网络的监控、配置、故障管理、安全和性能管理（FCAPS）等基本功能，这为路由器调试工具的设计提供了理论框架；协议标准如 SNMP（简单网络管理协议）、netconf、restful API 等标准化协议为统一调试工具的实现提供了基础。

五、未来发展趋势

随着云计算和软件定义网络（SDN）的普及，网络管理工具向云端迁移，提供集中管理和灵活配置的能力。更高水平的网络可视化技术将被应用，提升网络运维人员的工作效率。通过这段技术发展历程，路由器统一调试工具应运而生，以满足日益复杂的网络环境中对高效管理和故障排查的需求。

六、研究的作用和意义

路由器的统一配置与调试方法的作用和意义则是通过统一配置流程调试命令的智能识别提示、支持多种通信协议（如 Modbus、OPC UA、MQTT、PROFIBUS 等）、SNMP 等技术，

做到既不影响路由器调试，又能够有效防止外部病毒、木马、人为攻击等不安全因素进入电网系统，增强安全认证工作，有效防止外部攻击和人员误操作。可以做到集中管理和监控多个路由器设备，而且可以为运维管理员提供了便捷的界面和功能，使得配置、监控和故障排查变得更加高效，同时工具监控和管理网络设备的状态和性能采用安全协议保护数据的传输安全。路由器的统一配置与调试方法还可以为运维管理人员提供了便捷的功能，使得配置、监控和故障排查变得更加高效，同时对于保障厂站路由器检修调试工具的使用安全性和效率性有极大的积极意义。

七、结论

工业路由器在电网实际生产力水平中的应用主要体现在其高度稳定性与可靠性、强大的数据处理与转发能力、丰富的接口与扩展性、强大的安全性能以及远程管理与维护功能。这些特点使得工业路由器在电网等关键基础设施中能够提供稳定、高速的网络连接，确保数据的实时传输和快速响应，支持各种工业设备和系统的互联互通，保障生产数据的安全传输，并降低运维成本，提高工作效率。

通过重点研究路由器的统一配置与调试方法，可以提升网络可靠性，通过快速诊断和解决网络问题，减少网络故障时间，提高网络的整体可靠性，保障业务连续性。可以提高工作效率，统一调试配置和调试方法通常可以简化配置和管理流程，减少管理员在调试过程中的工作量，从而提高团队的工作效率。可以降低运维成本，通过快速定位和解决问题，减少对现场技术支持的需求，降低企业的运维成本。可以增强安全性，统一调试方法能够帮助识别和修复潜在的安全漏洞，降低网络攻击的风险，从而保护企业的数据和资产。可以优化资源利用，通过监控和分析网络流量，帮助企业更好地利用网络资源，避免过度投资于网络硬件。可以实现知识积累与共享，使用统一调试工具的过程中，可以积累大量的调试经验和知识，通过文档化和共享，提高团队的整体技术水平。可以实现统一管理和审计，统一调试通常具备日志记录和审计功能，帮助企业追踪操作记录，提高网络管理的透明度。可以提升用户满意度，更高的网络可靠性和更快的故障响应时间，直接提升了终端用户的使用体验和满意度。

参考文献

- [1] 方胜, 武保强. 静态路由与动态路由配置比较研究 [J]. 电脑知识与技术, 2025, 21(07): 87-89. DOI: 10.14004/j.cnki.ckt.2025.0325.
- [2] 张程翔, 陆莹, 贺军, 等. 基于多端口能量路由器的微网系统及其调试 [J]. 科学技术与工程, 2020, 20(13): 5149-5155.
- [3] 王达. 华为路由器学习指南 [M]. 人民邮电出版社: 202001.1675.
- [4] 刘建臣. 配置路由器控制层面安全策略 [J]. 网络安全和信息化, 2018, (12): 113-116.
- [5] 苗增良, 刘振军, 高栋. 路由器网络接口模式分析 [J]. 网络安全和信息化, 2018, (05): 145-146.
- [6] 孟一飞. 浅析路由器的安全配置 [J]. 中国管理信息化, 2017, 20(11): 179-180.
- [7] 刘艳. 路由器的安全配置与维护 [J]. 信息与电脑 (理论版), 2016, (15): 42-43.
- [8] 曾永和, 刘伟跃. 路由器的配置与调试 [J]. 科技信息, 2009, (19): 442.
- [9] 李杰. 浅谈路由器的配置与调试 [J]. 新疆教育学院报, 2005, (02): 124-126.
- [10] 王焰, 纪平. CISCO 路由器实例配置与调试 [J]. 电脑学习, 2000, (04): 17-18.

风电和光伏联合并网对电网负荷波动的影响研究

李国强

辽宁大唐国际新能源有限公司，辽宁 沈阳 110000

DOI:10.61369/EPTSM.2025120007

摘 要： 为有效降低风光联合并网下的电网负荷波动，确保供电质量和安全。本文结合风光联合并网基本情况，分析其对电网负荷波动的影响，包括电网频率波动、电压波动闪变、谐波污染叠加等。并提出针对性控制策略，以供后续风光联合并网负荷波动控制参考。

关 键 词： 风光联合并网；电网负荷波动；频率波动；电压波动；谐波污染

Study on the Effect of Wind Power and Photovoltaic Combined Grid on Load Fluctuation of Power Grid

Li Guoqiang

Liaoning Datang International New Energy Co., Ltd., Shenyang, Liaoning 110000

Abstract： In order to effectively reduce wind and light combined grid load fluctuations, to ensure power supply quality and safety. Combined with the basic situation of wind and light combined grid, this paper analyzes its impact on load fluctuation, including frequency fluctuation, voltage flicker and harmonic pollution. Finally, the control strategy is put forward for reference to the control of load fluctuation of combined wind and optical power grids.

Keywords： wind and light combined grid; load fluctuation; frequency fluctuation; voltage fluctuation; harmonic pollution

前言

在“双碳”背景下，风电和光伏联合并网已成为电网主要发展趋势。风能特征呈间歇性、随机性，光能特征呈周期性、随机性，因此两者联合并网可达到资源互补效果，是目前主流的新能源消纳模式。但在该消纳模式下，多元波动叠加易引发电网负荷波动，降低电网运行可靠性。为有效应对此类影响，电力单位应根据风光联合并网特点，分析其对电网负荷波动的影响，制定针对性控制策略。

一、风电与光伏联合并网介绍

风光联合并网是基于协同控制技术，整合风力发电机组和光伏阵列输出功率，将其接入传统电网，用清洁能源替代部分不可再生能源，并使风光两种能源特性互补，达到功率平抑效果。该模式主要特征有三个，第一是能源互补，在日间，光伏出力峰值和风电低谷互补；在夜间，风电出力提高和光伏停运缺口互补，使功率波动合理降低。第二是出力波动，在风速变化和阳光遮挡等影响下，风光联合系统出力存在短时间波动情况。第三是控制复杂，风电机组、光伏阵列与并网设备众多，只有确保多设备协调效果，才可使功率输出平滑，并与电网达到适应性调节作用。在上述特征共同作用下，风光联合并网对电网负荷具有特殊影响，其负荷波动也较单一新能源并网波动更加复杂，电力单位需从多个维度展开综合分析。

二、风电与光伏联合并网对电网负荷波动的影响

（一）电网频率波动

电网频率波动主要受有功功率实时平衡效果影响，如发电功率不能动态匹配负荷功率，电网频率便会发生波动。在风光联合并网后，整体系统出力波动将此种平衡直接打破，电网频率显著偏离额定值^[1]。其中，风力发电出力和风速三次方存在近似正比关系，如风速发生突变，风机在短时间内将出现出力剧变情况；光伏出力取决于光照强度，如阳光被云层快速遮挡，光伏功率可在短时间内骤降。两者功率波动叠加后，将对电网负荷造成较大冲击，使电网频率明显波动。基于电网频率特点，频率偏移量和有功功率波动量关系满足以下公式：

$$\Delta f = \frac{\Delta P}{K} \quad (1)$$

式中, Δf 代表电网频率偏移量; ΔP 代表风光联合并网系统有功功率波动量; K 代表电网单位可调节功率。根据该公式可知, 如电网单位调节功率固定, 风光联合并网系统有功功率波动量越大, 电网频率偏移量越大。偏移量过大时, 电网将出现低频减载或高频切机保护情况, 使部分负荷停电, 甚至导致电网崩溃。与单一新能源并网模式相比, 在风光联合并网模式下, 风电与光伏互补作用可使电网频率偏移量最大值降低, 从而降低频率波动幅度。但其互补效应易受季节、气候、地理条件等因素影响, 如风速不稳定且无光照条件同时出现, 电网频率波动风险将高于并网前。

(二) 电压波动闪变

电压波动即电网节点电压在短时间出现有效值偏离额定值的现象, 如波动范围过大, 将使用电端灯光亮度出现人眼可见的闪烁感, 即电压闪变。在风光联合并网模式下, 无功功率波动和输出阻抗变化是电压波动闪变的重要影响因素。并网时, 风电机组和光伏组件需利用逆变器与电网连接, 因此逆变器本身无功调节能力将对并网节点电压产生直接影响。在风光联合系统出现出力波动时, 为使输出功率保持稳定, 对应并网节点逆变器将实时调整自身无功输出, 从而打破节点处的无功功率平衡。基于有功、无功功率波动量和并网线路基本情况, 并网节点电压变化量可通过以下公式计算:

$$\Delta U = \frac{\Delta P \cdot R + \Delta Q \cdot X}{U_e} \quad (2)$$

式中, ΔU 代表风光联合并网节点电压变化量; ΔP 代表有功功率波动量; ΔQ 代表无功功率波动量; R 代表并网线路电阻值; X 代表并网线路电抗值; U_e 代表节点电压额定值。在高压配网中, 电抗值远高于电阻值, 因此可进一步将公式简化为:

$$\Delta U = \frac{\Delta Q \cdot X}{U_e} \quad (3)$$

可见无功功率波动将对高压电网电压产生更大影响。而在低压配网中, 电抗值与电阻值接近, 无论有功功率发生波动, 或无功功率发生波动, 电网电压都将发生明显改变。风电机组运行中, 风速变化可导致有功出力变化, 也可改变风机叶片功角, 被动引起无功功率波动; 光伏机组运行中, 光照强度变化会改变光伏电池输出电压, 若逆变器不能及时调整无功补偿量, 电网也将受到无功功率冲击。在两者叠加作用下, 并网节点电压易出现周期性或随机性波动, 严重时可导致电压闪变。表1为某地区110kV电网风光并网节点不同并网模式电压波动闪变程度:

表1-某地区110kV电网风光并网节点不同并网模式电压波动闪变程度

| 序号 | 并网模式 | 典型工况 | 有功功率波动量 (MW) | 无功功率波动量 (Mvar) | 电压闪变值 (Pst) |
|----|------|--------------|--------------|----------------|-------------|
| 1 | 单一风电 | 短时风速 8-12m/s | 15-35 | 3-8 | 1.28 |
| 2 | 单一光伏 | 短时多云 遮挡光照 | 10-30 | 2-6 | 1.15 |
| 3 | 风光联合 | 1、2工况 叠加 | 12-32 | 2-7 | 0.82 |

由此可见, 与单一风电或光伏并网相比, 在风光联合并网模式下, 通过功率互补作用, 可有效降低有功和无功功率波动幅度, 改善电压闪变情况。但联合并网依然存在电压波动问题, 尤其在极端天气条件下, 联合并网模式将面临更大电压调节压力。

(三) 谐波污染增加

谐波是电网电流或电压中, 频率为基波频率整倍数的分量, 该污染可降低电能质量, 引起继电保护误动或电机发热等问题。在风光联合并网模式下, 谐波主要来源于电力电子装置^[9]。与单一新能源并网模式相比, 联合并网系统多台逆变器协同作用易导致谐波叠加, 增加谐波污染。风电变流器和光伏逆变器均通过脉冲宽度调制法实现直交流转换, 调制时会伴随特征谐波产生, 其频率计算公式如下:

$$f_h = k \cdot f_s \pm f_1 \quad (4)$$

式中, f_h 代表特征谐波频率; k_1 代表调制脉冲次数; f_s 代表开关频率; f_1 代表基波频率。如风光联合系统多台逆变器开关频率接近或存在倍数关系, 产生的谐波将相互叠加, 从而使某频次谐波含量骤增。对于谐波污染严重程度, 一般可通过电压总谐波畸变率衡量, 其公式如下:

$$THD_U = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{U_1} \times 100\% \quad (5)$$

式中, THD_U 代表总谐波畸变率; U_1 代表基波电压有效值; U_2, U_3, \dots, U_n 代表2-n次谐波电压有效值。在风光联合并网系统中, 投入逆变器越多, 出力波动将越大, 对应的电压总谐波也将越高。同时, 电网自身阻抗特性也将对谐波传输产生影响, 若风光联合系统谐波输出频率接近电网局部谐振频率, 将出现串联或并联谐波情况, 进一步放大谐波, 加剧谐波污染。

三、风电与光伏联合并网下的电网负荷波动控制策略

(一) 基于功率预测的源网协同控制

在风光联合并网系统运行中, 为有效降低出力波动, 确保电网频率稳定性, 电力单位可通过功率预测法, 对未来一段时间内风光联合系统出力变化情况进行精准预测, 根据预测结果提前制定针对性源网协同调度计划, 使电网发电与电网负荷保持动态平衡, 从而实现电网频率波动的有效抑制^[9]。此项控制应基于预测和控制两个环节实现, 通过两环节紧密衔接, 基于功率预测实施源网协同控制。

将天气预报系统与基于机器学习的预测模型设置在预测层, 由天气预报系统利用地面气象站、卫星遥感等精准获取未来风速、光照、云层等关键气象参数, 为系统出力预测提供数据支持。根据近年来风光联合系统设备运行状态数据、出力历史数据等, 利用长短记忆神经网络模型建立非线性映射关系, 确保预测精度。将云计算作为支持技术, 在控制层构建源网协同调度平台, 由该平台实时采集气象和风光联合系统运行数据, 与预测出力数据整合后, 通过混合整数规划算法计算调度需求, 实时制定动态

化调度决策，并向并网调度系统实时下达指令。

调度过程中，调度平台会根据不同出力波动场景开展差异化调度。如预测未来一段时间后系统出力大幅度提升，平台会优先控制储能系统快速充电，并通过需求响应平台将用电增量提升指令下达给可调节负荷，引导负荷及时提升，就地消纳有功功率，以免功率过剩导致电网频率骤升。如预测未来一段时间后系统出力大幅度降低，平台会立即将备用电源启动，并通过智能电表将负荷衰减信号下发商业用户，合理降低非核心负荷用电量，使有功功率缺口得到快速补偿，以免功率不足导致电网频率骤降。同时，电力单位还应将风光机组主动调节机制引入调度环节，基于预测结果提前对风机偏航角度和光伏组件倾角进行调整，使机组出力保持在最优区间，降低出力突变停机次数，延长机组设备使用寿命。

（二）基于储能系统的电压波动控制

针对风光联合并网导致的电压波动情况，具体控制时，电力单位可将储能系统合理引入，根据电网电压等级和波动特性差异，通过集中储能与分布储能结合分层配置储能模式。通过锂电池和全钒液流储能电池设置集中式储能系统，前者能量密度高，响应速度快，在功率调节中适用；后者安全性高，循环寿命长，在能量调节中适用。将两者接入高压并网节点，根据风光联合系统容量合理设置总容量，确保分钟级电压波动平抑效果。通过锂电池和超级电容设置分布式储能系统，后者功率密度高，充放电速率快，适用于用户侧。将两者直接接入低压配网，可对秒级甚至毫秒级电压闪变做到有效抑制^[4]。

具体控制时，电力单位可引入电压闭环与前馈补偿复合式调节机制，精准控制电网电压。先利用高精度电压传感器实时采集并网节点电压参数，利用卡尔曼滤波算法去除测量噪声后，将校正值与额定电压参数实时对比，精准确定电压偏差^[5]。根据电压偏差大小及变化趋势，通过自适应神经网络控制算法，对储能系

统无功功率输出值进行动态调节^[6]。如发现电网电压过高，储能系统将迅速吸收无功功率；如发现电网电压过低，储能系统将迅速释放无功功率，使电网有功和无功功率始终保持平衡，确保电压稳定。同时，电力单位也应将前馈补偿环节引入，根据风光联合系统出力变化率提前生成无功补偿功率调节指令，使电网电压波动得到及时预测和有效调节^[7]。

（三）基于逆变器优化法的谐波控制

在风光联合并网模式下，为有效控制谐波污染，电力单位可对并网逆变器进行合理优化。首先是逆变器拓扑优化，用多电平逆变器替代传统两电平逆变器，增加电压输出级数，使输出波形与正弦波接近，从而显著降低电网低次谐波含量^[8]。其次是逆变器调制策略优化，通过空间矢量脉冲宽度调制法替代传统正弦脉冲宽度调制法，使电压空间矢量与电网实际供电需求匹配，提高电网电压利用率，减少谐波和开关损耗^[9]。最后是谐波补偿优化，将谐波检测和补偿模块加入逆变器控制回路，基于瞬时无功理论实时检测电网谐波分量值，根据检测结果实时生成电流补偿指令，在逆变器有功功率输出过程中，同步输出与谐波电流相同幅值、相反相位的补偿电流，有效抵消电网谐波^[10]。

四、结束语

综上所述，在风光联合并网模式下，由于风电和光伏机组出力存在波动，电网负荷平衡受多维度因素不利影响，易发生频率波动、电压波动、谐波污染等情况，对电网安全稳定运行不利。针对上述情况，电力单位可采取合理的方法控制电网负荷波动，如基于功率预测的源网协同控制、基于储能系统的电压波动控制、基于逆变器优化法的谐波控制等。从而使电网保持稳定状态，最大化降低负荷波动不良影响，确保电网绿色化发展效果，提升供电服务水平。

参考文献

- [1] 田浩,王可庆,俞斌,等.考虑多类型负荷及风光不确定性的配电网优化规划[J].电力系统及其自动化学报,2021,33(9):144-150.
- [2] 颜香梅.适应多元化负荷、电源接入的配电网典型供电方案研究[J].电器工业,2022(10):41-44.
- [3] 朱自伟,黄彪,袁昕月,等.基于平抑风光出力波动的主动配电网优化调度[J].太阳能学报,2022,43(5):90-97.
- [4] 高小童,秦志龙,高新宇.含海上风电-光伏-储能的多能源发电系统可靠性评估[J].发电技术,2022,43(4):626-635.
- [5] 熊伟,马志程,张晓英,等.计及风、光消纳的风电-光伏-光热互补发电二层优化调度[J].太阳能学报,2022,43(7):39-48.
- [6] 白格平,李英俊,付宁,等.基于经验模式分解与纵横交叉算法的台区负荷预测[J].自动化仪表,2021,42(11):63-67,73.
- [7] 杨茂,王金鑫.考虑可再生能源出力不确定的孤岛型微电网优化调度[J].中国电机工程学报,2021,41(3):973-984,中插16.
- [8] 孙哲,谷训良,朱志军,等.基于信号同源的AGC负荷解耦控制和自动寻优研究[J].电力系统装备,2022(1):72-74.
- [9] 王舒宁.电池储能系统辅助火电机组调频技术研究[D].华北电力大学,华北电力大学(保定),2023.
- [10] 郑云平,亚夏尔·吐尔洪.基于VSG技术的风-光-储系统自适应调频控制策略研究[J].高压电器,2023,59(7):12-19.

