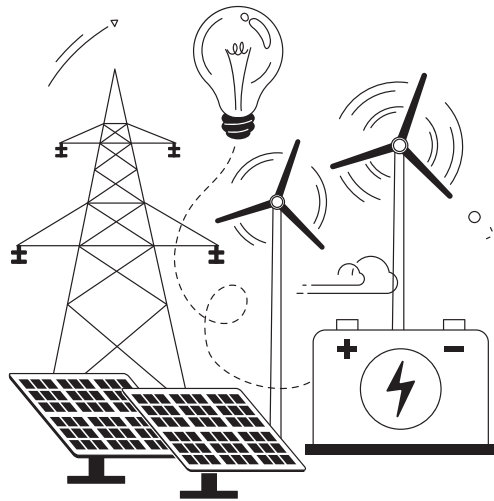


电力技术 与安全管理

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 © 2024 by ART AND DESIGN PRESS INC.

Complimentary Copy



编委 Editorial Board Member

贺喜巴特尔, 内蒙古能源发电杭锦发电有限公司

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

莫日更高娃, 内蒙古电力(集团)有限责任公司鄂尔多斯供电分公司

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

王娟, 内蒙古电力(集团)有限责任公司鄂尔多斯供电公司

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

谢超善, 北京必可测科技股份有限公司

Chaoshan Xie, Beijing BKC Technology Co., Ltd.

电力技术与安全管理

Electric Power Technology and Safety Management

第1卷 第8期 2024年11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.artdesignp.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。



电力工程 | POWER ENGINEERING

- 005 电气工程电气自动化施工质量监控数字化方案 范新萌
Digital Scheme of Electrical Automation Construction Quality Monitoring in
Electric Power Engineering Fan Xinmeng
- 008 新能源企业绿氢项目工程与生产管理难点分析 张婷婷
Analysis of Difficulties in Engineering and Production Management of
Green Hydrogen Project in New Energy Enterprises Zhang Tingting
- 011 面向智能电网的电力金具设计优化与可靠性研究 吕迪
Design Optimization and Reliability Research of Power Fittings for Smart Grid Lv Di
- 014 基于大数据分析的新能源发电预测与优化模型研究 邓泽群
Research on Prediction and Optimization Models for New Energy Power
Generation Based on Big Data Analysis Deng Zequn
- 018 基于配电网的电力负荷预测探究 张卫杰, 孙有恒, 严康
Research on Power Load Forecasting Based on
Distribution Network Zhang Weijie, Sun Youheng, Yan Kang
- 021 火电企业二氧化碳捕集与封存的技术经济评估 朱雪峰
Technical and Economic Assessment of Carbon Dioxide Capture and
Storage in Thermal Power Enterprises Zhu Xuefeng
- 024 用电工程中需求响应策略的优化与经济效益分析 郭汉臣
Optimization and Economic Benefit Analysis of Demand Response Strategies
in Power Engineering Guo Hanchen
- 027 数字化时代电力营销服务模式的转型与升级路径 冷烈, 邹娜
The Transformation and Upgrading Path of Power Marketing Service Model
in the Digital Age Leng Lie, Zou Na
- 030 新能源电力工程中储能技术的应用现状及发展趋势探讨 孙玉龙, 杨兆威
Exploration of the Current Status and Development Trends of Energy
Storage Technology in New Energy Power Engineering Sun Yulong, Yang Zhaowei
- 033 电力企业营销管理现状分析及策略研究 张猛
Analysis of the Current Situation and Strategy Research on Marketing
Management in Electric Power Enterprises Zhang Meng
- 036 极端天气频发下电力设施的安全防护与应急管理研究 郭建建
Research on Safety Protection and Emergency Management of Power
Facilities Under Frequent Extreme Weather Conditions Guo Jianjian

电力系统 | POWER SYSTEM

- 039 反馈控制在单元机组协调控制系统的实践 马全秀, 周锦扬, 王鑫
Feedback Control in the Practice of Unit Coordination
Control System Ma Quanxiu, Zhou Jinyang, Wang Xin
- 042 PLC在提升广播电视供电系统安全中的应用 王岳峰
Application of PLC in Enhancing the Safety of Radio and Television Power Supply
Systems Wang Yuefeng
- 045 变电站二次系统监视预警与在线运维系统的研究 张丽霞, 王琪, 程智浩, 魏真艳, 董泉, 梁向阳, 徐明, 邵季飞
Research on Monitoring, Early Warning and Online Operation and Maintenance System
for Secondary Systems in Substations Zhang Lixia, Wang Qi, Cheng Zhihao, Wei Zhenyan, Dong Quan, Liang Xiangyang, Xu Ming,
Shao Jifei

049	分布式电源对配电网供电可靠性的影响及应对措施 The Impact of Distributed Generation on the Reliability of Power Supply in Distribution Networks and Countermeasures	倪鹏程 Ni Pengcheng
052	新能源发电功率预测技术方向性研究 Research on the Direction of New Energy Power Generation Power Prediction Technology	李云飞, 马东, 张哲, 徐思达, 胡斯格 Li Yunfei, Ma Dong, Zhang Zhe, Xu Sida, Hu Sige
055	配电安全管理中人为因素的控制与预防措施研究 Research on the Control and Prevention Measures of Human Factors in Power Distribution Safety Management	李玉, 闫慧敏, 赵伟, 陆清月, 董欣琦 Li Yu, Yan Huimin, Zhao Wei, Lu Qingyue, Dong Xinqi
058	新能源发电系统的智能化监控与管理技术研究 Research on Intelligent Monitoring and Management Technology of New Energy Power Generation Systems	卢紫龙 Lu Zilong
061	浅析分布式电源并网管理措施 Analysis on the Management Measures of Grid-Connected Distributed Power Supply	邓华平 Deng Huaping
064	配网 GIS 系统在配网自动化中的实践探究 Practice Exploration of GIS System in Distribution Network Automation	陈微 Chen Wei
067	高比例新能源并网下的电力系统调度优化策略 Optimization Strategy of Power System Dispatching under the Grid Connection of a High Proportion of New Energy	周航 Zhou Hang
071	热控自动化系统在新能源领域的应用及市场机遇 Applications and Market Opportunities of Thermal Control Automation Systems in the New Energy Sector	方涛 Fang Tao
074	电气自动化的分布式控制系统架构与性能研究 Research on the Architecture and Performance of Distributed Control Systems for Electrical Automation	桑生福 Sang Shengfu

检修技术 | MAINTENANCE TECHNOLOGY

077	通过精准检修提升风力发电设备发电效率的实践 Practice of Improving the Power Generation Efficiency of Wind Power Equipment through Precise Maintenance	吴春辉 Wu Chunhui
080	基于人工智能的电力系统故障诊断方法研究 Research on Fault Diagnosis Method of Power System Based on Artificial Intelligence	涂雪晴 Tu Xueqing
083	基于大数据的变电站设备故障预测与维护策略 Substation Equipment Fault Prediction and Maintenance Strategy Based on Big Data	王伟庆, 陈永杰, 娄云 Wang Weiqing, Chen Yongjie, Lou Yun
086	AI大数据在风电企业安全管理中的综合应用：设备状态评估与故障预测 Comprehensive Application of Ai Big Data in the Safety Management of Wind Power Enterprises: Equipment Status Assessment and Fault Prediction	魏成发 Wei Chengfa
089	热电厂汽机设备运行状态监测与故障诊断 Operation State Monitoring and Fault Diagnosis of Steam Turbine Equipment in Thermal Power Plant	孔垂鑫, 张建民 Kong Chuixin , Zhang Jianmin
092	GIS设备运维与检测中的物联网技术应用探索 Exploration of the Application of the Internet of Things technology in GIS Equipment Operation and Maintenance and Detection	龚鹏, 曹曲 Gong Peng , Cao Qu
095	电力工程维护中的大数据分析 with 故障预测模型 Big Data Analysis and Fault Prediction Models in Power Engineering Maintenance	高扬 Gao Yang
099	600MW 等级汽轮发电机组发电机故障原因分析及防范 Causation Analysis and Prevention of 600MW Generator's Typical Failure	安柔嘉, 安殿华 An Roujia, An Dianhua
102	核电阀门气动执行机构隔膜成品检验方法 Development and Application of an Inspection Protocol for Diaphragms in Pneumatic Actuators of Nuclear Power Valves	李凤洋, 田尧, 周来 Li Fengyang, Tian Yao, Zhou Lai
105	基于人工智能的电气自动化设备故障诊断方法研究 Research on the Fault Diagnosis Method of Electrical Automation Equipment Based on Artificial Intelligence	敖林, 王鹏, 郑天东 Ao Lin, Wang Peng, Zheng Tiandong
108	基于大数据的新能源装置运行状态监测与故障诊断 Monitoring and Fault Diagnosis of New Energy Device Operation Status Based on Big Data	杨长贤 Yang Changxian
111	基于大数据的电力系统故障诊断与预测技术研究 Research on Fault Diagnosis and Prediction Technology of Power System Based on Big Data	邓鹏 Deng Peng

电力工程电气自动化施工质量监控数字化方案

范新萌

潍坊亚峰化工仪表有限公司, 山东 潍坊 261000

摘要： 随着电力工程的飞速进展，电气自动化施工质量监控数字化转型已然刻不容缓。本文对电气自动化施工的特点进行了剖析，对其数字化质量监控必要性进行了说明，还对存在的问题展开深入探究，问题主要表现在数据采集不够准确以及系统集成难度较大这两方面。紧接着提出极具针对性的策略，例如精心建设智能传感网络来实现精准数据采集，巧妙借助云平台破除信息孤岛以加强系统集成，进而为切实提高电力工程的质量、全力确保电网的平稳运行提供了强有力的支撑。

关键词： 电力工程；电气自动化；施工质量监控；数字化

Digital Scheme of Electrical Automation Construction Quality Monitoring in Electric Power Engineering

Fan Xinmeng

Weifang Yafeng Chemical instrument Co., LTD. Weifang, Shandong 261000

Abstract： With the rapid progress of electric power engineering, the digital transformation of electrical automation construction quality monitoring has been urgent. This paper analyzes the characteristics of electrical automation construction, explains the necessity of digital quality control, and deeply explores the existing problems, which are mainly reflected in the inaccuracy of data collection and the difficulty of system integration. Then it proposed highly targeted strategies, such as the careful construction of intelligent sensor network to achieve accurate data collection, and the clever use of cloud platform to break the information island to strengthen the system integration, which provides a strong support to effectively improve the quality of power engineering and ensure the smooth operation of the power grid.

Keywords： electric power engineering; electrical automation; construction quality monitoring; digital

引言

在科学技术快速发展的今天，电力工程是国家基础设施中至关重要的环节，电气自动化程度越来越高。传统的施工质量监控手段已经很难适应越来越复杂的工程需要，融入数字化技术已经成为一种必然的趋势。通过数字化方案的制定，可以对电气自动化施工中的每一个环节进行实时准确的控制，及时的发现和解决其中存在的问题，保证电力工程的高效可靠的投入使用，这对于保证社会用电，促进能源产业进步有着十分重要的意义。

一、电力工程电气自动化施工的特点

（一）技术复杂性高

电气自动化涵盖了很多前沿技术，例如 PLC 编程，传感器技术以及通信网络。以变电站自动化系统为例，不仅需要实现电力设备运行参数准确获取，同时还需要依托复杂通信协议向监控中心进行实时数据传输，任何技术环节的偏差都会造成系统的整体失效。各厂家设备技术标准不一，整合过程中适配工作较多，技术难度进一步提高^[1]。

（二）设备精密性强

电气自动化设备大多是高精度仪器，对于安装环境，调试参

数都有严格的要求。与高精度电流互感器一样，测量精度也能达到 0.1 甚至更高，在安装过程中很小的振动，倾斜就会影响测量精度。在一大型工业厂房的供电工程中，由于早期运输时导致一智能电表出现微小磕碰现象，虽然外观没有损坏，但是投运之后却发现测量数据的偏差超过了容许的范围，经过反复检查才查找到了根本原因，突出了设备精密性的高要求和建设的重要性。

（三）施工流程连贯性要求高

从电气设备的安装，线路的铺设到控制系统的调试等各个环节都是息息相关的。以风电工程电气施工为例，塔筒内部电缆铺设完毕之后，随即就要对风机控制系统进行布线和调试工作，如果电缆铺设发生中断、短路等故障没有被及时检测出来，随后的

调试工作就不能正常开展，耽误了工期。而一旦某一环节返工后，牵一发而动全身的代价就大大增加。

（四）对人员专业素质要求高

施工人员在具备电气专业知识的同时，需要对自动化控制原理，计算机编程以及其他跨学科的内容了如指掌。现场运维人员需要能够根据控制系统反馈来的故障代码快速定位问题所在，例如在遇到 DCS 系统出现故障告警时，能够判断是否为硬件模块受损或者软件逻辑出错，这就需要其有较深的理论功底和丰富的实践经验，不然很难胜任电气自动化施工和运维的繁杂工作^[2]。

（五）受外部环境影响大

电力工程经常处在复杂的自然环境中，温度高，湿度大以及强电磁干扰威胁着电气自动化设备的平稳运行。沿海地区变电站施工时，高湿度空气容易导致电子元件潮湿短路，盐雾腐蚀加快了设备外壳腐蚀速度。在夏季气温较高期间，如果散热措施不当，设备在长期运行过程中可能会因为过热保护而发生跳闸事故，对供电可靠性造成严重的影响，因此在建设过程中一定要充分考虑环境适应性设计和防护措施。

二、电力工程电气自动化施工质量监控数字化的必要性

（一）提高监控实时性

传统的人工巡检间隔时间较长，很难及时捕捉到设备的突发性故障。数字化监控在传感器和网络的辅助下，可以进行秒级乃至毫秒级的数据采集传输。例如，城市轨道交通供电系统通过将温度，湿度和电流传感器布设到开关柜和变压器等关键设备上，当参数出现异常时，该监控系统即时发出警报，运维人员能够在第一时间做出反应，避免了故障的扩展，确保了地铁运营的安全性，显著提高了供电的可靠性。

（二）增强数据精准性

数字化测量设备的准确性比人工观测要高。以电能质量监测为例，专业的电能质量分析仪能够准确地测量电压波动和谐波含量，并且误差最小。在一个数据中心供电工程中，对谐波进行准确的监测可以避免由于谐波超标而对服务器和其他敏感设备造成损害，并根据准确的数据对滤波装置的参数进行优化设计，确保电力供应的质量以适应高精密电子设备的工作需要。

（三）实现远程监控与管理

在互联网，云计算技术的帮助下，管理人员在任何地方都可以通过手机和电脑端看到项目现场的实时数据和设备状态。大型电力集团跨区域电网建设中，总部工程师可以实现多地施工现场的远程监控，施工工艺规范的实施，设备调试的进展等信息的实时控制，适时发布指导意见、突破地域限制、提升管理效率、减少沟通成本。

（四）助力故障预测性维护

利用大数据对历史运行数据进行分析，发现潜在的故障规律。对某型高压断路器在多次开闭运行后触头磨损情况进行了数据分析，并结合运行时间和电流负荷建立了预测模型对触头剩余

寿命进行了预先预判，排换后再进行故障处理，避免了突发停电事故的发生，降低了设备的维修成本，有利于电网运维的经济性。

（五）优化资源配置

数字化监控系统集成了项目的进度，材料和人力信息，将施工全貌直观地展现出来。施工企业根据实时数据对材料和人员进行合理配置，以免造成材料积压浪费和人力闲置不均衡。例如在火电建设项目当中，针对不同工区的电气安装进度对电缆和桥架的物料进行准确分配，并依此设备调试的需要对专业技术人员进行了分配，以提高资源的利用率，确保工程的顺利进行^[3]。

三、电力工程电气自动化施工质量监控数字化现存问题

（一）数据采集不全面、不准确

有的施工现场传感器布局疏密有致，关键部位的参数漏掉了，例如老旧变电站改造时，只对主变压器设置温度传感器而忽略了母线接头温度的测量，容易漏掉发热隐患点。传感器的精度会因为环境和长时间的运行而受到影响，如果没有及时进行校准，会导致数据采集出现较大偏差，这将不能准确地反映设备的实际状态，从而影响后续分析和判断的准确性。

（二）系统兼容性差

电力工程中涉及到多家厂家的设备，各种品牌的自动化系统的通信协议，数据格式都不一样，就像是西门子 PLC 和 ABB 变频器在对接的时候，由于 Modbus 协议的细节不同，数据传输经常会出现错误和丢包等情况，监控系统很难全面收集数据，导致信息孤岛的产生，妨碍了数字化集成的进行，不能做到全流程的统一监控。

（三）网络安全风险高

数字化监控对网络的依赖性以及电力工控网络和外部公网的接入引入了很多风险。黑客会对监控系统进行攻击篡改电力设备的运行参数从而导致电网事故发生；恶意软件入侵会导致数据泄露并危及电力企业的运营安全。某区电网曾经遭受钓鱼邮件的袭击，一些变电站监控数据大量流出，虽然没有引起实质性的停电事故，却暴露了严重的网络安全问题。

（四）数据分析深度不足

目前大多数监控系统仅仅停留于单纯的数据展示，阈值报警等方面，没有完全发掘数据的价值。大量的设备运行数据没有得到有效的关联分析，例如变压器油温，负载电流和绝缘老化指标之间的内在逻辑没有被梳理清楚，难以在宏观上检测出潜在的故障趋势，不能对运维决策进行深入的量化支持，限制了数字化优势的实现。

（五）人员数字化素养欠缺

一些施工，运维人员已经习惯了传统的模式，对于数字化监控技术的接受程度较慢。新员工虽然理论知识过硬，但实操经验不足，在面对纷繁复杂的数字化故障排查时束手无策。例如在智能变电站的调试过程中，青年员工并不知道如何对监测系统的数

据采集频率进行优化，无法根据数据分析结果对设备进行准确调试，从而影响了项目的进度和质量保障^[4]。

四、电力工程电气自动化施工质量监控数字化的策略

（一）构建全方位智能传感网络

针对电气设备的结构和运行特性，对传感器的布置进行了优化，变电站开关柜中除了母线和刀闸等关键部位设置温度传感器之外，还加入了局放传感器对其绝缘状态进行监控；使用高精度，自校准的智能传感器并使用其内建微处理器对环境因素的影响进行实时补偿以保证数据的准确性。例如新研制的光纤光栅温度传感器在不受电磁干扰的情况下，其测量精度达到0.5° C范围内，对设备状态的监测和控制提供了可靠的基础，达到了全面、准确地采集数据的目的^[5]。

（二）强化系统集成与标准化建设

促进电力设备制造商按照统一的通信标准进行通信，例如普及 IEC 61850 变电站通信网络标准以达到不同制造商的设备即插即用的目的。制定了行业数据接口规范并研发了通用的数据转换中间件实现了系统集成中协议格式的自动适配，保证了数据的顺畅传输^[6]。国家电网统一智能电表通信协议以后，各地级市供电公司的抄表系统可以实现不同厂商电表的无缝连接，显著提高了采集效率、消除了信息孤岛、实现了全过程的数字化贯通^[7]。

（三）筑牢网络安全防线

利用物理隔离，防火墙和入侵检测的多重保护方法，将单向隔离装置布置于电力工控网和公网的边界上，以阻断外界的非法接入；对内部网络进行分段管理、设定访问权限、运维人员持数字证书进行登录运行。定期进行网络安全演练以模拟黑客攻击和病毒爆发等情景，测试和增强防护能力。某省电网企业在实战演

练中发现和修复了若干系统漏洞，加强了网络安全应急响应过程，保障了数字化监控系统的稳定性和可靠性^[8]。

（四）深化数据分析与应用

引入大数据分析平台并结合机器学习和深度学习算法对数据进行关联挖掘。利用聚类分析对同类设备的运行数据进行集成，构建设备健康画像；采用时间序列对变压器的寿命，负载趋势进行了预测。以大型水电厂为研究对象，根据数据分析对机组启停策略进行优化，并根据来水流量和电价峰谷时段进行准确调度，年节约发电成本几百万元的同时减少了设备故障率，增强了运行维护的科学性^[9]。

（五）提升人员数字化技能培训

制定了不同工种的分层培训计划，并对施工人员进行传感器安装，调试实操培训；运维人员加强数据分析，故障诊断软件的使用培训等。构建线上与线下相结合的培训体系，在线上使用虚拟仿真软件进行故障排查仿真，离线组织专家对复杂项目进行实地实战指导。某电力培训中心联合院校共同研发了电气自动化专业数字化运维课程，受训人员能够熟练使用数字化工具胜任岗位需求并提高了整个行业的人力素质^[10]。

五、结语

电力工程电气自动化施工质量监控数字化转型是行业发展的必由之路。尽管当前面临诸多挑战，但通过构建智能传感网络、强化系统集成、保障网络安全、深化数据分析等一系列策略的实施，逐步攻克现存问题，能够充分释放数字化潜能，提升施工质量与运维效率，为电力工程可靠运行、智能电网发展筑牢根基，推动电力行业迈向高质量发展新征程。

参考文献

- [1] 李再丽. 电力工程中的电气自动化技术应用 [J]. 信息系统工程, 2023, (08): 56-59.
- [2] 刘鹏飞. 电气自动化技术在电力工程中的应用 [J]. 造纸装备及材料, 2023, 52(07): 54-56.
- [3] 吕文渊. 电气自动化技术在电力工程中的应用与发展 [J]. 光源与照明, 2023, (03): 236-238.
- [4] 杨明川. PLC 技术在电气工程自动化控制中的应用 [J]. 四川建材, 2022, 48(11): 37-38.
- [5] 杨秦飞, 齐航. 电力电气自动化技术在电力工程中的运用 [J]. 中国设备工程, 2022, (11): 209-211.
- [6] 迟博, 车清宇. 电气自动化技术在电力工业工程中的应用 [J]. 自动化应用, 2023, 64(S2): 150-152.
- [7] 李巍. 电气自动化技术在电力工程中的应用分析 [J]. 光源与照明, 2023, (11): 216-218.
- [8] 李坤安. 电力电气自动化元件技术的运用 [J]. 电气技术与经济, 2023, (09): 104-106.
- [9] 练坚, 武亦文. 电气自动化技术在电力工程中的应用探索 [J]. 中国品牌与防伪, 2023, (10): 64-67.
- [10] 张林强. 电气自动化技术在电力工程中的运用分析 [J]. 电气技术与经济, 2023, (06): 95-97.

新能源企业绿氢项目工程与生产管理难点分析

张婷婷

国家电投吉电股份北京吉能新能源科技有限公司, 北京 100000

摘要： 在全球气候变化和能源转型的紧迫形势下，寻找可持续的清洁能源解决方案已成为当务之急。绿氢，作为一种零碳排放的优质能源载体，正逐渐站在能源变革的前沿。其凭借在减少温室气体排放、推动工业绿色转型以及提升能源系统稳定性等方面的巨大潜力，在全球能源战略布局中占据了愈发关键的位置。新能源企业开发绿氢项目具备新能源资源开发与电氢耦合技术开发优势，但在项目推进中，面临传统思维突破、组织架构设置以及电氢生产调度等难点。本文旨在系统分析新能源企业通过顶层设计前瞻锚定、产业基础优势夯实、生产准备细化优化等策略，帮助解决绿氢项目工程与生产管理难点的可行性。

关键词： 绿氢产业；新能源企业；组织架构；电氢耦合；工程生产管理

Analysis of Difficulties in Engineering and Production Management of Green Hydrogen Project in New Energy Enterprises

Zhang Tingting

SPIC Jilin Electric Power Co.,Ltd. Beijing Jineng New Energy Technology Co., LTD. Beijing 100000

Abstract： In the urgent situation of global climate change and energy transition, finding sustainable clean energy solutions has become a top priority. Green hydrogen, as a high-quality energy carrier with zero carbon emissions, is gradually standing at the forefront of energy reform. With its huge potential to reduce greenhouse gas emissions, promote the green transformation of industry and improve the stability of the energy system, it occupies an increasingly critical position in the global energy strategy. The development of green hydrogen projects by new energy enterprises has advantages in the development of new energy resources and electrohydrogen coupling technology, but in the process of project promotion, they are faced with difficulties such as breakthroughs in traditional thinking, organizational structure setting and electrohydrogen production scheduling. This paper aims to systematically analyze the feasibility of new energy enterprises to help solve the difficulties of green hydrogen project engineering and production management through the strategies of top-level design foresight anchoring, consolidating industrial base advantages, and refining and optimizing production preparation.

Keywords： green hydrogen industry; new energy enterprises; organizational structure; electrohydrogen coupling; engineering production management

引言

新能源企业凭借自身在可再生能源领域的深厚积累，成为绿氢项目开发的主力军。然而，绿氢项目从规划建设到生产运营，涉及多领域复杂技术与管理问题。新能源企业在这一全新征程中，面临着从传统思维模式转变到适应新兴产业组织架构搭建，再到应对电氢复杂生产调度等一系列挑战。深入剖析这些工程与生产管理难点，并探寻切实可行的优化策略，不仅对新能源企业自身的发展至关重要，更将对全球绿氢产业的健康、快速发展产生深远影响。

一、绿氢产业概述

在全球能源转型的大背景下，绿氢产业正逐渐成为实现可持续发展的关键力量。绿氢，即通过可再生能源电解水制得的氢气，其生产过程几乎不产生碳排放，与传统化石能源制氢形成鲜明对比。这种绿色、清洁的能源属性，使得绿氢在全球能源战略中占据着极其重要的地位^[1]。

从全球范围来看，许多国家纷纷将绿氢纳入国家能源发展战略。欧盟提出了“欧洲绿色协议”，旨在通过大规模发展绿氢产业，推动能源系统的深度脱碳，实现到 2050 年碳中和的目标。欧盟计划在 2030 年前建设多个 GW 级别的绿氢项目，并逐步完善绿氢产业链。同样，日本也将绿氢视为未来能源的重要支柱，制定了“绿色增长战略”，加大对绿氢技术研发和基础设施建设的投入，目标是在 2030 年实现绿氢的大规模商业化应用^[2]。

作者简介：张婷婷（1992.10—），女，汉族，籍贯：吉林省吉林市，博士研究生，研究方向：氢能技术与项目管理。

绿氢产业的发展不仅有助于应对气候变化，减少温室气体排放，还能带动一系列相关产业的发展，创造新的经济增长点。例如，绿氢在交通运输领域的应用，可推动氢燃料电池汽车的发展，减少对传统燃油汽车的依赖；在工业领域，绿氢可用于钢铁、化工等行业的生产过程，实现这些行业的绿色转型。此外，绿氢还能与储能技术相结合，解决可再生能源发电的间歇性问题，提高能源系统的稳定性和可靠性^[3]。

二、新能源企业绿氢项目建设优势

（一）新能源企业资源开发优势

新能源企业开发绿氢项目的核心前提是拥有丰富且稳定的绿色电力来源。新能源企业在长期的发展过程中，在新能源资源开发方面积累了显著优势^[4]。

许多新能源企业在风能和太阳能资源丰富的地区布局了大量的发电设施。以我国西部地区为例，广袤的戈壁沙漠地区拥有充足的太阳能辐射，同时地势开阔，风力资源也十分丰富。新能源企业通过这些地区建设大规模的风电场和光伏电站，能够持续稳定地获取大量的可再生能源电力^[5]。据统计，我国西部地区的部分新能源企业，其每年的风能和太阳能发电量可达数十亿千瓦时，为绿氢项目提供了坚实的电力基础。

此外，新能源企业在新能源资源的勘探、评估和开发技术方面也处于领先地位。他们利用先进的卫星遥感技术、地理信息系统（GIS）等手段，能够精准地识别和评估潜在的新能源资源区域，确定最佳的发电设施建设地点^[6]。在项目建设过程中，采用高效的风力发电机组和光伏组件，以及先进的电力传输和管理技术，确保新能源发电的高效性和稳定性，从而为绿氢项目提供可靠的绿色电力保障。

（二）电氢耦合技术开发优势

电氢耦合技术是新能源企业实现绿氢项目高效运行的关键技术之一。新能源企业在长期的电力生产和运营过程中，对电力系统的运行和管理有着深入的理解，这为其开发和应用电氢耦合技术提供了有力支持^[7]。

新能源企业通过研发和应用先进的电解水制氢技术，实现了电力与氢气生产的高效耦合。例如，一些企业采用质子交换膜（PEM）电解水技术，该技术具有响应速度快、电流密度高、氢气纯度高等优点，能够根据电力供应的变化快速调整制氢量，实现电力与氢气生产的实时匹配。同时，企业还在不断优化电解水制氢设备的性能，提高其能源转换效率，降低制氢成本^[8]。

此外，新能源企业在电力储能和调度方面也具备独特的技术优势。为了应对可再生能源发电的间歇性问题，确保绿氢项目的稳定运行，新能源企业开发了多种储能技术，如电池储能、抽水蓄能等，并将其与电氢耦合系统相结合^[9]。通过智能电网调度系统，根据电力供需情况和制氢需求，合理调配电力资源，实现电力在发电、储能和制氢之间的优化配置，提高能源利用效率，降低系统运行成本^[10]。

三、新能源企业绿氢项目工程与生产管理难点

（一）传统思维突破难点

在新能源企业绿氢项目的推进过程中，传统思维模式成为了

一大阻碍。长期以来，能源行业形成了以化石能源为主导的思维定式，从项目规划、建设到运营管理，都遵循着传统能源项目的模式。

对于绿氢项目，这种传统思维在多个方面产生了负面影响。在项目规划阶段，传统思维往往侧重于短期经济效益，忽视了绿氢项目在长期可持续发展和环境保护方面的巨大价值。例如，在评估项目可行性时，过于关注初始投资成本和短期内的投资回报率，而对绿氢项目在减少碳排放、推动能源转型等方面的长期效益考虑不足。

在技术研发和应用方面，传统思维使得企业对新兴的绿氢技术持保守态度。习惯于依赖传统的能源生产技术，不愿意投入大量资源进行绿氢技术的研发和创新。这导致企业在绿氢项目中可能无法及时采用最先进的技术，从而影响项目的竞争力和可持续发展能力。

此外，在市场推广和客户认知方面，传统思维也限制了企业的行动。企业往往按照传统能源产品的市场推广方式来推广绿氢，没有充分认识到绿氢作为一种新型清洁能源，其市场需求和客户群体具有独特性。这使得绿氢项目在市场拓展过程中面临诸多困难，难以快速获得市场的认可和接受。

（二）组织架构设置难点

绿氢项目的复杂性和创新性对新能源企业的组织架构提出了严峻挑战。传统的能源企业组织架构通常是按照职能划分的，如生产、销售、研发等部门各自独立运作。这种组织架构在应对绿氢项目时，暴露出了诸多问题。

首先，跨部门协作困难。绿氢项目涉及多个领域，包括新能源发电、电解水制氢、氢气储存和运输、市场销售等，需要不同部门之间密切配合。然而，在传统组织架构下，各部门之间存在明显的沟通壁垒，信息传递不畅，导致项目推进过程中协调成本高，效率低下。例如，在项目建设过程中，生产部门可能只关注制氢设备的安装和调试，而忽视了与销售部门的沟通，导致产品生产出来后无法及时满足市场需求。

其次，缺乏对绿氢项目的整体统筹管理。由于各部门各自为政，没有一个专门的部门或团队对绿氢项目进行全面的规划、协调和监控，容易出现项目进度失控、资源分配不合理等问题。例如，在资源分配上，可能会出现某些部门资源过剩，而另一些关键部门资源不足的情况，影响项目的整体推进。

此外，传统组织架构在面对绿氢项目的快速变化和创新需求时，缺乏灵活性和适应性。绿氢技术和市场都处于快速发展阶段，需要企业能够及时调整组织架构和业务流程，以适应新的变化。但传统组织架构的层级较多，决策过程繁琐，难以快速响应市场变化和技术创新的要求。

（三）电氢生产调度难点

电氢生产调度是绿氢项目运营管理中的关键环节，也是一个极具挑战性的问题。可再生能源发电的间歇性和波动性，给电氢生产的稳定调度带来了巨大困难。

一方面，风能和太阳能的发电功率受天气、时间等因素影响较大。例如，在阴天或无风天气，太阳能和风能发电功率会大幅下降，甚至可能出现零发电的情况。而电解水制氢设备需要稳定的电力供应才能高效运行，电力供应的不稳定会导致制氢设备频繁启停，不仅影响设备寿命，还会增加制氢成本。

另一方面，电力与氢气的生产和需求之间的匹配难度较大。

电力需求和氢气需求在时间和数量上往往存在差异，如何在满足电力供应的前提下，合理安排氢气的生产，以满足不同时段的氢气需求，是电氢生产调度面临的一大难题。例如，在某些工业生产高峰期，对氢气的需求量较大，但此时可再生能源发电可能不足，需要从电网购电或调整制氢策略，以确保氢气供应的稳定。

此外，电氢生产调度还涉及到多个系统之间的协调，包括发电系统、储能系统、电解水制氢系统和氢气储存运输系统等。这些系统之间的接口复杂，信息交互量大，需要建立高效的调度管理系统，实现各系统之间的协同运行。然而，目前的调度管理技术在应对这些复杂情况时，仍存在一定的局限性，难以实现电氢生产的最优调度。

四、新能源企业绿氢项目工程与生产管理优化策略

（一）顶层设计前瞻锚定

为了突破传统思维的束缚，新能源企业需要进行高瞻远瞩的顶层设计。首先，企业应明确绿氢项目在公司整体战略中的定位，将其视为推动公司可持续发展和实现能源转型的核心业务。从战略高度出发，制定长期的绿氢项目发展规划，明确各个阶段的目标和任务。

在规划过程中，充分考虑绿氢项目的长远效益，不仅仅关注经济效益，更要重视环境效益和社会效益。例如，将减少碳排放、推动区域能源转型等目标纳入项目规划中，以引导企业的各项决策和行动。

同时，加强对绿氢技术研发和创新的战略布局。设立专门的研发基金，加大对电解水制氢技术、储运氢气技术、电氢耦合技术等关键技术的研发投入。鼓励企业内部的研发团队与高校、科研机构开展合作，共同攻克技术难题，提升企业在绿氢领域的技术竞争力。

此外，在市场推广方面，制定创新的市场策略。深入研究绿氢市场的特点和需求，针对不同的客户群体，制定个性化的市场推广方案。加强与政府部门、行业协会的沟通与合作，积极参与制定绿氢产业的相关标准和政策，为绿氢项目的市场拓展创造良好的外部环境。

（二）产业基础优势夯实

针对组织架构设置的难点，新能源企业需要对组织架构进行优化和调整，以适应绿氢项目的发展需求。

首先，建立跨部门的项目团队，打破部门之间的壁垒。该团队由来自生产、研发、销售、市场等多个部门的专业人员组成，负责绿氢项目的全过程管理，包括项目规划、建设、运营和市场推广等。通过跨部门的协同工作，实现信息的快速传递和共享，提高项目的决策效率和执行能力。

其次，设立专门的绿氢项目管理部门，负责对绿氢项目进行整体统筹和协调。该部门的职责包括制定项目计划、分配资源、监控项目进度、协调各部门之间的工作等。通过设立专门的管理部门，确保绿氢项目能够得到有效的管理和控制，避免出现资源浪费和项目失控的情况。

此外，优化企业的业务流程，提高组织的灵活性和适应性。对与绿氢项目相关的业务流程进行全面梳理，简化繁琐的环节，建立快速响应机制。例如，在项目审批流程上，采用信息化手段，实现线上审批，缩短审批时间，提高项目推进效率。同时，

鼓励员工提出创新的想法和建议，对组织架构和业务流程进行持续优化。

（三）生产准备细化优化

为了应对电氢生产调度的难点，新能源企业需要从多个方面对生产准备进行细化和优化。

首先，加强对可再生能源发电的预测和管理。利用先进的气象预测技术和数据分析模型，对风能和太阳能的发电功率进行精准预测，提前做好电力供应的规划。根据发电预测结果，合理安排电解水制氢设备的运行时间和负荷，避免因电力供应不稳定导致设备频繁启停。

其次，完善储能系统的配置和管理。加大对储能技术的投入，根据绿氢项目的需求，选择合适的储能方式和规模。例如，对于短期的电力波动，可以采用电池储能系统；对于长期的电力调节，可以考虑抽水蓄能等大规模储能方式。通过储能系统的合理配置，实现电力的削峰填谷，提高电力供应的稳定性和可靠性。

此外，建立智能的电氢生产调度系统。利用大数据、人工智能等技术，对发电系统、储能系统、电解水制氢系统和氢气储存运输系统进行实时监测和分析，实现各系统之间的智能协同。通过优化调度算法，根据电力供应和氢气需求的变化，自动调整制氢设备的运行参数和氢气的储存运输策略，实现电氢生产的最优调度。

五、结语

新能源企业开发绿氢项目是实现能源转型和可持续发展的重要举措。尽管在工程与生产管理过程中面临诸多难点，但通过突破传统思维、优化组织架构、加强电氢生产调度等方面的努力，新能源企业能够有效应对这些挑战。通过前瞻性的顶层设计、夯实产业基础优势以及细化优化生产准备，新能源企业可以提升绿氢项目的竞争力和可持续发展能力，为推动全球绿氢产业的发展做出积极贡献。在未来，随着技术的不断进步和市场的逐渐成熟，绿氢项目有望成为新能源企业的核心业务，引领能源行业迈向更加清洁、高效的未来。

参考文献

- [1]梁晓静,洪族芳,薛兴宇,等.不同制氢路线的经济性分析及比较[J].能源化工,2024,45(01):30-37.
- [2]李海波.深远海海上风电制氢场景及技术分析[J].低碳化学与化工,2024,49(02):115-123.
- [3]徐立军,苏昕,朱迪,等.“双碳”目标下氢能产业技术发展分析[J].新疆大学学报(自然科学版中英文),2024,41(04):385-407.DOI:10.13568/j.cnki.651094.651316.2024.05.04.0001.
- [4]徐俊.改进型LEC法在风力发电工程中的应用[J].电力安全技术,2023,25(06):45-48.
- [5]周圣杰,王士铭,田洪滨,等.基于人工智能与物联网的电力现场作业智能保障系统研究[J].电测与仪表,2024,61(09):137-144.DOI:10.19753/j.issn1001-1390.2024.09.018.
- [6]尚旭妍.县城绿色低碳建设水平的评价与提升路径研究[D].东南大学,2023.DOI:10.27014/d.cnki.gdnau.2023.003400.
- [7]汪建波.风电工程安全管理的难点及对策[J].云南水力发电,2024,40(01):173-176.
- [8]徐俊.改进型LEC法在风力发电工程中的应用[J].电力安全技术,2023,25(06):45-48.
- [9]缪迅.光伏发电项目价值评估研究[D].天津商业大学,2023.DOI:10.27362/d.cnki.gtsxy.2023.000400.
- [10]杨云涛.BIM对绿色建筑的驱动机制及路径研究[D].重庆大学,2022.DOI:10.27670/d.cnki.gcqdu.2022.003905.

面向智能电网的电力金具设计优化与可靠性研究

吕迪

中国电建集团四平线路器材有限公司, 吉林 四平 136000

摘 要： 电力金具是连接和固定电力系统中各类电气设备、导线、绝缘子等的关键部件，它在电力传输和分配过程中起着不可或缺的作用。当前在智能电网环境下，电力金具不仅要能够满足传统的机械和电气性能要求，并且还需要适应智能电网的特殊运行条件，如更高的电压等级、更大的传输容量、复杂的电磁环境以及与智能监测系统的协同工作等。因此优化电力金具设计与提高其可靠性，对于保障智能电网的安全稳定运行是至关重要的。

关 键 词： 智能电网；电力金具；设计优化；可靠性

Design Optimization and Reliability Research of Power Fittings for Smart Grid

Lv Di

China Electric Power Construction Group Siping Line Material Co., Ltd . Siping, Jilin 136000

Abstract： Power fittings are key components that connect and fix various electrical equipment, conductors, ins, etc. in the power system, playing an indispensable role in the process of power transmission and distribution. In the current context of smart grids, power fittings not only to meet the traditional mechanical and electrical performance requirements, but also need to adapt to the special operating conditions of smart grids, such as higher voltage levels, larger transmission capacity complex electromagnetic environment, and coordinated work with intelligent monitoring systems. Therefore, optimizing the design of power fittings and improving their reliability are crucial for ensuring the safe and stable operation smart grids.

Keywords： smart grid; power fittings; design optimization; reliability

引言

智能电网作为现代电力系统的发展方向，当中融合了先进的信息技术、通信技术和电力技术，因此具有高度自动化、信息化和互动化的特点。其发展旨在提高电力系统的安全性、可靠性、经济性和环保性，以及满足日益增长的电力需求和能源可持续发展的要求。

一、智能电网对电力金具的要求

（一）电气性能要求

1. 高电压绝缘性能

智能电网之中不断提高了电压等级，对于电力金具的绝缘性能提出了更高要求^[1]。即金具必须具备良好的绝缘材料和合理的绝缘结构，才能够防止电网在高电压下发生绝缘击穿、沿面放电等现象，以确保电力系统的安全运行。

2. 低电阻与低能耗

为了降低电力传输过程中的能量损耗，电力金具应具有较低的电阻，才能有效地减少发热和功率损耗。对此应采用优质导电材料和优化的接触结构，如此就能够降低金具的电阻，达到提高电力传输效率的目的。

（二）机械性能要求

1. 高强度与高稳定性

智能电网中的电力金具需要承受导线的张力、风力、覆冰等

各种机械载荷，同时其还要适应不同的地理环境和气候条件。因此金具必须具有足够的强度和稳定性，才能够确保电网在长期运行过程中不发生变形、断裂等损坏现象^[2]。

2. 耐疲劳性能

由于电力系统的运行会使金具承受周期性的载荷作用，此时极易导致金具产生疲劳损伤。而提高金具的耐疲劳性能，即选择合适的材料和制造工艺，即能延长金具的使用寿命，从而减少维护成本。

（三）智能化要求

1. 与智能监测系统的融合

智能电网中的电力金具需要具备与智能监测系统相融合的能力，才能够实时地采集自身的运行状态信息，如温度、应力、振动等，并且将这些信息传输给监测系统，以便于及时地发现潜在的故障隐患，进而实现状态检修。

2. 自适应调节功能

对于实践来说，部分电力金具应具备自适应调节功能，即自

身能够根据电网运行状态的变化自动地调整自身的参数。如张力调节金具可根据导线的热胀冷缩自动调整张力，以保证导线的安全运行。

二、现有电力金具设计存在的问题

（一）材料问题

1. 材料性能不足

因为一些传统的电力金具采用的材料在强度、耐腐蚀性、导电性等方面存在一定的局限性，所以其难以满足智能电网对金具高性能的要求。例如某些金属材料在恶劣环境下容易发生腐蚀，此时将会影响金具的使用寿命和可靠性。

2. 材料选择不合理

在金具设计过程当中，有时会存在材料选择不合理的情况。其原因在于工作人员没有充分地考虑金具的实际使用工况和性能要求，最终导致金具在运行过程中出现过早损坏等问题。

（二）结构设计问题

1. 结构不合理导致应力集中

部分电力金具的结构设计不合理，导致在承受载荷时会出现应力集中现象，进而降低了金具的强度和可靠性。如一些连接金具的连接处设计不合理，进一步导致局部应力过大，最终将会引发断裂。

2. 缺乏对复杂工况的考虑

现有金具结构设计往往没有全面地考虑智能电网中复杂的运行工况，如强电磁干扰、高频振动等，最终金具在实际运行中极可能会出现性能下降或故障的情况^[3]。

（三）制造工艺问题

1. 制造精度不高

现下存在一些电力金具，其制造工艺水平较低，并且制造精度难以保证。如此会导致金具的尺寸偏差较大，从而影响了金具的装配质量和性能。比如金具的接触表面不平整会增加接触电阻，接着将会导致发热问题。

2. 表面处理工艺不完善

金具的表面处理工艺对于其耐腐蚀性和使用寿命有着重要影响。目前部分金具的表面处理工艺不完善，如镀锌层厚度不均匀、附着力不足等，该问题容易导致金具在使用过程中发生腐蚀的情况。

三、电力金具设计优化策略

（一）材料优化

1. 新型材料的应用

在智能电网不断发展的背景之下，传统的电力金具材料逐渐难以满足日益增长的性能需求，对此积极地探索和应用新型材料成为了必然的趋势。而高强度铝合金便是其中极具潜力的一种。它主要以铝为基体，通过添加如铜、镁、锌等合金元素，并经过特定的热处理工艺，最终具备了密度小的显著特点。相较于传统的钢材来说，其密度大幅降低，因此在电力金具的实际应用中便能够有效地减轻金具自身重量，且降低杆塔等支撑结构的负荷压力，从而减少建设成本和维护难度。同时高强度铝合金的强度还可与部分优质钢材相媲美，它能够承受较大的机械载荷。如在耐

张线夹、接续管等需要承受导线拉力和张力的金具部件制造中，高强度铝合金的应用就能够确保金具在长期复杂受力情况下，依然保持其结构的稳定，确保其不发生变形或断裂。

2. 材料性能改进

除了引入新型材料以外，对于现有材料进行改性处理也是提升电力金具性能的重要途径。对于金属材料来说，热处理是一种常用且有效的改性方法。该方法主要是借助控制加热温度、保温时间和冷却速度等工艺参数，来改变金属的内部组织结构，进而改善其性能。例如淬火处理就可以提高金属的硬度和强度，进而使金具在承受较大外力时不易变形。回火处理则能消除淬火后的内应力，有效地提高材料的韧性，以防止金具在使用过程中发生脆性断裂。而表面合金化也是一种有效的手段，其主要通过在金属表面形成一层合金层，如渗碳、渗氮等，达到提高金属表面硬度、耐磨性和耐腐蚀性的目的，最终可增强金具在复杂环境下的适应能力^[4]。

（二）结构设计优化

1. 基于有限元分析的结构优化

有限元分析作为一种强大的数值计算方法，其在电力金具结构优化设计中发挥着关键作用。该方式的基本原理是将复杂的金具结构离散为有限个单元，再通过对每个单元的力学分析，建立起整个结构的数学模型，进而可求解在不同载荷工况下结构的应力、应变分布情况。有限元分析在实际应用中，首先需要利用三维建模软件精确构建电力金具的几何模型，然后再将其导入到专业的有限元分析软件中，如 ANSYS、ABAQUS 等。最后在软件中即可对金具模型进行材料属性定义、网格划分、载荷和边界条件设置等操作。

以悬垂线夹为例，对其进行有限元分析时，先要模拟悬垂线夹在承受导线张力、风力、覆冰等多种载荷工况下的力学响应。接着就是分析结果，从结果中可以清晰地看到金具结构中应力集中的区域，如线夹与导线接触部位、线夹本体的某些拐角处等^[5]。此时针对这些薄弱环节，设计人员就可以对结构形状进行优化操作，如采用圆滑过渡的曲线代替尖锐的拐角，以增加应力集中区域的材料厚度。或者是对尺寸参数进行调整，如优化线夹的长度、宽度和厚度比例，进而使结构受力更加均匀。经过多次的优化迭代，最终得到的悬垂线夹结构在承受导线张力时应力分布更加均匀，有效地提高了金具的强度和可靠性，且降低了因应力集中导致的断裂风险。

2. 考虑复杂工况的结构设计

由于智能电网的运行环境复杂多变，所以电力金具在实际工作中会受到多种复杂工况的影响，因此在结构设计过程中必须全面地考虑多种因素。就强电磁环境来说，在靠近变电站、高压输电线路交叉处等位置的时候，电力金具就容易受到电磁干扰，而这可能会影响到金具的电气性能和通信功能（对于智能监测型金具）^[6]。若想要减少电磁干扰对于金具性能的影响，相关人员可采用屏蔽结构设计。即在金具表面覆盖一层金属屏蔽层，如铜、铝等导电性良好的金属材料，其原理是利用金属对电磁波的反射和吸收特性，将外界的电磁干扰屏蔽在金具外部，以此确保金具内部的电气元件和通信模块正常工作。

（三）制造工艺优化

1. 提高制造精度

显而易见的是，先进的制造工艺和设备是提高电力金具制造

精度的关键。而数控加工设备通过计算机程序控制刀具的运动轨迹，能够精确地完成各种复杂形状的加工任务^[7]。即在电力金具制造中，数控车床可以精确地加工金具的轴类零件，以保证其尺寸精度在微米级；数控铣床则能对金具的复杂轮廓进行铣削加工，从而确保表面质量和尺寸精度符合设计要求。与传统加工方式相比来说，数控加工减少了人为因素对加工精度的影响，且提高了加工的一致性和稳定性。

除此之外，精密铸造和锻造工艺也在提高金具内部质量和性能一致性方面发挥着重要作用。具体而言，精密铸造工艺（如熔模铸造、消失模铸造等）能够制造出形状复杂、尺寸精度高的金具零件。其中熔模铸造是通过制作精确的蜡模，然后在蜡模表面涂覆多层耐火材料，再经过高温焙烧使蜡模熔化流出，最终形成型腔，借助将金属液浇入型腔中即可成型。因为这种工艺能够生产出表面光洁、尺寸精度高的金具，所以有效地减少了后续加工余量，还提高了材料利用率^[8]。

2. 完善表面处理工艺

热浸镀锌是一种当前常用的提高金具耐腐蚀性的表面处理技术。此技术需将经过前处理的金具浸入熔融的锌液中，进而使金具的表面能够形成一层锌铁合金层和纯锌层。由于锌层具有良好的电化学保护作用，即当金具表面的锌层与空气、水等介质接触时，锌会优先发生氧化反应，从而形成一层致密的氧化锌保护膜，因此该技术能够阻止氧气和水分进一步侵蚀金具基体，以延长金具的使用寿命。

对于降低金具接触电阻、提高导电性能方面而言，化学镀镍、镀银等工艺得到了广泛地应用。化学镀镍是在无外加电流的前提下，利用化学还原反应在金具表面沉积一层镍磷合金层。而镍磷合金具有良好的导电性和耐磨性，所以能够降低金具接触部位的电阻，从而减少发热现象，以及提高电力传输效率。镀银工艺则需要金具表面镀上一层银，因为银具有极高的导电性，所以镀银能够显著地降低金具的接触电阻，进一步提高其导电性能。

四、电力金具可靠性评估方法

（一）可靠性评估指标

1. 失效概率

失效概率表示在规定的时间内和条件下，金具发生失效的可

能性，它主要是衡量电力金具的可靠性^[9]。相关人员通过对金具的失效数据进行统计分析，再结合其故障模式和影响分析（FMEA），就可以计算出金具的失效概率。

2. 可靠度

可靠度是指在规定的时间内和条件之下，金具完成规定功能的概率。并且可靠度与失效概率互为补数。

3. 平均无故障时间（MTBF）

平均无故障时间意为金具在相邻两次故障之间的平均工作时间。它反映了金具的可靠性和稳定性。若 MTBF 越长，就说明金具的可靠性越高。

（二）可靠性评估方法

1. 基于故障树分析（FTA）的评估方法

故障树分析的原理是建立金具的故障树模型，并将金具的故障现象作为顶事件，再分析导致顶事件发生的各种直接和间接原因，直至找出最基本的底事件为止。借助对故障树的定性和定量分析，相关人员可以确定出金具的薄弱环节和失效概率^[10]。

2. 基于贝叶斯网络的评估方法

贝叶斯网络是一种基于概率推理的图形化模型，它能够有效地处理不确定性信息。而将贝叶斯网络应用于电力金具可靠性评估，需要先建立金具的贝叶斯网络模型，然后利用先验知识和样本数据对于金具的可靠性进行推理和预测。如此才能够更加准确地评估金具在不同工况下的可靠性。

3. 基于可靠性试验的评估方法

通过对电力金具进行可靠性试验，如寿命试验、环境试验、力学性能试验等，即可获取金具的失效数据和性能参数，从而能够评估金具的可靠性。

五、结语

电力金具作为智能电网的重要组成部分，其设计优化与可靠性对于保障智能电网的安全稳定运行具有重要意义。本文针对现有电力金具设计存在的问题，从材料优化、结构设计优化、制造工艺优化等方面提出了设计优化的策略，并且还研究了电力金具可靠性评估方法和提高可靠性的措施。

参考文献

- [1] 李宜莎, 孙轲. 电网调度自动化系统的优化与智能化升级路径探究 [J]. 科技资讯, 2024, 22(23): 93-95. DOI: 10.16661/j.cnki.1672-3791.2410-5042-6057.
- [2] 邢星, 袁朝洋. 面向智能电网业务的窄带物联网技术研究及应用 [J]. 物联网技术, 2024, 14(12): 132-136+140. DOI: 10.16667/j.issn.2095-1302.2024.12.032.
- [3] 刘柱, 欧清海. 面向智能配电网的电力线与无线融合通信研究 [J]. 电力信息与通信技术, 2016, 14(02): 1-6.
- [4] 宋清魁. 面向智慧城市的智能电网电力需求预测技术研究与应用 [D]. 东北大学, 2016.
- [5] 李新鹏. 面向国内智能电网的电力调度控制系统异常智能检测方法与故障定位技术研究 [D]. 北京市: 北京邮电大学, 2023. DOI: 10.26969/d.cnki.gbydu.2023.000374.
- [6] 黄鼎昌. 面向智能电网的数据中心需求响应策略选择与电力成本优化 [D]. 青海省: 青海大学, 2021. DOI: 10.27740/d.cnki.gqhdx.2021.000372.
- [7] 赵经纬. 基于智能电网的电力管理系统的设计与优化 [J]. 自动化应用, 2023, 64(S02): 80-82.
- [8] 张少鹏. 高可靠性配电网中智能电源管理系统的设计与优化 [J]. 通信电源技术, 2024, 41(05): 85-87. DOI: 10.19399/j.cnki.tpt.2024.05.027.
- [9] 董秋军, 吴布托, 邹昊凯. 基于特高压技术的智能电网优化设计与运行策略研究 [J]. 办公自动化, 2024, 29(20): 11-13.
- [10] 王实, 路健, 李灿岑, 等. 面向智能电网的配电自动化数据质量管理与决策支持系统设计 [J]. 科技风, 2024, (31): 4-6+13. DOI: 10.19392/j.cnki.1671-7341.202431002.

基于大数据分析的新能源发电预测与优化模型研究

邓泽群

吉林吉电新能源有限公司, 吉林 长春 130000

摘 要： 全球对清洁能源需求增长，新能源发电在能源领域越发重要，但新能源发电的间歇性和不稳定性给电力系统的规划、运行和调度带来很大挑战。本文围绕基于大数据分析的新能源发电预测与优化模型，阐述新能源发电类型及特性和大数据技术在能源领域的应用原理，全面介绍大数据驱动的新能源发电预测模型以及大数据助力的新能源发电优化模型。详细分析各类模型的原理、优势与局限，对比模型性能评估指标。目的是为新能源发电领域的研究与实践提供全面理论参考，推动新能源发电高效又稳定的发展。

关 键 词： 大数据分析；新能源发电；预测模型；优化模型；综述

Research on Prediction and Optimization Models for New Energy Power Generation Based on Big Data Analysis

Deng Zequn

Jilin Jidian New Energy Co., Ltd. Changchun, Jilin 130000

Abstract： The global demand for clean energy is growing, making new energy generation increasingly important in the energy sector. However, the intermittent and unstable nature of new energy generation poses significant challenges to the planning, operation, and scheduling of power systems. This paper focuses on a new energy generation prediction and optimization model based on big data analysis, elaborating on the types and characteristics of new energy generation and the application principles of big data technology in the energy sector. It provides a comprehensive introduction to big data-driven new energy generation prediction models and big data-assisted new energy generation optimization models. It analyzes in detail the principles, advantages, and limitations of various models, comparing performance evaluation metrics. The aim is to provide a comprehensive theoretical reference for research and practice in the field of new energy generation, promoting its efficient and stable development.

Keywords： big data analysis; new energy power generation; prediction model; optimization model; review

引言

全球能源结构加快向清洁能源转变，新能源发电作为可持续能源发展的关键部分，受到广泛关注。太阳能、风能、水能、生物质能等新能源清洁、可再生，对缓解能源危机和减少环境污染意义重大。不过新能源发电受自然条件（像光照强度、风速、水文等）影响大，有明显的间歇性和不稳定性，这就使得新能源发电并入电网时可能对电网的稳定性、可靠性和电能质量产生不良影响。大数据分析技术快速发展，为解决新能源发电上述问题带来新机会，大数据有海量数据、快速流转、数据类型多样和价值密度低的特点，并且能整合新能源发电相关的多源数据，挖掘数据背后隐藏的规律和趋势。基于大数据分析构建的新能源发电预测模型可提前知道发电功率变化，为电力系统的调度和运行提供准确依据；优化模型能在考虑多种约束条件下实现新能源发电的最优配置，提高发电效率，降低发电成本。所以开展基于大数据分析的新能源发电预测与优化模型研究，有重要理论意义和实际应用价值。

一、新能源发电与大数据技术基础

（一）新能源发电类型及特性

常见新能源发电类型主要有太阳能发电、风能发电、水能发电和生物质能发电等。其中太阳能发电主要通过光伏发电板把太

阳能转为电能，它的发电特性受光照强度以及温度等因素影响明显。白天光照足时发电功率高；夜晚或阴天时发电功率大幅下降甚至为零，另外温度过高也会降低光伏电池的转换效率。风能发电利用风力发电机把风能转为电能，风速大小和稳定性直接决定风能发电的功率。因风速有随机性和间歇性，风能发电的输出功

率波动大且难准确预测，同时不同地区风资源分布差异大，这对风电场选址和布局要求高。

而水能发电依靠水轮机把水流能量转为电能，其发电功率主要取决于水位落差和流量。受季节和气候影响，河流水量有明显丰枯变化，导致水能发电出力也随之波动。同时水电站建设还受地理条件和生态环境等多方面限制。生物质能发电则是利用生物质能转为电能，比如用农作物秸秆、林业废弃物等发电，生物质能发电稳定性相对较高，但原料供应受季节和地域限制且发电效率相对较低^[1]。

（二）大数据技术核心概念与能源应用原理

大数据技术核心概念围绕数据的“4V”特征，即大量（Volume）、高速（Velocity）、多样（Variety）和价值（Value），在能源领域大数据技术应用原理主要体现在以下方面：

在数据采集环节，通过各种传感器、智能电表、监测设备等去实时采集新能源发电设备运行数据、气象数据、电网负荷数据等海量信息。这些数据来源广且类型多样，包括结构化数据（如设备运行参数）、半结构化数据（如日志文件）和非结构化数据（如卫星图像、文本报告）。

数据传输方面借助高速通信网络（如 5G、光纤网络）把采集到的数据快速传输到数据存储和处理中心，保证数据时效性。

数据存储采用分布式存储技术（如 Hadoop 分布式文件系统 HDFS），能存储海量数据，并保证数据安全性和可靠性^[2]。

而在数据处理与分析阶段，运用数据挖掘、机器学习、深度学习等技术，对数据进行清洗、预处理、特征提取和建模分析，挖掘数据中潜在规律和价值，进一步为新能源发电预测和优化提供数据支持。

二、大数据驱动的新能源发电预测模型综述

（一）传统预测模型概述与局限

传统新能源发电预测模型主要有时间序列分析和回归分析等。其中时间序列分析基于发电功率历史数据，通过建立时间序列模型（如 ARIMA 模型）预测未来发电功率，该方法假设数据有平稳性和周期性，通过对历史数据统计分析预测未来趋势。但新能源发电数据受自然因素影响大并且随机性和波动性强，难满足平稳性假设，进而导致预测精度受限。而回归分析则通过建立发电功率与影响因素（如风速、光照强度等）的线性或非线性回归方程进行预测。但实际中新能源发电与影响因素关系复杂，不是简单线性关系，传统回归分析难准确描述这种复杂关系，影响预测效果。

（二）基于机器学习的预测模型

1. 神经网络模型

神经网络模型有强大非线性映射能力，能自动学习数据中复杂模式和特征，在新能源发电预测中常用神经网络模型有 BP 神经网络和 RBF 神经网络。其中 BP 神经网络是多层前馈神经网络，通过反向传播算法调整网络权重和阈值最小化预测值与实际值误差。它由输入层、隐藏层和输出层组成，输入层接收发电相关各

种因素数据（如气象数据、时间数据等），隐藏层对输入数据进行特征提取和非线性变换，输出层输出预测发电功率。不过 BP 神经网络存在训练速度慢或易陷入局部最优等问题^[3]。而 RBF 神经网络则采用径向基函数作为激活函数，局部逼近能力强、训练速度快。它能更有效处理非线性问题，在新能源发电预测中也有较好应用效果，但 RBF 神经网络的径向基函数中心和宽度选择较难，需通过合适算法优化。

2. 支持向量机模型

支持向量机（SVM）是基于统计学习理论的机器学习算法，在小样本、非线性问题上有独特优势，其基本思想是寻找最优分类超平面，分开不同类别数据。在新能源发电预测中 SVM 把发电数据和影响因素数据映射到高维空间，在高维空间寻找最优分类超平面，实现发电功率预测^[4]。而 SVM 优点则是泛化能力强并且对小样本数据适应性好，但它对核函数选择很敏感，不同核函数导致不同预测结果且计算复杂度较高，对大规模数据处理效率低。

（三）基于深度学习的预测模型

1. 递归神经网络及其变体

递归神经网络（RNN）适合处理时间序列数据，能利用历史信息预测未来值。在新能源发电预测中 RNN 可捕捉发电功率随时间变化趋势，但传统 RNN 有梯度消失和梯度爆炸问题，难处理长期依赖关系。为解决这一问题就出现长短期记忆网络（LSTM）和门控循环单元（GRU）等变体。LSTM 通过引入门控机制（输入门、遗忘门和输出门），有效控制信息流动，更好处理长期依赖问题。GRU 则是对 LSTM 的简化，把输入门和遗忘门合并为更新门，计算复杂度相对较低，在新能源发电预测中也表现出良好性能。

2. 卷积神经网络及其融合模型

卷积神经网络（CNN）最初主要用于图像识别领域，通过卷积层、池化层和全连接层等结构去自动提取数据局部特征。在新能源发电预测中 CNN 可用于提取气象数据或发电设备图像等数据的空间特征。同时为充分利用数据时空特征，近年出现 CNN 与 LSTM 等模型的融合模型，比如把 CNN 提取的空间特征作为 LSTM 输入，让 LSTM 进一步处理时间序列信息，进而实现对新能源发电功率更准确预测。这种融合模型结合 CNN 和 LSTM 优势，处理复杂时空数据时表现更好^[5]。

（四）模型性能评估指标对比

在新能源发电预测模型中，常用的性能评估指标包括均方根误差（RMSE）、平均绝对误差（MAE）、平均绝对百分比误差（MAPE）等。

RMSE 能反映预测值与真实值偏差的平均幅度，对较大误差更为敏感，其计算公式为：

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}$$
，其中 y_i 为真实值， \hat{y}_i 为预测值， n 为样本数量。MAE 衡量预测值与真实值误差的平均绝对值，计算简单且直观，公式为： $MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|$ 。

MAPE 以百分比形式展示预测误差，便于不同规模数据间比较，公式为：

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{|y_i|} \times 100\%$$

传统时间序列分析模型，如 ARIMA，由于对数据平稳性要求高，在新能源发电数据波动大的情况下，RMSE、MAE 和 MAPE 值往往较大，预测精度低^[6]。

BP 神经网络模型，训练过程易陷入局部最优，导致预测结果不稳定，RMSE 和 MAE 相对较高，MAPE 也不理想。

RBF 神经网络训练速度快，但径向基函数参数选择困难，若参数不合适，RMSE、MAE 会偏大，影响预测准确性。

SVM 对小样本数据有优势，但其核函数选择敏感，核函数选择不佳时，RMSE、MAE 增大，MAPE 也会升高，且在大规模数据下计算效率低，影响其在实际中的应用。

RNN 受梯度消失和梯度爆炸问题影响，预测长期序列时误差较大，RMSE、MAE 和 MAPE 值较高。

LSTM 和 GRU 能有效处理长期依赖问题，相比 RNN，RMSE、MAE 和 MAPE 值明显降低，预测精度显著提升。

CNN 及其融合模型，在处理具有时空特征的数据时，通过提取空间和时间特征，能更准确地预测新能源发电功率，RMSE、MAE 较低，MAPE 也处于较低水平，展现出较好的性能。

三、大数据助力的新能源发电优化模型综述

（一）优化目标与约束条件梳理

新能源发电优化目标主要有最大化发电效率、最小化发电成本、提高能源利用率等。最大化发电效率可通过合理调整发电设备运行参数（如风机叶片角度、光伏电池跟踪角度等），让发电设备在不同自然条件下保持最佳发电状态。最小化发电成本需综合考虑设备投资成本、运维成本以及能源采购成本等因素，通过优化发电计划和资源配置，降低总体发电成本。而提高能源利用率旨在减少能源浪费，进而实现能源高效转化和利用。

在优化过程中需考虑多种约束条件，发电设备运行约束包括设备功率限制、启停约束以及寿命约束等。例如风机发电功率不能超额定功率，设备频繁启停影响设备寿命，所以要合理安排设备运行时间和启停次数。另外电网接入约束主要考虑电网容量限制、电压稳定性、频率稳定性等因素，新能源发电需与电网运行要求匹配，确保电力安全稳定传输和分配。能源供需平衡约束要求新能源发电输出能满足用户用电需求，同时避免能源过度生产或短缺^[7]。

（二）数学规划类优化模型

1. 线性规划模型

线性规划模型是经典优化模型，目标函数和约束条件都是线性函数。在新能源发电中线性规划模型可用于发电资源分配、发电计划制定等，比如在多个新能源发电站间分配发电任务时，以发电成本最小化为目标函数，以各发电站发电功率限制、能源需求等为约束条件来建立线性规划模型。求解该模型可得到最优发电分配方案，同时线性规划模型优点是求解算法成熟并且计算效率高，但只能处理线性关系，对实际中存在的非线性问题应用受限。

2. 非线性规划模型

非线性规划模型适用于处理目标函数或约束条件中有非线性关系的优化问题。在新能源发电领域，很多实际问题有非线性特征，如发电设备效率曲线通常是非线性的，非线性规划模型能更准确描述这些复杂关系但求解难度大。常用求解算法有梯度下降法和拟牛顿法等，其中梯度下降法通过迭代更新变量，沿目标函数负梯度方向找最优解；拟牛顿法则通过近似海森矩阵加速收敛。不过这些算法易陷入局部最优解，对大规模或者复杂非线性规划问题来说求解效果可能不好^[8]。

（三）智能优化算法

1. 遗传算法

遗传算法是模拟生物进化过程的随机搜索算法，通过对种群中个体（即可能的解）进行选择、交叉和变异操作，逐步找到最优解。在新能源发电优化中遗传算法可用于优化发电设备运行参数、发电调度方案等。首先对决策变量编码，转化为染色体形式；然后随机生成初始种群并计算每个个体适应度值，适应度值根据目标函数和约束条件评估；接着通过选择操作从当前种群选适应度高的个体去作为下一代种群父代；父代个体通过交叉和变异操作产生子代个体而形成新种群。不断重复上述过程，直到满足终止条件（如达到最大迭代次数或适应度值不再变化），此时得到的最优个体就是优化模型近似最优解。遗传算法优点是全局搜索能力强，对问题依赖性小但计算量大，易出现早熟收敛现象^[9]。

2. 粒子群优化算法

粒子群优化算法是基于群体智能的优化算法，模拟鸟群觅食行为，在新能源发电优化中把每个可能的解看作搜索空间中一个粒子，粒子在搜索空间以一定速度飞行并且通过不断调整自身位置和速度去找最优解。粒子速度和位置更新根据自身历史最优位置和群体全局最优位置进行，粒子群优化算法优点是收敛速度快且容易实现，但易陷入局部最优。为克服这一缺点就可采用多种改进策略，如引入惯性权重、自适应调整参数等。

（四）模型性能评估指标对比

在新能源发电优化模型中，常用的性能评估指标有发电效率提升率、发电成本降低率、能源利用率提升率等。

发电效率提升率用于衡量优化模型对发电设备发电效率的提升程度，公式为：发电效率提升率 = 优化前发电效率优化后发电效率 - 优化前发电效率 × 100%。

发电成本降低率反映优化模型在降低发电成本方面的效果，公式为：发电成本降低率 = 优化前发电成本优化后发电成本 - 优化后发电成本 × 100%。

能源利用率提升率体现优化模型对能源利用效率的改进情况，公式为：能源利用率提升率 = 优化前能源利用率优化后能源利用率 - 优化前能源利用率 × 100%。

线性规划模型在处理线性关系的发电资源分配等问题时，能快速找到理论上的最优解，可有效提高发电效率提升率，一定程度降低发电成本，提升能源利用率。但实际中非线性问题较多，限制了其对这些指标的进一步优化。

非线性规划模型能更准确描述实际问题中的非线性关系，理

论上对发电效率提升率、发电成本降低率和能源利用率提升率的优化潜力更大。然而，由于求解难度大，易陷入局部最优，实际应用中可能无法充分发挥其优势，导致这些指标提升效果不稳定。

遗传算法全局搜索能力强，在优化发电设备运行参数和调度方案时，有可能找到较优解，提高发电效率提升率，降低发电成本，提升能源利用率。但计算量大、早熟收敛问题可能影响其最终优化效果，使得各项指标提升幅度受限。

粒子群优化算法收敛速度快，在处理一些简单的新能源发电优化问题时，能快速提高发电效率提升率、降低发电成本，提升能源利用率。但易陷入局部最优，对于复杂问题，可能导致优化后的指标提升程度有限^[10]。

四、结论

综上所述，大数据分析技术为新能源发电领域带来了创新性的解决方案。从预测模型来看，传统的时间序列分析和回归分析模型，因难以适应新能源发电数据的随机性和波动性，在预测精度上存在明显局限，难以满足实际需求。

基于机器学习的神经网络模型，如 BP 神经网络和 RBF 神经网络，虽具备强大的非线性映射能力，但 BP 神经网络训练速度慢、易陷入局部最优，RBF 神经网络的径向基函数参数选择困

难，影响了其预测性能的稳定性。支持向量机模型在小样本、非线性问题上有优势，然而对核函数选择敏感且计算复杂度高，限制了其在大规模数据处理中的应用。而基于深度学习的递归神经网络及其变体（LSTM 和 GRU），通过改进门控机制有效解决了长期依赖问题，显著提升了预测精度，展现出良好的发展性。卷积神经网络及其融合模型，能够充分提取数据的时空特征，在处理复杂的新能源发电数据时表现出色，同样具有较大的发展潜力。

在优化模型方面，线性规划模型虽求解算法成熟、计算效率高，但仅能处理线性关系，在面对实际中大量的非线性问题时应用受限。非线性规划模型虽能准确描述复杂的非线性关系，但求解难度大，易陷入局部最优，实际应用效果不稳定。另外遗传算法全局搜索能力强，但计算量大且易出现早熟收敛现象。粒子群优化算法收敛速度快、容易实现，却也存在易陷入局部最优的问题，这些传统的优化算法在新能源发电优化中均面临一定挑战。

未来应针对现有模型的局限性，要进一步深入研究大数据与新能源发电技术的融合。一方面要优化现有模型，如改进机器学习和深度学习模型的训练算法，提高计算效率，避免陷入局部最优；另一方面还要开发更高效、精准的预测与优化模型，结合新兴技术，如强化学习、迁移学习等，以更好地应对新能源发电的间歇性和不稳定性挑战。通过不断努力，推动新能源发电在全球能源结构中占据更重要的地位，助力能源行业的可持续发展。

参考文献

- [1] 王毕元, 邓星野. 基于大数据分析的新能源发电数据分析与预测研究 [J]. 电气技术与经济, 2024, (07): 239-241.
- [2] 李珊. 基于大数据与智能算法的新能源项目风险分析 [J]. 集成电路应用, 2024, 41(02): 296-297.
- [3] 陈瑞. 新能源发电企业大数据中心提高数据采集质量的方法及其有效性分析 [J]. 云南电力技术, 2022, 50(06): 75-79+92.
- [4] 张扬帆, 杨伟新, 梁恺. 以数据为桥梁为新能源产业赋能增值 [J]. 华北电业, 2022, (04): 28-30.
- [5] 任东方. 多种能源发电协同发展管控模型及大数据分析研究 [D]. 华北电力大学 (北京), 2020.
- [6] 王毕元, 邓星野. 基于大数据分析的新能源发电数据分析与预测研究 [J]. 电气技术与经济, 2024, (07): 239-241.
- [7] 陈志煌. 基于大数据分析的煤电与新能源互补优化调度策略研究 [J]. 前卫, 2024, (01): 0007-0009.
- [8] 李雯, 魏斌, 韩肖清, 等. 面向滚动优化调度的光伏发电功率日内超短期预测 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(11): 43-49. DOI: 10.19635/j.cnki.csu-epsa.000439.
- [9] 卢才云, 朱文, 张海天, 等. 新能源发电功率预测准确率计算策略优化研究与应用 [J]. 电气应用, 2024, 43(06): 54-59.
- [10] 曹婧, 王瑞. 智能电网中新能源发电的预测与调度优化研究 [J]. 张江科技评论, 2024, (07): 108-110.

