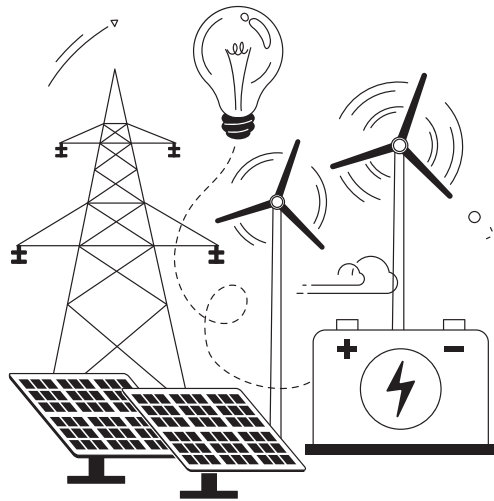


电力技术 与安全管理

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9期 2024年12月刊

主管 ART AND DESIGN PRESS INC.

主办 ART AND DESIGN PRESS INC.

编辑 《电力技术与安全管理》编辑部

ISSN(O): 2997-3503

ISSN(P): 2997-3473

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

网址: <https://www.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 计算机网络技术下 TSI 与热工测量的融合策略 王鑫, 马全秀, 周锦扬
Fusion Strategy of TSI and Thermal Measurement
under Computer Network Technology Wang Xin, Ma Quanxiu, Zhou Jinyang
- 008 热电厂 DCS 热控自动化技术的智能应用 康旭
Intelligent Application of DCS Thermal Control Automation Technology
in Thermal Power Plants Kang Xu
- 012 数字化转型背景下电力营销业务实践 王巧霞
Power Marketing Business Practice under the Background of Digital
Transformation Wang Qiaoxia
- 014 光伏电站设备管理与改造研究 李红超
Research on Photovoltaic Power Station Equipment Management and
Transformation Li Hongchao
- 017 定向钻敷设 10kV 电缆的设计与工程实践 唐小华
Design and Engineering Practice of Directional Drilling Installation
of 10kV Cables Tang Xiaohua
- 021 电力配电网工程建设管理研究 张哲岚
Research on Construction Management of Power Distribution
Network Engineering Zhang Zhelan
- 024 本质安全理念下电力安全管理体系的构建 邓亚军
The Construction of Electric Power Safety Management System under
the Concept of Essential Safety Deng Yajun
- 027 核电站取水口海生物堵塞的成因、
影响和智能防控体系研究 岳冲, 任根民, 汪井春
Study on the Cause, Influence and Intelligent Prevention and Control System
of Sea Biological Blockage at the Water Intake of Nuclear Power Plant
Yue Chong, Ren Genmin, Wang Jingchun
- 030 数字化技术融入电力安全工具检测的探讨 王盛, 李金娥, 许莉, 胡笏
Discussion on the Integration of Digital Technology into Electrical Safety
Tools and Equipment Testing Wang Sheng, Li Jin'e, Xu Li, Hu Jia
- 033 新能源电力项目全生命周期的环境影响与管理对策 李琨
Environmental Impact and Management Strategies for the Whole Life
Cycle of New Energy Power Projects Li Kun
- 036 控制棒动态失步监测逻辑异常问题研究、应对及改进 李瑞豪
Research, Response and Improvement of Dynamic Step
Monitoring of Control Rod Li Ruihao
- 039 动力工程设备腐蚀监测中的电化学分析技术应用实践 王小贺
Application Practice of Electrochemical Analysis Technology in Corrosion
Monitoring of Power Engineering Equipment Wang Xiaohu

电力系统 | POWER SYSTEM

- 042 配网自动化在隔离配网故障中的应用探究 陈微
Exploring the Application of Distribution Network Automation in
Isolating Distribution Network Faults Chen Wei
- 045 构网型储能电站提升电力系统稳定性的关键技术与应用分析 王涛
Key Technologies and Application Analysis of Grid-forming Energy Storage
Power Stations for Improving Power System Stability Wang Tao

048	储能技术在提升电力系统安全可靠中的应用与管理策略 Application and Management Strategies of Energy Storage Technology in Improving the Safety and Reliability of Power Systems	郭建建 Guo Jianjian
051	电能质量优化促节能 Power Quality Optimization for Energy Saving	谢新航, 王伯杨 Xie Xinhang , Wang Boyang
054	用户变电站 110kV 线路单相断线分析计算研究 Analysis and Calculation of Single-Phase Break of 110kV Line in Customer Substation	薛俊亮 Xue Junliang
058	光伏电站的运行维护与故障诊断技术研究 TResearch on Operation, Maintenance and Fault Diagnosis Technologies for Photovoltaic Power Stations	朱波 Zhu Bo
061	分布式电源接入对输配电系统的影响及技术对策探讨 Discussion on the Impact of Distributed Power Source Access on Transmission and Distribution Systems and Technical Countermeasures	冀连东, 崔家荣 Ji Liandong, Cui Jiarong
064	智能化技术在高压输电线路检修中的实践分析 Practical Analysis of Intelligent Technology in High Voltage Transmission Line Maintenance	张东, 王凯 Zhang Dong, Wang Kai
067	配网调度大数据分析在故障快速定位与处理中的应用 Application of Big Data Analysis of Distribution Network Scheduling in Fast Fault Location and Processing	周航 Zhou Hang
070	基于人工智能的光伏电站故障诊断与预测维护系统设计 Design of Fault Diagnosis and Predictive Maintenance System for Photovoltaic Power Station Based on Artificial Intelligence	张生兵 Zhang Shengbing
073	售电公司在电力交易中风险管理要点及应对策略 Risk Management Key Points and Coping Strategies for Electricity Selling Companies in Electricity Trading	唐嘉泽 Tang Jiaze

计算机网络技术下 TSI 与热工测量的融合策略

王鑫, 马全秀, 周锦扬

华能兰州热电有限责任公司, 甘肃 兰州 730104

摘要： 计算机网络技术的快速发展为工业测量领域带来了革命性的变化。其中 TSI 与热工测量的融合策略研究显得尤为重要，这是因为通过将 TSI 与热工测量技术相结合，可以实现对工业设备运行状态的实时监控和分析，从而在提高设备运行效率减少能源浪费。针对于此本文首先对计算机网络技术进行概述，随后说明了计算机网络技术下 TSI 与热工测量融合的意义，并针对实际融合中存在的相关问题，提出了针对性的优化措施。期望通过这些优化策略的实施，能为 TSI 与热工测量融合提供帮助。

关键词： 计算机网络；TSI；热工测量；融合

Fusion Strategy of TSI and Thermal Measurement under Computer Network Technology

Wang Xin, Ma Quanxiu, Zhou Jinyang

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

Abstract： The rapid development of computer network technology has brought revolutionary changes to the field of industrial measurement. Among them, the research on the integration strategy of TSI and thermal measurement is particularly important. This is because by combining TSI and thermal measurement technology, real-time monitoring and analysis of the operating status of industrial equipment can be achieved, thereby improving equipment operating efficiency and reducing energy waste. In view of this, this article first outlines computer network technology, then explains the significance of the integration of TSI and thermal measurement under computer network technology, and proposes targeted optimization measurements for the related problems that exist in the actual integration. It is hoped that through the implementation of these optimization strategies, assistance can be provided for the integration of TSI and thermal measurement.

Keywords： computer network; TSI; thermal measurement; integration

引言

随着工业自动化和信息化水平的不断提高，对工业测量技术的要求也越来越高。TSI 作为工业测量中的重要组成部分，其在保障工业设备安全、稳定运行方面发挥着关键作用。然而传统的 TSI 系统往往独立运行，缺乏与其他热工测量系统的有效整合，这在一定程度上限制了数据的综合分析和利用。计算机网络技术的引入，为 TSI 与热工测量的融合提供了可能。通过网络技术，可以实现数据的快速传输、处理和共享，从而打破信息孤岛，实现多系统间的协同工作。

一、计算机网络技术概述

（一）计算机网络技术的基本原理

计算机网络技术的基本原理涉及多个方面，主要包括数据传输、网络协议、网络架构和网络设备等。其中数据传输是当下所广泛使用的计算机网络的核心功能，它依赖于各种物理介质如双绞线、光纤和无线信号等，确保数据能够在不同设备间准确、高效地传输。其次网络协议是计算机网络中不同设备之间进行通信

的标准和规则，如 TCP/IP 协议栈定义了数据包的封装、传输、路由和接收等过程。网络架构则描述了网络的组织结构，常见的有星型、总线型、环型和网状等拓扑结构，它们决定了网络的可靠性和扩展性。最后网络设备如路由器、交换机、网关和防火墙等，是实现网络功能的关键硬件，它们负责数据的转发、过滤和管理，确保网络的高效运行^[1]。

（二）网络协议与数据传输

就当下的社会而言，计算机网络技术是现代信息技术的重要

组成部分，它涉及计算机硬件、软件以及通信技术的综合应用。在生活中通过计算机网络，人们可以实现数据、信息和资源的共享与交换，从而极大地提高了工作效率和生活质量。在这其中网络协议是计算机网络中用于数据传输和通信的一套规则 and 标准，它规定了数据的格式、传输方式以及通信双方如何进行交互。常见的网络协议包括传输控制协议 / 互联网协议、用户数据报协议和超文本传输协议等。数据传输是网络协议的核心功能之一，它确保了信息能够在网络中准确且高效地传递^[2]。