电气工程中电气自动化技术的应用研究

胡锋铭

南昌海立电器有限公司，江西 南昌 330038

DOI:10.61369/EPTSM.2025120008

摘 要： 电气自动化技术作为电气工程现代化发展的核心驱动力，其广泛应用显著提升了系统的生产效率、运行安全性与能源利用效率。本文阐述了电气自动化技术的核心组成，分析了其在提升生产效率与质量稳定性、降低运营成本与资源消耗、增强系统安全性等方面的重要价值。在该基础上，结合电力系统等领域实际，探讨了电气自动化技术的具体实施路径，以期为应对复杂工程场景的更高要求，推动电气工程事业高质量发展提供借鉴与参考。

关 键 词： 电气工程；电气自动化；技术应用；优化路径

Application Research of Electrical Automation Technology in Electrical Engineering

Hu Fengming

Nanchang Haili Electric Appliance Co., Ltd., Nanchang, Jiangxi 330038

Abstract： As the core driving force behind the modernization of electrical engineering, electrical automation technology has significantly enhanced system production efficiency, operational safety, and energy utilization efficiency through its widespread application. This paper elucidates the fundamental components of electrical automation technology and analyzes its critical value in improving production efficiency and quality stability, reducing operational costs and resource consumption, and strengthening system security. Building on this foundation, and drawing from practical applications in power systems and related fields, the paper explores specific implementation pathways for electrical automation technology. These insights aim to provide valuable references for addressing the increasingly complex demands of engineering scenarios and to promote high-quality development in the field of electrical engineering.

Keywords： electrical engineering; electrical automation; technology application; optimization path

电气自动化技术是电气工程领域的重要组成部分，其通过集成传感、控制、通信与执行等技术，实现了电气系统的智能化监测、决策与调控。随着工业4.0、智能电网等概念的深入推进，电气自动化已成为提升工程效率、保障系统稳定、实现节能减排的关键技术支撑。在当前电气工程日益复杂化、集成化的背景下，探讨分析电气自动化技术的构成体系与应用路径，具有重要现实意义。

一、电气自动化技术组成与关键模块

（一）传感器与数据采集技术

传感器与数据采集技术是电气自动化系统获取外部信息的“入口”，其性能直接决定了后续控制决策的准确性与及时性。在电气工程场景中，电气设备的运行状态、环境参数、能量流动等关键信息，均需通过传感器转化为可计算、可传输的电信号，为自动化控制提供基础数据支撑。从技术原理来看，传感器的核心功能是物理量向电信号的转换，不同类型的传感器对应不同的监测需求^[1]。例如，在电力系统中，电流传感器可实时采集输电线路的电流变化，电压传感器则精准捕捉母线电压波动，两者共同为过载、短路等故障判断提供数据依据，而在工业制造场景，温

度传感器则用于监测电机、机床等设备的工作温度，避免因过热导致的设备损坏^[2]。

（二）控制算法

控制算法可对采集到的数据进行分析计算，生成精准的控制指令，驱动电机、阀门、继电器等执行机构调整运行状态，最终实现电气系统的自动化目标。在实践领域，不同的电气工程场景对控制精度、响应速度、稳定性的需求不同，也催生了多种适配的控制算法，从经典的经典算法到现代智能算法，形成了多层次的算法体系。随着多变量耦合系统等电气工程复杂度的提升，现代控制算法与智能控制算法开始广泛应用。例如，在柔性直流输电（VSC-HVDC）系统中，单纯的PID控制难以满足控制精度要求，此时会采用模型预测控制（MPC）算法建立系统的数学模型，预测未来

一段时间内的系统状态，结合约束条件优化控制指令，对直流电压、有功功率、无功功率等多变量进行协同控制^[3]。

（三）通信技术

现场总线技术是早期电气自动化中应用最广泛的通信技术，其通过一条总线线路连接多个现场设备，替代传统的点对点布线，减少线缆成本与施工复杂度，但不同总线协议之间兼容性较差，难以实现跨厂商设备的无缝互联。对此，无线通信技术凭借着灵活部署、无需布线等优势，在电气工程中得到快速应用，尤其适用于高压输电线路、户外光伏电站、移动设备等难以布线的场景。其中，5G技术具有高带宽、低延迟、大连接特性，成为工业无线通信的核心技术之一^[4]。在工业互联网环境下，电气系统的通信网络往往面临网络攻击等风险，因此通信技术需通过加密传输确保数据在传输过程中不被窃取或篡改，同时通过网络隔离等方式阻止非法访问。电气自动化系统中的主要通信技术对比如表1所示。

| 表1 电气自动化系统中主要通信技术对比 | | | |
|---------------------|-------------|--------------------------|---------------------|
| 技术类型 | 技术特点 | 优势 | 局限性 |
| 现场总线 | 数字式、串行、多点通信 | 布线简单，成本低，实时性好 | 协议标准不一，兼容性差，传输距离有限 |
| 工业以太网 | 基于以太网协议，带宽高 | 传输速度快，与IT系统无缝集成，通信协议统一 | 对工业环境适应性（如抗干扰）有特定要求 |
| 无线通信技术（如5G） | 无线传输，灵活组网 | 部署灵活，无需布线，支持移动设备，大连接、低延迟 | 信号易受环境干扰，存在网络安全风险 |

二、电气自动化技术在电气工程中的应用价值

（一）提升生产效率与质量稳定性

在电气工程领域，生产效率的瓶颈往往源于人工操作的局限性与参数控制的离散性，而电气自动化技术则通过感知、决策、执行等闭环体系，从根本上突破了这一限制。在工业制造场景中，自动化生产线借助PLC与工业机器人的协同控制，可实现24小时不间断运行，彻底摆脱人工操作的生理极限与时间限制。以汽车焊接生产线为例，自动化设备的重复定位精度可达0.1毫米以内，不仅将单台车身的焊接时间从人工操作的15分钟缩短至3分钟，更避免了人工操作中因疲劳、经验差异导致的焊接质量波动^[5]。在质量控制层面，自动化系统的优势更为突出，尤其是在电子元器件制造中，机器视觉检测设备通过高速摄像头与AI识别算法，每秒可完成数百个元器件的外观缺陷检测。

（二）降低运营成本与资源消耗

电气自动化技术对成本的优化作用，体现在人工、能耗、运维等多个成本维度的协同管控上，其降本增效的主要应用领域如表2所示。人工成本的降低是最直接的体现，比如传统变电站需安排运维人员24小时轮班巡检，而华为智慧变电站解决方案通过远程智能巡视与AI预警功能，将运维人员的日常作业时间从每天4小时缩短至1.5小时，大幅降低了人工投入，同时减少了人工巡

检中的安全风险^[6]。能耗成本的优化则依托于精准的智能调控技术，其中施耐德电气无锡工厂在Building GPT技术辅助下，通过制冷系统与算力负荷的联动控制，实现了能源的动态匹配，充分展现了自动化技术在节能降耗中的核心价值^[7]。此外，基于AI的预测性维护技术可通过分析设备运行数据提前预判故障，显著降低运维成本。

| 表2 电气自动化技术降本增效应用析 | | |
|-------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| 应用领域 | 传统模式痛点 | 自动化解决方案 |
| 变电站运维 | 需人员24小时轮班巡检，人工成本高，存在安全风险，数据记录不连续。 | 采用远程智能巡视系统与AI预警平台，实现无人值守与预测性维护。 |
| 工业制造能耗管理 | 能源消耗与生产负荷不匹配，存在“大马拉小车”现象，能耗成本高昂。 | 利用AI能效优化系统，实现制冷系统与算力负荷的联动精准控制。 |
| 生产线质量控制 | 人工检测效率低、易疲劳，标准不一，漏检率高，影响产品一致性。 | 引入基于机器视觉与AI算法的自动化检测设备，进行高速、在线质量检测。 |

（三）强系统安全性与可靠性

电气工程系统的安全与可靠是保障生产生活正常运行的基础，电气自动化技术通过实时监测、快速响应与智能防护的多重机制，构建了全方位的安全保障体系。在设备运行安全层面，自动化系统能对关键参数进行毫秒级监测，一旦出现异常立即触发保护机制。比如，在工业电机控制中，电流传感器实时监测电机负载变化，当出现短路隐患时，控制器能在10毫秒内发出停机指令，防止电机烧毁引发的火灾风险^[8]。在安防防护层面，融合AI的周界安防系统更展现出强大的安全防护能力。以华为智慧变电站为例，其具有显著的光纤感知特性，可密切结合AI大模型算法精准判断人员及外物入侵，入侵事件响应时间从传统的分钟级提升到秒级，实现了物理安全与系统安全的双重保障^[9]。

三、电气自动化技术在电气工程中的具体应用探讨

（一）在电力系统中的应用

电力系统作为电气工程的核心领域，涵盖发电、输电、配电、用电等全链条，而电气自动化技术则可通过对各环节的精准控制与智能管理，解决传统电力系统效率低、响应慢、调度难的痛点，为构建新型电力系统提供关键技术支撑。以新能源发电中的光伏电站为例，自动化系统可在最大功率点跟踪（MPPT）技术支持下，由传感器持续采集光伏阵列的输出电压、电流数据，控制器基于扰动观察法或增量电导法等算法，动态调整逆变器的工作参数，确保光伏组件始终运行在最大功率点，与无MPPT控制的系统相比，其发电效率可提升10%-15%^[10]。同时，自动化并网控制系统通过采集电网电压、频率、相位数据，与光伏电站输出参数进行实时匹配，当电网出现波动时，可在200毫秒内实现低电压穿越，避免电站脱网，保障并网稳定性。

（二）在工业制造领域的应用

在离散制造领域，电气自动化技术通过可编程逻辑控制器（PLC）与工业机器人的协同控制，可实现生产线的无人化与柔性

化。比如，在汽车焊接生产线中，整条生产线由10–20台工业机器人组成，每台机器人的动作）均由PLC通过程序精确控制，实时调整机器人运动参数，以此确保焊点强度与精度。在电子元器件制造中，自动化技术则聚焦于高精度与高速度，由PLC实时采集设备运行数据，当出现参数偏差时，立即调整伺服电机参数，避免封装缺陷。某芯片封装厂应用该技术后，产能提升至5000片/小时，缺陷率控制在0.01%以下，远优于人工封装的水平。

（三）在建筑电气领域的应用

建筑电气系统涵盖供配电、照明、暖通、给排水等多个子系统，传统管理模式依赖人工巡检与手动操作，而电气自动化技术则通过集中监控、能调控、联动管理等模式，对建筑电气系统进行高效化、节能化与智能化管理，为绿色建筑或智慧楼宇建设提供关键支撑。比如，在供配电自动化方面，电气自动化技术可利用智能配电终端与监控系统，对供电状态保持实时监测，快速处置故障，并负动态优化荷。在高层建筑中，供配电系统通常分为高压（10kV）、低压（0.4kV）两个层级，自动化系统通过安装在高低压配电柜中的智能仪表，实时采集电压、电流、功率因数、谐波含量等参数，并通过工业以太网传输至建筑电气监控中心。

（四）在交通运输领域的应用

交通运输领域对电气系统的可靠性、实时性、安全性要求相

对较高，电气自动化技术可将供电保障、运行控制和调度优化等作为基础，推动交通运输向智慧交通方向发展。在地铁、高铁、城轨等轨道交通方面，电气自动化技术可通过牵引变电所监控系统（SCADA），由安装在牵引变电所内的电流传感器、电压传感器、保护装置，实时采集整流器输出电流、接触网电压、设备温度等参数，实现对电能传输的实时监测与故障处置。而在公路交通电气自动化方面，基于电气自动化技术的智能交通信号控制系统则可分析采集到的各方向车流数据，通过优化算法，自动调整信号灯绿灯时长。

四、结语

综上所述，电气自动化技术在电气工程中的应用已展现出显著的优越性与广泛的适应性。通过传感器、智能控制算法与高效通信技术的系统集成，该技术不仅在电力系统、工业制造、建筑电气及交通运输等领域实现了生产效能的提升与运行成本的优化，更在系统安全与可靠性方面构筑了坚实屏障。随着人工智能、5G通信等新兴技术的不断融合，电气自动化正朝着更智能、更高效、更安全的方向演进，应进一步加强跨领域技术协同，推动标准化与智能化建设，以助力电气工程实现高质量与可持续发展。

参考文献

[1]王凯辉. 电气工程和自动化技术在工业控制柜中的应用研究 [J]. 造纸装备及材料, 2024, 53(12): 105–107.
[2]刘昊泽. 电气工程及其自动化应用中存在的问题与对策研究 [J]. 中国设备工程, 2024, (23): 117–119.
[3]刘佳. 电气工程自动化技术在船舶机械设备中的应用与挑战 [J]. 船舶工程, 2025, 47(1): 10037–10037.
[4]刘朋, 张永林, 刘文君. 电气工程及其自动化的智能化技术应用 [J]. 中国科技纵横, 2025, (11): 51–53.
[5]朱志成, 郭瑞鹏, 李宗源, 等. 基于电气工程自动化技术在电力系统运行中的应用探析 [J]. 智能城市应用, 2023, 6(10): 83–86.
[6]张建军. 电气工程及其自动化在智能电网建设中的应用探析 [J]. 消费电子, 2025, (22): 230–232.
[7]王福宁. 电气工程自动化系统中的质量控制与安全管理技术 [J]. 电工技术, 2024, (S2): 752–753.
[8]乔征瑞, 张玉. 探究当前智能化技术在电气工程自动化控制中的运用 [J]. 新疆有色金属, 2023, 46(5): 108–110.
[9]李腾, 相振俊, 王雪松, 等. 基于智能化控制系统的电气工程设备自动化调度优化研究 [J]. 消费电子, 2025, (13): 50–52.
[10]宋亚楠, 杨欣. 电气自动化系统在电气工程自动化控制中的应用 [J]. 电工技术, 2024, (S1): 296–298.

配电线路故障处理中配网自动化技术运用分析

倪楠, 沈志文, 赖玮, 孙雪成

国网安徽省电力有限公司马鞍山供电公司, 安徽 马鞍山 243000

DOI:10.61369/EPTSM.2025120009

摘 要 : 配电线路作为电力系统与用户连接的关键载体, 其运行稳定性直接决定供电可靠性。配网自动化技术凭借实时监测、智能判断及快速隔离等优势, 已成为提升配电线路故障处理效率的核心手段。本文先阐述配网自动化技术的核心内涵与发展历程, 再结合配电线路故障处理的实际需求, 分析该技术在故障检测、定位、隔离及恢复中的具体运用机制, 接着探讨技术应用现存的问题, 最后提出优化策略, 为电力企业提升配电线路故障处理能力提供理论与实践参考。

关 键 词 : 配电线路; 故障处理; 配网自动化; 供电可靠性

Application Analysis of Distribution Network Automation Technology in Distribution Line Fault Handling

Ni Nan, Shen Zhiwen, Lai Wei, Sun Xuecheng

State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd. Ma'anshan Power Supply Company, Ma'anshan, Anhui 243000

Abstract : As the critical link between power systems and end-users, distribution lines directly determine power supply reliability through their operational stability. Distribution network automation (DNA) technology, with its real-time monitoring, intelligent decision-making, and rapid isolation capabilities, has become a core solution for improving fault handling efficiency. This paper first outlines the core concepts and historical development of DNA technology, then analyzes its practical applications in fault detection, localization, isolation, and restoration based on real-world requirements. It further examines existing challenges in technology implementation and proposes optimization strategies, providing theoretical and practical references for power enterprises to enhance their fault handling capabilities.