基于配电网的电力负荷预测探究

张卫杰, 孙有恒, 严康

国网宝丰县供电公司, 河南 宝丰 467400

摘 要 : 构建新型电力系统是促进现代电力系统转型和发展、实现双碳目标的重要手段。新型电力系统中新能源渗透率不断提高, 输、配电网的消纳压力持续增大, 电力系统平衡面临巨大挑战。因此, 精确的负荷预测结果对优化电力供需平衡、提升能源利用效率至关重要, 其精确性对电网的稳定性、运营经济性及长期规划产生深远影响。本文深入探究了配电网环境下的电力负荷预测技术, 系统分析了其基本原理及常用预测方法, 并利用详细的数据图表对各种方法的优劣进行了客观评估。此外, 文章还审视了当前负荷预测所面临的挑战, 并对其未来发展方向进行了预测, 旨在为配电网规划提供坚实的决策依据以及实操指南。

关 键 词 : 配电网规划; 电力负荷预测; 预测方法; 数据分析

Research on Power Load Forecasting Based on Distribution Network

Zhang Weijie, Sun Youheng, Yan Kang

State Grid Baofeng County Power Supply Company, Baofeng, Henan 467400

Abstract : The construction of new power system is an important means to promote the transformation and development of modern power system and realize the two-carbon goal. The penetration rate of new energy in the new power system is constantly increasing, the consumption pressure of the transmission and distribution networks continues to increase, and the balance of the power system is facing great challenges. Therefore, accurate load forecasting results are crucial to optimizing the balance between power supply and demand and improving the efficiency of energy utilization, and its accuracy has a profound impact on the stability of the power grid, operation economy and long-term planning. In this paper, the power load forecasting technology under the distribution network environment is deeply explored, and the basic principles and common forecasting methods are systematically analyzed, and objectively evaluate the advantages and disadvantages of various methods by using detailed data charts. In addition, the paper also examines the challenges facing the current load forecasting, and predicts its future development direction, aiming to provide a solid decision-making basis and practical guide for the distribution network planning.

Keywords : distribution network planning; power load forecasting; prediction method; data analysis

电力作为现代社会运转的动脉, 对国家经济的持续发展和民众生活质量的提升起着至关重要的作用, 随着工业化和城市化的迅猛推进, 电力需求呈现出持续增长的态势。配电网这一电力传输的终端环节, 其规划的前瞻性和科学性对于满足不断增长的电力需求至关重要, 在这其中, 电力负荷预测扮演着举足轻重的角色, 不仅是确保电网稳定运行的关键因素, 更是实现电力资源高效分配、提升经济效益的重要环节。本文将从专业角度出发, 深入探讨电力负荷预测的技术原理、应用方法及其面临的挑战, 以期为配电网规划提供更为科学、精准的指导。

一、基于配电网的电力负荷预测概述

(一) 电力负荷预测的概念

电力负荷预测是电力系统运营中的关键环节, 其本质是利用科学的方法和技术手段, 对未来一段时间内的电力需求进行合理预测, 这一预测过程绝非简单的猜测, 而是基于电力系统运行的内在规律、外部环境的动态变化以及社会经济因素的影响, 通过运用复杂的数学模型和算法来实现的。精准的电力负荷预测对于

电力部门的运营决策至关重要, 能帮电力企业优化资源配置, 提高运营效率, 为保障电网的稳定运行提供数据支持。通过电力负荷预测, 电网运营者能够提前了解到电力需求的变化趋势, 及时调整发电和输电计划, 确保电力供应的稳定性和可靠性。精准的负荷预测还有助于电力企业制定合理的电价策略, 引导用户错峰用电, 降低系统负荷峰值, 提高电力系统的整体效能, 从长远来看, 电力负荷预测的准确性直接关系到智能电网的建设进程和能源互联网的未来发展。

（二）电力负荷预测的基本原理

电力负荷预测的基本原理包括可知性、可能性、连续性和相似性四大原则，共同构成电力负荷预测的理论基础，为预测工作的准确性与可靠性提供了有力保障。可知性原理强调数据信息的可获取性与真实性，进行电力负荷预测时，必须确保所使用的数据能够真实反映电力需求的实际情况，要求人们在收集和处理数据时，遵循科学的方法和严谨的态度，确保数据的准确性与可靠性，基于这些数据做出精准预测。

由于电力负荷受到多种不确定性因素的影响，因此预测结果并非绝对确定，进行预测时，要给出具体的预测数值，对预测结果的可能变化范围和概率分布进行合理分析，全面了解未来电力需求的可能情况，为决策提供更全面的数据支持^[1]。

连续性原理强调电力负荷变化的连续性，电力负荷并非孤立存在，而是受到时间、季节、经济周期等多种因素的共同影响，进行电力负荷预测时，必须考虑这些因素的连续性变化，确保预测结果的平稳过渡和连贯性，更好地把握电力负荷的整体变化趋势，为电力系统的稳定运行提供有力保障。相似性原理鼓励人们寻找并利用电力负荷变化的模式和趋势，在相似的外部条件下，电力负荷的变化往往呈现出相似的特征，通过类比和推理，可以利用这些模式和趋势来提高预测的准确性，进行电力负荷预测时，注重对历史数据的挖掘和分析，发现其中规律与趋势，为未来的预测工作提供有力依据^[2]。

二、基于配电网的电力负荷预测存在的问题

（一）数据获取与处理难度增加

随着智能电网技术的不断进步，面临的电力负荷数据呈现爆炸式增长，数据的海量性、高维度和复杂性日益凸显，虽然这些数据为负荷预测提供了更多维度的参考，但同时也带来了巨大的处理难题。海量数据要求我们必须拥有更强大的数据储存和计算能力，数据的多维性和复杂性则对数据清洗、数据转换及整合技术提出了更高的要求，对数据处理与分析能力构成了严峻的挑战，如何高效、准确地从这些数据中提取有价值的信息，成为当前亟待解决的问题^[3]。

（二）预测精度与实时性要求提高

电力市场的竞争日益激烈，对电力负荷预测的精度和实时性要求也越来越高，精准的预测是电力调度和市场交易的重要依据，预测的实时性则直接关系到电力部门对市场变化的响应速度，但要同时满足这两个条件并不容易。高精度的预测需要依托更先进的模型和算法，以及质量更高的数据支撑；实时性的提高，要求预测系统必须拥有更强的计算能力以及更高效的数据处理流程。这两方面的需求，给电力负荷预测工作带来了巨大的技术压力^[4]。

（三）不确定性因素增多

电力负荷预测受电力系统内部运行特性与外部环境因素的共同影响。全球经济的发展、政策的不断调整，以及气候变化的加剧，都使得影响负荷预测的不确定性因素越来越多。比如，经济

活动的变化会直接影响电力需求，政策的调整可能会引发电力消费结构和模式的改变，而气候变化导致的极端天气也会对电力负荷产生显著影响。这些不确定性因素的增加，进一步加大了电力负荷预测的难度和复杂性，如何在这样的背景下，依然保持预测的准确性和实时性，是当前面临的重要课题^[5]。

三、基于配电网的电力负荷预测方法

（一）传统预测方法

1. 单耗法

单耗法这一直观的电力负荷预测技术，其核心理念是通过具体产品或行业的单位电力消耗来估算整体电力需求，举例来说，如果某地区的钢铁制造业每生产一吨钢铁需要消耗2000千瓦时（kWh）的电，那么，在预计该地区钢铁年产量将达到100万吨的情况下，可以推算出该行业整年的电力需求会高达20亿千瓦时。在产业结构相对单一、电力消耗模式较为稳定的区域或行业内，单耗法表现得尤为出色，该方法操作简便，数据收集难度较低，且能迅速产出预测结果，但不可忽视的是，也存在一定限制。单位耗电量的数据必须精确无误，否则预测结果的准确性将大打折扣；在产业结构复杂、发展多元化的地区，单耗法的预测精度可能会受到影响。

为提升预测的准确度，可以通过对比和分析历史数据与实时数据，不断调整和优化单位耗电量的数值，也可考虑将单耗法与其他预测技术相结合，构建更为综合的预测模型，以更好地应对多元化发展所带来的挑战^[6]。

2. 弹性系数法

弹性系数法是从宏观经济视角出发，深入探究电力消费增长率与国民经济增长率之间的内在联系，通过计算这两者之间的比率，也就是电力弹性系数，预测电力需求的未来走势。如果某个地区过去五年的电力弹性系数稳定在0.8，意味着电力消费的增长速度是国民经济增长速度的80%，预计未来国民经济增长率为5%的情况下，可以估算出电力消费的增长率大约为4%。

这一方法的优势在于它能从宏观层面洞察电力需求的变化趋势，特别适用于经济发展较为稳定的地区，但确定弹性系数并非易事，因为它受到多种复杂因素的影响，包括但不限于产业结构、能源政策以及技术进步等，这些因素的任何变化都可能导致弹性系数的波动，影响预测的精确性。

为提高弹性系数法的预测效果，需要密切关注这些影响因素的动态变化，并及时对弹性系数进行相应的调整，还可结合其他重要的经济指标和行业数据，构建更为精细复杂的预测模型，准确捕捉电力需求变化规律^[7]。

（二）现代预测方法

1. 时间序列法

时间序列法在电力负荷预测中占据着举足轻重的地位，主要是通过分析历史电力负荷数据的时间序列特性，建立数学模型来预测未来的负荷情况。时间序列数据，即按时间顺序排列的数据，通常反映了某一现象随时间变化的情况，电力负荷预测中，

这些数据可能包括每小时、每天或每周的电力消费量。该方法能够精确地捕捉到电力负荷的周期性变化，如日周期、周周期和季节性周期，因此在短期和中期负荷预测中表现出众，通过对过去一年的每小时电力负荷数据进行分析，时间序列法可以揭示出每天下午6点至8点电力负荷达到高峰的规律，准确预测未来这一时段的电力需求。

然而，时间序列法在长期负荷预测中可能会受到挑战，由于政策调整、市场变化、技术进步等不确定性因素的影响，长期预测的难度较大，这些因素可能导致电力负荷模式发生根本性变化，降低预测准确性。为提高预测的精确度，研究人员正在不断探索新的时间序列模型和算法，例如，ARIMA（自回归整合移动平均模型）和 SARIMA（季节性自回归整合移动平均模型）等高级模型，能更好地适应电力负荷数据的复杂性与非线性特性，提高预测准确度^[9]。

2. 神经网络法

神经网络法近年来在电力负荷预测中越来越受到重视，利用人工智能技术，通过构建复杂的神经网络模型来模拟人脑的学习与决策过程，这些模型能够自动识别与提取历史负荷数据中的关键特征，对未来电力负荷进行准确预测。神经网络法的优势在于其强大的自适应能力和非线性处理能力，处理复杂、非线性的电力负荷数据，并自动调整模型参数以适应数据的变化，在处理具有高度不确定性和复杂性的负荷预测问题时表现出色。

以深度学习中的长短期记忆网络（LSTM）为例，该模型能够捕获序列数据中的长期依赖关系，非常适合处理具有时间序列特性的电力负荷数据，通过训练大量的历史数据，LSTM模型可以精确地预测出未来一段时间内的电力负荷情况。然而，神经网络

的预测效果也受到多种因素的影响。模型结构的选择、训练算法的优化以及训练数据的质量和数量等都会对预测结果产生影响，为获得更准确的预测结果，研究人员需要不断探索优化神经网络模型的各个方面^[9]。

（三）组合预测方法

电力负荷预测领域，组合预测方法以其独特的整合策略，显著提升了预测精准度与稳定性，成为行业内的高级预测策略，这种方法的精髓在于，并非单一地依赖某一种预测手段，而是将多种预测方法的结果进行有机融合，以此最大化发挥各种方法的优势，有效规避单一方法可能导致的预测偏差或风险。实施组合预测时，通常会先运用诸如时间序列分析、神经网络模型等多种预测技术来进行初步预测，时间序列分析在捕捉电力负荷的周期性变动方面表现出色，神经网络则在处理错综复杂的非线性模式时具有显著优势，完成初步预测后，根据每种方法过往的预测准确率和特性，会为其分配相应的权重，这些权重实际上反映了在组合预测中，每种方法所占据的重要性与影响力^[10]。

四、结束语

电力负荷预测是配电网规划的基石，其重要性不言自明，本文经深入研究和数据分析，细致剖析了多种预测方法的优势与局限，及其适用的具体情境。面对电力系统日趋复杂、预测要求不断提高的现状，必须不断创新、精进预测技术，以确保配电网规划决策的科学性和有效性，推动跨学科的合作与交流，是实现电力负荷预测持续进步不可或缺的环节。

参考文献

[1] 白星振, 赵康, 葛磊蛟, 等. 基于 EWT-GRU-RR 的配电网短期电力负荷预测模型 [J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2023, 42(5): 77-87.
[2] 王立威, 张启龙. 基于 BP 神经网络的区域配电网短期电力负荷预测 [J]. 电子制作, 2021, (1): 49-51.
[3] 朱亮, 张宁, 李妍. 基于智能算法的配电网负荷预测和扩展规划研究 [J]. 微型计算机, 2024(6): 37-39.
[4] 廖永钜. 配电网规划中电力负荷预测方法研究综述 [J]. 电子乐园, 2019(18): 120.
[5] 王丹豪. 基于配电网运维管控平台的电力负荷预测研究 [D]. 上海电力大学, 2020.
[6] 贾鹏飞. 配电网规划中电力负荷预测的关键问题分析 [J]. 电脑爱好者 (校园版), 2023: 242-244.
[7] 张道路. 基于深度学习和集成学习的配电网中期负荷预测研究 [D]. 华南理工大学, 2022.
[8] 左植铭. 探析电力公司配电网规划中的负荷预测 [J]. 电力设备管理, 2024(13): 23-25.
[9] 罗恩博, 苏适, 张旭东, 等. 基于电力负荷预测的高压配电网变电站规划研究 [J]. 电气自动化, 2021(005): 043.
[10] 刘航. 基于大数据分析的配电网负荷预测 [D]. 河南科技大学, 2022.

火电企业二氧化碳捕集与封存的技术经济评估

朱雪峰

新疆油田新能源有限责任公司，新疆 克拉玛依 834000

摘 要： 在全球积极应对气候变化、大力推进碳减排的时代背景下，火电企业的二氧化碳捕集与封存（CCS）技术备受关注。本文深入聚焦这一领域，对 CCS 技术进行全面且深入的剖析。不仅详细探讨了诸如化学吸收法、物理吸附法等关键捕集技术，还深入研究了运输及封存环节的核心要点。同时，精心构建了精准的成本与收益评估模型，综合考虑设备购置、运营维护、碳交易收益等多方面因素。在此基础上，开展了严谨的敏感性分析，明确了火电企业 CCS 的技术经济特性以及各类影响因素。这一系列研究成果，能够为火电企业 CCS 项目的科学决策提供有力依据，也为整个行业的可持续发展贡献关键参考。

关 键 词： 火电企业；二氧化碳捕集与封存；技术经济评估

Technical and Economic Assessment of Carbon Dioxide Capture and Storage in Thermal Power Enterprises

Zhu Xuefeng

Xinjiang Oilfield New Energy Co., Ltd. Karamay, Xinjiang 834000

Abstract： In the context of the global active response to climate change and vigorously promoting carbon emission reduction, the carbon dioxide capture and storage (CCS) technology of thermal power enterprises has attracted much attention. This paper focuses deeply on this field and makes a comprehensive and in-depth analysis of CCS technology. Not only are the key capture technologies such as chemical absorption method and physical adsorption method discussed in detail, but also the core points of transportation and storage were studied in depth. At the same time, an accurate cost and benefit evaluation model is carefully constructed, comprehensively considering various factors such as equipment purchase, operation and maintenance, carbon trading income and so on. On this basis, a rigorous sensitivity analysis was carried out, and the technical and economic characteristics and various influencing factors of CCS in thermal power enterprises were clarified. This series of research results can provide a strong basis for the scientific decision-making of CCS projects of thermal power enterprises, and also contribute a key reference for the sustainable development of the whole industry.

Keywords： thermal power enterprises; carbon dioxide capture and storage; technical and economic evaluation

一、二氧化碳捕集技术及成本分析

（一）化学吸收法

化学吸收法利用特定化学溶剂与 CO₂ 发生可逆化学反应实现捕集。以常用的醇胺类溶剂单乙醇胺（MEA）为例，其与 CO₂ 反应如下： $2\text{MEA} + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{MEA}_2\text{CO}_3$ 。在吸收塔中，含有 CO₂ 的烟气与 MEA 溶液逆流接触，CO₂ 被吸收。随后富液进入再生塔，通过加热使反应逆向进行，释放出高纯度 CO₂，MEA 溶液得以再生循环利用。

该方法具有极高的 CO₂ 捕集效率，通常可达 90% 以上，能产出高纯度 CO₂ 产品气。但显著缺点是能耗高，再生溶剂需消耗大量蒸汽，导致运行成本大幅增加。据实际项目数据，某 300MW 火电项目采用 MEA 化学吸收法捕集 CO₂，吨 CO₂ 捕集成本中

蒸汽消耗成本约占 40%，设备投资成本占比约 30%，其他如溶剂损耗、人工等成本占 30%。设备投资成本主要集中在吸收塔、再生塔及相关附属设备，因化学溶剂具有腐蚀性，对设备材质要求高，进一步提高了投资成本^[1]。

（二）物理吸收法

物理吸收法基于物理溶剂在不同压力和温度下对 CO₂ 溶解度的差异实现捕集。例如聚乙二醇二甲醚（Selexol）溶剂，在高压低温条件下，CO₂ 溶解度增大，在吸收塔中与烟气接触实现吸收；在低压高温的再生塔中，CO₂ 解吸出来。

物理吸收法在处理高浓度 CO₂ 烟气时优势明显，能耗相对较低，对设备腐蚀性小，设备投资成本相对化学吸收法更低。然而，其对 CO₂ 吸收选择性欠佳，吸收过程中可能同时吸收其他气体，致使产品气纯度相对不高。在某实际项目中，采用物理吸

收法处理 CO₂浓度为15%的烟气，吨 CO₂捕集成本中能耗成本约占30%，设备投资成本占比约25%，溶剂补充及其他成本占45%。与化学吸收法相比，在相同规模项目中，设备投资成本可降低约20% - 30%。

（三）吸附法

吸附法利用固体吸附剂对 CO₂的吸附作用进行捕集，吸附剂分物理和化学吸附剂。以分子筛这一物理吸附剂为例，其均匀微孔结构依据分子大小和形状对 CO₂产生吸附选择性，CO₂分子因直径小能进入微孔被吸附。吸附过程中，含 CO₂烟气通过吸附床层被吸附，吸附饱和后，通过升温、降压等方式脱附释放 CO₂。

吸附法设备简单、操作灵活，对低浓度 CO₂烟气捕集效果好，吸附剂可再生循环使用，一定程度降低运行成本。但吸附容量有限，需频繁再生吸附剂，且吸附和解吸多为间歇式，不利于大规模连续化生产。在某小型火电项目中应用吸附法捕集 CO₂，吨 CO₂捕集成本中吸附剂再生能耗成本约占45%，设备投资成本占比约20%，吸附剂更换及其他成本占35%。由于吸附设备相对简单，设备投资成本低于化学吸收法和物理吸收法，但频繁再生导致能耗成本较高^[2]。

（四）膜分离法

膜分离法依靠特殊膜材料对不同气体分子渗透速率的差异来分离 CO₂。有机膜如聚酰亚胺膜和无机膜如陶瓷膜是常见类型。在膜两侧压力差驱动下，CO₂分子因较小尺寸和较高扩散系数优先透过膜实现分离。

该方法设备紧凑、占地面积小、操作简单、能耗低，分离过程无相变，环境友好。但膜材料成本高，使用寿命有限需定期更换，增加运行成本，且膜分离性能易受气体组成、温度、压力等因素影响。在某示范项目中，采用膜分离法捕集 CO₂，吨 CO₂捕集成本中膜材料更换成本约占50%，设备投资成本占比约25%，能耗及其他成本占25%。随着膜材料技术发展，成本有望降低，但目前仍是制约其大规模应用的关键因素^[3]。

二、二氧化碳运输技术及成本分析

（一）管道运输

管道运输是将捕集的 CO₂通过专门铺设的管道输送至封存地点。其优点是运输量大、连续性强、运输成本相对较低且安全性高。管道建设成本主要包括管道材料采购、铺设施工、沿线加压站建设等费用。管道材料需具备良好的耐腐蚀性和耐压性，以适应 CO₂的特性。在长距离运输中，每隔一定距离需设置加压站，以维持 CO₂的流动压力。

据相关数据，建设一条管径为600mm、长度为100km的 CO₂输送管道，投资成本约为3 - 5亿元。运行成本主要包括电力消耗、设备维护、人员管理等费用，以输送压力为10MPa、年输送量为100万吨 CO₂的管道为例，年运行成本约为1000 - 1500万元。随着输送距离增加和输送量增大，单位运输成本会有所降低。

（二）罐车运输

罐车运输利用专门设计的罐式运输车辆将 CO₂从捕集地运往封存地。罐车运输灵活性强，适用于运输距离较短、运输量相对较小的场景。罐车购置成本较高，需配备特殊的隔热、耐压和密封装置，以确保 CO₂在运输过程中的安全性和稳定性。

每次运输还需考虑装卸费用、车辆损耗、燃油消耗以及司机人工成本等。以一辆载重为30吨的 CO₂罐车为例，往返运输距离为200km，单次运输成本约为5000 - 8000元，折合吨 CO₂运输成本约为167 - 267元。与管道运输相比，罐车运输单位成本较高，但在一些特殊情况下，如项目初期运输量不稳定或距离较近时，具有一定优势。

三、二氧化碳封存技术及成本分析

（一）地质封存

1. 枯竭油气藏封存

枯竭油气藏封存是将 CO₂注入已开采殆尽的油气藏中。由于油气藏经过长期开采，内部形成大量可供储存 CO₂的孔隙空间。注入的 CO₂首先占据孔隙，通过物理吸附和溶解等作用实现封存。部分 CO₂还可能与岩石矿物发生化学反应，形成更稳定的碳酸盐矿物，增强封存稳定性。

该方法技术相对成熟，可利用现有的油气开采基础设施，如井口、管道、监测设备等，从而降低部分封存成本。但在实施前，需对枯竭油气藏进行详细的地质勘探和评估，确定其储存容量、密封性和安全性。勘探成本包括地质调查、地球物理勘探、钻井取芯等费用，一般一个中等规模的枯竭油气藏勘探成本约为500 - 1000万元。注入成本主要包括注入设备购置、安装和运行费用，以及后续的监测和维护费用。以某枯竭油气藏封存项目为例，年注入量为50万吨 CO₂，年注入成本约为1500 - 2000万元。

2. 深部咸水层封存

深部咸水层分布广泛，储存容量巨大，是极具潜力的 CO₂封存场所。CO₂以气态或超临界态存在于咸水层孔隙中，部分溶解于咸水，随时间推移与岩石矿物发生反应。

然而，深部咸水层封存对长期安全性和环境影响的研究尚不完善。在实施前，需进行大规模的地质勘探，确定咸水层的地质构造、渗透率、孔隙度、流体性质等参数，勘探成本较高，一般一个大型深部咸水层勘探项目成本可达1000 - 3000万元。注入过程中，需建设专门的注入井和相关配套设施，注入成本相对较高。同时，为确保长期安全性，需建立全面的监测体系，监测 CO₂的运移、储存状态以及对周边环境的影响，监测成本也是不可忽视的一部分。以某深部咸水层封存项目为例，年注入量为80万吨 CO₂，年注入成本约为2500 - 3500万元，年监测成本约为500 - 800万元。

（二）海洋封存

海洋封存是将 CO₂直接注入海洋水体，分表层海水注入和深海注入。表层海水注入后，CO₂通过海水混合和生物地球化学循环向深层扩散；深海注入利用深海低温高压环境，增大 CO₂溶解度，实现长期储存。

海洋封存虽理论储存容量巨大，但对海洋生态系统潜在影响存在争议。CO₂注入可能导致海水酸化，影响海洋生物生长、繁殖和

生存，破坏海洋食物链和生态平衡。其运输和注入成本较高，需配备专门的船舶运输设备和深海注入装置。以某海洋封存试验项目为例，将 CO₂ 运输至距离海岸 100km 的海域进行深海注入，年运输和注入成本约为 3000 - 5000 万元（按年注入量 50 万吨计算）。此外，由于海洋封存技术尚处于研究和试验阶段，相关技术标准和规范不完善，增加了项目实施的不确定性和风险成本。

四、火电企业 CCS 项目收益分析

（一）碳交易市场收益

在碳交易市场中，火电企业实施 CCS 技术减排 CO₂，可将减排量换算为碳排放配额。若企业实际排放量低于配额，可将剩余配额在市场出售获取收益；反之则需购买配额。碳交易价格受市场供需关系、政策法规、经济形势等多种因素影响。

以某参与碳交易的火电企业为例，其实施 CCS 项目后，年减排 CO₂ 量为 20 万吨。在碳交易价格为 50 元 / 吨时，该企业通过出售配额可获得年收益 1000 万元。若碳交易价格上涨至 80 元 / 吨，年收益则增加至 1600 万元。但碳交易价格波动较大，如在某些市场环境下，价格可能降至 30 元 / 吨，此时企业收益仅为 600 万元，这对 CCS 项目收益稳定性产生较大影响。

（二）政策补贴收益

为推动 CCS 技术发展，政府通常会给予实施项目的火电企业一定政策补贴。补贴形式多样，包括投资补贴、运营补贴、减排量补贴等。投资补贴一般在项目建设初期发放，按项目投资总额一定比例给予补助，可有效缓解企业资金压力，降低初始投资成本。运营补贴则根据项目运行情况，每年给予一定补贴，用于弥补运营成本。减排量补贴按企业实际减排 CO₂ 量给予补贴。

某火电企业 CCS 项目获得政府投资补贴 2000 万元，运营补贴每年 300 万元，减排量补贴为 20 元 / 吨。该项目年减排 CO₂ 量为 15 万吨，仅减排量补贴一项年收益为 300 万元，加上运营补贴，年政策补贴总收益为 600 万元。政策补贴在一定程度上提高了 CCS 项目的经济效益和吸引力，但补贴政策的持续性和补贴力度因地区和政策调整而异。

五、敏感性分析

（一）关键因素选取

选取碳交易价格、政策补贴额度、能源价格、设备投资成本作为敏感性分析的关键因素。碳交易价格直接影响项目减排收

益；政策补贴额度对项目整体收益有重要作用；能源价格在捕集、运输和封存过程中影响能耗成本；设备投资成本是项目初始投资的重要组成部分。

（二）分析方法及结果

采用单因素敏感性分析方法，每次仅改变一个因素取值，其他因素保持不变，计算项目净现值（NPV）和内部收益率（IRR）的变化情况。

当碳交易价格在 $\pm 30\%$ 范围内变动时，若价格上涨 30%，某 CCS 项目 NPV 增加约 45%，IRR 提高约 8 个百分点；若价格下跌 30%，NPV 减少约 55%，IRR 降低约 10 个百分点，表明碳交易价格对项目经济性影响显著。政策补贴额度变动 $\pm 30\%$ 时，补贴额度增加 30%，NPV 增加约 30%，IRR 提高约 5 个百分点；补贴额度减少 30%，NPV 减少约 35%，IRR 降低约 6 个百分点，说明政策补贴对项目收益也有较大影响。能源价格上涨 30%，项目运营成本增加，NPV 减少约 40%，IRR 降低约 7 个百分点；能源价格下跌 30%，NPV 增加约 35%，IRR 提高约 6 个百分点，显示能源价格对项目经济性影响较大。设备投资成本增加 30%，NPV 减少约 25%，IRR 降低约 4 个百分点；设备投资成本减少 30%，NPV 增加约 30%，IRR 提高约 5 个百分点，表明设备投资成本对项目经济性有一定影响，但相对前三个因素影响程度稍低。

六、结语

通过对火电企业二氧化碳捕集与封存技术经济的全面评估可知，当前 CCS 技术在火电企业应用中，技术层面各环节已取得一定进展，但仍面临诸多挑战，如捕集技术的高能耗和高成本问题、封存技术的长期安全性和环境影响不确定性等。经济层面，CCS 项目成本较高，收益受碳交易价格、政策补贴等因素影响波动较大，整体经济性欠佳。

然而，随着技术持续创新发展，如新型捕集材料和工艺研发、封存技术监测与评估体系完善，有望降低成本并提高安全性。同时，碳交易市场逐步成熟和政策支持力度加大，将改善项目收益状况。未来，火电企业 CCS 技术若要实现大规模商业化应用，需政府、企业和科研机构协同合作，加大研发投入，完善政策法规和市场机制，以推动 CCS 技术在火电行业的广泛应用，助力全球碳减排目标达成。

参考文献

- [1] 吴滇宁, 卢佳, 李刚, 等. 清洁能源占比高的电力市场环境下火电辅助服务补偿方法 [J]. 南方电网技术, 2018, 12(12): 78-85.
- [2] 姜立宝. 电力市场新形势下火电企业营销策略探索 [J]. 企业管理, 2017, (S2): 366-367.
- [3] 袁岑颀, 戴敏敏, 周旭, 等. 电力市场环境下火电机组调频性能提升研究 [J]. 浙江电力, 2022, 41(06): 84-91.

用电工程中需求响应策略的优化与经济效益分析

郭汉臣

国网河北省电力有限公司保定供电分公司, 河北 保定 071000

摘要： 由于近些年来全球能源危机的加剧和环境保护意识的提升，优化电力资源的使用效率，已成为全球性的挑战。需求响应策略通过调整用户的电力消费行为，可以有效缓解电网负荷的峰谷差，同时增强清洁能源的利用率。针对于此本文首先对用电工程中需求响应策略经济效益进行分析，随后说明了用电工程中需求相应策略优化的重要性，并针对实际优化中存在的问题，提出了对应的解决方法，期望能为用电工程中需求相应效果提升提供帮助。

关键词： 用电工程；需求响应；策略优化；经济效益

Optimization and Economic Benefit Analysis of Demand Response Strategies in Power Engineering

Guo Hanchen

State Grid Hebei Electric Power Company, Baoding Power Supply Branch, Baoding, Hebei 071000

Abstract： Due to the intensification of the global energy crisis and enhancement of environmental awareness in recent years, optimizing the efficiency of power resource usage has become a global challenge. Demand response strategies can effectively alleviate the peak-valley difference of grid load by adjusting the power consumption behavior of users, while enhancing the utilization rate of clean energy. In view of this, this paper first analyzes the economic benefits of response strategies in power engineering, then explains the importance of optimizing demand response strategies in power engineering, and proposes corresponding solutions to the problems existing in actual optimization, hoping to help for the improvement of demand response effects in power engineering.

Keywords： power engineering; demand response; strategy optimization; economic benefits

引言

在当前的电力市场环境下，需求响应策略的实施不仅能够帮助电力公司更好地管理电网负荷，还能激励用户参与到节能减排的实践中来。然而需求响应策略的优化并非易事，它需要综合考虑用户行为、市场机制、技术手段以及政策法规等多方面因素。在实际操作中，可能会遇到用户参与度不高、激励机制不完善、技术平台不成熟等问题。

一、用电工程中需求响应策略经济效益分析

(一) 经济效益评估指标

在用电工程中的运行当中，需求响应策略的经济效益评估指标是衡量其经济可行性和效率的关键因素。如今的评估标准之下，这些指标包括成本节约、投资回报率、能源使用效率、电力价格波动的影响、以及对电网稳定性的贡献等。具体而言其中的成本节约，是指通过实施需求响应策略，用户能够在电力消费上实现的直接经济节省，这就要包括减少高峰时段的电力购买成本和可能的需量电费。而投资回报率是衡量需求响应项目投资效益的重要指标，它通过计算项目带来的总收益与总成本的比率来评估项目的经济效益。能源使用效率则关注需求响应策略如何帮助

用户更合理地使用电力资源，减少浪费，提高整体能源利用效率。电力价格波动的影响评估则关注需求响应策略在不同电价水平下的经济表现，以确保在电价波动时仍能保持经济效益。最后对电网稳定性的贡献是评估需求响应策略在缓解电网负荷、降低停电风险以及提高供电可靠性方面的价值^[1]。

(二) 需求响应对电力市场的影响

针对于当下的电力市场现状而言，用电工程中需求响应策略的经济效益分析显得尤为重要。需求响应是指通过激励措施或价格信号，引导用户在特定时间内改变其电力消费行为，从而影响电力系统的负荷曲线。这种策略不仅能够提高电力系统的运行效率，还能在一定程度上缓解电力供应紧张的状况。当下需求响应对于电力市场的影响是多方面的。企业电力工程中的需求及时响

应之下，往往能够有效缓解高峰时段的电力供应压力。例如在用电高峰时段，电力需求量激增，而发电能力可能无法及时跟上需求增长的速度，导致电力供应紧张。通过需求响应策略，可以激励用户在高峰时段减少用电量，或者将用电时间调整到非高峰时段，从而降低高峰负荷，保证电力系统的稳定运行^[2]。

二、用电工程中需求响应策略优化的重要性

（一）提高能源效率与成本节约

在现代用电工程中，需求响应策略的优化不仅关乎电网的稳定运行，还对提高能源效率和实现成本节约具有深远的意义。所以电力企业可以通过精细化管理电力需求，去进一步减少高峰时段的电力消耗，以此来科学合理的降低对昂贵的峰值发电能力的依赖。在当前的市场环境之下，这种策略的实施，可以使得电力资源得到更加合理的分配和使用，从而避免了资源的浪费和不必要的能源成本支出。除此之外需求响应策略优化还能促进可再生能源的利用，企业通过智能调度，则可以将风能、太阳能等间歇性能源更有效地融入电网，进一步提高整体能源利用效率。在经济层面成本节约不仅体现在电力消费的直接减少上，还体现在对电网基础设施投资的优化上。通过需求响应，可以推迟或减少对电网升级和扩建的需求，从而节省大量资本支出^[3]。

（二）增强电网稳定性和可靠性

在增强电网稳定性与可靠性这一层面，优化需求响应策略同样至关重要。这是因为近些年来社会对于电力需求不断增加的背景之下，使得企业所面临的电力负荷的不断增长，电网的运行环境日益复杂，传统的调控手段已难以满足现代电网的需求。需求响应作为一种有效的负荷管理手段，通过引导用户主动调整用电行为，与电网进行互动，可以有效缓解电网的供需矛盾，提升电网的稳定性和可靠性。需求响应策略的优化，能够更精准地匹配电网的实际需求。通过对历史负荷数据、天气预报、节假日因素等多维度信息的综合分析，可以预测出未来的负荷变化趋势，制定出更加科学合理的需求响应计划。这样不仅可以减少电网的备用容量需求，降低运行成本，还能在负荷高峰时段有效削减峰值负荷，减轻电网压力，避免局部过载和停电事故的发生。

（三）促进可再生能源的整合与利用

对于可再生能源而言，用电工程中需求响应策略优化的重要性不容忽视。随着全球能源结构的转型，可再生能源如风能、太阳能等的比重逐渐增加。然而这些能源的供应具有间歇性和不确定性，因此如何有效地整合和利用这些可再生能源，成为电力系统面临的一大挑战。而需求响应策略优化在促进可再生能源整合与利用方面发挥着至关重要的作用。需求响应是指通过激励措施引导用户在电力供应紧张或过剩时调整其电力消费行为，从而平衡供需关系。通过优化需求响应策略，可以提高电网的灵活性和可调度性，为可再生能源的接入和消纳创造有利条件。在实际的策略优化过程中，通过优化可以缓解可再生能源发电的波动性。由于风能和太阳能发电受天气和时间的影响较大，其发电量往往难以预测和控制。通过需求响应可以在可再生能源发电量高时鼓

励用户增加用电量，而在发电量低时减少用电量，从而减少对传统化石能源发电的依赖，提高整个系统的能源利用效率^[4]。

三、用电工程中需求响应策略优化时的阻碍

（一）数据隐私与安全问题

在用电工程中，需求响应策略的优化往往需要收集和分析大量的用户用电数据，以便更准确地预测和管理电力需求。然而数据隐私与安全问题成为了一个显著的阻碍。这是因为对于用户而言，自身的用电数据属于个人隐私范畴，这些数据一旦泄露，可能会被不法分子利用，对用户的财产安全和人身安全造成威胁。例如不法分子就可以通过分析用户的用电模式，推断出用户的日常活动规律，甚至可能暴露用户的居住习惯和家庭成员信息。其次随着智能电网和物联网技术的发展，越来越多的设备和系统需要联网操作，这无疑增加了数据被黑客攻击的风险。一旦电力系统遭受网络攻击，不仅可能造成大规模的停电事故，还可能影响到国家安全和社会稳定^[5]。

（二）用户参与度不足

用户作为用电工程当中，需求响应策略的直接参与者，其积极性和参与程度直接影响到策略的实施效果。但是当下的用户对需求响应策略的认知不足是现有的一个主要问题。这是因为许多用户对需求响应的概念、目的以及如何参与缺乏足够的了解。他们可能不清楚通过调整自己的用电习惯可以对电网稳定性和能源效率产生积极影响。这种信息不对称导致用户无法充分认识到参与需求响应的长远利益，从而缺乏参与的动力。此外，还存在用户参与需求响应的激励机制不够完善。虽然一些地区和电力公司已经尝试通过经济补偿、电价优惠等方式鼓励用户参与，但有些激励措施往往不够吸引人，或者在实施过程中存在诸多限制条件，使得用户难以感受到实际的经济利益。此外，激励措施的持续性和稳定性也影响用户的参与意愿^[6]。

（三）需求响应策略的实时性与准确性问题

尽管用电工程中需求响应策略的优化对于提高电网运行效率、降低能耗和成本具有重要意义，但在实际操作中，仍面临诸多挑战。其中需求响应策略的实时性与准确性问题尤为突出。其中实时性问题主要体现在需求响应措施的实施速度上。这是因为由于现代电力系统运行所具有的复杂性，杀跌需求响应策略需要在极短的时间内做出反应，以适应电网负荷的快速变化。但是就当下而言，现有的技术手段和管理机制往往难以满足这一要求。例如当电网出现负荷高峰时，需求响应系统需要迅速识别可调节负荷，并向用户发送调节指令。但这一过程涉及到数据采集、传输、处理和决策等多个环节，任何一个环节的延迟都可能导致响应不及时，从而影响整个系统的稳定性和效率。

（四）跨部门协调与合作问题

跨部门协调与合作问题在用电工程中需求响应策略优化时的阻碍尤为显著。由于需求响应策略通常涉及多个部门和利益相关者，包括电力公司、政府监管机构、商业用户、居民用户以及技术供应商等，因此，缺乏有效的沟通和协调机制会直接影响到策

略的实施效果。这是因为在需求相应的过程中，不同部门之间存在信息孤岛现象。由于每个部门都可能拥有关键信息，但这些信息往往没有得到充分共享。例如电力公司可能掌握了电网负荷的实时数据，但政府监管机构可能缺乏这些数据来制定有效的政策。反之政府可能有长期能源规划，但电力公司未必能及时了解并调整其需求响应策略。这种信息不对称导致了决策的不协调，进而影响了需求响应策略的优化^[7]。

四、用电工程中需求响应策略优化实施路径

（一）采用先进的加密技术和安全协议

在用电工程中，需求响应策略的优化实施路径首先需要确保整个系统的安全性和数据的保密性。为此采用先进的加密技术和安全协议是至关重要的。这就要求在具体的实施过程中，企业需要重点对现有的电力系统进行安全评估，确定可能存在的安全隐患和薄弱环节。这包括对数据传输、存储和处理的各个环节进行详细审查，以确保没有安全漏洞。接下来，企业还需要根据实际的用电工程特点，去选择合适的安全技术和协议。例如可以采用高级加密标准（AES）对数据进行加密，确保数据在传输过程中的安全。同时使用安全套接层（SSL）或传输层安全（TLS）协议来保护数据传输过程中的完整性和保密性^[8]。

（二）设计激励机制

针对用户参与度不足的相关问题，设计一个有效的激励机制是关键。激励机制的实施路径需要综合考虑用户的实际需求、行为习惯以及激励的可持续性。首先明确激励目标。激励机制的目的是提高用户的参与度，鼓励用户在用电高峰时段减少用电量，或者在用电低谷时段增加用电量。因此激励目标应具体、可量化，比如降低高峰时段的用电量10%或在低谷时段增加用电量20%。而激励内容的设计时，可以选择是经济奖励，如电费折扣、现金返还、积分奖励等，也可以是非经济奖励，如荣誉称号、优先服务权、环保证书等。经济奖励直接与用户的经济利益挂钩，能迅速提高用户的参与积极性，非经济奖励则满足用户的社交需求和自我实现需求，具有长期的激励效果^[9]。

（三）实时监测电网负荷和用户用电行为

随着智能电网技术的不断发展，实时监测电网负荷和用户用

电行为成为优化需求响应策略的关键步骤。通过部署先进的智能电表和传感器，可以实现对电网负荷的精确测量和实时监控。这些设备能够收集大量数据，包括电压、电流、功率因数等关键指标，为电网运行提供实时反馈。同时用户用电行为的监测则通过智能电表收集的用电数据进行分析，以识别用户的用电模式 and 高峰用电时段。为了确保数据的准确性和实时性，电力企业还需要建立一个稳定可靠的数据通信网络，负责将收集到的数据实时传输到控制中心。数据处理和分析系统将对这些信息进行处理，生成电网负荷和用户用电行为的动态视图。通过这些视图，电力企业可以及时发现潜在的负荷问题，预测用电高峰，并制定相应的响应策略^[10]。

（四）建立跨部门协调机制

为了解决电力工程中需求相应时的跨部门协作相关问题，电力企业则建立一个由各部门代表组成的专项工作小组，通过负责统筹协调需求响应策略的实施。在具体的实施过程中，这个小组应包括电力公司、能源管理部门、大型用电企业以及可能的第三方服务提供商。小组的职责是确保各部门之间的沟通畅通无阻，信息共享及时准确，以及在需求响应事件发生时能够迅速做出决策并执行。其次制定明确的跨部门协作流程和规则，包括信息报告、事件响应、资源调配和事后评估等环节。流程和规则应以书面形式明确下来，确保每个部门都清楚自己的职责和义务。同时应定期进行流程的演练和培训，以提高各部门在实际操作中的熟练度和效率。

五、结语

综上所述，用电工程中需求响应策略的优化是实现电网高效、稳定和可持续发展的关键。通过精细化管理电力需求，可以有效降低高峰时段的电力消耗，减少对昂贵的峰值发电能力的依赖，从而实现成本节约和能源效率的双重提升。同时，需求响应策略的优化对于增强电网的稳定性和可靠性具有重要意义，能够有效缓解电网供需矛盾，避免局部过载和停电事故的发生。所以相信在不远的未来，需求响应策略将更加成熟和完善，为电力系统的现代化和绿色转型提供有力支撑。

参考文献

- [1] 吴限. 数据驱动下基于 MBSE 的电力需求侧响应决策研究 [D]. 辽宁工程技术大学, 2023.DOI: 10.27210/d.cnki.glnju.2023.001203.
- [2] 冯惠绮. 虚拟电厂优化调度及其评价研究 [D]. 广东: 广东工业大学, 2023.
- [3] 张希. 自身不发电, “调配”实现用电最优解 [N]. 南京日报, 2024-08-12(A04).DOI: 10.28601/n.cnki.nnjrb.2024.003317.
- [4] 黄飞, 李永福, 高杨, 等. 基于改进遗传算法的家庭用电调度优化方法 [J]. 计算机科学, 2024, 51(S1): 1169-1174.
- [5] 朱虹, 孟祥娟, 孙健, 等. 用户响应机制下基于长短期记忆网络的负荷聚合商用电模型 [J/OL]. 现代电力, 2024.https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2023.0158.
- [6] 朱善令. 基于用电行为特征的工商业用户需求响应能力分析方法 [D]. 浙江大学, 2024.DOI: 10.27461/d.cnki.gzjdx.2024.000738.
- [7] 智源, 林雪, 姜宁. 浅谈通信运营商用智慧响应的实践 [J]. 江苏通信, 2024, 40(01): 115-118.
- [8] 汤波, 林静涛, 杨鹏, 等. 基于交互式实时电价机制的用电优化研究 [J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(01): 105-114.DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.01.010.
- [9] 王申, 麻超, 吴家敬, 等. 基于负荷响应的地铁施工智能用电控制策略研究 [J]. 中国水运, 2023, 23(24): 56-58.
- [10] 董晓天, 周全, 缪瑞峰, 等. 基于用户画像的企业负荷调峰分组方法 [J]. 安徽电气工程职业技术学院学报, 2023, 28(04): 16-24.

数字化时代电力营销服务模式的转型与升级路径

冷烈, 邹娜

国网湖北省电力有限公司武汉供电公司江岸供电中心, 湖北 武汉 430010

摘 要 : 针对电力营销领域, 在数字化转型的背景下, 本文集中探讨数字化时代下电力营销服务模式的演变及其提升策略。在数字化时代背景下, 电力营销服务展现出智能、定制、高效与数据导向等显著特征。推进转型与升级对于提高客户满意度、强化企业竞争力、顺应市场变迁具有深远的意义。然而, 目前面临的技术实施挑战等问题依然突出。因此, 为推动电力企业在数字化时代转型, 构建创新的营销服务体系, 采取了一系列策略来克服技术挑战。

关 键 词 : 数字化时代; 电力营销服务; 转型与升级; 营销策略

The Transformation and Upgrading Path of Power Marketing Service Model in the Digital Age

Leng Lie, Zou Na

State Gridhan Power Supply Company Jiang'an Power Supply Center, Wuhan, Hubei 430010

Abstract : Focusing on the field of marketing, this paper explores the evolution of power marketing service models in the digital age and their improvement strategies under the background of digital transformation. Under the background of the digital, power marketing services show significant characteristics such as intelligence, customization, efficiency, and data-oriented. Promoting transformation and upgrading is of profound significance for improving customer satisfaction, enterprise competitiveness, and adapting to market changes. However, the problems of technical implementation challenges and other issues are still prominent. Therefore, in order to promote the transformation of enterprises in the digital age and build an innovative marketing service system, a series of strategies have been adopted to overcome technical challenges.

Keywords : digital age; power marketing; transformation and upgrading; marketing strategy

引言

在科技日新月异的时代背景下, 数字化洪流以史无前例的速度横扫全球, 对各行各业的运作方式与发展版图产生了深远的影响。鉴于电力行业在国民经济发展中的支柱性作用, 其正急切地寻求数字化转型以驱动产业升级。传统电力营销服务模式, 在数字化时代面临着显著挑战, 逐步凸显出一系列问题, 已不足以适应客户日益增长的多元化与个性化需求, 以及市场激烈竞争的态势。因此, 深入探索数字化时代下电力营销服务模式的演变与优化途径, 是电力企业在追求持续增长过程中亟需解决的核心问题。此举不仅能够增强电力企业的市场竞争力, 优化客户的服务体验, 还能够促进电力行业的创新进步, 更有效地支撑社会经济的持续发展。

一、数字化时代电力营销服务模式的特点

(一) 智能化

借助大数据、借助先进如人工智能的技术, 电力营销服务得以实现智能化运行。智能电表具备即时收集用户用电信息的功能, 借助数据解析来预估用户用电模式, 以此优化电力资源分配, 从而提升电力供给的稳定性和可信度。举例而言, 通过应用智能化算法, 结合用户的过往用电模式以及当前的实际用电状况, 向用户提供精确的节能指导, 以达到减少能源消耗的目的。

(二) 个性化

在数字化时代背景下, 电力企业能够搜集海量用户数据, 深入探究用户的用电习惯、喜好及其特定需求, 从而为用户提供定制化的电力产品与服务。例如, 针对高能耗企业, 我们提供个性化节能策略与电价计划; 而对于一般居民用户, 则基于其家庭用电习惯, 推荐适宜的智能化用电器材及节能对策。

(三) 高效化

采用数字化技术革新了电力营销服务的流程, 显著提升了工作效能。通过构建线上业务办理平台, 用户得以在无需离家的情

况下完成诸如电费支付、服务请求提交以及故障报告等一系列事务，显著减少了时间投入与体力消耗。此外，自动化业务处理系统减少了人为介入，降低了错误发生概率，提升了业务处理效率。

（四）数据驱动

数据是电力营销服务体系中的关键资源。借助于对庞大用电数据的深入挖掘与细致分析，电力企业能够全面洞察市场趋势、消费者偏好以及自身的运营状态，从而为构建精准且高效的市场营销策略与服务计划奠定坚实的基础。举例而言，借助于剖析用户的用电高峰期与低谷期特征，科学地修订电价政策，以激励用户实施分时用电。

（五）互动性强

数字化平台构筑了电力企业与客户之间的高效交流通道，显著提升了双方的互动参与度。消费者能够借助网络平台提出反馈与建议，电力公司应即时回应并处理顾客事宜，以增进客户满意程度。此外，电力企业亦可通过社交媒体、移动应用程序等渠道，向消费者传达电力相关知识、促销活动等资讯，以增进与消费者的沟通与互动^[1]。

二、数字化时代电力营销服务模式转型与升级的必要性

（一）提升客户满意度

伴随社会的进步，客户的电力服务需求显著提升，不仅追求稳定与可靠的电力供给，还寄望于体验到定制化、高效的优质服务。在数字化时代背景下，电力营销服务模式得以有效应对客户需求，通过实现智能化与个性化服务的融合，迅速回应客户关切，进而提升客户满意水平，强化客户对电力企业的信赖与忠诚。

（二）增强企业竞争力

于数字化时代背景下，市场角逐愈发激烈，电力企业在面对同行及多元能源供应商的同时，承受着显著的竞争压力。通过改革与提升电力营销服务模式，企业能更有效地应对市场波动，增强服务品质与效能，减少运营开支，进而于竞争格局中崭露头角，获取更大的市场占有率。

（三）适应市场变化

电力市场通过改革与开放，显著重塑了其竞争格局。电力供应商的选择日益呈现出多样性，而市场的需求则变得更加复杂且多样化。为了实现可持续发展，电力企业应推进数字化转型，即时洞察市场趋势与客户诉求，适时调整其营销战术与服务架构，以应对市场的变动。

（四）优化资源配置

数字化技术有能力实现电力资源的精确调度与优化分配。通过解析电能使用数据，电力公司能够精确把握消费者用电习惯及负载状态，从而科学制定发电方案与电网运作模式，提升电力资源的使用效益，减少能源浪费，促进资源的高效分配。

（五）推动行业创新

在数字化时代背景下，电力行业迎来了创新与发展的宝贵契机。电力营销服务模式的演变与提升，将激励电力企业与科技企业深化合作，加速新技术、新业务、新模式的创生与实践^[2]。例如，区块链技术在电力交易领域的运用，能够显著提升交易的透明度与安全性；而虚拟现实技术在电力培训中的实践，则能有效增强培训的成效与效率。

（六）促进能源可持续发展

数字化技术有益于促进能源的持续性增长。借助智能能源管理与节能服务，电力企业能够指导用户高效用能，普及节能技术与设施，减少能源使用与碳足迹，推动能源的持续利用，从而在气候变暖挑战中发挥积极作用。

三、数字化时代电力营销服务模式转型与升级的现存问题

（一）技术应用难题

尽管数字化技术为电力营销服务模式的转变与提升提供了强有力的技术支撑，但在其实际操作中，仍遭遇一系列技术挑战。例如，要有效利用大数据分析技术，必须具备充足且高质量的数据资源，然而，当前电力企业所拥有的数据品质存在显著差异，数据的精确度、全面性和一致性难以确保，这直接制约了数据分析的实际效能与应用价值。此外，人工智能技术在电力营销服务领域的应用尚处于起步阶段，其算法的精确度与稳定性仍有待优化，需通过更多的研究与实践来加以提升^[3]。

（二）数据安全隐患

在数字化时代背景下，确保数据安全已成为电力企业所面临的重大课题。电力营销服务涵盖众多用户的个人资料与用电信息，若此类数据不慎外泄，不仅会导致用户遭受重大损失，还可能严重损害电力企业的信誉。当前，电力行业的数据安全保障体系尚显不足，面临数据泄露、篡改与遗失等潜在风险。

（三）人才短缺

在数字化时代背景下，电力营销服务领域亟需兼具电力专业知识与数字化技能的综合性人才。然而，当前电力企业的人员配置存在结构性失衡，特别是在缺乏具备专业知识的数字化人才方面，这阻碍了电力营销服务模式向现代化的转变与提升。此外，电力企业的才培育与吸纳体系尚显欠缺，人才激励策略不力，由此引发了人才流失现象的加剧，进而恶化了人才匮乏的局面。

（四）系统兼容性差

在电力企业推进数字化转型之际，通常会集成多元化的数字化平台与技术工具。然而，由于各系统间的互操作性欠佳，数据流通受阻，业务流程衔接不畅，这严重制约了电力营销服务的效能与品质提升。举例而言，电力营销系统与客户服务系统间的数据不匹配问题阻碍了客户信息的即时更新，从而对客户服务的效能产生了不利影响^[4]。

（五）成本投入压力

电力营销服务体系的转变与优化升级，需巨额资金支持，涵盖数字化技术的创新、实践与持续管理，数据中心的构建与运作，以及专业人才的培育与吸纳等关键环节。对于部分电力企业而言，面临显著的成本负担压力，特别是在当前经济环境下，企业的盈利水平受到影响，资金短缺现象更为显著，这严重阻碍了电力营销服务模式的改革与提升。

四、数字化时代电力营销服务模式转型与升级的策略

（一）攻克技术应用难题

电力企业需强化对数字化技术的研发及应用资金投入，积极与顶级科研机构及著名高校构建持久稳固的合作机制，共建联合

实验室与项目协作平台，聚合各参与方的优质资源，合力解决诸如大数据高效管理、智能电网精确控制等关键技术挑战^[5]。此外，构建并健全一套全面的数据质量管理体系，涵盖数据自采集直至分析的整个流程，通过专业工具及算法对数据进行彻底的清洗与验证，以提升数据品质及其适用性，为大数据分析提供了稳固支撑，并促进了人工智能技术在电力市场营销服务领域的广泛而深入应用。

（二）强化数据安全保障

构建并完善数据安全保障体系已刻不容缓，需对数据生成、应用、传递以及存储的整个流程实施精细化管理。采用国际领先的加密技术，例如 AES（高级加密标准），对关键数据进行加密保护；实施访问控制策略，精确界定各类人员的数据访问资格；配置安全审计机制，实现对数据操作活动的实时监控与追踪。此外，应周期性地安排员工参与数据安全意识培训，采用案例剖析、仿真操练等手段，有效提升员工的数据安全防护意识，以保障数据的安全与隐私不受侵犯。

（三）转变服务理念

电力企业应坚定贯彻以客户服务为核心的战略导向，确保将客户需求作为业务开展的根本依据与终极目标，高度重视客户的使用感受。通过线上客服、通过开展实地访问、发放问卷等多种手段，强化与客户的交流与参与，迅速获取客户的需求与反馈^[6]。依据客户的用电习惯、针对行业的独特属性，旨在提供定制化、全维度的服务。构建高效回应的客户服务体系，确保在设定的时间框架内处理客户投诉与意见，并及时反馈，持续精进服务流程，不懈提升服务品质，以实质举措增强客户满意度。

（四）加强人才培养与引进

精心规划并实施科学化、合理化的人才培养策略，为各类岗位的员工量身定制多层次、多类别的数字化技能培训项目。具体而言，为市场营销人员设计侧重于数据分析与消费者画像构建的课程，为技术研发人员则提供人工智能应用开发的专业训练。此举旨在全方位地提升员工的专业技能及整体素质。此外，应显著增强对数字化人才的吸纳规模，借助优渥的薪酬体系、优质的职场条件以及宽广的职业晋升路径，以吸引一群具备深厚行业经验与专业技艺的数字化精英加盟电力产业^[7]。构建健全的人才激励体系，通过设立创新奖赏、绩效奖励等措施，为人才铺设广阔的发展路径与优渥的福利条件，以维系人才稳定，激活其创新潜能。

（五）提升系统兼容性

强化对数字化系统的规划与整合工作，组建专业团队深入探究各类业务系统的功能特性和体系结构，确立一致的数据规范与

接口准则。举例而言，制定了数据格式规范、编码准则等，以确保数据在各类系统间的统一性和普适性。通过引入前沿的系统整合策略，特别是企业服务总线（ESB）技术的应用，成功实现了电力营销系统、客户服务系统、电网运行管理系统的紧密连接，彻底消除信息壁垒，促进数据流通与业务流程的协作，显著提升了电力营销服务的效能与品质。

（六）创新营销策略

最大化利用数字化平台与技术手段，结合大数据分析工具，深入探索用户数据，全面洞察用户需求与倾向^[8]。根据分析所得结论，我们制定了定制化的营销策略，具体包括向高能耗企业提议实施节能改造计划并提供节能型电价套餐，同时向居民用户推荐绿色用电指南及电费折扣促销活动。此外，为了增强与用户的沟通与互动，策划了一系列线上线下融合的营销策略，包括举办线上直播用电知识讲座以及线下组织用电体验活动，旨在提升用户的参与感和品牌忠诚度^[9]。

（七）合理控制成本

制定科学的成本预算和管控策略，对各项费用进行深入拆分与精确计算，优化成本配置，剔除非必需支出，以精简成本投入。借助云计算技术，实现灵活获取硬件资源，有效削减初始硬件投资；依托大数据分析，精确评估资源应用状况，促进资源共享与高效配置，从而降低数字化平台的构建与运维开支。同时，构建了成本监控及分析机制，周期性产出成本报告，以便即时识别成本管理中的症结，并实施针对性策略予以应对，从而保证电力营销服务模式的改革与优化进程皆在预算成本的约束之下顺利推进^[9]。

五、结语

在数字化时代背景下，电力营销服务模式面临着无与伦比的机遇与挑战，推动其急需实现转型与升级。深入探究数字化时代下电力营销服务模式的独特属性，洞察其变革与优化的迫切性，直面现有挑战并制定切实可行的解决方案，电力企业方能逐步构筑符合数字化时代发展趋势的创新营销服务体系。此举不仅能够有效增强电力企业在市场中的竞争优势与客户满意水平，还为其行业持续健康发展提供了动力源泉，进而更有力地支撑社会经济整体进步。在未来的演进过程中，电力企业应持续跟踪数字化技术的进展动态，不断探索并优化电力营销服务体系，以应对不断演变的市场格局与消费者需求。

参考文献

- [1] 熊瑛. 面向低碳经济的电力营销服务模式创新研究 [C]// 中国电力设备管理协会. 全国绿色数智电力设备技术创新成果展示会论文集（六）. 国网武汉供电公司, 2024: 3.
- [2] 丁小飞. 国网荆门供电公司数字化营销研究 [D]. 兰州理工大学, 2021.
- [3] 徐莹. H 市供电公司大客户服务营销提升策略研究 [D]. 浙江工商大学, 2021.
- [4] 朱英俊. 电力营销业务数字化管理模式分析 [J]. 中国高新技术企业, 2015, (32): 172-173.
- [5] 张成君. 供电企业电力营销业务数字化管理模式 [J]. 科技经济市场, 2015, (08): 43.
- [6] 陆雪峰, 吴言. 基于电力营销大数据的用电客户精确营销 [J]. 电工技术, 2024, (S1): 90-92.
- [7] 张越. 数字化技术在电力营销风险管控中的应用 [J]. 广东经济, 2024, (12): 67-69.
- [8] 孙正天, 冯旖旎. 智能化电力营销与配电网管理系统分析 [J]. 集成电路应用, 2024, 41(06): 292-293. DOI: 10.19339/j.issn.1674-2583.2024.06.134.
- [9] 曹利慧. 智能化与数字化驱动的电力营销转型策略分析 [J]. 电子技术, 2024, 53(05): 390-391.