二、计算机网络技术下 TSI 与热工测量融合的意义

（一）提高数据处理效率与准确性

在当前人们的生产与作业过程中，可以计算机网络技术的辅助下将 TSI 与热工测量融合，这种融合模式的应用不仅能够提高数据处理的效率与准确性，而且对于整个工业过程的优化和控制具有深远的意义。这是因为在企业的生产当中，所使用融合后的系统能够实时监控设备状态，通过高速网络传输的精确数据，帮助操作人员可以及时了解设备运行情况，对潜在的问题进行预警和干预，从而减少意外停机时间，提高生产效率。除此之外 TSI 与热工测量的融合使用还能够为设备维护提供更为精确的依据。这是因为在应用中通过长期积累的数据分析，可以对设备的磨损程度、性能衰退趋势进行预测，实现预测性维护，避免突发故障的发生。这种基于数据驱动的维护策略，能够显著降低维护成本，延长设备使用寿命^[3]。

（二）实现远程监控与故障诊断

在远程监控与系统故障诊断这一层面，当下计算机网络技术的应用为 TSI 与热工测量的融合提供了强大的支持。在工作人员的实际应用中，可以通过网络技术去进一步实时获取关键设备的运行数据，而温度、压力、振动等这些数据对于确保工业设备的稳定运行至关重要。在远程监控的实现之下，可以帮助工作人员在提高数据采集的效率的同时还进一步降低人工巡检的成本和风险。更重要的是它使得故障诊断变得更加迅速和精准。同样的在以往传统的监控模式下，一旦设备出现异常，往往需要等到问题严重化后才能被发现，这不仅会导致生产中断，还可能造成设备损坏。而通过远程监控系统，可以实时监测设备状态，一旦发现异常数据，系统会立即发出警报，甚至可以自动启动保护程序，避免潜在的故障扩大。这种及时的响应机制大大减少了意外停机时间，提高了生产效率^[4]。

（三）优化能源管理与成本节约

尽管计算机网络技术与 TSI 和热工测量的融合应用，对于企业而言需要在初期进行较大的投资，但其长远意义是不可估量的。具体而言这种融合模式在生产中可以优化能源管理与成本节约。通过实时监测和分析，系统能够精确地识别能源浪费的环节，从而提供针对性的优化建议。例如，通过监测蒸汽流量和温度，可以及时调整锅炉的运行参数，确保其在最佳效率下工作，减少不必要的能源消耗。除此之外计算机网络技术使用的背景下，进行融合使得数据的收集和处理更加高效，为能源管理提供

了强大的数据支持。企业可以利用这些数据进行能源审计，制定更为科学合理的能源使用计划。通过长期的数据积累，企业还可以进行趋势分析，预测未来的能源需求，从而提前做好准备，避免能源短缺或过剩的情况发生^[5]。

三、计算机网络技术下 TSI 与热工测量融合的难点

（一）数据同步与处理的挑战

在当下所广泛使用的计算机网络技术下，将 TSI 与热工测量融合时数据同步与处理成为了一个主要的挑战。这是由于 TSI 系统和热工测量系统往往采集的是不同类型的信号，比如如温度、压力、流量等信号它们的采样频率、数据格式和传输协议可能各不相同。这就要求系统设计者必须解决数据同步问题，确保不同数据源的数据能够准确地对应到同一时间点上，以便于进行准确的分析和控制。

（二）系统兼容性与集成难题

随着近些年来计算机网络技术的飞速发展，使得 TSI 与热工测量技术的融合成为提升工业自动化水平的重要途径。然而大多数企业在这一过程中，系统兼容性与集成难题成为不可忽视的难点。这是因为这些企业所使用的 TSI 系统与热工测量系统往往由不同的制造商提供，它们在设计时遵循的标准和协议各不相同，这导致了两者在数据格式、通信协议以及接口等方面的不兼容。例如 TSI 系统可能采用专有的数据格式和高速数据采集技术，而热工测量系统则可能依赖于通用的工业通信协议，如 Modbus 或 Profibus。这种差异使得两者在数据交换和处理上存在障碍，难以实现无缝集成^[6]。

（三）实时性要求与网络延迟问题

在当下工业自动化水平得到了极大的提升的背景下，TSI 与热工测量的融合成为提升发电效率和保障设备安全的重要手段。然而在实际应用中，这一融合过程面临着诸多难点，其中，实时性要求与网络延迟问题尤为突出。这是因为当下的企业使用 TSI 系统时对数据的实时性要求极高。汽轮机作为发电厂的核心设备，其运行状态的实时监测对于保障整个发电过程的安全和效率至关重要。TSI 系统需要实时收集和分析大量数据，包括转速、振动、位移、压力等参数，以便及时发现潜在的故障和异常。然而计算机网络技术在数据传输过程中不可避免地会遇到延迟问题，这在一定程度上影响了数据的实时性^[7]。

（四）安全性威胁与隐私保护的困境

安全性与隐私保护这一问题在计算机网络技术下 TSI 与热工测量融合的过程中显得尤为突出。由于 TSI 在应用通常涉及实时数据的采集、处理和传输，而这些数据往往包含关键的工业控制信息和热工参数。这就导致如果系统遭受攻击或泄露，可能会对整个系统的安全运行造成严重影响。具体而言安全性威胁主要来自于网络攻击，如拒绝服务攻击以及中间人攻击和数据篡改等。这些攻击手段可以干扰 TSI 的正常传输，甚至导致热工测量数据的失真，进而影响到整个工业过程的控制精度和可靠性。而当下企业进行隐私保护的困境在于，TSI 和热工测量数据往往能够反映

出工业设备的运行状态和生产流程，这些信息如果被未经授权的第三方获取，可能会泄露企业的核心竞争力^[8]。

四、计算机网络技术下 TSI 与热工测量融合的策略

（一）实施高精度的时间戳机制

为了进一步去实现计算机网络技术下 TSI 与热工测量融合的策略，对于有关部门而言重点需要建立一个高精度的时间戳机制。这一机制是确保数据同步和准确性的基础，对于实时监控和控制工业过程至关重要。在这一优化策略的实施过程中，需要选择支持高精度时间同步的网络设备，如支持 IEEE 1588 PTP 的交换机和路由器。而对于老旧设备可能需要进行硬件升级，以支持高精度时间同步协议^[9]。

（二）采用标准化的通信协议

就当下的融合现状而言，一个标准化的通信协议，如 Modbus、Profibus、OPC 等可以为不同厂商的设备和系统之间的互操作性提供了保障。在实际的生产作业当中，这些协议的使用使得 TSI 系统能够无缝集成到整个热工测量网络中，确保了数据的准确传输和高效处理。例如 Modbus 协议因其简单、开放和易于实现的特点，在工业自动化领域得到了广泛应用。通过 Modbus 协议，TSI 系统可以将采集到的转速、振动、温度等关键参数实时传输给控制中心，控制中心再根据这些数据进行分析和决策，从而实现对热力系统的精确控制^[10]。

（三）优化网络架构

计算机网络技术自 20 世纪 60 年代诞生以来，经历了从 ARPANET 到互联网的演变，其技术发展始终围绕着提高数据传输效率、增强网络的可靠性和扩展性、以及提升用户体验等方面。然而当下随着物联网和工业 4.0 的兴起，计算机网络技术在工业自动化领域得到了广泛应用，特别是在热工测量和 TSI 系

统中网络技术的融合优化策略显得尤为重要。在融合中相关部门为了进一步优化融合后的效果，则需要对现有的网络架构进行优化。在优化中需要将传统的串行通信网络升级为以太网或工业以太网，以支持更高的数据传输速率和更稳定的网络连接。例如采用 EtherCAT 或 Modbus TCP 等协议，这些协议专为工业环境设计，能够提供实时数据交换和高可靠性。

（四）实施多层次的安全防护措施

在计算机网络技术下，将 TSI 与热工测量融合的过程中，实施多层次的安全防护措施是至关重要的。这不仅能够确保数据的准确性和可靠性，还能有效防止未授权访问和网络攻击，保障整个系统的安全稳定运行。在安全防护的实施当中，物理层安全是基础。这是因为在 TSI 与热工测量设备的物理接入点，应采用防篡改的硬件设备和锁定机制，确保只有授权人员才能接触到这些关键设备。例如可以使用带有生物识别技术的门禁系统，限制对控制室和设备机房的访问。此外关键的网络设备，如交换机和路由器，应放置在安全的环境中，避免物理损坏或非法操作。

五、结语

综上所述，在当今快速发展的工业自动化领域，计算机网络技术与 TSI（涡轮机状态监测）及热工测量的融合已成为提升生产效率、保障设备安全和优化能源管理的关键。尽管在数据同步、系统兼容性、实时性要求和安全性等方面存在挑战，但通过实施高精度的时间戳机制、采用标准化的通信协议、优化网络架构以及实施多层次的安全防护措施，可以有效克服这些难点。所以相信在不远的将来，随着技术的不断进步和创新，TSI 与热工测量的融合将更加紧密，为工业自动化带来更多的可能性和优势。企业应持续关注并投入资源于这些技术的融合与优化，以确保在激烈的市场竞争中保持领先地位，实现可持续发展。

参考文献

- [1] 孟宪鹏. 火电厂热工参数软测量技术的应用研究 [J]. 自动化应用, 2023, 64(19): 164-166+172.
- [2] 高增兰. 火电厂热工参数软测量技术的发展研究 [J]. 电气技术与经济, 2022, (03): 32-34.
- [3] 鲁娟. 热工仪表压力测量技术在火电厂的应用故障及措施 [J]. 电气技术与经济, 2022, (01): 41-43.
- [4] 孙美玲. 基于大数据分析的计算机网络信息安全监测 [J]. 信息与电脑 (理论版), 2023, 35(22): 239-241.
- [5] 戴响. 大数据与人工智能在计算机网络技术中的应用 [J]. 电子技术, 2023, 52(11): 94-95.
- [6] 曾彬, 张国安, 冯越海, 等. 欧盟 TSI 铁路机车车辆防火安全研究 [J]. 技术与市场, 2023, 30(07): 69-77.
- [7] 黄洛玮, 王树霞, 司虎, 等. PTA-IPA-AA 三元共聚酯薄膜的制备及性能研究 [J]. 合成纤维工业, 2023, 46(03): 45-48.
- [8] 俞在仙 (Yu Jaeseon). 中国 IT 产业国际贸易竞争力研究 [D]. 中国石油大学 (华东), 2020.
- [9] 李明, 谢冲, 张亦姝. 隔离式两线制 RTD 测量系统设计 [J]. 长江信息通信, 2023, 36(09): 94-97.
- [10] 朱新新, 杨远剑, 王辉, 等. 圆筒压力热流计的研制与测试结果分析 [J/OL]. 实验流体力学, 1-9. 2023.