Keywords : distribution line; fault handling; distribution network automation; power supply reliability

引言

配网自动化技术以计算机技术、通信技术、测控技术为支撑, 实现对配电线路运行状态的实时监控、故障的快速识别及自动化处理, 能大幅缩短故障处理时间, 降低停电损失。近年来, 我国电力行业大力推进配网自动化建设, 该技术在配电线路故障处理中的应用愈发广泛。基于此, 深入分析配网自动化技术在配电线路故障处理中的运用, 对提升配网运行可靠性、推动电力行业高质量发展具有重要意义^[1]。

一、配电线路故障处理的需求与配网自动化技术的应用优势

(一) 配电线路故障处理的核心需求

配电线路故障处理的核心目标是在故障发生后, 以最快速度定位故障点、隔离故障区域、恢复非故障区域供电, 最大限度减少停电时间与损失。具体而言, 其需求主要体现在三个方面。一是快速性, 故障发生后需在最短时间内完成检测与定位, 避免故障扩大; 二是准确性, 精准定位故障点是缩短处理时间的关键, 传统人工巡检易因线路复杂而出现定位偏差; 三是安全性, 故障

处理过程中需保障检修人员安全, 避免二次事故发生, 同时减少故障对电网其他部分的影响。

(二) 配网自动化技术的应用优势

相较于传统故障处理方式, 配网自动化技术在满足配电线路故障处理需求方面具有显著优势。其一, 提升故障处理效率, 通过终端设备实时采集线路电流、电压等参数, 主站系统可快速判断故障类型与位置, 无需人工巡检, 大幅缩短故障定位时间; 其二, 提高定位准确性, 借助馈线自动化技术与故障信息分析算法, 能精准定位故障点至具体线段或设备, 避免传统巡检的盲目性; 其三, 增强供电可靠性, 故障发生后, 系统可自动发出指

令，通过开关设备隔离故障区域，快速恢复非故障区域供电，减少停电范围与时间；其四，降低人工成本与安全风险，自动化处理减少人工干预，降低检修人员劳动强度，同时避免人工巡检过程中的安全隐患。

二、配网自动化技术在配电线路故障处理中的具体运用

（一）故障检测：实时监测与异常识别

故障检测是配电线路故障处理的首要环节，配网自动化技术通过终端设备与主站系统的协同作用，实现对线路运行状态的实时监测与异常识别。终端设备如 FTU 安装于馈线开关处，TTU 安装于配电变压器旁，可实时采集线路电流、电压、功率因数、设备温度等运行参数，并通过通信网络将数据传输至主站系统^[2]。

主站系统对接收的数据进行实时分析，通过设定阈值判断线路是否存在异常。当线路发生短路、接地等故障时，电流或电压参数会急剧变化，系统可快速捕捉这一异常，发出故障告警信号。例如，在单相接地故障检测中，传统方式难以准确判断，而配网自动化系统通过采集线路零序电流、零序电压等参数，结合故障选线算法，可快速识别接地故障线路。此外，部分先进系统还具备趋势分析功能，通过对历史数据的挖掘，预测设备老化、线路绝缘下降等潜在故障风险，实现故障的提前预警，为预防性维护提供依据。

（二）故障定位：精准锁定故障点

故障定位是故障处理的关键，直接影响后续处理效率。配网自动化技术主要通过馈线自动化（FA）与主站自动化两种方式实现故障定位。

馈线自动化无需主站系统干预，通过终端设备之间的协同实现故障定位。根据实现方式不同，可分为就地控制模式与集中控制模式。就地控制模式下，终端设备通过检测故障电流、电压等信息，自行判断故障位置，并通过相邻终端的通信实现故障定位与隔离，如重合器 - 分段器模式，重合器检测到故障后跳闸，分段器根据故障电流是否通过判断故障区段，实现定位与隔离；集中控制模式下，终端设备将故障信息上传至区域控制中心，控制中心对多个终端的故障信息进行综合分析，定位故障点。

主站自动化定位则依赖主站系统的故障诊断算法，结合终端上传的故障信息、设备状态等数据，通过拓扑分析、故障录波分析等方法精准定位故障点^[3]。例如，基于故障电流分布的定位算法，通过对比不同终端采集的故障电流大小与方向，锁定故障所在的线段；基于阻抗法的定位算法，通过计算故障点到终端设备的阻抗值，确定故障位置。随着人工智能技术的应用，部分系统引入神经网络、支持向量机等算法，通过训练历史故障数据，提高复杂故障场景下的定位准确性，如在多故障点、线路分支较多的复杂配网中，仍能实现精准定位。

（三）故障隔离：自动分隔故障区域

故障隔离是为避免故障扩大，保障非故障区域供电的重要环节。配网自动化技术通过远程控制开关设备实现故障区域的自动隔离，该过程与故障定位同步或紧随其后完成。

在馈线自动化就地控制模式下，故障定位完成后，终端设备可直接发出指令，控制故障区域两侧的开关设备跳闸，实现故障隔离。例如，分段器检测到故障后，会自动分闸，隔离故障区段，而重合器在跳闸后经过延时重合，恢复非故障区域供电。集中控制模式下，主站系统或区域控制中心在定位故障点后，通过通信网络向故障区域两侧的开关设备下发分闸指令，完成隔离。

开关设备的自动化水平是故障隔离的关键保障，配网自动化系统中常用的开关设备为智能真空断路器、负荷开关等，具备远程控制、状态反馈等功能，能快速响应系统指令，实现精准分合闸操作。故障隔离后，系统会将故障区域信息上传至主站，为检修人员提供明确的故障位置与范围，便于后续处理。

三、配网自动化技术在配电线路故障处理中应用的现存问题

（一）技术层面：兼容性与复杂场景适应性不足

一是系统兼容性问题。我国配网自动化建设历经多个阶段，不同时期建设的系统采用不同厂家的设备与技术标准，导致各系统之间数据格式、通信协议不统一，难以实现数据共享与协同运行。例如，早期建设的终端设备与新建主站系统无法正常通信，影响故障信息的传输与处理；二是复杂场景适应性不足。在山区、偏远地区等复杂地形，线路分布分散，通信信号不稳定，导致终端设备数据传输延迟或丢失，影响故障检测与定位准确性。此外，在多电源供电、线路分支密集的复杂配网中，故障电流分布复杂，传统定位算法易出现误判，影响定位精度。

（二）设备层面：终端设备可靠性与老化问题突出

终端设备是配网自动化系统的基础，其可靠性直接影响技术应用效果。部分地区由于建设资金有限，采用的终端设备质量参差不齐，运行稳定性差，易出现数据采集错误、指令响应延迟等问题。同时，早期安装的终端设备已运行多年，出现老化、性能下降等问题，无法适应新的运行需求。例如，部分老旧 FTU 不支持新型通信协议，无法与主站系统实现数据交互，导致故障检测与定位功能失效。此外，开关设备的可靠性也有待提升，部分智能开关在恶劣天气下易出现拒动、误动等情况，影响故障隔离与恢复效率^[4]。

（三）管理层面：运维体系与人员素质不匹配

配网自动化技术的高效应用需要完善的运维体系与高素质的专业人员支撑。目前，部分电力企业的运维管理体系仍停留在传统模式，缺乏针对配网自动化系统的专项运维制度，导致设备故障无法及时发现与处理。同时，运维人员素质参差不齐，部分人员对自动化系统的原理、操作流程不熟悉，无法快速排查系统故障，当自动化系统出现问题时，仍依赖传统人工方式处理，影响技术应用效果。此外，数据管理能力不足，主站系统积累大量运行数据，但缺乏有效的分析与挖掘手段，无法充分发挥数据的价值，难以实现故障的预测与预防性维护。

（四）成本层面：建设与升级成本较高

配网自动化建设涉及终端设备安装、通信网络搭建、主站系

统升级等多个环节，前期投入成本较高。对于经济欠发达地区的电力企业而言，资金压力较大，难以实现配网自动化的全面覆盖。同时，随着技术不断更新，现有系统需要定期升级改造，更换终端设备、优化主站算法等，后续运维成本也较高。部分企业为控制成本，选择简化建设方案，导致系统功能不完善，影响故障处理效果^[5]。

四、配网自动化技术在配电线路故障处理中的优化策略

（一）技术优化：提升兼容性与复杂场景适应性

一是统一技术标准与通信协议，推进配网自动化系统的标准化建设。国家层面应出台统一的技术规范，明确终端设备、通信网络、主站系统的数据格式与通信协议，确保不同厂家、不同时期的设备与系统能够兼容。电力企业在新建或升级系统时，应严格遵循标准，逐步替换不兼容的老旧设备；二是优化故障定位与诊断算法，提升复杂场景适应性。结合人工智能、大数据等新技术，开发更先进的故障诊断算法，如基于深度学习的故障定位模型，通过训练大量复杂场景下的故障数据，提高多故障点、复杂拓扑结构下的定位准确性。同时，针对偏远地区通信信号差的问题，采用光纤通信与无线通信相结合的方式，优化通信网络架构，提升数据传输的稳定性与实时性。

（二）设备升级：提高终端设备可靠性与智能化水平

一是加大设备研发投入，选择质量可靠、性能先进的终端设备。电力企业应与设备厂家合作，根据配网运行需求，定制化开发具备高稳定性、抗干扰能力强的 FTU、DTU、TTU 等终端设备，提升设备在恶劣环境下的运行可靠性。同时，推广采用智能化程度高的设备，如具备自诊断功能的终端设备，可实时监测自身运行状态，发现故障后自动告警；二是加快老旧设备更新换代，制定设备全生命周期管理计划，对运行年限长、性能下降的终端设备与开关设备进行逐步替换，确保系统整体运行效率。此外，加强设备出厂检验与现场调试，严格把控设备质量关。

（三）管理完善：构建专业化运维体系与提升人员素质

一是构建专业化的配网自动化运维体系，制定专项运维管理制度，明确运维流程、责任分工与考核标准。建立设备台账，对终端设备、开关设备、通信设备等进行全生命周期管理，定期开展巡检、维护与校准工作，及时发现并处理设备故障。同时，搭建运维管理平台，实现对运维工作的信息化管理，提高运维效率；二是加强人员培训，提升运维人员专业素质。制定系统的培训计划，定期组织运维人员学习配网自动化技术原理、系统操作流程、故障排查方法等知识，邀请技术专家开展现场指导。此外，开展技能竞赛、案例分析等活动，提升人员解决实际问题的能力，打造一支高素质的专业运维队伍。

（四）成本控制：优化建设方案与多元化资金投入

一是优化配网自动化建设方案，根据不同区域的负荷密度、供电重要性等因素，制定差异化的建设策略。对于城市核心区域、重要用户所在区域，采用功能完善的高配网自动化系统；对于农村、偏远地区等负荷较低的区域，采用简化版系统，重点实现故障检测与基本隔离功能，降低建设成本；二是拓展多元化资金投入渠道，除企业自有资金外，积极争取政府专项补贴、政策性贷款等资金支持，缓解资金压力。同时，加强成本管控，在设备采购、工程建设等环节，通过招标采购、集中建设等方式降低成本，提高资金使用效率。

五、结论

配网自动化技术在配电线路故障处理中发挥着关键作用，通过实时监测实现故障检测，借助馈线自动化与主站自动化实现精准故障定位，通过自动控制开关设备完成故障隔离，最终快速恢复非故障区域供电，大幅提升配电线路故障处理效率与供电可靠性。然而，该技术在应用过程中仍存在技术兼容性不足、设备可靠性不高、运维体系不完善、成本较高等问题，制约其应用效果的充分发挥。通过技术优化、设备升级、管理完善与成本控制等策略，可有效解决这些问题，提升配网自动化技术的应用水平。

参考文献

- [1] 国家电网有限公司. 配网自动化技术导则 [S]. 北京：中国电力出版社，2020.
- [2] 孙明. 配网自动化技术在故障定位中的应用研究 [J]. 电力系统自动化，2019, 43(12): 145 - 150.
- [3] 赵千. 馈线自动化在配电线路故障处理中的实践与优化 [J]. 电力自动化设备，2020, 40(8): 201 - 206.
- [4] 周柱. 智能电网背景下配网自动化技术发展趋势分析 [J]. 中国电力，2021, 54(5): 89 - 95.
- [5] 陈佳. 配网自动化系统运维管理体系构建与实践 [J]. 电力安全技术，2022, 24(3): 45 - 49.

存量煤电升级之路：重庆地区某老旧机组等容量替代案例分析

江剑，林侃

中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司，四川 成都 610021

DOI:10.61369/EPTSM.2025120010

摘 要： 在“双碳”战略引领下，推动老旧煤电机组升级改造是构建新型电力系统的关键环节。本文针对重庆地区某 $2\times 300\text{MW}$ 亚临界老旧机组的现状，提出等容量替代方案设想。结合《燃煤发电机组单位产品能源消耗限额》等最新政策，从先进技术选型、初步经济性与环境效益等方面进行综合论述。经论证，采用超超临界机组实施替代，能显著提升机组效率与环保水平，是实现区域存量煤电清洁高效利用的可行路径。本文旨在为同类型机组的升级改造提供参考。

关 键 词： 重庆地区；等容量替代；超超临界火电机组；能耗限额；技术经济分析

The Path of Upgrading Existing Coal-fired Power Units: A Case Study on Capacity-equivalent Replacement of an Aging Unit in Chongqing

Jiang Jian, Lin Kan

China Power Engineering Consulting Group Limited, Southwest Electric Power Design Institute Co.,Ltd., Chengdu, Sichuan 610021

Abstract : Guided by the "dual carbon" strategy, promoting the upgrading and renovation of aging coal-fired power units is a crucial aspect of constructing a new type of power system. This paper proposes a concept for a capacity-equivalent replacement plan tailored to the current state of a $2\times 300\text{MW}$ subcritical aging unit in the Chongqing region. Integrating the latest policies, such as the "Energy Consumption Limits per Unit Product for Coal-fired Power Generation Units," the paper provides a comprehensive discussion on advanced technology selection, preliminary economic feasibility, and environmental benefits. Through demonstration, it is evident that implementing replacement with ultra-supercritical units can significantly enhance unit efficiency and environmental performance, offering a viable path for the clean and efficient utilization of regional existing coal-fired power. This paper aims to provide a reference for upgrading and renovating similar units.