新能源电力工程中储能技术的应用现状及发展趋势探讨

孙玉龙, 杨兆威

国网湖北省电力有限公司武汉供电公司江岸供电中心, 湖北 武汉 430010

摘 要 : 聚焦新能源电力, 深挖储能技术, 本文深入探究了新能源电力工程中的储能技术, 强调了其在实现能量存储与调控、增强电力系统稳定性方面的关键作用, 并探讨了实施这一技术的迫切需求。文章识别并剖析了当前储能技术面临的挑战, 如高昂的成本和不成熟的技术等问题。同时, 提出了降低成本、促进技术成熟的战略建议, 以期加速储能技术的发展。最后, 本文展望了储能技术在推动新能源电力行业革新与进步中的巨大潜力。

关 键 词 : 新能源电力工程; 储能技术; 应用现状; 发展趋势

Exploration of the Current Status and Development Trends of Energy Storage Technology in New Energy Power Engineering

Sun Yulong, Yang Zhaowei

State Grid Wuhan Power Supply Company Jiang'an Power Supply Center, Wuhan, Hubei 430010

Abstract : For new energy power, this paper deeply explores the energy storage technology in new energy power engineering, emphasizing its crucial role in achieving energy storage and regulation, and enhancing the of power systems. The urgent need for implementing this technology is also discussed. The paper identifies and analyzes the challenges faced by current energy storage technology, such as high costs immature technology. At the same time, strategic suggestions for reducing costs and promoting technological maturity are proposed to accelerate the development of energy storage technology. Finally, this paper prospects great potential of energy storage technology in promoting the innovation and progress of the new energy power industry.

Keywords : new energy power engineering; energy storage technology; current status; trend

引言

在全球大力推动可持续能源战略的背景下, 新能源电力工程项目呈现出蓬勃发展的态势。太阳能、由于其清洁且可再生的特性, 风能等新能源日益受到推崇, 然而, 这些能源固有的间歇性和波动性, 对电力系统的稳定运行构成了显著挑战。储能技术作为核心支柱, 能够有效地解决新能源电力的吸纳与稳定供给难题, 对促进新能源电力产业的发展具有深远的意义。通过深入探讨其应用现状及未来趋势, 有助于改善能源配置体系, 推动能源结构的变革, 以达成能源转型的目标。

一、储能技术的特点

(一) 能量存储与灵活调节

储能系统的精髓之所在, 即为将电能有效转换为其他能量形态进行存储, 而后在必要时刻逆向转换回电能。以抽水蓄能为例, 通过消耗电能将水从低位提升至高位, 于用电高峰期释放水流进行发电, 从而实现电能的空间与时间转换。而电池储能机制, 则依赖化学反应来存储及释放电能, 如广为人知的锂离子电池, 可在用电低谷时段蓄积电能, 并于用电高峰时段释放, 以此灵活调控电力的时间与空间分布, 以适应不同时间段的用电需求。

(二) 增强电力稳定性

新能源发电受到自然条件的影响, 导致其功率输出呈现显著

波动。以风力发电为实例, 由于风速的不确定性引发电功率出现显著波动。储能系统能够即时响应并追踪发电功率的变动, 于功率激增之际高效积累过剩电量, 而在功率急降之时迅速填补缺口, 其作用犹如一个调节器, 成功地使发电曲线趋于平稳, 显著减少了对电网的冲击, 确保电力系统的稳定性, 有效预防了由可再生能源发电波动所导致的供电不稳现象。

(三) 提高能源利用效率

储能技术能够搜集及储存来自新型能源发电过剩或暂未使用之能量, 以防止能源的损耗。在分布式能源架构下, 日间的光伏发电过剩电能能够被储存, 以满足夜间电力需求。以某一分布式能源示范项目为例, 该社区借助储能装置在日间收集过剩的太阳能, 并于夜间释放, 以此优化能源使用效率, 推动能源的有效管

理和持续增长，从而降低能源浪费^[1]。

（四）应用场景多元化

于发电端，储能系统辅助新能源发电保持平稳输出，特别是在太阳能发电遇到阴天覆盖导致光伏板输出功率下滑时，确保持续供电的稳定性。在电网层面，储能则承担着削峰填谷、频率调节以及事故应急备用的角色，以应对用电高峰期和意外断电情况。在用户端，储能设备既可作为家庭的紧急备用电源，也支持电动车充电，以适应多样化的用电场景，显著增强用户的用电满意度与体验。

（五）技术种类丰富

涉及物理储能技术，包括抽水蓄能、压缩空气储能，通过物理状态变化来储存能量；化学储能领域则有锂离子电池、铅酸电池、钠硫电池等，其能量存储基于化学反应过程；此外，电磁储能方式如超级电容器、超导磁储能等也有其独特之处，如超级电容器适用于短时高功率的充放电操作，而抽水蓄能则更适宜于大规模储能应用。各种储能技术各具优势，并在不同的应用场景中展现出其特定的适用范围。

二、新能源电力工程中应用储能技术的必要性

（一）解决新能源发电间歇性难题

太阳能、风力发电的运作基于光照、风速等自然因素，表现出显著的间歇性特征。在日间光照充裕时段，太阳能发电表现活跃，而夜间则因缺乏光照而无发电产出；类似地，风力发电量亦会因风速波动而呈现出时有时无的状态。储能技术在电力供应过剩时存储能量，并在短缺时释放，例如通过电池储能手段，在日间收集太阳能并储存，夜间则释放以维持电力供应的连续性和稳定性，有效应对新能源发电的不稳定性^[2]。

（二）提升电网稳定性

大规模新能源并网导致电网架构趋于复杂，由此可能引发电压振荡与频率偏离等挑战。以某一区域为例，大规模风电并网后，由于风电功率的波动性，引发电网电压的频繁变动，从而对用电设备的正常运作造成影响。储能系统具备迅速调整电网功率的功能，在电压超出正常范围时，能够适时吸收过剩电能或释放储备电能，有效维持电压与频率的稳定性，显著提升电网抵御外界干扰的能力，确保电力系统的安全与稳定运行。

（三）促进能源消纳

某些区域面临新能源发电过量而未能充分利用的情况，例如中国西北地区，尽管其风能和太阳能资源充裕，但由于当地电力消费能力有限，导致产生过剩电力。储能技术具备储存剩余电量的能力，在电力需求高峰时段释放，从而促进能源的合理调配，提升新能源的使用效率，有效减少弃风、弃光情况的发生，将多余的能源存储以备其他时间使用^[3]。

（四）推动分布式能源发展

分布式能源系统的特征为规模较小及分布广泛，由此导致其发电过程缺乏稳定性。类似的小型分布式光伏电站，其输出显著受到气候条件及日照强度的波动影响。储能技术能有效克服发

电过程中的不稳定性，存储过剩电能，并在电力供应短缺时加以应用，从而提升能源自给能力，推动分布式能源在能源体系中的效能释放，确保能源的分散化高效利用。

（五）提升电力系统灵活性

储能技术具备即时充放电特性，能够根据电力供需动态调整，为电力系统的灵活性管理提供关键工具^[4]。于夏季用电高峰期，空调等负载密集运行导致电力需求剧增，此时储能系统能够迅速释放能量以补充电力供应；而在深夜用电低谷时段，则能吸收过剩电能，从而强化系统的负荷调整能力与应变机制，显著提高电力系统的灵活性及适应性^[5]。

三、储能技术在新能源电力工程应用中的现存问题

（一）成本居高不下

储能系统的初始资本投入显著，尤其是锂离子电池储能解决方案，其电池组件费用高昂，钴、锂等稀缺金属的价格起伏剧烈，并伴随较高的开采成本，同时，生产过程技术含量高，包含精细的电极制作与电解液调配等多重工艺步骤。此外，储能系统的运营与维护成本相对高昂，需依赖专业技术团队进行周期性的检查与保养，这不仅阻碍了其广泛普及应用，也让不少企业及用户因成本考量而犹豫不决。

（二）技术成熟度有待提升

某些储能技术目前尚处于研发或示范应用阶段，面临能量转换效率不高、使用寿命较短以及安全性能不佳等挑战。以钠硫电池为例，尽管其能量密度较高，却因需要在300–350℃的高温条件下运作而存在显著缺陷，这种高温环境不仅增加了潜在的安全风险，如密封失效或温度失控可能导致火灾等严重事故，而且其技术成熟度的局限性还制约了其商业化的实际应用。

（三）政策支持体系不完善

当前，对储能技术的支持政策力度不足，补贴政策缺乏针对性，普遍采取统一标准的补贴方式，未充分考量不同储能技术及应用场景的特异性。由于缺乏长期稳定性的政策指导，政策常处于变动状态。政策间协同性不足，能源、财政及环保等领域的政策未能有效整合，从而在储能技术研发与推广进程中引发多重不确定性^[6]。

（四）市场机制不健全

储能参与电力市场的制度尚待健全，导致其价值未能充分展现。储能在调峰、在调频及辅助服务市场的收益机制存在模糊性，特别是储能设施参与调峰操作时，其补偿价格的设定缺乏明确规则，这显著削弱了企业的投资激励，众多企业忧虑于投入后可能无法实现预期的合理收益。

（五）储能系统寿命有限

大多数储能系统的寿命具有一定的局限性，例如，铅酸电池的循环使用寿命通常介于数百次至数千次之间。随着充放电周期的增长，电池的容量逐步衰退。当储能系统的使用寿命届满，替换费用昂贵，同时，废弃储能装置的回收与处置亦是一项挑战。不当处理含重金属的电池组件可能导致土壤与水源遭受污染。

（六）安全隐患

某些能量存储技术蕴含安全性隐患，例如，在过充电、过热等状态下，锂离子电池可能引发火灾及爆炸事件。在2021年，某一储能电站曾遭遇由电池热失控导致的火灾事件。储能系统的安全性管理与监控技术需进一步强化，当前的监控机制较为匮乏，难以实现对潜在风险的即时识别，从而确保人员及设备的安全^[7]。

四、推动储能技术在新能源电力工程中发展的策略

（一）降低成本

强化研发投入，组建专门的研发团队，深度挖掘储能技术的创新前沿，积极优化储能技术与生产流程，旨在显著降低储能设备的成本。举例而言，专注于开发创新电池材料，尤其是固态电池材料，旨在通过增强电池的能量密度，在保持原有体积的前提下显著增加电量存储能力，进而优化生产流程，实现从原材料获取到加工制造全链条的成本节约，从而有效降低材料及制造成本。与此同时，全面优化储能系统的架构设计，融入了智能管理平台，并借助传感器等装置实现对设备状态的即时监控。通过深入的数据分析，我们能够精确预估维护需求，有效防止过度维护带来的成本浪费，进而显著减少运营与维护费用。

（二）提升技术成熟度

不断强化储能技术的研发，针对目前所面临的能量转换效率低下、使用寿命短、安全性不佳等核心挑战，开展深入的技术突破工作。构建产学研协同创新体系，高等院校与科研机构依托其科研优势，致力于基础理论与技术创新，例如深入探究新型储能机理。企业则凭借其市场洞察力的优势，承担应用开发与产业化的任务，致力于将科研成果转变为实体产品。举例而言，高等学府、科研单位与产业界协同创新，致力于开发新型储能电池，通过材料甄选、结构优化等多维度策略，旨在全面提升其整体效能，并加速推动储能技术的市场化进程。

（三）完善政策支持体系

政府应制定精确且长期稳定的政策，并显著提升对储能技术的财政支持。基于储能技术的不同种类，包括抽水蓄能与电化学储能等，以及其应用环境，涵盖电网端与用户端等，应确立分层次的补贴政策。强化政策协调，能源部门规划储能技术发展蓝图，确立目标与战略导向；财政部门确保充足资金供给，保障技术研发与工程实施的财务需求；环保部门实行绿色政策优惠，例如为储能项目审批开启快速通道，各司其职，共同构建有利的政策生态，为储能技术进步创造优越的政策氛围^[8]。

（四）健全市场机制

优化储能接入电力市场的机制设计，并明确界定储能通过提供辅助服务所能获得的收益模式。根据储能调峰、通过采用精确恰当的评价手段，本研究旨在量化调频的实际效能及其对电网稳定运作所做出的贡献，并据此制定合理的价格机制。构建储能容量交易机制，通过为提供储能服务的实体提供公允的经济激励，确保其投资回收，凸显储能投资的经济效益，以此激活市场动力，吸引更多的企业投身于储能行业，进而推动储能产业的规模

化扩张与繁荣。

（五）延长储能系统寿命

致力于开发创新储能材料与技术，例如引入新颖电极材料，通过改良其结构与性能，以显著提升电池的循环耐久性和稳定性^[9]。此外，强化储能系统的运行监控与维护工作，借助大数据分析工具，搜集并解析储能系统运作期间的各种数据，探索充电与放电的模式，建立合理的充放电方案，精确调控充放电的程度与速度，以防过量充放电，以期延长储能系统的寿命，减少替换费用，并提升其经济回报。

（六）加强安全管理

构建健全的储能系统安全性标准与规程，自设计阶段起贯穿安全思维，于生产制造中严控品质，安装操作依循规范程序，运行期间强化监控，确保全过程严格执行安全规定。强化储能装置的安全评估与在线监控机制，借助智能感应器持续跟踪电池的温度、电压等核心指标，一旦识别到异常情况立即发出警报。不断开发高安全性储能技术，例如引入热管理策略，以提升储能系统的内在安全性，确保人员及设备的安全^[10]。

五、结语

储能技术在新能源电力工程领域扮演着不可或缺的关键角色，其应用与进展对于克服新能源发电挑战、增强电力系统的稳定性以及推动能源结构的转型均具有深远的影响。鉴于当前储能技术在实际应用中所遭遇的种种挑战，通过实施降低生产成本、增强技术成熟度、建立健全政策扶持机制等策略，有望促进储能技术在新能源电力系统的广泛应用与高效率运行。展望未来，伴随技术持续演进与市场日渐成熟，储能技术有望在新能源电力领域扮演更为关键的角色，为其推动可持续能源战略目标的实现奠定坚实基础。

参考文献

- [1]张清.GJ新能源公司发展战略研究[D].贵州大学,2024.
- [2]黄银亮.新能源发电技术与电力工程的融合发展研究[J].张江科技评论,2024,(05):79-81.
- [3]于乐岭,郭师洋.电力工程中新能源发电技术的发展路径与应用实践[J].电工技术,2024,(08):39-42.
- [4]侯欣宇.电网公司与中东欧国家新能源电力合作路径研究[D].华北电力大学(北京),2023.
- [5]袁玲.新能源电力工程EPC总承包项目设计管理研究[D].中南大学,2023.
- [6]杨裕生,马志敏.要大力发展高安全、长时间储能的铬-铁液流电池[J].科技导报,2022,40(02):1.
- [7]王嘉琛,张海峰.新能源电力系统中的储能技术[J].城市建设理论研究(电子版),2019,(18):6.
- [8]蔡兴桐.储能技术在新能源发电中的应用[J].城市建设理论研究(电子版),2019,(11):2.
- [9]张静晖.新能源电力系统中的储能技术探讨[J].城市建设理论研究(电子版),2017,(19):20.
- [10]刘志方.基于“双碳”目标的新能源光伏储能配置技术方案研究[J].光源与照明,2024,(07):120-122.

电力企业营销管理现状分析及策略研究

张猛

内蒙古国华准格尔发电有限责任公司，内蒙古 鄂尔多斯 010300

摘要： 随着电力市场改革的深入，蒙西网现货交易成为电力企业营销管理的新挑战。当前，电力企业在营销管理方面面临市场竞争激烈、价格波动大、用户需求变化等问题。为有效应对这些挑战，分析现有营销模式，提出基于现货交易机制的优化策略显得尤为重要。通过对电力市场的现状和未来趋势进行研究，制定更加精准的营销策略，可以帮助企业提高市场适应性和客户粘性。通过合理运用数据分析、价格调控以及差异化服务，电力企业不仅能够提升自身的盈利能力，还能增强市场竞争力，最终实现企业长期稳健发展。

关键词： 电力企业；营销管理；现货交易；市场竞争；数据分析

Analysis of the Current Situation and Strategy Research on Marketing Management in Electric Power Enterprises

Zhang Meng

Inner Mongolia Guohua Jungar Power Generation Co., Ltd. Erdos, Inner Mongolia 010300

Abstract： With the deepening of the reform of the electricity market, spot trading in the West Inner Mongolia Grid has become a new challenge for marketing management in electric power enterprises. Currently, these enterprises are facing issues such as fierce market competition, significant price fluctuations, and changing user demands in their marketing management. To effectively address these challenges, it is particularly important to analyze the existing marketing models and propose optimization strategies based on the spot trading mechanism. By studying the current situation and future trends of the electricity market and developing more precise marketing strategies, enterprises can improve their market adaptability and customer loyalty. Through the rational use of data analysis, price regulation, and differentiated services, electric power enterprises can not only enhance their profitability but also strengthen their market competitiveness, ultimately achieving long-term and stable development.

Keywords： electric power enterprises; marketing management; spot trading; market competition; data analysis

引言

在电力行业深化改革的背景下，蒙西网现货交易成为电力企业营销管理的新焦点。面对市场环境的复杂性和激烈竞争，电力企业需要不断优化营销策略，以应对价格波动、用户需求多样化等挑战。随着现货交易市场的崛起，企业营销的方式发生了深刻变革，如何利用现货交易机制提高市场响应速度和定价灵活性，成为企业生死存亡的关键。探索合适的营销管理模式，不仅能够提高企业的竞争力，还能有效提升用户满意度和企业盈利能力。

一、蒙西网现货交易对电力企业营销管理的影响分析

随着电力市场改革的不断推进，蒙西网现货交易已逐渐成为电力企业营销管理中不可忽视的重要组成部分。现货交易市场的出现，为电力企业提供了更加灵活的市场交易平台，但同时也带来了新的挑战。现货交易的价格波动性和实时性要求电力企业在营销管理中具备更加敏锐的市场反应能力和精准的价格预测能力，这对传统的营销模式提出了较高的要求。

（一）价格波动对营销管理的影响

现货交易市场的价格波动较大，电力企业在面对短期内快速

变化的电力价格时，必须具备灵活应对的策略。这种波动性要求电力企业不断调整销售价格和定价策略，以确保在不同市场条件下最大化盈利。此外，电力企业还需提升对市场价格趋势的分析和预测能力，通过实时监控市场变化，做到动态定价，减少因价格波动带来的风险^[1]。

（二）用户需求与现货交易的适应性

现货交易的引入使得电力企业在制定营销策略时，必须更加注重用户需求的多样性和个性化。随着市场逐渐向智能化、信息化方向发展，用户对于电力的需求不仅限于价格上的优惠，还包括服务质量、用电灵活性以及电力供应的稳定性等方面^[2]。电力

企业需要通过精准的客户细分和个性化服务，提升客户粘性，满足不同用户群体的需求，从而在激烈的市场竞争中占据优势。

（三）市场竞争加剧对营销管理的挑战

蒙西网现货交易的开展，使得电力市场的竞争更加激烈。传统的电力企业营销管理模式已无法应对这一变化，如何在竞争激烈的市场中脱颖而出，成为电力企业面临的核心问题。电力企业需加强与各类市场主体的合作，灵活调整营销策略，并借助现代技术如大数据、人工智能等提高市场响应速度，优化资源配置，提升企业的市场竞争力。

（四）数据分析与决策支持系统的作用

为了应对现货交易市场的复杂性和动态性，电力企业需加强数据分析和决策支持系统的建设。通过精准的数据分析，电力企业能够在短时间内获取市场信息、预测价格趋势，并据此调整营销策略^[9]。同时，现代信息技术也为电力企业提供了优化营销管理的工具，提升了决策的科学性和准确性，从而增强了企业在现货交易市场中的竞争力。

二、电力企业营销管理中的主要问题与挑战

（一）价格波动带来的风险管理挑战

现货交易的特点之一就是价格波动较大，这使得电力企业在制定营销策略时面临极大的不确定性。电力价格的剧烈波动不仅影响企业的盈利模式，还给用户定价带来了难度。企业在缺乏有效价格预测机制的情况下，很难做到合理定价和资源配置，这导致了营销管理决策的滞后性和不准确性。在这样的环境下，如何有效规避价格波动带来的风险，成为电力企业亟需解决的问题。

（二）用户需求的变化与个性化服务的缺失

随着市场的逐步开放和信息技术的发展，电力用户的需求日益多样化。过去，电力企业的营销管理主要依赖于单一的电力供应模式，但现如今，客户不仅仅关注电力价格，还希望获得更为灵活的用电服务，例如实时监控、智能用电管理、绿色能源选择等^[4]。然而，许多电力企业尚未完全实现客户需求的个性化服务和精准定位，导致客户满意度较低，用户流失率较高。如何通过创新的营销手段，满足客户多元化的需求，是电力企业必须面对的一大挑战。

（三）数据管理和技术支持不足

蒙西网现货交易的快速发展对电力企业的数据管理能力提出了更高的要求。现货市场的动态变化需要企业通过大数据、云计算等先进技术进行实时监控和分析。然而，许多电力企业在数据管理和技术支持方面仍存在薄弱环节，导致营销管理无法充分依靠数据驱动，决策依据不足，响应速度较慢。这使得电力企业在应对市场波动时缺乏必要的技术支持，无法精准调配资源，降低了企业的市场竞争力^{[5][6]}。

（四）市场竞争加剧与创新能力不足

随着蒙西网现货交易的不断发展，电力市场的竞争变得愈加激烈。传统的营销管理模式和固定的价格机制已经无法满足快速变化的市场需求。许多电力企业在创新能力上存在不足，缺乏灵

活的营销策略和高效的资源调配机制。这不仅影响了企业的市场占有率，还降低了其在市场中的适应性和竞争力。因此，电力企业必须在加强创新、提高服务质量、优化资源配置等方面下更大功夫，才能在激烈的市场竞争中占据一席之地。

三、基于现货交易机制的电力企业营销策略优化

（一）动态定价策略的实施

现货市场的价格波动性要求电力企业具备灵活的定价能力。传统的电力定价方式往往依赖于固定的合同和长期价格，但现货交易机制使得价格更加动态，随市场供需变化而波动。电力企业应根据市场的实时需求和价格变化，实施动态定价策略。这不仅能够帮助企业在市场价格低谷时吸引更多用户，也能在高峰期最大化收益^[7]。此外，通过分析历史价格趋势和实时数据，电力企业可以制定更加精准的价格预测模型，从而优化定价策略，提升市场响应速度。

（二）客户分层与个性化服务

在蒙西网现货交易的环境下，电力企业需要更加注重客户需求的差异化，实施客户分层管理。通过对不同用户群体的电力需求、用电习惯、消费能力等进行分析，电力企业可以制定针对性的营销策略。对于大客户或高价值客户，企业可以提供定制化的电力供应方案，如灵活的电价选择、用电量的实时监控等服务。而对于中小型用户，企业则可以提供套餐优惠、用电教育和智能设备等附加服务。个性化服务能够提升用户的满意度和忠诚度，从而促进长期稳定的客户关系，增强市场竞争力。

（三）数据分析与精准预测

电力企业在现货交易市场中必须依赖大数据分析和精准预测来优化营销策略。通过对大量市场数据的实时分析，电力企业能够预测未来的电力需求变化和价格走势，及时调整营销策略。例如，通过分析历史用电数据、天气变化、市场需求波动等因素，企业可以预测电力价格的变化趋势，并根据这一预测制定相应的销售计划。此外，借助人工智能和机器学习技术，电力企业可以优化电力资源的配置，提高营销决策的科学性和准确性，从而在复杂的市场环境中做出更具竞争力的选择^[8]。

（四）增强客户体验与互动

现货交易市场的快速变化要求电力企业不仅要在价格上具有灵活性，还要在服务上提供更多创新的体验。为了增强客户粘性，电力企业可以通过智能化的服务平台，为用户提供实时电量监控、个性化用电建议、节能减排方案等增值服务。此外，通过客户互动平台，企业能够及时了解客户反馈并做出相应调整。增强客户体验，不仅能够提升客户满意度，还能通过口碑传播吸引更多新客户，为企业带来长期的竞争优势。

（五）跨行业合作与资源共享

为了提升营销策略的灵活性和市场适应性，电力企业可以通过跨行业合作与资源共享，优化营销方案。例如，与智能家居企业、电动汽车充电桩运营商等行业合作，整合资源，为客户提供综合性的能源解决方案。这样的跨行业合作能够为电力企业创造

更多附加值，也能增加客户对企业的依赖度。此外，通过共享资源，企业能够更好地应对市场波动，提高资源利用效率，实现双方的共赢。

四、电力企业应对市场竞争的创新营销模式

传统的电力企业营销模式已经无法满足现有市场环境的需求，电力企业必须通过创新营销模式来应对市场竞争，提升企业竞争力和市场份额。

（一）结合大数据与精准营销

大数据技术的广泛应用使得电力企业能够实时掌握客户的用电行为与需求变化，进而制定精准的营销策略。利用大数据分析，电力企业可以对客户进行精细化管理，精确识别不同客户群体的特征与需求。例如，针对不同用电量的客户，企业可以提供差异化的定价方案和个性化的服务，甚至根据用户的用电习惯和偏好，推荐节能方案或定制化服务，从而提升客户的满意度与忠诚度。此外，大数据还可以帮助电力企业提前预测电力市场的变化趋势，优化资源配置和价格策略，提高营销决策的精准性和时效性^[9]。

（二）智能化产品与服务的推广

智能化产品和服务是电力企业在当前竞争激烈的市场中脱颖而出的重要手段。通过推广智能电表、家庭能源管理系统等智能产品，电力企业不仅可以提高电力使用的效率，还能为用户提供更加灵活和便捷的用电服务。例如，通过智能电表，用户可以实时监控自身用电情况，合理调节用电时间，从而减少电费支出。同时，电力企业可以通过智能设备与大数据平台，分析用户的用电模式，提供量身定制的节能建议和个性化的电力服务。这样的创新服务不仅能够提升客户体验，还能帮助企业通过增值服务提升收入 and 市场份额。

（三）基于现货交易的灵活定价与优惠策略

现货交易市场的价格波动性使得灵活定价成为电力企业应对市场竞争的重要工具。电力企业可以通过现货交易机制的价格信号，结合实时的市场供需变化，实施更加灵活的定价策略。例如，在电力需求较低的时段，企业可以通过降低价格吸引更多的客户；在高需求时段，企业则可以适当提高价格以最大化收益。

除此之外，企业还可以针对长期客户或大客户 provide 定制化的优惠方案，如价格折扣、积分奖励等，增强客户的粘性。此外，采用差异化定价策略能够帮助电力企业提升市场占有率，减少客户流失，并在价格波动较大的市场中获得稳定的盈利^[10]。

（四）跨行业合作与资源整合

面对市场竞争，电力企业单打独斗难以应对行业内外的压力。通过跨行业合作，电力企业可以整合各类资源，打造综合性的能源服务平台。例如，与新能源汽车产业合作，提供电动车充电服务，与智能家居产业合作，提供智能家居能源管理服务等。通过这种跨行业合作，电力企业可以为客户提供更多样化的产品和服务，提升企业的市场渗透率和品牌影响力。此外，跨行业合作还可以推动电力企业的创新，拓展新的业务领域，增强企业的市场适应性。

（五）社会责任与绿色能源战略

随着环保意识的增强，消费者对绿色能源和可持续发展的需求不断增加。电力企业可以通过引入绿色能源，如风能、太阳能等，推动企业的绿色发展战略。同时，电力企业可以通过宣传绿色能源使用的社会责任，吸引环保意识较强的用户群体。在竞争激烈的市场中，绿色能源战略不仅能够提升企业的社会形象，还能开辟新的市场空间，满足消费者对绿色和环保的需求，从而为企业带来新的增长点。

五、结语

随着蒙西网现货交易机制的不断深化，电力企业的营销管理面临着前所未有的挑战与机遇。通过分析现货交易对电力企业的影响，探索其在营销管理中的优化路径，可以看出，电力企业必须积极调整策略，提升市场响应速度和灵活性，以应对价格波动、用户需求变化等多重挑战。创新营销模式是企业适应新市场环境、提高竞争力的关键，利用大数据、智能化服务、差异化定价等手段，不仅能够优化资源配置，还能增强用户粘性和满意度。跨行业合作和绿色能源战略的实施，将为电力企业开辟新的增长空间，促进可持续发展。未来，电力企业应通过不断创新和优化，不断提升自身的核心竞争力，实现稳步发展并应对市场变化的挑战。

参考文献

- [1] 徐伟. 电力企业营销管理现状及策略创新探讨 [J]. 中国高新技术企业, 2017, (10): 250-251. DOI: 10.13535/j.cnki.11-4406/n.2017.10.126.
- [2] 宋乐. 电力市场开拓及电力企业营销管理策略分析 [J]. 现代企业文化, 2023, (23): 81-84.
- [3] 黄珊. 物流企业营销管理的现状及策略分析 [J]. 成功营销, 2018, (10): 115-116.
- [4] 李丹. 电力企业营销管理创新策略分析 [J]. 现代企业文化, 2024, (34): 49-51.
- [5] 裴玉. 电力企业营销管理的现状分析 [J]. 民营科技, 2015, (09): 114.
- [6] 李鑫. 电力企业绩效管理现状及策略分析 [J]. 东方企业文化, 2014, (17): 178.
- [7] 邓崇. 对电力企业电力营销管理策略的分析 [J]. 中国市场, 2014, (52): 34-35.
- [8] 范志新. 电力企业营销管理现状及对策分析 [J]. 中国电力教育, 2013, (29): 168-169.
- [9] 王珂, 张红兴. 电力企业绩效管理现状及提升策略分析 [J]. 中国高新技术企业, 2015, (04): 168-169. DOI: 10.13535/j.cnki.11-4406/n.2015.0365.
- [10] 张少铎. XC 供电公司电力营销策略研究 [D]. 沈阳大学, 2022. DOI: 10.27692/d.cnki.gsydx.2022.000023.

极端天气频发下电力设施的安全防护与应急管理研究

郭建建

国家电投集团北京电力有限公司, 北京 100032

摘 要： 随着全球气候变化，极端天气事件愈发频繁，给电力设施的安全运行带来严峻挑战。本文深入研究极端天气对电力设施的影响机制，从设计、建设、运维等多环节提出安全防护策略，并构建全面高效的应急管理体系，旨在提升电力设施在极端天气下的稳定性与可靠性，减少停电事故发生，保障电力供应安全。

关 键 词： 极端天气；电力设施；安全防护；应急管理

Research on Safety Protection and Emergency Management of Power Facilities Under Frequent Extreme Weather Conditions

Guo Jianjian

Beijing Electric Power Company of State Power Investment Corporation, Beijing 100032

Abstract： With global climate change, extreme weather events are becoming more frequent, posing severe challenges to the safe operation of power facilities. This paper conducts an in-depth study on the impact mechanism of extreme weather on power facilities, proposes safety protection strategies from multiple aspects such as design, construction, operation, and maintenance, and constructs a comprehensive and efficient emergency management system. The aim is to improve the stability and reliability of power facilities under extreme weather conditions, reduce power outages, and ensure the safety of power supply.

Keywords： extreme weather; power facilities; safety protection; emergency management

引言

近年来，我国极端天气频发，电力系统屡受冲击。全球气候变暖已从“幕后”走向“台前”，导致的极端天气气候事件显著增加，“几十年一遇”甚至“百年一遇”的灾害时常出现，这给我们敲响了警钟，气候变化就在身边，气候失衡的威胁现实存在。电力系统作为现代社会的基础性设施，其安全稳定运行直接关系到经济发展和社会秩序。极端天气的频发严重威胁电力设施的安全，导致大面积停电事故时有发生，给经济带来巨大损失，影响社会正常运转。因此，深入研究极端天气频发下电力设施的安全防护与应急管理具有重要的现实意义和紧迫性。

一、极端天气对电力设施的影响

（一）暴雨与洪涝灾害的影响

暴雨和洪涝灾害对电力设施的破坏作用明显。强降雨易引发山体滑坡、泥石流等地质灾害，冲毁电线杆塔基础。相关研究表明，在暴雨洪涝灾害高发地区，因地质灾害导致的杆塔损坏事故占总事故的30%以上。杆塔基础一旦受损，杆塔倾斜、倒塌风险大增，进而使输电线路中断。如2024年某地区因连续暴雨引发山体滑坡，致使多基杆塔基础被冲毁，造成数十公里输电线路停电，影响数万用户正常用电^[1]。

洪涝淹没变电站、配电室等电力设施危害巨大。电气设备短路、受潮损坏风险显著增加，设备金属部件易被积水腐蚀，缩短设备使用寿命。电缆沟进水会影响电缆正常运行，引发电缆故障。研究数据显示，洪涝灾害严重区域，约25%的变电站和配电

室会遭受不同程度水浸，受积水影响的电缆，其故障发生率较正常情况高出40%左右^[2]。

（二）台风与大风灾害的影响

台风和大风对电力设施的破坏主要源于强大机械力。强风作用下，电线杆塔承受巨大水平风力，当风力超杆塔设计承受能力，杆塔可能折断、倾斜。相关统计表明，在台风频繁登陆区域，每年因强风导致杆塔损坏的事故达数十起。

台风还可能吹落异物，如树枝、广告牌等，搭落在输电线路，引发线路短路跳闸。据不完全统计，在强风天气下，此类因异物搭落引发的线路短路跳闸事故占总跳闸事故的20%左右。架空输电线路的导线在大风中会舞动，导线间相互碰撞、摩擦，造成导线外层绝缘损坏，降低绝缘性能，引发线路故障。在海边地区，台风伴随的盐雾会附着在电力设备表面，加速设备腐蚀，影响电气性能。研究发现，盐雾环境中电力设备的腐蚀速率比正常

环境快3倍左右^[3]。

（三）暴雪与冰冻灾害的影响

暴雪和冰冻天气对电力设施危害严重。积雪在输电线路和杆塔上大量堆积，增加线路和杆塔负重，可能导致导线弧垂过大甚至断线，杆塔不堪重负倒塌。冰冻天气形成的覆冰现象更为危险，覆冰厚度可达数厘米甚至数十厘米，严重超出电力设施设计承载能力。研究显示，严重冰冻灾害期间，输电线路覆冰厚度可达30厘米以上，使导线负重增加数倍甚至数十倍^[4]。

覆冰还可能引发导线舞动加剧，进一步破坏电力设施。绝缘子串覆冰会降低其绝缘性能，易发生闪络放电现象，导致线路跳闸。覆冰绝缘子的闪络电压相比正常情况可降低50%以上。

（四）高温与干旱灾害的影响

高温天气下，电力负荷急剧增加，尤其是空调制冷负荷大幅上升，给电力系统带来巨大供电压力。长时间高负荷运行使电力设备温度升高，加速设备绝缘老化，降低设备使用寿命。变压器、电缆等设备在高温环境中，内部散热困难，可能引发过热故障。相关数据显示，高温时段电力系统负荷较平时增加20%–30%，变压器等设备油温可能超出正常运行范围，加速绝缘老化^[5]。

干旱天气导致土壤干燥，电线杆塔基础稳定性下降，增加杆塔倾斜、倒塌风险。据统计，干旱地区杆塔倾斜、倒塌风险较正常地区增加30%左右。高温干旱还可能引发森林火灾，威胁输电线路周边安全，一旦火灾蔓延至输电线路，将造成严重停电事故^[6]。

二、电力设施的安全防护策略

（一）强化电力设施的设计标准

在电力设施设计阶段，充分考虑极端天气因素，提高设计标准至关重要。针对不同地区气候特点，合理确定杆塔强度、高度及基础埋深等参数。例如，在台风多发地区，杆塔设计应增强抗风能力，采用更高强度钢材和更稳固基础形式。研究表明，采用新型高强度钢材制造的杆塔，其抗风能力可提升40%以上。

优化输电线路路径选择，避开易受地质灾害影响区域，如滑坡体、泥石流易发区等。通过优化线路路径，可有效降低因地质灾害导致的线路故障率35%左右。提高导线抗舞动性能，采用防舞动导线或安装导线防舞动装置，降低大风天气下导线舞动对线路的损害。安装导线防舞动装置后，导线舞动幅度可减小60%以上^[7]。

（二）提升电力设施建设质量

严格把控电力设施建设质量关。杆塔建设中，确保基础施工符合设计要求，保证基础强度和稳定性。加强对杆塔组立和导线架设过程的质量监督，避免施工缺陷。高质量电气设备和材料的选用，可提高设备防护等级，增强抵御极端天气能力。选用防水、防潮、耐腐蚀性能好的设备，并对设备外壳进行特殊处理，防止雨水、盐雾等侵蚀。相关研究指出，高质量电气设备在极端天气下的故障率比普通设备低30%左右。经过特殊防水、防潮处

理的设备，在暴雨、洪涝等灾害中的损坏概率可降低45%左右。对设备外壳进行防腐蚀处理，能使设备在盐雾等恶劣环境下的维护周期延长50%左右^[8]。

（三）加强电力设施的运维管理

建立完善的电力设施运维管理制度，增加极端天气前后的巡检频次。在暴雨、台风等灾害来临前，对电力设施进行全面检查，及时清理输电线路周边杂物，加固杆塔基础，对可能受影响的设备采取防护措施。灾害过后，迅速组织人员对受损设施进行排查和修复。

利用先进监测技术，如在线监测系统、无人机巡检等，实时掌握电力设施运行状态。在线监测系统可实时监测导线温度、弧垂、杆塔倾斜度等参数，及时发现潜在安全隐患。通过在线监测系统，能够提前发现80%以上的潜在安全隐患。无人机巡检可快速、高效地对大面积输电线路进行检查，尤其适用于地形复杂、人工难以到达的区域，相比人工巡检，效率可提高5倍以上^[9]。

（四）采用新技术提升设施防护能力

积极应用新技术提升电力设施防护能力。研发新型绝缘材料，提高设备绝缘性能，降低极端天气下设备发生闪络放电风险。新型绝缘材料可使设备绝缘性能提高50%以上。利用智能电网技术，实现电力系统智能调度和负荷优化分配，减轻高温等极端天气下电力系统供电压力。智能电网技术的应用，可使电力系统在高温等极端天气下的负荷分配更加合理，降低设备过载风险40%左右。

在应对冰冻灾害方面，采用直流融冰技术，通过向输电线路注入直流电流，使导线发热融化覆冰，保障线路正常运行。利用大数据分析技术，对历史极端天气数据和电力设施故障数据进行分析，预测极端天气对电力设施的影响，提前做好防范措施。通过大数据分析技术，能够较为准确地预测极端天气对电力设施的影响，提前制定针对性防护措施的准确率可达70%以上^[10]。

三、电力设施的应急管理体系构建

（一）制定完善的应急预案

结合不同地区极端天气特点和电力设施实际情况，制定详细、可操作性强的应急预案。应急预案应明确应急组织机构和职责分工，规定应急响应流程和处置措施。针对各类极端天气可能引发的电力设施故障，制定相应应急抢修方案，包括抢修队伍调配、抢修设备和物资准备等。

定期对应急预案进行演练和评估，根据演练结果和实际情况变化，及时对应急预案进行修订和完善。经过多次演练和完善的应急预案，在实际应急处置中能够使故障抢修时间缩短35%左右，提高应急响应效率。

（二）建立高效的应急指挥系统

构建统一、高效的应急指挥系统，实现应急指挥科学化、信息化。应急指挥系统具备实时监测、信息共享、指挥调度等功能。通过与气象部门、交通部门等相关单位建立信息共享机制，及时获取极端天气预警信息，提前做好应急准备。

在应急处置过程中，利用应急指挥系统对抢修队伍、物资和设备进行统一调度，确保应急救援工作高效有序进行。通过应急指挥系统及时向上级部门和社会公众发布电力设施受灾和抢修情况，保障信息畅通。高效的应急指挥系统能够使应急救援工作效率提高 40% 以上，确保抢修资源合理调配。

（三）加强应急抢修队伍建设

组建专业应急抢修队伍，配备充足抢修人员和先进抢修设备。应急抢修人员具备丰富电力设施维修经验和应对极端天气能力，定期接受专业培训和应急演练，提高应急处置技能和协同作战能力。为应急抢修队伍配备必要防护装备，保障抢修人员在极端天气环境下的人身安全。

加强与外部专业救援力量的合作，建立应急救援联动机制，在必要时迅速获得外部支援，提高应急抢修效率。经过专业培训和多次应急演练的抢修队伍，在实际抢修工作中的效率比未经充分训练的队伍高出 50% 左右。与外部专业救援力量建立有效联动机制，能够在紧急情况下快速获得支援，缩短抢修时间 30% 左右。

（四）完善应急物资储备与管理

建立健全应急物资储备体系，根据不同地区需求，储备足够数量的电力设施抢修物资，如杆塔、导线、绝缘子、应急发电设备等。对应急物资进行分类管理，建立详细物资台账，实时掌握

物资库存情况。定期对应急物资进行检查和维护，确保物资处于良好状态。

建立应急物资快速调配机制，在极端天气灾害发生时，迅速将所需物资运送到受灾现场，保障应急抢修工作顺利进行。完善的应急物资储备与管理体系，能够使应急物资调配时间缩短 40% 左右，确保抢修工作及时获得所需物资，提高抢修效率。

四、结束语

极端天气频发对电力设施的安全运行构成了严重威胁，加强电力设施的安全防护与应急管理势在必行。通过强化设计标准、提升建设质量、加强运维管理以及采用新技术等多方面的安全防护策略，可以有效提高电力设施抵御极端天气的能力。同时，构建完善的应急管理体系，包括制定应急预案、建立应急指挥系统、加强抢修队伍建设和完善应急物资储备与管理等，能够在极端天气灾害发生时，快速、高效地开展应急处置工作，减少停电事故造成的损失，保障电力供应的安全稳定。未来，随着气候变化的持续，还需不断深入研究和探索新的技术和方法，进一步提升电力设施在极端天气下的安全防护与应急管理水平，以适应日益严峻的挑战。

参考文献

- [1] 岳昊. 构建新型电力系统需更加重视气候变化“新常态”[J]. 中国电力企业管理, 2022, (22): 59-61.
- [2] 邹春蕾. 高温极端天气下局地出现电能质量问题 [N]. 中国电力报, 2023-07-17(002).DOI: 10.28061/n.cnki.ncdlb.2023.000825.
- [3] 聂新伟. 警惕极端天气成为电力“灰犀牛”[J]. 能源, 2023, (06): 30-33.
- [4] 严嘉豪. 极端天气事件下的电力系统维修决策及其在加固规划中的应用 [D]. 重庆大学, 2021.DOI:10.27670/d.cnki.gcqdu.2021.000990.
- [5] 罗剑潇. 台风天气下主动配电网韧性评估与韧性提升方法研究 [D]. 东北电力大学, 2024.DOI:10.27008/d.cnki.gdbdc.2024.000020.
- [6] 刘海涵. 新型送端电力系统移动能量支撑技术研究 [D]. 东北电力大学, 2024.DOI:10.27008/d.cnki.gdbdc.2024.000053.
- [7] 陈威, 田永乐, 白春光, 等. 考虑极端天气的电力供应链可再生能源维护策略研究 [J/OL]. 中国管理科学, 1-20[2024-9-17].https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2022.2669.
- [8] 吕涛, 黄燕, 孟祥蕴, 等. 极端天气下电力短缺的网络舆情演化及调控对策研究 [J]. 煤炭经济研究, 2024, 44(01): 162-169.DOI:10.13202/j.cnki.cer.2024.01.019.
- [9] 杨晓冉. 新型电力系统如何跨过气象关 [N]. 中国能源报, 2023-06-19(008).DOI: 10.28693/n.cnki.nshca.2023.001012.
- [10] 蒋国鑫. 应对极端天气灾害的配电网韧性提升策略研究 [D]. 西南交通大学, 2023.DOI: 10.27414/d.cnki.gxnju.2023.000759.

反馈控制在单元机组协调控制系统的实践

马全秀, 周锦扬, 王鑫

华能兰州热电有限责任公司, 甘肃 兰州 730104

摘 要 : 反馈控制是单元机组协调控制系统中不可或缺的一部分, 其主要目的是确保机组运行的稳定性和经济性。通过实时监测机组的运行参数, 并将这些参数与设定的目标值进行比较, 反馈控制系统能够及时发现偏差并采取相应的调节措施, 以纠正这些偏差。基于此本文首先对反馈控制的相关内容进行概述, 随后说明反馈控制技术应用的意义, 并针对实际应用中存在的问题, 提出了针对性的实践策略, 期望能为反馈控制系统在单元机组协调控制系统中的应用提供帮助。

关 键 词 : 反馈控制; 单元机组; 协调控制系统

Feedback Control in the Practice of Unit Coordination Control System

Ma Quanxiu, Zhou Jinyang, Wang Xin

Huaneng Lanzhou Thermal power Co., LTD. Lanzhou, Gansu 730104

Abstract : Feedback control is an indispensable part of the unit coordination control system, and its main purpose is to ensure the stability and economy of the unit operation. By monitoring the operating parameters of the unit in real time and comparing these parameters with the set target values, the feedback control system can detect the deviations in time and take corresponding adjustment measures to correct these deviations. Based on this, this paper first summarizes the relevant content of feedback control, then explains the significance of feedback control technology application, and according to the problems existing in practical application, puts forward targeted practical strategies, which is expected to provide help for the application of feedback control system in the unit coordination control system.

Keywords : feedback control; unit unit; coordination control system

引言

在现代电力工业中, 单元机组协调控制系统是保证发电效率和安全运行的关键技术之一。随着电力需求的不断增长和电网运行复杂性的增加, 对机组控制系统的性能要求也越来越高。反馈控制作为协调控制系统的核心, 其作用不容忽视。它通过连续监测和调整, 确保机组在各种工况下都能保持在最佳运行状态。然而在实际应用中, 反馈控制系统面临着诸多挑战。例如机组运行环境的复杂多变可能导致控制参数的频繁波动, 而传统反馈控制策略可能无法及时适应这些变化。

一、反馈控制的相关内容概述

(一) 反馈控制的定义和目的

反馈控制是一种通过监测系统输出并将其与期望目标进行比较, 然后根据比较结果调整系统输入以纠正偏差的控制方法。在当下大多数企业的实际应用中, 应用的主要目的是确保系统能够达到或维持在期望的性能水平上。常见的反馈控制通常用于各种系统, 包括工程、经济、生物和社会系统。同样的在经济领域, 反馈控制也可以发挥作用。例如一个国家的中央银行可能会设定通货膨胀率的目标比如2%。为了达到这个目标, 中央银行会监测当前的通货膨胀率, 并根据这个数据调整货币政策。如果通货膨胀

率高于2%中央银行可能会提高利率以减少货币供应, 从而降低通货膨胀率^[1]。

(二) 反馈控制与前馈控制的比较

相较于前馈控制而言, 反馈控制是一种更为常见的控制方式, 在应用中它侧重于在活动或过程结束后进行评估和调整。具体而言反馈控制的核心在于通过观察结果与预期目标之间的差异, 来识别问题、分析原因, 并采取相应的纠正措施。这种控制方式依赖于对过去行为的回顾和总结, 因此它通常在活动或项目完成后才开始发挥作用。反馈控制的一个显著优点是, 它能够提供实际结果与预期目标之间的具体差异, 从而为决策者提供宝贵的信息, 帮助他们更好地理解问题所在, 并制定出更有效的改进措施^[2]。

二、反馈控制在单元机组协调控制系统中应用的作用

（一）提高机组响应速度与稳定性

反馈控制在单元机组协调控制系统中的应用，对于提高机组的响应速度与稳定性具有至关重要的意义。这是因为这一方法在企业生产当中，可以通过实时监测机组运行状态并将这些信息反馈给控制系统，来帮助工作人员实现对机组运行参数的精确调整，从而确保机组在各种工况下都能保持最佳性能。在实际的应用中提高机组响应速度是反馈控制的一个显著优势。例如在电力系统中，电网负荷是不断变化的，这就要求发电机组能够迅速响应这些变化，以维持电网的稳定。而在运行中如果电网负荷突然增加时，反馈控制系统能够迅速检测到这一变化，并指令机组增加输出功率。通过反馈控制，机组可以在几秒钟内调整燃烧率和汽轮机的进汽量，从而快速提升发电量，满足电网需求^[3]。

（二）优化负荷分配与经济运行

在当下的工业自动化和智能化水平不断提升背景之下，使得现在反馈控制在单元机组协调控制系统中的应用变得越来越重要。在电力系统的运行当中，反馈控制通过实时监测系统输出，并将其与期望值进行比较，从而调整控制输入，以确保系统稳定运行并达到预期性能。在电力生产领域特别是在单元机组协调控制系统中，反馈控制的作用尤为显著，它不仅保证了机组的安全稳定运行，还优化了负荷分配与经济运行。具体而言在生产当中，反馈控制能够实时监测机组的输出功率，并与电网调度中心下达的负荷指令进行比较。如果发现实际输出功率与指令存在偏差，反馈控制系统会自动调整燃料供应量、给水流量、送风量等关键参数，以确保机组输出功率迅速且准确地跟踪负荷指令。这种快速响应能力不仅提高了电网的稳定性，还减少了因负荷波动引起的能源浪费^[4]。

（三）增强系统抗干扰能力与可靠性

在维持电网稳定性和可靠性方面，反馈控制在单元机组协调控制系统中应用同样发挥着关键作用。在电力系统的运行当中，往往会由于各种不可预测的干扰因素，如负荷波动、设备故障、天气变化等变化都可能对电网的稳定运行造成影响。而反馈控制系统通过实时监测电网的运行状态，能够迅速检测到这些干扰，并通过调整发电机组的输出功率来补偿这些干扰带来的影响。例如当电网负荷突然增加时，反馈控制系统会指令发电机组增加输出功率，以满足负荷需求，防止电网频率下降。反之当负荷减少时，系统则会减少发电量，以维持电网频率的稳定^[5]。

三、反馈控制在单元机组协调控制系统应用的阻碍

（一）反馈控制系统的动态响应延迟问题

反馈控制系统的动态响应延迟问题在单元机组协调控制系统中的产生，主要源于几个关键因素。其中最为核心的原因是因为物理过程本身具有一定的惯性，例如锅炉的热响应和汽轮机的机械惯性，而这些因素就可能导致了从控制信号发出到实际物理量变化之间存在时间差。除去这一因素之外，测量设备的响应速度

也会影响反馈控制系统的动态性能。如果测量设备的采样频率低或者存在信号传输延迟，那么反馈信号的实时性就会受到影响，进而影响控制系统的动态响应^[6]。

（二）反馈控制在机组参数波动时的稳定性挑战

反馈控制在单元机组协调控制系统中的应用，尽管在理论上具有诸多优势，但在实际操作中仍面临诸多挑战，尤其是在机组参数波动时的稳定性问题。这是因为在电力系统的运行当中，会因为机组运行环境的复杂性，以及各种内外部干扰的存在，使得反馈控制系统的稳定性成为了一个亟待解决的问题。其中机组参数波动是影响反馈控制稳定性的主要因素之一。例如在火力发电厂中，锅炉在运行时所产生的蒸汽压力和温度会因为燃料质量、燃烧效率、环境条件等因素而产生波动。这些波动若不能被及时准确地检测和调整，将导致反馈控制系统无法有效地维持机组运行在最佳状态。若蒸汽压力突然升高，而反馈控制系统未能及时响应，可能会导致安全阀动作，甚至引发设备损坏^[7]。

（三）反馈控制算法在复杂工况下的适应性问题

随着近些年来工业自动化技术的不断进步，使得当下的电力企业所使用的单元机组协调控制系统开始扮演着越来越重要的角色。这些系统通过实时监测和调整设备运行参数，确保生产过程的高效和稳定。然而在实际应用中，反馈控制算法在复杂工况下的适应性问题逐渐凸显，成为制约系统性能提升的关键因素。复杂工况下反馈控制算法的适应性问题主要表现在模型失配和参数变化上。在实际生产过程中，由于设备老化、环境变化、原料波动等因素，系统运行环境往往与设计时的模型存在差异。这种模型失配会导致反馈控制算法无法准确预测系统行为，从而无法做出正确的调整决策^[8]。

（四）反馈控制系统的维护与校准难题

在系统维护这一层面，反馈控制系统的维护与校准难题是单元机组协调控制系统应用中不可忽视的问题。这对于当前的大多数电力企业而言，由于反馈控制系统在单元机组中扮演着至关重要的角色，所以性能的稳定性和准确性直接影响到整个机组的运行效率和安全。然而随着机组运行时间的增加，设备老化、磨损以及环境因素的影响，反馈控制系统的维护和校准工作变得日益复杂和困难。具体而言在企业反馈控制系统的校准进行中，这一工作的开展往往需要高度的精确性。所以校准过程中的任何微小误差都可能导致控制参数的偏差，进而影响到机组的输出功率和效率。然后在实际操作中，由于缺乏精确的校准工具或校准方法不当，往往难以达到理想的校准效果。

四、反馈控制在单元机组协调控制系统的实践策略

（一）引入模型预测控制技术

就当下大多数企业而言，为了提高单元机组协调控制系统的性能，进而去引入模型预测控制技术是一个有效的策略。MPC是一种先进的控制策略，它通过优化未来一段时间内的控制动作来实现对系统的控制。MPC利用一个数学模型来预测系统未来的行为，并在每个控制周期内求解一个在线优化问题，以确定最优的

控制输入。在这一优化策略的具体实施过程中，要求企业应先建立精确的数学模型。这一步是实施 MPC 的基础，需要对单元机组的动态特性进行详细分析，包括锅炉、汽轮机、发电机等主要设备的数学模型。这些模型需要能够准确描述机组在不同工况下的行为，包括负荷变化、温度和压力的动态响应等^[9]。

（二）设计更为复杂的控制算法

针对于反馈控制在机组参数波动时的稳定性挑战，设计更为复杂的控制算法是提高单元机组协调控制系统性能的关键。这是因为在现代电力系统中，机组参数的波动可能由多种因素引起，常见的包括负荷变化、燃料品质波动、环境条件变化等。所以企业为了确保机组运行的稳定性和效率，控制系统必须能够快速准确地响应这些变化。具体而言企业可以采用先进的预测控制算法，如模型预测控制，来预测机组未来的运行状态，并据此调整控制策略。MPC 算法能够考虑系统的动态特性和约束条件，通过优化未来一段时间内的控制输入，来实现对机组参数波动的有效抑制^[10]。

（三）利用机器学习和人工智能技术

随着近些年来机器学习与人工智能技术的飞速发展，使得这些技术在工业自动化领域的应用变得越来越广泛。特别是在单元机组协调控制系统中，机器学习和人工智能技术的应用为提高系统的效率、稳定性和可靠性提供了新的可能性。在实际的应用当中，机器学习算法能够通过分析大量的历史运行数据，识别出影响单元机组性能的关键因素。例如通过使用聚类分析和异常检测算法，可以对机组运行状态进行分类，并及时发现潜在的故障

和异常行为。这不仅有助于预防设备故障，还能为维护工作提供数据支持，从而减少停机时间，提高生产效率。

（四）开发智能诊断系统

在单元机组协调控制系统中实施反馈控制策略，关键在于开发一个智能诊断系统，该系统能够实时监测机组运行状态，分析数据，预测潜在问题，并提供及时的反馈以调整控制参数。在开发中的核心在于，设计人员需要在机组的关键部位安装传感器，以实时监测温度、压力、流量、振动等关键参数。这些数据需要通过高速数据采集系统集中整合，为智能诊断系统提供准确的输入信息。

五、结语

综上所述在单元机组协调控制系统中，反馈控制的应用不仅提升了机组的响应速度和稳定性，还优化了负荷分配和经济运行，增强了系统的抗干扰能力和可靠性。然而动态响应延迟、参数波动时的稳定性挑战、复杂工况下的算法适应性问题以及系统的维护与校准难题，都是反馈控制在实践中需要克服的障碍。为应对这些挑战，企业可以采取引入模型预测控制技术、设计更为复杂的控制算法、利用机器学习和人工智能技术以及开发智能诊断系统等策略。通过这些实践策略的实施，可以进一步提升反馈控制在单元机组协调控制系统中的效能，确保电力系统的高效、稳定和安全运行。

参考文献

- [1] 刘俊磊, 钱峰, 王峰, 等. 基于闭环控制的两相电源直流输电系统线路稳态电压协控方法 [J]. 电源学报, 2022, 20(04): 138-145.
- [2] 刘华, 汪成文, 赵斌. 基于泵阀协调控制的电液位置伺服节能控制研究 [J]. 机电工程, 2020, 37(09): 1039-1044.
- [3] 杨孝松, 郭守春, 杜立强, 等. 某航空声学风洞控制系统 [J]. 兵工自动化, 2020, 39(08): 54-59.
- [4] 张志飞, 袁成健, 燕全超. 液压支架结构设计自适应和智能化技术 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2023, (24): 46-48.
- [5] 宫爱成, 梁浩鑫, 王凯, 等. 核电厂 NSSS 控制功能纵深防御设计及验证 [J]. 核科学与工程, 2023, 43(06): 1235-1242.
- [6] 曹天成, 张舒. 含有采样反馈的二连杆系统稳定性 [J]. 动力学与控制学报, 2023, 21(11): 10-18.
- [7] 韩军萍. 常村煤矿选煤厂煤泥水处理系统智能化改造 [J]. 矿山机械, 2023, 51(11): 49-52.
- [8] 唐鹏奕. 基于 T-S 模糊时滞系统的记忆反馈控制与分析 [J]. 怀化学院学报, 2023, 42(05): 45-49.
- [9] 杨博. 基于国产 FPGA 的模拟量控制系统的研究与设计 [D]. 南京邮电大学, 2023.
- [10] 熊旭民, 杜兵, 张鹏, 等. 高压喷射控制单元台架试验研究 [J]. 内燃机, 2023, 39(05): 22-27+39..

PLC 在提升广播电视供电系统安全中的应用

王岳锋

池州市传媒中心，安徽 池州 247100

摘 要： 本文针对广播电视系统供电安全要求高、影响大、故障频率高等特点进行总结分析，提出了在现有供电系统中运用 PLC 技术，提升供电安全性、降低处置故障时间的方案，详细阐述设计思路、主要功能、硬件系统电路的工作原理，并结合实例介绍软件控制功能的实现途径。

关 键 词： 广播电视供电系统；UPS；PLC；主要功能；工作原理

Application of PLC in Enhancing the Safety of Radio and Television Power Supply Systems

Wang Yuefeng

Chizhou Media Center, Chizhou, Anhui 247100

Abstract： This article summarizes and analyzes the characteristics of radio and television broadcasting systems, which include high power supply safety requirements, significant influence, and high failure frequency. It proposes the use of PLC technology in existing power supply systems to enhance power supply safety and reduce fault handling time. The article elaborates on the design ideas, main functions, and working principles of the hardware system circuitry, and introduces the implementation of software control functions through practical examples.