热电厂 DCS 热控自动化技术的智能应用

康旭

天津国能津能热电有限公司，天津 300000

摘 要： 为应对工业 4.0 和智能制造的发展需求，热电厂 DCS（分布式控制系统）热控自动化技术的智能应用成为提升电厂运行效率、安全性和经济性的重要手段。本文围绕热电厂 DCS 热控自动化技术的智能应用展开研究，重点分析了关键技术、具体应用、智能场景及实际案例。通过典型案例分析，结合实际项目背景、智能应用方案和应用效果，总结了智能应用的成功经验和推广价值。

关 键 词： 热电厂；DCS 热控自动化；智能应用；人工智能

Intelligent Application of DCS Thermal Control Automation Technology in Thermal Power Plants

Kang Xu

Tianjin Guoneng Jinneng Thermal Power Co., Ltd. Tianjin 300000

Abstract： To meet the development needs of Industry 4.0 and smart manufacturing, the intelligent application of DCS (Distributed Control System) thermal control automation technology in thermal power plants has become an important means to improve the operational efficiency, safety, and economy of power plants. This paper focuses on the intelligent application of DCS thermal control automation technology in thermal power plants, with emphasis on analyzing key technologies, specific applications, intelligent scenarios, and practical cases. Through typical case studies, combined with actual project backgrounds, intelligent application solutions, and application effects, the successful experience and promotion value of intelligent applications are summarized.

Keywords： thermal power plant; DCS thermal control automation; intelligent application; artificial intelligence

引言

热电厂 DCS（分布式控制系统）是以计算机技术为基础，通过分布式通信网络将分散在各个控制室的生产设备和生产过程进行集中管理、分散控制，并通过计算机网络实现企业资源共享的信息系统。随着我国经济的快速发展，热电厂的生产规模不断扩大，热电厂的热控自动化系统也不断完善，自动化技术在热电厂的应用范围也不断扩大，从传统控制系统到智能控制系统，从单纯的就地控制到区域集中管理，从单台机组运行到区域协同调度管理，从 DCS 控制到智能决策管理，都是热电厂自动化技术在不同历史阶段下的不断升级和发展。随着热电厂对自动化控制要求的提高，传统的 DCS 控制系统已无法满足热电厂自动化生产的要求，DCS 控制系统已经成为热电厂控制系统的重要组成部分，在我国热电厂自动化生产中得到了广泛应用^[1]。根据电力市场的实际需求，对热电厂传统 DCS 控制系统进行升级改造，在实现 DCS 系统全分布式、全分散式控制和管理功能的基础上，通过对先进技术的应用，实现了 DCS 系统在热电厂中的实际应用^[2]。但是由于我国地域辽阔，地区发展不平衡，企业间生产规模、技术水平差异较大，导致不同区域对 DCS 系统的要求不同，从而造成了 DCS 在不同区域的使用情况有所差异。

一、热电厂 DCS 热控自动化技术智能应用关键技术

DCS 热控自动化技术是基于现场控制系统的基础上，将信息、控制、管理等融为一体，是一个综合的信息系统。热电厂 DCS 热控自动化技术的智能应用涉及以下几个关键技术：

（一）DCS 运行优化技术

机组运行优化控制是智能热控系统的核心功能之一，通过 DCS 分布式控制系统采集和分析机组运行过程中的数据，将各参数控制在最佳范围内，以提高机组运行效率^[3]。在对机组运行数据进行采集、分析、处理的基础上，进行优化计算和决策，提出

最优控制方案，提高机组效率、降低能耗。

（二）智能分析技术

热电厂 DCS 热控自动化系统的智能分析功能主要包括：状态诊断、趋势分析、安全评价和故障诊断。通过对机组运行状况进行分析，判断机组的健康状况及存在的问题，对影响机组安全与经济运行的关键因素进行统计分析和预测，并提出相应的防范措施或建议。在趋势分析方面，通过对机组设备运行状况的综合分析，发现设备隐患并及时采取措施进行预防控制；在安全评价方面，通过对机组安全与经济运行状况进行评价，识别和消除存在的不安全因素及隐患^[4]；在故障诊断方面，通过对设备故障信息进行采集、处理、存储和输出等处理过程进行控制和优化。

（三）人工智能技术

热电厂 DCS 热控自动化技术智能应用关键技术的另一个重要方面是人工智能技术，该技术包括专家系统、神经网络等。专家系统是一种通过输入大量样本知识来解决复杂问题的方法。在 DCS 热控自动化系统中应用专家系统可以实现对电厂故障的自动诊断和预测^[5]；神经网络则可以实现对复杂模型的辨识与建模。通过将两者结合应用于热电厂 DCS 热控自动化技术应用中，可以有效提高故障诊断和预测精度。

（四）故障诊断和预测技术

当电厂设备发生故障时，可以通过对故障发生情况、原因和发展趋势进行分析、判断、处理后，基于 DCS 热控自动化系统中的数据进行诊断和预测，给出相应的解决方案。基于 DCS 热控自动化技术中大量现场数据信息及历史数据，采用人工神经网络、支持向量机等算法对故障进行诊断和预测。

二、DCS 热控自动化技术在热电厂中的具体应用

（一）火力发电厂 DCS 系统设计与功能开发

主要包括热工参数测量、自动控制和故障诊断三大功能。热工参数测量功能是实现机组自动化控制的基础，是实现机组经济运行的重要前提；通过热工参数测量可以发现机组运行过程中的故障隐患，并进行有效分析；自动控制功能是实现机组安全、经济运行的关键^[6]。通过 DCS 热控自动化技术实现对机组运行状态的实时监测，可以提高机组运行的可靠性和安全性。

（二）热控保护系统

热控保护系统包括自动保护、紧急保护和安保护三大系统。自动保护系统主要是通过逻辑运算实现对机组的安全稳定运行，安保护系统主要是通过热控逻辑运算实现对机组设备运行状态的实时监测，使机组在运行过程中出现故障时可以及时发现，避免发生危险事故。而在机组运行过程中，由于各种因素的影响，会出现一些不利于机组正常运行的情况，这个时候就需要对这些不利于机组正常运行的因素进行及时处理和消除。而在这些不利于机组正常运行的因素中，往往会有一些不利于机组安全

稳定运行的因素存在。因此，就需要在热控保护系统中增加一些必要的保护功能来防止不利于机组安全稳定运行的因素对机组正常运行造成影响^[7]。比如，当温度升高时可以采取相应的降温措施来防止温度过高而引起设备损坏；当某一设备出现故障时可以采取停机处理措施，从而避免因故障停机造成对整个系统造成影响等。通过热控保护系统中功能完善的保护逻辑和准确可靠的保护装置，可以使热控保护系统在实际应用中发挥重要作用。

（三）安全自动装置

安全自动装置是指在 DCS 热控系统中，当机组发生异常情况时，通过对各个设备运行状态的实时监控，可以及时发现异常情况并进行处理，避免机组发生严重事故。安全自动装置的作用主要有：

1. 系统故障诊断。在机组运行过程中，系统故障是经常出现的，当出现机组设备异常情况时，系统会自动对设备进行检查，并发出相应信号。同时，对异常情况进行处理。
2. 机组事故处理。在机组发生故障时，安全自动装置会将设备故障情况实时显示出来，并在系统发出故障信号的同时对其进行相应处理。处理后的结果会反馈到 DCS 热控系统中。
3. 设备状态监测。当机组运行过程中发生设备异常时，安全自动装置会根据相应的异常情况对设备运行状态进行实时监测，并将监测结果通过 DCS 热控系统中的监视画面呈现出来。
4. 安全自动控制。通过安全自动装置的使用可以将机组运行中存在的安全隐患及时发现并排除，提高机组运行的可靠性和安全性。同时，安全自动装置还可以为机组运行提供必要保障。

三、热电厂 DCS 热控自动化技术智能应用场景

（一）机组启停、启停过程控制

随着火电机组容量不断增大，机组启停过程中，DCS 系统自动控制能力的提升就显得尤为重要。一是对启停过程的安全性进行分析和优化，在 DCS 系统中实现辅助运行、辅助决策功能；二是在 DCS 系统中实现机组负荷、燃料、烟气排放等参数的在线监测，在 DCS 系统中实现辅助运行功能。