Keywords : Chongqing region; capacity-equivalent replacement; ultra-supercritical thermal power units; energy consumption limits; technical and economic analysis

引言

为了推动能源结构的清洁低碳转型，要求煤电行业精准落实“三改联动”政策，持续优化能效环保标准，近年来，国家密集出台了《全国煤电机组改造升级实施方案》与《新一代煤电升级专项行动实施方案（2025—2027年）》等指导文件。国家标准《燃煤发电机组单位产品能源消耗限额》（GB21258-2024）的发布与实施，为现役机组的能效达标设立了明确的底线与时限。该标准对不同容量等级的机组提出了严格的供电煤耗限额值，对于已投运多年的老旧火电机组，其能耗水平已逼近或超过限定值，升级改造迫在眉睫。

重庆电网作为重要的受端电网，在“十五五”期间仍将面临电力供应缺口。与此同时，区域内一批早期投运的亚临界机组设备老化、能耗过高，难以满足新国标要求。本文以重庆地区某 $2\times 300\text{MW}$ 亚临界老旧机组的等容量替代方案设想为案例，旨在探索一条符合国家政策、适应区域需求的技术路径，并为同类改造项目提供决策参考。

作者简介：

江剑（1979.09—），男，汉族，湖北省武汉市人，本科，高级工程师，单位：中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司，研究方向：热能与动力工程；

林侃（1985.09—），男，汉族，福建省闽侯县人，本科，高级工程师，单位：中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司，研究方向：热能与动力工程。

一、案例概况

本案例所研究的电厂位于重庆市某工业园区内，现拥有2台300MW亚临界燃煤发电机组。机组虽完成了超低排放环保改造，并实施了供热改造，但主机效率低下的根本问题并未解决。根据2024年专项节能诊断报告，两台机组在实际运行工况下的供电标煤耗分别高达351.63 g/kWh和348.76 g/kWh，远超《全国煤电机组改造升级实施方案》中“2025年火电平均供电煤耗低于300克标准煤/千瓦时”的总体要求，能耗过高，技术升级与等容量替代已势在必行。

实施等容量替代，首先是满足国家强制性能耗与环保政策的必然要求，避免机组因不达标而面临强制关停。其次，是保障重庆电网长远电力供应与安全稳定的战略需要。作为重要的负荷中心，重庆电网未来存在可观的电力缺额，新建的高效、灵活机组将作为可靠的支撑性电源点，不仅能增强电力供应保障能力，其优异的调峰性能也将促进区域内可再生能源的消纳，提升电网整体韧性。最后，这也是发电企业自身实现资产提质增效、可持续发展的内在驱动。通过等容量替代，企业可彻底摆脱高煤耗困境，充分利用现有厂址资源、部分公用设施及人力资源，实现存量资产的价值重塑与核心竞争力提升。

二、等容量替代方案设想

（一）总体原则与技术目标

本项目方案设想以“等容量替代”为根本原则，即规划建设1台660MW级高效超超临界燃煤发电机组，并同步关停原有2台300MW亚临界机组。替代方案的核心目标是：通过采用当代先进的燃煤发电技术，使新建机组的能效与环保水平实现跨越式提升。具体而言，通过采用先进的超超临界技术，预计机组设计供电煤耗预期可降至约273.8 g/kWh，不仅显著优于老机组水平，也满足且严格优于GB21258-2024标准中对新建660MW级超超临界机组的能耗准入值要求。同时，机组将按照超低排放标准设计，确保二氧化硫、氮氧化物、烟尘等大气污染物排放浓度稳定达到乃至优于国家最新环保要求。

（二）主机选型与系统配置

在技术路线抉择上，针对重庆电网水电比重高、峰谷差大、火电机组需承担深度调峰任务的特点，本项目推荐采用技术成熟、经济性优异、调节性能良好的660MW高效超超临界一次再热机组。汽轮机进口初参数选用28MPa/600℃/620℃，这一参数等级在国内已拥有大量成功运行业绩，材料与制造工艺完全自主可控，在效率、可靠性与成本间可取得最佳平衡。

在锅炉选型方面，结合设计煤种为较高挥发份烟煤的特性，可选用技术成熟的Ⅱ型或塔式布置煤粉炉，具体选择可在后续主机招标中，综合各制造厂的最优方案与工程造价确定。制粉系统推荐采用中速磨煤机正压直吹式系统，其系统相对简单，响应负荷变化快，适合燃用设计煤种。

热力系统力求高效与可靠。拟采用10级回热抽汽（含0号高

压加热器），并设置一级低温省煤器，充分利用锅炉排烟余热加热凝结水，可有效降低机组热耗。给水系统配置1台100%容量的汽动给水泵，前置泵与主泵同轴布置，汽源取自主机中压缸排汽，经济性高。考虑到本项目为等容量替代，可利用毗邻电厂的蒸汽作为启动汽源，故不设常规的电动启动给水泵，简化系统并节省投资。凝结水系统则配置2台100%容量的凝结水泵，采用一台变频器拖动两台电机的“一拖二”方案，确保全负荷段的高效运行。

为满足严格的环保要求，烟气治理采用“协同治理”路线。新建石灰石-石膏湿法脱硫系统，采用高效复合塔技术。除尘系统在高效静电除尘器的基础上，结合湿法脱硫系统的除尘效果，可实现较高的综合除尘效率。脱硝系统采用SCR装置，确保较高的脱硝效率。通过上述组合，可保障烟气排放浓度稳定达到 $\text{SO}_2 \leq 35\text{mg/Nm}^3$ 、 $\text{NO}_x \leq 50\text{mg/Nm}^3$ 、烟尘 $\leq 10\text{mg/Nm}^3$ 的超低排放标准。

（三）厂址方案比选

基于该项目“等容量替代”的特点，本研究提出了两个厂址方案进行深度比选。

方案一：原址拆除重建方案。该方案核心思路是“集约利用、价值挖潜”。具体实施为：拆除现有2×300MW机组的主厂房、锅炉房等核心老旧设施，在原址区域新建660MW机组主厂房。同时，对厂区内仍有利用价值的存量资产进行最大程度的利用或改造。例如，保留并利用现有的两座6000 m³自然通风冷却塔（更换内部填料及除水器）、循环水泵房（更换水泵）、220kV升压站、厂前区行政办公及生活辅助建筑。将现有的露天煤场改造为全封闭式圆形煤场，解决环保问题。输煤系统在保留原有主干廊道及碎煤机室的基础上，进行局部改造衔接。此方案的突出优势在于：① 投资最省：充分利用了现有土地、水源、电网接口及大量公用设施，避免了重复建设，静态投资估算具有明显优势。② 用地集约：无需新征土地，符合国家节约集约用地的政策导向。③ 实施基础好：厂外交通、水源、灰场等边界条件均已落实。然而，该方案也面临显著挑战：① 施工组织异常复杂：需在有限的场地内，统筹拆除、新建与部分老系统运行，安全保障压力大。② 利旧设施技术风险：尤其是已运行近20年的210米高烟囱，其加固改造以适配新机组烟道的技术难度与安全性需进行审慎的评估。

方案二：异地新建方案。该方案规划在紧邻的已建电厂北侧空地实施新建。厂区按全新现代化电厂高标准规划，布局不受既有设施约束，工艺流程更为顺畅。可新建一座自然通风冷却塔及配套循环水泵房，机组效率潜力更优。接入系统方案考虑以500kV电压等级接入附近电网枢纽，输送能力更强。此方案的主要优点在于：① 布局合理，施工便利：新建工程与老厂运行完全隔离，互不干扰，可大幅缩短工期，降低施工安全风险，而且老旧机组退役关停后可先不拆除转为应急备用电源。② 技术方案不受限：可采用最新的主厂房布置和最优的管线走向，无历史包袱。③ 预留扩建条件：新厂区通常可预留一台机组扩建场地，为未来发展留有余地。但其缺点同样突出：① 总投资高昂：需新征

用地，并配套建设全部厂内系统和部分厂外工程，单位千瓦静态投资显著高于方案一。② 前期工作复杂：涉及新的用地规划、环评、接入系统等多项核准支持文件，不确定性增加。

综合比较，方案一与方案二代表了“集约挖潜、控制投资”与“另起炉灶、追求最优”两种不同的升级路径。方案一的核心优势在于初始投资低、利用现有条件、推进速度快，但代价是更高的施工组织挑战和技术风险；方案二则通过更高投资换取更优的工程布局、更简单的施工条件和更可靠的技术系统，但面临更长的前期周期和更高的整体资本支出。建设方的最终决策，需在项目资金约束、对工期与风险的耐受度、以及对机组全生命周期性能与成本的综合预期之间进行审慎权衡。

三、方案可行性分析

（一）技术可行性分析

本替代方案所依托的高效超超临界发电技术，在我国已历经十余年的发展与实践，国内三大主机制造企业均具备完全自主知识产权和丰富的制造、运行业绩，设备可靠性已得到充分验证。老厂厂址区域地质稳定，满足建厂条件。现有水源、输煤系统均可满足新机组需求，贮灰场可继续利旧，外部条件支撑有力。技术方案中选用的设备与系统均属主流且先进，确保了项目的技术可行性。

（二）经济性与敏感性探讨

经初步技术经济分析，该项目具备财务可行性。考虑到重庆地区水电丰沛、火电利用小时数受季节性影响的特点，以及未来市场竞争，暂时采用4000小时作为基准利用小时数。在此条件下，测算得出的资本金财务内部收益率表明项目具有投资价值，且盈亏平衡点处于合理区间，显示出一定的抗风险能力。根据敏感性分析，项目经济效益对上网电价和到厂煤价两个因素最为敏感。这意味着，合理的电量电价和容量电价政策、与锁定稳定且低价的煤源，是保障项目经济性的关键。

（三）环境与社会效益

项目实施后，预计每年可节约标准煤约12万吨，相应减少二氧化碳排放约30万吨，对区域节能减排目标贡献显著。大气污染物排放总量将得到有效控制，环境效益突出。同时，项目将增强地区电力供应的稳定性，并对当地经济发展产生积极影响。

四、关键问题与实施路径探讨

尽管该项目等容量替代方案设想具备多方面可行性，但在实际推进过程中仍需关注几个核心问题。首要的是政策层面，老旧

机组的关停或转应急备用，以及新建项目的核准，均需获得地方能源主管部门的明确支持与批复。其次，在原址重建方案下，对运行多年的烟囱、冷却塔等设施的利旧，必须经过严谨的安全鉴定与评估，其加固方案的可靠性与经济性是不容忽视的技术风险。最后，项目长期稳定运行的经济性高度依赖外部条件，其中上网电价、燃料成本和利用小时数是决定性变量。正如敏感性分析所警示，如何寻找更有利的电量电价和容量电价政策支持，签订长期稳定的低价燃煤供应协议，以及如何在未来竞争激烈的电力市场中争取更高的发电利用小时数，将成为项目未来盈亏的关键。

针对上述问题，建议后续实施过程中应特别注意：主动加强与政府部门的沟通协调，积极争取将本项目纳入省级能源发展规划，明确其作为保障性电源的定位，为项目核准和未来电量计划铺平道路，寻求更有利于电厂生存的电量电价和容量电价政策；启动对利旧设施的检测鉴定工作，为后续工程设计提供准确依据，有效管控技术风险；项目的核心竞争力在于成本控制，因此，建设单位应致力于构建多元化的廉价燃煤供应体系，并积极参与电力市场交易，通过提供调峰等辅助服务，尽可能的提升机组的年利用小时数。

五、结论与展望

本文以重庆地区某2×300MW亚临界老旧机组为例，论证了通过等容量替代模式实现升级的可行性。虽然本案例研究对象具体，但其面临的能效环保压力、政策环境及电网需求在重庆地区具有普遍性。因此，本研究所提出的技术路径、方案比选及可行性分析结论，对于该地区其他面临相似升级压力的同类型机组，在规划思路、技术选型与风险识别方面均具有一定的参考与借鉴意义。

展望未来，煤电的转型之路不仅在于新建高效机组，更在于持续的技术迭代与角色重塑。根据《新一代煤电升级专项行动实施方案》的指引，替代机组在未来可进一步探索多种前沿技术路径。例如，开展燃煤耦合生物质或掺烧氨气等低碳燃料的试验，从源头降低碳排放；评估加装碳捕集、利用与封存（CCUS）装置的技术经济性，为实现近零排放做好技术储备。未来，电厂还应深度挖掘机组的灵活调节潜力，通过技术改造提升机组在低负荷下的运行效率与稳定性，并加快负荷响应速率，使煤电机组更好地适应大量新能源接入电网的调峰需求，从而在新型电力系统中积极寻找符合自身定位的战略价值。

高比例分布式电源接入下互感器计量误差特性研究

李飞, 史轮, 陈磊, 申洪涛, 武光华, 吴一敌, 申雪韵
国网河北省电力有限公司营销服务中心, 河北 石家庄 051000
DOI:10.61369/EPTSM.2025120011

摘 要 : 高比例分布式电源接入电力系统后, 电网呈现随机波动性、时变性及双向潮流等复杂特征, 显著劣化互感器计量精度, 直接影响电网经济结算与安全稳定。为此, 本文系统性综述该复杂工况下互感器计量误差特性演变、机理与研究进展。首先, 系统分析高比例分布式电源接入引发的电网运行特性演变, 明确其对互感器工作状态的扰动路径与影响机制;^[1]其次, 深度剖析计量误差内在产生机理, 揭示单/多因素耦合下的误差影响规律; 最后, 基于前述分析提出多维度误差抑制策略, 为互感器计量优化相关研究提供理论支撑。

关 键 词 : 高比例分布式电源; 互感器; 计量误差; 复杂工况

Research on the Metering Error Characteristics of Instrument Transformers under High Penetration of Distributed Generation

Li Fei, Shi Lun, Chen Lei, Shen Hongtao, Wu Guanghua, Wu Yidi, Shen Xueyun
Marketing Service Center, State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei 051000

Abstract : After high penetration of distributed generation is integrated into the power system, the power grid exhibits complex characteristics such as random fluctuations, time-varying behavior, and bidirectional power flow, significantly deteriorating the metering accuracy of instrument transformers and directly affecting the economic settlement and safety stability of the power grid. To address this issue, this paper systematically reviews the evolution, mechanism, and research progress of metering error characteristics of instrument transformers under such complex operating conditions. Firstly, it systematically analyzes the evolution of power grid operation characteristics caused by the integration of high penetration of distributed generation, clarifying the disturbance paths and impact mechanisms on the operating state of instrument transformers.^[1] Secondly, it deeply analyzes the internal generation mechanism of metering errors and reveals the error influence laws under single/multi-factor coupling. Finally, based on the aforementioned analysis, it proposes multi-dimensional error suppression strategies to provide theoretical support for research related to the optimization of instrument transformer metering.

Keywords : high penetration of distributed generation; instrument transformer; metering error; complex operating conditions

引言

高比例分布式电源接入通过改变电网拓扑结构与运行方式, 推动电力系统从传统“源随荷动”单向潮流模式向“源网荷储”多向互动复杂系统转型, 深刻影响电网电能质量与运行参数, 包括潮流分布紊乱、电压电流波动加剧以及谐波污染加剧问题^[1]。互感器作为联接电力一次系统、二次系统的关键耦合环节, 其传变特性与计量精度直接决定了二次测控、保护及计量装置数据采集的准确性与可靠性。互感器设计多基于50Hz工频正弦波标准, 并依托实验室静态校准。然而, 逆变器并网高次谐波、新能源出力间歇性所引发频率微波动及潮流反转导致宽范围负荷变化, 均导致互感器长期处于非标准工况, 其现场误差远超实验室检定值, 严重影响电能计量公平、状态估计准确度及继电保护可靠性, 亟需开展高比例分布式电源接入下互感器计量误差特性研究^[2-4]。

基金项目: 国网河北营销中心科技项目“基于电气拓扑的广域互感器群强关联性分析与在线校准数据筛分方法研究”(SGHEYX00AQJS250053)

作者简介: 李飞(1982.10-), 男, 汉族, 河北省石家庄人, 硕士, 单位: 国网河北省电力有限公司营销服务中心, 研究方向: 为电力传感量测技术、电力计量等。

一、高比例分布式电源接入场景互感器计量特性

高比例分布式电源接入从拓扑结构、运行参数、电能质量维度影响电网运行特征。具体而言，拓扑结构方面，配电网由辐射状转为网状，潮流双向波动引发铁芯磁化方向周期性反转，增大计量误差；运行参数方面，分布式电源间歇性导致电流幅值波动幅度提升3–5倍，造成铁芯工作点偏离额定磁密，非线性特性或饱和效应加剧；电能质量方面，分布式电源变流器引入高含量奇/偶次谐波，并网点电流 THD 易超出国标限值，同时叠加小幅频率波动，通过磁滞、涡流损耗进一步劣化互感器计量性能^[9]。综上分析，高比例分布式电源接入下互感器计量误差主要可围绕产生机理、影响规律展开。

常见互感器类型主要包括电流互感器、电压互感器、电子式电流/电压互感器以及组合式互感器，其核心功能、典型适用场景、误差关键影响因素如表1所示。传统电磁式电流互感器、电压互感器设计及校准均基于50/60赫兹额定正弦稳态工况，进而保障该场景下比值差、角差满足精度等级要求。高比例分布式电源接入通过幅值波动、谐波分量、时变特性造成互感器实际工作状态偏离设定工况，其中，幅值波动易使铁芯磁密偏离额定范围，低磁密导致磁导率下降、高磁密引发铁芯饱和，均扩大互感器计量误差；谐波分量易引发叠加损耗，高次谐波涡流损耗大幅高于基波，且造成磁化曲线多值性畸变，使损耗显著提升；时变特性导致励磁电流动态响应滞后，分布式电源出力快速突变情形，动

态误差占比明显增加。上述因素叠加作用，造成互感器计量误差显著增大，远超稳态允许范围。

二、高比例分布式电源接入场景互感器计量误差产生机理

（一）互感器计量误差传统分析方法

互感器计量误差传统分析方法基于正弦稳态理论，主要面向额定频率正弦波情形稳态误差展开研究，计量误差来源包括磁滞损耗、涡流损耗、励磁电流、二次负荷变化，通过等值电路模型、相量图法量化误差。然而，针对高比例分布式电源接入场景，该方法未考虑非正弦信号谐波耦合效应，缺乏针对时变过程动态响应滞后因素考量，且未结合潮流双向波动造成铁芯磁化反转损耗问题，导致误差计算值与实测值偏差显著，较难适配新型电网运行特性^[9]。

（二）高比例分布式电源接入场景互感器计量误差分析

鉴于传统误差机理难以适配非正弦、时变、双向潮流等复杂工况，无法全面解释磁滞–谐波耦合、涡流频率依赖及动态响应滞后等新增误差分量，诸多学者结合新型电力系统运行特性开展互感器计量误差机理体系研究。本节面向高比例分布式电源接入场景互感器计量误差新增机理，系统梳理铁芯磁滞–谐波耦合、涡流效应频率依赖性及动态励磁电流研究进展，深入剖析各机理的物理本质、量化规律及影响因素。