Keywords： radio and television power supply system; UPS; PLC; main functions; working principles

引言

当前，在各市县广播电视播出系统中，安全播出电源系统基本上实现了双回路供电并配置一台智能化 UPS 进行供电保障，使得安全播出供电安全性提高的同时也带来了设备的冗余和复杂性，一旦发生供电故障使得值机人员有点不知所措，很难在短时间内及时找到故障点并快速采取措施恢复供电。因此，时刻了解供电系统状态和极端状况下快速恢复播出系统供电就显得尤为重要。

一、设计背景

按照国家广播电视安全播出管理规定，各市县广播电视供电系统基本实现了双回路设计与不间断电源 UPS 之间的搭配使用方案^[1]，使供电安全有了一定的安全保障，但在实际应用中普遍存在以下问题：一是绝大多数双回路并没有严格独立开来，仍同时受到外界不可控因素（气候、地震、火灾等）影响较大；二是受投资维护经费影响，UPS 基本上单台配备，没有冗余配置，且电池容量有限，留给技术人员故障处置时间短；三是 UPS 作为电子硬件产品，使用年限增加故障发生的概率增大，当切换旁路出现故障时，需要快速判断并手动切换，这对于值机人员的要求较高；四是对于供电线路电流、电压、主电缆的温度、电池温度等状态缺乏实时监控，发生供电故障时很难快速判定是哪路线路出现了故障；五是在开启备用柴油发电时，缺乏针对发电机组的状态监测，既不安全也不经济。

供电系统状态监测虽然市面上技术比较成熟，但是购买类似监控系统往往厂家模块化量产，定制需求费用较高，且基本上只能实现监测很难再某些极端情况下进行电源的自动切换功能。鉴

于此，本设计方案根据自己的需求对供电系统优化和完善，具有经济、稳定、具备监测和特殊状态下的自动切的功能。^[2]

二、主要功能及工作原理

本电源监测告警切换系统包括主进线状态监测、UPS 工作状态监测、UPS 故障应急切换、柴油发电机运行监测（根据实际供电系统架构增添）等四个主要部分构成。^[3]

1. 进线主电源的状态监测功能设计。该部分的设计功能：一是通过电流、电压传感器对进线电源参数进行采集并送入 PLC 中进行变换，二是实时采集双电源转换开关的工作状态，一般情况下双回路转换开关都配有信号输出点，可通过中间继电器转换为数字量输入到 PLC 中，实时读取双回路开关闭合情况，为自动切换提供逻辑判断依据。

2. UPS 运行状态监测。包括 UPS 进线电源状态、UPS 电池电压状态、旁路运行状态、设备运行是否有故障、输出电压情况等。

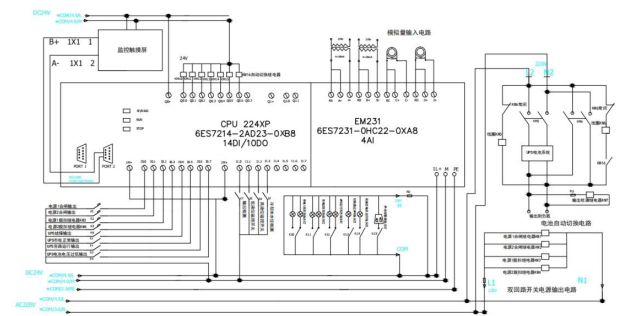
3. UPS 特殊故障时应急切换。在线式 UPS 的工作原理即市电

经整流器变成直流，一路逆变成纯净的正弦电压供给负载，另一路给电池充电。一旦市电中断时，先由蓄电池逆变供给负载，若逆变器出现故障，则静态开关动作转旁路直接供电。从 UPS 的工作原理来说，可以解决绝大部分的供电中断故障，大大提高供电的稳定性，但仍然存在供电风险。比如当静态开关或末端输出电子线路出现故障，UPS 供电就很难保障了。鉴于此，本设计增加自动切换电路，即在 UPS 的进线端并入一套接触器联动控制开合回路，当监测到 UPS 主机发生故障告警且输出没有电压输出时，接触器线圈快速吸合，带动接触器主回路闭合，直接跳过 UPS 进行供电。^[4]

4. 发电机状态监测告警。目前在单回路供电系统中一般配备一台柴油发电机。当需要人为观察冷却水和油位情况，既繁琐又存在一定安全风险。考虑到实际应用，可将发电机组的水温和油位信号采集进入 PLC 进行实时监控，并设定报警限位告警。

三、硬件电路系统介绍

本电源监测告警切换系统硬件电路主要包含 PLC 主控系统、开关量输入检测电路、模拟量输入检测电路、输出执行电路、电池自动切换电路、状态监测液晶屏以及供电电源电路等 7 个部分组成，具体如图 1 所示。



> 图1

PLC 主控系统采用西门子 200 系列 PLC 模块作为主控电路核心控制器件。选用 200 系列 PLC 作为主要理由：一是相比较 300 以上的 PLC 控制器模块，200 系列 PLC 性价比更高，在满足控制要求的同时价格相对较低，减少投入成本；二是西门子系列 PLC 具有高可靠性、扩展丰富、操作便捷、通讯能力强劲以及丰富指令集和内置集成功能等特点，特别适合小型控制系统的设计。本设计选了一个 224XP 主控 CPU 和一个 EM231 的 4 路模拟量输入模块组成了核心控制器件。224XP 主控 CPU 集成 14 输入 10 输出共 24 个数字量 I/O 点，2 输入 /1 输出共 3 个模拟量 I/O 点，可连接 7 个扩展模块，最大扩展值至 168 路数字量 I/O 点或 38 路模拟量 I/O 点。20K 字节程序和数据存储空间,2 个 RS485 通讯 / 编程口，具有 PPI 通讯协议、MPI 通讯协议和自由方式通讯能力。考虑到 224XP 模拟量输入的点位不够以及后续的功能扩展因素，在扩展模块上选了一个 4 路模拟量输入模块 EM231。

开关量输入检测电路分为三个部分，即双回路开关电源状态检测、UPS 系统主机运行状态检测以及扩展自备发电机的状态检

测。双回路开关电源部分主要针对两路电源的合闸、脱扣的状态进行检测，从双回路开关电源的控制输出端子引入 4 个 220V 继电器控制回路 KM1~KM4, 然后从继电器的常开点 K1~K4 串联到 PLC 的输入端 I0.0~I0.3，从而实现双回路控制电源的状态实时监测。UPS 系统的检测相对比较简单，因为 PLC 主机自带了无源状态输出端子，不需要过 modbus 通讯模式读取数据，直接将状态端子 S1~S4 串接到 PLC 的 I0.4~I0.7 输入端。自备发电机的运行监测可以直接从发电机的控制箱读取状态信号，如果没有信号点也可以增加磁控液位检测开关实时监测油位、冷却水等状态，这里主要通过 S5~S7 检测燃油的油位和冷却水低液位状态。

模拟量输入主要检测输入电流和电压信号，电压检测值可直观反应电网的波动情况，电流的检测值可实时了解当前供电系统的负载状况，两者都是重要数值信息。由于 EM231 模块灵活性强且适用于复杂的控制场合，具有 12 位的分辨率和多种输入 / 输出范围，能够不用外加放大器而与传感器直接相连，因此，可直接将电压、电流输入的 4~20mA 电流信号接入模块的输入端子。

输出执行电路主要通过 24V 继电器输出控制两路电源状态指示 (KM10~KM11)、UPS 状态指示 (KM12)、自动切换状态指示 (KM13)、柴油发电机的状态指示 (KM14)、以及异常状态的声光报警 (KM15) 等继电器，然后将继电器的常开接入到输出执行控制电路中，实现各种状态的实时监测。

电池自动切换电路设计主要针对 UPS 故障无输出或切换旁路失效的极端情况。主控电路采用两个主控接触器形成联动闭锁控制，主控电路 1 路 KM5 作为正常情况下的运行，串入 KM6 的常闭形成闭锁联动；主控电路 2 路 KM6 作为异常情况下的运行，串入 KM5 的常闭点以及 PLC 逻辑输出控制常开点 KM16 综合判断进行切换控制。在 UPS 的输入端引入了状态监测继电器 KM7 回路，实时监测 UPS 是否输出正常作为 PLC 控制判断是否切换到主控 2 路运行的重要依据。

状态监测选用西门子 Smart 1000IE V4 触摸屏，属于高灵敏度 4 线电阻式触摸屏，宽屏 10.1 英寸，工作电压 24VDC，分辨率 1024*600，Arm 主频 800MHz, 内存大小 256MB, 40 个变量归档，既支持 RJ45 标准以太网接口也支持 R422/485 串口通讯，为后续开发提供方便。本设计采用 WinCC flexible SMART 软件进行组态设计，通过网线进行程序下载到触摸屏，触摸屏与 PLC 控制器之间采用 Modbus RTU 通讯线进行通讯，实现数据传输。

全电路包括 24VDC 和 220VAC 两种工作电压。24VDC 部分选用两个 24VDC/2A 的开关电源，一路给为 PLC、输出执行电路中的指示灯、声光报警器等供电，另一路给输出继电器 KM10~KM16 进行供电、触摸屏等供电。220VAC 直接从双回路开关电源的输出端取电。

四、软件控制介绍

从硬件设计图中可看出该电源检测与线路切换系统输入 / 输出点较多，控制起来比较复杂，因此在软件编程中需要逻辑清晰。为了明晰该系统软件编程控制逻辑，可分为输入电源监测、UPS

电源监测控制以及扩展柴油发电机组告警三个部分进行分析说明。^[5-6]

电源状态监测控制逻辑：主要是运用双回路开关电源的开关量输入和两回路电压、电流模拟量输入数值进行组合逻辑控制，输出由电源指示灯的状态、触摸屏显示电压电流值及运行状态等，从而达到实时监测。现就控制逻辑列表说明如下：

表（一）

输入				输出			
I0.0	I0.1	Ra	Rb	Q0.0	Q0.1	Q0.5	触摸屏显示
1	0	Y	Y	1	0	0	显示电流、电压值，在用回路1路或者2路
0	1	Y	Y	0	1	0	
1	0	Y	N	1	0	1	1路显示正常，告警2路掉电
0	1	N	Y	0	1	1	2路显示正常，告警1路掉电
0	0	N	N	0	0	1	两路电源无显示，报警器告警
I0.0 电源1路合闸输出 I0.1 电源1路合闸输出 Ra 电源1路电压检测 RB 电源2路电压检测 Q0.0 市电1路运行指示灯 Q0.1 市电2路运行指示灯 Q0.5 声光报警器输出							

由上表可知：（1）当 Ra 和 Rb 两路检测值正常时，无论 I0.0 电源1路合闸还是 I0.1 电源2路合闸，此时两路电源电压电流显示正常，并且根据合闸信号可在触摸屏中显示当前合闸回路；（2）当 Ra 和 Rb 两路检测只有1路正常时，则正常回路电源指示绿灯，另一路显示红灯闪烁，并告警输出，且此时可合闸回路信号必定也是对应正常供电回路，否则可判断双回路开关故障，没有动作；（3）当 Ra 和 Rb 两路检测值都没有时，则无论是 I0.0 电源1路合闸还是 I0.1 电源2路合闸，都不能提供电源，此时两回路电源指示灯显示红灯闪烁，报警器输出报警。

UPS 电源切换控制回路的控制逻辑：主要基于 UPS 故障情况下的逻辑控制，因为切换回路的设计主要针对 UPS 自身故障且切换旁路失效且无输出的情况，所以这里就简要说明 UPS 进线电源正常而主机故障情况下的运行控制逻辑：

表（二）

输入					输出				
I0.4	I0.5	I0.6	I0.7	I1.0	Q0.2	Q0.3	Q0.5	Q0.6	触摸屏显示
1	1	1	0	1	1	0	1	0	UPS故障 切换旁路运行
1	1	0	0	1	1	0	1	0	UPS故障 电池逆变运行
1	1	0	1	0	1	1	1	1	UPS故障 切换跳过 UPS 运行
...
I0.4 UPS故障信号 I0.5 UPS进线正常 I0.6 UPS旁路运行正常 I0.7UPS 电池电压过低告警 I1.0 UPS输出负载端信号 Q0.2 UPS运行状态指示 Q0.3切换跳过 UPS指示灯 Q0.5 声光报警器输出 Q0.6切换跳过 UPS输出信号									

由上表二可知：（1）当 UPS 电源进线正常，主机发生故障告警，但是能够正常切换旁路，负载有输出则只进行声光报警，提示 UPS 有故障，正在旁路运行；（2）当 UPS 电源进线电源正常，

主机发生故障告警，没有切换旁路，电池电压正常，输出负载端有输出，则说明 UPS 正在逆变供电，此时触摸屏显示逆变运行并告警；（3）当 UPS 电源进线电源正常，主机发生故障告警，也没有切换旁路，电池电压有过低告警，输出端无输出，此时自动切换到跳过 UPS 运行并发出告警信号。^[7]

柴油发电机联动告警控制逻辑：当柴油发电机开启时，需要关注的是柴油发电机的运行状态，所以在本设计案例中通过 I1.1—I1.3 输入点采集了柴油发电机的燃料油位和冷却水的水位告警，当低于告警值时提醒值班人员及时补充燃料和冷却水。在实际应用中，多数发电机提供了联动启停、运行状态告警等信号接入点，可以根据自己需要进行深度联动控制或者功能扩展，这里不再赘述。^[8-9]

五、结语

本设计是以实际应用需求为初衷，综合考虑可靠性和投资性价比而精心设计的电源监测与切换系统，具有能耗低、无需运维、运行稳定可靠、告警及时、状态指示精准、自动切换有效及时等特点，为广播电视供电安全保驾护航。该系统还综合考虑到实际供电系统配置差异化将发电机状态接入作为可扩展项，同时针对电源自切换部分设置手动 / 自动切换模式，可根据实际运行自行切换。当然，本系统虽可大大提高供电系统的安全性和稳定性的同时也具有一定局限性，比如受供电电源的影响、缺乏日志留存以及短信远程报警等功能，后期可根据实际工作场景需求拓展完善。^[10]

参考文献

- [1]刘鑫.广播电视传输发射机房UPS电源系统的设计与维护[J].中国新通信,2023,25(09):31-33.
- [2]王琳.广播电视发射台供电系统扩容改造研究[J].电视技术,2022,46(12):122-124.
- [3]孙尚攀.广播电视转播台站低压双回路供电系统设计与运行[J].电视技术,2022,46(05):82-84.
- [4]陈英.广播电视发射台供电系统的运行和日常维护[J].西部广播电视,2022,43(04):232-234.
- [5]和安元.广播电视传输发射机房UPS电源系统设计和应用[J].通信电源技术,2019,36(04):53-54+58.
- [6]王娜.广播电视微波无人值守站供电系统改造实践[J].西部广播电视,2021,42(16):234-235.
- [7]张岩梅.广播电视机房电力供给系统优化改造设计[J].科学技术创新,2021,(15):182-183.
- [8]赵军棋,李正花.广播电视无线台站UPS电源系统智能化设计与技术运用[J].电子世界,2021,(16):180-181.
- [9]陈卓.无线发射台(站)电力系统技术方案的探讨[J].广播电视信息,2020,(02):101-102.
- [10]江林.关于广播电视专业设备供电系统中UPS电源、发电机组设备合理正确运用的探讨[J].影视制作,2017,23(02):68-70.

变电站二次系统监视预警与在线运维系统的研究

张丽霞, 王琪, 程智浩, 魏真艳, 董泉, 梁向阳, 徐明, 邵季飞

国网河南省电力公司超高压公司, 河南 郑州 450000

摘 要 : 变电站二次设备是电网调度和运行监控的关键基础设施, 是电网安全可靠运行的重要保障。随着新型电力系统供需双侧的不确定性, 电网运行方式调整和集中监控操作越来越频繁和复杂; 同时, 变电站二次设备缺少全面的运行状态数据支撑, 无法满足变电站二次设备高可靠运行的要求和科学精细的管理运维。为了创新厂站二次设备运维管控模式, 增强二次设备整体可靠性, 应用边缘计算、容器化、微服务、知识图谱等技术, 在站端和集控站实现对站控层、间隔层各类二次设备的全景数智化运维管控功能, 为日常运检工作提质增效提供数字化技术手段, 推动电网生产业务数智化转型。

关 键 词 : 二次设备; 运行状态; 数据支撑; 运维管控

Research on Monitoring, Early Warning and Online Operation and Maintenance System for Secondary Systems in Substations

Zhang Lixia, Wang Qi, Cheng Zhihao, Wei Zhenyan, Dong Quan, Liang Xiangyang, Xu Ming, Shao Jifei

State Grid Henan Electric Power Company Ultra-high Voltage Company, Zhengzhou, Henan 450000

Abstract : Substation secondary equipment is a critical infrastructure for power grid scheduling and operation monitoring, serving as an important guarantee for the safe and reliable operation of the power grid. With the increasing uncertainty on both the supply and demand sides in the new power system, adjustments to power grid operation modes and centralized monitoring operations have become more frequent and complex. At the same time, there is a lack of comprehensive operational status data support for substation secondary equipment, which fails to meet the requirements for high-reliability operation of such equipment and the needs for scientific and meticulous management and maintenance. To innovate the operation and maintenance control model of substation secondary equipment and enhance the overall reliability of this equipment, technologies such as edge computing, containerization, microservices, and knowledge graphs are applied. These technologies achieve panoramic intelligent operation and maintenance control functions for various types of secondary equipment at the station level and bay level at the station end and centralized control stations. Additionally, offering digital technology means to improve the quality and efficiency of daily operation and maintenance work, promoting the digital and intelligent transformation of power grid production activities.

Keywords : secondary equipment; operating status; data support; operation and maintenance control

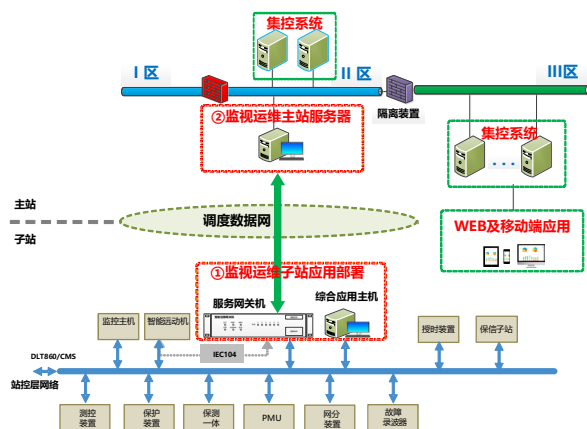
前言

目前变电站二次设备专业管理缺少全面的设备运行状态数据支撑, 缺乏准确的设备台账、SCD模型配置和定值参数等关键运行数据的管控手段, 运维检修也仍以大量人力投入的现场作业为主, 缺乏有效的远程化、数字化、高安全的运维检修技术手段, 设备的故障分析及处理往往需要运维检修人员多次往返于变电站现场, 故障消缺处理周期长, 运维检修效率偏低, 难以满足新型电力系统对变电站二次设备高可靠运行的要求。为了创新厂站二次设备运维管控模式, 面向二次专业管理、面向班组, 提升设备运维和专业管理效能, 增强二次设备整体可靠性, 应用边缘计算、容器化、微服务、知识图谱等技术, 在站端和集控站实现对站控层、间隔层各类二次设备的全景数智化运维管控功能, 为日常运检工作提质增效提供数字化技术手段, 推动电网生产业务数智化转型^[1]。

一、系统架构

系统架构如图1所示，整体部署于Ⅱ区，由站端二次设备监视运维子站（以下简称运维子站，部署于站内Ⅱ区）与集控站Ⅱ区前置服务器（以下简称运维主站）组成。

整体方案按照“应用下沉站端、主站轻量运行、业务安全贯通”的思路设计，充分利用厂站端设备算力，实现海量数据资源的就地分析、处理和应用，异常告警信息主动推送至运维主站，其它数据由运维主站定时或按需调阅。



> 图1 系统架构图

二、运维子站

运维子站平台及应用软件部署于站内服务网关机，接入站内间隔层与站控层网络，采集监控后台、数据通信网关机、授时装置、测控装置等二次设备的数据，实现包括模型文件的管理与合规性校验功能、遥控流程诊断功能、联闭锁逻辑诊断功能、装置告警智能诊断功能、二次设备全景感知功能等核心功能；对上与部署在集控站的前置服务器通信，为集控站提供运维数据调阅服务^[2]。

为解决站端设备类型多、厂商多的问题，运维子站采用开放共享软件架构设计，通过App化的方式进行各类业务扩展，一方面各设备厂商可针对各自设备开发专业化的运维App，另一方面后续运维和管理上新的需求也可以便捷的进行迭代。运维子站上的App按功能职责划分为三类：负责数据采集的驱动类App、负责业务逻辑功能的服务类App、以及用于人机交互的界面类App^[3]。

三、运维主站服务器

运维主站服务器部署在超高压集控站自动化机房，具备功能如下：

一是部署配置管理软件，提供运维子站接入管理、配置管理、App远程部署、上线调试等功能。

二是集成设备监视、运行分析、巡视运维、台账管理、备份管控等应用功能。

三是部署监视运维业务数据聚合App，按业务需求采集辖区内监视运维子站数据推送至集控站系统，实现站端I/II区二次设备精益化监视运维相关业务。

四、基础功能

（一）用户管理

具备用户管理功能，基于三权分立原则划分管理员、操作员、审计员等不同角色，并为不同角色分配不同权限，不存在拥有所有权限的超级管理员角色。

（二）厂站接入

具备厂站接入管理功能，运维主站上存储了所辖区域内所有变电站运维子站的基本信息，包括厂站名称、地理位置、电压等级、通信地址、硬件参数等。新接入子站时，只需完成手动录入新接入子站的通信地址接入即可，其它信息由运维主站向运维子站自动在线获取。

（三）厂站监视

可对接入运维主站的运维子站工况进行实时统计监视，包括服务网关机的在线状态、CPU使用率、内存使用率、磁盘使用率等硬件资源使用情况进行实时监视，对资源越限情况记录告警事件。

（四）数据聚合

部署监视运维业务数据聚合App，按业务需求采集辖区内监视运维子站数据进行数据聚合后推送至集控站系统，同时也可接收集控站系统下发的业务交互反馈数据，构建面向厂站二次设备的专业管理和运维检修统一平台。

五、全景感知

（一）台账管理

提供全站二次设备资产台账管理功能，站端基本台账信息由全站SCD导入运维子站后同步至运维平台，运维平台负责与集控站系统或省级调控云中资产模型进行关联同步和校核，台账信息包含设备名称、中文描述、设备类型、型号、生产厂家、版本号、网络IP等信息，可按区域、厂站、供应商、设备型号、板卡型号等进行分类查询展示，支持通过三维模型、实物影像等进行设备画像。支持资产在线维护，支持网络资产主动发现，支持资产报表导出，资产台账覆盖范围及属性字段。

同时提供站控层网络设备资产主动探测和接入设备资产自动监管功能，以IP地址台账数据为基础，主动扫描探测站控层网络中的接入设备IP地址，当发现存在非台账内IP地址的设备接入网络，产生相应的告警提示，并提供维护接口进行资产台账更新，站控层网络设备资产探测实施技术方案。

（二）二次设备状态监视

提供“厂站-间隔-装置”三级导航功能实现对厂站二次设备的全景感知功能。实现监控后台、网关机等站控设备的CPU占有率、内存使用率、磁盘使用率、通道状态、核心进程状态的监视。通过主接线图方式展示当前所访问的厂站的一次主接线图开

关、刀闸状态及对应间隔二次设备的总体运行工况。通过间隔设备展示界面展示该间隔内二次设备的详细工况，并可作为导航入口访问想要查看的二次设备运维界面。点击间隔视图内的二次设备即可进入装置的全景展示界面，实现对装置的指示灯、人机界面、主站告警、压板状态、参数定值、三维模型、设备台账等各种全景信息。

（三）时钟同步装置监视

集成地区已部署的时钟同步监测应用，提供地区所辖厂站时钟同步装置运行情况监视功能，实现对时间同步系统的收星及守时状态监视。可按地区、厂家、型号等统计时钟接入数量、占比、告警数量等指标。可查看各厂站时钟工作状态、时钟源状态、天线状态、收星状态及守时状态。

（四）网络管控

提供全站通信网络全景监视功能，实现对全站通信网络状况的可视化，通信网络的静态网络拓扑从全站 SCD 模型中解析获得，通过从交换机获取各类工况数据实时展示网络设备的端口状态、端口流量、端口告警以及网络链路状态，具体监测信息和功能展示界面。

（五）运行分析统计

提供二次设备状态分析功能，综合长期运行过程中的装置温度、工作电压、测量偏差、自检状态、通信状态、对时状态等多维度状态数据对设备的运行工况进行综合评估，按“优、良、中、差”等级进行设备工况归类，为用户制定检修计划提供依据。针对检修发现的设备缺陷进行归档统计，分析潜在影响范围。统计设备运行年限，按厂家、型号等绘制设备分布图。

六、设备巡视

自动巡视功能用于实现对厂站站二次设备的运行工况和关键运行数据进行在线巡视，巡视内容包括装置指示灯状态、参数定值、压板状态、遥测值、遥信状态、模型版本等等。自动巡视可按用户编制的巡视日程表自动启动巡视，巡视完成后自动生成巡视报告，对于存在异常巡视项的报告，主动推送巡视异常告警，巡视报告中对巡视异常项进行分类统计，方便用户及时掌握系统总体运行情况，历史巡视报告支持按时间进行检索查询。

七、智能诊断

（一）设备告警诊断

设备告警诊断功能用于检测、分析站内二次设备产生的告警信息，提供对告警信息的诊断结果和处置建议。通过 MMS 及相关专用规约驱动 App 进行基础数据和告警信息的收集与筛选，结合自建的故障诊断知识图谱库，自动发现告警产生的内在特征和潜在逻辑，以逐条对应的解释方式进行呈现，帮助快速定位并排除设备异常。

（二）遥控流程诊断

遥控流程诊断功能用于全流程监测遥控命令流转，诊断遥控

失败原因，精准定位问题。通过收集远动、交换机、测控装置等遥控关键节点的数据信息，监测遥控选择、遥控执行、遥控取消等操作的全过程状态，进行时域链式展现，当发生遥控操作异常时，自动逐级排查，定位失败原因，提升故障排查效率。

（三）联闭锁逻辑诊断

联闭锁逻辑诊断功能用于可视化展示测控装置中的五防规则文件，并依据监视运维网采集的实时遥信遥测值，对五防逻辑图进行渲染展示。通过解析装置内的五防联闭锁文件内容，根据其中每条规则对应的联闭锁逻辑在界面上生成对应的可视化逻辑图，计算出闭锁逻辑状态，并与测控装置的闭锁逻辑状态进行校核，不一致时给出告警提示，便于用户进一步检查核实。

八、在线运维

（一）远程虚拟人机交互

通过二次设备远程或虚拟液晶功能，将设备的液晶画面、指示灯、面板按键等延伸至主站，在主站端即可完成远程与间隔层设备的交互，实现沉浸式的设备监视和维护；通过监控后台画面调阅功能，提供后台画面信息和数据库信息的远程查看功能，出现问题时便于和调度信息核实^[4]。

（二）远动转发数据校核

结合远动转发表、EMS 前置信息表、监控信息表、全站 SCD、远动断面数据进行综合校核，确保远动转发表信息一致性。

（三）设备日志调阅

远程在线调阅各二次设备内运行日志信息，便于远程进行设备运行过程的异常分析、遥控操作流程异常的综合排查等工作。

（四）网络漏洞扫描

快速、全面的检测网络中各类资产的脆弱性及边界完整性问题，并进行自动化验证，提供直观的检测结果及专业的加固建议，网络漏洞扫描实施技术特点：

1. 资产脆弱性检测

平台支持识别各类系统漏洞、中间件漏洞、数据库漏洞、云平台漏洞、Web 漏洞、行业化漏洞（如视频专网的 IPC 漏洞、业务平台漏洞等），全面发现资产的安全隐患。

2. 漏洞自动化验证

平台支持模拟人工渗透测试的方式对漏洞进行验证，自动判断漏洞的真实性，用户可根据检测结果有针对性的制定漏洞修复计划。

3. 边界完整性检测

针对用户破坏网络边界完整性的违规行为进行检测，如：私接互联网、私接路由、一机两用、使用随身 WiFi 等，主动监测专网边界状态，预防出现跨网信息交互事件。

4. 资产风险可视化

针对发现的资产风险，提供各维度的数据分析展示，让用户迅速了解资产的整体安全状态。

九、备份管控

（一）模型文件管控

模型文件管控功能包括站端合规性校验和运维平台管控2部分。站端合规性校验是指运维子站定期通过 DLT/860从站内 A/B套远动分别获取模型文件，如：RCD文件、SCD文件等，解析并进行文件合规性校验（合规性校验规则见附录 E）、双套设备文件的一致性校验和受控版本校验，生成对应的管控简报。运维平台管控是指汇集了各子站模型文件和管控信息后，对文件进行归档管理，可进行各版本的模型文件调阅、异常检查、合规性规则管理等，实现全网模型文件统一管控^[5]。

（二）装置定值文件管控

支持装置参数定值单的人工导入和一致性核对。在运维子站的管理界面上，实现对设备定值和参数的批量对比功能。由初始时导入或人工确认生成的默认版本，后期可由用户根据需要生成不同的定值版本。实现定值参数变更的历史溯源，方便用户全过程跟踪和管控全站设备的定值参数变化。

（三）装置配置管控

通过 DLT/860收集变电站二次设备的相关配置文件,包括装置 CID、CCD模型文件、四统一测控装置配置版本信息文件等，装置程序包和定值参数配置文件等装置运行的关键文件。定期对这些文件的文件大小，校验码和 md5 等信息进行定期收集和记录形成历史比对，同时还可以通过版本管理工具进行装置程序包的备份，提供程序和关键运行数据的快照功能。对历史基线版本比对不一致的装置进行告警，以加强对装置程序配置的版本管控。

十、结论

现有变电站体系架构基础上，提出以开放共享架构为基础，以多元信息融合分析为思路，构建数字化的二次系统统一监测与在线运维平台，支撑电网“调、监、控”一体化业务，推进运行、检修、专业管理向自动化、规范化、远程化与智能化方向发展，支撑变电站二次系统安全可靠运行。

参考文献

[1] 李晶, 吕占彪, 许静静, 等. 智能变电站综合自动化系统中的状态监测与诊断技术分析 [J]. 集成电路应用, 2024, 41(09): 184–185. DOI: 10.19339/j.issn.1674–2583.2024.09.081.
[2] 曹飞, 马红星. 220kV 智能变电站中的继电保护与控制技术分析 [J]. 电子技术, 2023, 52(06): 280–281.
[3] 魏涛. 变电站自动化监测控制系统的研究 [J]. 能源技术与管理, 2023, 48(02): 174–176.
[4] 周建. 智能变电站二次设备故障状态自动化监测系统设计 [J]. 中国科技投资, 2021, (14): 59–60.
[5] 张余佳. 智能变电站自动化在线监测系统的设计 [J]. 通信电源技术, 2017, 34(01): 87–88. DOI: 10.19399/j.cnki.tpt.2017.01.033.

分布式电源对配电网供电可靠性的影响及应对措施

倪鹏程

国网蔚县供电公司, 河北 张家口 075700

摘 要 : 随着能源需求的增长和环保意识的提高, 分布式电源在配电网中的应用越来越广泛。本文深入探讨了分布式电源对配电网供电可靠性的影响, 分析了其带来的正面和负面影响, 并针对这些影响提出了相应的应对措施。通过对分布式电源接入配电网的技术研究和实际案例分析, 旨在为提高配电网供电可靠性提供理论支持和实践指导, 促进分布式电源与配电网的协调发展。

关 键 词 : 分布式电源; 配电网; 供电可靠性; 影响; 应对措施

The Impact of Distributed Generation on the Reliability of Power Supply in Distribution Networks and Countermeasures

Ni Pengcheng

State Grid Yian Power Supply Company, Zhangjiakou, Hebei 075700

Abstract : With the growth of energy demand and the improvement of awareness, the application of distributed generation in distribution networks is becoming increasingly widespread. This paper deeply explores the impact of distributed generation on the reliability of power supply in distribution, analyzes the positive and negative effects it brings, and proposes corresponding coping measures for these effects. Through technical research and practical case analysis of the access of distributed generation to networks, this paper aims to provide theoretical support and practical guidance for improving the reliability of power supply in distribution networks, and to promote the coordinated development of distributed generation and networks.

Keywords : distributed generation; distribution network; reliability of power supply; impact; countermeasures

引言

在全球能源转型的大背景之下, 分布式电源 (Distributed Generation, DG) 作为一种新型的能源利用方式, 其得到了迅速地发展。分布式电源通常是指功率在数千瓦至数十兆瓦的小型模块化、分散式的发电装置, 如太阳能光伏发电、风力发电、生物质能发电、微型燃气轮机发电等。因为这些电源靠近用户侧, 所以能够直接为当地负荷供电。其在减少电力传输过程中损耗的同时, 还有助于提高能源利用效率, 与降低对传统化石能源的依赖。

配电网作为电力系统的重要组成部分, 需要直接面向终端用户, 因此其供电可靠性将直接地影响到用户的用电体验和经济社会的正常运转。但分布式电源的接入打破了传统配电网的单一供电模式, 使得配电网的结构和运行特性发生了显著地变化, 对于配电网的供电可靠性产生了多方面的影响。因此深入地研究分布式电源对配电网供电可靠性的影响及应对措施具有重要的现实意义。

一、分布式电源的类型及特点

近些年来分布式电源在全球范围内呈现出快速增长的态势。根据国际能源署 (IEA) 的统计数据来看, 太阳能光伏发电和风力发电的装机容量在持续地攀升, 并在许多国家和地区已成为重要的能源供应来源。而在我国, 分布式电源的发展也是十分迅速的, 其主要原因是政府出台了一系列鼓励政策, 有效地推动了分布式能源产业的发展。特别是在东部沿海地区和一些光照、风力

资源丰富的地区当中, 分布式光伏发电和风力发电项目大量涌现。同时生物质能发电、微型燃气轮机发电等其他类型的分布式电源也在逐步地推广应用。

(一) 太阳能光伏发电

太阳能光伏发电是利用太阳能电池将太阳光能直接转化为电能的发电方式。其主要特点包括:

1. 可再生性: 因为太阳能是一种取之不尽、用之不竭的清洁能源, 所以它不会对环境造成污染^[1]。

2.分布广泛：太阳能资源在地球上分布广泛且不受地域限制，因此适合在各种地形和气候条件下建设。

3.模块化：如果使用太阳能光伏发电系统，就可以根据实际需求进行模块化设计和安装。其灵活性高，也易于扩展。

4.间歇性：光伏发电的输出功率受光照强度和天气条件的影响较大，所以会具有明显的间歇性和随机性。

（二）风力发电

风力发电是将风能转化为电能的发电方式。其特点如下：

1.可再生性：风能是一种清洁的可再生能源且无污染。

2.能量密度高：在风力资源丰富的地区当中，风力发电的能量密度相对较高，所以具有较大的发电潜力。

3.规模效应：风力发电场通常需要具有一定的规模，而通过多台风机的联合运行，就可以实现较高的发电效率。

4.间歇性和波动性：因为风速的大小和方向会随时发生变化，从而导致风力发电的输出功率具有间歇性和波动性，所以给电力系统的稳定运行带来了挑战。

（三）生物质能发电

生物质能发电是利用生物质能进行发电的方式，当中主要包括生物质直燃发电、生物质气化发电和生物质沼气发电等。其特点为：

1.可再生性：生物质能来源于植物、动物等有机物质，其是一种可再生能源。

2.环保性：生物质能发电过程中产生的污染物较少，即对环境比较好。

3.分散性：由于生物质资源分布较为分散，所以适合发展分布式发电。

4.原料供应稳定性：生物质原料的供应受季节、气候等因素的影响，因此可能会存在供应不稳定的问题。

（四）微型燃气轮机发电

微型燃气轮机发电是一种以天然气、柴油等为燃料，其主要是通过燃气轮机将热能转化为机械能，再通过发电机将机械能转化为电能的发电方式^[2]。其特点有：

1.高效性：微型燃气轮机具有较高的发电效率，其能够实现能源的高效利用。

2.灵活性：该机械启动迅速，能够快速响应负荷变化，因此适合作为备用电源或调峰电源。

3.低污染：燃烧过程中产生的污染物较少，且污染物符合环保要求。

4.成本较高：因为设备投资和运行成本相对较高，所以在实际当中限制了其大规模应用。

二、分布式电源对配电网供电可靠性的正面影响

（一）减少传输损耗，提高供电稳定性

分布式电源是在靠近用户侧接配电网，此举减少了电力传输的距离，从而降低了传输过程中的功率损耗。根据相关研究来看，传统配电网中的电力从发电厂传输到用户端，其传输损耗通

常在 8% – 15% 之间，但是分布式电源的接入可以使传输损耗降低至 20% – 40%^[3]。而传输损耗的降低不仅提高了能源利用效率，还减少了因传输线路故障导致的停电风险，有效地提高了供电稳定性。

（二）增强配电网的自愈能力

分布式电源的接入使配电网具备了一定的自愈能力。即当配电网发生局部故障时，分布式电源依然可以通过孤岛运行的方式，继续为部分重要负荷进行供电，进而避免了大面积停电的发生。例如某城市的配电网当中，当一条 10kV 馈线发生故障时，接入该馈线的分布式光伏发电系统迅速地切换到了孤岛运行模式，最终为周边的医院、消防等重要用户提供了持续的电力供应，有力地保障了这些用户的正常运行。

（三）改善电压质量

分布式电源在运行过程之中，其可以根据配电网的电压情况进行无功补偿，做到调节配电网的电压水平。特别是对于一些偏远地区或负荷较重的区域来说，分布式电源的无功补偿作用可以有效地改善电压质量，从而减少电压波动和电压偏差，与提高供电可靠性^[4]。如在某农村地区的配电网中，由于负荷增长和线路老化，导致该地区电压质量较差，会经常出现电压过低的情况。而在接入分布式风力发电系统之后，该系统通过风机的无功调节功能，使得该地区的电压水平得到了明显改善，最终用户的用电可靠性得到了提高。

三、分布式电源对配电网供电可靠性的负面影响

（一）分布式电源的间歇性和波动性

因为太阳能光伏发电和风力发电等分布式电源受自然条件的影响较大，所以其输出功率具有明显的间歇性和波动性。实践中若分布式电源的输出功率突然发生变化，则可能会引起配电网的电压波动、频率变化和功率不平衡，从而影响配电网的稳定运行，降低了供电可靠性^[5]。如在某地区的光伏发电项目中，由于云层的快速移动，导致光伏发电的输出功率在短时间内大幅度的下降，最终引起了配电网的电压波动，致使部分用户的电器设备出现了异常工作的情况。

（二）对配电网保护的影响

分布式电源的接入改变了配电网的故障电流分布和流向，使得传统的配电网保护装置难以正确动作。即当配电网发生故障时，分布式电源可能会向故障点提供短路电流，从而导致故障电流增大或减小，使得保护装置的动作时间和动作范围发生变化。此时可能出现误动作或拒动作的情况，进一步影响到配电网的供电可靠性。

（三）孤岛运行问题

当配电网发生故障或停电时，分布式电源如果不能及时的与配电网解列，就会形成孤岛运行状态。而孤岛运行可能会对电网维修人员的人身安全造成威胁，同时该情况也会影响配电网的重合闸和恢复供电过程，最终降低供电可靠性。此外，孤岛运行时分布式电源的输出功率与负荷需求难以匹配，就可能会导致电压

和频率不稳定，影响到用户设备的正常运行^[6]。

（四）与配电网的兼容性问题

不同类型的分布式电源在接入配电网时，其可能会与配电网的电气参数、控制方式等存在兼容性问题。例如一些分布式电源的谐波含量较高，就可能会对配电网的电能质量造成污染，进而影响其他设备的正常运行；或者一些分布式电源的控制策略与配电网的调度要求不匹配，此时就可能会导致分布式电源无法充分发挥其作用，甚至是对配电网的运行产生负面影响。

四、应对分布式电源对配电网供电可靠性影响的措施

配电网供电可靠性是衡量电力系统服务质量的重要指标之一，它会直接关系到用户的用电连续性和稳定性^[7]。其中对于工业用户来说，停电可能导致生产中断、设备损坏，造成巨大的经济损失。而对于居民用户来说，停电会影响到日常生活的便利性，进而降低生活质量。此外随着社会经济的发展，一些对供电可靠性要求极高的行业，如金融、医疗、通信等，对于配电网的供电可靠性也提出了更高的要求。因此提高配电网供电可靠性是电力系统发展的重要目标之一。

（一）优化分布式电源的配置和布局

相关人员在分布式电源的规划和建设过程中，应该充分地考虑到当地的能源资源、负荷分布和配电网结构等因素，以此为基础来优化分布式电源的配置和布局。而经过合理地选择分布式电源的类型、容量和接入位置，即可使分布式电源能够与配电网实现良好的匹配，在运行过程中就能够最大限度地发挥其对供电可靠性的正面影响，且减少负面影响。例如在太阳能资源丰富且负荷集中的地区，可优先建设分布式光伏发电项目，而在风力资源丰富的沿海地区或山区需合理地布局风力发电场。

（二）加强分布式电源的控制与管理

为了应对分布式电源的间歇性和波动性，相关人员需要加强对分布式电源的控制与管理^[8]。结合时代背景而言，相关人员应采用先进的控制技术，如最大功率跟踪控制、无功功率调节控制等，即使分布式电源能够根据电网的需求和自身的运行状态，自动地调整输出功率和无功补偿量，以此保持配电网的稳定运行。同时其还应该建立分布式电源的监测与管理系统，以实时地监测分布式电源的运行状态，确保能够及时地发现和及时处理故障，从而保证分布式电源的可靠运行。

（三）改进配电网保护与控制策略

针对分布式电源接入对配电网保护的影响来说，相关人员需要改进配电网的保护与控制策略。一方面可采用自适应保护技术，使得保护装置能够根据分布式电源的接入情况和故障电流的变化，自动地在实践之中调整保护定值和动作特性，以确保保护装置的正确动作^[9]。另一方面可引入智能电网技术，如分布式能源管理系统（DEMS）和微电网控制技术，借此实现对分布式电源和配电网的协同控制，达到提高配电网供电可靠性的目的。

（四）解决孤岛运行问题

若想要在实际运行过程中防止孤岛运行对配电网供电可靠性

的影响，就需要对其采取有效的措施解决孤岛运行问题。目前最快速可靠的方法就是孤岛检测技术，当配电网发生故障或停电时，该技术能够及时地检测到孤岛的形成，并且使分布式电源与配电网迅速解列。与此同时还需制定出合理的孤岛运行控制策略，如在孤岛运行期间，通过调节分布式电源的输出功率和负荷需求，来维持孤岛内的电压和频率稳定，以确保重要负荷的正常供电。

（五）提高分布式电源与配电网的兼容性

相关人员加强对分布式电源接入技术的研究和标准制定，即可解决分布式电源与配电网的兼容性问题。对此应积极地研发高效的谐波治理装置和无功补偿设备，目的是降低分布式电源对配电网电能质量的影响^[10]。同时还需制定统一的分布式电源接入标准和规范，借此明确分布式电源的电气参数、控制方式和通信协议等要求，从而确保分布式电源能够与配电网实现无缝对接。

五、结语

分布式电源的接入对配电网供电可靠性既有正面影响，也有负面影响。其中正面影响主要包括减少传输损耗、增强配电网的自愈能力和改善电压质量等，而负面影响主要包括分布式电源的间歇性和波动性、对配电网保护的影响、孤岛运行问题以及与配电网的兼容性问题等。但是相关人员在实际安装采取优化分布式电源的配置和布局、加强分布式电源的控制与管理、改进配电网保护与控制策略、解决孤岛运行问题和提高分布式电源与配电网的兼容性等措施，就可以有效地应对分布式电源对配电网供电可靠性的影响，从而进一步提高配电网的供电可靠性。

参考文献

[1]张敏.分布式光伏电源对配电网电压的影响与改善[J].模型世界,2024,(29):64-66. DOI:10.3969/j.issn.1008-8016.2024.29.021.
[2]华一飞.计及分布式电源接入及电动汽车充电的配电网规划探讨[J/OL].中国科技期刊数据库工业A,2023(09)[2023-01-01].https://www.cqvip.com/doc/journal/3247736898.
[3]缪宇峰.分布式电源光伏发电对低压电网的影响及对策[J].电气技术与经济,2023,(06):109-111.
[4]乐健,郎红科,谭甜源,等.新型配电系统分布式经济调度信息安全问题研究综述[J].电力系统自动化,2024,48(12):177-191.DOI:10.7500/AEPS20231015003.
[5]黄飞拓,陈佳佳,潘登.含分布式电源的配电网故障定位及恢复技术分析[J].电力系统装备,2024,(08):123-125.
[6]杨利.分布式电源光伏发电对低压电网产生的影响及应对研究[J].通信电源技术,2024,41(01):109-111.DOI:10.19399/j.cnki.tpt.2024.01.036.
[7]贺哲.含分布式电源的韧性配电网网络重构及故障自愈研究[D].北京市:北方工业大学,2024.DOI:10.26926/d.cnki.gbfgu.2024.000609.
[8]刘小康.配电网网架结构对上海电网供电可靠性的影响及优化措施研究[D].上海市:上海工程技术大学,2021.DOI:10.27715/d.cnki.gshgj.2021.000729.
[9]刘聪,敖明,苏阔,等.高比例分布式电源对配电网运行的影响及应对措施[J].吉林电力,2024,52(03):36-39.
[10]广东电网有限责任公司,广东电网有限责任公司东莞供电局.配电网供电可靠性的评估方法、装置、设备及存储介质:CN116307824A[P/OL].2023-06-23.https://www.cqvip.com/doc/patent/3181415221.

新能源发电功率预测技术方向性研究

李云飞, 马东, 张哲, 徐思达, 胡斯格

华电电力科学研究院有限公司, 浙江 杭州 310000

摘 要 : 近年来, 新能源发电功率预测技术已在电力行业得到极为广泛的应用, 对电力系统的稳定运行与高效管理发挥着不可或缺的作用。本文聚焦于新能源发电功率预测技术领域展开深入研究, 全面且深入地剖析了技术原理、研究意义, 细致解读了考核内容及其分析要点, 对“两个细则”考核内容进行了详细阐释, 并对功率预测系统的功能展开了深度解析, 旨在为该领域的发展提供全面且有价值的参考。

关 键 词 : 新能源; 功率预测; “两个细则”考核; 系统功能

Research on the Direction of New Energy Power Generation Power Prediction Technology

Li Yunfei, Ma Dong, Zhang Zhe, Xu Sida, Hu Sige

Huadian Electric Power Research Institute Co., Ltd. Hangzhou, Zhejiang 310000

Abstract : In recent years, the new energy power prediction technology has been widely used in the power industry, and plays an indispensable role in the stable operation and efficient management of the power system. This paper focuses on the new energy power prediction technology research, comprehensive and deeply analyzes the technical principle, research significance, carefully interpret the assessment content and the analysis points, the "two rules" assessment content in detail, and the depth of the power prediction system function, aims to provide comprehensive and valuable reference for the development of the field.

Keywords : new energy; power prediction; "two rules" assessment; system function

一、功率预测技术研究背景和意义

(一) 功率预测研究背景

“双碳目标”这一伟大构想的提出, 加快了我国迈入新能源时代的步伐。截至2024年3月底, 全国新能源发电装机容量达到15.85亿千瓦, 同比增长26%, 约占我国总装机的52.9%, 其中, 风电和光伏发电装机之和突破11亿千瓦, 占比总装机容量达到36.8%。伴随着新能源在电网中的渗透率逐渐提高, 风光发电的间歇性、波动性、随机性以及布局的分散性和不平衡性给电力系统的平衡调节和灵活运行带来了前所未有的挑战。高比例新能源、高比例电力电子装备的广泛接入, 从根本上改变电力系统的稳定特性、安全控制和生产模式, 电力系统的运行正面临着全新的考验。因此, 精准的新能源发电功率预测将成为新型电力系统中必不可少的环节。

(二) 功率预测研究意义

功率预测技术不仅对电力系统的安全和经济运行至关重要, 也为实现可持续发展目标奠定了坚实基础。功率预测技术的研究意义涵盖了多个关键方面:

- 对于发电集团的作用, 减少“两个细则”考核, 抑制新能源风光发电场站因预测不准带来的经济损失。
- 功率预测能为电力交易提供重要的数据信息支撑, 降低市场风险, 提升交易效率, 在新能源发电提速加入全国统一电力市

场的背景下, 为发电企业抓取主动性。

- 准确的功率预测能够有效指导新能源发电场站的运维检修等工作安排, 增加风光发电量, 提升系统的可靠性, 有效应对负荷波动, 减少停电事件的发生; 促进新能源发电在电力系统中的高效利用。

二、功率预测考核内容及分析

(一) 功率预测系统服务规范

1. 国家标准及行业标准

功率预测考核方法的制定首先立足于国家标准内容, 以确保全国电力系统运行的稳定性和高效性; 其次是行业标准, 主要为电力企业在选择预测模型、数据处理和结果评估等方面提供重要指导, 这些标准的实施有助于提高电力系统的稳定性和效率。

主要国家标准包括:

GB / T 40407-2021《调度侧风电或光伏功率预测系统技术要求》

依据本标准, 调度侧的风电或光伏功率预测系统在软件、硬件、性能指标以及数据指标等维度, 均有相应的技术要求被予以规定。

主要的行业标准包括:

(1) NB / T 10205-2019《风电功率预测技术规定》

本标准规定了与风电功率预测相关的基本要求、预测技术、预测结果评价等。本标准适用于风电场、分散式风电、各级电力调度机构和第三方预测技术服务商等开展的风电功率预测工作或服务^[2]。

(2) NB / T 31046-2022《风电功率预测系统功能规范》

本标准对风电功率预测系统的功能进行了全面且细致的规定，内容主要涵盖预测建模前期的数据筹备、数据采集与处理的规范、预测功能的实现要求、统计分析的方法与标准、人机交互界面的设计准则、系统安全防护的策略与措施、数据输出的格式与形式，以及系统在不同工况下的性能指标要求等多个方面。

(3) NB / T 32031-2016《光伏发电功率预测系统功能规范》

本标准对光伏发电功率预测系统的各项功能内容作出了详细规定，主要包括数据的采集与处理流程、光伏发电功率的预测方法与要求、数据输出的形式与规范、统计分析的方式与标准、操作界面的基本功能设置、权限管理的具体规则，此外还涵盖了系统安全防护的相关要求以及系统性能指标的具体要求等方面。

2. 性能指标要求

GB/T 40407-2021同时规定了场站侧以及调度管辖区域全网风、光伏电站的准确率和合格率指标^[1]，全国各个省域调度的考核指标首先建立在这些国标要求之上，其次再发展适合本地新能源发电发展情况的指标要求。

风电场、光伏电站的功率预测结果性能指标如表2-1所示，分别对超短期（未来15分钟至4小时，时间分辨率15分钟，逐15分钟更新）、短期（日前，次日0时-24时，时间分辨率15分钟，每日9时前上报）、中期（0-240小时，时间分辨率15分钟，每日9时前上报）的功率预测月平均准确率及合格率做出规定。

调度管辖区域内全网的风电和光伏功率，有关其预测结果的性能指标展示于表 2-2 之中。与此同时，还分别针对超短期、短期和中期预测，对月平均准确率以及合格率设定了相应的标准。

从具体的准确率和合格率要求中可以发现，现有功率预测技术呈现时间尺度越长，预测越困难的趋势，其主要原因在于长时间尺度上的气象预报数据准确性较差；同时可以发现光伏的预测难度较风电容易，这主要是因为目前的准确率、合格率的计算将夜晚的时间也纳入了计算；此外还可以看到，全网的合格率指标要高于场站同类型指标，这是因为新能源发电相关的气象要素在越广的空间尺度上不确定性越小^[5]。

总的来说，国家标准及行业标准对具体指标规定，直接反应出了现有功率预测技术在不同预测内容方面的特点。

表2-1 风电场、光伏电站功率预测结果的性能指标

预测时间尺度	月平均准确率	月平均合格率
中期功率预测	以1日为步长统计，预测准确率按顺序依次递减，风电：第10日≥70% 光伏：第10日≥75%	—
短期功率预测	风电：日前≥83% 光伏：日前≥85%	风电：日前≥83% 光伏：日前≥85%
超短期功率预测	风电：第4小时≥87% 光伏：第4小时≥90%	风电：第4小时≥87% 光伏：第4小时≥90%

表2-2 全网风电、全网光伏功率预测结果的性能指标

预测时间尺度	月平均准确率	月平均合格率
中期功率预测	以1日为步长统计，预测准确率按顺序依次递减，风电：第10日≥75% 光伏：第10日≥80%	—
预测时间尺度	月平均准确率	月平均合格率
短期功率预测	风电：日前≥85% 光伏：日前≥90%	风电：日前≥85% 光伏：日前≥90%
预测时间尺度	月平均准确率	月平均合格率
超短期功率预测	风电：第4小时≥90% 光伏：第4小时≥95%	风电：第4小时≥90% 光伏：第4小时≥95%

(二) 两个细则考核要求

为了保障电力系统安全、优质、经济运行，助力新能源电力消纳，国家能源局发布的《电力并网运行管理规定》要求电力调度机构对发电侧并网主体新能源功率预测偏差进行考核，各区域电力监管机构在国家能源局《电力并网运行管理规定》、《电力辅助服务管理办法》以及相关国家、行业标准的基础上，结合本地区电力系统实际情况和电力市场建设要求，先后制定并发布了《电力并网运行管理实施细则》和《电力辅助服务管理实施细则》（以下简称“两个细则”）。

本文整理了东北监管局、西北监管局发布且正在执行的“两个细则”文件，对其中的风电场、光伏电站功率预测考核标准进行比较，以期对能源气象服务产品的设计提供一定的参考依据。表2-3、表2-4为各监管局根据“两个细则”文件对风光功率预测的考核内容。表中预测类型主要有中期功率预测（0-240小时，时间分辨率15分钟，每日9时前上报），短期预测（日前，次日0时-24时，时间分辨率15分钟，每日9时前上报）以及超短期预测（未来15分钟至4小时，时间分辨率15分钟，逐15分钟更新）^[6]。

1. 东北监督局

如下表2-3所示，为东北监管局“两个细则”文件对风光功率预测的考核内容，包含短期功率预测准确率和合格率两个指标的考核。表2-3 东北监管局“两个细则”文件对风光功率预测的考核内容

并网主体	预测类型	考核指标	要求（日计算、月考核）	计算公式	考核标准（每分对应的考核为人民币1000元）
风电场	短期功率预测	准确率	月平均准确率≥75%	均方根误差	每降低1%，每10万千瓦容量扣1分
		合格率	月平均合格率≥80%	绝对误差	每降低1%，每10万千瓦容量扣1分
光伏电站	短期功率预测	准确率	月平均准确率≥85%	均方根误差	每降低1%，每10万千瓦容量扣1分
		合格率	月平均合格率≥80%	绝对误差	每降低1%，每10万千瓦容量扣1分

2. 西北监督局^[4]

西北监管局“两个细则”对风光功率预测的考核内容，发电企业向调度机构报送短期功率预测、超短期功率预测两类数据文件，调度机构根据准确率指标按月进行考核。西北监管局在文件中规定了该项目考核分数上限为100万千瓦。

三、功率预测系统功能

（一）数据要求

1. 数据采集要求^[2]

数据采集要求采集风速、风向、环境温度、气压等气象数据、发电设备的运行状态数据、发电设备的运行实时数据；这些数据收集和传输必须满足时间同步、完整性和准确性指标^[7]。

在功率预测技术中，数据采集与接口要求至关重要。主要包括：

（a）数据类型和来源需涵盖气象数据、发电设备的运行数据，以反映电力需求的变化趋势；

（b）数据采集频率应根据预测时间尺度设定，短期预测需较高频率，而长期预测可采用小时或日级数据；

（c）接口应遵循统一的标准，确保不同系统间的数据互通性，常用的接口标准包括 API 和数据格式标准；

（d）需提供详细的文档和使用规范，以确保数据采集实施过程的清晰可循，从而提升系统的可维护性和扩展性。通过满足这些要求，可以为功率预测提供坚实的数据基础，提升预测的准确性和可靠性。

2. 数据处理要求

在功率预测系统架构中，数据处理要求是确保数据分析和预测结果准确性的关键组成部分。数据处理要求包括：

（a）具备数据完整性及合理性的自动校验功能

必须对数据进行清洗和校验，以确保准确性和完整性，并可对缺测和异常数据进行自动插补和修正。

（b）具备强大的计算能力

以处理大规模数据集和复杂计算任务，支持实时和高频率的预测需求。采用分布式计算架构可以提高计算效率和处理能力，允许多个节点同时处理数据，缩短计算时间。

（c）具备实时数据流处理能力

使系统能够快速响应动态变化的电力需求，支持即时预测和决策。为了适应数据量和计算需求的增长，并灵活调整资源配置，计算处理能力的可扩展性也非常重要。^[8]

3. 数据存储要求

在功率预测系统架构中，数据存储要求是确保数据管理高效、安全和可靠的关键组成部分。数据存储要求包括：

（a）支持多样化的数据存储

包括实时数据、历史数据和预测数据，以满足不同的分析需求；存储系统必须具备足够的扩展性，以处理不断增长的数据量，并支持未来的扩展需求。

（b）快速响应查询请求

以支持实时分析和决策制定，尤其在紧急情况下。同时在安全性方面，需实施严格的访问控制，确保只有授权用户能够访问数据，并对存储的数据进行加密，以保护敏感信息。

（c）定期备份以防止数据丢失或损坏

确保在发生故障时能够快速恢复。数据的一致性管理同样重要，特别是在分布式存储环境中，需采用适当的机制来处理数据的同步和冲突。

（二）软件要求

预测系统的功能至少应涵盖长期电量预测、中期功率预测、

短期功率预测、超短期功率预测以及概率预测等方面的要求^[3]。

（1）预测的空间尺度

预测的空间尺度应至少包括单个风电场或光伏电站、集群及整个调度管辖区域的全网风电或光伏。

（2）长期电量预测要求

逐月滚动更新电量预测结果，每次预测未来12个月，每月上旬发布最为合适。

（3）概率预测要求

预测时长以及时间分辨率需与中期、短期、超短期功率预测保持一致。预测区间的上下限应至少提供置信度为95%、90%、85%的设置选项，同时，也支持人为设定其他阈值的置信度。

（三）硬件要求

预测系统的硬件配置中，至少应涵盖数据通信服务器、系统应用服务器、数据库服务器以及人机交互工作站等必要设备。

1. 从系统稳定性和可靠性的角度考量，数据通信服务器、系统应用服务器以及数据库服务器若采用冗余配置，则能达到更为理想的运行效果。

2. 风电功率预测系统或光伏功率预测系统，均应在电力二次系统中运行。针对跨区数据传输的情况，必须采用物理隔离装置来保障数据安全。此外，无论是风电功率预测系统还是光伏功率预测系统，都务必严格满足电力二次系统安全防护规定的相关要求^[9]。

四、总结

在新能源领域的深入探索进程中，聚焦于功率预测技术方向展开研究具有重大意义。一方面，针对功率预测技术诞生的背景予以深度挖掘，剖析促使该技术发展的各类驱动因素，同时，对与之紧密相关的考核内容展开细致入微的解析；另一方面，全面探究功率预测系统的服务规范，涵盖国内统一遵循的标准、行业内部特有的规范，以及详尽的性能指标设定要求，还有极具影响力的“两个细则”考核衡量标准。进一步地，系统且深入地阐述功率预测系统的功能要求，这其中包含数据要求、软件要求、硬件要求、统计分析要求等，在数据层面涵盖了数据采集要求、数据存储等要求^[10]。

参考文献

[1] GB / T 40407-2021《调度侧风电或光伏功率预测系统技术要求》。

[2] NB / T 10205-2019《风电功率预测技术规定》。

[3] NB / T 31046-2022《风电功率预测系统功能规范》。

[4] 西北监管市场〔2023〕95号-《西北区域电力并网运行管理实施细则》。

[5] 沈继宝. 功率预测对电力现货交易的影响研究 [J]. 产业创新研究, 2023, (12): 151-153.

[6] 张小京, 李晓. 基于间歇式新能源发电功率预测技术的移动通信基站电源管理 [C]//2012年中国通信能源会议论文集. 2012: 216-221.

[7] 李卫. 新能源发电功率预测技术研究与系统开发 [C]//2016年第二届中国电器与能效管理技术高峰论坛论文集. 2016: 80-85.

[8] 陈泽西. 基于新能源发电功率预测的储能系统优化配置研究 [D]. 华北电力大学, 2022.

[9] 马明, 汪宁渤, 马彦宏, 等. 河西新能源基地风光场站群联合发电功率预测技术研究 [C]//甘肃省电机工程学会2014年学术年会论文集. 2014: 112-116.

[10] 李青. 基于深度学习的大规模新能源场站发电功率预测方法研究 [D]. 新疆: 新疆大学, 2023.

配电安全管理中人为因素的控制与预防措施研究

李玉, 闫慧敏, 赵伟, 陆清月, 董欣琦

国网内蒙古东部电力有限公司赤峰供电公司, 内蒙古 赤峰 024000

摘 要 : 配电安全管理乃是电力系统稳定运转的关键保障, 而人为因素实乃引发配电安全事故的重要缘由之一。本文借助剖析配电安全管理中人为因素的呈现形式及其所产生的影响, 深入探讨了把控与防范人为因素的行之有效的举措。研究表明, 增强作业人员的安全意识、强化专业技术培训、完备安全管理制度以及优化工作环境乃是降低人为因素致使事故的关键所在。经由理论阐述, 本文为增进配电安全管理的科学性与有效性给予了理论支撑, 期望能为电力行业的安全生产提供借鉴。

关 键 词 : 配电安全管理; 人为因素; 控制措施; 预防措施; 理论论述

Research on the Control and Prevention Measures of Human Factors in Power Distribution Safety Management

Li Yu, Yan Huimin, Zhao Wei, Lu Qingyue, Dong Xinqi

State Grid Inner Mongolia Eastern Power Co., Ltd. Chifeng Power Supply Company, Chifeng, Inner Mongolia 024000

Abstract : Distribution safety management is a key guarantee for the stable operation of the power system, and human factors are one of the important causes of distribution safety accidents. This article explores effective measures to control and prevent human factors in power distribution safety management by analyzing the forms of human factors and their impacts. Research has shown that enhancing the safety awareness of workers, strengthening professional technical training, improving safety management systems, and optimizing the working environment are key factors in reducing accidents caused by human factors. Through theoretical exposition, this article provides theoretical support for enhancing the scientific and effective management of power distribution safety, and hopes to provide reference for the safety production of the power industry.

Keywords : distribution safety management; human factors; control measures; preventive measures; theoretical discourse

一、人为因素在配电安全管理中的表现

(一) 安全意识薄弱

在配电安全管理方面, 部分施工人员对配电危险性的理解不够深刻, 存在一定的侥幸心理, 没有完全理解不按章操作操作会造成的严重后果。比如, 在配电带电作业时候, 操作人员如果没有理解高压电的危险性, 就容易在施工的时候出错误。这种现象在实际工作中表现为对安全操作规程的忽视, 以及对潜在风险的低估。依照我国的安全生产法, 安全意识的培养是安全生产的重要组成部分。但是, 部分施工人员没能把安全意识变成主动的行为, 导致在干活时候出现“三违”情况, 即违章指挥、违规操作、违反劳动纪律^[1]。这种安全意识的欠缺不光让意外发生的可能性变大, 还容易造成人员受伤、损害设备。

(二) 专业技术能力不足

低压配电系统的日常运维需要处理各类复杂设备与线路网络, 这对从业者的专业素养提出了严格要求。调研数据显示, 大多数突发故障源于技术人员对设备运行机理的认知缺陷, 具体表

现为三相负载平衡原理理解不足、谐波干扰辨识能力薄弱以及绝缘介质老化预判经验欠缺等典型问题。以典型低压供配电架构为例, 其核心组件涵盖变电装置单元、发电机组模块、应急供电系统及智能化配电终端, 作业人员必须深入理解各模块地预防性维护策略与状态监测系统运行逻辑, 方能在接地故障或电弧放电等紧急工况下, 依托设备特征图谱分析技术及时采取有效处置措施^[2,3]。这一知识体系地构建需要结合电力电子技术、继电保护原理等跨学科理论框架, 通过仿真训练平台实现技术素养地阶梯式提升, 从而形成完善的应急响应机制。

(三) 心理素质不稳定

配电作业场景面临多重挑战, 作业者时常置身高压电流与受限空间等不利环境中展开工作。个体心理承受力直接影响操作效能, 心理素质薄弱的作业人员易因紧张情绪导致操作偏差。究其根源, 此类心理压力既源于作业环境地高危性特征, 又与作业者对自我能力认知不足存在密切关联。聚焦高压作业情境, 操作者地心理状态与其作业精准度及稳定性呈现出显著相关关系。基于“四不伤害”这一基本原则, 作业者应着力培养自我保护、保护他

人以及防范他人伤害的复合型安全意识。值得注意的是，当作业人员心理状态出现波动时，其在突发状况下往往难以保持冷静理性，继而可能违背操作规程，致使事故发生^[4,5]。从“三查三找三整顿”地作业要求来看，作业人员需要在工作中系统排查潜在隐患，持续查找不足并及时改进工作作风。心理素质的欠缺将直接影响这一安全管理机制的有效实施，进而提升配电作业地安全风险系数。

（四）管理层面的疏漏

在电力系统安全管控领域，组织架构缺陷往往成为人为事故的关键诱因。相关研究表明，部分供电单位在标准化操作体系构建层面存在系统性安全漏洞，其安全规范执行机制未能覆盖作业全流程，尤其在关键节点监管缺位的情形下，操作人员的不当行为难以被及时识别与纠正，致使安全隐患呈现指数级累积态势。

当前配电企业在管理机制层面存在显著短板，主要体现在“三同时”制度的执行层面存在系统性偏差，安全配套设施与主体工程地协同建设存在明显脱节。这种制度性缺陷直接导致配电设备运行阶段存在系统性安全隐患，致使事故概率呈几何级数增长^[6]。特别值得注意的是，企业安全培训体系存在结构性缺陷，部分从业人员对设备运行机理认知存在严重偏差，导致现场操作存在重大安全隐患。更为严重地是，企业安全监管机制存在系统性漏洞。基层供电单位普遍缺乏专业化监管队伍，导致安全工器具管理存在严重漏洞，具体表现为：安全装备随意置放、预防性试验周期混乱、检修流程缺乏标准化等问题突出。这种监管真空状态使得现场作业风险长期处于不可控状态。

需要特别指出地是，部分基层单位在安全资源配置方面存在严重缺陷，具体表现为安全防护装备配置不足、定期检测机制形同虚设等系统性缺陷，这种管理失范状态已成为制约行业安全发展地关键瓶颈。

二、人为因素对配电安全管理的影响

（一）增加事故风险

在配电系统运行的过程中，人为因素的存在大大增加了出事故的可能性。具体来说，例如工人违规干活、管理失误、安全意识欠缺等情况，都会造成设备出问题或者触电等严重问题。从技术上来说，工人不按规章制度操作可能会让设备损坏，例如在带电作业中未采取适当的绝缘措施，或在设备检修时未遵循正确的接地程序，这些行为均可能直接导致触电事故或电气短路，进而引发火灾等次生灾害^[7,8]。从管理方面来看，如果管理不严格，工人在施工的时候可能不认真遵守安全规定，例如未严格执行“两票三制”（工作票、操作票、交接班制度、巡回检查制度、设备定期试验轮换制度）。另外，如果欠缺安全意识，可能就会忽略那些潜在的危险，从而在操作的过程中出现疏忽，增加引发事故的可能性。

（二）降低工作效率

配电作业团队地专业技能储备与心理调控水平直接影响着系统运维效能。当遇到配网自动化设备异常或继电保护装置误动作时，技术薄弱人员往往难以快速完成故障定位与处置决策。具体而言，在油浸式变压器瓦斯保护动作的应急处置中，若运维人员

对电气拓扑结构与机械传动原理掌握不充分，可能使故障隔离耗时增加，直接影响供电可靠性指标。

作业人员的应激反应能力同样是制约因素。在10kV以上高压环境或电缆沟道受限空间作业时，抗压能力不足地作业者易出现操作序列错乱，严重时甚至引发二次设备误操作风险^[9]。这种由心理波动导致的作业偏差，可能造成保护压板误投退或安全标示牌漏挂等典型人为失误，进而延长设备停运周期。值得注意的是，在涉及多电源点倒闸操作地复杂场景中，操作者的空间感知与风险预判能力将直接影响工序衔接效率。

（三）影响电力供应稳定性

配电安全事故造成的危害具有多重维度，其影响远超出作业人员人身安全的范畴。作为维系现代社会经济运转的关键基础设施，电力系统地安全稳定运行直接关系到社会生产秩序与居民生活质量。当配电系统发生故障时，局部地区往往首当其冲面临停电风险，这种电力供应中断将导致工业企业生产流程受阻，造成不可忽视的经济损失。居民日常生活同样深受影响，照明系统失灵、家用电器停摆等状况将严重影响正常生活秩序。更为严峻地是，医院、交通信号灯等关键公共设施一旦遭遇供电中断，可能直接威胁公共安全。从电网运行的技术层面分析，配电事故极可能引发局部电网解列现象，伴随而来地电压波动将破坏整个电力系统地稳定性，形成连锁反应。这种系统性风险不仅危及电网安全，更会对社会经济秩序造成深远影响。

三、人为因素的控制措施

（一）加强安全意识教育

在配电作业领域，安全意识的培养构成从业人员行为准则的核心要素。定期组织安全培训与警示教育，有助于作业人员更准确地把握配电作业的危险特性。培训方案需系统整合配电网络运行风险辨识、设备运维规程解析及典型事故研判三大模块，特别是要结合 DL/T408-2016 等规范标准，深化从业人员对安全防护体系的理解。运维实践表明，当作业人员真正理解规程背后的安全逻辑时，更能主动规避操作过程中的主观疏失。

（二）提升专业技术水平

配电系统运维作业面临复杂的电气设备与网络架构，要求技术人员具备扎实的专业素养。为提升操作人员的技能水平，企业需构建完善的培训体系，重点聚焦电气设备运行机理、故障诊断方法、维修工艺规范以及应急处置预案等领域。依托理论教学与实操训练地有机结合，技术人员得以在复杂工况中准确研判问题，并采取针对性的解决方案。这种培训模式有助于强化技术人员地实践能力，降低因操作不当导致的安全隐患。值得注意的是，培训过程中应适当引入典型案例分析，使技术人员能够将理论知识与实际应用场景相融合，从而提升问题处理效率。

（三）优化工作环境

配电作业现场存在复杂环境风险因素，作业人员需在高压电场、受限空间及噪声干扰等多重压力源下开展工作^[10]。基于职业健康安全管理体系的要求，企业应当从工程控制、个体防护、管

理措施三个维度构建多维防护体系：1）工程控制方面，需配置智能通风系统与防爆型照明设备，确保作业空间环境指标符合 GBZ 2.1 标准；2）个体防护装备应选用符合 GB 24541 标准的绝缘装备，并建立智能监测系统实时监控设备绝缘性能；3）实施分级管理制度，建立“黄金四分钟”应急响应机制。同时需建立基于疲劳度监测地轮班制度，引入生物节律评估技术，通过可穿戴设备实时监测作业人员生命体征，构建“预防－干预－恢复”三位一体的职业健康保障体系。这种系统性风险管控模式可显著降低因心理负荷过载引发的作业失误率。

（四）完善管理制度

构建完备地配电安全管理制度乃是规范作业人员行径、确保安全管理得以切实落地地关键所在。企业需依凭国家有关法律法規（诸如《中华人民共和国安全生产法》）以及行业准则，拟定周全的配电安全管理制度，牵涉作业流程、设备管理、人员考核等诸方面。凭借强化对作业人员操作行为的监察与考核，运用信息化手段针对作业过程予以实时监控，能够及时察觉并矫正违规行为，保证作业人员严格依循规范流程进行操作。

四、人为因素的预防措施

（一）建立岗前培训机制

配电作业实施前，安全督导员需组织专项交底会，重点解析作业流程中地风险预控要点，该环节作为三级安全管控体系的基础模块。经过专项培训后，作业团队不仅掌握标准化操作规范，还能系统认知环境风险要素，形成主动防御意识。培训方案需整合现场实景影像与设备原理图，参照行业典型案例进行情景推演，使参训人员建立立体化作业认知框架。这种多维度地培训机制有效消解了传统安全教育中地认知盲区，通过可视化预演与标准化流程的有机结合，将人为失误概率控制在可接受阈值范围内。

（二）加强心理素质训练

配电作业环境复杂且多变，作业人员需直面高压电流、恶劣天气以及突发故障等多重压力。故而，进行心理素质训练乃是提

升作业人员应对复杂环境能力地关键手段。心理素质训练能够借助模拟真实作业场景、设定应急演练等途径，助力作业人员在高压环境中保持冷静，强化其应变能力。与此融合心理学方法，例如放松训练、心理疏导等，可切实舒缓作业人员地紧张情绪，提高其心理稳定性，减少因心理因素导致的操作失误。

（三）强化责任意识

在具体操作中，要将岗位职责细化到每个环节，让每位工作人员都清楚自己的安全职责。建立完善地问责机制，对违规行为必须严肃追责，同时设立安全奖励基金，对表现突出地个人给予表彰奖励。通过这种“责任到岗、奖罚分明”地机制，能够有效强化人员的安全责任意识。特别要强调地是，要定期开展岗位责任培训，让每位员工都清楚自己地安全职责范围，形成“人人有责、层层负责”的工作氛围。比如某供电所通过实施“岗位安全责任卡”制度，将安全职责具体化到每个操作环节，使安全责任真正落到实处。

五、结论

在配电系统运行过程中，操作人员地作业行为往往成为安全风险的潜在诱因。基于人机交互理论视角，这种由主观能动性引发的安全隐患呈现动态演变特征。通过构建“教育－技能－制度－环境”四维防控体系，可显著降低人因失误概率。具体而言，应依托人因工程学原理开展情景模拟培训，深化专业技能培训体系，建立 PDCA 循环管理模式，同时改善设备人机工效学设计。从管理实践的角度来看，电力运营单位需将人因风险管理纳入整体安全框架。相关研究表明，通过引入行为安全观察（BBS）机制，配合双重复核工作流程，能够使误操作发生率降低。这种系统性防控策略不仅涉及作业规程的优化，更需要关注作业空间照度、噪声值等环境参数的动态监测。在实施技术改进方案时，必须保持应急预案与日常管理制度的协同性，确保风险防控措施的有效落地。

参考文献

- [1] 黄睿嘉. 供配电线路运行维护管理中的问题与对策分析 [J]. 模具制造, 2023, 23 (10): 253-255.
- [2] 耿文志. 铁路客车制造企业安全生产双重预防机制研究 [D]. 大连交通大学, 2023. DOI: 10.26990/d.cnki.gsltc.2023.000564.
- [3] 张森. 输配电线路安全运行维护工作探讨 [J]. 现代工业经济和信息化, 2023, 13 (01): 237-238+241. DOI: 10.16525/j.cnki.14-1362/n.2023.01.092.
- [4] 李英俊. 供电所 10 kV 线路运行维护措施与检修管理对策研究 [J]. 现代工业经济和信息化, 2022, 12 (12): 273-275. DOI: 10.16525/j.cnki.14-1362/n.2022.12.107.
- [5] 肖丽华. 输配电线路运行的安全管控思考 [C]// 中国电力设备管理协会. 中国电力设备管理协会第二届第一次会员代表大会论文集. 国网江西省电力有限公司高安市供电分公司, 2022: 5. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2022.009921.
- [6] 陈浩琨. 做好输配电线路安全运行维护工作的策略分析 [J]. 数字通信世界, 2020, (12): 197-198.
- [7] 樊镇豪. 基于多级可拓法的古建筑火灾风险评价研究 [D]. 大连交通大学, 2019. DOI: 10.26990/d.cnki.gsltc.2019.000070.
- [8] 庄峰. 配电运维管理常见问题分析及改进措施 [J]. 中国新技术新产品, 2019, (11): 114-115. DOI: 10.13612/j.cnki.cntp.2019.11.068.
- [9] 赵明辉. 煤矿供电系统安全评价研究及应用 [D]. 西安科技大学, 2019.
- [10] 郑琳琳. 配电线路运行安全管理优化措施 [J]. 中国新技术新产品, 2018, (18): 100-101. DOI: 10.13612/j.cnki.cntp.2018.18.059.