（二）汽轮机变工况控制

汽轮机变工况运行是火电厂运行的常态，根据机组负荷变化，汽轮机转速需要进行调节。一是机组负荷变化时，汽轮机转速也会发生相应变化；二是机组负荷变化时，汽轮机转速也会发生相应变化^[8]。为满足机组变工况控制需求，DCS 系统通过对汽轮机转速、主蒸汽压力、主汽流量等参数的在线监测，实现对变工况控制的智能控制。

（三）机组低负荷控制

机组在低负荷阶段运行时，因低负荷运行工况的影响，给水泵电机在该阶段的电流会出现突变。在 DCS 系统中实现低负荷控制功能后，可以实现对低负荷段电流、水泵电机电流、冷却水流

量等参数的实时监测和优化控制。

（四）锅炉燃烧优化控制

锅炉燃烧优化是指根据锅炉运行参数（如锅炉效率、过量空气系数等）来优化锅炉燃烧系统各主要部件（如阀门开度、进汽流量、空气预热器进口温度等）的运行方式，从而提高锅炉效率和降低能耗^[9]。DCS系统通过对锅炉燃烧系统相关参数进行实时监测与优化，实现对锅炉燃烧系统的智能控制。

（五）煤质变化管理

电厂燃煤存在煤质变化和煤质漂移问题，而煤质变化和煤质漂移会对机组安全性和经济性造成影响。在DCS系统中实现煤质变化管理功能后，可以对煤质进行在线监测，在煤质发生变化时进行自动调整，进而实现机组安全经济运行。

（六）辅助服务功能应用

在DCS系统中实现辅助服务功能后，可以实现对供热系统、消防系统等辅助设施的监测与控制；还可以实现对电厂脱硫、脱硝、除尘等设备的监测与控制；还可以实现对电厂锅炉点火、锅炉吹管和停炉等辅助服务的监测与控制^[10]；还可以实现对汽机本体振动、引风机振动等辅助设施的监测与控制；还可以实现对锅炉效率、烟气排放和烟气净化等辅助设备的监测与控制；在DCS系统中实现辅助控制功能后，可以实现机组运行过程中对辅机设备的监测与控制，进而提高设备利用率、减少故障率和设备故障率，从而保证机组的安全稳定运行；在DCS系统中实现厂用电优化控制后，可以实现对机组的负荷优化、厂用电优化和厂用电平衡管理等功能。

四、案例分析

（一）项目概况

某电厂300MW机组，配备1套6Mvar循环流化床锅炉，设计煤种为中煤，额定蒸发量为146.44t/h，额定发电功率为6×300MW。该项目是国家能源集团以提高公司绿色智能制造水平为目标的新能源发电项目，项目总投资约13亿元。该项目的建设，可以实现提高发电效率、优化运行方式、降低碳排放和降低维护成本等目标，具有重要的示范作用。该项目是全国首个火电机组6MW循环流化床锅炉智能运行优化控制技术的示范应用。针对该项目，研究团队采用“1+N”的模式开展智能优化控制系统建设，并在设计、生产、运维等环节开展了大量的技术研究工作。

（二）DCS热控自动化技术智能应用

首先是深入分析了循环流化床锅炉燃烧控制特点，通过对各锅炉运行工况进行数据采集和分析，得到了燃烧工况下各种影响因素对锅炉燃烧性能的作用机理。随后，对燃烧优化控制系统进行了设计优化，设计了适应锅炉燃烧特点的智能优化控制算法。在此基础上，研发了以循环流化床锅炉燃烧优化控制为核心、集生产运行数据采集、分析于一体的智能运行优化控制系统，该系统采用多项先进技术和工艺，实现了燃烧过程的“三集五大”功

能和“三高一低”等目标，并针对循环流化床锅炉复杂、大惯性、强耦合、非线性、大滞后等特点，采用了多项先进控制算法。同时，采用“分层式”分布式智能管控模式，实现了现场控制层与智能优化控制层的分离。

在智能运行优化控制系统设计中，将以提高锅炉效率和降低碳排放为目标的各参数优化设定值分为主参数和辅助参数两大类。主参数包括：炉膛负压、排烟温度、排烟含氧量、飞灰含碳量、炉膛温度等；辅助参数包括：锅炉效率、空预器出口风温、燃烧器喷口火焰中心位置等。辅助参数的智能优化设定值可根据锅炉运行工况和机组负荷变化情况进行实时调整。

（三）应用效果

智能运行优化控制系统完成了从设计到调试全过程的验证及考核工作，该系统实现了从锅炉燃烧调整到机组运行调整的全过程智能化控制。在此基础上，通过在现场建立在线模拟测试平台和实际机组运行数据采集系统，进行了锅炉燃烧过程控制试验和热工模拟试验。结果见表1。试验结果表明：智能优化控制系统可显著提高锅炉燃烧效率和机组运行稳定性。

表1应用效果

指标类别	具体指标	优化前	优化后	提升效果	备注
锅炉燃烧效率	锅炉热效率（%）	85.5%	88.2%	+2.7%	通过燃烧优化控制，锅炉效率显著提升，达到最佳值。
机组运行稳定性	主蒸汽压力波动范围（MPa）	±0.15	±0.05	稳定性提升	主蒸汽压力波动范围显著缩小，运行更加稳定。
	主蒸汽温度波动范围（℃）	±5	±2	稳定性提升	主蒸汽温度波动范围显著缩小，运行更加稳定。
经济性指标	供电煤耗（g/kWh）	310	298	-12g/kWh	通过智能优化控制，供电煤耗降低，经济性显著提升。
	厂用电率（%）	6.2%	5.8%	-0.4%	厂用电率降低，进一步提高了机组的经济性。
智能化控制效果	燃烧调整响应时间（秒）	120	60	-60秒	燃烧调整响应时间缩短，控制更加迅速精准。
	主参数调整准确率（%）	85%	95%	+10%	主参数（如压力、温度）调整准确率显著提高。
环保指标	氮氧化物排放浓度（mg/m ³ ）	150	120	-30mg/m ³	燃烧优化控制降低了氮氧化物排放，环保效益显著。
	二氧化碳排放量（吨/年）	500,000	480,000	-20,000吨/年	通过优化燃烧，二氧化碳排放量减少，助力绿色低碳发展。
示范作用	智能化改造覆盖率（%）	-	100%	全面覆盖	该项目为国家能源集团大型火电机组智能化改造提供了新模式，具有示范作用。

智能运行优化控制系统投运后，取得了良好的效果。根据负荷需求及时调整主参数和辅助参数实现机组高效经济运行；通过燃烧优化控制使锅炉效率得到提升并达到最佳值；通过智能优化控制系统在现场大量运行数据的基础上实现了对锅炉燃烧系统的准确调节，提高了锅炉效率并达到最佳值，该项目对新能源发电企业进行智能化改造具有重要的示范作用，为国家能源集团大型火电机组智能化改造提供了新的模式。

五、结语

热电厂 DCS 热控自动化技术的智能应用，在保证生产安全

的前提下，实现了机组运行过程中的优化和精细化管理，实现了运行效率、安全保障和经济性提升的目标，为企业创造了可观的经济效益和社会效益。随着技术的进步，热电厂 DCS 热控自动化技术的智能应用将进一步扩展到其他领域，同时将结合 AI、云计算、大数据等新一代信息技术，促进热电厂生产运营模式向智能化方向转变，为企业实现高质量发展提供助力。

参考文献

- [1] 关大祥, 韩阳光. DCS 热控自动化安装调试要点 [J]. 河南建材, 2020(11): 159-160.
- [2] 徐勇. 对于火电厂 DCS 热控自动化安装调试探究 [J]. 电子测试, 2019(22): 105-106.
- [3] 褚云山, 邵毅, 宋胜军, 等. DCS 热控保护系统可靠性评估 [J]. 东北电力技术, 2020, 41(10): 30-32.
- [4] 邢智成. 电厂热控 DCS 控制保护回路误动作原因与处理措施研究 [J]. 电力设备管理, 2024(21): 67-69.
- [5] 武学华. 火电厂热工自动化 DCS 控制系统及应用分析 [J]. 中国科技纵横, 2024(23): 52-54.
- [6] 苏中. 冶金余热发电机组 DCS 控制系统的设计与实现 [D]. 江苏: 南京理工大学, 2021.
- [7] 杨潇. 基于 DCS 的烧结余热回收发电控制系统分析 [J]. 山西冶金, 2023, 46(3): 239-240.
- [8] 丁岫, 肖泽华. 电厂热工控制中 DCS 系统管理维护分析 [J]. 今日自动化, 2023(2): 161-163.
- [9] 刘潇, 葛举生, 郁强, 等. 基于自主可控 DCS 的火电机组再热蒸汽温优化控制系统研究与应用 [J]. 工业控制计算机, 2024, 37(4): 15-17.
- [10] 李福军, 轩福杰, 史春方, 等. 一种基于和利时 DCS 的热电厂母管制锅炉负荷分配的优化控制方法 [J]. 自动化博览, 2022(8): 88-90.