表1 常见互感器类型、适用场景及误差特性表

| 互感器类型 | 核心功能 | 典型适用场景 | 误差关键影响因素 |
|-------------|---------------------------------|------------------------------|---|
| 电流互感器 | 将大电流按比例转换为小电流，用于计量、保护及监测 | 发电侧、配电线路、用户侧进线等电流测量场景 | 1.低负荷率易进入强非线性区；2.电流频率与谐波含量；3.铁芯磁化特性；4.高频下分布参数寄生效应 |
| 电压互感器 | 将高电压按比例转换为低电压，用于电压测量与绝缘隔离 | 光伏电站母线、配电变压器高压侧、电网节点电压监测等 | 1.二次负荷大小与功率因数；2.电网电压畸变率；3.频率偏移；4.铁芯饱和程度 |
| 电子式电流/电压互感器 | 通过光电转换或罗氏线圈等原理采集信号，直接输出数字或模拟小信号 | 高谐波含量的光伏电站、智能配电网、数字化变电站等复杂场景 | 1.传感元件精度；2.光电转换模块噪声；3.温度与电磁环境；4.数据传输延迟 |
| 组合式互感器 | 集成电流、电压测量功能，简化接线，减少占地 | 光伏分布式电站出线柜、小型配电房等空间受限场景 | 1.电流与电压回路交叉干扰；2.共用铁芯的磁化耦合；3.负荷变化的协同影响 |

针对磁滞–谐波耦合研究，诸多研究通过 J–A 模型、Preisach 模型等量化铁芯磁滞特性，并引入谐波影响分析耦合机制。非正弦信号作用情形，基波形成主磁滞回线，高次谐波叠加形成次磁滞回线，总磁滞回线面积与损耗随谐波含量增加而增大，且谐波与基波相位差、谐波次数显著影响耦合效应。针对涡流效应频率依赖性研究，高比例分布式电源引入大量高次谐波，直接导致涡流损耗激增，进而加剧互感器计量误差。诸多研究通过建立多频率谐波涡流损耗计算模型、推导误差量化关联公式，证实互感器计量误差与谐波频率、含量存在显著相关性。针对动态励磁电流研究，传统理论假设励磁电流与一次侧电流呈静态线性关系，实际工况存在铁芯磁滞惯性、绕组电磁惯性，导致一次侧电流快速情形励磁电流响应滞后，形成动态误差，其大小与电流变化率正相关。诸多研究通过构建等效电路模型，实现动态误差机理量化分析，并提出多类检测方法实现动态误差精准分离、量化。

三、高比例分布式电源接入场景互感器计量误差影响规律研究

（一）互感器传变误差物理机理与建模基础

电磁式互感器计量准确性取决于其信号传递的保真度，其物理模型通常基于 T 型等效电路进行描述。根据法拉第电磁感应定律与基尔霍夫电流定律，互感器一次电流并非全部感应至二次侧，而是分流出一部分励磁电流以维持铁芯磁通。定义互感器的复数误差为二次电流与一次电流的差值比。由上述定义及物理机制分析可知，励磁电流直接导致出现比值差、相位差。

互感器铁芯磁导率随磁通密度呈现显著非线性，高比例分布式电源场景极低负荷工况易造成铁芯磁导率骤降、励磁电流占比提升，进而引发计量误差；高次谐波则通过磁滞损耗、交叉调制效应加剧非线性偏差。传统频域模型难以表征该复杂过程，部分研究结合 Jiles–Atherton 理论构建时域微分模型可精准刻画铁芯

动态磁化轨迹。

（二）互感器计量误差频率偏移敏感性分析

高比例分布式电源接入场景系统频率呈现围绕50Hz工频动态波动特征，该频率偏移幅度通常处于 $\pm 0.5\text{Hz}$ 范围。互感器基于感抗原理设计，其计量精度关于频率频移幅度呈现累积影响。同时，互感器二次侧感应电动势与频率、匝数及磁通密度成正比，励磁电抗则可由直接表征。

理论分析表明，频率波动与互感器计量误差呈现显著负相关特性：系统因重载或源荷失衡导致频率低于额定工频情形，为维持二次回路电压平衡，铁芯磁通密度需相应增大以补偿电动势损失，同时励磁电抗随频率线性减小，双重效应致使励磁电流显著增大，进而导致互感器比值差向负向漂移、相位差绝对值增大；同理，频率高于工频时，励磁电抗增大、分流作用减弱，误差特性得以改善。针对关口计量等高精度要求场景，微小频率偏差即可能导致误差超出互感器允许限值。

（三）互感器多频谐波复合计量误差特性

分布式电源逆变器运行过程产生高频开关谐波、其倍频分量，导致互感器长期处于非正弦波形激励工况。互感器多频谐波复合计量误差，具体涉及幅频响应、相频响应以及非线性耦合等复杂物理过程。

随着谐波频率升高，铁芯内涡流损耗与频率呈平方关系急剧增大，导致等效励磁电阻衰减，进而显著增大励磁电流有功分量，造成比值差恶化；高频段，互感器绕组漏抗随频率线性递增，励磁阻抗受铁芯非线性特性及饱和效应制约，其增长幅度通常滞后于漏抗，上述阻抗比例失衡导致高次谐波传输过程产生相移，引发二次侧输出波形严重畸变。并且，即使基波电流保持稳定，大幅值谐波电流仍将改变铁芯瞬时工作点，使其在磁化曲线非线性区域频繁切换，进而改变基波分量平均磁导率。

（四）宽域负荷波动情形互感器计量误差演化规律

呈现双向流动、大幅波动特征，互感器需在极轻载至重载、

正反向潮流频繁切换全工况下维持计量性能。轻载情形互感器处于“低灵敏度区”，铁芯工作于瑞利区，磁导率随磁场强度骤降引发励磁阻抗大幅衰减，比差、角差远超互感器计量误差允许下限，成为分布式电源计量主要误差来源。此外，分布式电源运行模式切换引发功率因数剧烈波动，通过改变二次回路去磁效应进一步扩大误差波动范围。

综上，高比例分布式电源接入直接改变互感器电磁工作环境，系统频率动态偏移、谐波非线性耦合以及宽幅负荷波动协同作用，造成互感器计量误差呈现显著时变性、非线性特征。

四、结语

本文面向高比例分布式电源接入下互感器计量误差特性研究，系统探究互感器计量误差信号特性、物理机理及演变规律，电网运行层面，高比例分布式电源造成电网呈非平稳随机性、频谱展宽以及动态时变特征，传统稳态模型失效；误差机理层面，误差来源为变频、畸变信号下铁芯非线性磁化致励磁阻抗动态变化，以及高频下分布参数引发寄生效应；影响规律层面，频率降低经感抗下降加剧比差、角差，谐波通过损耗增加、磁路耦合产生附加误差并干扰基波计量，轻载工况使互感器进入强非线性“高误差区”。

本研究作为互感器计量误差分析基础理论部分，对后续误差校准研究工作具有指导意义，未来需要深化暂态误差机理研究、研发适配性互感器误差校正技术、推动互感器迭代升级、建立全场景评估体系，进而有效保障高比例分布式电源接入下互感器计量准确性。

参考文献

[1]戴璟,王剑晓,张兆华,等.新型电力系统形态特征与关键技术[J].新型电力系统,2023,1(2):161-183.
[2]周峰,殷小东,葛得辉,等.电力量子计量技术的进展与趋势.高电压技术2023,49(2):618-635.
[3]蒋建东,李梦佳,周峰,等.互感器误差校验技术综述[J].科学技术与工程,2025,25(3):879-892.
[4]周峰.电力互感器误差智能校验与在线监测技术[M].中国电力出版社,2023.
[5]黄天超,李志新,黄奇峰,等.计量用低压电流互感器直流偏磁下的误差计算方法和特性研究[J].电网技术,2025,49(01):373-380.
[6]殷小东,王斌武,曹伟,等.实时工况下计量用低压电流互感器校准技术研究[J].计量学报,2025,46(08):1083-1090.

1000MW 二次再热机组二再单屏超温问题分析、调整及处理措施

欧阳伟基

广东电研锅炉压力容器检验中心有限公司, 广东 广州 510700

DOI:10.61369/EPTSM.2025120012

摘 要 : 结合该 1000MW 二次再热锅炉的结构特点、金属材质、运行方式等, 分析二再单屏超温的原因, 从燃烧调整、设备改造等多方面进行处理, 很好的解决了单屏超温的问题, 保证了机组的安全和经济性。

关 键 词 : 二次再热; 1000MW; 单屏超温; 改造

Analysis, adjustment, and treatment measures for the overheating problem of the second reheat single screen in a 1000MW secondary reheat unit

Ouyang Weiji

Guangdong Dianyan Boiler & Pressure Vessel Inspection Center Co.,Ltd. Guangzhou, Guangdong 510700

Abstract : Based on the structural characteristics, metal materials, and operating mode of the 1000MW secondary reheat boiler, the reasons for the overheating of the single screen in the secondary reheat boiler are analyzed. Treatment is carried out from various aspects such as combustion adjustment and equipment modification, effectively solving the problem of overheating of the single screen and ensuring the safety and economy of the unit.

Keywords : secondary reheating; 1000MW; single screen overheating; renovation

一、设备概述

某电厂锅炉是某锅炉厂生产的1000MW等级超超临界二次再热 π 型锅炉, 该锅炉为二次中间再热、超超临界压力变压运行直流锅炉、单炉膛双切圆、平衡通风、固态排渣、全钢架、全悬吊结构、露天布置的 π 型锅炉。主要参数 (BMCR) 为: 过热器出口压力 33.4MPa, 出口温度 605℃; 一次再热出口压力 10.7Mpa, 出口温度 623℃; 二次再热出口压力 3.24Mpa, 出口温度 623℃。锅炉尾部采用双烟道布置形式, 采用新型低 NO_x 燃烧器 + 高位 SOFA 风布置反向双切圆燃烧方式, 过热器系统为三级布置, 分别为分隔屏、后屏、末过, 均布置在炉膛上部, 采用煤水比调节汽温, 高、低压再热器系统均采用两级布置, 水平烟道分别布置高压末再和低压末再, 尾部前烟道布置高压低再, 尾部后烟道布置低压低再, 再热器系统采用烟气再循环 + 尾部烟气挡板 + 燃烧器摆动的组合式调温方式, 烟气再循环为取自省煤器出口的热烟。制粉系统采用中速磨冷一次风直吹式系统。每炉配 6 台 HP1103 中速磨煤机, 煤粉细度 R₉₀=18%。锅炉采用双切圆燃烧方式, 每台磨煤机带 8 只燃烧器。

低压高温再热器 (二次再热器末级) 管屏材质: 1 号管 $\Phi 60 \times 4.0$, 材质: SA-213TP310HCBN; 2、3 号管 $\Phi 57 \times 4.0$,

材质: SA-213TP310HCBN; 4-11 号管 $\Phi 57 \times 4.0$, 材质: SA-213S30432; 报警温度为: 649℃。

二、单屏超温现象描述

机组整套启动调试期间, 首次从 800MW 升至 1000MW 时, 发现低压高再 10 屏整体壁温高出其他屏 40-50℃, 低压高再出口汽温升至 580℃ 时, 10 屏 11 管壁温达到 648℃ (报警温度 649℃)。通过调整控制二再出口温度在 580℃ 左右, 机组可以带至满负荷。但当机组负荷超过 800MW 时, 该屏温度会显著较其他屏高, 且负荷越高, 偏差越大。1000MW 时, 高出其他屏 50℃ 左右, 限制了二再出口汽温不能达到额定。

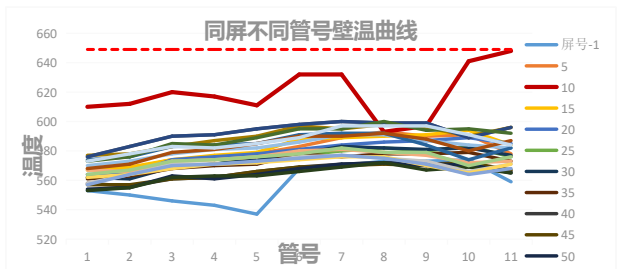


图1- 低压高再同屏不同管号壁温曲线 (1000MW 工况)

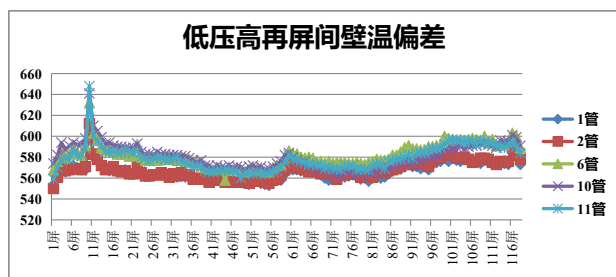


图2- 低压高再屏间壁温偏差 (1000MW 工况)

三、二再单屏超温的原因分析

(一) 根据图2,在1000MW工况时对于低压末级再热器壁温分布情况进行整理分析:

- (1) 锅炉整体壁温水平分布均呈驼峰型,与理论设计相符;
- (2) 10屏管壁温度存在异常,壁温高于其他屏40 ~ 50℃,与理论设计不相符。

(二) 对5-15屏区间管间壁温运行情况进行整理分析:

- (1) 1-4、6、7号管壁温偏高30℃,10、11管壁温最高,其中11管壁温偏高约46℃。
- (2) 5-9、11-15屏管温度分布趋势一致,壁温差较小。10屏与其他屏趋势不同,存在异常,管壁温波动比较大,与理论设计不相符。

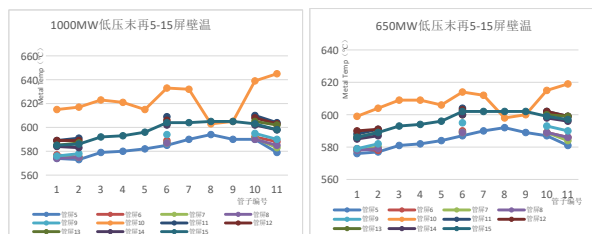


图3-1000MW、650MW 工况低压末再5-15屏壁温情况

(三) 结构设计方面

本工程采用成熟结构,并已在许多项目中应用。本次对集箱管道结构重新进行了校核,工质流动偏差控制均在4%以内,整个受热面选型设计是合理的,且从另合同类型锅炉整体运行效果来看与设计基本一致,且偏差可控,所以结构设计方面是没有问题的。

(四) 烟气侧偏差方面

本工程水平烟道中依次布置了末级过热器、高压高温再热器、低压高温再热器,烟气侧对这三组受热面影响是一致的,因此我们对本锅炉烟气上游末级过热器、高压高温再热器壁温分布也进行了分析:

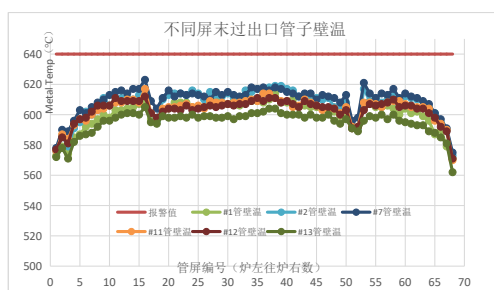


图4- 末过出口管壁温分布 (1000MW 工况)

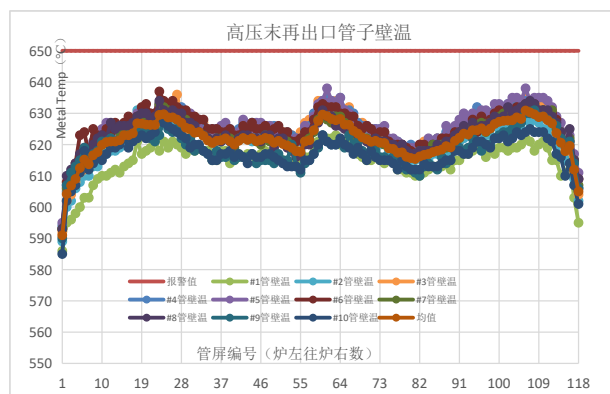


图5- 高压末再出口管子壁温分布 (1000MW 工况)

上述统计可以看出末级过热器的壁温分布较均匀,基本都控制在620℃以内;高压高再壁温趋势与低压高再基本相同,高压高再10屏区域壁温基本没有偏差,都保持在640℃以下。锅炉整体运行情况与设计相符。综上对于#1炉10屏超温问题,我们可以排除烟气侧偏差的原因。

(五) 工质侧方面

排查低压末再集箱内部检查视频,发现10屏集箱开孔正好处于集箱筒身拼接内壁加工凹槽的斜坡顶点位置,且处于蒸汽流向的下游。



图6 锅炉吹管后低压高再集箱10屏开孔处内窥镜情况

工质在集箱内部从9屏向10屏方向流动,流场在此处会放生改变,形成涡流区,涡流效应最终体现在对工质的流动阻力和工质的流量分配上。且工质流量、流速越高,涡流效应越显著,对管子中工质流量的影响越显著,也与运行情况吻合。

锅炉二再受热面超温根本原因是烟气侧热负荷和工质侧流量不匹配造成的。

四、低压高温再热器单屏超温的燃烧调整及处理

(一) 运行方式燃烧调整措施:

- 1) 根据汽温、壁温情况,适当开大一次再热侧烟气挡板,关小二次再热侧烟气挡板,保证两侧烟气挡板开度总合大于120%;
- 2) 因二再超温点在左侧,适当将左侧燃烧器切圆摆角下摆,右侧燃烧器切圆摆角上摆,同时兼顾过热器、一再出口汽温偏差在允许范围内;
- 3) 调整吹灰频次,加强吹灰,水冷壁区域24小时全面