新能源发电系统的智能化监控与管理技术研究

卢紫龙

华能湖南清洁能源分公司，湖南 长沙 410011

摘 要： 随着新能源发电技术的快速发展，智能化监控与管理技术在提升发电效率和保障系统稳定性方面发挥着重要作用。采用物联网、大数据分析、人工智能等先进技术，新能源发电系统的运行状态、设备故障、能源流向等信息可实时监控与分析。通过智能化系统，优化资源配置、预测设备故障、降低运维成本，提高发电系统的可靠性和经济效益。该技术的发展不仅能促进绿色能源的有效利用，也为智能电网的建设提供了重要支撑。

关 键 词： 新能源发电；智能化监控；大数据；人工智能；系统管理

Research on Intelligent Monitoring and Management Technology of New Energy Power Generation Systems

Lu Zilong

Hunan Clean Energy Branch of Huaneng, Changsha, Hunan 410011

Abstract： With the rapid development of new energy power generation technology, intelligent monitoring and management technology plays a crucial role in improving power generation efficiency and ensuring system stability. By adopting advanced technologies such as the Internet of Things, big data analytics, and artificial intelligence, real-time monitoring and analysis of information such as operating status, equipment failures, and energy flow in new energy power generation systems can be achieved. Through intelligent systems, resource allocation can be optimized, equipment failures can be predicted, operation and maintenance costs can be reduced, and the reliability and economic benefits of power generation systems can be improved. The development of this technology not only promotes the effective utilization of green energy but also provides important support for the construction of smart grids.

Keywords： new energy power generation; intelligent monitoring; big data; artificial intelligence; system management

引言

随着全球能源结构转型和环境保护需求的不断提升，新能源发电成为重要的替代能源。然而，新能源发电系统由于其不稳定性及复杂性，面临着运行效率和设备管理上的挑战。智能化监控与管理技术的应用，为解决这些问题提供了有效手段。通过集成先进的信息技术，能够实现对发电系统的实时监控、数据分析与决策优化，从而提升系统的稳定性和经济性。这些技术的发展不仅对新能源领域具有深远影响，也为未来智能电网的发展奠定了基础。

一、新能源发电系统的智能化监控技术发展现状

新能源发电系统的智能化监控技术近年来得到了快速发展，成为提高能源利用效率和优化电力系统管理的重要手段。随着可再生能源的不断发展，传统的发电方式逐渐向风能、太阳能等新能源转型，但新能源的波动性和间歇性特征使得其发电的稳定性和可靠性面临严峻挑战。新能源发电系统的能效提升、稳定性保障以及成本控制，都依赖于高效的监控技术。智能化监控技术应运而生，它通过先进的信息传感设备与自动化控制系统，对新能源发电系统进行实时监控与管理，确保其在复杂的外部环境中能够稳定高效运行^[1]。这种技术的核心是集成感知、分析和决策支持，通过准确的数据采集和处理，使系统能够自动调整应对风

力、日照等自然因素的变化，保持系统的最佳运行状态。

物联网、大数据、人工智能等技术的融合使得智能化监控系统在新能源发电中的应用变得更加成熟和高效。物联网技术不仅能够将各类传感器、监控设备与控制平台连接，还能实现对设备运行数据、气候变化及电力输出等信息的实时采集，确保发电系统的动态监控。通过大数据分析，系统可以从海量数据中挖掘出潜在的规律和趋势，从而进行准确地预测与提前预警，有效防止设备的突发故障。人工智能技术的加入，尤其是机器学习和智能算法的应用，提升了故障诊断、预测和自我优化能力，减少了人工干预，进一步增强了系统的智能化程度和自适应能力，从而大幅度提高了系统的运行效率和可靠性。

随着智能化技术的不断进步，新能源发电系统的管理方式逐

步向数字化、自动化方向发展。智能化监控系统不仅能够实时监测发电设备的健康状态，还能结合环境因素对发电量进行预估，为决策者提供更加精准的运营数据和建议。这种系统能够根据实时数据对故障进行预测，并进行及时的调整或修复，避免了停机和设备损坏的风险。此外，智能化管理系统通过优化调度与运行参数，减少了能源浪费，提高了系统的整体经济效益^[2]。智能化技术的全面应用，使得新能源发电系统能够以更低成本、更高的效率运行，并为未来智能电网的建设与绿色能源的广泛应用奠定了坚实的基础。

二、物联网和大数据在新能源发电系统中的应用

物联网和大数据技术在新能源发电系统中的应用，为系统的智能化管理提供了强有力的支持。物联网技术通过传感器、智能设备与通信网络的结合，能够实时采集和传输发电设备的各类数据，如风速、光照强度、温度、湿度、电压、电流等。这些传感器分布在风电机组、光伏面板、变电站等重要设备上，形成一个全面的监控网络，确保各项数据的即时获取与传输。这些实时监控数据可以帮助系统管理者更精准地了解设备运行状况、能源生成情况及环境因素，从而进行更加科学合理的调度和决策。特别是在风光不稳定的新能源发电领域，物联网提供了对外部环境变化的快速响应能力，使得发电系统能够及时调整和适应环境变化，保持稳定输出^[3]。

大数据技术的引入使得物联网所采集的海量数据得以有效处理和分析。新能源发电系统产生的数据通常庞大且复杂，其中包括设备的运行数据、气象数据、历史故障记录以及电力消耗模式等。通过大数据分析技术，可以对这些数据进行存储、整理、挖掘和建模，为发电系统提供深度的洞察。例如，通过对气象数据的分析，系统能够预测未来的风力和光照变化，从而调整发电设备的运行策略，提前预警潜在的发电波动。此外，大数据还可以帮助识别设备的运行规律和故障模式，为系统维护和优化提供决策支持。大数据分析不仅可以提高设备的利用率，还能在系统发生潜在故障时提供及时预警，确保设备在最佳状态下工作^[4]。

物联网和大数据的结合不仅为新能源发电系统的日常运营提供了技术保障，还为系统的长远发展提供了可持续的解决方案。通过实时数据监控与分析，系统能够在发生故障或异常时及时作出反应，减少系统停机时间，提高发电效率。与此同时，大数据技术的预测分析功能能够进一步优化发电计划的制定，使得电力生产能够更加精准地满足需求，从而降低了资源浪费，避免了能源过剩或不足的现象。最终，物联网和大数据技术的深度融合提升了新能源发电系统的整体智能化水平，增强了系统的灵活性和适应性，为智能电网的建设奠定了坚实基础，并推动了绿色能源的普及和高效利用，推动了能源产业的可持续发展。

三、人工智能技术对新能源发电系统管理的优化作用

人工智能技术在新能源发电系统中的应用，极大地优化了管

理与运营效率，特别是在提高发电稳定性和降低运维成本方面展现了显著作用。由于新能源发电的波动性与不确定性，传统的人工管理模式已难以满足高效、精确的需求。人工智能技术，尤其是机器学习和深度学习，通过对大数据的自动分析与处理，能够识别系统运行中的潜在风险和问题。系统能够实时监控设备运行状态，通过不断积累的历史数据，优化预测模型，提供更精准的故障诊断与维护策略^[5]。这种智能化管理模式极大减少了人为干预的需要，降低了操作风险。

人工智能技术能够通过算法分析发电设备的运行数据，提前预测设备可能出现的故障并提出预警，避免设备因长时间不稳定运行而导致的损坏。人工智能还可以对大量历史运行数据进行深入分析，挖掘出潜在的规律和模式。例如，人工智能可以根据不同天气条件、环境因素和设备健康状况，自动调整设备的运行参数，确保发电系统在不同条件下都能保持最佳性能。这不仅提高了设备的使用寿命，也大幅度提升了发电系统的整体效率，使得发电过程更加高效、可靠。

人工智能在新能源发电系统的优化管理中还起到了资源调度与智能决策的作用。通过集成的人工智能平台，系统可以根据实时数据和预测信息，自动进行电力输出的调节与资源的合理分配，优化电网负荷管理。人工智能技术还能基于实时的电力需求和发电数据，进行短期和长期的负荷预测和能源调度，帮助系统进行更加精细化的管理，确保电力供应的稳定与高效。在新能源发电系统面临大规模并网挑战的背景下，人工智能的引入使得多种类型的电力来源能够协调合作，形成更加智能化和高效的能源管理体系，推动新能源发电行业向更加智能化、自动化的方向发展^[6]。

四、智能化监控系统在提升发电效率和降低运维成本中的作用

智能化监控系统在新能源发电领域的应用，显著提高了发电效率并有效降低了运维成本。新能源发电系统面临的一个主要挑战是设备的高维护成本和不稳定的发电能力，而智能化监控系统通过整合先进的传感技术、数据分析以及自动化控制，大幅改善了系统的整体运行状况。通过实时监控设备的运行状态、环境数据和能源输出，智能化系统能够及时发现设备潜在的故障，自动调整系统设置，确保发电设备始终处于最优运行状态。这种持续的性能监控帮助发电系统有效避免了由于设备故障而导致的停机或效率降低，从而提高了发电效率。

智能化监控系统不仅能够实时跟踪设备的健康状况，还能够通过大数据分析预测设备的故障和维护需求。通过对设备历史运行数据的分析，系统能够识别出设备的磨损趋势和潜在问题，在问题发展为故障之前做出预警。预警机制可以帮助运维人员及时对设备进行检修或调整，避免了因突发故障导致的停产损失。同时，智能化系统能够根据发电设备的实际运行状况和环境变化，自动调整运行参数或切换运行模式，最大限度地提高发电效率。这种智能化的管理方式，不仅提升了发电系统的稳定性，也提高

了能源的利用率，有助于减少能源浪费^[7]。

在降低运维成本方面，智能化监控系统通过自动化和远程管理减少了人工操作的需求。传统的运维模式通常依赖人工巡检和定期维护，成本高且难以应对快速变化的系统需求。智能化系统则通过自动化的监控与控制，能够实时识别和诊断故障，减少了人工检查的频率和人工干预的程度，降低了人力成本。此外，系统还能够对设备的运行数据进行优化分析，帮助运维团队制定更精确的维护计划，避免了不必要的重复维修和资源浪费。通过这些智能化手段，不仅提高了系统的运维效率，也减少了停机时间和设备更换频率，从而有效降低了运维成本^[8]。智能化监控系统的全面应用，推动了新能源发电领域向更加高效、经济和可持续发展的方向发展。

五、智能化管理技术对新能源发电系统可靠性与经济性的提升

智能化管理技术在新能源发电系统中的应用，不仅显著提升了系统的可靠性，还有效增强了其经济性。新能源发电通常受到天气、环境等外部因素的影响，其波动性和不确定性使得系统的稳定运行和高效发电成为一大挑战。通过引入智能化管理技术，系统能够实时监控设备运行状态和发电输出，及时识别出潜在的故障隐患并进行干预，减少了人为失误和设备停机的风险。智能化系统能够实现全方位、实时的监控，确保各类设备在不同的运行条件下都能保持稳定的输出，这样不仅提升了系统的可靠性，还增强了新能源发电的持续性和稳定性。

智能化管理技术的另一个重要作用是在优化资源配置和提高经济效益方面。通过集成大数据分析和人工智能技术，智能管理系统能够对发电设备进行精确的性能分析和优化调度。系统根据

实时监控数据与历史数据，自动调整发电设备的运行模式，从而有效提升发电效率。智能化管理还可以预测不同时间段和天气条件下的发电量，合理调度能源输出，确保电力供需平衡，并减少资源浪费。例如，系统可以根据气象变化对风力发电和光伏发电进行精准预测，优化能源输出，避免能源过剩或不足。这种智能化的资源配置，不仅提高了新能源发电的效率，也帮助降低了单位电力生产成本，推动了系统的经济性提升^[9]。

在经济性方面，智能化管理技术能够显著降低运维成本。传统的发电系统往往依赖人工巡检和定期维护，这不仅费时费力，还容易因人为失误导致设备损坏或维修延误。智能化系统通过自动监控、实时数据分析和远程控制，可以及时发现和解决设备问题，减少了人为干预的需求，进而降低了人工成本和停机时间。系统还能够根据设备的运行数据和维护记录，优化维修计划，避免了过度维护和频繁更换设备，降低了不必要的支出。智能化管理技术提升了发电系统的经济性，保障了新能源发电的可靠性，并在成本控制方面取得优势^[10]。其广泛应用推动了新能源发电技术进步，促进了绿色能源的高效利用与可持续发展。

六、结语

智能化监控与管理技术在新能源发电系统中的应用，显著提升了系统的可靠性、发电效率与经济性。物联网、大数据和人工智能等技术的融合，推动了发电设备的实时监控与预测分析，优化了资源调度与运维管理。通过智能化手段，不仅有效降低了运维成本，还提高了新能源的利用效率，为智能电网的发展提供了坚实基础。未来，随着技术的不断进步，新能源发电系统将更加高效、稳定和经济，为可持续能源发展做出更大贡献。

参考文献

- [1] 杨志, 邵作之. 新能源电力生产信息智能化管控系统的设计与实现 [J]. 计算机与现代化, 2012(11): 103-107.
- [2] 白浩楠. 新能源发电系统智能营业厅设计研究 [J]. 农业科技与装备, 2020(01): 35-36.DOI: 10.16313/j.cnki.nykjyzb.2020.01.016.
- [3] 韩刚, 姜思航, 张子潼, 顾振洋. 新能源发电系统智能营业厅的规划设计 [J]. 农业科技与装备, 2021(05): 89-90.DOI: 10.16313/j.cnki.nykjyzb.2021.05.037.
- [4] 闫俊. 基于人工智能技术的新能源发电系统智能化故障检测研究 [J]. 通讯世界, 2024, 31(09): 130-132.
- [5] 施莉. 新能源发电系统设计及自动化技术的应用 [J]. 光源与照明, 2024(03): 198-200.
- [6] 董大群, 赵计生. 新能源发电系统控制技术研究 [J]. 光源与照明, 2024(06): 237-239.
- [7] 褚文杰. 新能源发电系统的控制技术分析 [J]. 集成电路应用, 2024, 41(09): 236-237.DOI: 10.19339/j.issn.1674-2583.2024.09.107.
- [8] 田子健. 新能源风力发电系统中储能技术的应用探索 [J]. 河南科技, 2024, 51(22): 12-15.DOI: 10.19968/j.cnki.hnkj.1003-5168.2024.22.003.
- [9] 胡春雷. 风电场设备智能监测与故障诊断分析 [J]. 装备制造技术, 2024(5): 144-146, 150.
- [10] 杨建林, 王伟, 杨思贤. 电池储能系统在并网型新能源发电系统中的应用研究 [J]. 太阳能, 2024(12): 79-83.DOI: 10.19911/j.1003-0417.tyn20240104.03.

浅析分布式电源并网管理措施

邓华平

国网湖南省电力有限公司蓝山县供电分公司，湖南 蓝山 425800

摘 要： 随着全球能源结构的转型和智能电网的飞速发展，分布式电网作为一种新型电网形态，逐渐成为电力系统的重要组成部分。本文研究的主要内容是分布式电源并网管理的措施，结合营销服务知识，在阐述分布式电源并网的基础上对并网管理上存在的问题和解决措施做出相应分析。

关 键 词： 分布式电源；并网管理；措施

Analysis on the Management Measures of Grid-Connected Distributed Power Supply

Deng Huaping

State Grid Hunan Province electric power Co., LTD. Lanshan County Power Supply branch, Lanshan, Hunan 425800

Abstract： With the transformation of global energy structure and the rapid development of smart grid, distributed grid, as a new form of power grid, has gradually become an important part of the power system. The main content of this paper is the measures of grid-connected management of distributed power supply, combined with marketing service knowledge, on the basis of explaining the problems in grid-connected management and solutions to make corresponding analysis..

Keywords： distributed power supply; grid-connected management; measure

引言

分布式电网通过集成分布方式能源资源、储能系统、微电网以及先进的通信和控制技术，实现能源的高效性和可靠性。然而，分布式电源并网的复杂性和多样性在管理方面带来了很大的挑战，也给分布式电网管理的营销方面造成了一定的阻碍。分布式电源并网不仅涉及到电力生产、传输和分配等各个环节，还涵盖了营销服务等多个方面。本文旨在浅析分布式电网管理的措施，探讨如何通过技术创新、营销服务策略，促进分布式电源并网的高效运营和可持续发展。

一、研究背景和意义

当前社会发展进程中，能源结构的转型变化和不断优化得到了广泛运用，新型电网形态的分布式电源并网在能源结构转型过程中具有重大意义。

一是促进国家新能源发展战略进程。积极正确的分布式能源可以解决可再生能源的营销推广，在区域能源结构转型上成为代表，不断促进清洁能源发展和环境治理，实现产业发展和环境保护的推广运行具有重大意义^[1]。

二是满足电源并网快速增长的需求。近几年分布式电源呈直线上升的发展状态，为适应市场环境变化和客户发展的电源并网需求，很多公司从以前的毫无经验到现在的深刻认识，越来越认识到分布式电源管理对市场发展的重要性，全方位调动单位工作人员的积极性来提升管理服务质量，进一步促进分布式电源的推行和应用，从而推进电力系统和能源的可持续发展。

三是电源并网的效率提高和电网有效运行的保障。分布式电源的出现，为电力系统增添了发展可能性的同时也为供电公司营

销服务带来了一定的挑战。只采取分布式电源措施并不能完全的解决相应问题，需要进行分布式电源的并网管理和服务，确保分布式电源供电的连续性和稳定性，保障了电力系统的有效运行。

二、分布式电源并网管理现状

分布式电源并网是新型电网形态，分布式电源本身就具有间歇性和不确定性的特点，在电源并网过程中存在一定的挑战。10月底由中国能源研究会分布式能源专委会和中国能源网研究中心共同编制的《中国分布式能源发展报告2024》的发布，介绍了分布式光伏、分散式风电、天然气分布式能源、氢能等其他分布式能源发展现状与趋势，《报告》指出，中国作为全球最大的分布式能源投资市场，市场规模将持续扩大。

尽管分布式电源并网服务日趋规范，但并网消纳问题依旧突出，存在办理分布式光伏项目并网时限超期、违规扩大分布式光伏接入红区等现象，影响了分布式光伏项目的建设进度和公平接入^[2]。当前，分布式电源并网管理在市场规模、并网服务和并

网消纳等方面呈现出不同的特点，需要综合施策以解决存在的问题。

三、分布式电源并网管理的挑战

（一）分布式能源并网的接入和管理

当前分布式电源并网的不断渗透，因其本身具有的间歇性在并网管理过程中带来的是更多的不确定性和动态性。在分布式电源并网技术接入和管理的过程中，需要考虑到以下方面的内容：一是分布式电源并网的接入需要满足电网安全规范和技术要求，要经过技术审查和认证，同时还要考虑配电网的电网容量、稳定性以及供电质量。例如，对于10kV及以下配电网，需要明确分布式电源的接入要求，包括总体要求、并网测试、安全要求等方面。二是分布式电源并网接入后，技术人员需要建立完善的检测和数据采集系统，充分考虑相关政策法规进一步实时掌握分布式电源的工作情况，同时，电网设备人员定期检查和维护设备，保障电网的正常运行，除此之外，还需要通过数据分析和算法模型优化调度发电计划，实现可再生能源的最大利用化^[3]。

（二）分布式电源并网的稳定性和可靠性

分布式电源并网的稳定性和可靠性直接关系到电网的安全运行和用户用电质量。分布式电源包括太阳能、风能等可再生能源，本身具有间歇性和不确定性，大量的分布式电源在配电网运行过程中，配电网的输出功率稳定性就会受到一定影响^[4]。多层次的分布式电源并网是配电网结构发生变化，虽然能满足用户电量不足的需求，但是无法提高配电网的可靠性。

（三）能源市场的竞争和监管

截止2023年底，分布电源并网中的分布光伏并网规模累计达到2.5亿千瓦。截止2024年9月底，分布式光伏装机新增8522万千瓦，并继续保持高速增长趋势，使得分布式电源并网在能源市场中的占据份额逐步增加，造成市场竞争加剧。除此之外，因为分布式电源的形式不同，造成不同技术应用的成本和效率之间存在一定的差异性，这也在一定程度上加大了市场竞争，为不同技术路线发展的分布式电源发展提供空间。

分布式电源的并网后，国家能源局等监管机构在推动分布式电源并网管理方面制定了一系列的政策，但是具体实施和操作起来与政策要求有差距。电网企业的不严格按照规定执行，违规扩大分布式光伏接入红区、限制分布式项目接入电网等行为，都会对分布式电源并网的发展形成阻碍^[5]。完善分布式电源并网管理制度的同时也需要监管机构的监管手段进一步得到提升。怎样利用监测设备对分布式电源并网运行情况进行监控和查看，进而提高监管效率，这成为了监管部门工作人员的一大难题。

四、分布式电源并网的管理措施

（一）技术措施

1. 智能检测和控制系统

智能检测和控制系统是利用灵活变化的智能检测结构

以及高效率的控制设备，通过传感器技术、智能算法以及计算机数据通信技术等方式，对分布式电源的运行状态进行实时检测，包括电压、电流、功率等参数的监测。传感器的使用是实时检测分布式电源并网的运行情况，为并网管理运行提供精确数据；智能算法能够对监测到的数据进行分析 and 处理，确保并网管理中的设备、数据和资源正常运行；计算机数据通信技术则是用于提供分布式电源与并网之间的数据通信保证信息的准确性和及时性^[6]。其中，“网上国网”数字化服务平台就可以对并网运行状态进行在线监测、实时等操作，进一步提升和优化电源并网管理。

2. 储能技术的运用

过去的储能技术以水泵抽水蓄能技术为主要内容，但随着新能源技术的不断发展，其中光伏发电、风力发电等间歇性电源接入电网规模逐渐壮大，相应的储能技术发生了巨大变化。储能系统中的技术应用，凭借功率调节和蓄能的优势对电压质量进行改善，也会对波动较大的并网管理峰值进行填补，逐渐成为一定意义上的备用电源。可再生能源的接入，配电网的电压质量会产生一定的波动性，造成电压值不确定性的产生，此时储能装置的作用就是对可再生资源并网后产生的电压值变化进行相应填补，这样功率受到抑制，电压逐渐趋向于稳定状态，这时，配电网的接受和容纳能力就会变强^[7]。除此之外，储能系统会将并网中的风能、太阳能等将其产生的电能进行转换并储存起来，使得用电客户可以根据地区能源形式来选择储能系统。

3. 微电网的管理和建设

近几年光伏与储能成本的快速下降为分布式电源并网管理提供了经济可行性的基础。市场上综合能源系统、智能微电网、虚拟电厂等技术的崛起，为分布式电源并网管理的开发利用提供了发展空间。在经济工业园区或者是城镇发达地区建设综合能源系统或是智能微电网系统，解决可再生能源的并网消纳问题，这不仅能够减轻并网管理负担，还有助于企业在可再生能源上的成本节约。对部分可再生能源开发利用潜力大的地区，可以采用分布式能源集中并网汇入到同一地区，再通过电网系统进行消纳。例如，以光伏为代表的分布式能源发展呈直线上升趋势，通过“分布式光伏+智能微电网”等方式进行多地区应用，获得优秀成就，表现在分布式光伏装机新增、分布式光伏并网规模累计增加等方面^[8]。

（二）管理策略

1. 分布式能源的管理

分布式能源的规划和布局是通过实时检测和控制分布式能源系统的运行来提高可再生能源的利用效率。包括以下几个手段：一是能源的采集。能源采集是通过传感器、检测控制系统等设备的实时监测再生能源分布的运行情况，包括电量功率、电压电流等。二是能源的存储。利用可再生能源的储能设备对分布式能源进行储存和监管，以便不时之需。三是能源的调度。根据分布式电源并网后的配电网进行负荷预测以及能源管理，开展科学规范的能源调度，进一步提高能源的利用效率和在经济市场上的效益。四是能源的控制。对电力系统和并网管理系统进行实时监控，保证各系统的正常运行和安全。

2. 电网运行和维护优化

分布式电源并网的电网优化主要是提高电网的供电可靠性和运行效率，进而降低电网的损耗和成本。主要优化方式表现为以下内容：一是负荷分配优化。通过合理的负荷分配，可以避免并网设备的超负荷运行，降低运行设备的损耗率，提高设备利用率和运用效率。同时，采取负荷预测技术和算法，对电网负荷进行精确负荷预测和分配，实现最优负荷分配。二是变压器的运行优化。变压器是电网中的重要设备之一，根据负荷变化及时调整变压器运行数据和档位，以降低变压器的损耗和提高其运行效率^[9]。

电网的维护优化是提高电网设备的可靠性和延长使用寿命，降低设备故障维修次数和成本。表现为：一是指定预防性维护计划。通过定期对电网设备进行预防性试验和检查，便于及时发现设备隐藏的故障并迅速对故障原因做出判断，包括绝缘实验、耐压试验、设备清洁等工作内容。二是对故障处理方式进行优化。建立完善的故障处理机制，当设备发生故障时能够迅速判断故障原因并及时做出调整，同时还要加强运维队伍的建设和培训，提高设备维修效率，并在维修处理后进行经验总结，吸取经验教训，不断完善故障处理流程和方法。三是电网设备的更新改造。对陈旧的电网设备及时更新或者进行改造增容，进而提高设备的可靠性和相关性能，同时还需要制定电网设备更新改造计划并实施，确保电网设备的整体性能和可靠性。

五、分布式电源并网管理中的营销服务

分布式电源并网管理的营销服务应该遵循“四个统一”、“便捷高效”的基本原则。“四个统一”分别为统一管理模式、统一技术标准、统一工作流程、统一服务规则。营销服务的目标是为分布式电源项目的客户提供优质服务，加快分布式电源并网速度，提高并网服务水平，进而促进分布式电源并网的可持续发展^[10]。

（一）服务内容

电网工作人员首先就是要指导非自然人客户对其建设项目进行项目备案。电网管理部门对客户利用住宅及周边区域内建设分布式电源项目时必须进行确认，根据当地电网项目管理办法定期指导客户到政府部门进行项目备案。二是对电网接入系统的方案制定和审查。按照国家发改委下发的文件要求，县区供电公司营

销部门必须负责组织相关部门审定380/220伏分布式电源接入系统方案，给出具体接入答复意见。同时，还需要指导协助客户进行并网申请的填写工作，确保提供资料及填报信息的真实性、准确性和完整性，并在规定时限完成并网申请的受理工作。三是提供并网工程的设计与施工。电网管理部门提供并网工程设计的咨询服务，确保设计方案符合国家规定，同时协助客户选择有资质的施工单位进行并网工程施工，并对施工过程进行监督和检查，确保施工质量安全。四是开展并网验收和调试工作。管理部门对并网工程组织并网的验收工作，确保项目符合国家和行业相关标准，同时协助客户进行并网调试，确保分布式电源与电网之间的正常运行。五是及时进行上网电费结算和补贴申请。根据国家出台的政策，电力管理部门需要为客户提供电费结算服务，协助客户申请分布式电源相关的政府补贴和优惠政策，确保电费结算和补贴申请的准确性和及时性。

（二）并网营销策略

首先是建立完善客户关系管理。建立完善的客户关系管理系统，及时跟踪和全面了解客户需求，根据和客户需求，提供个性化的服务方案，同时加强与客户之间的沟通与互动，深入了解客户想法，提升客户满意度和忠诚度。其次是优化并网管理流程。不断研究和优化并网流程，提高并网效率，确保并网稳定运行。同时简化并网申请材料，降低客户办理成本，并加强管理部门内部的协调与配合，确保并网项目的顺利开展。最后是管理部门人员的并网技术创新与研发。必须加大技术创新和研发投入，进一步提升分布式光伏能源并网管理的技术水平，同时还可以引进和吸收国际先进技术水平和管理经验，不断深化自我，从而提高服务质量和管理水平^[11]。

六、结语

分布式电源并网管理是一项复杂而漫长的艰巨任务，需要政府、企业和社会各界的共同努力。处于加速阶段的新型电力系统，分布式电源并网管理具有重要作用。通过并网管理技术的创新服务、加强微电网的建设和管理、提出适合并网管理的运行方式以及营销服务策略，可以不断完善分布式电源并网的管理体系，促进分布式电源的健康发展，推动能源结构的优化和可持续发展。

参考文献

[1] 郭尧顺, 郑思捷. 分布式电源并网调控存在的问题及措施 [J]. 科学与信息化, 2024(3): 4-6.
[2] 荆琳, 艾文灏, 王婉莹, 等. 分布式电源并网中存在的问题 [J]. 通信电源技术, 2020, 37(9): 152-153, 157.
[3] 何国庆, 王伟胜, 刘纯, 等. 分布式电源并网技术标准研究 [J]. 中国电力, 2020, 53(4): 1-12, 176.
[4] 李燕燕, 李文华, 何冬梅, 等. 农村分布式电源并网管理策略探讨 [J]. 广东水利电力职业技术学院学报, 2021, 19(1): 7-10, 27.
[5] 陈喆. 配电网分布式电源最大并网容量自动化评估方法 [J]. 中国新技术新产品, 2024(17): 47-49.
[6] 杨柄楠, 李张弘泰. 分布式新能源电源并网对配电网保护的影响 [J]. 通信电源技术, 2024, 41(3): 106-108.
[7] 邱哲. 分布式光伏电源并网控制措施探究 [J]. 通信电源技术, 2023, 40(9): 130-132.
[8] 朱少芬. 浅析分布式光伏电源接入电网安全管理 [J]. 中国设备工程, 2023(24): 46-48.
[9] 任晓瑜. 高效储能技术在综合能源服务中的应用研究 [D]. 三峡大学, 2018.
[10] 周苏, 王良之, 宋凯, 等. 基于分布式架构的电网营销数据自动监测可视化研究 [J]. 自动化技术与应用, 2022, 41(06): 169-172.
[11] 杨坤, 席盛亮, 周昕. 分布式电源及微网接入对电网企业的影响分析及营销服务策略研究 [J]. 电工文摘, 2017, (01): 56-57+60.

配网 GIS 系统在配网自动化中的实践探究

陈微

国网荆州供电公司江陵县供电公司, 湖北 江陵 434100

摘要： 本文深入探讨了配电网 GIS（地理信息系统）在配电网自动化中的实际应用。首先介绍了配电网 GIS 系统的基本概念与作用。其次，分析了其在数据管理、设备监控、故障定位及线路规划等方面的功能与优势。通过典型应用场景的展示，阐述了配电网 GIS 系统如何提高配电网自动化效率与智能化水平。最后，总结了配电网 GIS 系统发展中的挑战与未来方向，为相关专业人员提供了参考。

关键词： 配电网；GIS 系统；配电网自动化；故障定位；智能化

Practice Exploration of GIS System in Distribution Network Automation

Chen Wei

State Grid Jingzhou Power Supply Company Jiangling County Power Supply Company, Jiangling, Hubei 434100

Abstract： This paper explores the practical application of GIS (Geographic Information System) in distribution network automation. It begins by introducing the basic concepts and significance of the GIS system in distribution networks. Next, it analyzes its functions and advantages in data management, equipment monitoring, fault location, and route planning. Through typical application scenarios, the paper illustrates how GIS systems enhance the efficiency and intelligence level of distribution network automation. Finally, the challenges and future directions of GIS system development in distribution networks are summarized, providing insights for professionals in the field.

Keywords： distribution network; GIS system; distribution network automation; fault location; intelligence

引言

随着能源需求的持续增长和智能电网技术的发展，配电网的智能化和自动化水平成为提升电网运行效率和可靠性的关键方向。而地理信息系统（GIS）作为一种集数据采集、存储、分析和可视化于一体的技术，在电网资源管理、故障定位、负荷模拟等方面具有显著优势。

配网 GIS 系统通过将配电设备、线路及地理环境数据进行一体化管理，为配网自动化提供了精准的数据支持和高效的分析平台。尤其在电网故障处理、抢修调度和状态监测等核心环节中，GIS 系统已逐步成为不可或缺的技术工具。^[1]

一、配网 GIS 系统与配网自动化的相关理论

（一）配网 GIS 系统的定义与功能

配网 GIS 系统是将地理信息技术应用于配电网管理的一类信息化系统，它能够以地理空间为基础，将配电设备（如变压器、开关站、电缆等）和线路分布结合到地理信息模型中，实现全区域内配电网资源的集中管理和可视化监控。该系统的主要功能包括：

- 设备管理：建立配网资源设备的完整档案，提供电网设施的空间位置、物理特性和运行状态等信息。
- 数据可视化：通过直观的地图或图形界面展示配网运行的各类信息，便于运维管理人员快速理解电网状况。^[2]

3. 空间分析：利用 GIS 技术实现对电网资源的空间分布、路径规划和辅助模拟分析。

4. 数据共享：为相关部门提供统一的配网资源基础数据支持，实现多部门协同工作。

通过这些功能，配网 GIS 系统不仅能够提升配网资源管理的精确性，还可以在配网运行优化和故障定位中发挥重要作用。

二、配网 GIS 系统在配网自动化中的核心实践

配网 GIS 系统作为配网自动化的重要组成部分，其核心实践贯穿于优化调度、故障定位、实时监控、数据管理、运行模拟等多个方面。以下从关键应用环节具体展开：

（一）配网 GIS 系统的优化调度与故障定位

配网自动化的核心目标之一是提升电力系统的调度效率和故障处理能力，而配网 GIS 系统在这一过程中扮演着关键角色。^[3]通过对配网 GIS 系统的优化调度功能，系统能够实现更加精确、高效的配电设备控制与资源分配：

优化调度：通过 GIS 系统的拓扑分析与数据精准定位功能，能够动态分析配网负荷。系统结合地理空间信息与运行状态数据，实现智能化优化调控。例如，在不同用电负荷时段，GIS 系统可以协助调度中心动态调整电力资源分配，从而提升供电效率，减少电能损耗。

故障定位：配网 GIS 系统通过对配电网络的实时监控和历史数据比对，能够快速定位故障发生位置。例如，当发生线路断线或设备故障时，系统可结合图形化界面迅速提供准确的故障点信息，同时指引检修人员选择最快捷的路径到达现场，提高抢修效率，降低供电中断时间。

（二）配网 GIS 系统的实时监控与数据管理

配网 GIS 系统实时监控功能的实现是配网自动化的重要基础，它可以直观表现配电网络设备的健康状况和运行状态：

实时监控：配网 GIS 系统能够对变电站、开关站、线路节点等设备进行全面监控，实时显示电压、电流、负荷等数据参数。通过 GIS 可视化界面，调度中心可以一目了然地掌握整个配电网络的运行全貌。^[4]当某些关键指标接近警戒值时，系统会第一时间发出报警信号，确保早发现、早处理。

数据管理：通过 GIS 系统的集中式数据管理平台，能够对海量信息数据进行统一整合。这不仅包括设备运行数据，还涉及拓扑结构、设备历史检修记录等重要参数。^[5]GIS 系统在数据智能化存储与分类的同时，还支持调度人员对历史数据进行回顾与趋势分析，为未来的配电网络优化提供指导。

（三）配网 GIS 系统在运行模拟中的应用

运行模拟是配网自动化发展的重要手段，配网 GIS 系统为运行模拟提供了精准的数据输入与设备状态映射支持：

算法支持与预测模型：借助 GIS 系统中的网络拓扑数据与地理信息，配网自动化可以通过模拟仿真技术计算不同负荷条件下的网络运行状态。模拟运行不仅提高了异常情况处理的预见性，还为优化未来的设备运行提供了数据支撑。^[6]

实景演练与应急培训：在特定情况下（如自然灾害导致的多点设备故障），GIS 系统可提供实时运行模拟的仿真环境，帮助工作人员快速识别可能的隐患并制定针对性解决方案。这种实景模拟场景有助于提升应急处置能力。

配网 GIS 系统已经成为配网自动化不可或缺的核心支撑技术，其在优化调度、故障处理、运行模拟以及应急管理等多方面展现了巨大价值。

四、配电网 GIS 系统在配电网自动化中的挑战与对策

（一）主要问题

配电网 GIS 系统虽然在配电网自动化中发挥了重要作用，但

在实际应用中仍然面临诸多挑战，这些问题主要集中在以下几个方面：

1. 数据收集与更新困难

配电网 GIS 系统的数据依赖于大量的地理信息采集、设备信息统计和动态更新。然而，由于配电设备分布广泛、地形复杂，以及设施更新的频率较高，数据的实时性和准确性难以保证。这种问题可能导致配电网运行调度中信息失真，影响决策的可靠性。^[7]

2. 系统集成性不足

配电网 GIS 系统需要与多种配电自动化系统（如 SCADA 系统、配电管理系统等）进行联动，但目前的 GIS 系统可能在接口规范、数据格式或通信协议方面存在不一致性，难以实现系统间的高效整合。这种集成不足会导致数据孤岛现象，影响整体功能的发挥。^[8]

3. 数据安全隐患

配电网 GIS 系统涉及大量敏感的电力网络和地理信息，一旦系统受到网络攻击或数据泄露，将可能造成严重的安全隐患。然而，目前许多 GIS 系统在防御外部攻击和保障数据安全方面的能力相对薄弱，甚至缺乏完整的安全防护体系。

4. 技术适配与扩展性问题

随着配电网规模的不断扩大以及新技术（如物联网和人工智能）的引入，传统的 GIS 系统可能难以满足新的业务需求。例如，部分系统的处理能力有限，无法承载大规模的数据分析和处理，系统架构的扩展性不足也可能限制其在未来的应用。

（二）解决方案与优化方向

针对上述问题，为提升配电网 GIS 系统在配电网自动化中的性能和贡献，可以从以下几个方面进行改进和优化：

1. 完善数据采集与动态更新机制

引入先进的数据采集技术，如无人机巡检、物联网感知设备以及移动终端工具，提升数据获取效率和精度。^[9]同时，建立动态数据更新机制，利用实时监测技术与自动化运算模型，确保 GIS 数据的实时性和可靠性。

2. 加强系统集成与标准化建设

推动配电网 GIS 系统与其他配电自动化系统的深度融合，采用国际通用的接口标准和通信协议，确保跨系统的数据互联互通。此外，可通过开发开放性 API 接口和数据共享平台，实现多系统的协同运行与数据整合，打破信息孤岛。

3. 增强数据安全防护能力

构建全方位的数据安全体系，包括数据加密、网络安全防护及用户权限控制等技术手段。并实时监控系统运行状况，预防和抵御潜在的网络攻击风险。同时，增加隐私保护功能，避免敏感地理信息的泄露。

4. 提升技术适配性与系统扩展能力

采用模块化和分布式的系统架构设计，使 GIS 系统能够随着配电网的扩展而进行灵活升级。同时，引入大数据分析与人智能技术，提升系统对大规模复杂数据的处理能力，尤其是在故障定位、负荷预测等场景中的应用表现。

5.加强人员培训和运维支持

针对 GIS 系统的复杂性，定期组织专业技术培训，提高运维人员的技术水平，使其能快速响应和解决系统运行中的问题。此外，可结合远程技术支持及智能运维手段，提高系统运行的可靠性与稳定性。^[10]

通过以上措施的实施，配电网 GIS 系统在配电网自动化中的功能和效率将得到进一步的提升，为电网的安全、可靠和高效运行提供有力支撑。

五、结语

随着电力系统的持续发展与电网自动化的不断推进，配电网 GIS 系统以其显著优势和实际应用效果，成为配电网自动化不可或缺的重要工具。通过 GIS 技术的引入，大大提高了电力配电网的运行效率、管理智能化水平以及服务质量。其主要优势和重要性可以概括如下：提高供电可靠性：配电网 GIS 系统集成了大量空间信息和电力设备数据，使运维人员能够快速定位和响应故障，提高故障定位准确性，缩短修复时间，显著提升了供电系统的可靠性和稳定性。优化资源分配：通过 GIS 系统的精细化分析和信息可视化功能，有助于实现资源的最优配置，合理利用配电资产，并提高工作效率和经济效益。增强自动化水平：GIS 系统与其他自动化平台的无缝集成，为配电自动化系统提供精准的数据支持和智能化策略支撑，从而推动现代配电网的全面数字化和智

能化升级。

综上所述，配电网 GIS 系统作为配电网自动化的强大辅助工具，在运行效率、供电可靠性和资源利用率上展现了极大的实际效果，对于推动配电网智能化发展发挥了不可替代的作用。

未来展望

尽管配电网 GIS 系统已经取得了显著成效，但未来其深化与提升仍有广阔的空间。结合当今技术发展的趋势，配电网 GIS 系统在配电网自动化中的应用还有以下值得展望的方向：结合人工智能（AI）与大数据技术：通过引入人工智能算法和大数据分析能力，GIS 系统将具备更强的预测分析能力，如负荷预测、故障预警等，同时能够优化配电系统的调度策略，实现更加智能化的决策支持。推动更广范围和更深层次智能升级：未来，配电网 GIS 系统可以更加深入地与物联网（IoT）设备融合，通过对配电终端设备和用户用电数据的全面采集与分析，实现智能化监控、精准化服务和个性化管理。提升交互性与数据共享：随着配电网数字化进展，GIS 系统将更加注重数据共享与开放平台建设，使不同系统间实现无缝对接，加强信息互联互通，提高系统运行效率。增强系统的扩展性和灵活性：未来的配电网 GIS 系统需要在满足不同用户需求的同时，具备快速迭代、功能扩展的能力，以应对电网不断变化的新需求和新挑战。综上所述，配电网 GIS 系统在配电网自动化进程中前景可期，有望通过技术整合和创新，全面推动配电系统迈向更高效、更智能、更可靠的新时代。

参考文献

[1]王辰.浅谈配网自动化中 GIS 技术的应用 [C]//中国武汉决策信息研究开发中心,决策与信息杂志社,北京大学经济管理学院.决策论坛——系统科学在工程决策中的应用学术研讨会论文集(上).广西大学电气工程学院,2015:218.

[2]黄修乾.输电线路 GIS 系统的开发与应用 [C]//云南电网公司,云南省电机工程学会.2008 年云南电力技术论坛论文集.云南电网公司大理供电局,2008:200-203.

[3]陈浩龙,吴大放,刘毅华.基于 GIS 的珠三角物流园区区位适宜度评价 [C]//中国自然资源学会.建设资源节约与环境友好社会 促进经济转型与资源科学发展——中国自然资源学会 2012 学术年会论文集.广州大学地理科学学院,2012:1084.

[4]化彬,江见鲸.GIS 在城市综合减灾中的应用研究 [C]//中国灾害防御协会,上海市科学技术协会,上海市保险同业公会.灾害风险评估研究——全国首届灾害风险评估研讨会论文集.清华大学土木工程系,1996:27-30.

[5]董宏杰,李媛,董文杰.基于 GIS 的蔚县文化遗产空间演变及保护策略研究 [C]//中国城市规划学会,合肥市人民政府.美丽中国,共建共治共享——2024 中国城市规划年会论文集(10 城市文化遗产保护).天津大学;天津市城市规划设计研究总院有限公司;河北建筑工程学院,2024:282-289.

[6]王洲亚,贾瑞华,凡亮,等.基于 GIS 及遥感分析的斯里兰卡自然人文差异化研究 [C]//天津大学,天津市钢结构学会.第二十三届全国现代结构工程学术研讨会论文集.中建国际建设有限公司;清华大学土木工程系,2023:373-377.

[7]邹敏.某电厂 500KV 升压站 GIS 断路器 N2 泄漏报警集中性缺陷的原因分析及处理 [C]//中国电力技术市场协会.2023 年电力行业技术监督工作交流会暨专业技术论坛论文集(上册).华能太仓电厂,2023:638-645.

[8]马青.基于无人机遥感与 GIS 的生态保护红线校核与优化 [C]//江苏省测绘地理信息学会,江苏省测绘地理信息学会 2020 年学术年会论文集.镇江市勘察测绘研究院,2020:84-87.

[9]陈洋.基于 GIS 的采煤沉陷耕地损毁边界下沉值确定方法 [C]//中国煤炭学会土地复垦与生态修复专业委员会.中国煤炭学会土地复垦与生态修复专业委员会第七届学术研讨会暨第二届委员会会议摘要集.中国矿业大学,2018:8.

[10]王妍妍,范静.基于 GIS 的标准化试点村庄空间分布格局研究——以山东省“四区十带”美丽乡村建设为例 [C]//中国城市规划学会,成都市人民政府.面向高质量发展的空间治理——2021 中国城市规划年会论文集(16 乡村规划).山东建筑大学,2021:718-725.

高比例新能源并网下的电力系统调度优化策略

周航

国网江陵县供电公司, 湖北 江陵 434100

摘要： 随着新能源接入电网的比例不断提高，电力系统调度面临前所未有的挑战。本文针对高比例新能源并网条件下的电力系统调度优化策略进行研究，提出基于智能化、灵活性和多层次协同的解决方案。从新能源波动性特征分析入手，探讨对电网稳定性的影响；结合大数据技术和智能优化算法，提出电力系统调度的创新模式；强调多能互补、灵活性资源调度及市场机制的协同作用。本研究通过理论分析和实践经验总结，为实现电网高效、稳定运行提供指导。

关键词： 高比例新能源并网；电力系统调度；优化策略；多能互补；灵活性资源；智能算法

Optimization Strategy of Power System Dispatching under the Grid Connection of a High Proportion of New Energy

Zhou Hang

State Grid Jiangling County Power Supply Company, Jiangling, Hubei 434100

Abstract： With the increasing integration of new energy sources into power grids, the challenges faced by power system scheduling are unprecedented. This paper focuses on optimization strategies for power system scheduling under high proportions of new energy grid connection. Starting with an analysis of the volatility characteristics of new energies and their impact on grid stability, the study introduces innovative scheduling approaches based on intelligence, flexibility, and multilevel coordination. Through the integration of big data technologies and intelligent optimization algorithms, as well as emphasizing multi-energy complementarity, flexible resource dispatch, and market mechanisms, this research provides theoretical and practical insights to ensure efficient and stable grid operation.

Keywords： high proportion new energy grid connection; power system scheduling; optimization strategies; multi-energy complementarity; flexible resources; intelligent algorithms

前言

近年来，全球能源转型趋势日益明显，新能源发电（如风电、光伏）的装机规模和比例快速提升。与传统化石能源相比，新能源发电具有清洁、可持续等显著优势，在实现“碳达峰”和“碳中和”目标中起着重要作用。然而，新能源发电的间歇性和随机性也对传统电力系统的运行和调度带来了前所未有的挑战。高比例新能源的并网改变了传统电力系统以稳定煤电为主的结构，迫使电力系统向灵活、智能、高效的方向发展。合理优化电力系统调度成为推进新能源高效利用、保障系统运行安全的重要研究课题。

一、高比例新能源并网下电力系统面临的挑战

在高比例新能源并网的背景下，电力系统的运行和调度面临一系列复杂的挑战。新能源发电以风电和光伏为代表，其独特特性与传统化石能源有显著差异，对电力系统的稳定性与安全性提出了前所未有的要求。本节围绕其特性和对电力系统造成的主要影响展开，同时分析调度优化的具体需求。

（一）高比例新能源发电的特性

高比例新能源发电的快速增长，赋予了电力系统全新特性，也带来了较为突出的技术难题。

1. 间歇性、波动性和随机性及预测误差

新能源发电受自然条件影响显著，例如风力和太阳光强的波动性导致了其间歇性和随机性特征。风电输出可能会在数分钟内突然从满负荷降为零，光伏发电则因云层遮挡呈现剧烈的功率波动。这种不确定性给电网运行增加了复杂性，导致电力系统在实时运行中难以精准预测供需平衡状态。

2. 分布式发电与远距离输电问题

新能源发电具有明显的地理分布特征，例如中国风电集中于西北、内蒙古等地，但负荷中心往往位于东部和南部经济发达地区。这种分布不协调性导致能源需要通过长距离输电线路传输，并面临传输损耗与功率输送瓶颈。同时，大量分布式新能源发电并网，可能因接入点分散影响局部电网的电能质量和稳定性。

（二）电力系统面临的主要挑战

高比例新能源并网引发了一系列系统运行和调度复杂性的问题。

1. 电力平衡难度增加

由于新能源发电的不确定性和波动性，在短时间内可能出现发电量与负荷需求的严重不匹配。传统的火电调节能力较为有限，一个显著的例子是高峰负荷时间难以快速响应新能源发电的波动，这可能导致频率失稳。

2. 系统稳定性不足

高比例新能源并网削弱了电网的惯性支撑能力。新能源发电通常通过电力电子设备与电网连接，相较于同步发电机，电力电子设备缺少旋转惯性，这使得系统对扰动的响应能力变差，容易引发电网频率和电压的大幅波动。

3. 储能与灵活调度需求增加

为了应对新能源的波动性和间歇性需求，电力系统对储能设施的依赖显著增强。然而，大规模储能技术成本较高，尚未大规模商业化。同时，如何增强现有调度的灵活性以适应多种工况变化，避免新能源弃风弃光问题也成为了亟待解决的难题。

4. 输电耦合与电网安全问题

高比例新能源发电的“源荷分离”特性加剧了大规模远距离输电的依赖。但若输电通道出现故障，可能导致局部电网因新能源集中接入而过载甚至瓦解，严重威胁电网安全。此外，在分布式新能源发电大量并网的情况下，也容易引起网架结构的不稳定性。

（三）电力系统调度优化需求的分析

为应对上述挑战，提高电网运行的安全性、经济性与灵活性成为实现高比例新能源消纳的关键目标。

1. 提升系统鲁棒性与安全性

通过改进调度算法，引入实时数据监测和智能预测技术，可以有效提升系统对新能源波动问题的响应能力。同时，加强电力电子设备的控制策略优化以及对动态安全稳定性问题的研究，确保电网具备足够的抗扰动能力。

2. 实现经济性与运行效率优化

合理的调度策略不仅可以降低弃风、弃光比例，还能减少对昂贵备用电源的依赖。通过优化现有资源配置，激发市场主体参与调节市场机制，从全局角度实现供需的动态平衡。

3. 融合多时间尺度的调度策略

高比例新能源并网需要综合短期、中期和长期时间维度的调度需求。例如，短期调度应侧重实时的电能质量保障和新能源利用最大化，而长期计划则应结合季节性变化优化整体供电布局，协同考虑储能投资与调峰能力建设。

4. 降低新能源弃电率

通过鼓励灵活负荷响应和需求侧管理，结合储能调节手段，可以大幅降低新能源发电的弃风、弃光比例。与此同时，加速推广可调度型新能源技术（如光热或氢能储能的应用），进一步提高新能源消纳能力。

综上所述，高比例新能源并网对传统电力系统提出了多方面

的挑战，这些问题贯穿了能源的发电、传输、调度和消纳全过程。在这种背景下，深入研究电力系统调度优化策略，通过技术手段弥补新能源固有的不确定性不足，成为未来清洁能源开发与利用的关键突破点。

二、高比例新能源并网下的电力系统调度优化方法与策略

随着高比例新能源持续接入电力系统，系统调度面临着诸多挑战，如新能源的不确定性、间歇性和区域性带来的安全性和稳定性问题。因此，针对这些问题，提出并实践一系列调度优化的理论、技术支持、策略与模型方法，为提高系统效率、保持电网稳定提供了科学依据和技术路径。以下从基本理论、关键技术与策略以及优化模型算法等方面展开分析。

（一）电力系统调度的基础理论与框架

电力系统调度优化的理论基础源于能源流动平衡和系统可靠性分析，通过经济调度 (Economic Dispatch, ED)、安全约束机组组合 (SC-UC) 等框架模型实现对系统资源的全局优化。在高比例新能源接入的场景下，传统的调度框架需扩展为：

多时间尺度的统筹调度：将长期计划与短期实时调度相结合，包括日内计划、日前计划和实时调整。

多目标优化：平衡经济效益、能量效率与系统运行安全的多重目标。

不确定性理论的引入：结合概率统计和区间优化等方法描述风能和光能的不确定性特性，从而使调度决策具有更强的适应性。这一理论框架为调度优化策略的系统性应用奠定了基础。

（二）新能源发电预测技术的支撑

新能源发电的不确定性直接影响电力系统的调度可靠性，因此精准的预测技术是调度优化的核心技术支撑。当前新能源预测技术主要包括：

基于物理模型的预测：通过分析天气条件、设备参数及运行特性等因素，模拟新能源出力功率。

数据驱动预测模型：利用机器学习算法（如支持向量机、长短期记忆网络 LSTM 等）对大量历史数据进行拟合，尤其在短期预测中展现出较高精度。

多元融合预测方法：将物理模型与数据驱动模型相结合，同时考虑地理空间和时间序列的相关性以提高预测的鲁棒性。通过高精度预测，可以为电网调度提供更优化的运行约束和决策边界，有效降低新能源出力波动对系统稳定性的冲击。

（三）主要调度优化策略

在高比例新能源并网环境下，优化调度策略的实施至关重要，以下几种策略为当前研究与应用的重点方向：

1. 提升电力系统灵活性

系统灵活性是应对新能源间歇性的重要手段，包括加快灵活性电源（如调节机组）的响应能力，优化储备容量分配以及引入动态备用策略。

2. 储能技术的应用

储能系统是消纳新能源和平衡功率波动的重要技术，传统电化学储能（如锂电池）与新型储能技术（如飞轮储能）都在调度优化中扮演关键角色。储能的优化布局和动态充放调整可以显著提升系统的运行稳定性。

3. 需求侧响应（Demand Response, DR）

通过激励用户参与电力系统调节，动态调整用电侧负荷，提高系统对新能源波动的主动响应能力，同时降低高峰负荷和提升谷底负荷。

4. 先进控制方法的应用

利用智能控制算法（如预测控制、强化学习等），将新能源大规模接入与传统调度机制有效结合，提升调度决策速度与精度。

5. 多能协同与分布式能源管理

将电力系统与天然气、供热、储能等多能流集成优化，通过能源间的转换与调度平衡波动。此外，分布式电网与微网的协同管理可提升新能源利用效率，分散化调度风险。

（四）优化调度的算法与模型

在调度优化算法方面，传统线性规划与非线性规划已无法满足高比例新能源下的复杂性需求，现阶段主要研究以下智能优化算法和模型：

元启发式算法：包括遗传算法（GA）、粒子群优化算法（PSO）、模拟退火算法（SA）等，能够解决复杂目标函数的全局优化。

鲁棒优化：针对新能源接入带来的不确定性问题，提出基于鲁棒性的优化方法，如分布鲁棒性优化 (DRO) 模型，并结合场景扩展提高优化结果的适用性。

实时优化算法：结合分布式计算技术，实现毫秒级的调度算法响应能力，以满足高时效性需求。

多目标优化模型：在经济性、可靠性和可再生能源消纳率之间平衡，搭建多目标模型并利用 Pareto 前沿方法进行权衡分析。同时，模型开发需融合实际电网系统的大数据特性，充分挖掘数据驱动优化的潜力，如将深度学习直接嵌入优化模型中。

在高比例新能源并网的背景下，电力系统调度优化的研究和实施需要综合理论框架、技术支撑、优化策略与算法创新的多方面融合。未来，随着新能源接入比例的进一步提升，多维度调度策略的协同与智能化将成为推动电网发展的重要方向。

三、优化策略的验证与案例分析

（一）仿真分析方法

为了验证调度优化策略在高比例新能源电网中的实际效果，本研究构建了高比例新能源接入的电力系统仿真模型。该模型包括风能、太阳能等可再生能源，以及常规火电、储能装置和负荷侧响应等多种电力资源的建模，充分考虑了新能源的波动性和随机性。在仿真平台中，通过典型场景的设计和调度策略的应用，进行多轮测试和优化。主要步骤如下：

构建完整电力系统架构，结合历史运行数据模拟接入高比例新能源后的设备运行状态。

在典型场景下（如峰值负荷时段、极端天气条件、电网突然断连等）引入多种调度策略，测试其在不同条件下的表现。

通过比较仿真结果，定量分析调度策略对系统性能的提升效果。

（二）测试场景设计

基于电力系统调度实际中可能面临的典型挑战，设计以下测试场景：

峰值负荷场景：模拟电力负荷达到峰值的情况下，新能源发电的消纳能力，以及系统负荷响应和备用调节策略的有效性。

断网故障场景：某些关键电网节点或输电线路发生故障时，测试调度策略的应急处理效果，评估系统的安全性和稳定性。

强波动天气场景：在风速快速变化或大范围云量变化下，新能源出力的剧烈波动对系统平衡和调度策略的考验。

（三）实验结果分析

1. 可再生能源消纳能力的优化

实验结果表明，通过优化调度策略，系统对可再生能源的消纳能力显著提升。在比较不同策略的仿真结果中发现：

应用先进调度算法后，新能源发电的消纳率提高了15%–20%，显著减少了弃风弃光现象。

特别是在峰值负荷场景中，优化策略利用储能装置和需求响应机制，有效平抑了新能源出力波动造成的影响。

2. 系统运行成本与经济性分析

优化策略在经济性方面带来了显著提升：

在多种策略比较中，综合利用储能和负荷侧响应的混合调度策略最低可减少约10%–12%的运行成本。

其中，优先使用本地新能源资源的策略减少了对传统火电的依赖，通过削减燃料消耗进一步降低了经济成本。

3. 系统灵活性与安全性提升

仿真分析显示了优化调度策略对系统灵活性和安全性的显著改善：

频率响应快速性提升了25%–30%，在发生负荷或发电量剧烈变化时能及时恢复系统稳定。

功率平衡与电压稳定性在极端天气下依然能够保持，未出现因新能源波动导致的电网崩溃情况。

在断网故障场景中，通过分区优化调度和备用调节机制的引入，有效降低了断网范围，且恢复时间缩短了约30%。

四、结语

本文围绕高比例新能源接入电网的电力系统调度优化问题展开研究，分析了当前电网调度在新能源渗透率提升背景下所面临的挑战，并提出了相关优化策略。通过深入探讨新能源并网对电网调度稳定性、系统安全性、以及电力经济性的影响，本文总结出以下关键见解和研究成果：多特性耦合问题的识别：高比例新能源接入导致了间歇性、随机性和波动性的大幅增强，这对传统电力系统的调度模式提出了重大挑战，要求更精准的预测能力、更快速的响应机制以及更灵活的资源配置策略。优化技术路径的

探索：研究表明采用先进的优化调度技术（如基于人工智能的预测、分布式调度和鲁棒优化）可以显著提升高比例新能源接入的系统稳定性和经济性。构建灵活的调度模型，融合多能源种类，实现多维度协同优化是提升调度能力的关键。实证效果验证：基于实验与仿真分析，提出的优化策略在提升可靠性、降低弃风弃光率以及经济效益方面表现突出，同时展现出在能耗与运行效率优化方面的应用潜力。

展望与未来研究方向

尽管在高比例新能源接入电网的调度优化策略方面取得了一定进展，仍存在值得进一步探索和深化的问题。未来的研究可以从以下几个方面展开：更智能化的调度方法：随着数字化和智能电网技术的发展，基于人工智能的算法（如深度学习、强化学习和多代理系统）有望进一步提升新能源调度的精确性和实时响应

能力，未来应重点开发智能化调度控制平台。综合能源系统的协同优化：在多能源耦合系统中，将电、热、气等多能源类型进行统一调度是提升资源利用效率的关键，未来应探索跨领域、多系统耦合问题的优化方法。新型储能技术的融合应用：储能技术是解决新能源波动性问题的关键，未来应针对新型储能设备（如固态电池、氢气储能等）与电力系统的联合调度展开深化研究。政策和市场机制的完善：高比例新能源接入需要政策和市场相辅相成，未来研究应重点关注如何设计灵活的电力市场机制与补贴政策，激励新能源发展和资源优化配置。多地区联合调度的国际合作：针对全球新能源渗透率快速提升的背景，加强区域间输电互联与技术协同，优化能源的跨区域调度管理策略，是实现全球能源系统碳中和目标的重要方向。

参考文献

- [1] 吕金玲; 王小君; 窦嘉铭; 孙庆凯; 刘墨; 和敬涵. 考虑运行状态信息的综合能源系统图强化学习优化调度 [J]. 电力系统保护与控制, 2024(02).
- [2] 李昌平; 杨炳良. 近年来华电福建公司水电优化调度经验探索与成效 [J]. 福建水力发电, 2015(02).
- [3] 王译旋; 杨用春; 高长征. 计及典型日选取与源荷灵活性调节的优化调度研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2024(10).
- [4] 赵艳峰. 考虑最优消纳率的新能源并网多能互补双层优化调度技术分析 [J]. 集成电路应用, 2024(10).
- [5] 吉兴全; 张旋; 于一潇; 张玉敏; 杨明; 刘健. 考虑综合能源系统运行灵活性的输配协同优化调度 [J]. 电力系统自动化, 2022(23).
- [6] 张明. 基于负载均衡的主动配电网分布式优化调度方法 [J]. 电器工业, 2022(12).
- [7] 张慧丽; 张姝; 李昭静. 柔性负荷与储能的交直流配电网优化调度研究 [J]. 现代工业经济和信息化, 2023(03).
- [8] 肖帆; 艾欣; 祁琪. 基于边云协同的产消者群合作式博弈优化调度方法 [J]. 电力系统自动化, 2022(16).
- [9] 吴桐; 刘丽军; 林钰芳; 郑文迪. 基于动态分区的配电网日前优化调度研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2022(15).
- [10] 王永刚, 李卫东, 柳焯, 潘毅. 动态优化调度走向实用的策略与段落全局优化 [J]. 中国电机工程学报, 1998(06).