数字化转型背景下电力营销业务实践

王巧霞

身份证号码: 6422211986****412X

摘要： 随着信息技术的迅速发展和数字化转型的深入推进，电力行业正面临着巨大的变革。数字化转型不仅提升了电力公司的运营效率，还为电力营销业务带来了新的机遇与挑战。本文旨在探讨数字化转型对电力营销业务的影响，分析电力企业如何通过数字化手段提升服务质量，优化客户体验，以及实现精准营销，从而增强市场竞争力。通过对典型案例的分析，本文进一步探讨了数字化转型在电力营销中的实践应用，并提出了未来发展的方向。

关键词： 数字化转型；电力营销；客户体验；精准营销；智能化

Power Marketing Business Practice under the Background of Digital Transformation

Wang Qiaoxia

ID: 6422211986****412X

Abstract： With the rapid development of information technology and the deepening of digital transformation, the power industry is facing great changes. Digital transformation not only improves the operating efficiency of power companies, but also brings new opportunities and challenges for power marketing business. This paper aims to discuss the impact of digital transformation on power marketing business, analyze how power enterprises can improve service quality, optimize customer experience, and achieve precision marketing, so as to enhance market competitiveness. Through the analysis of typical cases, this paper further discusses the practical application of digital transformation in power marketing, and puts forward the future development direction.

Keywords： digital transformation; electric power marketing; customer experience; precision marketing; intelligence

引言

在数字化时代的背景下，传统电力行业面临着前所未有的挑战和机遇。尤其是在电力营销业务中，如何利用数字化技术提升运营效率、优化服务质量和实现精准营销成为行业发展的关键。电力企业需要借助大数据、云计算、物联网等新兴技术，推动电力营销模式的转型升级。本文将结合当前电力营销业务的实践，探讨数字化转型的实施路径和取得的效果。

一、数字化转型对电力营销的影响

（一）数字化转型提升电力营销的效率

数字化转型使得电力公司能够通过大数据和人工智能技术分析用户需求和电力供应，优化营销策略和运营效率。通过精确的需求预测和实时数据监控，电力公司可以提前调整电网负荷，避免电力资源的浪费。例如，通过实时数据分析，某电力公司能够监控到居民区的用电波动，并通过自动化系统调整电力供应，确保电力充足且不浪费。此举不仅提高了电力公司运作的灵活性和效率，也降低了运营成本，从而提升了整体的服务效能。

（二）数字化技术助力客户体验提升

数字化转型通过智能平台、移动应用和自助服务系统，使得电力公司能够更好地服务客户，提高用户体验^[1-3]。例如，通过智

能电表和手机应用，客户可以实时查看电量使用情况、预测下月电费，增加了用户对电力消费的透明度。这种实时的互动反馈使客户能够更主动地管理自身的用电行为，提升了客户满意度。通过这些创新服务，电力公司能够获得更多的用户数据，进一步优化产品和服务，使其更加个性化和精准，从而增强客户的忠诚度和品牌认同感。

（三）数字化转型推动精准营销

数字化转型使电力公司能够利用大数据分析、人工智能和机器学习等技术，对客户进行细分，开展精准营销。通过收集和大量客户的用电数据，电力公司可以识别出高用电量、低用电量等不同用户群体，并根据每个群体的特征推送定制化的营销策略。例如，某电力公司通过分析用户历史用电数据，针对高峰时段用电量大的客户推出了差异化的电费优惠方案，从而提高了客

户的参与度和电力消费的积极性^[4-6]。此外，精准营销还能够为电力公司提供更为有效的营销预算分配，提升整体销售效果，见表1。

表1:数字化转型推动精准营销

项目	详情
技术手段	大数据、AI、机器学习
客户细分	依用电数据分高、低电量群体
营销实例	针对高峰高电量客户推电费优惠
营销效果	提升客户参与及消费，优化预算分配

二、电力营销中的数字化转型实践

（一）大数据与人工智能在电力营销中的应用

大数据与人工智能技术在电力营销中的应用，推动了营销决策的智能化。例如，某电力公司通过分析用户的用电数据，发现某些区域在夏季空调负荷高峰期电力需求急剧增加^[7]。通过人工智能算法，电力公司能够预测高峰期的电力需求，并提前进行电网调度，从而避免了可能发生的电力短缺。此外，人工智能技术还被广泛应用于客户服务中，例如，某电力公司利用智能客服机器人，能处理超过80%的常见用户问题，有效减少了人工客服的工作量，提升了服务效率和客户满意度。

（二）云计算技术在电力营销中的应用

云计算技术在电力营销中的应用，帮助电力公司提升了数据处理能力和跨部门协作效率。例如，某电力公司利用云平台集成了市场分析、客户服务、设备管理等多个系统，并实现了实时数据同步。这使得不同部门能够基于最新的数据做出及时决策，提升了整个企业的运营效率。在营销方面，云计算使得电力公司能够通过云平台对客户行为进行分析，从而推出个性化的用电服务。例如，云平台的数据分析帮助用户识别出一批高用电量用户，进而为他们提供定制化的节能方案，帮助用户降低能源费用的同时，提高了公司的客户忠诚度。

（三）物联网技术推动电力营销的智能化

物联网技术在电力营销中的应用促进了智能化服务的发展，尤其是在智能电表和智能家居的普及中发挥了重要作用^[8]。通过部署智能电表，电力公司能够实时监测用户的用电情况，收集更精确的数据。例如，某电力公司通过物联网技术实施了智能电网项目，在特定区域部署了智能电表，能够实时监控用电数据，发现异常用电情况。通过这种方式，电力公司不仅能够及时识别潜在的用电故障，还能向用户提供实时的用电建议。例如，如果用户的用电量出现异常波动，系统会自动向用户推送节能方案，帮助用户调整用电习惯，避免不必要的浪费。

三、数字化转型中的挑战与解决方案

（一）技术实施的难度

尽管数字化转型带来了巨大的潜力，但在实施过程中，电力公司仍然面临着技术更新与人员培训的挑战。例如，某些电力公司在引入大数据和人工智能技术时，遇到了数据集成难、技术开发周期长等问题。电力公司需要投入大量的资金和时间进行技术的调试和员工的培训，以确保新技术的顺利实施。为了解决这一问题，部分公司采取了与技术供应商合作的策略，共同开发符合公司业务需求的技术解决方案^[9]。例如，某电力公司与国内领先的人工智能企业合作，共同开发了基于机器学习的电力需求预测

模型，该模型能够通过分析历史数据预测用户未来的用电需求，从而帮助电力公司更有效地管理电力供应。

（二）用户隐私保护问题

在数字化转型过程中，电力公司大量采集并处理用户数据，这可能引发隐私保护问题。例如，某些用户对其用电数据的收集和存储持谨慎态度，担心自己的个人信息被滥用或泄露。为了保护用户隐私，电力公司需要遵循《个人信息保护法》及其他相关法律法规，确保数据的采集、存储和使用符合安全标准。例如，某电力公司建立了多重数据加密系统，并通过区块链技术确保用户数据在传输过程中的安全性。此外，电力公司还采取了透明的隐私政策，向用户明确告知数据采集的目的和使用方式，从而增加用户的信任度和参与度。

（三）数据共享与合作的障碍

数据共享在数字化转型中扮演着关键角色，但由于利益分配和数据安全等问题，电力公司在与其他企业进行数据共享时常面临障碍^[10]。例如，在与第三方企业合作推广智能家居服务时，电力公司与设备制造商在数据共享方面存在分歧，后者担心数据的泄露会影响到自己的商业机密。为了突破这一瓶颈，部分电力公司采取了加强与合作伙伴的沟通和建立标准化数据接口的措施。例如，某电力公司与智能家居企业共同创建了一个开放的合作平台，通过该平台，双方可以在确保数据安全的前提下共享实时电力数据和用电模式，从而为用户提供更加智能化的用电服务，推动了数字化转型的顺利推进。

四、结论

数字化转型为电力营销业务带来了深刻的变革，不仅提高了运营效率，也促进了客户体验的提升。通过大数据、云计算、人工智能和物联网等技术的应用，电力公司可以实现精准营销和智能化服务，增强市场竞争力。然而，数字化转型过程中也面临技术难题、数据安全和合作障碍等挑战。为此，电力公司应加强技术投入、保护用户隐私、促进数据共享与合作，从而在未来的发展中不断优化和提升电力营销的整体水平。

参考文献

- [1]董湘清,刘灵恺,廖然,等.电力营销业务中应用数字化管理的探究[J].电工技术,2024,(S2):331-333.
- [2]宋婷.浅谈“互联网+”电力营销服务渠道数字化精准运营分析[J].网络安全和信息化,2024,(12):23-24.
- [3]张强.基于数字化技术促进电力营销发展探析[J].电力设备管理,2024,(22):279-281.
- [4]曲晓轩,王晶晶.新时期数字化技术在电力营销的应用探究[J].大众标准化,2024,(15):137-139.
- [5]李敏,张宾.数字化技术在电力营销中的创新应用[J].集成电路应用,2024,41(07):200-201.
- [6]范雅舒,徐鸣灿.数字化技术在电力营销中的应用[J].电子技术,2024,53(05):136-138.
- [7]廖晓云,尚朔南.数字化转型在电力营销中的影响分析[J].集成电路应用,2024,41(04):346-347.
- [8]苏海军,刘晓煜,侯应龙,等.基于挖掘技术的电力营销客户档案数字化管理[J].微型电脑应用,2024,40(03):217-220.
- [9]范博韬.电力营销数字化稽查监控体系建设分析[J].网络安全和信息化,2024,(03):21-22.
- [10]沈博星.数字化电力营销与监管模式的创新实践[J].集成电路应用,2023,40(12):316-317.