吹扫2次，其他区域24小时全面吹扫1次；4）适当降低烟气再循环量；5）将燃尽风水平摆角调整至最大反切位，消旋，减少烟气温度偏差；6）适当开大左侧最上层二次风门开度，冷却左侧炉膛出口烟温；7）适当开大左侧二再减温水开度，保证至少有30℃以上的过热度，且二再出口两侧汽温偏差在允许的范围。

经过以上的运行调整，二再壁温不超温的情况下，可以将二再出口温度调整至610℃以上，主汽、一再出口温度至额定。

（二）设备改造处理措施：

管屏超温可以通过减少管屏的吸热量或增加工质流量两个方面来考虑。加装不锈钢罩壳的方案可以减少管屏的吸热量，但此区域烟温在850℃左右，长时间的运行，罩壳有被烧坏的风险，因此不建议加不锈钢罩壳。

通过减少吸热量的调整手段效果有限，要解决管屏超温的问题最终还是要蒸汽侧进行调整。通过减少管屏的长度来减少换热面积、减少管屏阻力增加流量，实现降低管屏温度是最简单也是有效的手段，具体为：1）需要调整的管屏为：第9、10、11屏（从左到右）；2）如图7所示将第10屏1-9号（从外到内）管向上缩短4.5m，单管减少长度约9m，壁温约下降32℃；将第10号管向上缩短5m，单管减少长度约10m，壁温约下降40℃；将第11号管向上缩短5.8m，单管减少长度约11.6m，壁温约下降48℃。将第9、11屏整体缩短1.5m，解决缩短10屏后形成烟气走廊带来的壁温稍升高的问题；3）现场工作量：对管屏截短，现场焊口66道，增加吹灰区域防磨护板。

（三）改造后的效果：

改造后，低压高温再热器第10屏整体温度与其他管屏温度一致，未出现超温点，可以将过热器、一再、二再调整至额定参数，保证了机组的安全和经济性，彻底解决了二再单屏超温的问题。

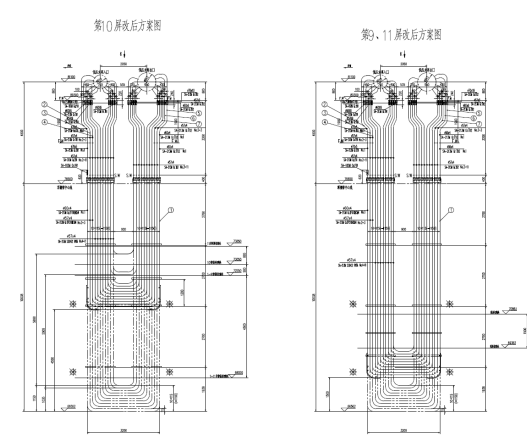


图7 低压高温再热器管屏改造方案

五、总结

1000MW二次再热器机组因效率高，能耗低而得到大力推广。本项目出现的机组高负荷二再单屏超温问题，通过分析判断，原因主要是管屏进口为集箱拼接处，内径偏差形成了涡流，影响了管屏工质流量，造成超温。通过燃烧调整和设备改造，可以将主汽、一再、二再调整至额定参数，彻底解决了二再单屏超温问题，保证了机组的安全和经济性。

参考文献

[1]王林,刘辉,刘超等.1000MW超超临界二次再热塔式锅炉过热器超温分析与对策[J].陕西电力,2016,44(8).
[2]宁新宇,刘忠轩,孙栓柱等.1000MW超超临界塔式锅炉过热器、再热器管壁壁温超温分析与试验研究[J].锅炉技术,2019,50(8).
[3]刘超,刘辉,王林,等.1000MW二次再热机组塔式锅炉过热器与再热器优化改造[J].热力发电,2017,46(08):96-100+112.
[4]王小华,张战峰,黄伟珍,等.1000MW机组锅炉低负荷下管壁超温诊断及运行优化调整[J].热能动力工程,2019,34(8).

机场柴油发电机组并机逻辑优化与可靠性研究

成华轩

四川机场集团成都天府国际机场, 四川 成都 641400

DOI:10.61369/EPTSM.2025120013

摘 要 : 机场柴油发电机组并机系统是保障机场关键设施不间断供电的核心, 其可靠性与运行效率至关重要。本文针对现有并机系统在同步精度、负载分配灵活性和动态响应方面的不足, 展开了系统性的逻辑优化与可靠性提升研究。仿真与模拟验证表明, 本文提出的优化策略能显著提升并机系统的智能化水平、供电可靠性与经济运行效益, 为机场应急供电系统的升级改造提供了理论依据和技术方案。

关 键 词 : 柴油发电机组; 并机控制; 可靠性; 负载均衡

Research on Logic Optimization and Reliability Enhancement for Parallel Operation of Diesel Generator Sets at Airports

Cheng Huaxuan

Chengdu Tianfu International Airport, Sichuan Airport Group, Chengdu, Sichuan 641400

Abstract : The parallel operation system of diesel generator sets at airports serves as the core for ensuring uninterrupted power supply to critical airport facilities, with its reliability and operational efficiency being of paramount importance. This paper conducts a systematic study on logic optimization and reliability enhancement to address the deficiencies in the existing parallel operation system in terms of synchronization accuracy, flexibility in load distribution, and dynamic response. Simulation and modeling validations demonstrate that the optimization strategies proposed in this paper can significantly enhance the intelligence level, power supply reliability, and economic operational efficiency of the parallel operation system, providing theoretical foundations and technical solutions for the upgrading and transformation of airport emergency power supply systems.

Keywords : diesel generator sets; parallel operation control; reliability; load balancing

引言

柴油发电机组因其启动迅速、运行独立、容量范围广等优点, 已成为机场应急供电系统的核心组成部分。对于负荷容量大、波动性强的机场场景, 通常采用多台柴油发电机组并联 (并机) 运行的方式, 以提供充足的备用功率, 并根据实际负荷灵活调整运行机组数量, 从而兼顾供电可靠性与运行经济性。然而机场负载具有典型的“潮汐式”波动特征, 且包含大量对电能质量极为敏感的精密电子设备, 这对并机系统的动态响应速度、同步控制精度和负载分配策略提出了巨大挑战。基于此, 本文聚焦于机场柴油发电机组并机系统, 旨在通过逻辑优化与智能控制策略设计, 全面提升其运行可靠性与经济性。文章系统分析现有并机系统的运行现状, 深入剖析其潜在缺陷与影响可靠性的关键因素。设计一套闭环智能并机控制框架, 重点研究基于负荷预测的自适应投切、基于改进下垂控制的动态负载均衡、基于模糊逻辑的智能同步以及基于故障诊断的容错重构等核心策略。引入预测与健康管理理念, 构建故障诊断与剩余使用寿命预测模型, 并设计其与并机逻辑的联动机制, 实现系统全生命周期的主动维护。研究旨在为构建新一代智能、高效、高可靠的机场应急供电系统提供理论支撑和技术方案, 具有重要的理论价值和工程应用前景。

一、机场柴油发电机组并机系统现状与可靠性分析

(一) 典型并机逻辑流程剖析

在柴油发电机领域除考虑其安全性和稳定性外, 还需要考虑节能, 即电能的经济性。在负荷和频率变化大的情况下, 需要配备两台或两台以上的柴油发电机组, 供电系统因具有备用设备使

得其稳定性和安全性得到了提高, 也使其可以随着负载量的变化调整其相应的机组投入数量^[1]。机场柴油发电机组并机系统作为应急供电的核心中枢, 其运行流程环环相扣。当市电异常时, 系统立即启动预设机组, 完成自检、参数加载和预热等准备工作^[2]。进入同期检测阶段, 系统会精确调控待并机组的电压、频率和相位, 确保与母线参数严格匹配, 为安全并网创造条件。在

最佳时机完成合闸并机后，系统进入负载分配阶段，通过下垂控制等方式实现多台机组的功率均分，以保障机场关键负载的稳定运行。当市电恢复正常，系统会遵循平稳卸载原则，先将负载转移至市电，再逐步降低机组出力、分闸，并经过冷却后完成停机^[3]。尽管这一流程能满足基本需求，但在应对机场负载的强波动性和敏感负载的高质量要求时，其在同步精度、负载分配灵活性和动态响应速度方面存在明显不足，为系统可靠性埋下隐患。

（二）现有并机逻辑的潜在缺陷与瓶颈分析

现有机场柴油发电机组并机系统在复杂运行场景下暴露出系统性缺陷，严重威胁供电可靠性与运行效率^[4]。其核心问题在于传统下垂控制逻辑无法应对机组差异、线路阻抗及频繁的负载突变，导致负载分配严重不均，部分机组长期过载而部分轻载，极大缩短了设备寿命；同时落后的模拟信号采集与固定 PID 同步控制精度不足、响应滞后，并机时极易产生巨大冲击电流，有烧毁设备和引发关键系统中断的风险。此外，系统缺乏自适应能力，采用固定的机组投切模式，无法匹配机场负载的潮汐式波动，造成严重的燃油浪费和无效磨损^[5]。更严峻的是，系统容错机制薄弱，单点故障易引发连锁反应导致系统瘫痪，且故障定位与恢复时间远超应急标准。在机组启停、负载突变等过渡过程中，固定参数控制无法保证电压、频率稳定，加之缺乏谐波抑制能力，导致供电质量难以保障，加剧了设备损耗。

（三）影响系统可靠性的关键因素识别

机场柴油发电机组并机系统的可靠性是多重因素共同作用的结果，发电机组本体作为核心执行单元，其可靠性是系统稳定运行的基础，故障占比高达 45%–55%，主要源于发动机的燃油、润滑、冷却系统故障，发电机的绕组及励磁系统问题，以及辅助系统引发的连锁反应^[6]。并机控制设备作为系统的“大脑中枢”，故障占比 20%–25%，其控制器、传感器和执行机构的任何故障，特别是传感器精度下降或失效，都可能导致并机失败或系统瘫痪。控制策略的合理性同样至关重要，传统策略因参数固定、缺乏预判和环节割裂，难以适应机场负载的动态变化，易引发运行缺陷。

二、并机逻辑优化与智能控制策略设计

（一）优化总体思路与框架

为应对机场负载的强波动与高敏感特性，本文提出一种闭环智能并机控制框架。框架以“感知–决策–执行–反馈”为核心，通过感知层采集系统运行参数并预测负载变化，为决策层提供精准数据；决策层作为核心，融合实时数据与预测结果，制定最优的机组投切、同步控制、负载分配及容错策略；执行层则精确执行这些控制指令；反馈层实时监测执行效果并将偏差反馈至决策层，通过动态调整形成一个自适应闭环，从而全面提升并机系统的同步精度、负载分配效率和运行稳定性。

（二）基于负荷预测的自适应投切策略

为应对机场负载的显著波动，提升并机系统运行效率，构建了一种基于负荷预测的自适应投切策略。利用长短期记忆网络（LSTM）模型，融合历史负载数据、航班计划、季节、时段及温

度等多维因素，精准预测未来 1 至 6 小时的负荷^[7]。在此基础上，根据预测负荷、单机额定功率及效率系数，并预留 10% 至 20% 的冗余功率，动态计算出最优运行机组数量。为避免投切过程对电网造成冲击，系统还采用平滑控制策略，在增减机组时逐步转移负载，确保整个过程的平稳过渡，从而在保障负载可靠供应的同时，实现机组的经济高效运行。

（三）基于改进下垂控制的动态负载均衡优化

传统下垂控制因频率/电压下垂系数（ k_p 、 k_q ）固定，受机组参数差异和线路阻抗不平衡影响，存在负载分配精度低、动态响应慢问题，难以适配机场负载突变场景。通过自适应下垂系数，根据各机组实际功率与目标功率的偏差动态调整 k_p 和 k_q ，以提升负载分配精度；同时引入带抗饱和措施的积分补偿环节，根据功率偏差的累积值微调频率和电压，以消除静态功率偏差^[8]。仿真验证表明，该策略可将功率分配偏差从 10% 以上降至 3% 以内，并显著提升负载突变时的动态响应速度和系统稳定性。

（四）基于模糊逻辑或神经网络的智能同步控制

传统同步控制精度低、动态响应慢，难以满足机场敏感负载供电需求。基于模糊逻辑的智能同步控制策略，无需精确数学模型，以电压差 ΔU 、频率差 Δf 、相位差 $\Delta \phi$ 为输入，调速器/调压器调节量为输出，经模糊子集划分、49 条模糊规则推理及重心法解模糊，实现高精度同步控制^[9]。仿真显示其可将电压/频率/相位差控制精度提升 50% 以上，合闸冲击电流降低 30% 以上。基于故障诊断与负载转移的容错重构策略，通过 SVM 故障诊断模型实时识别定位机组故障并快速隔离；再依剩余机组容量制定负载转移策略（容量充足则经改进下垂控制转移负载，不足则启动备用机组），确保敏感负载运行。故障模拟验证表明，该策略可 0.5 秒内完成故障识别隔离，1 秒内实现系统重构，母线电压频率波动可控。

（五）容错与重构控制策略

为提升并机系统的容错能力，降低故障机组对系统的影响，设计基于故障诊断和负载转移的容错与重构控制策略，实现系统故障后的快速恢复和稳定运行。感知层采集机组运行参数，通过 SVM 故障诊断模型实时识别故障机组及类型；识别后立即隔离故障机组并记录故障信息，再据剩余机组容量与当前负载制定负载转移策略，容量充足时通过改进下垂控制转移负载，不足时启动备用机组完成并机重构，过程中严控母线电压和频率波动。故障模拟验证显示，该策略可 0.5 秒内完成故障识别隔离，1 秒内实现负载转移与系统重构，保障连续供电。

三、融合健康管理的系统可靠性提升方案

（一）发电机组故障模式与影响分析

为实现发电机组的主动维护与故障预警，需先开展故障模式与影响分析（FMEA），结合机场柴油发电机组运行经验及相关文献识别典型故障模式，再通过风险优先数（RPN）法评估各模式风险等级，为后续故障诊断和剩余使用寿命预测提供依据^[10]。所识别的典型故障涵盖发动机故障、发电机故障以及控制系统故障，RPN 计算方式为严重度（S）× 发生概率（O）× 探测

度(D)，其中S、O、D均采用1~10分制，分数分别对应故障对系统影响程度、发生可能性、被探测难易程度的高低，比如发动机气缸故障RPN=144属于高风险模式，传感器精度下降故障RPN=60属于中风险模式，通过FMEA分析可明确发动机气缸故障、发电机定子绕组短路等高风险故障模式，为后续故障诊断和健康管理锁定重点关注对象。

（二）基于多传感器数据融合的故障诊断

单一传感器采集的数据存在局限性，如精度不足、易受干扰，难以实现故障的准确诊断，基于此提出基于多传感器数据融合的故障诊断方法，结合多个传感器采集的不同类型数据，提升故障诊断的准确性和可靠性。在发电机组关键部位安装多种传感器，采集机械状态（振动、温度、压力）、电气状态（电压、电流等）及环境（温湿度、粉尘）数据；随后对数据进行预处理（含数据清洗、min-max 标准化、特征提取），消除噪声并提升数据质量；基于D-S证据理论实现融合诊断，建立含故障模式与正常状态的识别框架，通过支持向量机获取各传感器初步诊断证据，经证据组合规则得到融合信任度，据此判定故障（信任度低于阈值则为未知故障）。

（三）基于数据驱动的剩余使用寿命预测

剩余使用寿命(RUL)预测是PHM核心，可为发电机组主动维护提供依据。本文采用深度学习LSTM模型开展数据驱动的RUL预测研究，构建机场柴油机组历史运行与故障数据集（含运行参数、时间、实际RUL），按7:3划分为训练集与测试集；随后进行特征工程，通过时域频域分析提取故障演化特征，采用皮尔

逊相关系数法筛选关键特征；训练LSTM模型（含输入层、2层LSTM隐藏层、全连接输出层，以MSE为损失函数、Adam为优化器）；用测试集验证，通MAE、RMSE、R²评估，结果显示模型预测精度高，满足工程需求。

（四）PHM与并机逻辑的联动机制

为实现并机系统从被动到主动维护的转变，设计PHM与并机逻辑的联动机制。该机制将PHM系统实时生成的包含故障诊断、RUL预测和健康指数的健康状态报告，直接融入并机控制器的决策过程，实现运行策略的动态调整与智能调度。当PHM诊断出轻微故障时，并机控制器会主动降低该机组负载以防恶化；若诊断出严重故障，则立即启动容错与重构，切除故障机组并转移负载，确保系统稳定。同时，基于RUL预测结果，系统会将RUL较短的机组列为重点监控对象，优先减少其运行时间，并在其RUL将尽时提前启动备用机组进行替换。

四、结束语

本文针对传统并机系统在应对机场负载强波动性与高敏感性时暴露出的同步精度低、负载分配不均、动态响应慢及容错能力弱等核心问题，展开了系统性的研究，并提出了一套融合智能控制与预测健康管理的综合优化方案。本文的研究成果能够为相关领域的工程技术人员和研究人员提供有益的参考，共同推动我国机场应急供电技术向着更智能、更可靠、更绿色的方向发展。

参考文献

- [1] 郑真福. 大功率柴油发电机组并机运行稳定性技术研究[J]. 通信电源技术, 2016, 33(6): 67-68. DOI: 10.3969/j.issn.1009-3664.2016.06.021.
- [2] 李帅帅, 狄乐蒙, 徐刚强, 等. 基于CAN总线的柴油发电机组并机控制系统解决方案[J]. 曲阜师范大学学报(自然科学版), 2020, 46(1): 82-86. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5337.2020.1.082.
- [3] 戴斌, 喻小涛, 肖世华, 等. 数据中心柴油发电机组并机主控冗余监控系统的设计[J]. 移动电源与车辆, 2022, 53(2): 22-26, 21. DOI: 10.3969/j.issn.1003-4250.2022.02.006.
- [4] 尹国强. 某数据中心柴油发电机组并机异常的原因分析[J]. 通信电源技术, 2020, 37(10): 76-78. DOI: 10.19399/j.cnki.tpt.2020.10.025.
- [5] 赵友诚, 朱长青, 刘金宁, 等. 虚拟同步机控制逆变器与柴油发电机组并联运行控制策略[J]. 兵器装备工程学报, 2023, 44(4): 127-132. DOI: 10.11809/bqzbgcxb2023.04.018.
- [6] 吕庆军. 柴油发电机组并联运行稳定性研究[D]. 黑龙江: 哈尔滨工程大学, 2012. DOI: 10.7666/d.Y2236652.
- [7] 同利伟. 柴油发电机组并联运行分析与综合控制的研究[D]. 华北电力大学, 华北电力大学(保定), 2007. DOI: 10.7666/d.y1151374.
- [8] 李东辉, 张均东, 纪玉龙. 柴油发电机组并联运行稳定性研究[J]. 西南交通大学学报, 2014(3): 494-498. DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.2014.03.019.
- [9] 贾园, 王正辉. 柴油发电机组并联运行分析与控制的研究[C]//2008年中国电机工程学会年会论文集. 2008: 1-7.
- [10] 谢远党, 李维嘉. 不同容量柴油发电机组并联运行时优化控制的研究[J]. 电测与仪表, 2011, 48(5): 49-50, 67. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1390.2011.05.012.