热控自动化系统在新能源领域的应用及市场机遇

方涛

国家电投集团贵州金元威宁能源股份有限公司，贵州 毕节 553100

摘要： 本文深入探究热控自动化系统在新能源领域的应用状况以及所面临的市场机遇。通过阐述热控自动化系统的基本原理、组成与关键技术，分析其在太阳能发电、风力发电及其他新能源领域的具体应用场景，揭示该系统在新能源产业发展中的重要作用。同时从政策驱动、产业需求、技术创新等方面剖析市场机遇，探讨发展过程中面临的挑战并提出相应策略，旨在为热控自动化系统在新能源领域的进一步发展提供参考。

关键词： 热控自动化系统；新能源领域；应用；市场机遇

Applications and Market Opportunities of Thermal Control Automation Systems in the New Energy Sector

Fang Tao

China Power Investment Corporation Guizhou Jinyuan Weining Energy Co., Ltd. Bijie, Guizhou 553100

Abstract： This paper delves into the application status of thermal control automation systems in the new energy sector and the market opportunities they present. By explaining the basic principles, components, and key technologies of thermal control automation systems, it analyzes their specific applications in solar power generation, wind power generation, and other new energy fields, revealing the system's crucial role in the development of the new energy industry. Additionally, it examines market opportunities from aspects such as policy-driven factors, industrial demand, and technological innovation, discusses challenges encountered during development, and proposes corresponding strategies, aiming to provide references for further development of thermal control automation systems in the new energy sector.

Keywords： thermal control automation system; new energy sector; applications; market opportunities

引言

随着全球对环境保护和可持续能源发展的关注度持续攀升，新能源产业迎来了蓬勃发展的黄金机遇。新能源凭借其清洁、可再生等显著优势，逐渐成为全球能源结构转型的核心力量。在新能源的开发与利用进程中热控自动化系统发挥着举足轻重的作用，它能够切实提升新能源系统的运行效率、稳定性和安全性，为新能源产业的高效发展提供坚实有力的支持。深入研究热控自动化系统在新能源领域的应用及市场机遇，对于推动新能源产业进步、实现能源可持续发展具有重要的现实意义。

一、热控自动化系统概述

（一）热控自动化系统基本原理

热控自动化系统以自动化控制理论为基础，通过对温度、压力、流量等热工参数进行实时监测与精准控制来实现系统的稳定运行。其基本原理是借助各类传感器采集热工参数信号，并将这些信号传输至控制器。控制器依据预设的控制策略对信号进行分析处理，随后输出控制指令，驱动执行机构对相关设备进行调节，从而使系统的热工参数始终保持在设定范围内。

（二）系统组成与关键技术

热控自动化系统主要由传感器、控制器、执行机构和通信网络构成。传感器负责采集温度、压力、流量等参数，例如热电

偶、热电阻用于温度测量，压力变送器用于压力检测。控制器是系统的核心部件，常见的有可编程逻辑控制器（PLC）、集散控制系统（DCS）等，它们按照预设程序对传感器采集的数据进行处理并生成控制指令。执行机构包括调节阀、电动门等，根据控制指令实现对设备的调节操作，而通信网络则承担着各部件之间的数据传输与通信任务。关键技术涵盖了先进的控制算法，如自适应控制、模糊控制等，以提升控制精度和系统响应速度；还有数据融合与处理技术来确保采集数据的准确性和可靠性^[1]。

（三）技术优势与应用特点

热控自动化系统具备显著的技术优势，它能够实现对热工参数的精确控制，有效提高能源利用效率且降低能源消耗。通过自动化运行能够减少人工干预，降低劳动强度和人为操作失误带来

的风险，极大地提高系统运行的稳定性和可靠性。同时系统具备实时监测和故障诊断功能，能够及时发现并处理设备故障，有力保障系统的安全运行。另外在应用特点方面，热控自动化系统还具有很强的适应性，可根据不同新能源系统的特点和需求进行定制化设计与安装，灵活满足各类应用场景的要求。

二、在新能源领域的应用场景

（一）太阳能发电

1. 光伏发电系统

在光伏发电系统中热控自动化系统主要应用于光伏组件的温度控制。光伏组件的发电效率受温度影响较大，当温度升高时光伏组件的输出功率会下降。热控自动化系统通过安装在组件表面的温度传感器实时监测温度，一旦温度超过设定阈值便启动冷却装置，如采用风冷或水冷方式降低组件温度，确保光伏组件在适宜的温度范围内工作，从而提高发电效率。同时热控自动化系统还可对汇流箱、逆变器等设备进行温度监测与控制，保障整个光伏发电系统的稳定运行。

2. 光热发电系统

光热发电系统中热控自动化系统用于控制集热器、蓄热装置和发电设备等关键环节的温度。在集热器部分，通过调节聚光镜的角度和冷却介质流量来保证集热器在高效运行的同时，避免因过热而损坏。对于蓄热装置，热控自动化系统精确控制蓄热和放热过程中的温度，确保热能的有效存储和释放^[3]。另外在发电设备中，控制蒸汽温度和压力能够保障汽轮机等设备的稳定运行，进而提高发电效率和可靠性。

（二）风力发电

1. 风机设备运行

热控自动化系统在风机设备运行中起着重要作用。风机在运行过程中齿轮箱、发电机等部件会产生大量热量，若温度过高会影响设备的性能和寿命。热控自动化系统通过温度传感器实时监测这些部件的温度，当温度升高时启动冷却系统，如采用油冷或风冷方式进行散热。同时还可根据环境温度和风机运行状态来自动调节风机的转速和桨叶角度，以优化风机的发电效率，以便能够更好地降低设备损耗。

2. 风电场群管理

对于风电场群，热控自动化系统实现了对整个风电场的集中监控和管理。通过通信网络将各个风机的热工参数传输至监控中心，监控人员可以实时了解每个风机的运行状态。热控自动化系统根据风电场的整体运行情况，对各风机的温度控制策略进行优化调整并实现资源的合理分配和高效利用。例如在高温天气或负荷高峰期，优先保障关键风机的散热和稳定运行来确保整个风电场的发电能力和稳定性。

（三）其他新能源领域

1. 生物质能发电

在生物质能发电中，热控自动化系统用于控制生物质燃烧过程中的温度和压力，通过监测燃烧室的温度和压力来调节燃料供

应量和助燃空气量，进而保证生物质充分燃烧，提高发电效率。同时对余热回收系统进行温度控制，实现热能的有效利用，降低能源消耗。此外热控自动化系统还可对发电设备的温度进行监测与调节来确保设备正常运行^[3]。

2. 地热能利用

在地热能利用中，热控自动化系统主要应用于地热井的开采和地热能转换设备的运行控制。在地热井开采过程中监测井口温度、压力等参数，通过调节开采流量和回灌量来保证地热资源的可持续开采。在地热能转换设备中，如地源热泵系统，热控自动化系统精确控制热泵机组的温度和压力，实现高效的热能转换和利用，为建筑物供暖、制冷提供稳定可靠的能源供应。

三、市场机遇分析

（一）政策驱动因素

各国政府纷纷出台一系列支持新能源发展的政策，为热控自动化系统在新能源领域的应用营造了良好的政策环境。例如许多国家制定了可再生能源配额制，要求电力企业提高新能源发电在总发电量中的占比，这促使新能源发电项目迅速增长。同时政府对新能源项目给予补贴、税收优惠等政策支持，降低了项目的投资成本也提高了项目的经济效益。而热控自动化系统作为保障新能源系统高效运行的关键技术，随着新能源项目的增多，其市场需求也将随之扩大^[4]。

（二）产业发展需求

随着新能源产业的快速发展，对提高新能源系统运行效率和稳定性的需求日益迫切。热控自动化系统能够有效满足这一需求，通过精确控制热工参数，提高能源利用效率，降低设备故障率，延长设备使用寿命。新能源企业为了提升自身竞争力，不断加大热控自动化系统的投入，进而推动热控自动化系统市场的发展。此外新能源产业的规模化发展也为热控自动化系统的产业化和标准化提供了契机，进一步降低了系统成本，提高了市场竞争力^[5]。

（三）技术创新与拓展

近年来，热控自动化技术不断创新，新的控制算法、传感器技术和通信技术层出不穷。例如人工智能、大数据等技术在热控自动化系统中的应用，实现了对系统的智能监测和优化控制。通过对大量运行数据的分析能够提前预测设备故障，优化控制策略并且提高系统的运行效率和可靠性。同时热控自动化系统的应用领域也在不断拓展，除了传统的太阳能、风能发电领域，在生物质能、地热能等新能源领域的应用也逐渐增多，为热控自动化系统市场带来了新的增长点。

（四）市场规模预测与竞争格局

根据市场研究机构的预测，未来几年热控自动化系统在新能源领域的市场规模将持续增长。在竞争格局方面，目前市场上存在着众多的热控自动化系统供应商，既有国际知名企业也有国内的新兴企业。国际企业凭借其先进的技术和丰富的经验，在高端市场占据一定优势；国内企业则通过不断的技术创新和成本控

制，在中低端市场具有较强的竞争力^[6]。市场竞争将促使企业不断提高产品质量和技术水平，推动热控自动化系统行业的发展。

四、发展挑战与应对策略

（一）面临的挑战

首先，新能源系统的多样性和复杂性对热控自动化系统的适应性提出了更高要求。不同类型的新能源项目，其运行环境、设备特点和控制要求差异较大，例如光伏发电系统受光照强度、温度等环境因素影响显著，光热发电系统则涉及复杂的集热、蓄热和发电环节，风力发电又面临强风、低温等恶劣自然条件。这就要求热控自动化系统不仅要具备精准的温度、压力等参数控制能力，还得能根据不同场景灵活调整控制策略。然而目前部分热控自动化系统难以快速适应新能源系统的多变特性，导致系统兼容性不足，进而影响了整体运行效率。

其次，热控自动化系统的可靠性和稳定性至关重要，但在实际运行中受到环境因素、设备老化等影响，系统可能出现故障。新能源项目多处于户外或特殊环境，高温、高湿、沙尘等恶劣条件会加速设备老化，降低传感器、控制器等部件的性能。而且随着运行时间增长，设备磨损、线路老化等问题逐渐凸显，一旦热控自动化系统发生故障就可能导致新能源系统停机，造成发电损失，甚至引发安全事故。同时一些热控自动化系统在设计时对冗余和容错考虑不足，故障发生时缺乏有效的备用方案也进一步加剧了系统运行风险^[7]。

最后，热控自动化技术的快速发展对专业人才的需求日益增加，目前相关专业人才短缺就制约了行业的发展。热控自动化涉及自动化控制、热工技术、通信技术等多领域知识，需要既懂理论又有实践经验的复合型人才。但当下高校相关专业设置不够完善，培养的人才与实际行业需求存在差距。另外企业内部培训体系也不够健全，难以快速提升员工技能，人才短缺使得企业在技术研发、项目实施和系统运维等方面面临困难，进而限制了热控自动化系统的技术创新和推广应用。

（二）应对策略建议

针对上述挑战可以提出以下应对策略。一是加强技术研发来提高热控自动化系统的适应性和灵活性。企业和科研机构应加大

研发投入，开发通用的控制平台，通过模块化设计来使系统能够根据不同新能源项目需求快速集成不同功能模块。例如设计标准化的传感器接口和通信协议，方便适配各类新能源设备。同时可以利用人工智能和机器学习技术，让热控自动化系统能够自动学习和适应不同运行环境，实时优化控制策略，进而提高系统的兼容性和运行效率^[8]。

二是强化系统的可靠性设计，采用冗余技术、故障诊断技术和容错控制技术等技术来提高系统的可靠性和稳定性。在硬件方面，关键部件采用冗余配置，如双电源、双控制器等，当主部件出现故障时备用部件能立即投入工作。还可以引入先进的故障诊断技术，利用大数据分析和智能算法来实时监测系统运行状态，提前预测故障隐患。在软件方面可以开发容错控制程序，当系统局部出现故障时仍能维持基本运行功能。同时还要建立完善的设备维护和管理体系，制定定期巡检计划，及时更换老化设备，以便能够确保系统长期稳定运行。

三是加大专业人才培养力度，高校和职业院校应加强相关专业的建设，优化课程设置。增加热工技术、自动化控制、新能源应用等多学科交叉课程，注重实践教学环节，与企业合作建立实训基地，让学生在实项目中积累经验^[9]。企业也应加强内部培训，定期组织技术培训和交流活动来鼓励员工参加行业研讨会和技术认证考试。同时还可以通过提高薪酬待遇、提供良好的职业发展空间等方式吸引和留住优秀人才，为热控自动化系统行业发展提供人才保障^[10]。

五、结语

热控自动化系统在新能源领域的应用具有重要意义，它为新能源系统的高效、稳定运行提供了关键支持。随着政策的推动、产业的发展和技术创新，热控自动化系统在新能源领域面临着广阔的市场机遇。然而在发展过程中也面临着一些挑战，需要通过加强技术研发、提高系统可靠性和加大人才培养力度等策略加以应对。未来随着热控自动化技术的不断进步和应用的不断拓展，它将在新能源产业的发展中发挥更加重要的作用，为实现全球能源可持续发展做出更大贡献。

参考文献

- [1] 魏志德. 火电厂热控自动化系统运行的稳定性研究 [J]. 电子元器件与信息技术, 2023, 7(12): 40-43.
- [2] 郑泽聪. 热控自动化在电厂热工系统中的应用分析 [J]. 电气技术与经济, 2024, (09): 179-181.
- [3] 黄宏宁. 火电厂热控自动化控制设备的调试及安装应用 [J]. 模具制造, 2024, 24(07): 222-224.
- [4] 罗士钦. 火电厂热控自动化装置的维修保护方法研究 [J]. 模具制造, 2024, 24(07): 231-233.
- [5] 魏志德, 杨文菲. 火电厂热控自动化控制设备的调试与安装措施 [J]. 设备监理, 2024, (02): 62-65.
- [6] 李超, 孙晓明, 谭思, 等. 针状焦在不同领域中的应用 [J]. 现代化工, 2024, 44(02): 86-90.
- [7] 袁辉, 吴超鹏, 李海丽, 等. 低压电器塑壳在新能源领域的创新应用 [C]// 中国智慧工程研究会. 2024 工程技术应用与施工管理交流论文集 (上). 浙江天正智能电器有限公司; 浙江和诚智能电气有限公司, 2024: 3.
- [8] 栗世涵, 钱超, 周少东. 质谱技术在新能源领域的应用 [J]. 质谱学报, 2024, 45(05): 587-599.
- [9] 刘晓翠. 新能源汽车智能化发展趋势及其在电工领域的应用前景 [J]. 内燃机与配件, 2024, (16): 137-139.
- [10] 梁佳佳. 混合模型预测方法在新能源领域的应用 [D]. 武汉科技大学, 2024.

电气自动化的分布式控制系统架构与性能研究

桑生福

西安辉煌软件信息产业有限公司, 陕西 西安 710075

摘 要 : 本文聚焦电气自动化的分布式控制系统 (DCS), 深入研究其架构与性能。DCS 架构涵盖系统网络、现场 I/O 控制站、操作员站和工程师站, 各部分协同工作实现高效控制。随着技术发展, DCS 将朝着智能化、标准化与开放性提升、与工业物联网深度融合以及强化网络安全的方向演进, 为工业自动化发展注入新动力, 助力相关行业迈向更高水平的自动化和智能化。

关 键 词 : 电气自动化; 分布式控制系统; 系统架构; 系统性能; 发展趋势

Research on the Architecture and Performance of Distributed Control Systems for Electrical Automation

Sang Shengfu

Xi'an Huihuang Software Information Industry Co.,Ltd. Xi'an, Shaanxi 710075

Abstract : This paper focuses on the distributed control system (DCS) for electrical automation, conducting an in-depth study on its architecture and performance. The DCS architecture includes the system network, field I/O control stations, operator stations, and engineer stations, with each component working together to achieve efficient control. With technological advancements, DCS is evolving towards increased intelligence, standardization, openness, deeper integration with the Industrial Internet of Things, and enhanced network security. These developments are injecting new momentum into industrial automation, pushing related industries towards higher levels of automation and intelligence.

Keywords : electrical automation; distributed control system; system architecture; system performance; development trends

引言

随着科技的飞速发展, 电气自动化在工业生产等领域的应用越来越广泛, 分布式控制系统作为电气自动化的关键技术, 其架构与性能对于整个系统的高效运行起着决定性作用。分布式控制系统 (DCS) 以微处理器为基础, 采用控制功能分散、显示操作集中、兼顾分而自治和综合协调的设计原则, 自 1975 年问世以来, 经历了不断的发展和完善, 在系统功能和性能方面都取得了巨大的提升。本文将深入研究电气自动化的分布式控制系统架构与性能, 以期对相关领域的发展提供有益的参考。

一、分布式控制系统架构

(一) 系统网络

目前, 我国在电力系统控制方面大多还是采用的中央集中控制方式, 传统集中控制系统需要按照电力系统的结构参数 (像发电机、变压器、用户和输配电线路等)、运行参数运行时的潮流和电压等)、网络拓扑结构及各种扰动情况, 来确定系统应该采取的控制方式^[1]。系统网络作为 DCS 的基础与核心要素, 决定着整个系统的实时响应、可靠运行以及扩展潜能, 是系统运转的关键支撑。为满足实时性要求, 系统网络需在确定的时间限度内完成信息传送, 这一时间限度由被控制过程的实时性要求决定, 因此衡量系统网络性能的关键指标是实时性, 而非网络速率。多数厂家的 DCS 采用双总线、环形或双重星形的网络拓扑结构, 以确保网络通信的可靠性, 无论在任何情况下都不会中断。系统在规

划网络架构时, 充分考量扩充性要求, 将系统网络最大可接入节点数量, 设定为显著高于实际使用数量。这一策略, 不仅确保系统可便捷接入新节点, 实现灵活扩展, 还能降低网络通信负荷, 为系统实时性和可靠性筑牢根基。与此同时, 系统网络集成了强大的在线网络重构功能。当节点进行上线或下线操作时, 该功能能够有效应对由此产生的网络结构变化, 保障系统稳定、持续运行。

(二) 现场 I/O 控制站

现场 I/O 控制站作为 DCS 架构中具备特定功能的网络节点, 承担着现场 I/O 处理以及直接数字控制 (DDC, 推测此处 DOS 为笔误) 的重要任务。在 DCS 体系内合理部署现场 I/O 控制站, 能够将系统 I/O 与控制功能进行分散处理。这种分散式架构一方面有效规避了单一站点故障引发的系统整体性瘫痪风险, 显著提升系统的可靠性; 另一方面, 各站点能够协同完成数据采集与控制任

务，进而优化系统的数据处理效率，大幅提升整个系统的运行性能^[2]。例如，在工业生产中，现场 I/O 控制站可实时采集各种传感器的数据，如温度、压力、流量等，并根据预设的控制策略对执行器进行控制，实现对生产过程的精确控制。

（三）操作员站

操作员站作为网络节点，集中承载并处理人机界面中，与运行操作相关的全部功能^[3]。它为操作人员提供了一个直观、便捷的操作平台，通过该平台，操作人员可以实时监控系统的运行状态，获取各种数据信息，如设备的运行参数、生产过程的实时数据等，并能够对系统进行各种操作，如调整控制参数、启动或停止设备等。良好的操作员站设计能够提高操作人员的工作效率，减少操作失误，保障系统的稳定运行。

（四）工程师站

工程师站作为 DCS 网络关键节点，承担离线配置、组态以及在线监督、控制与维护的重要职能。工程师站配备专业组态软件，用以完成 DCS 系统的全面组态与配置任务。当 DCS 进入在线运行阶段，工程师站可实时监测 DCS 网络内各节点的运行状态。工程师借助该平台，能够及时调整系统配置，灵活设定各类系统参数，保障 DCS 持续处于最优运行状态^[4]。

二、分布式控制系统性能研究

（一）高可靠性

DCS 运用分散式架构，将系统控制功能分配至各台计算机实现，同时在系统结构设计中融入容错机制。当某一台计算机发生故障时，系统凭借分散控制与容错设计特性，其他功能仍能持续正常运行。此外，鉴于各台计算机分工明确，单一承担特定任务，系统能够为其适配具有针对性结构和软件的专用计算机，从而有效降低功能复杂度，进一步提升每台计算机的可靠性^[5]。以工业自动化生产线为例，即使某一控制节点的计算机出现故障，其他节点仍能继续工作，保证生产线的部分运行，避免了因单点故障导致整个生产线停产的情况，大大提高了生产的连续性和稳定性。

（二）开放性

DCS 遵循开放式、标准化原则开展模块化与系列化设计。系统内各计算机借助局域网搭建通信链路，实现数据信息的高效传输。得益于这种设计架构，在系统功能需调整或拓展时，新计算机接入系统通信网络、从网络移除等操作，均可便捷完成，且不会对系统内其他计算机的运行产生显著影响，系统持续保持稳定、可靠的运行状态^[6]。这种开放性使得 DCS 能够方便地与其他系统进行集成，如与企业的管理信息系统（MIS）集成，实现生产过程与管理的一体化，提高企业的整体运营效率。同时，开放性也有利于系统的升级和维护，用户可以根据自身需求选择不同厂家的产品对系统进行扩展和优化。

（三）灵活性

借助组态软件，DCS 能够针对多样化流程应用场景开展软硬件组态。用户可基于具体需求，确定测量信号与控制信号及其之

间的连接关系，从控制算法库选取适配的控制规律，并且从图形库调用基础图形元素，构建涵盖监控与报警功能的各类画面，快速便捷地完成所需控制系统的搭建。这一过程不仅灵活高效，还满足了不同行业的差异化控制需求。这种灵活性使得 DCS 能够适应各种不同的工业生产过程和控制需求^[7]。例如，在化工生产中，不同的化学反应过程需要不同的控制策略和参数，DCS 可以通过组态软件轻松实现对这些不同过程的控制，而无需对硬件进行大规模的改动。

（四）易于维护

DCS 系统采用功能专门化设计，配置了小型或微型专用计算机，每台设备仅承担单一功能，大幅简化了维护工作的复杂度。当局部设备或某台计算机发生故障时，系统凭借自身架构优势，支持在线更换故障设备。这种特性确保系统整体运行不受影响，实现故障的快速排除，保障了系统的高可用性与稳定性。而且，由于系统的模块化设计，各个模块的功能相对独立，故障排查和修复也更加容易^[8]。以 I/O 模块故障场景为例，得益于 DCS 系统的模块化设计和故障隔离特性，技术人员借助系统内置的故障诊断机制，可迅速定位故障 I/O 模块，并开展在线更换操作。整个过程不会引发系统运行中断或产生显著波动，有效控制了系统维护成本，极大缩短了停机时长。

（五）协调性

各工作站依托通信网络，实现各类数据的高效传输，达成系统层面的信息共享与协同运作。借助这一模式，系统能够有机整合各工作站资源，完成控制系统既定的总体功能，并开展优化处理。在一个大型的工业自动化系统中，涉及多个生产环节和设备，DCS 能够使各个环节的工作相互协作，实现对整个生产过程的协同控制。例如，在电力系统中，发电、输电、配电等环节的设备通过 DCS 进行协调控制，确保电力的稳定供应和高效分配。通过信息共享和协调工作，DCS 能够实现对生产过程的优化，提高生产效率，降低能源消耗。

（六）控制功能齐全

DCS 拥有丰富的控制算法体系，集成了连续控制、顺序控制以及批处理控制功能。不仅能够实现串级、前馈、解耦、自适应和预测控制等一系列先进控制策略，还可依据具体需求，灵活嵌入特殊控制算法，为各类复杂控制系统提供全面、多元的算法支撑。在实际工业生产中，不同的生产过程需要不同的控制方式，DCS 的这种齐全的控制功能能够满足各种复杂生产过程的控制需求^[9]。例如，在钢铁生产过程中，对于温度、压力、流量等参数的控制需要采用多种先进的控制算法，DCS 可以根据具体情况灵活选择和组合这些控制算法，实现对钢铁生产过程的精确控制，提高产品质量和生产效率。

三、分布式控制系统的发展趋势

（一）智能化发展

伴随人工智能、大数据、机器学习等前沿技术的持续迭代，DCS 正积极向智能化演进。这一趋势不仅驱动 DCS 架构、功能升

级，还将促使其在工业场景中深度应用，满足行业智能化转型需求。通过对大量生产数据的分析和学习，DCS能够实现对生产过程的智能预测和优化控制。例如，利用机器学习算法对设备的运行数据进行分析，提前预测设备故障，及时进行维护，避免设备突发故障对生产造成影响。同时，智能化的DCS还能够根据生产环境的变化自动调整控制策略，实现生产过程的自适应优化，提高生产效率和产品质量。

（二）标准化与开放性进一步提升

未来，DCS将更加注重标准化和开放性，以促进不同厂家设备之间的互联互通和互操作性。统一的标准将使得用户在选择和集成系统时更加方便，降低系统集成成本和风险。同时，开放性的提升将使DCS能够更好地与新兴技术和系统进行融合，如物联网、云计算等，拓展DCS的应用范围和功能。例如，通过与物联网技术的融合，DCS可以实现对更多现场设备的实时监测和控制，构建更加庞大和智能的工业自动化系统。

（三）与工业物联网深度融合

工业物联网的发展为DCS带来了新的机遇和挑战。DCS将与工业物联网深度融合，实现设备之间更广泛的连接和数据共享^[10]。通过工业物联网，DCS可以获取更多来自不同设备和环节的数据，进一步优化控制策略。同时，DCS也可以作为工业物联

网的核心控制部分，对物联网中的设备进行统一管理和控制。

（四）网络安全强化

随着DCS与网络的连接越来越紧密，网络安全问题日益突出。未来，DCS将加强网络安全防护，采用先进的加密技术、身份认证技术和防火墙技术等，保障系统的数据安全和运行安全。同时，建立完善的网络安全管理体系，实时监测网络安全状况，及时发现和应对网络攻击。例如，通过对网络流量的实时监测和分析，及时发现异常流量，判断是否存在网络攻击行为，并采取相应的防护措施，确保DCS系统的稳定运行和生产过程的安全。

四、结束语

电气自动化的分布式控制系统架构设计独特，系统网络、现场I/O控制站、操作员站和工程师站协同工作，高效控制工业生产过程。它具备高可靠性、开放性、灵活性等优势，有力地支持了工业自动化发展。随着科技进步，分布式控制系统将向智能化、更高的标准化与开放性发展，与工业物联网深度融合，强化网络安全。这使其在未来工业及其他领域的作用更重要，推动相关行业提升自动化和智能化水平。

参考文献

[1]王东云,刘芳华,彭红海,等.电力系统分布式连通控制[J].控制工程,2013,20(04):744-747+752.DOI:10.14107/j.cnki.kzgc.2013.04.014.
[2]张铁运,商冲冲,刘润坤.基于强化学习的PLC控制在电气自动化设备中的应用[J].自动化应用,2024,65(19):72-74+80.DOI:10.19769/j.zdhy.2024.19.020.
[3]杨正东.PLC在选煤厂电气自动化设备中的应用[J].矿业装备,2024,(01):48-50.
[4]魏小燕.人工智能技术在机电设备电气自动化控制中的应用研究[J].造纸装备及材料,2023,52(12):112-114.
[5]罗曼.数字技术在工业电气自动化系统中的应用[J].电子技术,2023,52(09):330-331.
[6]杨子润,陈康,周亚军,等.基于计算机技术的电气自动化控制系统设计研究[J].中国新通信,2023,25(18):56-58.
[7]周小祥.电气自动化工程控制系统的现状及其发展趋势[J].信息记录材料,2022,23(09):72-74.DOI:10.16009/j.cnki.cn13-1295/tq.2022.09.016.
[8]侯亮.电气自动化工程控制系统的发展应用[J].矿业装备,2022,(03):124-125.
[9]赵士松.电气自动化工程控制系统的现状及其发展探究[J].冶金管理,2021,(19):172-173.
[10]刘森.电气自动化工程控制系统的现状及其发展趋势[J].电子技术与软件工程,2021,(06):94-95.DOI:10.20109/j.cnki.etse.2021.06.042.

通过精准检修提升风力发电设备发电效率的实践

吴春辉

中电投东北新能源发展有限公司, 辽宁 沈阳 110623

摘要：现阶段全球对清洁能源需求在不断地增长, 风力发电作为一种重要的可再生能源利用方式, 其在能源结构中的地位日益凸显。本文主要详细地阐述了在风力发电领域, 相关从业者通过精准检修提升风力发电设备发电效率的实践过程。文章核心内容为介绍风力发电设备常见故障及对发电效率的影响, 与精准检修技术与方法, 当中包括了故障诊断技术、检修策略制定等。基于此还探讨了精准检修面临的挑战与未来发展趋势, 期待能够为风力发电行业的高效稳定运行提供参考。

关键词：精准检修; 风力; 发电设备; 发电效率

Practice of Improving the Power Generation Efficiency of Wind Power Equipment through Precise Maintenance

Wu Chunhui

China Power Investment Northeast New Energy Development Co., Ltd. Shenyang, Liaoning 110623

Abstract： At present, the global demand for clean energy is constantly increasing, and wind power generation, as an important renewable energy utilization method, is becoming increasingly prominent in the energy structure. This article mainly elaborates on the practical process of practitioners in the field of wind power generation to improve the power generation efficiency of wind power equipment through precise maintenance. The core content of the article is to introduce common faults of wind power generation equipment and their impact on power generation efficiency, as well as precise maintenance techniques and methods, including fault diagnosis techniques, maintenance strategy formulation, etc. Based on this, the challenges and future development trends faced by precision maintenance were also discussed, hoping to provide reference for the efficient and stable operation of the wind power industry.

Keywords： precise maintenance; wind power; power generation equipment; power generation efficiency

引言

风力发电设备在实际运行过程当中会受到各种因素的影响, 从而导致发电效率波动, 甚至出现故障停机。而为了提高风力发电的经济效益和可靠性, 精准检修就成为了关键环节。因为精准检修能够使工作人员及时地发现设备潜在问题, 接着其会采取针对性措施, 以最大限度地减少设备停机时间, 与提升发电效率。

一、风力发电设备常见故障及对发电效率的影响

(一) 叶片故障

1. 叶片磨损

当叶片长期在复杂的自然环境中运行时, 容易受风沙、雨水等侵蚀, 此时其表面就会出现磨损。而磨损会破坏叶片的空气动力学外形, 导致叶片的升力系数降低, 使其阻力系数增加。根据相关研究来说, 若叶片表面粗糙度增加 10 倍, 那么风机功率则可能下降 5% - 10%^[1]。

2. 叶片裂纹

叶片在承受交变载荷作用下, 就极易在根部、叶尖等部位产生裂纹。而裂纹的出现不仅会降低叶片的结构强度, 还会改变叶

片的振动特性。当裂纹发展到一定程度, 则可能会导致叶片断裂, 进而引发严重的安全事故。同时存在裂纹的叶片还会使风机的能量捕获效率降低, 致使其发电效率明显下降。

(二) 传动系统故障

1. 齿轮箱故障

齿轮箱是风力发电设备中的关键部件, 实践中其故障率较高。展开来说, 齿轮箱故障主要包括齿轮磨损、齿面胶合、轴承损坏等。其中齿轮磨损会导致齿轮传动精度下降, 并产生振动和噪声, 与增加能量损耗。另外当齿轮箱出现严重故障时, 风机就需要停机维修, 此时就会造成大量的发电量损失。

2. 发电机故障

发电机故障主要表现为绕组短路、断路、绝缘损坏等。实践

中发电机故障会直接影响到电能的输出质量和数量，最终导致发电效率降低。例如当发电机绕组出现短路时，电流则会急剧增大，此时发电机的输出功率会大幅度下降，甚至是无法正常发电^[2]。

（三）控制系统故障

1. 传感器故障

风力发电设备中的传感器主要是用于监测风速、风向、温度、转速等参数，以此可为控制系统提供数据支持。如果传感器出现故障，如风速传感器测量不准确，那么控制系统就可能会根据错误的信号来调整风机的运行状态，致使风机无法在最佳工况下运行，导致发电效率地降低。

2. 控制器故障

控制器是风机控制系统的核心，其主要负责的是控制风机的启动、停止、变桨、偏航等操作。若控制器出现故障，那么风机的控制功能就会受到影响，其可能出现风机失控、无法正常调节功率等问题，会严重地影响发电效率。

三、精准检修技术与方法

（一）故障诊断技术

1. 振动监测技术

现阶段，振动监测是风力发电设备故障诊断中常用的技术之一。其原理是通过在风机的关键部件，如齿轮箱、发电机、轴承等部位安装振动传感器，以采集振动信号。接着再利用信号处理技术对振动信号进行分析，从中提取出特征参数，如振动幅值、频率、相位等。基于这些特征参数的变化，工作人员可以判断设备是否存在故障以及故障的类型和严重程度。

2. 油液分析技术

油液分析技术主要用于监测齿轮箱、液压系统等设备的运行状况。该技术需要工作人员采集设备中的润滑油样本，并对油液的理化性能、磨损颗粒、污染物等进行分析^[3]。而油液的理化性能指标，如粘度、酸值、水分含量等，可以向其反映油液的老化程度和污染情况。磨损颗粒的大小、形状、成分等信息，则可以帮助工作人员判断设备的磨损部位和磨损机制。

3. 红外热成像技术

红外热成像技术主要是利用物体表面的红外辐射特性，对设备进行非接触式的温度检测。工作人员通过红外热像仪拍摄设备的红外热图像，结合图像中不同部位的温度分布情况，即可判断出设备是否存在过热故障。例如当发电机绕组出现局部过热时，其在红外热图像上则会表现为温度异常升高的区域。

（二）检修策略制定

1. 基于状态的检修

基于状态的检修（CBM）是一种先进的检修策略，它主要是根据设备的实际运行状态，来确定检修时间和内容。其中工作人员需要通过实时地监测设备运行参数，再利用故障诊断技术对设备状态进行评估。同时当发现设备出现潜在故障或性能下降到一定程度时，工作人员应及时地安排检修。与传统的定期检修相比，基于状态的检修能够避免过度检修和欠检修的情况，有效地提高检修的针对性和有效性，并降低检修成本^[4]。

2. 预测性维护

预测性维护是在基于状态的检修基础上发展起来的一种更高

级的检修策略。它的维护原理是利用大数据分析、人工智能等技术，使工作人员对设备的运行数据进行深度地挖掘和分析，以此预测设备未来的运行状态和故障发展趋势。据此，工作人员通过建立设备的故障预测模型，可提前预测到设备可能出现的故障时间和类型，从而提前制定出更加合理的检修计划。即预测性维护能够实现对设备故障的提前预警，使检修人员有足够的时间去准备备品备件和维修工具，从而进一步地提高检修效率和设备可靠性。

（三）检修流程优化

1. 检修前准备工作

工作人员在进行精准检修之前，需要做好充分的准备工作。首先要收集设备的运行数据、历史检修记录、故障报告等信息，以确保自己对于设备的运行状况有全面的了解。其次要根据设备的状态评估结果和检修计划，并且制定详细的检修方案，在当中明确检修内容、检修步骤、安全措施等。同时还应准备好所需的备品备件、维修工具、检测设备等物资。此外相关企业应对检修人员进行技术培训，使其熟悉检修流程和技术要求，从而确保检修工作的顺利进行。

2. 检修过程实施

实际检修过程当中，检修人员应严格地按照检修方案进行操作。在条件允许的情况下，采用先进的检修技术和工具，以确保检修质量。而对于已经发现的故障，必须要进行深入地分析，找出故障出现的原因，再采取有效的修复措施。若需要更换备品备件，一定要确保备件的质量和规格符合要求。同时还必须加强对检修过程的安全管理，即检修人员要严格地遵守安全操作规程，以防止发生安全事故^[5]。

3. 检修后验收与测试

检修工作完成后，企业要对其要进行严格的验收与测试。首先应对检修项目进行逐一检查，要确保检修工作全部完成，且质量符合要求。然后再对设备进行调试和试运行，此时主要需要检查设备的运行状态是否正常，其各项性能指标是否达到设计要求。而在试运行过程中，企业应利用监测设备对设备的运行参数进行实时监测，以此对设备的性能进行评估。只有在验收与测试合格后，该设备才能正式投入运行。

四、精准检修面临的挑战与未来发展趋势

（一）面临的挑战

1. 技术难题

因为精准检修技术是一个高度复杂且综合性极强的领域，其深度地融合了机械工程、电子技术、计算机科学、数据分析等多个学科的前沿知识与技术^[6]。所以在过去一段时间内，尽管相关研究与实践取得了一系列令人瞩目的成果，但是在实际应用过程中，该技术仍存在诸多亟待攻克的技术瓶颈。

一方面是故障诊断准确性方面，当前的技术手段在面对复杂工况时，已然暴露出其对微小故障识别能力不足的问题。主要原因是复杂工况下，设备的运行状态会受到多种因素的交互影响，例如风力发电设备在不同风速、风向、温度以及湿度等条件下运转，其产生的振动、声音、电气参数等信号极其复杂且多变。而微小故障所引发的信号变化往往会被淹没在大量的背景噪声之中，使得现有的故障诊断技术难以精准地捕捉并有效识别这些细

微变化，最终导致故障诊断的准确性大打折扣。

另外一方面是预测性维护模型的精度。因为预测性维护模型主要是通过对设备运行数据的深度分析，助力工作人员提前预测设备可能出现的故障，以便其在故障发生前安排维修。然而要构建一个准确、可靠的设备故障预测模型并非易事。因为设备的运行状态不仅受到自身结构、材料特性以及制造工艺的影响，其还与外部环境因素密切相关，并且不同类型设备之间的故障模式和规律也存在显著差异。而相关人员如何综合考虑这些复杂因素，并选取合适的特征参数，以及运用恰当的算法构建模型，仍是现阶段精准检修技术领域研究热点与难点。

2.数据管理与安全

因为精准检修对设备运行数据的依赖程度极高，所以数据的有效管理与安全保障成为了精准检修能否顺利实施的关键因素。而风电场作为风力发电设备的集中部署区域，其通常分布在偏远的山区、戈壁或沿海地区。由于这些地区的网络通信条件往往较为有限，因此相关人员如何实现设备运行数据的实时、准确传输，已经成为了精准检修面临的一大挑战^[7]。

3.人员素质要求

设备运维人员作为设备日常维护和管理的一线人员，其必须要熟悉设备的结构、原理和操作流程，并具备基本的故障诊断和维修技能。同时在精准检修模式下，他们还需要掌握一定的数据分析和处理能力，要能够通过设备运行数据的初步分析，及时地发现潜在的故障隐患。但是当前许多设备运维人员虽然在设备操作和传统维修方面经验丰富，可是在数据分析和新技术应用方面的知识储备却不足，依然需要加强相关方面的培训。

（二）未来发展趋势

1.智能化检修技术的发展

目前随着人工智能、大数据、物联网等新兴技术的飞速发展，使得风力发电设备的精准检修正朝着智能化方向大步迈进。若相关企业积极地引入智能化检修技术，将能够实现对设备运行状态的全方位、实时监测，而通过对监测数据的自动分析和处理，其能够实现故障的自动诊断、智能决策以及远程控制，从而会极大地提高检修工作的效率和准确性。

其中在设备运行状态监测方面，企业借助物联网技术，可将大量的传感器部署在风力发电设备的关键部位，如叶片、齿轮箱、发电机等，从而实时地采集设备的振动、温度、压力、电流、电压等多种参数^[8]。接着将这些传感器通过无线网络将采集到的数据传输到数据中心，即可实现对设备运行状态的实时监

控。同时利用边缘计算技术，企业可在设备现场对采集到的数据进行初步处理和分析，进而减少数据的传输量，有效地提高数据处理的实时性。

对于故障自动诊断方面而言，深度学习算法将发挥核心作用。企业可通过对大量历史故障数据和正常运行数据的学习，从而构建出深度的神经网络模型。该模型能够自动地提取数据中的特征模式，并且根据这些特征模式对于设备的运行状态进行分类和判断，从而实现对设备故障的自动诊断^[9]。

2.多技术融合应用

未来精准检修技术将会更加注重多技术的融合应用，即通过整合不同技术的优势，企业可实现对设备故障的更全面、更准确的诊断和预测，进而有效地提高精准检修的技术水平 and 应用效果。

目前振动监测技术是该行业应用较为广泛的一种故障诊断技术，该技术主要是通过监测设备的振动信号，并分析其频率、幅值等特征，来判断设备是否存在故障以及故障的类型和位置。可是振动监测技术也存在一定的局限性，其对于一些早期的、微小的故障，则可能难以准确地检测。而油液分析技术则可通过对设备润滑油的成分、性能等进行分析，帮助相关人员了解设备的磨损情况和润滑状态，使其能够发现一些振动监测难以察觉的故障。实践中若相关企业将振动监测技术与油液分析技术相结合，就可以实现对设备故障的多维度诊断。

3.全生命周期管理

企业进行精准检修将从传统的以设备故障维修为中心，向着设备全生命周期管理方向发展。其在设备的设计、制造、安装、运行、维护等各个阶段，都将融入精准检修的理念和技术，并通过对设备全生命周期的数据分析和处理，来实现设备的可靠性、可用性和经济性的优化，最终提高风力发电的整体效益^[10]。

五、结语

经过精准检修来提升风力发电设备发电效率是一项系统工程，其需要相关人员综合地运用故障诊断技术、检修策略制定、检修流程优化等多种技术和方法。然而精准检修在技术、数据管理、人员素质等方面还面临一些挑战。未来随着智能化检修技术的发展、多技术的融合应用以及全生命周期管理理念的推广，相信精准检修将在风力发电行业中能够发挥更加重要的作用，最终为实现风力发电的高效、稳定、可持续发展提供有力支持。

参考文献

[1] 酒泉众和新能源技术有限公司.一种风力发电设备检修用制动装置:CN215762055U[P/OL].2022-02-08[2025-01-13].https://www.cqvip.com/doc/patent/1973475084.

[2] 甘肃建投装备制造有限公司.一种基于风电场运维及优化的风力发电效率提升装置:CN220415596U[P/OL].2024-01-30.https://www.cqvip.com/doc/patent/3337735181.

[3] 李善斌.风力发电机设备运输路径优化的物流成本分析与管控策略研究[C].2024人工智能与工程管理学术交流会论文集.2024:167-169.DOI:10.26914/c.cnkihy.2024.020864.

[4] 邓佳, 谭代伦.基于旅行商路径与任务指派的风力发电设备检修问题研究[J].通化师范学院学报, 2024, 45(02): 52-59.DOI:10.13877/j.cnki.cn22-1284.2024.02.009.

[5] 董殿海.风力发电机组变速器的检修和维护研究[J].科学与信息化, 2024, (18): 50-52.

[6] 吴健.风力发电项目升压站电气设备的安装、调试及管理[J].电子乐园, 2019, (30): 326-326.

[7] 潘聪聪, 李福瑞, 刘勇, 等.移动专网对风力发电管理效率的提升[J].中国宽带, 2023, 19(09): 61-63.

[8] 程成.风力发电场设备定期检修与保养策略优化研究[J/OL].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术, 2024(04)[2024-04-26].https://www.cqvip.com/doc/journal/3342054287.

[9] 马强.风力发电机组轴承润滑系统的优化与运行效率提升[J/OL].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术, 2024(11)[2024-11-26].https://www.cqvip.com/doc/journal/3472542671.

[10] 山东鼎能新能源有限公司.风力发电设备数据远程监控装置:CN218268344U[P/OL].2023-01-10.https://www.cqvip.com/doc/patent/2428537334.

基于人工智能的电力系统故障诊断方法研究

涂雪晴

湖北省黄石市阳新县供电公司, 湖北 黄石 250101

摘 要 : 当下随着电力系统规模的不断扩大和结构的日益复杂, 相关行业对其故障诊断的准确性和及时性提出了更高要求。而传统故障诊断方法在面对海量数据和复杂故障模式时逐渐地显露出其局限性。对此本文深入地研究了基于人工智能的电力系统故障诊断方法, 且在分析了人工智能技术在电力系统故障诊断中的应用现状的基础上, 探讨了多种人工智能算法在故障诊断中的原理、优势, 同时还对该领域的发展趋势进行了展望, 希望能够为提升电力系统运行的可靠性和稳定性提供理论支持。

关 键 词 : 人工智能; 电力系统; 故障; 诊断方法

Research on Fault Diagnosis Method of Power System Based on Artificial Intelligence

Tu Xueqing

Yangxin County Power Supply Company, Huangshi, Hubei 250101

Abstract : With the continuous expansion of the scale of the power system and the increasing complexity its structure, the accuracy and timeliness of fault diagnosis in the power system have been put forward higher requirements by relevant industries. However, traditional fault diagnosis methods have gradually their limitations in the face of massive data and complex fault patterns. In view of this, this paper makes an in-depth study of the fault diagnosis method of the power based on artificial intelligence. On the basis of analyzing the current application status of artificial intelligence technology in the fault diagnosis of the power system, the principles and advantages of various intelligence algorithms in fault diagnosis are discussed. At the same time, the development trend of this field is also expected to provide theoretical support for improving the reliability and stability of power system operation.

Keywords : artificial intelligence; power system; fault; diagnosis method

引言

电力系统作为现代社会的重要基础设施, 其中任何故障的发生都可能会导致大面积停电, 进而给社会经济带来巨大损失。因此准确、快速地诊断电力系统故障, 并及时地采取有效的修复措施, 对于保障电力系统的可靠供电是至关重要的。但是传统的故障诊断方法主要是基于专家经验和简单的数学模型, 它难以适应现代电力系统复杂多变的运行环境。此时人工智能技术的快速发展, 为电力系统故障诊断提供了新的思路和方法, 其能够有效地处理海量数据, 且准确地识别复杂故障模式, 从而提高故障诊断的效率和准确性。

一、电力系统故障诊断概述

电力系统的故障种类繁多, 当中包括短路故障、断路故障、设备故障等。而故障诊断的过程就是通过对电力系统运行状态的监测, 以获取相关的电气量数据, 如电压、电流、功率等, 接着运用特定的诊断方法, 来判断故障是否发生、故障的类型、位置以及严重程度。通常一个完善的电力系统故障诊断系统应具备实时监测、准确诊断、快速报警和辅助决策等功能^[1]。

二、传统电力系统故障诊断方法及其局限性

(一) 基于专家系统的故障诊断方法

专家系统是将领域专家的经验 and 知识以规则的形式存储在知识库中, 再通过推理机对实时采集的数据进行分析推理, 从而判断出故障。它具有知识表达直观、易于理解等优点。然而专家系统存在知识获取困难、知识更新缓慢、对复杂故障诊断能力有限等问题^[2]。同时随着电力系统的发展, 新的故障模式在不断地出

现，而专家系统难以快速地适应这些变化。

（二）基于解析模型的故障诊断方法

基于解析模型的方法是以电力系统的数学模型为基础，通过比较实际测量值与模型计算值的差异来诊断故障。虽然该方法具有理论基础坚实、诊断准确性较高的优点。但由于建立精确的电力系统数学模型难度较大，且模型参数易受运行环境变化的影响，所以会导致诊断结果的可靠性下降^[3]。

（三）基于信号处理的故障诊断方法

基于信号处理的方法主要是对电力系统中的电气信号进行分析，从中提取特征量来识别故障。目前常用的信号处理技术包括傅里叶变换、小波变换等。尽管这种方法能够有效地处理非平稳信号，但对于微弱故障信号的提取和识别能力有限，并且容易受到噪声地干扰。

三、人工智能技术在电力系统故障诊断中的应用

（一）人工神经网络

1. 基本原理

人工神经网络（Artificial Neural Network, ANN）是从仿生学角度出发，其核心是模拟人类大脑神经元结构与功能，以构建出复杂的计算模型。该网络的基本组成单元是神经元节点，就如同大脑中的神经元，能够相互连接且构成一个庞大而复杂的网络结构^[4]。通常在电力系统故障诊断的实际应用场景中，人工神经网络承担着从海量故障样本数据里挖掘出关键信息的双重任务。

以多层前馈神经网络（Multilayer Feed-forward Neural Network）为例，它是一种典型且应用广泛的神经网络结构。一般该网络在运行过程中，首先会通过输入层接收来自于电力系统实时监测的各类电气量数据，它们是反映电力系统运行状态的重要指标。接着数据将被传递至隐含层，而隐含层是神经网络的核心处理区域，其中包含多个神经元，且每个神经元都会对输入数据执行非线性变换操作，此时数据中蕴含的复杂故障特征被逐步地挖掘和强化，最终会在输出层输出明确的故障诊断结果。

2. 应用优势

人工神经网络凭借其独特的结构和运行机制，展现出了多方面的显著优势。一方面它具备强大的自学习能力，其在面对大量电力系统故障样本数据时，无需人工预先设定复杂的规则和特征提取方式，即可自主地从数据中学习到故障模式与故障类型之间的内在映射关系。例如某地区电网的故障诊断实践中，神经网络通过持续地对历史故障数据进行学习训练，逐渐地掌握了不同故障场景下电气量数据的变化规律，从而能够准确地识别新出现的故障情况^[5]。

另一方面是其自适应能力使其能够很好地适应电力系统复杂多变的运行环境。具体表现为，随着电力系统的不断发展和运行条件的动态变化，无论是负荷的波动、设备的老化还是外部环境因素的影响，人工神经网络均能通过自身参数的调整来适应这些变化，一直保持着相对稳定的故障诊断性能。

（二）支持向量机

1. 基本原理

支持向量机（Support Vector Machine, SVM）是基于统计学习理论发展而来的一种高效分类方法，其核心思想在于寻找一个最优分类超平面，以此将不同类别的样本数据清晰地划分开来。通常在二维空间中，分类超平面会表现为一条直线，而在高维空间里，它则是一个超平面。对于电力系统故障诊断的具体应用来说，一般会将电力系统的故障样本和正常运行样本作为训练数据输入到支持向量机模型中。

支持向量机的学习算法致力于在样本空间中找到一个能够使两类样本之间的间隔最大化的超平面。而这个间隔被称为“margin”，使得间隔最大化的目的是为了提高分类器的泛化能力，使模型在面对新的数据样本时依然能保持较高的分类准确性。因此支持向量机引入了拉格朗日乘子法，可将原问题转化为对偶问题进行求解。在求解的过程之中，只有那些位于间隔边界上的样本点（即支持向量）对确定最优分类超平面起到关键作用，其他样本点的影响相对较小。最终支持向量机能够在有限的样本数据下，构建出高效的分类模型，以此能够实现对电力系统故障的准确分类诊断，进而判断出当前系统运行状态是正常还是存在故障，以及故障的具体类型。

2. 应用优势

在小样本学习方面，相较于其他一些机器学习方法来说，支持向量机在样本数量有限的情况下依然能够构建出性能良好的分类模型^[6]。而在实际电力系统之中，获取大量的故障样本数据往往存在一定困难，但支持向量机的这一特性使其能够充分地利用有限的的数据资源进行有效的学习和诊断。

对于非线性分类问题来说，支持向量机通过引入核函数技巧，可巧妙地将低维空间中的非线性分类问题转化为高维空间中的线性分类问题。现阶段常见的核函数有线性核、多项式核、径向基核（RBF）等。以径向基核函数为例，它能够将原始数据映射到一个更高维的特征空间中，使得原本在低维空间中线性不可分的数据在高维空间中变得线性可分，最终成功实现非线性分类。

（三）深度学习

1. 基本原理

深度学习（Deep Learning）是一类基于人工神经网络的先进机器学习技术，其显著特点是能够通过构建包含多个隐含层的深度神经网络模型，来实现对海量数据中复杂特征的自动学习与提取。就电力系统故障诊断领域来说，深度学习模型凭借其强大的特征学习能力，为故障诊断带来了新的突破。

常见的深度学习模型在电力系统故障诊断中各有专长。展开来说：卷积神经网络（Convolutional Neural Network, CNN）在处理图像和结构化数据方面具有独特优势。虽然在电力系统中主要需要处理的是电气量数据，但这些数据在经过一定的变换和组织后，就可以转化为类似图像或结构化的数据形式。而 CNN 通过卷积层和池化层对数据进行处理，即可在保留主要特征的同时，降低数据的维度且减少计算量，有效地提高了模型的运行效率。

2. 应用优势

深度学习模型在电力系统故障诊断中展现出多方面的突出优

势。首先，其强大的特征自动提取能力是一大亮点。与传统方法需要人工手动提取特征不同，深度学习模型能够直接从海量、高维、复杂的电力系统运行数据中自动学习到最具代表性的故障特征。例如，在处理大量不同类型故障的电气量数据时，深度学习模型能够自动挖掘出数据中隐藏的复杂模式和特征组合，无需人工预先设定繁琐的特征提取规则^[7]。

其次，深度学习模型在故障诊断的准确性和适应性方面表现卓越。由于能够学习到更全面、更深入的故障特征，它在诊断各种复杂故障时具有更高的准确性。同时，深度学习模型对电力系统复杂多变的运行环境具有较强的适应性，无论是不同地区电网结构的差异，还是不同季节、不同时段负荷变化等因素，都能通过自身的学习和调整来适应，从而准确诊断出故障。此外，深度学习模型还能够发现传统方法难以捕捉的细微故障特征，在早期故障预警和诊断方面发挥重要作用，提前发现潜在的故障隐患，为电力系统的预防性维护提供有力支持，进一步保障电力系统的安全稳定运行。

（四）模糊理论

1. 基本原理

模糊理论（Fuzzy Theory）是专门用于处理模糊性和不确定性问题的数学方法，其在电力系统故障诊断领域具有重要的应用价值。因为电力系统运行过程中，故障特征量往往并非具有明确的数值界限和确定性，而是会呈现出模糊性和不确定性。例如当电力系统发生故障时，电气量的变化程度很难用一个精确的数值来界定，其可能处于正常与异常之间的模糊过渡状态。

模糊理论由于引入了模糊集合和隶属度函数的概念，因此能够将这些模糊信息进行量化处理。以电气量的变化程度为例，即可用模糊语言变量来描述，如“很大”“较大”“正常”“较小”“很小”等。并且对于每个模糊语言变量可定义其相应的隶属度函数，该函数用于衡量某个具体的电气量数值属于该模糊集合的程度，取值范围在0到1之间。如对于“电压很大”这个模糊集合，当实际测量的电压值为V时，可通过隶属度函数计算得到其属于“电压很大”这个模糊集合的隶属度为 $\mu(V)$ ，而 $\mu(V)$ 越接近1就

表示该电压值越符合“电压很大”的描述。

对于故障诊断的实际过程而言，先将采集到的电力系统电气量数据根据隶属度函数转化为相应的模糊语言变量，然后就能够依据预先建立的模糊规则库进行推理。其中模糊规则库是基于专家经验和大量实际运行数据建立起来的，包含了各种故障情况下电气量模糊信息与故障类型之间的对应关系。最终将得出故障的诊断结果，以此判断出故障的可能性和类型^[8]。

2. 应用优势

模糊理论能够有效地处理故障诊断中的不确定性和模糊性信息，从而避免了传统方法在面对模糊情况时的局限性，其在电力系统故障诊断中的应用优势十分明显。同时在实际电力系统中，由于测量误差、干扰等因素的存在，会使故障特征量往往具有不确定性，而模糊理论能够很好地包容这些不确定性，且将其纳入到诊断过程中，从而提高诊断结果的合理性和可靠性^[9]。

此外模糊理论不需要建立精确的数学模型。因为电力系统是一个庞大而复杂的系统，所以建立精确的数学模型难度极大，且模型参数难以准确获取和调整。而由于模糊理论仅基于模糊规则和专家经验进行故障诊断，且对复杂系统的适应性较强，因此其能够在不依赖精确数学模型的情况下，快速准确地判断出故障情况^[10]。

四、结论

基于人工智能的电力系统故障诊断方法为相关行业提高电力系统运行的可靠性和稳定性提供了有效的途径。本文通过对人工神经网络、支持向量机、深度学习、模糊理论等人工智能技术在电力系统故障诊断中的应用研究，表明了这些技术在处理复杂故障模式、提高诊断效率和准确性方面均具有显著的优势。但是其在实际应用中仍面临数据质量、模型可解释性、模型适应性等挑战。未来随着人工智能技术的不断发展和与其他领域技术的融合创新，相信基于人工智能的电力系统故障诊断方法将会被不断地完善，最终将为电力系统的安全稳定运行提供更加坚实的保障。

参考文献

- [1] 宋春爱. 基于多电源并列运行的输电网故障诊断的改进方法研究[J]. 自动化应用, 2024, 65(04): 37-38+42.
- [2] 颜肃, 张玮亚, 李宏仲, 等. 基于人工智能的输电线路故障快速诊断方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(19): 94-99. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181527.
- [3] 宁剑, 任怡睿, 林济铿, 等. 基于人工智能及信息融合的电力系统故障诊断方法[J]. 电网技术, 2021, 45(08): 2925-2933. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2020.0948.
- [4] 张博, 刘绚, 于宗超, 等. 基于人工智能的电力系统网络攻击检测研究综述[J]. 高电压技术, 2022, 48(11): 4413-4426. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20220300.
- [5] 韩富佳, 王晓辉, 乔骥, 等. 基于人工智能技术的新型电力系统负荷预测研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(22): 8569-8591. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.221560.
- [6] 金萍, 侯娟. 面向新型电力系统的粗糙集和双流网络自动化物联设备故障诊断方法研究[J]. 电测与仪表, 2024, 61(09): 166-171. DOI: 10.19753/j.issn1001-1390.2024.09.022.
- [7] 周圣杰, 王士铭, 田洪滨, 等. 基于人工智能与物联网的电力现场作业智能保障系统研究[J]. 电测与仪表, 2024, 61(09): 137-144. DOI: 10.19753/j.issn1001-1390.2024.09.018.
- [8] 邹昊东, 王会羽, 孙琦, 等. 基于模糊神经网络的智能电气系统故障诊断方法研究[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2020, 51(04): 708-711. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2324.2020.04.026.
- [9] 李根, 刘珊珊. 基于大数据和人工智能的储能系统故障预测与诊断方法研究[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(10): 3653-3655. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0902.
- [10] 王小东. 基于人工智能和数据挖掘的电力系统故障分类预测[D]. 天津理工大学, 2021.

基于大数据的变电站设备故障预测与维护策略

王伟庆, 陈永杰, 娄云

国网河南省电力公司原阳县供电公司, 河南 原阳 453500

摘 要 : 本文针对变电站设备故障预测与维护策略进行了深入探讨, 运用大数据技术进行了全面分析, 通过梳理和分析海量的历史数据, 成功构建出高效的故障预测模型, 基于此模型, 提出一套切实可行的维护策略。实验结果充分表明, 本文所提出的策略能够精准预测设备的潜在故障, 并在实际应用中显著提升了维护工作的效率, 有效增强了设备的运行稳定性, 降低运维成本, 为电力系统的智能化维护开辟了新的路径。

关 键 词 : 大数据; 变电站; 设备故障预测; 维护策略

Substation Equipment Fault Prediction and Maintenance Strategy Based on Big Data

Wang Weiqing, Chen Yongjie, Lou Yun

State Grid Henan Electric Power Company Yuanyang County Power Supply Company, Yuanyang, Henan 453500

Abstract : In this paper, the fault prediction and maintenance strategy of substation equipment is deeply discussed, and a comprehensive analysis is carried out by using big data technology. By combing and analyzing massive historical data, an efficient fault prediction model is successfully constructed. Based on this model, a set of feasible maintenance strategy is proposed. The experimental results fully show that the strategy proposed in this paper can accurately predict the potential failure of the equipment, and significantly improve the efficiency of maintenance in practical application, effectively enhance the operation stability of the equipment, reduce the operation and maintenance cost, and open up a new path for the intelligent maintenance of the power system.

Keywords : big data; substation; equipment failure prediction; maintenance strategy

电力网络中, 变电站作为关键节点, 其设备运行的稳定性直接关系到电网的安全与可靠, 设备故障始终是运营中的一大挑战, 如何借助先进技术精准预测并快速响应设备故障, 成为电网稳定运行的关键所在。大数据技术的崛起, 为解决这一问题提供了新的契机。本文以大数据技术为基石, 深入挖掘以及分析变电站设备的运行数据, 旨在构建科学、高效的故障预测模型, 并据此提出创新的维护策略, 有望提高电网的运行效率, 为电力系统的长期稳定发展提供有力支撑。

一、基于大数据的变电站设备故障特点

(一) 常见的变电站设备故障类型

变电站运营过程中, 设备故障是一种普遍存在的现象, 且类型多样, 其中, 变压器故障、断路器故障和隔离开关故障是最常见的几种, 变压器可能会出现油温过高、异常声响或绝缘油性能降低等问题, 对变电站的平稳运行造成潜在威胁。断路器故障常常涉及操作机构的失灵或分合闸不准确, 这类问题直接影响到电网系统的安全隔离功能, 隔离开关的故障, 如触头接触不良或操作时的卡涩现象, 也会对电网的稳定运行造成不利影响。这些故障如果未能及时发现和处理, 可能导致设备的进一步损坏, 更可能触发连锁反应, 对电网的整体稳定性和安全性造成重大风险, 对于变电站设备故障的预测与及时维护至关重要。

(二) 关键数据的采集与处理

为实现变电站设备故障的精确预测, 关键数据的采集与处理成为一个不可或缺的环节, 这一过程需要对设备运行中的各种参数进行实时、连续的监控和记录。这些参数包括但不限于电压、电流、温度和湿度等关键指标, 直接反映设备即时运行状况, 为后续故障预测与深入分析提供了宝贵的数据支持^[1]。

数据采集阶段, 确保所获取数据的准确性与完整性至关重要, 为此, 采用具备高精度的传感器和先进的数据采集技术成为关键, 为满足大数据处理的要求, 还需对数据进行一系列有效的预处理操作, 这些操作包括但不限于数据的清洗、转换以及标准化等。通过这些预处理步骤, 显著提升数据的质量, 为后续数据挖掘和故障预测工作奠定坚实基础。

二、基于大数据的变电站设备故障预测模型的构建

（一）选择合适的数据分析方法和工具

构建变电站设备故障预测模型时，必须先对数据进行深入的理解与分析。考虑到变电站产生的数据不仅规模庞大而且种类繁多，需要采用能够高效处理这类数据的方法和工具。数据挖掘技术，特别是决策树、随机森林和支持向量机等算法，因其对分类和预测问题的出色处理能力，成为此次模型构建的关键技术^[2]。

面对海量的数据，可以选择 Hadoop 和 Spark 这类大数据处理工具，这些工具利用分布式存储和计算的原理，迅速、准确地处理大规模数据，保证数据分析的效率和精确度，提供灵活多变的数据处理框架和多语言支持，极大简化了数据分析的复杂性，提高了工作效率。

（二）模型构建和训练流程

构建基于大数据的变电站设备故障预测模型是一个复杂精细的过程，充分利用丰富的历史数据集，通过严谨的科学方法和流程，力求打造出精准可靠的预测模型。

模型的构建从数据预处理开始，需要对原始数据进行了全面的清洗、整理，去除噪声和异常值，提取关键特征，进行标准化处理，对于提升模型预测的准确度具有决定性影响。

接下来，根据数据的特性和预测需求，选择最合适的算法进行模型构建，模型训练过程中，需要不断调整优化模型参数，如学习率、正则化系数等，以找到最佳模型配置，还可运用交叉验证等技术，确保模型的稳定性与泛化能力^[3]。

经过反复训练以及优化，最终得到一个能够根据实时数据准确预测设备故障的模型，不仅具有很强的通用性，可以适应不同设备和运行环境，而且响应迅速，能在极短的时间内给出预测结果，为设备的及时维护与故障预防提供有力的数据支持。

三、基于大数据的变电站设备故障预测系统的设计路径

（一）故障预警系统

1. 总体架构设计

基于大数据的变电站设备故障预测系统的总体架构设计应遵循模块化、可扩展性和易维护性的原则。系统架构可分为数据层、处理层、应用层和展示层，数据层负责数据的采集和存储，处理层进行数据的预处理和模型分析，应用层实现故障预警和维护调度等功能，展示层则为用户提供直观的操作界面和数据可视化。

2. 数据收集模块

数据收集模块作为整个系统的数据源头，其重要性不言而喻，该模块需要从变电站内的众多传感器和监控系统中实时、准确地收集设备运行数据。这些数据包括电压、电流、功率因数、设备温度、环境湿度等关键运行参数，为确保数据的全面性和实时性，采用高性能的数据采集设备和协议，确保在各种恶劣环境和复杂工况下都能稳定工作。数据收集模块还具备数据校验和异

常检测功能，以确保采集到的数据质量，一旦检测到异常数据，系统会立即进行标记并触发相应的处理流程^[4]。

3. 数据处理和分析模块

构建基于大数据的变电站设备故障预警系统中，数据处理和分析模块堪称系统的“大脑”，这一模块的首要任务是对从各种传感器、监控系统收集来的海量原始数据进行细致的预处理。预处理环节涵盖数据清洗、异常值筛查与处理、数据归一化等多个关键步骤，旨在确保输入到后续分析环节的数据具备高度的准确性和可靠性。经过预处理的数据，将被送入经过精心训练的故障预测模型中，进行更为深入的分析和挖掘。为构建这些高效的预测模型，可以采用当前最前沿的机器学习算法与深度学习技术，这些先进技术的融合应用，使模型能自动从历史数据与实时数据中学习并识别出设备运行的异常模式，准确预测潜在故障风险^[5]。

故障预测模型并非一成不变，通过持续不断地对模型参数进行微调和优化，进一步提升模型的预测精度和泛化能力，确保模型在面对复杂多变的实际情况时，依然能够保持出色的性能。数据处理和分析模块还具备强大的扩展性与灵活性，随着技术的不断进步和数据的日益丰富，可以轻松地往系统中集成更多的分析算法和模型，以适应不断变化的分析需求。

4. 预警生成与通知模块

预警生成与通知模块在故障预警系统中扮演着至关重要的角色，一旦故障预测模型侦测到设备存在潜在的故障风险，这一模块便会迅速响应，生成详尽的预警信息，这些信息明确指出故障具体类型，还深入剖析了可能引发故障的原因，预测了故障可能波及的范围，为相关人员提供了宝贵的决策依据^[6]。

为确保这些至关重要的预警信息能够及时、准确地传达给相关人员，该模块特别设计了多元化的通知方式。无论是通过短信直接发送到手机上，还是通过电子邮件进行详尽的故障描述，亦或是通过 APP 推送实现即时提醒，该模块都能确保相关人员无论在何时何地，都能第一时间掌握设备的故障预警情况。预警生成与通知模块不仅仅是一个简单的信息传递工具，更是一个高度智能化、自动化的决策支持系统。通过精确地分析故障数据，该模块能协助相关人员迅速制定出有效的应对策略，最大程度减少故障对电力系统运行的影响，还具备出色的可扩展性和灵活性。随着技术的不断进步和通信方式的创新，可以轻松集成更多通信渠道与方式，满足不断变化的实际需求。

5. 用户交互界面

用户交互界面是用户与系统交互的桥梁，因此其设计至关重要，为用户提供了一个直观、易用的操作界面，通过图表、曲线和实时数据展示设备的运行状态和预警信息。用户还可根据需求自定义界面布局和数据展示方式，以满足不同的使用需求。用户交互界面还提供了丰富的配置和管理功能，如预警阈值设置、数据采样频率调整等，这些功能使得用户可以更加灵活地参与到设备的管理和维护工作中来，提高了系统的可用性和用户满意度^[7]。

同时，界面还集成了反馈机制，用户可即时反馈使用体验，促进系统的持续优化，用户交互界面的精心设计，确保了用户能

够便捷、高效地与系统进行交互，充分发挥故障预警系统的价值，提升设备管理的智能化水平。

6. 维护调度模块

维护调度模块是故障预警系统的另一个核心组成部分，根据预警信息和预设的维护策略，自动或手动安排维护任务。这些任务可能包括设备巡检、故障诊断、部件更换等，通过合理的任务调度和资源配置，可以确保故障得到及时处理，防止其进一步恶化或扩散^[8]。

维护调度模块还具备任务跟踪和结果反馈功能，用户可以实时查看任务的执行情况和处理结果，以便及时调整维护策略和优化资源配置，这样的设计不仅提高了维护工作的效率和质量，还为后续的故障分析和预防提供了有力的数据支持。

（二）预测结果在维护决策中的应用

随着大数据技术的日益成熟，其在电力系统中的应用也日益广泛，特别是在变电站设备故障预测领域，大数据技术正发挥着举足轻重的作用，故障预测结果的准确应用，对于提升电力系统的维护效率、缩减停机时长以及确保系统的平稳运行具有不可估量的价值^[9]。

故障预测结果在优化维护计划方面展现出了显著的优势。以往，维护计划多依赖于固定的时间周期或是维护人员的经验判断，这种方式虽然操作简便，但在针对性和灵活性上却大打折扣。基于大数据的故障预测系统，则能够实时捕捉设备的运行状态，并结合历史故障数据，对设备的健康状况和潜在风险进行深

入分析。有了这些精准的数据支持，维护团队便能根据预测结果来制定更加贴合实际的维护计划，将有限的资源集中投放到那些真正存在隐患的设备上，从而在保障设备正常运行的同时，也有效避免了不必要的停机和维护成本^[10]。

故障预测结果对于维护工具和备件的准备也具有重要的指导意义，在电力系统中，不同类型的设备故障需要不同的工具和备件进行处理，如果事先没有做好充分的准备，故障突发时，可能会因为工具和备件的不匹配而延误维护进度，进而影响整个系统的恢复时间。通过大数据故障预测系统的助力，可以提前预见可能发生的故障类型，并根据预测结果有针对性地准备相应维护工具与备件。这样，一旦故障发生，维护团队便能够迅速做出反应，以最短时间恢复设备正常运行，大大提升维护效率与系统稳定性。

四、结束语

综上所述，本研究通过大数据技术，构建了一个高效的变电站设备故障预测模型，并提出了相应的维护策略。实际应用表明，该策略能够有效预测设备潜在故障，显著提高维护效率和设备稳定性，对降低运维成本具有积极影响。未来，需要进一步优化模型算法和完善预警系统功能，以更好地服务于电网的安全稳定运行。

参考文献

- [1] 周晟祺. 电力大数据变电站设备状态检修技术研究 [J]. 网络安全和信息化, 2023(11): 95-97.
- [2] 李星婕, 王康, 王子行. 变电设备故障分析及预测平台的研制 [J]. 大众用电, 2023, 38(04): 47-48.
- [3] 李丽娜, 唐榛榛. 基于电力大数据的变电站设备状态检修研究 [J]. 光源与照明, 2022(08): 96-98.
- [4] 高博, 吴迪, 杨志豪等. 基于电力大数据变电站设备状态检修技术研究 [J]. 微型电脑应用, 2022, 38(04): 84-88.
- [5] 贾吉禄. 变电站海量设备数据挖掘及状态评估方法研究 [D]. 沈阳工业大学, 2021.
- [6] 王磊, 王展澳, 王璐. 大数据与人工智能在变电站设备巡检系统中的应用 [J]. 集成电路应用, 2023, 40(1): 194-195.
- [7] 张彪. 基于大数据的变电站故障诊断与预测 [J]. 通信电源技术, 2024, 41(10): 236-238.
- [8] 石文超, 张彤阳. 基于大数据分析的变电站故障诊断与维护优化研究 [J]. 通信电源技术, 2024, 41(2): 240-242.
- [9] 于晓蕾, 魏高涵, 唐昊, 等. 智能变电站故障预测与健康管理关键技术及展望 [J]. 宁夏电力, 2023(S01): 77-84.
- [10] 刘胜强, 杨峰. 基于大数据挖掘技术的智能变电站故障追踪架构研究 [J]. 电子设计工程, 2022, 30(3): 4.