光伏电站设备管理与改造研究

李红超

华电（海西）新能源有限公司，青海 海西 817000

摘 要： 本文以某典型光伏电站为案例，针对光伏电站设备问题，研究提出了一套管理改造的综合技术路径。通过实时监测、智能诊断和精准调控，提升设备运行稳定性和系统协同性。实地测试验证表明，改造方案对组件隐裂修复、储能效率提升及并网谐波优化效果显著，为复杂气候条件下光伏电站数字化与智能化运维提供了系统化技术支持。

关 键 词： 光伏电站；设备管理；设备改造

Research on Photovoltaic Power Station Equipment Management and Transformation

Li Hongchao

Huadian (Haixi) New Energy Co., LTD. Haixi, Qinghai 817000

Abstract： This paper takes a typical photovoltaic power station as a case, aiming at the problem of photovoltaic power station equipment, research and puts forward a set of comprehensive technical path of management transformation. Through real-time monitoring, intelligent diagnosis and precise regulation, the equipment operation stability and system coordination are improved. The field test and verification show that the transformation scheme has a significant effect on module hidden crack repair, energy storage efficiency improvement and grid connection harmonic optimization, and provides systematic technical support for the digitalization and intelligent operation and maintenance of photovoltaic power stations under complex climate conditions.

Keywords： photovoltaic power station; equipment management; equipment transformation

引言

全球能源结构的转型和环境保护要求不断提高，光伏电站的高效管理直接关系到能源的利用率和经济效益^[1]。然而，高沙尘、高温环境导致光伏电站组件衰减、逆变器过载保护频发，并网性能退化，传统运维方式难以解决。本文以某光伏电站为案例，研究组件隐裂修复、储能效率优化、并网调节和智能管理技术路径，提升设备性能和系统稳定性，支撑复杂环境下的高效运行^[2]。

一、案例概况

某典型光伏电站，装机容量52.35MWp，占地85.27公顷，位于年均水平面太阳辐照量1,789.52kWh/m²的地区，投运于2020年3月。采用单晶硅组件与组串式逆变器，组件初始转换效率19.45%，逆变器满载效率98.27%。运行多年后，光伏组件功率衰减率平均0.89%/年，发电量从81,245.36MWh下降至75,428.89MWh，降幅7.17%。部分组件隐裂导致衰减率超1.05%/年。逆变器效率下降至96.84%，高温环境中频繁触发过载保护，影响并网性能，功率因数响应延迟超出设计标准15.82ms。储能系统容量5.28MWh，运行效率89.64%，并网系统高峰负载功率损耗达4.18%，灵活性不足。当前管理方式依赖人工巡检与定期维护，缺乏实时监测与智能化分析能力，导致故障排查效率低，运维成本高。

二、光伏电站设备管理与改造的方法

光伏电站设备管理与改造以提升运行效率和设备性能为目标，围绕组件检测与修复、储能与并网优化、智能化管理和环境适应性改造展开，形成覆盖全系统的综合方案。在组件管理方面，通过高精度影像技术对隐裂区域进行精准定位，并结合修复与更换措施，成功恢复组件发电能力。同时，逆变器性能优化重点放在改进功率因数控制和散热设计，以此在满载与高温环境下显著提升运行稳定性。针对储能与并网系统，改造方法采用模块化升级和充放电调控策略，不仅优化了能量流转效率，还有效减少了峰值负载的功率损耗。而并网系统通过动态调节技术，进一步优化了功率流与谐波控制，从而提升了负载适应性和并网稳定性。

此外,智能化管理依托实时数据采集和分析技术,能够全面监测设备状态,快速诊断潜在故障,并自动生成优化的维护计划,从而实现运行效率的动态调整。而在环境适应性方面,通过表面防护与清洁技术减少了沙尘对设备的影响,同时改进散热策略,确保设备即使在高温工况下依然能够保持稳定运行。最后,数字化管理通过整合各模块运行数据,建立全系统的闭环控制。借助实时性能分析与调度优化,旨在提升光伏电站的运行协同性与管理效率。

三、设备管理与改造的关键技术路径

(一) 光伏组件与逆变器的优化技术

光伏组件与逆变器的优化技术以恢复发电能力和提升效率为目标,针对组件功率衰减率0.89%/年、隐裂衰减超1.05%/年及逆变器效率降至96.84%的问题,通过精准检测、硬件升级与算法优化形成闭环技术路径。光伏组件优化依托EL(电致发光)检测技术,采用EC120型便携式EL成像系统,分辨率达0.1mm,精准识别隐裂分布。隐裂导致的功率损失计算公式为:

$$P_{loss} = k \cdot A_{crack} \cdot \eta_{comp} \quad (1)$$

其中, P_{loss} 为功率损失,k为裂隙效应系数, A_{crack} 为裂纹面积, η_{comp} 为组件效率。根据裂纹级别,采用导电胶修复轻微裂纹,加装旁路二极管隔离中度裂纹区域,对于严重裂纹组件实施替换,选用23.2%转换效率的PERC单晶硅组件,整体提升发电性能。逆变器优化从硬件与控制算法两方面展开。主功率模块更换为高效IGBT模块,主控电路升级至DSP控制芯片,显著提升功率转换性能与控制响应速度。功率因数控制算法通过引入自适应补偿模块,根据负载实时调整输出参数,将响应延迟优化至10ms以内。逆变器的功率因数调整遵循:

$$Q = P \cdot \tan(\phi) \quad (2)$$

其中,Q为无功功率,P为有功功率, ϕ 为功率因数角。通过动态优化算法降低 ϕ 值,实现无功功率最小化。同时,散热系统升级为液冷结构,散热效率较传统风冷提升30%以上,所有监测数据上传至数字化管理平台进行实时分析,形成动态反馈与优化闭环。

(二) 储能与并网系统改造技术

储能与并网系统改造聚焦提升运行效率和功率调节能力,针对储能系统效率89.64%、并网功率损耗4.18%的问题,实施硬件升级和控制算法优化。该系统采用新型CATL LFP电池模块替换老化单元,提升能量密度与循环寿命。充放电控制引入动态功率调度算法,结合双向DC/DC变换器实现高效能量流转。SOC状态监控通过集成式BMS(电池管理系统),精确跟踪剩余电量并优化充放电路径,提升储能效率,公式如下:

$$\eta_{storage} = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (3)$$

其中, $\eta_{storage}$ 表示储能效率, P_{out} 为储能系统输出功率, P_{in} 为输入功率。通过优化充放电路径,减少能量转换中的损耗,确保输出功率接近输入功率。并网系统升级至三电平IGBT拓扑逆变器,改善谐波抑制性能。功率流管理采用分布式EMS(能量管理系统),动态分配负载,优化功率调节逻辑。电能质量通过引入APF(有源滤波器)显著降低谐波畸变,增强并网稳定性。功率

损耗优化由以下公式量化:

$$P_{loss} = \frac{I^2 R}{P_{total}} \quad (4)$$

其中, P_{loss} 表示总功率损耗,I为逆变器输出电流,R为电网阻抗, P_{total} 为系统总输出功率。通过精确调节逆变器输出电流与负载分配,减少峰值负载引起的功率损耗。

(三) 智能化管理与故障诊断技术

智能化管理与故障诊断技术通过高精度硬件与AI算法融合,实现光伏电站设备状态的实时监测与精确诊断^[3]。项目中部署了基于Keysight N8700系列电压电流传感器和DJI Matrice 300无人机搭载的热成像模块,采集组件与逆变器的电压、电流、温度和功率因数数据,每分钟采集一次,确保数据覆盖的全面性与时效性。所有采集数据均使用TensorFlow 2.0构建的深度学习故障诊断模型进行在线分析。

数据采集从组件和逆变器的关键运行参数开始,包括单体组件电压偏差、功率因数下降幅度以及逆变器热斑分布等异常指标^[4]。通过Matrice 300无人机搭载的Zenmuse XT2热成像设备快速识别组件

```
import numpy as np
import pandas as pd
from sklearn.ensemble import RandomForestClassifier
from sklearn.model_selection import train_test_split
from sklearn.metrics import classification_report

# 数据加载与预处理
data = pd.read_csv("sensor_data.csv") # 假设传感器数据文件
X = data[['voltage', 'current', 'temperature', 'power_factor']] # 输入特征
y = data['fault_type'] # 故障类型标签

# 数据分割
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.2, random_state=42)

# 模型训练
model = RandomForestClassifier(n_estimators=100, random_state=42)
model.fit(X_train, y_train)

# 模型评估
y_pred = model.predict(X_test)
print(classification_report(y_test, y_pred))

# 故障预测
new_data = np.array([[230.5, 10.1, 35.5, 0.95]]) # 新采集数据
fault_prediction = model.predict(new_data)
print(f"Predicted fault type: {fault_prediction[0]}")
```

图1: 故障诊断代码

隐裂或热点问题,将定位误差控制在0.1m内。

诊断过程使用基于随机森林和卷积神经网络(CNN)的混合模型。随机森林负责初步筛选明显的故障模式,以下为诊断过程的代码实现:

(四) 环境适应性改造技术

环境适应性改造技术针对高沙尘和高温环境对光伏电站设备的影响,重点优化组件抗沙尘能力与散热性能^[5]。

(1) 抗沙能力

抗沙尘改造采用3M Solar Dust-Guard涂层技术,在组件表面形成疏水防沙保护膜,减少沙尘积聚,降低清洁频率,同时保护组件表层玻璃不受沙尘侵蚀。结合KUKA KR Agilus机器人组成的自动化清洁系统,每两周自动完成组件表面清理,提高发电效率和运维效率。清洁系统具备路径优化功能,可精准识别组件表面污染程度,动态调整清洁压力和覆盖范围,确保高效清理。