基于数字孪生与人工智能的光伏电站安全生产技术体系构建

水华伟

渭南峡阳新能源发电有限公司, 陕西 渭南 715300

DOI:10.61369/EPTSM.2025120014

摘 要： 本文系统探讨了数字孪生与人工智能技术在光伏电站安全生产中的融合应用。通过构建“云边端协同、孪生体驱动”的分层技术架构，整合多源数据感知、动态风险预警与智能决策支持，形成“感知—认知—决策—执行”的闭环管理体系。重点研究了基于多源数据融合的设备健康评估、气象耦合的风险模拟及运行异常预警方法，并进一步提出面向风险处置的协同决策机制——借助数字孪生进行仿真推演与方案验证，结合人工智能多目标优化算法实现处置策略的生成与优选，以及预防性维护策略与人机协同应急演练平台。最终推动光伏电站向自主化、智能化与可持续的安全运营模式演进。

关 键 词： 数字孪生；人工智能；光伏电站；安全生产；闭环管理

Construction of Safety Production Technology System of Photovoltaic Power Station Based on Digital Twin and Artificial Intelligence

Shui Huawei

Weinan Xiayang New Energy Power Generation Co., Ltd. Weinan, Shaanxi 715300

Abstract： This paper systematically explores the integrated application of digital twin and artificial intelligence technologies in the safety production of photovoltaic power stations. By establishing a hierarchical technical architecture featuring "cloud-edge-device collaboration and twin-driven operations," the framework integrates multi-source data sensing, dynamic risk prediction, and intelligent decision support to form a closed-loop management system of "perception cognition decision execution." The study focuses on equipment health assessment based on multi-source data fusion, weather-coupled risk simulation, and operational anomaly warning methods. Furthermore, it proposes a collaborative decision-making mechanism for risk response—leveraging digital twins for simulation and solution validation, combined with AI multi-objective optimization algorithms to generate and prioritize response strategies—along with proactive maintenance strategies and a human-machine collaborative emergency drill platform. Ultimately, it aims to promote the evolution of photovoltaic power stations toward autonomous, intelligent, and sustainable safety operation models.

Keywords： digital twin; artificial intelligence; photovoltaic power station; production safety; closed-loop management

随着光伏电站规模持续扩大与运行环境日益复杂，传统安全生产模式在风险预见性、响应速度与管理精细化方面面临严峻挑战^[1]。数字孪生与人工智能技术的融合为电站安全管理提供了全新路径。本研究旨在构建一套数字孪生为交互核心、以人工智能为决策支撑的安全生产技术体系，通过虚实映射、智能分析与闭环优化，进而将安全管理从被动性危机解决状态转移到积极的风险预防状态，以寻求以整体视角对太阳能发电场的高可靠、高效及智能化运行的一体化解决方案。

一、新技术体系总体架构设计

（一）体系构建的理论基础与核心逻辑

数字孪生绝非简单的三维模型，而是集成了物理、几何、规

则与行为的多维度、多概率的虚拟仿真系统^[2]。数字孪生与光伏电站安全生产的结合，其本质是构建一个持续性学习、同步性演进的能力。人工智能则赋予了这一虚拟体理解、分析、预测与决策的能力。两者的结合主要基于这样的理念：利用数字孪生提供

的实时、整体和高精度的数据信息源和试验系统，使用人工智能来分析和发现数据之间的深层联系并制定出最佳执行方案，再通过数字孪生验证与反馈，使过程从“事后应对”变为“事前预判和实时控制”，形成一个“感知－认知－决策－执行”的闭环，不仅实现了对光伏电站全生命周期的精准映射与实时干预，更推动安全生产管理模式从被动响应向主动预警与自适应调控的根本转变。

（二）分层融合的技术架构蓝图

该体系采用“云边端协同、孪生体驱动”的分层架构。在设备边缘侧，部署智能传感器和物联接口等组成系统的最基本单元，实时采集组件电流电压、逆变器运行状态、支架应力、环境温度湿度辐照度乃至视频图像等多模态信息^[9]。这一层的关键在于在感知的广度与精度上获得突破，这是使数字孪生具有鲜活特征的关键。在网络与平台层，运用工业互联网及云边计算技术构建电站级的数字孪生体。该孪生体包含资产模型、行为模型、规则模型及知识模型等，是实体电厂的一种高度精确的数字化孪生。它不仅以静态描述设备的位置关系及关联，还可以动态建模其运行过程以及运行机理。在应用智能层，集成一批人工智能引擎，包括图像识别、序列预测、异常分析、策略优化、自然语言等，好比大脑不同区域，对孪生体数据流进行并行处理与深度挖掘。最终通过综合、一体化的可视交互入口，为运维人员呈现综合分析结果和决策建议等，实现由数据到认知到应用。

（三）数据流转与知识沉淀的核心机制

体系的核心在于高质量的信息流和连续的知识沉淀。要建立统一的数据标准和语义框架，保证所有信息（从零部件到电子设备）都可以被统一，避免各个环节的信息壁垒，建立从基础数据、性能数据、模型参数到决策知识的数据管道，实现数据的价值提炼。使用人工智能模型生成诊断规则、故障先兆特征、优化策略参数，将作为“数字资产”反哺并更新数字孪生体的知识模型与规则库，使得整个体系具备自我进化能力^[4]。该数据流转机制为分层架构的高效运转及孪生体与AI模块的深度融合提供核心支撑

（四）数字孪生体与人工智能模块的集成融合模式

融合的关键在于双向驱动与深度耦合。一方面，数字孪生为AI训练提供海量、带有时空标签的仿真与真实混合数据，大大丰富了机器学习的故障样本^[5]。通过于高保真孪生模型中引入各种事先设定的预设的故障和极端工况的情况，生成于现实世界非常难以获取或成本高昂的异常数据，从而有力地解决了安全生产中正样本多、负样本稀少的现实难题。另一方面，人工智能解析得到的结果，如机械装置的健康等级、危险的热分布、发生故障的概率等可直接作为动态属性的驱动去指导数字孪生体的可视化显示，使看不见的危害可视显影。

二、全场景动态风险感知与智能预警机制

（一）基于多源异构数据融合的设备健康状态评估

突破单一参数阈值告警的局限性，而是以智能化对多源时序数据进行融合分析与关联挖掘。例如，综合组件输出特性曲线走

势、红外热斑图像、无人机高速扫描成像和历史维修记录等，结合卷积神经网络、长短时记忆网络等深度学习算法，不仅可以识别有无PID、隐藏裂纹、热斑等，还可以预测功能折损速率及其尚可使用寿命周期，实现了预知维护^[6]。对于如逆变器、配电柜等关键功率装置，组合运用三相电流与电压谐波、外壳振动频谱范围、器件内部关键部位热场分布、冷却风扇运行状态等多种信息并基于图形神经网络等新技术构建装置的运行图谱和健康基准，检测机械零件松动、绝缘层断裂、电容老化等问题，从“好/坏”二值评估，到不间断的健康状态评估，为其风险管控提供梯度依据。

（二）耦合气象与环境因子的场站级风险演化模拟

利用数字孪生体集成高精度数值气象预报数据、地理信息系统数据、地质勘测数据以及电站精细三维地貌模型^[7]。当预报未来可能出现大风、暴雪、极端低温、扬沙和沙尘暴以及雷电等恶劣天气时，由人工智能指导的数字化孪生体可以启动多个物理场耦合交互的仿真分析软件，对各地分布式光伏组件的结构载荷、积雪深度及其滑落路径、温度传导变化情况、尘雪覆盖程度的变化展开评估，如仿真不同风力方向组合作用下，光伏支架结构的振动响应和载荷分布情况，标记可能出现疲劳破坏和刚度超载的部位，以及模拟暴风雪过后不同角度的光伏组件积雪融化、滑落过程，发出可能对下端构件及支架施加冲击载荷等预警信息，以“天气输入－物理模拟－风险输出的定量可视化预测预警”的机制，将安全部署提升到基于数据进行判断决策的层次，实现早预防、早准备，进行高危区域的实时强化、巡检路线的优化、应急资源的预先准备等。

（三）基于行为识别与模式挖掘的运行异常智能预警

电站运行异常不仅仅是电力设备的问题引起的，也可能由制系统误动作、并网点电能质量恶化、阴影遮挡变化或人为操作失误导致^[8]。通过用人工智能的方法学习分析历史的运行数据和SCADA信号，建立不同季节、不同天气条件和不同载荷情况的“正常运行特征数据库”，通过流水线技术对比分析实时数据流，通过独立树、自动编码、时序分解等非监督或半监督的方法识别如发电量曲线的剧烈偏离、汇流箱丢失电量的不断上升、逆变器转换效率的意外减少、整个电站发电总功率因数的变化等，这些都是比较严重的设备绝缘变化、接头磨损、局部辐照面积的扩大和电网干扰等问题，这些都是潜在的问题，智能预警机制为运维人员提供了宝贵的干预时间窗口，避免了小问题演变为大事故。

（四）自适应与可解释的预警模型迭代优化

预警模型的精确性和稳定性至关重要。体系引入在线学习、增量学习与迁移学习机制，使预警模型可以根据新电站的运行数据、新出现的故障类型，以及误报漏报的反馈进行自适应微调与优化，持续增强其泛化能力与场景适应性。同时，为了克服人工智能模型常被视为“黑箱”的障碍，体系深度融合可解释AI技术，发出预警的同时给出清晰的决策支持追溯，如用高亮表格列示引发报警的关键特征参数及其贡献率，形成自然语言解释：“这次报警主要来源于第3分区的15台单元，过去2小时内这些单元的后部温度始终保持35℃以上且高于背景环境温度，同时温差直

线上涨，且该单元输出的电流量比历史水平增加20%，因此判断严重过热缺陷可能性高”，该解释显著提升了报警的可信赖及操作员的决策信心，帮助其快速准确把握问题焦点，并找到问题的根本原因所在。

三、智能决策支持与自主优化闭环

（一）面向风险处置的协同决策支持系统

当预警事件触发后，该系统做出的不仅仅是警告，还会在系统中自动化地进行智能决策辅助^[9]。数字孪生体作为“作战沙盘”，立刻调取故障设备或风险区域的全息数字档案，包括设计图、技术规格、历史维修记录、相关的设备网络布局 and 当前运行情况等。“人工智能决策引擎”充当“智慧的智囊团”，并且利用风险级别、当前天气情况、电网控制命令、发电策略、可执行运行维护资产的状态和备用部件的数据，应用多目标限制优化算法、博弈论或强化学习模型产生多个解决方案及其结果的预测等。通过对数字孪生体仿真测试与预测，在其中可以测试出各种预案计划带来的效果以及费用成本与可能产生的副作用，并根据仿真测试结果为其进行排序和最优选择，同时把最优的结果以及三维虚拟与仿真结果直观地演示给领导，实现从“人找信息”到“信息找人、方案找人”的转变，辅助其进行科学、快速、精准的决策。

（二）基于全局优化的预防性维护与运行策略调整

体系从更深层次推动安全与效能的协同，实现资产管理的最优化^[10]。通过系统同时监控所有站点各设备的健康程度和预期寿命，AI可建立设备群体失效概率时间曲线，并且结合未来的发电预期、电力市场电价信息、维修组工作负载等因素，利用运营研究优化技术如动态规划、队列理论，制定全场地各设施的低成本，且低风险的预防性维护计划时间表。在运营控制级别上，系统可实现实时识别由组件老化不均匀、遮挡区域的变化、尘埃分布不均等原因造成的影子损失和热区风险的关联故障，然后基于分布优化技术提出模块级重新布局的建议，或者调整逆变器的多种高最大功率点跟踪模式。可在保证系统正常运行范围内积极平衡各部件的运行工况，延迟部分部件的长时间超载或低载运行风险的同时，提升系统整体发电效率，实现安全性与经济性的双赢。

（三）人机协同的应急演练与安全培训沉浸式平台

利用数字孪生体高度仿真的特性与虚拟现实技术，构建沉浸式、交互式、可配置的虚拟应急演练与安全培训平台。平台可模拟典型灾害场景的典型故障如雷击着火、电缆沟进水、汇流箱短路爆炸、运维人员高空作业跌落或电气触电等，帮助操作人员使用虚拟电子设备处理危险情形，在临场感的模拟场景下开展必要的识别危险源、及时断电、抢救伤员、灭火等完整响应，通过人工智能作为智慧导师，实时监督操作动作、顺序和规范性，依据专家知识库判断操作行为是否规范、及时，并实时语音提示及引导，练习完成后自动生成练习的详尽分析报告并给出优缺点分析及各项指标的详细数据分析结果。

（四）自主闭环控制与体系自适应进化

针对一些结构化、重复性强、低风险的调适、反应操作，系统可逐步实现一定程度的安全自我封闭式控制，减少人工重复劳动。例如，当智能摄像头检测到机器人在预定行进路线有物体堆积，或者有人在走路时，可基于数字孪生地图自动化制定并下发新的避障运行指令；当无人机巡检图像表明某具体阵列路段鸟类粪便污染较多时，系统可自动关联并调整后续的自动化清理设备作业计划及清理参数。更重要的是，系统整体结构具备自升级能力。所有处理事件的数据结果、维护人员的处置反馈、新未知的故障形态、外部的变化环境等均作为学习材料用于更新人工智能模型的参数和结构、修订数字孪生体的模拟物理特征、补充及扩充安全准则知识库，这样一来使得系统的生产安全管理可以在循环往复中不断增强，知识库也不断被充实扩展，最终推动光伏电站从自动化向智能化、再向具备韧性与智慧的自主化运营新形态演进。

总之，数字孪生与人工智能的深度融合，正推动光伏电站安全管理从“被动监测”向“主动感知”“被动判定”向“主动优化”渐进式升级。本文所提出的系统方法论，通过多层次风险预知、协同决策支撑、自适应优化迭代，能更好地解决电力设备早期隐患发现、精确预判掌控，未来随着技术迭代和数据丰富度提升，系统将演化为更灵活、自动的智能管理系统，将为光伏产业安全管理良性发展提供源动力。

参考文献

- [1] 张利琴. 数字孪生和人工智能技术在发电机组智能运维中的应用 [J]. 科技视界, 2025, 15(14): 1-4.
- [2] 段君艳, 辛社党, 崔明光, 王宏伟, 刘梦豪, 王强. 含能材料智能制造生产线本质安全设计及数字孪生技术应用 [J]. 锻压装备与制造技术, 2025, 60(4): 11-18.
- [3] 黄怀军. 人工智能技术在大型水电厂安全生产管理数智化中的应用 [J]. 中国高科技, 2025(18): 115-117.
- [4] 高鑫. 数字孪生技术在光伏电站运维管理中的应用 [J]. 电力设备管理, 2025(2): 171-173.
- [5] 苏贵兵. 基于人工智能技术的电力配网工程施工安全管理 [J]. 张江科技评论, 2025(5): 156-158.
- [6] 武文江, 郭俊卿. 光伏电站运维中人工智能技术的应用研究 [J]. 电力设备管理, 2025(2): 156-158.
- [7] 李长松, 王金辉. 基于 PDCA 循环的光伏电站安全生产管理研究 [J]. 机电安全, 2025(2): 14-17.
- [8] 周浩. 新能源光伏电站安全管理技术研析 [J]. 电力设备管理, 2025(6): 242-244.
- [9] 何邦权, 秦超, 张力欣, 陈冲, 李素梅. 基于数字化技术的全链条安全生产巡查创新与实践 [J]. 广西电业, 2025(6): 39-46.
- [10] 周海. 火电厂安全生产设备智能化技术发展趋势与前景分析 [J]. 中国设备工程, 2025(5): 42-44.