AI大数据在风电企业安全管理中的综合应用： 设备状态评估与故障预测

魏成发

国投贵州新能源有限公司，贵州 贵阳 550000

摘 要： 本文着重探讨 AI 大数据在风电企业安全管理中的综合应用，重点阐述的是其在设备状态评估与故障预测方面的应用原理、方法及实际效果。不仅如此，文章还通过对相关技术原理的剖析，结合风电设备运行特点，最终构建出有效的设备状态评估和故障预测模型。希望能够提高风电企业安全管理水平，降低设备故障率，以达到保障风电企业稳定运行和经济效益的目的。

关 键 词： AI 大数据；风电企业；安全管理；设备状态评估；故障预测

Comprehensive Application of Ai Big Data in the Safety Management of Wind Power Enterprises: Equipment Status Assessment and Fault Prediction

Wei Chengfa

SDIC Guizhou New Energy Co., LTD. Guiyang, Guizhou 550000

Abstract： This paper focuses on the comprehensive application of AI big data in the safety management of wind power enterprises, focusing on its application principles, methods and practical effects in equipment condition evaluation and fault prediction. Not only that, through the analysis of relevant technical principles, combined with the operation characteristics of wind power equipment, and finally build an effective equipment condition evaluation and fault prediction model. It is hoped to improve the safety management level of wind power enterprises, reduce the equipment failure rate, and achieve the purpose of ensuring the stable operation and economic benefits of wind power enterprises.

Keywords： AI big data; wind power enterprises; safety management; equipment status assessment; fault prediction

引言

风能作为一种清洁、可再生能源，其在全球能源结构中的地位日益重要。尽管目前风电企业的规模和数量在不断地扩大，但是风电设备通常分布在复杂的自然环境中，其运行条件恶劣，所以设备故障的风险较高。而一旦发生故障，不仅会导致发电量损失，并且还可能引发安全事故，最终造成巨大的经济损失和社会影响^[1]。因此加强风电企业的安全管理，与提高设备的可靠性和稳定性成为了当务之急。

传统的风电设备管理方法主要依赖人工巡检和经验判断，其中存在检测不及时、准确性低等问题。信息技术的飞速发展，促使 AI 大数据技术逐渐进入于风电企业安全管理领域。因为 AI 大数据技术能够实时采集、分析海量的设备运行数据，所以可以实现对设备状态的精准评估和故障的提前预测，从而为风电企业安全管理提供科学依据，可有效地降低设备故障带来的风险。

一、AI 大数据技术原理

（一）大数据技术

大数据技术是指从各种各样类型的数据中，快速获得有价值信息的能力。在风电企业当中，大数据主要来源于风电设备的传感器、监控系统、运维记录等，且其具有数据量大、数据类型多样、数据产生速度快等特点。而大数据技术通过数据采集、存储、处理和分析等环节，即可对风电设备运行数据进行深度地挖

掘，从中提取出设备运行状态的关键信息^[2]。例如利用分布式存储技术（如 Hadoop 分布式文件系统 HDFS）存储海量的风电数据，再使用 MapReduce 等分布式计算框架对数据进行并行处理，即可有效地提高数据处理效率。

（二）AI 技术

AI 技术是研究、开发用于模拟、延伸和扩展人的智能的理论、方法、技术及应用系统的一门新的技术科学。对于风电设备管理而言，常用的 AI 技术包括了机器学习和深度学习。其中机

器学习是让计算机通过数据学习模式和规律，从而实现对新数据的预测和分类^[3]。如支持向量机（SVM）、决策树、随机森林等算法，均可用于风电设备状态的分类和评估。深度学习则是机器学习的一个分支领域，它主要是通过构建具有多个层次的神经网络模型，实现自动从大量数据中学习特征表示。如卷积神经网络（CNN）、循环神经网络（RNN）及其变体长短期记忆网络（LSTM）等，它们均在风电设备故障预测和状态评估中展现出了自己强大的能力，能够处理复杂的时间序列数据和非线性关系。

二、AI大数据在风电设备状态评估中的应用

（一）数据采集与预处理

风电设备运行过程中会产生大量的数据，其中包括风速、风向、发电机转速、温度、振动等。目前可通过安装在设备各个部位的传感器，实时地采集这些数据。但由于采集到的数据可能存在噪声、缺失值和异常值等问题，因此需要对其进行预处理。对此运维人员采用了滤波算法去除噪声，使用数据插值方法填补缺失值，并且通过统计学方法或机器学习算法来识别和修正异常值^[4]。例如对于温度数据中的异常值，运维人员可以通过设定合理的温度范围，再结合历史数据的统计特征，判断并修正异常值，来确保数据的准确性和可靠性。

（二）特征提取与选择

从预处理后的数据中提取能够反映设备运行状态的特征，是设备状态评估的关键步骤。当下常用的特征提取方法有时域分析、频域分析和时频分析。展开来说，在时域分析中主要计算均值、方差、峰值指标等统计量；频域分析则是通过傅里叶变换等方法，将时域信号转换为频域信号，以此提取频率特征；而时频分析需要结合时域和频域信息，如小波变换可用于分析信号在不同时间和频率尺度上的特征^[5]。

特征的选择是从提取的众多特征之中，挑选出最具代表性和相关性的特征，以减少数据维度，与提高模型训练效率和准确性。一般会采用相关性分析、信息增益等方法进行特征选择，以此去除冗余和不相关的特征。

（三）状态评估模型构建

1. 基于机器学习的评估模型

支持向量机（SVM）是一种常用的机器学习模型，它主要是通过寻找一个最优分类超平面，将不同状态的数据样本分开。在风电设备状态评估当中，运维人员可将正常运行状态和不同故障状态的数据样本作为训练集，再训练 SVM 模型，最终使其能够准确判断设备的运行状态^[6]。

2. 基于深度学习的评估模型

现阶段卷积神经网络（CNN）在图像识别领域取得了巨大成功，并且其在风电设备状态评估中也有应用。具体而言，CNN 通过卷积层、池化层和全连接层等结构，可实现自动提取数据的特征，因而能够有效地处理具有空间结构的数据。例如，对于风电设备的振动信号，运维人员可以将其转换为图像形式，接着利用 CNN 进行特征学习和状态分类。而循环神经网络（RNN）及其变

体长短期记忆网络（LSTM）更适合处理时间序列数据。由于风电设备运行数据具有时间序列特性，所以 LSTM 通过引入记忆单元和门控机制，即可有效地捕捉数据中的长期依赖关系，以此为基础可准确地评估设备的运行状态^[7]。

（四）状态评估结果分析与可视化

经由状态评估模型得到设备的状态评估结果后，运维人员需要对结果进行分析和可视化展示。其中分析评估结果可以用于判断设备是否处于正常运行状态，以及存在潜在故障的可能性。而利用图表、仪表盘等方式可以将评估结果可视化，如使用柱状图展示不同设备的健康状态评分，或者用折线图展示设备状态随时间的变化趋势。在可视化的展示之下，运维人员能够直观地了解设备的运行情况，从而能够及时地发现问题并采取相应措施。

三、AI大数据在风电设备故障预测中的应用

（一）故障预测的基本原理

故障预测可通过对设备运行数据的分析，来预测设备未来可能发生的故障。其基本原理是基于设备故障的发展规律，再利用历史数据建立故障预测模型，对于设备的未来状态进行预测。风电设备故障通常具有一定的发展过程，从早期的潜在故障到逐渐发展为严重故障，而通过监测设备运行数据的变化趋势，运维人员则能够提前发现潜在故障的迹象^[8]。

（二）基于时间序列分析的故障预测

时间序列分析在当前是一种常用的故障预测方法，它主要是通过通过对设备运行数据的时间序列进行建模和分析，来预测未来的数据值。其中自回归移动平均模型（ARIMA）是一种经典的时间序列模型，它可以根据时间序列的自相关性和移动平均性建立模型。在风电设备故障预测当中，运维人员可对设备的关键参数（如振动、温度等）的时间序列数据进行 ARIMA 建模，从而预测未来的参数值。当预测值超出正常范围时，则预示着设备可能发生了故障。

（三）基于深度学习的故障预测

深度学习模型在风电设备故障预测之中具有强大的能力。而 LSTM 网络能够有效地处理时间序列数据中的长期依赖关系，并且通过对历史数据的学习，预测设备未来的运行状态。例如，运维人员将风电设备过去一段时间的运行数据（包括风速、发电机转速、振动等）作为输入，然后通过 LSTM 网络预测未来的振动值，当预测的振动值异常增大时，就可以预测设备可能发生振动故障。除此之外，生成对抗网络（GAN）也可用于故障预测，它由生成器和判别器组成，经过对抗训练之后，生成器能够生成与真实数据相似的样本，而判别器则可以判断样本是真实数据还是生成数据。实际在故障预测中，运维人员利用 GAN 生成正常运行状态下的数据样本，再与实际采集的数据进行对比，若差异较大则预示着设备可能出现故障^[9]。

（四）故障预测模型的评估与优化

运维人员为了确保故障预测模型的准确性和可靠性，需要对模型进行评估和优化。现阶段常用的评估指标包括准确率、召回

率、F1值、均方误差等。运维人员通过在测试数据集上计算这些指标，即可评估模型的性能。如果模型性能不理想，则可以通过调整模型参数、增加训练数据、改进模型结构等方式对其进行优化。例如对于深度学习模型来说，运维人员可以调整学习率、层数、神经元数量等参数，或者是采用数据增强技术扩充训练数据，其目的均为提高模型的泛化能力和预测准确性。

四、AI大数据在风电企业安全管理中的综合应用

（一）容易引发的风机事故及事故预防相关的内容

1. 叶片故障引发事故

因为风电叶片长期在复杂的气象条件下运行，其会受到强风、沙尘、雷击等影响，随意容易出现裂纹、断裂等故障。一旦出现叶片故障，就可能导致叶片脱落，进而引发严重的安全事故，甚至是对周边人员和设备造成威胁。而利用 AI 大数据技术，即对叶片的振动、应变等数据进行实时监测和分析，运维人员便能够及时地发现叶片的潜在故障。同时还可以建立叶片故障预测模型，以提前预测叶片可能出现的问题，以此为根据及时地安排维护和更换，预防事故的发生。

2. 齿轮箱故障引发事故

齿轮箱是风电设备的关键部件，其在实践当中故障发生率较高。而齿轮箱故障可能导致设备停机、发电量损失，甚至是引发火灾等严重事故。此时运维人员应用 AI 大数据技术，就可以通过监测齿轮箱的油温、油压、振动等参数，在此基础上即可分析齿轮箱的运行状态。接着利用机器学习和深度学习模型，运维人员可对齿轮箱的故障进行预测和诊断，提前采取针对性措施，如更换润滑油、维修或更换齿轮等，以避免故障扩大^[10]。

3. 电气系统故障引发事故

风电设备的电气系统当中有发电机、变流器、变压器等部件，若电气系统故障就可能会导致设备短路、漏电等问题，继而引发火灾和人员触电事故。但通过 AI 大数据技术能够对电气系统的电流、电压、功率等参数进行实时地监测和分析，此时运维人员可以及时地发现电气系统的异常情况。基于此建立电气系统故障预测模型，便可与提前预测电气故障，并采取相应的保护措施，

如安装漏电保护器、短路保护装置等，最终可以确保电气系统的安全运行。

（二）建议采取的措施

1. 加强数据安全治理

AI 大数据在风电企业安全管理中的应用必须依赖于大量的设备运行数据，因此数据安全至关重要。而风电企业则应建立完善的数据安全管理制度，并采用加密技术保护数据传输和存储的安全，以此防止数据泄露和篡改。同时还需要对数据访问进行严格的权限管理，要确保只有授权人员才能够访问和处理数据。

2. 培养专业人才

对于风电企业而言，在实践中应用 AI 大数据技术必须需要既懂风电技术又懂数据分析和 AI 技术的专业人才。所以风电企业应加强人才培养，积极的通过内部培训、外部引进等方式，来组建专业的技术团队。除此还要培养在岗员工的数据意识和数据分析能力，使其能够熟练地运用 AI 大数据技术。

3. 建立健全的运维体系

基于 AI 大数据的设备状态评估和故障预测结果，需要风电企业应建立一个健全的运维体系。一方面要制定科学的运维计划，即根据设备的实际运行状态，合理地安排维护和检修工作，从而提高运维效率。另一方面要建立故障应急预案，当设备发生故障时，相关人员便能够迅速地响应，采取有效的措施，进而减少事故损失。

五、结语

实践中运维人员对于风电设备运行数据进行深度挖掘和分析，可实现了设备状态的精准评估和故障的提前预测，此举可有效地预防风机事故的发生。即风电设备的可靠性和稳定性离不开 AI 大数据技术的应用。但目前 AI 大数据技术在风电企业的应用仍面临一些挑战，如数据质量问题、模型的可解释性等。未来相关行业依然需要进一步地加强技术研究和创新，不断地完善 AI 大数据技术在风电企业安全管理中的应用，最终推动风电产业的可持续发展。

参考文献

- [1] 王彦海. 基层风电企业安全生产优化管理 [J]. 中国电力企业管理, 2014, (11): 64-65.
- [2] 郑涛. 高山风电项目开发难点及应对措施分析 [J]. 现代商贸工业, 2021, 42(13): 167-168.
- [3] 张振龙, 范祎珊. 平价时代风电项目开发选址的思考 [J]. 能源, 2022, (09): 68-70.
- [4] 罗新虎. 140m 风电机组混塔安装技术 [J]. 安装, 2023, (10): 6-10.
- [5] 王超宾. 分散式风电踏入跃进时代 [J]. 能源, 2013, (11): 71-73.
- [6] 刘吉臻, 王庆华, 房方, 等. 数据驱动下的智能发电系统应用架构及关键技术 [J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(12): 3578-3587.
- [7] 孔军, 朱海峰, 潘芸, 等. 基于实时信息的智能变电站二次设备状态综合评价 [J]. 机电工程技术, 2023, 52(04): 221-226.
- [8] 曹帅. 智能变电站继电保护系统可靠性分析 [J]. 机电工程技术, 2021, 50(07): 94-96.
- [9] 龚雪武. 数字化变电站继电保护及自动化系统设计 [J]. 机电工程技术, 2019, 48(04): 174-177.
- [10] 郑欢, 唐元春, 林文钦. 配电自动化无线专网中基于干扰抑制的小区深度覆盖和频谱分配策略 [J]. 重庆邮电大学学报 (自然科学版), 2022, 34(02): 320-330.

热电厂汽机设备运行状态监测与故障诊断

孔垂鑫, 张建民

华能青岛热电有限公司, 山东 青岛 266409

摘 要 : 伴随着工业技术的迅猛进步, 汽机设备在复杂性和自动化水平上均实现了显著提升, 这同时也对设备运行状态的实时监测以及故障诊断工作提出了更为严苛的要求。实时监测技术凭借其能够即时捕捉设备异常的优势, 成为保障设备稳定运行的重要手段。而故障诊断技术则依托深入的数据分析与严谨的模型验证过程, 精确识别设备中存在的潜在问题, 为实施科学合理的设备维护策略提供了坚实的数据支撑。本文旨在探讨热电厂汽机设备运行状态监测与故障诊断的关键技术, 分析其在实际应用中的效果与挑战, 以期为提升设备运行效率、减少非计划停机时间、保障电力生产安全提供理论支持与实践指导, 推动行业可持续发展。

关 键 词 : 热电厂汽机设备; 运行状态监测; 故障诊断

Operation State Monitoring and Fault Diagnosis of Steam Turbine Equipment in Thermal Power Plant

Kong Chuixin, Zhang Jianmin

Huaneng Qingdao Thermal power Co., LTD. Qingdao, Shandong 266409

Abstract : With the rapid progress of industrial technology, the complexity and automation level of the steam turbine equipment have been significantly improved, which also puts forward more stringent requirements for the real-time monitoring of the running status and fault diagnosis of the equipment. Real-time monitoring technology has become an important means to ensure the stable operation of equipment by virtue of its advantages. The fault diagnosis technology relies on the in-depth data analysis and rigorous model verification process to accurately identify the potential problems existing in the equipment, and provides a solid data support for the implementation of scientific and reasonable equipment maintenance strategy. This paper aims to discuss the key technologies of operation condition monitoring and fault diagnosis of steam engine equipment in thermal power plants, analyze its effects and challenges in practical application, in order to provide theoretical support and practical guidance for improving the operation efficiency of equipment, reducing unplanned downtime, ensuring the safety of power production, and promote the sustainable development of the industry.

Keywords : steam engine equipment in thermal power plant; operation status monitoring; fault diagnosis

引言

随着能源需求的持续攀升, 热电厂作为电力系统中的关键能源供应单元, 其运行效率和可靠性对系统的整体稳定性和经济性产生了深远影响。汽机设备作为热电厂的核心构成部分, 其运行状态的实时监测与故障诊断技术的研究与应用, 对于确保热电厂的高效稳定运行具有至关重要的意义。

一、热电厂汽机设备运行状态监测与故障诊断的研究意义

表1 研究意义

类目	具体内容
提升设备运行可靠性与安全性	汽机设备是热电厂的核心设备，其运行状态直接关系到整个电厂的安全性和稳定性。
提高电厂运行效率与经济效益	汽机设备的运行效率直接影响热电厂的能源转换效率和经济效益。

（一）提升设备运行可靠性与安全性

汽机设备作为热电厂的核心组成部分，其运行状态直接关乎电厂的安全性与稳定性。对汽机设备运行参数的实时监测，结合先进的故障诊断技术，能够有效识别并预警潜在故障隐患，从而避免设备突发性故障引发的非计划停机事故，确保电厂运行的安全稳定^[1]。精准的故障诊断技术不仅能迅速定位故障点，还能大幅缩短维修时间，降低设备故障发生率，提升运行可靠性。

（二）提高电厂运行效率与经济效益

汽机设备的运行效率对热电厂的能源转换效率和经济效益起着决定性作用。利用状态监测与故障诊断技术，可以实时调整并优化设备运行参数，有效减少能源浪费，降低运行成本^[2]。精准的故障诊断能力使得问题能够迅速被定位，从而减少非计划停机时间，提高设备的利用率，进而提升电厂的整体运行效率。实施预防性维护策略，有助于延长设备的使用寿命，降低维护成本，进一步优化电厂的经济效益^[3]。

二、热电厂汽机设备运行状态监测方法

表2 监测方法

类目	具体内容
基于传感器技术的实时监测	通过在汽机设备的关键部位安装传感器（如温度传感器、压力传感器、振动传感器等），实时采集设备的运行数据。
数据分析的智能监测	利用大数据和机器学习技术，对历史运行数据进行分析，建立设备正常运行状态的模型。
图像识别的视觉监测	利用高清摄像头和图像处理技术，对汽机设备的外观和运行状态进行实时监控。

（一）传感器技术的实时监测

在汽机设备的关键部位安装多种传感器，是实现实时监测的重要手段。温度传感器被用于监控轴承、蒸汽管道等关键部位的温度变化情况，而压力传感器则负责实时测量蒸汽压力，确保其始终保持在安全范围内^[4]。同时，振动传感器能够敏感地捕捉到设备运行过程中的异常振动信号，为后续的故障诊断提供有力依据。这些传感器将采集到的数据传输至中央控制系统，系统运用算法对数据进行处理，并与预设的阈值进行对比，从而及时发现潜在的异常状况并触发报警^[5]。

（二）基于数据分析的智能监测

基于数据分析的智能监测技术，通过收集汽机设备的历史运行数据，并结合机器学习算法，构建出设备正常运行状态的模

型。实时采集的数据与该模型进行对比分析，能够有效识别设备的异常行为，并预测潜在的故障发生^[6]。此技术运用大数据技术，对海量数据进行深度挖掘和分析，提取出关键特征，从而实现了对设备状态的精准评估。通过建立预测模型，系统能够在故障实际发生之前发出预警，为实施预防性维护策略提供科学依据^[7]。智能监测技术的应用，不仅提高了故障诊断的准确性，还优化了设备的维护计划，有效减少了非计划停机时间，提升了热电厂的整体运行效率和可靠性^[8]。

（三）基于图像识别的视觉监测

基于图像识别的视觉监测技术，利用高清摄像头捕捉汽机设备的外观及运行状态，并结合图像处理技术进行实时监控。该技术通过采集设备表面的图像数据，运用计算机视觉算法自动检测裂纹、泄漏、部件松动等可见故障。同时，它还能监测设备运行中出现的异常现象，如蒸汽泄漏或叶片变形，为故障分析提供直观的视觉信息^[9]。图像识别技术以其非接触式监测的特点，特别适用于复杂环境下的故障检测，有效补充了传统监测手段的不足。

三、热电厂汽机设备运行状态故障诊断中的注意事项

表3 注意事项

类目	具体内容
数据采集的准确性与完整性	数据采集的准确性与完整性是汽机设备故障诊断的基础。
故障诊断模型的科学性与适用性	故障诊断模型的科学性与适用性直接影响诊断结果的可靠性。
诊断结果的综合分析与验证	诊断结果的综合分析与验证是确保故障判断准确性的关键环节。

（一）数据采集的准确性与完整性

定期对传感器进行校准，以确保温度、压力、振动等关键参数的测量精度，防止因数据误差而引发误判^[10]。数据采集范围应全面覆盖设备运行的所有关键部位，确保所收集的数据能够全面反映设备的实际状态。采样频率需根据设备的特性进行合理设置，以便准确捕捉瞬态异常和细微变化。在数据存储与传输过程中，应采取有效的抗干扰措施，确保数据的完整性和可靠性。高质量的数据为后续的分析 and 诊断提供了坚实的基础，有效提升了故障识别的准确性，同时也增强了设备运行的安全性^[11]。

（二）故障诊断模型的科学性与适用性

故障诊断模型的科学性与适用性对诊断结果的可靠性至关重要。构建模型时，需依托高质量的历史数据，利用机器学习算法提取设备在正常运行状态下的特征，建立精确的参考模型。在模型验证环节，应模拟多种工况条件，以确保模型在不同运行环境下的适用性^[13]。随着设备的老化或工况的变化，模型需定期进行更新，以维持其诊断的准确性。在模型训练过程中，需有效避免数据噪声和偏差的影响，确保模型的鲁棒性。一个科学合理构建的诊断模型，能够准确识别设备的异常行为，预测潜在故障，为设备维护提供可靠的依据，进而提升热电厂运行的安全性与效率^[12]。

（三）诊断结果的综合分析与验证

诊断结果的综合分析与验证是保障故障判断准确性的核心环节。在这一过程中，需整合传感器数据、图像识别信息及历史运行记录，对异常现象进行多维度、全方位的交叉验证，以避免单一数据源可能导致的误判^[14]。同时，结合设备的运行环境和工况特点，深入分析故障的可能原因，并有效排除干扰因素。现场检查与测试作为验证手段，进一步确认诊断结果的可靠性。在综合分析验证过程中，注重数据的关联性，将温度、压力、振动等参数的变化趋势与设备的运行状态紧密结合，以识别潜在的故障模式^[15]。利用大数据分析技术，对海量数据进行深度挖掘，提取

关键特征，增强诊断的科学性和准确性。

四、结束语

总之，汽机设备运行状态监测与故障诊断技术，是热电厂迈向智能化、高效化运行的关键途径。该技术集成了先进的传感器技术、高效的数据处理算法以及智能诊断系统，能够显著提升汽机设备的运行可靠性，并优化维护效率，确保热电厂的稳定高效运营。

参考文献

- [1] 武家晨. 西安户县热电厂工业遗产保护利用研究 [D]. 西安建筑科技大学, 2024.
- [2] 崔国中, 梁海娟. 热电厂机组 DCS 升级改造研究 [J]. 电子质量, 2022, (11): 79-83.
- [3] 张晓东, 丁贤虎. 热电厂新增纯凝汽机组的技术经济分析 [J]. 节能, 2018, 37(01): 63-64.
- [4] 陈厚钗. 热电厂汽机热力性能测试分析及性能评价 [J]. 低碳世界, 2016, (20): 41-42.
- [5] 彭大维. 热电厂汽机部分顺序控制系统探析 [J]. 科技创新与应用, 2015, (26): 140.
- [6] 王睿. 火力发电厂设备运行中的故障及解决措施 [J]. 造纸装备及材料, 2023(07): 72-74.
- [7] 刘红军. 火力发电厂机组调峰服务当天启停运行方式优化 [J]. 仪器仪表用户, 2023(08): 84-87.
- [8] 马子程. 发电厂中的汽机辅机运行优化分析 [J]. 集成电路应用, 2023(01): 222-223.
- [9] 肖从付. 火力发电厂汽机常见问题及应对策略 [J]. 光源与照明, 2021(07): 77-78.
- [10] 迟鹏; 蒙磊; 李思博. 火力发电厂汽机设备运行中的常见问题及技术研究 [J]. 通信电源技术, 2020(02): 244-245.
- [11] 李杰. 关于优化火力发电厂汽机辅机运行的一些分析 [J]. 科技创新导报, 2018(23): 94-95.
- [12] 张耀. 论火力发电厂汽机辅机经济运行优化策略 [J]. 智库时代, 2019(38): 24-26.
- [13] 胡为杰. 火力发电厂汽机辅机经济运行优化策略探讨 [J]. 低碳世界, 2018(12): 71-72.
- [14] 陈建勋. 基于物联网技术的火力发电厂汽机远程监控与管理研究 [J]. 电气技术与经济, 2024(06): 280-282.
- [15] 黎明辉. 火力发电厂中汽机辅机的优化运行 [J]. 中国战略新兴产业, 2018(32): 219.

GIS 设备运维与检测中的物联网技术应用探索

龚鹏, 曹曲

国网湖北省电力有限公司荆州供电公司变电运维分公司, 湖北 荆州 434300

摘 要 : 目前地理信息系统 (GIS) 在城市规划、环境监测、交通管理等领域应用广泛, GIS 设备的运维和维护变得越来越关键, 物联网技术的快速发展给 GIS 设备的运维和检测带来了革命性的变化, 提供了新的高效的技术手段。本文深入探讨了物联网技术在 GIS 设备运维和检测中的具体应用, 详细分析了其技术优势和实际应用效果, 结合几个具体案例, 进一步说明了物联网技术如何显著提高 GIS 设备的运维效率和检测精度, 为 GIS 设备的稳定运维和高效管理提供了有力支撑。

关 键 词 : GIS 设备; 运维与检测; 物联网技术; 应用探索

Exploration of the Application of the Internet of Things technology in GIS Equipment Operation and Maintenance and Detection

Gong Peng , Cao Qu

State Grid Hubei Electric Power Co., LTD. Jingzhou Power Supply Company substation Operation and maintenance Branch , Jingzhou, Hubei 434300

Abstract : At present, geographic information system (GIS) is widely used in urban planning, environmental monitoring, traffic management and other fields. The operation and maintenance of GIS equipment has become becoming more and more critical. The rapid development of Internet of Things technology has brought revolutionary changes to the operation and detection of GIS equipment, and provided new and efficient technical means. This paper discusses the Internet of things technology in GIS equipment operations and detection in the specific application, detailed analyzes the technical advantages and practical application effect, combined with several specific cases, further illustrates the Internet technology how to significantly improve the operational efficiency of the GIS equipment and detection accuracy, for the stability of GIS equipment operations and efficient management provides a strong support.

Keywords : GIS equipment; operation and maintenance and detection; Internet of Things technology; application exploration

引言

地理信息系统 (GIS) 作为一种综合性的空间信息技术, 已经广泛应用于城市规划、交通管理、环境监测等领域, GIS 设备的稳定运维和准确检测对于保证地理信息数据的准确性和完整性至关重要, 传统的 GIS 设备运维和检测方法存在效率低、准确性不足等问题。随着物联网技术的快速发展, 其在 GIS 设备运维和检测中的应用逐渐受到关注。

一、传统 GIS 设备运维和检测的不足

(一) 运维响应滞后, 故障处理不及时

GIS 设备通常部署在复杂多变的地理环境中, 其运维状态往往受到多种因素的影响, 传统的运维方式大多依靠人工巡检和定期维护, 这种被动的运维模式使得运维人员难以及时发现和处理设备故障。当设备出现故障时, 运维人员往往需要通过复杂的流程了解故障信息, 然后进行现场排查和修复, 不仅延长了故障处理时间, 还可能导致更严重的后果。从运维效率来看, 传统运维模式在信息传递和反馈机制上存在明显的瓶颈, 由于 GIS 设备数

量多、分布广, 运维人员很难实时掌握所有设备的运维状态。当设备发生故障时, 信息的传递和反馈往往依靠电话、邮件等传统的通信方式, 不仅费时费力, 还可能因信息传递不准确或遗漏而导致误判或延误。^[1]此外, 传统的运维模式还缺乏智能的故障预警和诊断机制, GIS 设备在运维过程中会产生大量的数据, 这些数据包含了丰富的设备状态信息, 传统的运维方法往往忽略了这些数据的价值, 没有充分利用这些数据进行故障预警和诊断, 这使得运维人员难以在故障发生前进行预测和干预, 从而错失最佳故障处理时机。

(二) 检测方法单一, 准确性难以保证

在 GIS 设备的检测中, 传统的方法往往依赖于单一的检测

手段，如定期巡检和人工测量，这些检测方法虽然能在一定程度上反映设备的运维状态，但其准确性和可靠性有很大的局限性。定期检查和人工测量往往会受到人为因素的影响，检验人员的专业水平、工作经验和工作态度将直接影响检验结果的准确性。此外，由于 GIS 设备通常部署在室外或复杂环境中，巡检人员往往受到天气、地形等自然条件的限制，也可能导致巡检结果出现偏差。传统的检测方法往往缺乏对设备内部状态的深入了解，GIS 设备是一个复杂的系统，包含许多零部件，这些零部件之间的交互是复杂的，难以可视化。传统的检测方法只能检测设备的外部状态，无法深入了解设备的内部状态和性能，这使得运维人员很难准确判断设备的真实运维状态，可能会漏掉一些潜在的故障隐患。传统的检测方法仍然缺乏智能的数据分析和处理能力，GIS 设备在运维过程中会产生大量的数据，这些数据包含了丰富的设备状态信息，而传统的检测方法往往没有充分利用这些数据进行深入的分析和处理，而是单纯依靠检测人员的经验和判断来排除故障，这导致测试结果的准确性和可靠性无法得到充分保证。

（三）运维成本高，资源利用率低

传统的 GIS 设备运维检测模式仍然存在运维成本高、资源利用率低的问题，由于 GIS 设备数量多、分布广，运维人员需要投入大量的人力、物力和财力对设备进行运维和巡检，但由于传统运维方式缺乏智能化、自动化手段，运维效率低，资源利用率不高。传统的运维方式需要大量人工参与，导致运维成本高，运维人员需要定期进行检查、测量和维护，不仅费时费力，还需要投入大量资金购买相关的检测设备和工具，由于 GIS 设备通常部署在室外或复杂环境中，运维人员在工作时还需要考虑安全问题，这也增加了运维成本。传统的运维模式还缺乏智能的资源调度和分配机制，由于 GIS 设备数量多、分布广，运维人员在工作中往往难以合理分配和利用资源，一些区域或设备可能有剩余资源，而另一些区域或设备可能资源不足，这种资源分配的不平衡，不仅降低了运维效率，也浪费了宝贵的资源。传统的运维模式还缺乏智能的数据分析和处理能力，由于 GIS 设备在运维过程中会产生大量的数据，这些数据包含了丰富的设备状态信息和运维经验，而传统的运维方法往往没有充分利用这些数据进行深入的分析和处理，而是单纯依靠运维人员的经验和判断进行决策，这导致运维决策的科学性和准确性无法得到充分保障，也浪费了宝贵的数据资源。

二、物联网技术在 GIS 设备运维中的应用

（一）实时监测和预警系统的建设

以往 GIS 设备运维往往依赖人工巡检和定期维护，不仅效率低下，而且难以及时发现和处理潜在问题，物联网技术的引入彻底改变了这种情况。通过物联网传感器，可以实时监测 GIS 设备的运维状态，包括工作温度、压力、电流等关键参数，这些数据被实时收集并传输到云或数据中心，通过先进的算法和分析工具，可以对这些数据进行处理和分析，从而实现对 GIS 设备健康状态的实时监测。以 A 城市智能供水系统为例，该系统利用物联

网技术对供水管道中的 GIS 设备进行实时监控。当某段管道出现异常压力或泄漏时，系统能立即发出预警，并准确定位问题，这不仅大大提高了运维效率，也显著降低了因管道泄漏等原因造成的经济损失。

（二）远程操作维护和故障排除

物联网技术也为 GIS 设备的远程维护和故障排除提供了可能，借助物联网技术，可以实现对 GIS 设备的远程访问和控制，无需人员亲临现场即可对设备进行调试、配置和升级。这样既降低了运维成本，又提高了运维效率。此外，物联网技术还可以帮助我们快速检查和定位故障，当 GIS 设备出现故障时，系统可以自动采集故障信息，并通过网络传输到数据中心，操作和维护人员可以使用这些信息进行故障分析，并快速定位问题。例如，一家电力公司使用物联网技术来远程监控和操作变电站中的 GIS 设备。当设备出现故障时，系统能自动报警并提供详细的故障信息，运维人员可以根据这些信息快速制定维护方案，远程指导现场人员进行维护作业。

（三）数据融合和智能决策支持

通过物联网技术，我们可以将 GIS 设备与各种传感器和监控设备连接起来，形成一个庞大的数据网络，这些数据网络提供了丰富的实时数据和信息，为运维决策提供了有力支持。借助先进的数据分析和挖掘技术，可以从这些数据中提取有价值的信息和规律，为 GIS 设备的运维提供智能决策支持，比如可以利用数据分析技术预测设备的寿命和故障趋势，从而提前制定维修计划；还可以利用数据挖掘技术，发现设备运维中的潜在问题和风险点，从而采取相应的防范措施。以 B 大型油田 GIS 设备的运维为例，油田利用物联网技术将 GIS 设备与各种传感器连接起来，实现对设备状态的实时监控和数据采集。通过对这些数据的分析和挖掘，油田运维人员可以及时发现设备的异常情况，并采取相应的维护措施，这不仅提高了设备的可靠性和稳定性，还显著降低了设备故障造成的生产损失。^[2]

三、物联网技术在 GIS 设备检测中的应用

（一）实时监控和数据整合

GIS 设备可以实时采集和传输其运维状态数据，包括但不限于位置信息、工作参数、环境条件等，这些数据通过物联网网络快速整合到 GIS 系统中，使管理者能够实时获得设备的全面信息。比如在智能交通领域，物联网技术广泛应用于交通设备的实时监控，通过在红绿灯、摄像头、道路传感器等设备中嵌入 IOT 模块，这些设备可以实时向 GIS 系统发送数据，包括交通流量、速度、拥堵等。GIS 系统可以根据这些数据生成实时交通地图，帮助交通管理部门快速识别和解决交通问题，据统计，采用物联网技术的智能交通系统可以减少 20% 左右的交通拥堵时间，提高整体交通效率。此外，物联网技术在环境监测中也发挥着重要作用，通过部署在各地的环境传感器，如空气质量监测站、水质监测设备等，物联网可以实时采集环境数据，并通过 GIS 系统进行显示和分析，这些数据不仅有助于及时发现环境问题，还能环保政

策的制定提供科学依据。例如，在一些城市，通过物联网技术监测的 PM2.5 浓度数据被用于实时更新空气质量指数，以提醒市民采取必要的防护措施。

（二）预测性维护和故障预警

物联网采集的设备运维数据，结合先进的数据分析算法，GIS 系统可以预测设备的维护需求和潜在的故障风险，在工业领域，物联网技术广泛应用于设备的远程监控和预测性维护。物联网通过在设备上安装传感器，可以实时采集设备的振动、温度、压力等关键参数，并通过 GIS 系统进行分析。当设备参数出现异常波动时，GIS 系统可以自动触发故障预警，提醒维护人员及时采取措施，引入物联网技术的预知维修策略可以降低设备故障率 30% 左右，延长设备使用寿命。此外，在智慧城市建设中，物联网技术还用于公共设施的预测性维护，比如在城市照明系统中，GIS 系统通过物联网技术采集路灯亮度、耗电量等数据，预测路灯的维护需求，及时更换老化或损坏的灯泡，保证城市照明的正常运维，这不仅提高了城市照明质量，还降低了维护成本。

（三）资源优化和能源管理

在智能建筑领域，物联网技术应用于建筑的能源管理系统，物联网通过在建筑物内安装智能电表、温度传感器等设备，可以实时采集建筑物的能耗数据和环境数据，GIS 系统可以根据这些数据生成能耗分析报告，并提出节能建议。例如，在一些商业建筑中，通过物联网技术收集的能耗数据用于优化空调系统的运维策略，能耗降低了 15% 左右。此外，在农业领域，物联网技术也被用于农田的灌溉管理，通过部署在农田中的土壤水分传感器和气象监测设备，物联网可以实时采集农田的环境数据。GIS 系统可以根据这些数据生成灌溉计划，指导农民进行科学合理的灌溉作业，这样既提高了农田的灌溉效率，又节约了水资源。

（四）智能决策支持和可视化显示

城市规划中，物联网技术为决策者提供了丰富的数据支持，通过 GIS 系统显示的交通流量、人口密度、环境质量等数据，决策者可以了解城市的运维状况和发展趋势，制定更加符合实际需要的城市规划方案，比如在一些城市，通过物联网技术采集的交通数据，用于优化公交线路和站点布局，提高了公交的便捷性和覆盖面。此外，在环保方面，物联网技术也为决策者提供了强有力的数据支持，通过 GIS 系统显示的空气质量、水质等环境数据，决策者可以及时了解环境状况，采取必要的防护措施，一些地区利用物联网技术监测的水质数据制定水污染控制方案，有效改善了当地的水环境质量。在可视化展示方面，GIS 系统可以将物联网采集的数据以直观的方式呈现出来，通过地图、图表、动画等形式，管理人员可以清楚地了解设备的运维状态和环境条件，这不仅提高了数据的可读性和可用性，也为决策提供了更直观的依据。例如，在一些工业领域，通过 GIS 系统的可视化显示功能，管理者可以实时了解设备的运维状态和生产效率，及时调整生产计划，以应对市场变化。

四、结语

物联网技术在 GIS 设备运维和检测中的应用优势明显，通过实时监控预警、远程运维、故障排除等功能，提高 GIS 设备的运维效率和检测精度。同时，物联网技术还可以实现数据融合和分析，为设备维护和更换提供科学依据，随着物联网技术的不断发展和完善，其在 GIS 设备运维和检测中的应用前景将会更加广阔。

参考文献

[1] 姚卫民, 黄安朝. 浅析变电站 GIS 设备的故障诊断与检修 [J]. 科技创新导报, 2018(36): 37-38.
[2] 周广方. 浅析变电站 GIS 维护与修理 [J]. 广东科技, 2019, 21(23): 89-90.

电力工程维护中的大数据分析 with 故障预测模型

高扬

大连四通机电安装工程有限公司, 辽宁 大连 116000

摘要： 随着信息技术发展, 电力行业进入大数据时代。电力工程稳定性至关重要, 但传统故障检测和预测方法依赖人工, 存在效率低、成本高、预测不准等问题。大数据分析技术为电力工程维护提供新方案, 能揭示设备运行规律和潜在故障特征, 实现早期预警和精准定位。本文介绍电力工程维护现状, 分析传统方法局限, 阐述大数据应用优势, 探讨故障预测模型构建方法, 包括数据预处理、特征提取等步骤, 并展望大数据技术在电力工程维护中的未来趋势, 提出加强数据共享、深化算法研究等建议, 旨在为电力工程维护领域的大数据应用提供理论参考和实践指导, 推动电力行业智能化、高效化发展。

关键词： 电力工程维护; 大数据分析; 故障预测模型; 特征提取; 资源配置

Big Data Analysis and Fault Prediction Models in Power Engineering Maintenance

Gao Yang

Dalian Sitong Electromechanical Installation Engineering Co., Ltd. Dalian, Liaoning 116000

Abstract： With the development of information technology, the power industry has entered the era of big data. The stability of power engineering is crucial, but traditional fault detection and prediction methods rely on manual labor, which has issues such as low efficiency, high cost, and inaccurate predictions. Big data analysis technology provides new solutions for power engineering maintenance, revealing equipment operation patterns and potential fault characteristics, enabling early warning and precise positioning. This article introduces the current status of power engineering maintenance, analyzes the limitations of traditional methods, and elucidates the advantages of big data applications. It explores the construction methods of fault prediction models, including data preprocessing, feature extraction, and other steps. Additionally, it discusses future trends of big data technology in power engineering maintenance and proposes suggestions such as strengthening data sharing and deepening algorithm research. The aim is to provide theoretical references and practical guidance for big data applications in the field of power engineering maintenance, promoting the intelligent and efficient development of the power industry.

Keywords： power engineering maintenance; big data analysis; fault prediction model; feature extraction; resource allocation

引言

电力工程是现代社会的的重要基础设施, 其稳定性和可靠性对电力供应至关重要。然而, 随着规模的不断扩大和系统复杂度的日益提升, 传统的人工巡检与定期维护手段已难以充分满足当前的需求。人工巡检易受人为因素影响, 准确性难以保证; 定期检修缺乏针对性和灵活性, 易造成资源浪费和效率低下。因此, 提高电力工程维护效率和准确性成为亟待解决的问题。近年来, 大数据技术在电力工程维护领域受到广泛关注, 其强大的数据处理和分析能力能够从海量数据中挖掘有价值信息, 为电力工程维护提供新思路。运用大数据技术对运行数据进行实时监控与深入分析, 能够迅速识别潜在故障并采取相应的预防措施, 提高电力工程的稳定性和可靠性。

一、电力工程维护概述

(一) 电力工程维护的定义与重要性

电力工程维护是指对电力系统中的各类设备、线路和设施进行定期检查、保养、维修和更换等工作, 以确保其正常运行和安全生产。电力工程维护的重要性不言而喻, 它直接关系到电力系

统的稳定与可靠性对于确保社会经济的平稳运行和民众日常生活的顺畅进行起着举足轻重的作用。

电力工程维护是保障电力系统安全稳定运行的基础。电力系统是一个由发电、输电、配电及用电等多个复杂环节交织而成的网络, 其中任何一个环节出现故障都可能引发连锁反应, 导致整个系统崩溃。通过定期维护和保养, 可以及时发现和处理设备缺

陷和故障，避免事故的发生，确保电力系统的安全稳定运行。^[1]

（二）电力工程维护的常见类型与方法

电力工程维护的常见类型主要包括预防性维护、纠正性维护和状态维护。

预防性维护是指在设备出现故障之前，按照预定的计划和周期对设备进行维护和保养，以预防故障的发生。这种维护方法通常基于设备的使用年限、运行条件和维护历史等因素来确定维护周期和内容。预防性维护的主要目的是延长设备使用寿命，提高设备可靠性和安全性，减少故障停机时间和维修成本。预防性维护涵盖定期检查、清洁保养、润滑调整、紧固件检查以及易损部件的适时更换等措施。

而纠正性维护则是在设备发生故障之后，通过修复或更换损坏部件来使设备重新恢复正常运作的过程。这种维护方法通常是在设备出现故障后进行紧急处理，以尽快恢复供电。纠正性维护的主要目的是减少故障对生产和生活的影响，提高供电可靠性和安全性。纠正性维护的方法包括故障排查、设备修复、更换损坏部件等。^[2]

状态维护是根据设备的当前运行状态来实施保养与维护，通过实时监测与分析设备状况，及时发现并应对潜在的故障与问题。状态维护的主要目的是提高设备可靠性和安全性，减少故障停机时间和维修成本。状态维护的方法包括在线监测、数据分析、故障诊断和预测等。

二、大数据分析在电力工程维护中的应用优势

（一）提高故障预测准确性

在电力工程维护中，大数据分析技术能够深入挖掘并解析海量的历史数据，揭示设备故障的演变规律与趋势，进而提升故障预测的精准度。传统的故障预测方法往往依赖于专家的经验 and 知识，难以全面考虑各种因素，因此预测结果存在一定的不确定性和误差。而大数据分析技术能够处理并分析庞大的数据集，从而识别出设备故障的潜在特性与模式，增强预测的准确性和可靠性。结合设备的历史运行数据、维护记录及环境参数等多元信息，可以构建故障预测模型，对设备的未来运行态势进行预估与评判，以便及时洞察并应对潜在的故障风险，为维修决策提供科学依据。

（二）降低维护成本

在电力工程维护中，大数据分析技术能够实时监控并分析设备运行数据，迅速识别异常状况，从而提前安排维护与处理措施，从而避免设备故障导致的停机损失和维修成本。传统的维护模式往往依赖于定期的巡检与维修，这种方式效率低下，且容易导致资源的无谓消耗。而大数据分析技术可以依据设备的当前运行状况，灵活调整维护计划与维修策略，以达到精确维护的目的，并减少维护成本。这需要对设备运行数据进行即时的监测与深入分析，可以及时发现设备的异常情况，提前进行预警和干预，避免故障的发生和扩大，从而减少维修成本和停机损失。^[3]

（三）优化资源配置

在电力工程维护中，大数据分析技术可以通过对设备运行数

据的分析和挖掘，发现设备维护中的瓶颈和问题，为优化资源配置提供科学依据。通过实时追踪并分析设备运行数据，我们能够掌握设备的当前运行状态及其所需的维护措施，合理安排维护人员和物资资源，提高维护效率和资源利用率。同时，大数据分析技术还可以通过对设备故障数据的分析，发现故障发生的原因和规律，为改进设备设计和制造工艺提供科学依据，从源头上提高设备的可靠性和稳定性，减少故障发生的概率和维修成本。^[4]

三、基于大数据分析的故障预测模型构建

（一）数据预处理

在构建基于大数据分析的故障预测模型之前，收集到的原始数据需经历预处理流程。此环节在数据挖掘与分析中至关重要，旨在提升数据品质与可用性，为后续的分析与建模奠定坚实基础。预处理的核心步骤涵盖数据清洗、数据集成、数据变换和数据规约。

数据清洗是指对原始数据进行检查和修正，以消除数据中的错误、重复、缺失等问题。在电力工程维护中，由于设备种类繁多、运行环境复杂，收集到的数据往往存在各种问题，如传感器故障、数据传输错误等。因此，在数据预处理阶段，需要对原始数据进行仔细的检查和清洗，以确保数据的准确性和完整性。

数据集成是指将来自不同来源、不同格式的数据进行整合和统一。在电力工程维护中，数据可能来自多个监测系统和传感器，这些数据可能存在格式不一致、单位不统一等问题。因此，在数据预处理阶段，需要对这些数据进行集成和统一，以便后续的数据分析和建模。^[4-5]

数据变换是指对原始数据进行转换和处理，以使其更适合后续的数据分析和建模。在电力工程维护中，原始数据可能存在量纲不一致、分布不均衡等问题。因此，在数据预处理阶段，需要对这些数据进行适当的变换和处理，以提高数据的质量和可用性。

数据规约是指在尽可能保持数据原貌的前提下，通过数据压缩和降维等技术手段，减少数据的规模和复杂度。在电力工程维护中，由于数据量庞大且复杂，直接进行数据分析可能会面临计算量大、处理时间长等问题。因此，在数据预处理阶段，需要对数据进行适当的规约和降维，以提高数据分析的效率和准确性。

（二）特征提取

特征提取是构建大数据分析故障预测模型中的一个核心环节，旨在从原始数据中筛选出对故障预测具有实际价值的特征信息，以便后续的数据分析和建模。在电力工程维护中，特征提取的方法主要包括时域分析、频域分析、时频分析和非线性动力学分析等。

时域分析是指对原始数据在时间域上进行分析和处理，提取出与时间相关的特征信息。在电力工程维护中，时域分析可以用于提取设备的振动信号、电流电压波形等特征信息，以便对设备的运行状态进行监测和预测。

频域分析是指对原始数据进行傅里叶变换等处理，将其从时

间域转换到频率域上进行分析和处理。在电力工程维护中，频域分析可以用于提取设备的频谱特征、谐波成分等特征信息，以便对设备的故障类型和程度进行识别和判断。

时频分析是指将原始数据同时在时间域和频率域上进行分析 and 处理，以提取出时变频谱等特征信息。在电力工程维护中，时频分析可以用于提取设备的非平稳信号特征，以便对设备的瞬态故障和突变情况进行监测和预测。

非线性动力学分析是指对原始数据进行相空间重构、李雅普诺夫指数等处理，以揭示其内在的非线性动力学特性。在电力工程维护中，非线性动力学分析可以用于提取设备的混沌特征、分岔行为等特征信息，以便对设备的复杂故障和失稳情况进行识别和预测。

（三）模型选择与训练

在构建基于大数据分析的故障预测模型时，需要选择合适的模型和算法进行训练和验证。模型选择和训练是数据挖掘和分析的核心环节之一，其目的是从原始数据中学习出有效的预测规则和模式，以便对未来的数据进行准确预测。在电力工程维护中，常用的故障预测模型包括神经网络、支持向量机、决策树等。

神经网络是一种仿照人脑神经元网络架构设计的机器学习算法，具备卓越的非线性映射及自适应学习能力。在电力工程维护领域，神经网络能够被应用于构建故障预测模型，通过对历史数据的训练和学习，实现对设备故障的准确预测。神经网络的优点是可以处理复杂的数据关系和模式，但需要大量的训练数据和计算资源。^[6]

支持向量机是一种基于统计学习理论的机器学习算法，具有优秀的分类和回归性能。在电力工程维护中，支持向量机可以用于构建故障分类和预测模型，通过对设备运行状态的特征向量进行分类和识别，实现对设备故障的准确预测。支持向量机的优点是具有较高的预测精度和泛化能力，但对数据的质量和特征选择要求较高。^[7]

决策树是一种基于树形结构的机器学习算法，具有直观易懂和易于实现的优点。在电力工程维护中，决策树可以用于构建故障诊断模型，通过对设备运行状态的特征进行逐级判断和分类，实现对设备故障的准确诊断和预测。决策树的优点是易于理解和实现，但容易受到数据噪声和不平衡的影响。^[8]

在选择合适的模型和算法后，需要进行模型的训练和验证。模型训练是指利用历史数据对模型进行训练和学习，使其能够准确预测未来的数据。模型验证是指利用测试数据对模型进行验证和评估，以检验其预测性能和泛化能力。在模型训练和验证过程中，需要采用合适的数据划分方法，如交叉验证等，以确保模型的稳定性和可靠性。^[9]

（四）模型优化与评估

在构建基于大数据分析的故障预测模型时，模型性能的提升与可靠性评估是确保预测效果的关键步骤。其中，模型优化涉及对模型参数与结构的调整与优化，旨在增强预测的准确性及泛化性能。模型评估是指利用测试数据对模型进行性能评估和比较，以选择最优的模型和参数组合。

在模型优化方面，我们可以运用诸如网格搜索、随机搜索、贝叶斯优化等多种策略与技术，在预设的参数范围内探寻最佳的参数配置，从而提升模型的预测效能。同时，集成学习方法也是一个值得考虑的选择，如 bagging、boosting 等，将多个模型进行组合和优化，以提高模型的稳定性和鲁棒性。

在模型评估方面，可以采用多种评估指标和方法，如准确率、召回率、F1 分数、ROC 曲线等。这些评估指标能够多维度地体现模型的性能：准确率衡量了模型区分正例与负例的能力；召回率揭示了模型覆盖正例的程度；F1 分数作为准确率和召回率的调和均值，为综合评估模型性能提供了依据。而 ROC 曲线则通过描绘不同阈值条件下真正例率与假正例率的变化关系，直观地反映模型的分类性能和泛化能力。^[10]

在模型优化和评估过程中，需要注意避免过拟合和欠拟合的问题。过拟合是指模型在训练数据上表现过好，然而，模型在测试数据上表现不佳，往往源于其复杂度过高或训练数据的匮乏。相反，当模型在训练与测试数据上的表现均不理想时，我们称之为欠拟合，这通常是因为模型复杂度不足或特征选择不当所致。为了避免过拟合和欠拟合的问题，需要采用合适的数据划分方法、特征选择方法和模型复杂度控制方法。

四、电力工程维护中的大数据分析 with 故障预测模型应用案例

（一）应用场景

变电站设备故障预测，通过对变电站设备的运行数据进行实时监测和分析，构建故障预测模型，可以实现对变压器、开关设备等关键设备的故障预警和预测，提高变电站的运行可靠性和安全性。

输电线路故障预测，通过对输电线路的监测数据和气象数据进行综合分析，构建故障预测模型，可以实现对输电线路的风偏、舞动、覆冰等故障的预警和预测，提高输电线路的抗灾能力和运行可靠性。

配电网故障预测，通过对配电网的负荷数据、故障记录等进行分析和挖掘，构建故障预测模型，可以实现对配电网的过载、短路等故障的预警和预测，提高配电网的供电可靠性和服务质量。

（二）应用效果

提高故障预测准确性，通过大数据分析和故障预测模型的应用，可以实现对设备故障的准确预测和预警，提高故障预测的准确性和可靠性，减少故障发生的概率和损失。

降低维护成本，通过大数据分析和故障预测模型的应用，可以实现对设备状态的实时监测和评估，优化维护计划和维修策略，降低维护成本和停机时间，提高设备的利用率和经济效益。

提升运维管理水平，通过大数据分析和故障预测模型的应用，可以实现对设备运行状态的全面掌握和实时监测，提高运维管理的智能化和自动化水平，提升运维管理的效率和质量。

五、结束语

随着大数据技术的不断发展和应用，其在电力工程维护领域的应用前景越来越广阔。通过大数据分析和故障预测模型的应用，可以实现对设备故障的准确预测和预警，提高电力工程的可靠性和安全性，降低维护成本和停机时间。然而，大数据分析和

故障预测模型的应用也面临着一些挑战和问题，如数据质量问题、模型复杂度控制问题、算法优化问题等。因此，在未来的研究中，需要进一步加强数据质量管理和预处理技术的研究，优化算法和模型的选择和训练方法，提高大数据分析和故障预测模型的准确性和可靠性。

参考文献

[1] 林麒麟. 基于神经网络智能算法的电力系统短期负荷预测研究 [D]. 兰州理工大学, 2017.

[2] 刘金瑞. 探究数据挖掘和人工智能理论在短期电力负荷预测中的应用 [J]. 数字通信世界, 2017, (11): 179.

[3] 丁晓, 孙虹, 郑海雁, 等. 基于配用电大数据的短期负荷预测 [J]. 电力工程技术, 2018, 37(3): 7.

[4] 朱永利, 李莉, 宋亚奇, 等. ODPS平台下的电力设备监测大数据存储与并行处理方法 [J]. 电工技术学报, 2017, 32(9): 12.

[5] 程骋, 杨涛, 唐漾, 等. 基于大数据的故障诊断与预测理论及技术专题序言 [J]. 控制工程, 2022, 29(2): 193-197.

[6] 张霞, 张涛, 李玉梅, 等. 基于 EMD 的井下近钻头振动数据分析 [J]. 北京信息科技大学学报 (自然科学版), 2019, 34(06): 59-63.

[7] 洪嘉灏. 基于 GBDT 模型的股价趋势预测研究 [D]. 暨南大学, 2017.

[8] 陈智成. 大跨度桥梁荷载和响应的空间监测数据处理与建模方法 [D]. 哈尔滨工业大学, 2018.

[9] 王资远. 基于大数据的电力负荷预测研究 [D]. 天津职业技术师范大学, 2022.

[10] 郭婷婷. 大数据分析技术在采集运维业务中的应用研究 [J]. 建筑工程技术与设计, 2018, 000(020): 4411, 2203.

600MW 等级汽轮发电机组发电机故障原因分析及防范

安柔嘉¹, 安殿华²

1. 德州学院, 山东 德州 253023

2. 华电国际项目管理有限公司, 山东 济南 250000

摘 要 : 某发电机厂引进制造的600MW发电机在设计及制造安装过程中存在发电机定子引线水路外接回水管道管径偏小,造成发电机并联环及部分铜线熔断等一系列事故,针对事故原因,对发电机进行了发电机定子引线水路外接回水管道改造并设置了监控仪表及调节阀,避免了故障,保障了机组安全。

关 键 词 : 600MW 发电机; 并联环; 故障; 改造

Causation Analysis and Prevention of 600MW Generator's Typical Failure

An Roujia¹, An Dianhua²

1. Dezhou College, Dezhou, Shandong 253023

2. Huadian International Project Management Co., Ltd. Jinan, Shandong 250000

Abstract : Series failures occurred , such as parallel connection ring damaged, copper wire fused, during the designs, manufacturings and installations of the introducing type 600MW Generators manufactured by Shanghai Generator Manufactory, because of the smaller diameter of the cooling water pipe return lines which have cooled the generator connection wires. Aim at the causation of such failures, the reconstruction of the cooling water pipe return lines were performed, and the control instruments and control valves were set up additionally. And so , the failure is avoided, the safety of units is ensured.