(2) 散热方面

散热改造针对高温引发的逆变器过载问题,采用CoolFlow液冷散热系统替代传统风冷方案,散热效率提升30%以上。液冷系统集成Schneider RTG-20泵组和高效传热材料,实时调控液冷循环速度以适应负载变化,并在高温区域采用增强型散热片设计,确保逆变器在峰值负载时仍保持稳定运行。

环境适应性技术中还引入MeteoShield PRO气象监测站,实时监控环境温度、湿度和风速,将数据上传至数字化管理平台。平台通过算法分析预测沙尘暴或高温事件,提前调整清洁频率与散热策略,减少环境极端变化对设备性能的冲击。

(五) 设备管理系统的数字化与集成化

设备管理系统基于AWS IoT Core云平台,整合光伏组件、逆变器、储能与环境监测模块,实现全局监控与智能调度。高精度传感器网络实时采集电压、电流、温度、功率因数等数据,通

过无线通信模块上传云端处理^[6]。系统采用 Hadoop 大数据框架与 TensorFlow 2.0 AI 模型进行数据预处理与趋势预测，结合分布式 EMS（能量管理系统）优化储能与并网功率分配。

平台通过 API 接口集成组件监测系统、逆变器控制模块和环境适应系统。实时数据经分析生成综合报告，使用 Grafana 展示动态仪表盘。系统效率由以下公式量化：

$$R_{sys} = \frac{\sum_{i=1}^N \eta_i \cdot w_i}{\sum_{i=1}^N w_i}$$
 (5)

其中， R_{sys} 表示系统效率， η_i 为模块运行效率， w_i 为其权重。平台根据公式分析瓶颈，动态调整运行策略。故障诊断模块融合历史与实时数据，通过 AI 自适应模型识别问题，自动生成维护计划并向调度模块发送优化指令，确保在高负载或极端气候条件下的系统稳定性。

四、改造方案实地测试

(一) 测试步骤

实地测试围绕光伏组件与逆变器优化、储能与并网系统改造、智能化管理与环境适应性提升四个关键点展开，采用精密设备和先进技术对改造方案进行全方位验证，确保改造后的系统性能达到预期目标^[7]。

(1) 组件与逆变器的性能验证

通过 EC120 型 EL 成像系统检测组件隐裂，按轻微、中度、严重分级处理，分别采用导电胶修复、旁路二极管隔离和 PERC 组件替换。逆变器测试采用三电平 IGBT 拓扑结构结合 CoolFlow 液冷散热系统，在满载条件下测功率因数响应与散热效率，监测运行温升与电流波动。

(2) 储能与并网系统的测试

通过验证充放电效率与电网谐波优化效果展开。储能模块采用 CATL LFP 电池，结合动态功率调度算法测试能量流转效率与 SOC 状态监控。并网系统通过 APF 有源滤波器优化电网谐波，结合分布式 EMS 调控负载动态，记录峰值损耗与谐波含量。

(3) 智能化管理测试

部署 Keysight N8700 传感器与 DJI Matrice 300 无人机，搭载热成像设备采集数据，上传至 AWS IoT Core 云平台。通过 TensorFlow 2.0 AI 模型分析组件热斑与逆变器异常，验证故障分类与调度模块的响应效率。

(4) 环境适应性测试

评估 3M Solar Dust-Guard 涂层抗沙尘性能，结合 KUKA KR Agilus 机器人清洁效率测试积尘速率与光透过率。高温测试采用 CoolFlow 液冷散热系统，记录逆变器温升与循环散热性能。所

有数据通过 LabVIEW 2023 平台和 Grafana 仪表盘整合分析，验证系统集成与协同优化能力^[8]。

(二) 测试结果

测试结果表明，各模块协同优化显著，组件隐裂检测精度 0.10mm，裂纹面积减少率 68.25%，功率恢复率 95.34%。逆变器功率因数响应延迟降至 9.47ms，满载温升降至 38.56℃。储能系统充放电效率提升至 93.87%，SOC 误差范围缩小至 ± 0.95%。并网系统峰值功率损耗降至 2.67%，谐波畸变率降至 3.82%。智能诊断故障检测时间 2.36s，调度响应时间 1.94s。光透过率降低率降至 2.85%，清洁周期缩短至 14d，散热效率提升 31.28%。数据传输速率 1.82MB/s，实时性能分析时间 1.23s，详细测试数据见下表 1：

表 1：测试结果

测试项目	测试参数	原始数据	改造后数据	优化提升幅度 (%)
组件隐裂检测与修复	检测精度 (mm)	无	0.1	-
	裂纹面积减少率 (%)	无	68.25	-
	功率恢复率 (%)	无	95.34	-
逆变器性能验证	功率因数响应延迟 (ms)	15.82	9.47	40.12
	满载温升 (℃)	65.23	38.56	40.89
储能充放电效率	充放电效率 (%)	89.64	93.87	4.72
	SOC 误差范围 (%)	± 3.20	± 0.95	70.31
并网性能优化	峰值功率损耗 (%)	4.18	2.67	36.13
	谐波畸变率 (THD, %)	7.56	3.82	49.47
智能诊断与调度	故障检测时间 (s)	无	2.36	-
	调度响应时间 (s)	无	1.94	-
环境适应性测试	光透过率降低率 (%)	12.47	2.85	77.15
	清洁周期 (d)	30	14	53.33
	散热效率提升 (%)	无	31.28	-
系统集成与效率验证	数据传输速率 (MB/s)	无	1.82	-
	实时性能分析时间 (s)	无	1.23	-

五、结语

本文针对案例中的问题提出组件优化、储能与并网改造、环境适应性和数字化管理方案。组件裂纹检测精度达 0.10mm，储能效率提升至 93.87%，并网谐波畸变率降至 3.82%，光透过率降低率至 2.85%。测试验证改造后设备协同优化和数字化管理的闭环效果，方案具备工程推广价值。

参考文献

[1] 杨朝许, 张琛, 李利丹, 王鑫. 并网光伏电站支架基础对比研究 [J]. 智能建筑与工程机械, 2023.
[2] 张磊, 叶海瑞, 柏嵩. 能源互联网之智能光伏电站建设及运维分析 [J]. 华东科技, 2023(6): 128-130.
[3] 席凯, 黄国珍, 冯榆坤, 等. 水面光伏电站环境载荷数值预报方法研究 [J]. 水力发电学报, 2023, 42(1): 148-158.
[4] 冯星. 光伏电站建设及运行质量安全问题及对策 [J]. 中国高新科技, 2023, (18): 23-24+27.
[5] 陈俊宇, 王建华, 蔡福祿. 某光伏电站全站跳闸原因分析及处理对策 [J]. 云南水力发电, 2023, 39(6): 195-198.
[6] 尹江红, 卢锦力. 光伏电站 110KV 横山变继电保护整定计算 [J]. 电脑知识与技术: 学术版, 2020, 16(11): 4.
[7] 杨旭. 光伏电站汇流箱通信无线传输技术的研究及应用 [J]. 电力设备管理, 2023(23): 134-136.
[8] 杨建卫, 张宝, 曹晟磊. 基于云平台的光伏电站能量流测试系统的设计与应用 [J]. 太阳能, 2023(4): 59-65.

定向钻敷设 10kV 电缆的设计与工程实践

唐小华

广东省第一建筑工程有限公司，广东 广州 510010

摘 要： 本文深度聚焦 10kV 直埋电缆的定向钻敷设技术，对定向钻机选型、轨迹规划、泥浆配比、电缆输送机适配、直埋电缆选型、电缆机械防护以及电缆绝缘电阻监测等关键技术环节展开深入剖析。通过理论研究与实际工程案例相结合的方式，为提升定向钻敷设 10kV 直埋电缆工程的质量与安全性提供详尽参考，从而有力保障电缆线路的稳定可靠运行。这不仅显著简化了施工流程，降低工程成本，而且减少因保护管带来的潜在故障风险，为 10kV 直埋电缆敷设的可靠性与经济性提供了全新的思路与解决方案。本文创新点：采用电缆直接加拖的定向钻敷设电缆，减少了回拖保护管的环节。

关 键 词： 定向钻；10kV 直埋电缆；设计；工程实践

Design and Engineering Practice of Directional Drilling Installation of 10kV Cables

Tang Xiaohua

Guangdong No.1 Construction Engineering Co., Ltd. Guangzhou, Guangdong 510010

Abstract： This paper focuses deeply on the directional drilling installation technology of 10kV directly buried cables. It conducts in-depth analyses of key technical aspects such as the selection of directional drilling rigs, trajectory planning, mud proportioning, adaptation of cable conveyors, selection of directly buried cables, mechanical protection of cables, and monitoring of cable insulation resistance. By combining theoretical research with practical engineering cases, it provides a detailed reference for improving the quality and safety of the project of installing 10kV directly buried cables by directional drilling, thus effectively ensuring the stable and reliable operation of the cable lines. This not only significantly simplifies the construction process and reduces engineering costs, but also reduces the potential failure risks caused by protective pipes, providing new ideas and solutions for the reliability and economy of 10kV directly buried cable installation. The innovation of this paper lies in the use of direct cable pulling during directional drilling installation, reducing the step of pulling back the protective pipe.