光伏储能一体化在智能建筑电气系统中的集成设计

邬成辉

中外建华诚工程技术集团有限公司南昌分公司, 江西 南昌 330000

DOI:10.61369/EPTSM.2025120015

摘 要 : 在“双碳”目标引领下, 建筑行业的低碳转型成为能源革命的关键环节。光伏储能一体化技术凭借“发电—储能—用能”的闭环优势, 与智能建筑电气系统的深度集成, 能够破解传统建筑能源利用效率低、供电可靠性不足、碳排放强度高难题。本文基于智能建筑电气系统的结构特性与运行需求, 系统阐述光伏储能一体化的集成原理、核心设计要点及关键支撑技术, 并对光伏储能一体化集成设计未来发展趋势进行了展望。研究表明, 科学的集成设计可提升智能建筑清洁能源消纳率, 降低综合能源成本, 为智能建筑实现能源自给、高效运行与低碳发展提供全方位技术支撑, 对推动建筑领域可再生能源规模化应用具有重要意义。

关 键 词 : 光伏储能一体化; 智能建筑; 电气系统; 集成设计; 低碳能源

Integrated Design of Photovoltaic Energy Storage Integration in Electrical Systems of Intelligent Buildings

Wu Chenghui

Nanchang Branch of HCCI Urban Architectural Planning and Design Co.,Ltd. Nanchang, Jiangxi 330000

Abstract : Guided by the "dual carbon" goals, the low-carbon transformation of the construction industry has become a pivotal aspect of the energy revolution. Leveraging the closed-loop advantage of "power generation-energy storage-energy utilization," the integration of photovoltaic energy storage integration technology with the electrical systems of intelligent buildings can address challenges such as low energy efficiency, insufficient power supply reliability, and high carbon emissions in traditional buildings. Based on the structural characteristics and operational requirements of electrical systems in intelligent buildings, this paper systematically expounds on the integration principles, core design considerations, and key supporting technologies of photovoltaic energy storage integration. It also provides an outlook on the future development trends of integrated design for photovoltaic energy storage integration. Research indicates that scientific integrated design can enhance the consumption rate of clean energy in intelligent buildings, reduce comprehensive energy costs, and provide comprehensive technical support for achieving energy self-sufficiency, efficient operation, and low-carbon development in intelligent buildings. This holds significant importance for promoting the large-scale application of renewable energy in the construction sector.

Keywords : photovoltaic energy storage integration; intelligent buildings; electrical systems; integrated design; low-carbon energy

引言

全球能源结构转型与生态环境保护的双重压力, 推动建筑行业从传统高能耗模式向绿色智能方向升级^[1]。智能建筑作为融合自动化控制、物联网、大数据等技术的现代化建筑形态, 其电气系统已发展为涵盖供配电、终端用能、监控调度等多环节的复杂网络, 但长期依赖电网供电的模式仍面临能源浪费、峰谷负荷失衡、应急保障薄弱等突出问题。光伏储能一体化 (PV-ESS) 技术通过光伏组件将太阳能转化为电能, 借助储能单元平抑发电波动性, 形成独立的分布式能源系统, 为智能建筑提供了清洁、稳定、自主的能源解决方案。近年来, 光伏储能与建筑的融合应用成为行业研究热点。国内在政策驱动下, 光伏建筑一体化 (BIPV) 与储能技术的结合取得阶段性进展, 但在集成方案的通用性、控制策略的适应性、安全防护的系统性等方面仍需完善。因此, 开展光伏储能一体化在智能建筑电气系统中的集成设计研究, 明确技术路径与设计规范, 对推动智能建筑向低碳化、高效化、自主化发展具有重要的工程价值与现实意义。

一、光伏储能一体化与智能建筑电气系统的集成原理

智能建筑电气系统以“智能化协同”为核心特征，涵盖主电源、分布式能源、储能设备、用电负荷及监控调度五大核心模块，各模块通过电气接口与通信网络实现能量流与数据流的双向交互。从能源运行逻辑来看，系统存在电网供电、分布式发电、储能充放电、负荷用电四条核心路径，光伏储能一体化的集成本质是通过技术手段对四条路径进行优化整合，实现能源资源的最优配置。智能建筑的用电负荷具有多样性与波动性特征，常规负荷（照明、插座）功率稳定，动态负荷（空调、电梯）功率波动大，关键负荷（消防、数据中心）对供电可靠性要求极高，这些特性直接决定光伏储能系统的设计方向与技术参数。

光伏储能一体化系统由光伏组件、储能单元、逆变器（逆变器+PCS）、能量管理系统（EMS）四大核心部分组成，其工作机制形成完整闭环：光伏组件将太阳能转化为直流电，经汇流箱汇集后输送至逆变器，转化为交流电满足建筑即时用电需求^[2]；当光伏发电量超出负荷需求时，多余电能通过PCS逆变器为储能单元充电；当光伏发电量不足或电网故障时，储能单元释放电能，经逆变器转化后供给负荷；能量管理系统实时采集光伏出力、储能状态、负荷需求、电网参数等数据，通过优化算法制定充放电

策略，实现与智能建筑电气系统的协同运行。

两者集成的核心目标包括：最大化能源自给率，通过太阳能资源的高效利用降低电网依赖；最小化运行成本，借助峰谷电价差与弃光损失减少实现经济收益；提升供电可靠性，以储能单元作为应急电源保障关键负荷运行；降低碳排放强度，替代化石能源发电减少环境影响。集成过程中需应对多重约束：空间约束源于建筑可用安装面积有限，限制光伏组件装机容量；容量约束来自储能单元的占地面积、重量与成本限制，需平衡储能效果与经济性；技术约束体现在光伏出力的间歇性与储能单元的效率、寿命限制，对控制策略提出更高要求；政策约束则要求符合电网接入标准、补贴政策与储能配比等相关规定。

二、光伏储能一体化在智能建筑电气系统中的集成设计要点

（一）系统拓扑结构选型

光伏储能一体化与智能建筑电气系统的集成拓扑结构主要分为三种类型，不同结构在连接方式、性能特点与适用场景上存在显著差异，具体适配性如下表1所示：

表1 光伏储能一体化与智能建筑电气系统集成拓扑结构适配性对比

| 拓扑结构类型 | 核心连接方式 | 核心优势 | 主要局限 | 适配场景 |
|--------|---------------------------------|-----------------------------|--------------------------|----------------------|
| 交流耦合型 | 光伏系统与储能系统分别通过独立逆变器接入建筑交流母线 | 结构灵活，可独立扩容，光伏与储能可单独运行，改造难度低 | 能量转换效率较低（多一次逆变过程），设备成本较高 | 既有建筑节能改造、光伏与储能分期建设项目 |
| 直流耦合型 | 光伏组件与储能单元直接连接直流母线，通过同一逆变器接入交流系统 | 转换效率高（减少一次逆变损耗），结构紧凑，设备成本较低 | 扩容灵活性不足，光伏与储能需同步运行 | 新建智能建筑、光伏与储能一次性建设项目 |
| 混合耦合型 | 部分光伏组件与储能直流耦合，部分光伏组件独立交流接入 | 兼顾能量转换效率与系统灵活性，可适配复杂负荷特性 | 控制逻辑复杂，系统集成难度较高 | 大型智能建筑、负荷波动幅度大的场景 |

结构的选择需综合考虑建筑类型（新建/既有）、建设模式（同步/分期）、负荷特性（稳定/波动）等因素，核心目标是在效率、成本、灵活性之间达成平衡。

（二）组件选型与容量匹配

组件选型是集成设计的基础，需结合智能建筑的空间条件、性能需求与经济成本综合决策。光伏组件方面，晶硅组件因转换效率高、寿命长、成本合理，成为多数智能建筑的首选，适用于屋顶、墙面等平整区域；薄膜组件具有柔性优势，可适配曲面建筑或异形结构，但转换效率较低，成本相对较高；BIPV组件兼具发电功能与建筑围护属性，可替代幕墙、屋面瓦等传统材料，兼顾美观性与实用性，适用于对建筑外观有较高要求的项目，但需满足节能、防水、承重等建筑标准。

储能单元的选型需聚焦充放电效率、循环寿命、安全性与成本四大核心指标。磷酸铁锂电池凭借充放电效率高、循环寿命长、能量密度大、安全性可靠等优势，成为智能建筑的主流选择^[3]；钒液流电池循环寿命极长，充放电深度可达100%，无热失控风险，但能量密度低、成本较高，适用于大型智能建筑或对寿命要求极高的场景；铅酸电池技术成熟、成本低廉，但循环寿命

短、能量密度低，且存在环境污染风险，仅适用于低成本、低要求的小型项目。

容量匹配是集成设计的核心环节，需基于建筑负荷特性、光伏资源条件与政策要求，通过科学方法确定光伏装机容量与储能容量的最优配比。负荷侧需求分析法以建筑历史用电数据为基础，结合光伏年有效发电小时数，确定光伏装机容量满足日均用电量的60%—80%，储能容量按高峰负荷的30%—50%配置，同时保障关键负荷2—4小时应急供电；经济性优化法以全生命周期成本最小化为目标，整合光伏与储能设备成本、电费、补贴等因素建立经济模型，通过优化算法求解最优配比，峰谷电价差较大地区可适当增大储能容量；可靠性约束法针对关键负荷占比较高的建筑，按关键负荷100%容量配置储能，确保应急状态下的供电保障。三种方法需结合项目实际灵活应用，实现技术可行性与经济合理性的统一。

（三）控制策略优化

光伏储能一体化系统的控制策略需实现与智能建筑电气系统的深度协同，按控制层级可分为系统级、设备级与负荷侧三个维度，形成全方位的调度体系。系统级控制以能量管理系统

(EMS)为核心,负责全局优化决策,通过实时采集光伏出力、储能SOC状态、负荷功率、电网参数、电价等数据,自动切换运行模式,包括“自发自用+余电上网”“自发自用+储能充电”“储能放电+电网补充”“应急供电”四种核心模式;同时基于短期负荷预测与光伏出力预测,制定24小时充放电计划,实现能源利用效率最大化与运行成本最小化。

设备级控制聚焦光伏逆变器与PCS储能变流器的精准运行,光伏逆变器采用MPPT(最大功率点跟踪)控制技术,最大限度提升光伏出力,同时具备电网异常响应能力,在电压、频率超标时自动调整输出或断开连接;PCS变流器根据EMS指令采用恒功率、恒压或下垂控制模式,精准调节充放电功率,同时设置SOC上下限,避免过度充放电影响储能寿命。负荷侧控制通过对终端用能设备的智能化管控配合能源系统运行,对空调、水泵等柔性负荷实施错峰运行,在光伏出力高峰时段增加运行功率,低谷时段减少功率消耗;为关键负荷设置独立供电回路,在电网故障时自动切换至储能供电模式,保障运行连续性。三级控制策略相互协同,实现能源生产、存储、消费的全流程优化。

(四)安全防护体系构建

光伏储能一体化系统的集成需建立全方位安全防护体系,覆盖电气安全、消防安全、通信安全与机械安全四大维度。电气安全方面,系统需配置过压、过流、短路、接地等保护装置,光伏组件与建筑结构保持合理安全间距,避免阴影遮挡引发热斑效应,同时优化电路设计防止孤岛效应^[4];消防安全要求储能单元采用防火防爆设计,配备温度、烟雾监测与自动灭火装置,电池舱设置强制通风系统,控制环境温度在安全范围,避免热积聚引发风险;通信安全需采用加密协议保障EMS与建筑监控平台、电网调度系统的数据传输安全,防止数据泄露与恶意攻击;机械安全要求光伏组件与储能设备的安装满足建筑承重标准,抗风、抗震性能符合当地规范,确保设备长期稳定运行。安全防护体系需贯穿设计、施工、运行全生命周期,为系统集成提供可靠保障。

三、集成设计的关键支撑技术

光伏储能一体化与智能建筑电气系统的高效集成,需依托先进技术手段突破核心瓶颈,关键支撑技术主要包括预测技术、协同控制技术与电池管理技术。

负荷预测与光伏出力预测技术是优化控制的前提,通过整合历史用电数据、气象数据、建筑运行数据,采用LSTM、随机森林等机器学习算法,实现1—24小时短期预测,预测误差控制在10%以内,为EMS调度决策提供精准数据支撑;预测技术的核心价值在于提前预判能源供需变化,避免盲目充放电导致的能源浪费或供电不足。

分布式协同控制技术针对大型智能建筑多区域、多负荷的特点,采用分布式控制架构,将光伏储能系统划分为多个子单元,

每个子单元负责特定区域的能源供应,通过边缘计算与云端协同实现全局优化与局部自主控制的有机结合;该技术可提升系统响应速度,避免集中式控制的延迟问题,同时增强系统容错性,某一子单元故障时不影响整体运行,显著提升系统可靠性。

电池管理系统(BMS)技术是保障储能单元安全高效运行的核心,通过实时监测电池单体的电压、电流、温度、SOC等参数,采用主动均衡或被动均衡技术调节单体一致性,避免因单体差异影响电池组寿命;同时具备故障诊断与预警功能,及时识别电池过热、过充、过放等异常状态,触发保护机制防止安全事故,延长电池循环寿命,降低运行维护成本。三大关键技术相互支撑,为集成设计的优化实施提供技术保障。

四、光伏储能一体化集成设计的发展趋势

随着“双碳”目标的深入推进与技术的持续创新,光伏储能一体化在智能建筑电气系统中的集成设计呈现四大发展趋势。技术融合深度化方面,光伏储能技术将与物联网、人工智能、数字孪生等技术实现更深度的融合,形成“感知—分析—决策—执行”的全闭环智能系统,能源调度的精准性与智能化水平将显著提升;人工智能算法的广泛应用将实现负荷与光伏出力的超短期精准预测,数字孪生技术将支撑系统全生命周期的智能化管理。

系统集成模块化方面,标准化、模块化的集成方案将成为主流,光伏组件、储能单元、变流器等核心设备将实现模块化设计与生产,降低系统集成难度与成本,提升安装效率与兼容性。模块化设计可根据建筑需求灵活组合配置,适配不同规模、不同类型的智能建筑,同时便于后期扩容与维护,推动光伏储能一体化系统的规模化应用。

能源利用多元化方面,集成系统将从单一太阳能利用向多能源互补方向发展,与地热能、风能、生物质能等其他可再生能源结合,形成多能互补的分布式能源系统,进一步提升能源自给率与系统稳定性^[5]。同时,系统将与微电网、虚拟电厂技术深度融合,智能建筑作为分布式能源节点参与电网调度,实现能源的双向互动与优化配置,提升能源利用的综合效益。

政策标准完善化方面,随着技术应用的规模化推进,相关政策与标准将逐步完善。国家层面将出台更具针对性的补贴政策与激励措施,降低项目投资成本;电网接入标准将进一步优化,为分布式能源系统的并网运行提供更为便利的条件;技术标准与设计规范将不断健全,明确集成设计的技术要求、安全指标与验收标准,规范行业发展,为光伏储能一体化在智能建筑中的广泛应用提供政策保障与技术支持。

五、结语

光伏储能一体化与智能建筑电气系统的深度集成,是建筑行

业实现低碳转型的关键路径，其核心价值在于通过清洁能源生产、存储与消费的闭环优化，破解传统建筑能源利用效率低、碳排放强度高、供电可靠性不足等难题。本文通过分析发现，科学的集成设计可显著提升智能建筑的能源自给率与清洁能源消纳率，降低运行成本与碳排放强度，同时增强供电保障能力。未来，随着光伏组件转换效率的提升、储能技术成本的下降与智能

控制算法的优化，光伏储能一体化在智能建筑中的应用将更加广泛，集成方案将向标准化、模块化、智能化方向发展。展望未来，光伏储能一体化与智能建筑电气系统的集成将成为绿色建筑发展的核心趋势，为实现“双碳”目标与能源可持续发展提供重要支撑。

参考文献

[1] 余利丰. 碳中和背景下武汉市产业结构转型升级研究 [J]. 武汉社会科学, 2025, (03): 58-64.
[2] 马碧霞. 光伏—储能一体化系统在道路照明中的应用与节能效益分析 [J]. 中国照明电器, 2025, (07): 146-148.
[3] 张福生. 磷酸铁锂电池工业应用领域浅析 [J]. 化工管理, 2018, (34): 90-91.
[4] 张兵. 光伏发电系统消防安全检查方法与防护措施 [J]. 今日消防, 2025, 10(04): 98-100.
[5] 刘东阳, 何福鹏, 邱伟, 等. 低碳智慧化转型: 能源化工领域的未来发展与挑战 [J]. 化工进展, 2025, 44(06): 3305-3323.