Keywords : 600MW Generator; parallel connection ring; failure; reconstruction

引言

某公司所属新建发电 A、B 公司的 600MW 等级汽轮发电机组的发电机在投产试运伊始就先后发生两起类似的发电机内部故障事件。2007 年 7 月 4 日,发电 A 公司 #4 机组在 650MW 负荷运行时发生跳闸;7 月 10 日,试运期间的发电 B 公司 #2 机组在满负荷运行 36 小时后发生跳闸,并损毁发电机。

一、故障概况

1. 发电 A 公司 #4 发电机为某汽轮发电机有限公司(现更名为某发电机厂,以下简称“某电”)生产的 QFSN-670-2 型发电机,2007 年 6 月 9 日正式投入商业运营。7 月 4 日 16:20,机组负荷 650MW,发电机内冷水压力突然升高,16:26,锅炉 MFT,首出原因为“发电机故障”、“发电机匝间保护动作”,故障时发电机进水^[1]。

2. 发电机抽出转子后发现,发电机励端 1 点方向第 2 排(从里往外数)W2 弓形引线熔断 400mm 左右,发电机汽端损坏严重,部分线棒出槽口拐角处铜线



>图1 转子污染示意图

断裂、电联接烧断,转子污染严重(如图1)

3. 发电 B 公司 #2 发电机为“某电”生产的 QFSN-660-2 型发电机,2007 年 4 月出厂。正在试运期间,7 月 10 日 9:02,机组负荷 660MW, #7、8、9 瓦振动突然增加,其中 #8 轴承 X 向振动由 90.69 微米突升到 339.8 微米,达到定值跳机,发电机逆功率保护信号同时发出,其它发变组保护均未动作。事故追忆显示,在振动增大的同时,发电机负序电流从 1355.125A 突增到 2728.56A。就地检查发电机氢气干燥器排污管处有绝缘烧坏的异味^[2]。

4. 打开发电机励侧上端盖进行检查,发现



>图2 并联环损坏示意图

励端 11 点方向第 2 排弓形引线（并联环）熔断 400mm 左右。转子抽出后，未发现发电机其它部位损坏。（如图 2）

二、故障原因分析

1. 发电机 W 相并联绕组中的 2W 绕组至中性点的弓形引线烧断是由于气（汽）堵造成水量大幅度减小，局部过热致使铜线烧熔。2W2 引线长度最长，当总体水流量偏小时，相应的水流量不足以冷却该引线产生的热量和带走引线顶部聚集的气体，产生局部气堵，进而造成引线冷却水流量减少和局部温度急剧升高，冷却水升温以后的汽化更加剧流量的减少，直至断水导致该引线熔断^[3,4]。

2. 发电机定子引线水路外接回水管道管径偏小、阻力偏大，导致发电机引线冷却水流量总体偏小，是引发两起事件的主要原因。由于制造厂对管径的标注不明确，提供的图纸中只将瓷套管出水孔连接法兰标注为 Dg32，对引线水路外接回水管道管径未做标注（Dg 为已废止的标准，现应用标准为 DN），而厂家也未对此管道尺寸做补充说明（图纸中其它部分均有说明）。施工单位对管径尺寸不清楚，不询问厂家，只盲目判断，造成安装的管道管径偏小。

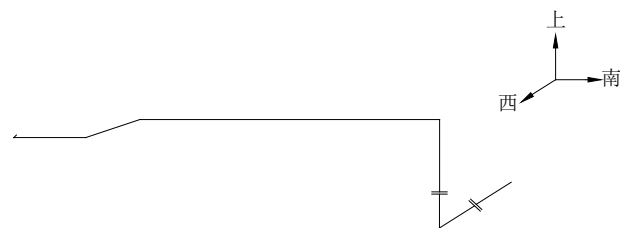
3. 另一方面，此类结构的发电机位于顶部位置的定子弓形引线较长，水流量分配不均，容易出现气堵^[5]。

三、防范措施

1. 针对发电机故障原因，对发电机主引线内冷水回水管道进行了检查，对发生事故的发电机及同型号发电机进行改造。根据各电厂不同情况，合理选择内冷水供回水管道的布置和走向，并改变不合理的管径，以减小流动阻力，增加冷却效果。

（1）发电 B 公司改造实例：

1）在改造前，对发电 B 公司 #1 发电机主引线内冷水回水管道进行了检查。检查发现，该管道全部采用 32×3 管道连接，并在离发电机主引线出口法兰约 400mm 处，为绕开墙壁上的固定支架，弯制约 150 度的挺伸（如图 3）。对照某汽轮发电机厂出具的改造方案，管道内径及弯头连接方式均不符合要求^{[6][7]}。



>图 3 改造前示意图

2）按照某汽轮发电机厂出具的方案，将所有管道更换为 $\phi 42 \times 3$ mm 不锈钢管，弯头为 $\phi 45 \times 3$ mm，弯曲半径大于 1.5 倍通径。由于管径变粗后，墙壁过近，墙壁上固定支架阻挡，为方便布置管道，管道的布置方式改为先向下约 400mm，再按原方式恢

复。对照原布置方式，去掉了挺伸，多增加了一个弯头（如图 4）。管道焊接全部采用氩弧焊，保持管道清洁无杂物。并在反冲洗回水门后加装堵板，以防止内冷水进水由此返回内冷水箱。并检查相关管路，立即更换管径不符合要求的引线水路外接回水管，回水管的安装尽量减少直角弯，减少回水阻力。



>图 4 改造后示意图

2. 同时，对照制造厂定子内冷水系统说明书、图纸，以及设计院图纸，对水系统进行全面核查，重点检查管道管径和弯曲半径是否符合图纸要求，检查临时冲洗管道是否已全部拆除，并已正确恢复正常系统连接，反冲洗阀门是否严密。

3. 增加对引线水流总量的监测手段，以便于发现流量偏小时及时处理，以确保定冷水流量。某电机厂原设计要求定冷水压力保持 3~4 公斤（0.3~0.4MPa），经现场试验，在压力为 4 公斤（0.4MPa）时流量仅 80 立方，不能满足现场要求。某电机厂确定在满足定冷水流量 116~120 立方的前提下，对压力不做要求^[8]。

4. 在发电机组调试及机组启动阶段，将反冲洗 A 组阀门用堵板堵死，避免水的分流返回水箱的问题发生。

5. 增设定子冷却水系统中的气表，按某汽轮发电机有限公司的要求将气表安装到位，增设密封油空侧和氢侧温度两套气动调节阀。开机前对内冷水系统彻底排气，以减小定冷水流动气阻。

6. 加强运行时的监控，密切注意发电机线圈层间温度、进出水温度和流量、的变化，并及时采取降负荷等措施。

7. 严格监视电机电压、电流、负序电流的变化情况，并对发电机冷却水压力、氢气压力加强监视和调整，保证在其正常范围内运行。

8. 加强对发电机冷却水水质、氢气纯度的化验，发现问题及时调整处理。

四、防范措施的应用及效果

以上措施从 2007 年 8 月开始在发电 A、B 公司相继实施后，达到了预期的预防效果，再未发生类似的发电机烧损事故，杜绝了事故隐患。某公司系统内的安徽、宁夏两地同类型机组采取上述措施后，都取得了很好的效果。

五、防止水路堵塞的反事故措施

1. 定子绕组端部引线水路通流截面应达到设计值，引出线外部水路的安装应严格按照厂家的图纸和要求进行，保证（总）水管焊接位置有效截面积满足设计要求。

2. 水内冷转子进水支座安装时应严格按照制造厂的安装图纸和技术规范进行, 保证安装精度, 防止盘根等部位磨损造成转子水路堵塞^[9]。

3. 定子、转子冷却系统应采用耐蚀性能不低于 S30408 不锈钢材质的水泵、管道和阀门, 防止锈蚀产物进入内冷水系统。

4. 水内冷系统中管道、阀门的橡胶密封圈应全部使用聚四氟乙烯垫圈, 并应定期更换。检修过程中涉及水回路再密封时, 应严格按照制造厂施工工艺要求开展, 禁止随意更改密封措施。

5. 绕组线棒在制造、安装、检修过程中, 若放置时间较长, 应将线棒内的水放净并及时吹干, 防止空心导线内表面产生氧化腐蚀。

6. 定期对定子线棒进行反冲洗, 反冲洗回路不锈钢滤网应达到 200 目 (75 μm), 并定期检查和清洗滤网。机组运行期间发电机水路反冲洗门应关闭严密并上锁。反冲洗时应按照相关标准要求, 冲洗直到排水清澈、无可见杂质, 进、出水的 pH 值、电导率基本一致且达到要求时终止。

7. 交接及大修时应进行水系统流通性检查, 分支路进行流量试验或进行热水流试验。

8. 内部水回路充水时应彻底排气, 防止由于环形引线“气

堵”导致的过热烧损。

9. 水内冷机组的内冷水质应按照相关标准进行优化控制, 长期不能达标的发电机应选择适用的内冷水处理方法进行设备改造。机组运行过程中, 应在线连续测量内冷水的电导率和 pH 值, 定期测定含铜量、溶氧量等参数^[10]。

10. 严格按规范安装温度测点, 做好防止感应电影响温度测量的措施, 防止温度跳变、显示误差。

11. 对于内冷水系统存在漏氢隐患的机组, 应加强出水温度的监测, 防止由于气堵造成线棒过热。

12. 运行中严格保持水内冷转子进水支座盘根冷却水压力低于转子内冷水进水压力, 以防盘根材料破损物进入转子分水盒内。

六、结束语

某公司对于所属电厂同类型机组未发生该类事故的机组制定了严格的运行监控及应急措施, 安排停机改造时间, 对磁套管出水管道进行更换改造, 从根本上杜绝了事故发生的隐患, 保证了机组安全和企业财产安全, 为该型发电机的设计和制造优化做出了探索和实践, 取得了良好的技术效益和经济效益。

参考文献

- [1] 张乐川, 高永芬, 李临临. 600MW 等级超超临界汽轮发电机组型式探究 [J]. 山东电力技术, 2007, (02): 18–21.
- [2] 胡琨, 马雪松. 两种 660MW 超超临界机组机型比较 [J]. 电力勘测设计, 2010, (02): 40–43.
- [3] 王鹏. 发电厂 660MW 超超临界机组节能技术研究 [J]. 科技风, 2022, (13): 88–90.
- [4] 董海涛, 孙朋伟. 1000MW 超超临界汽轮发电机转子线圈制造技术研究 [J]. 大电机技术, 2011, (02): 17–19.
- [5] 曹文, 关达生. 1000MW 超超临界汽轮发电机设计理念 [J]. 上海大中型电机, 2009, (03): 12–13.
- [6] 杨永. 汽轮发电机组安装调试技术要点研究 [J]. 科技与企业, 2014, (21): 196.
- [7] 梁洪涛, 谢玉增, 付长虹, 等. 1000MW 汽轮发电机设计改进 [J]. 大电机技术, 2013, (04): 24–25+60.
- [8] 李录强, 马良, 李海霞. 超超临界汽轮发电机试验站励磁系统设计 [J]. 防爆电机, 2014, 49(02): 33–35.
- [9] 田勇, 丁世勇. 关于大中型汽轮发电机自并励静止励磁系统问题的探讨 [J]. 电力系统保护与控制, 2008, (19): 61–62+66.
- [10] 张泽, 王涛, 王浩, 等. 某 1000 MW 汽轮发电机组轴系振动故障分析及处理 [J]. 发电设备, 2023, 37(06): 399–402+408.

核电阀门气动执行机构隔膜成品检验方法

李凤洋, 田尧, 周来

中广核核电运营有限公司, 广东 深圳 518000

摘 要 : 核电阀门气动执行机构隔膜是保证阀门动作的关键部件。近几年隔膜质量的不稳定, 已导致多起影响核电机组安全的事件。当前对于隔膜的质量控制方式主要为外观检查。由于国内外没有适用隔膜成品的性能检验标准, 只能参考相似产品的通用标准, 导致检验方法和结果存在较大差异。因此, 本文针对核电阀门气动执行机构隔膜成品的检验方法进行探讨。参考隔膜设计研发和历史检验经验, 结合隔膜的功能和结构特点, 制定了合理可行的专用检验规程。

关 键 词 : 核电站; 气动阀门; 隔膜; 检验; 质量控制

Development and Application of an Inspection Protocol for Diaphragms in Pneumatic Actuators of Nuclear Power Valves

Li Fengyang, Tian Yao, Zhou Lai

CGN Nuclear Power Operation Co., LTD. Shenzhen, Guangdong 518000

Abstract : The diaphragm in nuclear valve pneumatic actuators serves as a critical safety component for valve operation. Recent quality fluctuations have triggered multiple safety incidents in nuclear power plants. Current quality control primarily relies on visual inspection, while the absence of applicable performance testing standards for diaphragm products necessitates reference to generic standards for similar components, resulting in significant discrepancies in testing methodologies and outcomes. This paper proposes an inspection protocol developed through comprehensive analysis of diaphragm design parameters, historical inspection data, and functional-structural characteristics. The established protocol provides standardized technical specifications for performance verification of diaphragm products in nuclear applications, effectively addressing existing quality control challenges.

Keywords : nuclear power plant; pneumatic actuator; diaphragm; inspection protocol; quality control

一、背景描述

当前国内在运的57台核电机组中, 其中41台为二代轻水堆核电机组, 如M310、CPR1000等。该技术路线的核岛阀门主要驱动方式为气动和电动, 其中重要调节类阀门均为气动控制。气动执行机构的主要结构形式为隔膜式, 主要部件包括膜盒、隔膜、弹簧。隔膜是保证阀门动作功能的关键部件, 隔膜的基础结构为橡胶+编织物。编织物可以位于橡胶层的中间, 也可以位于橡胶层的一侧(非气源侧)。编织层位于中间的隔膜结构形式和各区域的名称如图1所示, 后文所指的位置名称以该示意图为准。

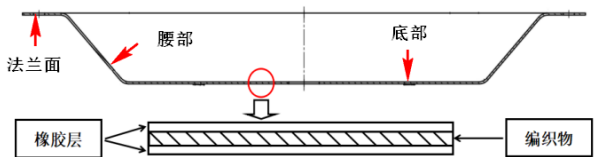


图1 隔膜结构及区域名称图

隔膜可以将气源压力转换为驱动阀门的推力, 进而完成阀门的开关或流量控制。根据近5年的使用情况, 隔膜产品质量并不稳定, 多次出现裂纹、喷霜等异常。隔膜失效会影响阀门的密封或

调节能力, 进而影响核电站的安全稳定运行。

为了保证对隔膜质量的有效控制, 需要在验收前进行性能检验。但目前国内外并没有可执行的检验标准。经与隔膜生产厂家了解, 隔膜的质量控制主要为对橡胶和编织物分别进行性能检验(均有可执行的检验标准)。在隔膜整体硫化完成后主要对进行整体的破裂强度检验。而隔膜交货到阀门厂家后, 则主要对外观和尺寸进行检查。隔膜作为阀门动作的关键零部件, 除了承受气源压力外, 还需要承受隔膜盒的压紧变形、阀门动作疲劳、工况环境老化等综合因素, 因此隔膜成品需要依据功能和结构特点制定更为适用的检验方法。

二、隔膜成品检验项目的确定

根据隔膜各区域的实际工作状态, 参考多起国内核电气动执行机构隔膜破裂事件的原因分析结论, 结合该橡胶及制品行业的常用检验方法, 制定的隔膜成品检验项目共8个方面。

(一) 隔膜尺寸检验

尺寸的准确性和均匀性, 可以快速确认隔膜的可用性。

（二）隔膜硬度检验

隔膜成品的表面硬度离散度可以体现隔膜在硫化成型过程中的均匀性。如果同一张隔膜不同部位的表面硬度偏差较大，说明质量控制存在异常。

（三）隔膜剥离强度检验

剥离强度代表着隔膜橡胶与编织物的粘合情况。隔膜的法兰面通过螺栓紧固在隔膜盒的密封面上，施加的紧固力矩既要满足气源压力的密封要求，也要保持隔膜在阀门动作中维持原有位置，不发生内缩和褶皱。隔膜在较大压力下动作时，如果剥离强度较低，容易导致橡胶与编织物分层，进而导致隔膜失效。

（四）隔膜屈挠疲劳检验

常用的疲劳检验方法有拉伸和屈挠两种。考虑隔膜在实际工况中主要为屈挠形动作，基本没有拉伸的情况，因此选取屈挠疲劳形式。

（五）隔膜破裂强度检验

隔膜破裂强度作为隔膜生产厂家出厂的试验项目，可以检验隔膜整体的承压能力。

（六）隔膜成品压缩永久变形

压缩永久变形是反映橡胶材料回弹性和抗变形能力的指标。压缩永久变形越小，则材料的回弹能力越好，抗变形能力越强。压缩永久变形能力差会严重影响隔膜安装后的状态，隔膜的法兰面、中心孔等装配压缩部位在不长的时间内就会出现内缩、漏气的异常。参考历史对失效隔膜的第三方检验结果，该指标存在异常的比例较高。因此，对于隔膜成品进行压缩永久性变形测试是很有必要的。

（七）拉伸强度和拉伸伸长率

拉伸强度是表征橡胶隔膜抵抗拉伸破坏极限的能力，是评价橡胶隔膜力学性能的重要指标之一。在阀门动作过程中，隔膜的拉伸强度需要满足相应的数值，以保证隔膜不会在动作中过载断裂。拉伸伸长率是体现橡胶延展性的重要指标，也能用于判断橡胶老化的程度。

（八）加速老化试验方法

热空气加速老化和耐热试验是评价隔膜长期相对的耐热性，和自然老化后性能的方法。通过对比老化试验前后的检验结果，可以了解隔膜在现场工况下长时间运行后的状态变化。

三、隔膜成品检验方法的确定

因气动执行机构的推力受阀门不平衡力、密封力、气源压力等影响会有不同，隔膜所需的有效承压面积也会不同。核电站常用的隔膜底部直径为 $\leq 40\text{cm}$ 。检验按照已有的参考标准执行时，试样尺寸较大或取样数量较多，会导致用于取样的隔膜消耗数量大幅增加。特别是底部直径 $<20\text{CM}$ 的隔膜，完成所有取样预计需要10片以上。取样数量多可能会导致同一检验项目出自不同的隔膜，增加检验结果的偏差度，同时也会对现场保障带来不利影响。综合质量监控和经济因素，取样的总体原则为：取样尺寸和数量参考历史送检的情况在满足检验目标的情况尽量减小，但检

验结果的判定标准更为严格，如从取中间值/平均值改为取最小值。对于出现结果异常的检验项目，则采用复检再次验证。

各检验项目的取样要求、检验方法详述如下：

（一）隔膜尺寸检验

参考HG/T 3050.3^[1]执行，测量过程中应尽量使隔膜与厚度计上下垂足面平行，如隔膜不平整，可参考GB/T 2941^[2]第7章施加规定压力而不引起任何明显变形。用卷尺对隔膜外径等尺寸进行检测，隔膜应放于平面，量取时隔膜不能变形。

（二）隔膜硬度检验

考虑隔膜厚度较薄，且编织物的硬度远大于橡胶的硬度，隔膜成品硬度的测量结果会受到测量点是否在编织物脉路上的影响。因此，硬度检验需要在每个位置测量3次取中间值，不同测量位置两两相距至少6mm。每个隔膜至少应测量法兰面圆周方向对称12个位置。

如需计算离散值则只需计算隔膜法兰面的硬度偏差，原则是用最大值或最小值与平均值之差，公式如下：

$\{S_{\text{Max}}-(S_1+\cdots+S_{12})/12;(S_1+\cdots+S_{12})/12-S_{\text{Min}}\}$ 取大值。记录离散值。

说明：S1为第一个测量点的平均值；SMax是所有平均值中的最大值；SMin是所有平均值中的最小值。12是测量位置数量。

（三）隔膜剥离强度检验

该检验项目总体参考GB/T 532^[3]执行。根据历史检验经验，隔膜剥离强度受编织物的方向影响较大。因此，取样裁切方向必须与编织物的编织方向分别相同，检验时也需要保证剥离方向与编织方向相同。根据隔膜结构，腰部编织物走向不平行，法兰面有较多的螺栓孔，取样位置应选取为隔膜底部。

试样长度考虑动夹持器的宽度和剥离过程的稳定性，应不小于130mm（若该长度因隔膜尺寸达不到，取隔膜底面最大值）。该试样尺寸较大，老化前后取样数量较多，因此取样数量从三个改为横向和纵向各取样2个，检验结果从国标的选取三个试样结果的中位数改为取两个试样结果的最小值。

（四）隔膜屈挠疲劳检验

日常运行时隔膜的动作部位为腰部，因此屈挠疲劳试样应从隔膜腰部裁取，更能体现隔膜在实际阀门动作中的特征。

橡胶及涂覆织物的屈挠疲劳国标为GB/T12586^[4]和GB/T13934^[5]。GB/T12586适用于橡胶成品，但屈挠方式与隔膜的实际工况不同，GB/T13934的屈挠方式与隔膜实际工况相同，但检验对象为纯橡胶，且样件外形需要单独成型模压。因此操作方法需综合考虑2个国标执行，取样根据总体原则，试样尺寸适应减小，尺寸长度 $\geq 125\text{mm}$ 、宽度 $25\pm 1\text{mm}$ 、厚度按照每种型号隔膜实际厚度。试样数量至少3个。

（五）隔膜破裂强度检验

考虑到液压法的试验介质为液体，与隔膜实际工况的压缩空气均为流体，特性更为相近，因此该检验内容推荐优先参考GB/T20027.2^[6]液压法执行，如不具备液压法条件，可参考GB/T20027.1^[7]钢球法执行。

（六）隔膜成品压缩永久变形

当前国内外标准中没有适用于隔膜成品的压缩永久变形检验方法。仅有橡胶的 GB/T7759.1^[8]。考虑隔膜主要为橡胶 + 编织物组成，而编织物的压缩变形较小，因此可以参考该橡胶的标准进行检验。但因为橡胶和编织物之间为粘接关系，编织物间也存在间隙，因此对于隔膜成品检验结果的判定相较于纯橡胶试样可以放宽。

（七）拉伸强度和拉伸伸长率

该检验项目总体参考 HG/T2580^[9] 执行。根据历史检验经验，隔膜拉伸强度受编织物的方向影响较大。因此，取样裁切方向必须与编织物的编织方向分别相同，取样位置也应选取为隔膜底部。HG/T2580 中拉伸试验的样件尺寸较大，数量较多。基于前述取样的总体原则，试样数量从 5 个调整为 3 个，取值标准维持原有的平均值。试样的尺寸方面，参考历史检验的经验，宽度从 HG/T2580 中的 $50 \pm 0.5\text{mm}$ 调整为 $15 \pm 0.5\text{mm}$ ，长度从 $100 \pm 1\text{mm}$ 调整为 $\geq 75\text{mm}$ ，厚度为隔膜本身厚度。

（八）加速老化试验方法

橡胶及涂覆织物的加速老化标准为 GB/T3512^[10] 和 GB/T24135。其中 GB/T3512 的检验对象为纯橡胶，GB/T24135 的检验对象为橡胶或塑料涂覆织物，但 4 种检验方法主要针对涂覆织物的挥发性、耐湿热性能等，与隔膜的工况不一致。根据隔膜的结构为橡胶覆盖编织物，相对更适用于 GB/T3512。且上述 2 个国标对于检验设备（老化箱）的要求一致，因此该检验项目选取参考 GB/T3512 执行。

为保证不同隔膜之间的检验结果能够对比参考，对于加速老化的温度和时间进行统一规定如下：一般选取的老化条件为 100°C 、168 小时。考虑三元乙丙橡胶的耐温更高，为验证其更长时间的老化性能，对该类橡胶隔膜也可以选取 138°C 、100 小时。老化温度精度要求为 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ，老化时间精度要求为 ± 2 小时。

四、应用与结论

该检验方法已在中广核集团 5 个核电基地开展应用，涉及国内外 11 个阀门厂家、10 个隔膜生产厂家。检验结果相较国标更为准确，与现场实际日常使用后的反馈情况基本一致。对于部分检验结果不符合要求的隔膜，提前通过复验后换货等方式进行处理，保证了库存隔膜的质量可用性，有效提高了隔膜的质量控制水平，使用效果良好。

该检验方法内容全面，更符合核电阀门气动执行机构隔膜产品的功能和结构特点，可综合量化评估隔膜的质量水平，并填补了国内在这一技术领域的空白。各检验项目操作方法标准化，保证了检验结果的一致性，有效减少了返工比例和制样次品率，降低了检测成本，提高了检验效率。同时，检验标准化后也可对不同型号、不同厂家的隔膜检验数据进行类比。对于即使隔膜生产厂家无法提供原设计性能参数的隔膜，也能参考其他同类型隔膜的检验结果评估该隔膜的质量水平。从而保障重要气动阀门的可靠性，保障核电站安全稳定运行。

参考文献

- [1]HG/T 3050.3-2020，橡胶或塑料涂覆织物整卷特性的测定第 3 部分：测定厚度的方法 [S].北京：化学工业出版社，2020.
- [2]GB/T 2941-2006，橡胶物理试验方法试样制备和调节通用程序 [S].北京：中国标准出版社，2007.
- [3]GB/T 532-2008，硫化橡胶或热塑性橡胶与织物粘合强度的测定 [S].北京：中国标准出版社，2008.
- [4]GB/T 12586-2003，橡胶或塑料涂覆织物 耐屈挠破坏性的测定 [S].北京：中国标准出版社，2008.
- [5]GB/T 13934-2006，硫化橡胶或热塑性橡胶屈挠龟裂和裂口增长的测定 [S].北京：中国标准出版社，2007.
- [6]GB/T 20027.2-2017，橡胶或塑料涂覆织物 破裂强度的测定第二部分：液压法 [S].北京：中国标准出版社，2017.
- [7]GB/T 20027.1-2016，橡胶或塑料涂覆织物 破裂强度的测定第 1 部分：钢球法 [S].北京：中国标准出版社，2016.
- [8]GB/T 7759.1-2015，硫化橡胶或热塑性橡胶压缩永久变形的测定第 1 部分：在常温及高温条件下 [S].北京：中国标准出版社，2015.
- [9]HG/T 2580-2022，橡胶或塑料涂覆织物拉伸强度和拉伸伸长率的测定 [S].北京：化学工业出版社，2022.
- [10]GB/T 3512-2014，硫化橡胶或热塑性橡胶热空气加速老化和耐热试验 [S].北京：中国标准出版社，2015.

基于人工智能的电气自动化设备故障诊断方法研究

敖林, 王鹏, 郑天东

国网昌吉供电公司变电检修中心, 新疆 昌吉 831100

摘 要 : 工业自动化的快速发展, 使得电气自动化设备在各行业中的应用日益广泛。而设备故障不仅会影响生产效率, 并且还可能会导致巨大的经济损失。现阶段传统的故障诊断方法在应对复杂多变的电气自动化系统时, 已经逐渐显露出其局限性。对此本文在分析了人工智能技术在故障诊断中优势的基础上, 详细地阐述了神经网络、专家系统、模糊逻辑、支持向量机等多种人工智能诊断方法。希望经过本次研究能够提高电气自动化设备的可靠性和稳定性, 以及保障工业生产的顺利进行。

关 键 词 : 人工智能; 电气自动化设备; 故障诊断; 神经网络; 专家系统

Research on the Fault Diagnosis Method of Electrical Automation Equipment Based on Artificial Intelligence

Ao Lin, Wang Peng, Zheng Tiandong

State Grid Changji Power Supply Company Substation Maintenance Center. Changji, Xinjiang 831100

Abstract : The rapid development of industrial automation makes the electrical automation equipment is increasingly widely used in various industries. Equipment failure will not only affect the production efficiency, but also may lead to huge economic losses. At present, the traditional fault diagnosis methods have gradually revealed their limitations when dealing with the complex and changeable electrical automation systems. On the basis of analyzing the advantages of artificial intelligence technology in fault diagnosis, this paper expounds various diagnostic methods of artificial intelligence, such as neural network, expert system, fuzzy logic and support vector machine. It is hoped that this research can improve the reliability and stability of electrical automation equipment, and ensure the smooth progress of industrial production.

Keywords : artificial intelligence; electrical automation equipment; fault diagnosis; neural network; expert system

引言

在当今工业4.0和智能制造的大背景下, 电气自动化设备作为现代工业生产的核心组成部分, 其运行的可靠性和稳定性会直接关系到企业的生产效率、产品质量以及经济效益。然而由于电气自动化设备结构复杂、运行环境多变, 致使实践中的设备故障难以完全避免。但一旦发生故障, 就可能导致生产中断、设备损坏甚至人员安全事故, 最终将会给企业带来巨大的损失。现如今随着人工智能技术的飞速发展, 如神经网络、专家系统、模糊逻辑、支持向量机等人工智能技术在故障诊断领域展现出了巨大的潜力。本研究则会深入地探讨基于人工智能的电气自动化设备故障诊断方法, 并且分析各种人工智能技术在故障诊断中的应用原理、优势和局限性。

一、电气自动化设备故障诊断概述

(一) 电气自动化设备的组成和工作原理

1. 组成

电气自动化设备的种类繁多, 其被广泛应用于工业生产、交通运输、医疗卫生、通信等各个领域。虽然不同类型的电气自动化设备在结构和功能上存在差异, 但其基本组成通常包括了电气控制部分、执行机构、传感器和检测装置等。

(1) 电气控制部分: 电气控制部分是设备的核心, 该部分主要由控制器、继电器、接触器、开关等电气元件组成, 核心任务是接收和处理各种控制信号, 以及控制执行机构的动作。

(2) 执行机构: 执行机构需要根据控制信号的要求, 来完成相应的机械运动或电气操作, 如电机的旋转、阀门的开关等。

(3) 传感器和检测装置: 传感器和检测装置被用于实时地监测设备运行状态, 并且还会将采集到的各种物理量(如温度、压力、电流、电压等)转换为电信号, 再传输给电气控制部分进行

分析和处理。

2. 工作原理

电气自动化设备的工作主要是基于电气控制理论和自动化技术的，其主要是通过对各种控制信号的处理和转换，来实现对设备的自动化控制。例如在一个电机控制系统中，控制器会根据预设的控制策略向接触器发送控制信号，以此控制电机的启动、停止、正反转和调速等操作；同时通过传感器会实时监测电机的运行参数，如电流、转速等，而当检测到异常情况时，控制器就会及时地采取相应的保护措施，从而确保电机的安全运行^[1]。

（二）常见故障类型及原因分析

电气自动化设备在运行过程中可能会出现各种类型的故障，其中常见的故障类型包括电气故障、机械故障、传感器故障和软件故障等。

1. 电气故障

电气故障是电气自动化设备中最常见的故障类型之一，该类型故障主要包括短路、断路、过载、漏电等。其中短路故障通常是由于电气元件的绝缘损坏或线路连接错误导致电流过大；断路故障则是由于线路断开或电气元件损坏导致的电路不通；而过载故障是指设备在运行过程中承受的电流或功率超过了其额定值；漏电故障是因为电气设备的绝缘性能下降，其会导致电流泄漏到设备外壳或其他接地部位^[2]。

电气故障产生的原因可能是电气元件的质量问题、长期运行导致的老化、环境因素（如温度、湿度、灰尘等）影响以及操作不当等。

2. 机械故障

机械故障主要涉及的是设备的机械部件，如电机的轴承磨损、齿轮损坏、皮带松弛等。而机械故障的原因可能是机械部件的制造质量问题、长期运行导致的磨损、润滑不良、安装不当以及过载等^[3]。

3. 传感器故障

传感器出现故障则可能会导致设备无法准确获取运行参数，从而影响到设备的正常运行。而传感器故障的类型包括了传感器损坏、信号漂移、干扰等。其原因可能是传感器本身的质量问题、环境因素（如温度、湿度、电磁干扰等）影响以及长期使用导致的性能下降等。

4. 软件故障

随着电气自动化设备的智能化程度不断提高，促使着软件在设备中的作用越来越重要。如今常见的软件故障有程序错误、数据丢失、系统崩溃等。该故障出现的原因可能是软件开发过程中的漏洞、病毒感染、硬件故障导致的数据错误以及用户操作不当等^[4]。

二、人工智能技术在电气自动化设备故障诊断中的优势

（一）强大的数据处理能力

电气自动化设备在运行过程中会产生大量的运行数据，当中

包括电流、电压、温度、压力等各种物理量数据。而人工智能技术具有强大的数据处理能力，尤其是神经网络和深度学习算法，因此其能够快速地处理和分析这些海量数据，从中提取出有用的故障特征信息。相比传统方法而言，人工智能技术能够更加全面、深入地挖掘数据中的潜在信息，进而提高故障诊断的准确性和可靠性^[5]。

（二）自学习和自适应能力

人工智能技术具有自学习和自适应能力，其能够根据不断积累的故障数据和实际运行经验，自动地调整和优化故障诊断模型。以神经网络为例分析，经过对大量故障样本数据的学习，神经网络可以不断地调整神经元之间的连接权重，使得模型能够更好地适应不同的故障情况。如果设备运行环境或工作状态发生变化时，人工智能诊断模型就能够自动地学习新的特征，并且及时地调整诊断策略，最终可提高诊断的准确性和适应性。而这种自学习和自适应能力使得人工智能故障诊断方法，能够在实际中更好地应对复杂多变的电气自动化设备故障诊断需求。

（三）能够处理复杂的非线性关系

当下电气自动化设备的故障往往与多种因素相关，且这些因素之间存在着复杂的非线性关系。若使用传统的故障诊断方法，则难以准确地描述和处理这种非线性关系。但因为人工智能技术具有很强的非线性映射能力，所以能够有效地处理复杂的非线性问题^[6]。

（四）实时监测和预警能力

借助传感器技术和物联网技术的力量，基于人工智能的故障诊断系统便可以实时地采集电气自动化设备的运行数据，并且通过预先训练好的故障诊断模型对于数据进行实时地分析和处理。一旦该系统检测到设备运行状态出现异常，则能够及时地向维修人员发出预警信号，通知其对问题进行处理，进而实现设备故障的早期发现和预防。

三、基于人工智能的电气自动化设备故障诊断方法

（一）神经网络故障诊断方法

1. 神经网络原理

神经网络是一种模拟人类大脑神经元结构和功能的计算模型，其由大量的神经元节点和连接这些节点的权重组成。该网络通常包括输入层、隐藏层和输出层，其中输入层负责接收外部数据，隐藏层则需要对输入数据进行处理和特征提取，而输出层要根据隐藏层的处理结果输出最终的诊断结果。

在对神经网络进行训练的过程中，操作人员通过不断地调整神经元之间的连接权重，就能使网络对输入数据进行准确的分类和预测。目前常用的神经网络训练算法包括了反向传播算法（BP算法）、随机梯度下降算法等^[7]。

2. 在电气自动化设备故障诊断中的应用

神经网络在电气自动化设备故障诊断中具有广泛的应用。展开来说，在电机故障诊断中应用神经网络，操作人员可以将电机的电流、电压、转速等运行参数作为神经网络的输入，再将电机

的故障类型（如短路、断路、轴承故障等）作为输出，借助通过对大量电机故障样本数据的学习，即可训练出一个能够准确诊断电机故障的神经网络模型。同时当实际运行中的电机出现故障时，将其运行参数输入到训练好的模型中，该模型便可输出该故障的类型和位置^[8]。

（二）专家系统故障诊断方法

1. 专家系统原理

专家系统是基于知识的智能系统，它的原理是将领域专家的知识 and 经验以规则的形式存储在知识库中，再通过推理机对输入的故障信息进行推理和判断，从而得出故障诊断结果。其主要由知识库、推理机、数据库、解释器和用户界面等部分组成。

知识库是专家系统的核心，该部分存储了领域专家的知识 and 经验，且这些知识以规则的形式表示，如“如果设备的电流超过额定值且温度升高，则可能存在过载故障”^[9]。而推理机根据输入的故障信息会在知识库中搜索匹配的规则，然后经过推理得出故障诊断的结论。数据库则用于存储设备的运行数据和诊断过程中的中间结果。解释器主要负责对于诊断结果进行解释，即向用户说明诊断的依据和过程。最后就是用户界面，它是用户与专家系统进行交互的接口，作用是方便用户输入故障信息和获取诊断结果。

2. 在电气自动化设备故障诊断中的应用

对于工业自动化生产线的故障诊断来说，若应用专家系统则可以将生产线中各种设备的故障特征、诊断方法和维修经验等知识整理成规则，并且存入知识库中。当生产线出现故障时，操作人员即可通过用户界面输入故障现象和相关数据，此时专家系统的推理机会根据知识库中的规则进行推理，从而判断出故障的类型和位置，并且给出维修人员相应的维修建议。

（三）模糊逻辑故障诊断方法

1. 模糊逻辑原理

模糊逻辑是一种数学工具，其主要处理的是模糊性和不确定

性问题。它的原理是将传统的二值逻辑（真和假）扩展为多值逻辑，并用隶属度来表示事物属于某个集合的程度。通常在模糊逻辑中，会以定义模糊集合和模糊规则为基础，对模糊信息进行处理和推理操作^[10]。

2. 在电气自动化设备故障诊断中的应用

模糊逻辑在电气自动化设备故障诊断中的应用，能够帮助操作人员有效地处理故障信息的模糊性和不确定性。如在电气设备的绝缘状态评估中，因为设备的绝缘性能受到多种因素的影响，如湿度、温度、运行时间等，并且这些因素与绝缘状态之间的关系往往是模糊的。所以需要操作人员建立模糊逻辑模型，如此便可以将这些模糊因素进行量化处理，且定义相应的模糊集合和模糊规则，进而对设备的绝缘状态进行评估和故障诊断。

（四）支持向量机故障诊断方法

支持向量机（SVM）主要基于统计学习理论，其基本思想是通过寻找一个最优分类超平面，再将不同类别的样本数据尽可能地分开。当处于低维空间之中时，线性可分的样本数据可以通过一个线性分类超平面进行分类，但是对于非线性可分的数据来说，则需要通过核函数将其映射到高维空间中，使其在高维空间中变得线性可分。

四、结语

实际按当中基于人工智能的电气自动化设备故障诊断方法，展现出了其卓越的性能与广阔的应用前景。面对传统故障诊断方法在复杂电气自动化系统中暴露出的效率低、准确性差以及难以实时监测等困境，人工智能技术凭借自身强大的数据处理能力、自学习和自适应能力、处理复杂非线性关系的能力以及实时监测和预警能力，最终为电气自动化设备故障诊断带来了创新性的解决方案。

参考文献

- [1] 王恒. 基于人工智能的风电机组运行状态监测和故障诊断预警研究 [J]. 科学技术创新, 2023, (27): 69-72.
- [2] 马文超. 基于神经网络的电气设备故障智能自诊断系统研究应用 [J]. 能源技术与管理, 2023, 48(05): 39-41+50.
- [3] 崔晓丹. 专家系统下的智能诊断技术研究 [C]. 第三届中国铁路发展论坛学术论文集. 中国北京市北京市, 2023: 479-485.
- [4] 韩立军. 电力设备状态的智能诊断研究 [J]. 电气技术与经济, 2023, (10): 377-379.
- [5] 李云渠, 咸日常, 张海强, 等. 基于改进灰狼算法与最小二乘支持向量机耦合的电力变压器故障诊断方法 [J]. 电网技术, 2023, 47(04): 1470-1477.
- [6] 芦小雨, 马全保. 电力电气自动化设备物联网在线监测技术研究 [J]. 中国新技术新产品, 2023, (22): 45-48.
- [7] 董海龙. 电气工程自动化技术应用在智慧水电站中的研究 [J]. 水上安全, 2023, (16): 13-15.
- [8] 胡港国. 电气自动化技术在电力系统运行中的应用 [J]. 自动化应用, 2023, 64(S2): 125-127.
- [9] 王苏亚, 包振兴. 自动化系统中的稳定控制技术分析 [J]. 电子技术, 2023, 52(12): 310-311.
- [10] 熊迪, 郭胥. 电力设备电气自动化控制技术探讨 [J]. 模具制造, 2023, 23(12): 179-181.

基于大数据的新能源装置运行状态监测与故障诊断

杨长贤

国家电投集团贵州金元威宁能源股份有限公司，贵州 毕节 553100

摘 要： 随着新能源产业的迅速发展，新能源装置的广泛应用也对其运行稳定性和可靠性提出了更高要求。为此本文将深入地探讨基于大数据的新能源装置运行状态监测与故障诊断技术。文章先分析了新能源装置运行数据特点，接着详细地介绍了基于大数据的监测系统架构、故障诊断方法。期待能够为提高新能源装置运行效率、降低运维成本提供理论支持与实践参考，有效地推动新能源产业的可持续发展。

关 键 词： 大数据；新能源装置；运行状态监测；故障诊断

Monitoring and Fault Diagnosis of New Energy Device Operation Status Based on Big Data

Yang Changxian

SPIC Guizhou Jinyuan Weining Energy Co., Ltd. Bijie, Guizhou 553100

Abstract： With the rapid development of the new energy industry, the widespread application of new energy devices has also set higher requirements for their operational stability and reliability. This paper aims to thoroughly explore big data-based monitoring and fault diagnosis technologies for the operation status of new energy devices. The article first analyzes the characteristics of new energy device operation data, then provides a detailed introduction to the architecture of the big data-based monitoring system and fault diagnosis methods. It is hoped that this can provide theoretical support and practical references to improve the operational efficiency of new energy devices and reduce maintenance costs, effectively promoting the sustainable development of the new energy industry.

Keywords： big data; new energy devices; operation status monitoring; fault diagnosis

引言

在全球能源转型的大背景之下，太阳能、风能、水能等新能源凭借其清洁、可再生等优势，已然成为了能源领域的重要发展方向。并且近年来新能源装机容量持续地增长，其在能源结构中的占比也在不断地提高。但新能源装置多分布在偏远地区，其运行环境复杂，且极易受到自然条件如光照强度、风速、温度等的影响较大。而装置的故障不仅会导致发电中断，造成经济损失，并且还可能会影响电网的稳定性。因此实时、准确地监测新能源装置的运行状态，并及时地进行故障诊断与修复，对于保障新能源系统的可靠运行至关重要。

一、新能源装置运行数据特点与大数据技术基础

传统的监测与诊断方法主要依赖于人工巡检和简单的传感器监测，现下该方式难以满足新能源装置大规模、复杂化发展的需求。此时大数据技术以其海量数据处理、快速分析和深度挖掘的能力，为新能源装置运行状态监测与故障诊断带来了新的契机。相关人员通过收集、整合新能源装置运行过程中产生的各种数据，再利用大数据分析算法，便可以实现对于装置运行状态的全面感知、实时监测和精准故障诊断，达到提高运维效率和降低运维成本的目的。

（一）新能源装置运行数据特点

1. 数据量大：新能源装置如风力发电机、太阳能光伏板等，

其在运行过程中都会持续地产生大量数据，其中包括设备的运行参数、环境数据、发电数据等。

2. 数据种类繁多：新能源装置的运行数据涵盖了数值型数据（如功率、转速、温度等）、文本型数据（如设备日志、维护记录等）、图像数据（如设备外观照片、红外热成像图像等）以及视频数据（如设备运行监控视频）。

3. 数据实时性强：新能源装置的运行状态变化非常迅速，因此需要实时地采集和处理数据，以便于相关人员能够及时地发现异常情况。例如，风速的突然变化就可能导致风力发电机的输出功率急剧波动，此时对其需要进行实时的监测和调整。

4. 数据具有时空特性：新能源装置的运行数据与地理位置和时间密切相关。由于不同地区的光照、风速等环境条件不同，其

会导致新能源装置的运行状态存在差异。同时一天中不同时段、不同季节的能源产出也有着明显的变化。

（二）大数据技术基础

1. 数据采集与存储：借助传感器、智能电表、物联网设备等多种数据采集手段，即可实时地采集新能源装置的运行数据，并且将其传输到数据中心。然后为解决高效地储存与管理海量数据，即可采用分布式文件系统（如 Hadoop Distributed File System, HDFS）和 NoSQL 数据库（如 Cassandra、MongoDB）等技术来实现。

2. 数据预处理：对于采集到的原始数据进行清洗、去噪、归一化等预处理操作，目的是去除数据中的错误值、缺失值和异常值，从而提高数据质量。

3. 数据分析与挖掘算法：运用机器学习算法（如支持向量机、决策树、神经网络等）、深度学习算法（如卷积神经网络、循环神经网络等）以及数据挖掘技术（如关联规则挖掘、聚类分析等），能够从海量数据中提取出有价值的信息，以此为基础可建立新能源装置的运行状态监测模型和故障诊断模型。

4. 可视化技术：将分析结果以直观的图表、图形等形式展示出来，如折线图、柱状图、热力图等，更加方便运维人员和管理人员直观地了解新能源装置的运行状态和故障情况，助力其及时地做出决策。

三、基于大数据的新能源装置运行状态监测系统架构

（一）感知层

感知层是新能源装置运行状态监测系统的数据采集源头，其主要由各类传感器和智能设备组成。当中包括温度传感器、压力传感器、振动传感器、电流传感器、电压传感器等（主要用于实时采集新能源装置的运行参数），以及环境传感器，如风速仪、光照传感器、温湿度传感器等（用于获取装置运行的环境数据）。此外还包括了智能电表、智能开关等设备，其被用于采集能源生产和消耗数据。上述这些传感器和智能设备能够通过有线或无线通信方式，将其采集到的数据传输到网络层^[1]。

（二）网络层

网络层负责将感知层采集到的数据传输到数据处理中心。它主要是采用物联网通信技术（如 ZigBee、Wi-Fi、蓝牙、LoRa 等），来实现传感器与网关之间的短距离通信。以及 4G、5G 等移动通信技术或光纤通信技术，来实现网关与数据中心之间的长距离数据传输。同时网络层还需要具备数据安全传输和网络管理功能，才能够确保数据在传输过程中的完整性和保密性。

（三）数据处理层

数据处理层是监测系统的核心，其主要负责对采集到的数据进行存储、预处理、分析和挖掘。首先应利用分布式存储技术，将海量数据存储到 HDFS 等文件系统或 NoSQL 数据库当中；然后通过数据清洗、去噪、归一化等预处理操作，可有效地提高数据质量；接着再运用大数据分析算法和机器学习模型，对于数据进行实时地分析和挖掘，从中提取出新能源装置的运行特征和潜在故障信息；最后即可将分析结果存储到数据库中，以供应用层调用。

（四）应用层

应用层的作用是为用户提供可视化的监测界面和故障诊断报

告。展开来说：通过 Web 应用程序或移动应用程序，运维人员则可以实时地查看新能源装置的运行状态、历史数据、报警信息等；同时该系统还会根据故障诊断模型，自动地生成故障诊断报告，以此为运维人员提供故障原因分析和维修建议。此外应用层还可以与其他能源管理系统进行集成，最终可实现能源生产、传输和分配的一体化管理。

四、基于大数据的新能源装置故障诊断方法

（一）基于数据驱动的故障诊断方法

就机器学习算法在故障诊断中的应用来说：

1. 支持向量机（SVM）：其可将新能源装置的运行数据作为特征向量，以核函数作为助力，将低维数据映射到高维空间，以此寻找一个最优分类超平面，然后将正常运行状态和故障状态区分开来。

2. 决策树：根据新能源装置运行数据的特征属性，即可构建决策树的模型。再通过对数据进行多次分裂，便能生成一系列的规则，而根据这些规则可对新的数据进行分类，用于判断装置是否处于故障状态^[2]。

3. 神经网络：神经网络包括多层感知器（MLP）、径向基函数神经网络（RBFNN）等。当构建起神经网络模型，便能够对于新能源装置的运行数据进行学习和训练，达到自动提取数据中特征和规律的目的，从而实现故障诊断。

而深度学习算法在故障诊断中的应用具体如下：

1. 卷积神经网络（CNN）：该网络特别适用于处理图像和视频数据。而在新能源装置的故障诊断之中，相关人员可以利用安装在设备上的摄像头采集的图像数据，再基于 CNN 算法对于图像进行特征提取和分类，从而识别出设备的故障部位和类型。

2. 循环神经网络（RNN）：此网络能够处理具有时间序列特性的数据。由于新能源装置的运行数据通常具有时间序列特征，而 RNN 则可以对这些数据进行建模和分析，进而预测设备的运行状态和故障趋势。

（二）基于模型驱动的故障诊断方法

1. 建立新能源装置的数学模型

以新能源装置的工作原理和物理特性为基础，建立其数学模型。例如，对于风力发电机来说，可以建立其空气动力学模型、机械传动模型、电气模型等；但对于太阳能光伏板，则可以建立其光伏效应模型、等效电路模型等。最终通过对数学模型的分析 and 求解，就能得到装置在正常运行状态下的理论参数和运行特性。

2. 基于模型的故障诊断方法

基于模型的故障诊断方法需将新能源装置的实际运行数据与数学模型的理论值进行对比，当两者之间的偏差超过一定阈值时，即表明装置可能出现了故障。

（三）基于知识驱动的故障诊断方法详解

在新能源设备维护与管理领域当中，基于知识驱动的故障诊断方法已经成为了提升运维效率与设备可靠性的关键手段。而这一方法的核心便在于故障知识库的构建与高效利用^[3]。

1. 故障知识库的建立

故障知识库是该方法的基础支撑，它可系统性地收集和整理了新能源装置（如风力发电、太阳能光伏系统等）的各类故障案例、故障原因、故障特征以及维修方法等宝贵知识。同时这些知识的来源广泛而多样，其中既包括了设备制造商提供的详尽技术文档（设备的设计原理、运行参数及常见故障排查指南），也吸纳了运维人员在长期的实践中积累的经验总结，而这些实战经验能够帮助系统掌握一些非标准故障模式及其解决方案相关的经验^[4]。此外相关研究文献也为知识库提供了理论与技术创新视角，其有助于深化对于故障机理的理解。

具体到风力发电机而言，故障知识库会详细地记录常见的故障类型，如叶片结冰导致的空气动力学性能下降、轴承磨损引发的机械振动加剧、变桨系统故障引起的叶片角度控制失灵等。而且针对每种故障，知识库还会列出相应的故障特征，比如振动频谱的异常变化、输出功率的不稳定波动、以及叶片实际角度与目标角度的偏差等，同时也会附上经过验证的维修步骤与预防措施^[5]。

2. 基于规则推理的故障诊断方法

依托于故障知识库则可进一步地开发出基于规则推理的故障诊断系统。而该系统通过预设的诊断规则，再结合新能源装置实时地运行监测数据，即可自动地分析故障特征，且快速地定位故障类型及潜在原因。以风力发电机为例，当系统检测到振动传感器数据异常升高，同时功率输出图表显示波动增大时，诊断规则就会立即启动，其会依据知识库中关于轴承磨损与振动、功率之间关系的规则，智能地推断出可能的故障源头，并且即时反馈给用户具体的维修建议，当中包括更换磨损部件的型号、维修步骤及安全注意事项等，从而在一定程度上缩短了故障响应时间，并且提高了运维效率^[6]。

五、存在的问题、挑战以及未来的研究方向

（一）存在的问题、挑战

1. 数据质量问题：因为新能源装置运行数据受到环境干扰、传感器故障等因素的影响，所以其可能存在数据缺失、错误、异

常等问题，会影响到故障诊断的准确性^[7]。

2. 算法适应性问题：不同类型的新能源装置具有不同的运行特性和故障模式，而现有的故障诊断算法可能无法完全地适应所有情况，因此还需要进一步地进行优化和改进。

3. 数据安全性与隐私问题：新能源装置运行数据通常会包含大量的敏感信息，如设备位置、发电数据等，对此在数据采集、传输和存储过程中必须要加强数据安全和隐私保护^[8]。

（二）未来的研究方向

1. 数据质量提升技术研究：极力地研究更加有效的数据清洗、去噪和补全算法，以提高新能源装置运行数据的质量。

2. 融合诊断算法研究：结合多种故障诊断方法的优点，来研究融合数据驱动、模型驱动和知识驱动的故障诊断算法，目的是提高故障诊断的准确性和可靠性^[9]。

3. 边缘计算与云计算融合技术研究：利用边缘计算技术在本地对新能源装置运行数据进行初步地处理和分析，以此减少数据的传输量，并提高其实时性。同时还可将复杂的数据分析和挖掘任务上传到云计算平台，来实现资源的高效利用。

4. 数据安全性与隐私保护技术研究：研究加密算法、访问控制技术，可有效地保障新能源装置运行数据的安全和隐私^[10]。

六、结语

本文当中深入地研究了基于大数据的新能源装置运行状态监测与故障诊断技术，在分析了新能源装置运行数据特点的基础上，还介绍了基于大数据的监测系统架构和故障诊断方法。相关人员在实践之中应用到大数据技术，便可以实现对于新能源装置运行状态的全面、实时地监测，并且能够更加准确地诊断故障类型和原因，进而提高新能源装置的运行效率和可靠性，与降低运维成本。

参考文献

- [1] 济南作为科技有限公司. 新能源场站故障预警方法、装置、设备、存储介质及程序产品 :CN118410441A[P/OL].2024-07-30.https://www.cqvip.com/doc/patent/3463314484.
- [2] 刘永刚. 新能源场站运维中的智能化监测与故障诊断 [J]. 今日自动化, 2024, (11): 116-118.
- [3] 国家电网有限公司华中分部. 一种基于新能源侧控制策略的电网故障诊断及装置 :CN119024095A[P/OL].https://www.cqvip.com/doc/patent/3474460969.
- [4] 谭海龙, 安洪伟. 基于智慧运维平台的新能源发电设备监测与故障诊断方法研究 [J]. 智慧中国, 2023, (12): 70-71.
- [5] 张新宇. 高压真空断路器诊断测试建模与交互式诊断方法研究 [D]. 浙江大学, 2023.DOI: 10.27461/d.cnki.gzjdx.2023.002429.
- [6] 黄海星. 基于数据驱动的风电机组故障预测方法研究 [D]. 内蒙古科技大学, 2023.DOI: 10.27724/d.cnki.gnmkg.2023.000674.
- [7] 王闯. 向家坝升船机平衡重系统状态监测与预警研究 [D]. 大连海事大学, 2023.DOI: 10.26989/d.cnki.gdlhu.2023.001218.
- [8] 于岩杰. 基于深度学习的配电网不完整信息分布式状态估计方法研究 [D]. 重庆大学, 2023.DOI: 10.27670/d.cnki.gcqdu.2023.000006.
- [9] 杜蔚杰. 新型电力系统低频振荡安全预警与态势感知预测机制研究 [D]. 北京建筑大学, 2023.DOI: 10.26943/d.cnki.gbjzc.2023.000173.
- [10] 马康原. 基于数据驱动的风电机组故障检测与定位方法研究 [D]. 内蒙古科技大学, 2023.DOI: 10.27724/d.cnki.gnmkg.2023.000867.

基于大数据的电力系统故障诊断与预测技术研究

邓鹏

国网蕲春县供电公司, 湖北 蕲春 435300

摘要： 当今电力供应对社会生产生活意义重大，保障系统稳定运行是关键，本文集中探讨了基于大数据的电力系统故障诊断及预测策略。论述了基于大数据的电力系统故障诊断与预测技术的特点和必要性。然而，目前面临的数据品质欠佳与模型适用性不足等问题亟需解决。为解决这些问题，建议采取优化数据收集与处理流程等策略。基于对该技术的深入探究，目标在于显著提升电力系统故障诊断及预测效能，以保障电力系统的安全、高效与稳定运作。

关键词： 大数据；电力系统；故障诊断；故障预测

Research on Fault Diagnosis and Prediction Technology of Power System Based on Big Data

Deng Peng

State Grid Qichun County Power Supply, Qichun, Hubei 435300

Abstract： Nowadays, power supply is of great significance to social production and life, and ensuring the stable operation of the system is crucial. This article focuses on exploring fault diagnosis and prediction strategies for power systems based on big data. It discusses the characteristics and necessity of fault diagnosis and prediction technology for power systems based on big data. However, there are urgent issues to be addressed, such as poor data quality and inadequate model applicability. To address these issues, it is suggested to adopt strategies such as optimizing data collection and processing procedures. Based on in-depth exploration of this technology, the goal is to significantly improve the efficiency of fault diagnosis and prediction in power systems, ensuring the safe, efficient, and stable operation of power systems.

Keywords： big data; power system; fault diagnosis; fault prediction

引言

伴随社会经济的迅猛增长，电力系统作为支撑现代社会的关键基础设施，确保其稳定与高效运作显得尤为关键。随着电力系统的规模持续扩张与结构日趋复杂，故障的出现不仅会引发电力供应的断续，对民众的生活与生产活动构成干扰，而且还可能引发严重的经济损失。传统故障诊断及预测技术，在应对动态复杂的电力系统时，日益显现出其效能的不足。通过大数据技术对电力系统生成的庞大数据集进行解析与发掘，能够更为精确地识别故障根源，预估故障出现的概率，进而增强电力系统的可靠性与稳定性。因此，基于大数据的电力系统故障诊断与预测技术的应用具备显著的实践价值。

一、基于大数据的电力系统故障诊断与预测技术的特点

（一）数据处理量大

在电力系统的运作中，会生成大量的数据，涵盖设备的操作参数、电网的拓扑配置、以及气候与环境信息等。依托大数据背景下的故障诊断与预测技术能够实现庞大数据集的高效管理和存储。举例而言，借助分布式存储与并行计算技术，能够高效处理高达 TB 乃至 PB 级的数据量，从而为故障诊断与预测活动提供充裕的数据资源。

（二）诊断预测精准

通过应用大数据分析技术，包括但不限于机器学习与深度学习等方法，能够对电力系统的过往数据及当前数据进行精细剖析，以揭示隐藏于数据间的内在联系与模式。借助精确的故障诊断与预测模型的构建，可以更为精确地识别故障种类、定位故障所在位置并评估其严重等级，同时预估故障的出现时点及其演变轨迹。举例而言，通过在电力设备振动数据中应用深度学习的卷积神经网络技术，能够精确辨识设备的故障类别^[1]。

（三）实时性强

借助大数据技术，电力系统中的数据得以实现实时收集与处

理,从而能即时识别异常状态并发出警报。借助实时监控电力系统的运作情况,一旦识别出数据偏离或故障信号,即刻触发警报,提醒维护团队及时响应,以降低故障带来的损害。举例而言,对电网的电压、电流等指标进行连续监控,一旦检测到这些指标偏离正常水平,即刻触发警报机制。

(四) 多源数据融合

在电力系统中,故障诊断与预测的实现需整合多元考量要素,而大数据技术的优势在于其能集成并整合自多渠道的数据资源,涵盖传感器信息、监控平台资料以及气象数据等。通过整合多种来源的数据进行综合分析,能够更为深入地洞察电力系统的运作状况,进而提升故障识别与预估的精确度。举例而言,通过整合气象数据与电力设施的操作数据,探讨气候条件对设备故障发生率的关联性。

(五) 自学习和自适应能力

基于大数据的故障诊断及预测模型具备自我学习与自我适应性。伴随电力系统运行数据的持续累积,模型能够实现自我更新与优化,以顺应电力系统运行状况的演变。举例而言,若电力系统的配置或运作模式有所变动,该模型能够依据新获取的数据进行适时调整,从而维持其诊断与预测效能的稳定性。

二、基于大数据的电力系统故障诊断与预测技术应用的必要性

(一) 保障电力系统稳定运行

电力系统的平稳运作对于社会的有序运行至关重要。借助于大数据驱动的故障诊断与预测技术,能够实现对电力系统故障及潜在问题的即时识别,从而采取针对性措施予以解决,有效遏制故障的进一步扩散与恶化,确保电力系统的安全与持续运作。例如,当电网遭遇短路事故时,能高效且精确地识别故障源,迅速断开故障区域,确保电力系统的正常运行^[2]。

(二) 提升供电可靠性

提升供电稳定性构成了电力企业核心的战略目标之一。借助大数据技术对电力系统的故障诊断与预测,能够前瞻识别设备的隐含故障,科学制定设备的检修及维护日程,有效缩减因设备故障引发的停电工时,进而增强供电的稳定性与可靠性。举例而言,利用预测技术评估变压器发生故障的可能性,从而提前安排维修工作,以预防因变压器突然故障导致的断电情况^[3]。

(三) 降低运维成本

传统电力系统的维护工作主要依赖于周期性的巡查与故障后的紧急修复,此类方法不仅执行效率欠佳,且运营成本相对高昂。基于大数据的故障诊断及预报技术能够实现对电力设备的实时监控与状态评价,依据设备的实际运作状态提供精准的维护策略,有效减少非必要的检修频率,从而降低运营与维护的费用。

(四) 适应智能电网发展需求

智能电网代表了电力系统未来的演进路径,其显著特征在于高度的信息化、自动化与智能化。基于大数据的故障辨识及预报技术是确保智能电网实现智能化运作的基石。通过深入分析与处理智能电网内庞大数据集,能够实现对该系统的智能化监控、调控及管理,从而显著提升智能电网的运营效能与稳定性^[4]。

(五) 应对电力系统复杂性增加

伴随电力系统规模的持续扩大与架构的愈发复杂,故障的种类与起因亦呈现出多元化特征。传统的方法在处理这类复杂性时显得力不从心。大数据技术有能力处理庞大的、复杂的数据集,深挖隐藏于数据之中的潜在知识,从而为应对电力系统中复杂的故障问题提供了行之有效的方法。以新能源并网后的电力系统为例,其运作属性出现了显著转变,大数据技术能够剖析新能源发电的不可预测性对电力系统故障的潜在影响。

(六) 满足用户对电力质量的要求

随着时代的发展,公众对电能品质的期待日益提升,电力系统的异常状况,诸如电压不稳定和频率偏离,会干扰用户电气设备的正常运作。借助于大数据驱动的故障诊断及预测手段,能够实现对电力问题的即时识别与处置,从而提升电力品质,以契合用户的期望。举例而言,借助对电网电压及频率数据的监控,能够即时识别出异常情况,并据此采取相应措施进行必要的调整^[5]。

(七) 促进电力行业可持续发展

借助大数据驱动的故障检测与预测技术,能够显著提升电力系统的运作效能与稳定性,同时降低能源损耗并减轻环境负担。为推动电力行业的持续进步,通过改良电力系统的运营策略,减少发电与输送环节的能耗,以确保其长期稳定与高效运作。举例而言,借助于预测电力需求,精心规划发电调度,避免非必需的发电机组启停,从而有效减少能源损耗。

三、基于大数据的电力系统故障诊断与预测技术现存问题

(一) 数据质量问题

在电力系统的数据收集过程中,可能出现诸如噪音、遗漏、误报等数据质量问题。干扰故障诊断与预测模型训练及分析的噪声数据会引发结果的准确性问题。缺失数据会损害模型的全面性和可信度,而错误数据则可能引发误诊与预测失误^[6]。例如,传感器失效可能会导致收集的数据失真,从而影响到电力设备运作状况的评估。

(二) 数据安全问题

电力系统的数据库蕴藏丰富且敏感的内容,包括但不限于电网的拓扑配置以及用户的用电详情。在大数据时代背景下,数据在存储、传输及处理过程中遭遇安全风险,包括数据泄露与篡改等问题。若数据安全发生故障,不仅会干扰电力系统的平稳运作,还可能引发用户资料外泄及财务损失。

(三) 模型适应性问题

电力系统的运作状况受多重变量制约,包括但不限于气候变迁与负载变动。当前的故障诊断及预测模型,在应对复杂且不断变化的操作环境方面,表现出较低的适应性。在电力系统运行状况变动的情况下,模型效能可能受损,从而引发诊断与预测结果的失真。例如,在异常气候情形下,当前的模型可能难以精确估算电力设施的故障机率。

(四) 算法效率问题

在大数据分析领域,算法的计算复杂度显著,特别是在应对海量数据集时,算法的效率成为决定其实用性的核心因素。某些

复杂的机器学习与深度学习技术，在执行训练与预测任务时，往往耗费显著的时间与计算资源，这使其难以适应电力系统的即时需求^[7]。

（五）专业人才短缺问题

基于大数据的电力系统故障检测与预报技术融合了电气工程、计算机科学、统计学等多学科的知识体系。当前，具备电力系统知识与大数据技术专长的专业人才较为匮乏，这一情况制约了该技术的应用与进步。企业和研究机构面临专业人才短缺的问题，难以有效开展数据处理、模型构建以及算法调优等相关工作。

（六）标准规范缺失问题

在当前的大数据驱动的电力系统故障诊断与预测技术应用中，尚未形成统一的标准规范体系。各企业与研究机构在数据收集、加工、模型构建及评测环节展现异质性特征，由此引发的数据与模型之间的兼容性与互操作性问题显著。此举妨碍了技术的普及与使用，同时也制约了科研成果的传播与互动。

（七）投资成本较高问题

采用以大数据为支撑的故障诊断与预测策略，涉及显著的资金投入，涵盖数据获取设施的购买、数据储存及处理系统的构建、算法创新以及专业人才培养等环节。对于部分中型和小型电力企业而言，较高的资本投入可能构成其采纳该项技术的制约因素^[8]。

四、基于大数据的电力系统故障诊断与预测技术的发展策略

（一）优化数据采集与处理

强化数据采集设备的保养与管控，以保障数据的精确度与全面性。采用数据清洗、利用填充等技术对收集的数据进行预处理，旨在消除噪音与错误记录，并填补遗漏的数据。此外，相关人员构建了数据质量评价体系，实现了对数据质量的即时监控与评价，有效识别并应对数据质量问题。

（二）加强数据安全保障

构建全面的数据安全保护机制，运用加密、权限管理、数据备份等技术策略，确保数据在存储、传输及处理过程中的安全性。强化数据安全管控，建立严谨的数据安全管理体系，明确数据应用与共享流程，以预防数据泄露与篡改事件的发生。

（三）改进模型算法

持续探索与提升故障诊断及预测模型的算法技术，以增强模型的适用范围与精确度。鉴于电力系统的特性，设计并开发了适用于多种运行情境的模型与算法。例如，通过集成学习策略，将多个模型整合在一起，以增强模型的泛化性能。此外，本研究着重探索前沿算法技术，包括强化学习和迁移学习等，旨在将其有效应用于电力系统的故障诊断与预测工作。

（四）提高算法效率

通过优化大数据分析算法，引入分布式计算与并行计算等策略，以增强算法的计算性能。通过优化与改进算法，有效降低了计算需求与执行时间。例如，采取逼近算法、降维算法等策略，在确保足够精确度的基础上，优化算法执行效率，以契合电力系统的实时性需求^[9]。

（五）加强专业人才培养

高等学府与职业学院需优化专业设置，致力于造就兼具电力系统知识与大数据技能的综合性专业人才。企业与研究机构应着重加强在职员工的大数据技术培训，以提升其应用能力。此外，构建人才激励体系，旨在吸引并保留卓越的专业人才，从而为技术进步奠定坚实的人力资源基础。

（六）建立标准规范

有关政府部门及行业协会应协同制定针对大数据驱动的电力系统故障检测与预判的技术标准，确保数据收集、加工、模型构建以及评价等环节的一致性。借助确立的标准规程，提升了数据与模型间的兼容性与互操作性，加速了技术的普及与实施，进而促进了行业的持续繁荣与发展^[10]。

（七）合理控制投资成本

电力企业需依据其具体条件，明智部署基于大数据的故障检测与预报系统的财务投入。采取分阶段增长策略，分期分配资金，以减少一次性大额投资所伴随的风险。此外，积极寻求政府与社会的支援，力求获取相应的政策与资金援助，以期减轻企业的投资负担。

五、结语

基于大数据的电力系统故障诊断及预测技术为确保电力系统的安全、稳定以及高效运作提供了坚实的基础。鉴于当前技术实施中面临的一些挑战，通过优化数据获取与处理流程、强化数据安全防护、升级模型算法设计、提升计算效能、加大专业人才培养力度、制定行业标准并合理规划投资策略等措施的采纳，预期上述问题将能够得到妥善解决。展望未来，持续深入的研究与探索至关重要，旨在促进该技术的革新与实践应用，从而为打造更为智能与稳健的电力系统贡献更大力量。

参考文献

- [1] 刘立石, 徐承森, 汪健, 等. 基于大数据技术的电力系统故障预测与诊断方法分析 [J]. 电子技术, 2023, 52(10): 392-393.
- [2] 顾云汉. 基于多源异构数据融合的电网故障诊断系统的设计与实现 [D]. 东南大学, 2022. DOI: 10.27014/d.cnki.gdnau.2022.000955.
- [3] 杨硕, 范军太, 王伟, 等. 基于大数据分析的电力系统远程运维及故障诊断 [J]. 电力学报, 2021, 36(01): 84-89. DOI: 10.13357/j.dlxb.2021.012.
- [4] 徐卫东, 刘勤锋, 郑贵元, 等. 基于电力大数据应用的故障诊断研究分析 [J]. 电工电气, 2020, (02): 31-34.
- [5] 刘津铭. 机器学习在电力系统故障中的运用 [J]. 通信电源技术, 2019, 36(09): 147-148. DOI: 10.19399/j.cnki.tpt.2019.09.057.
- [6] 张宇航, 邱才明, 杨帆, 等. 深度学习在电网图像数据及时空数据中的应用综述 [J]. 电网技术, 2019, 43(06): 1865-1873.
- [7] 耿俊成, 张小斐, 郭志民, 等. 电力通信网大数据应用场景开发及试点应用 [J]. 电力大数据, 2019, 22(02): 88-92.
- [8] 朱永利, 石鑫, 王刘旺. 人工智能在电力系统中应用的近期研究热点介绍 [J]. 发电技术, 2018, 39(03): 204-212.
- [9] 胡红钱, 施伟峰, 兰莹, 等. 基于以太网的船舶电力系统动态电能质量监测与故障诊断系统设计 [J]. 中国舰船研究, 2018, 13(01): 120-126.
- [10] 程志南, 屈可庆. 新能源主体下新型电力系统中数字化技术的应用 [J]. 光源与照明, 2023, (12): 234-236.