Keywords： directional drilling; 10kV directly buried cable; design; engineering practice

引言

随着城市建设规模的不断扩张以及各类现代化设施的日益增多，社会对电力供应的稳定性与可靠性提出了更为严苛的要求。10kV 直埋电缆作为城市配电网的关键组成部分，承担着向众多区域输送电能的重要任务，其敷设方式的合理选择直接关乎整个电力系统的运行效能。在众多电缆敷设技术中，定向钻敷设技术凭借其显著优势而得到广泛应用。该技术在施工过程中对周边环境的干扰极小，能够大幅降低对城市交通、绿化以及居民生活等方面的影响。与此同时，相较于传统敷设方式，其施工效率得以大幅提升，能够在较短时间内完成电缆敷设任务，有效缩短工程周期，降低建设成本，为城市电力基础设施建设提供了一种高效且环保的解决方案。^[1] 通过理论分析和实践验证，本文为定向钻敷设 10kV 电缆提供了系统的设计和施工指导，对推动该技术在电力供配电工程中的应用具有重要意义。

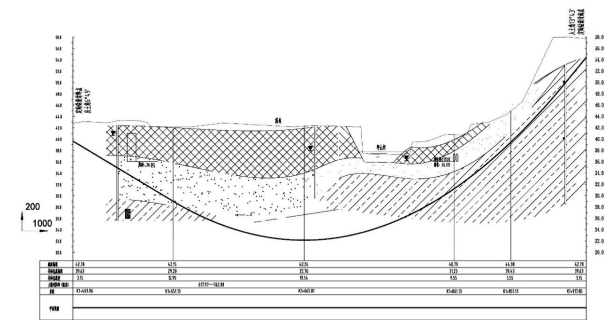
一、路径和轨迹设计

定向钻敷设 10kV 电缆的设计是整个工程的基础，需要综合考虑多方面因素。首先，路径选择是关键环节。设计人员需要仔细

勘察现场地形地貌，避开地下管线密集区、建筑物基础和其他障碍物。同时，要考虑电缆敷设后的运行维护便利性，尽量选择直线路径，减少转弯次数。在城市区域，还需协调相关部门，确保路径符合城市规划要求。

轨迹设计是定向钻敷设工程的核心环节之一，需设计时需要考虑电缆的最小弯曲半径、钻孔深度、进出钻角度等因素，同时要紧密结合施工现场的实际地形、错综复杂的地下管线分布状况以及既定的电缆线路规划进行精心谋划。钻孔直径应比电缆外径大30%~50%，以利于电缆敷设和后期维护^[2]。首先，入土点和出土点位置的确定至关重要，必须确保电缆线路严格符合城市电力规划布局要求，同时巧妙避开各类地下障碍物，如给排水管道、给排水管道以及其他通信线缆等。任何与现有地下设施的冲突都可能引发严重的安全事故，导致施工延误与成本增加。

入土角和出土角的设计需要遵循科学合理的原则，一般入土角控制在 $6^{\circ} \sim 20^{\circ}$ ，出土角控制在 $4^{\circ} \sim 12^{\circ}$ 。这一角度范围既能保证钻机在入土和出土过程中的平稳性与可操作性，使其顺利切入地下并安全钻出地面，又能有效降低对电缆产生的拉伸应力，避免电缆因过度受力而损坏内部结构。在穿越各类障碍物时，采用曲线轨迹设计是一种行之有效的方法。通过精确的数学计算得出合适的曲率半径，确保电缆在回拖过程中的弯曲程度在安全范围内，避免因过度弯曲导致绝缘层受损或导体断裂等问题。例如，在某市天然气高压调压站的10kV供电电缆敷设工程中，需穿坪山河和多条已建地下排水管线，通过精心设计曲线轨迹，成功避开了障碍物，且电缆回拖后各项性能指标检测均合格。



二、定向钻机选型

定向钻机的选型是定向钻敷设10kV直埋电缆工程的首要且关键的环节，需要全面、综合地考量多方面因素。工程地质条件是选型的基础依据，不同的地质特性对钻机性能有着显著不同的要求。例如，在粉质黏土等质地相对松软的地质环境中，土体的承载能力与抗剪强度较低，此时选用中小型定向钻机（如美国威猛 D24x40）便能满足施工需求。中小型钻机操作灵活性好，能够在狭窄的施工场地内自由移动，精准定位钻孔位置。而且，其能耗较低，设备成本也相对较低，能够有效削减施工开支^[3]。在某市天然气高压输配系统坪山调压站供电第二回路的电缆敷设工程中，跨越长度约454米，施工区域为粉质黏土地质，选用中型定向钻机后，施工成本相较于预期降低了约15%。而在岩石等坚硬地质区域，岩石的高强度与高硬度给钻进工作带来极大挑战，必须依靠大功率、高扭矩的定向钻机（如徐工 XZ5000）。这类钻机配备了强大的动力输出系统与坚固耐用的钻具，能够在岩石层中稳定钻进，确保施工顺利推进。

此外，穿越距离与管径大小也是影响钻机选型的重要因素。穿越距离越长，对钻机的持续工作能力与推进系统性能要求就越高；管径越大，则需要更大的扭矩与推力来带动钻具旋转与推进。在实际工程中，钻机导向系统的精度同样不容忽视。配备高精度陀螺仪和地磁传感器的先进导向系统，能够实时、精准地监测钻孔轨迹偏差。通过与预设轨迹进行对比分析，及时发出调整指令，确保钻孔始终沿着设计路线前行，从而大幅提高电缆敷设的准确性。在某市天然气高压输配系统坪山调压站供电第二回路的电缆敷设穿越坪山河电缆敷设项目中，由于穿越距离长且对精度要求极高，采用配备先进导向系统的定向钻机，成功将钻孔轨迹偏差控制在极小范围内，保证了电缆敷设的高质量完成。钻杆采用直径89mm，完成导向孔后不需扩孔即可回拖。

三、泥浆配制

泥浆在定向钻施工中起着举足轻重的作用，具备护壁、携渣、润滑和冷却钻头四大核心功能。泥浆配方并非一成不变，需要依据不同的地质条件进行灵活、精准的调整。在黏土质地的施工区域，黏土本身具有一定的黏性和可塑性，此时可适当减少膨润土的用量，同时增加降失水剂。降失水剂能够有效控制泥浆在钻进过程中的失水现象，防止因失水过多导致泥浆性能恶化，影响护壁效果。例如，在某黏土含量较高的区域施工时，通过调整泥浆配方，减少了20%的膨润土用量，并添加适量降失水剂，泥浆的失水性能得到了良好控制，护壁效果显著提升^[4]。

而在砂土等颗粒松散的地质条件下，由于砂土的稳定性较差，易发生坍塌，因此需要增加膨润土的含量，提高泥浆的黏度和切力。较高的黏度和切力能够使泥浆在钻孔壁形成一层坚固的泥皮，增强护壁效果，防止孔壁坍塌。常用的泥浆添加剂羧甲基纤维素（CMC）和聚丙烯酰胺（PAM）在改善泥浆性能方面发挥着重要作用。CMC能够有效提高泥浆的黏度和稳定性，PAM有助于增强泥浆的絮凝性能，提高携渣能力。

在实际施工中，泥浆的密度和黏度是关键性能指标，需要严格控制。泥浆密度一般控制在 $1.05 \sim 1.2 \text{ g/cm}^3$ ，在此密度范围内，泥浆既能有效支撑孔壁，又能保证良好的携渣效果。黏度控制在35~60s，合适的黏度可确保泥浆在钻孔内形成稳定的循环流动，实现高效的护壁、携渣与润滑功能。施工过程中，需要定期利用泥浆密度计、黏度计等专业检测设备对泥浆性能指标进行检测，根据检测结果及时调整泥浆配方，确保泥浆始终处于最佳性能状态，为施工的顺利进行提供坚实保障^[5]。

四、电缆输送机选型

电缆输送机在电缆回拖过程中承担着辅助牵引的重要职责，其核心作用是减轻电缆所承受的拉伸应力，确保电缆回拖过程的安全性及完整性。在选型时，需要综合考虑电缆的重量、直径以及回拖距离等关键因素。电缆的重量和直径直接决定了回拖过程中所需的牵引力大小，而回拖距离则影响着输送机的持续工作能

力与数量需求。

一般来说，对于10kV直埋电缆，选择输送能力为5~10kN的电缆输送机较为适宜。这一输送能力范围能够满足大多数10kV直埋电缆的回拖需求，既不会因输送能力过小而无法拖动电缆，也不会因过大而对电缆造成不必要的损伤。在输送机的布置方面，间距应保持均匀，使电缆在回拖过程中受力均匀，避免局部应力集中现象。尤其在电缆线路的转弯处，由于电缆在此处受到的弯曲应力较大，需要适当加密输送机的布置，为电缆提供额外的支撑与牵引，确保电缆在转弯过程中安全、平稳地回拖^[8]。

同时，为适应电缆回拖过程中速度和张力的动态变化，电缆输送机应配备先进的自动调速功能。该功能能够实时监测电缆的回拖速度与张力大小，当速度过快或张力过大时，自动调整输送机的运行速度与牵引力，保证电缆回拖过程的稳定性。例如，在某市燃气高压调压站穿越坪山河电缆敷设工程中，采用具备自动调速功能的电缆输送机，有效避免了因回拖速度不均导致的电缆损伤问题，提高了施工质量与效率。

五、直接回拖的电缆选型

直接回拖的电缆在选型时需要重点关注机械性能和绝缘性能两个方面，同时要考虑长期水泡的工作环境。在机械性能方面，电缆的外护套作为抵御外界机械损伤的首道防线，应选用高强度、耐磨损的材料。聚乙烯（PE）和聚氯乙烯（PVC）材料因其具有良好的物理机械性能，如较高的抗拉伸强度、耐磨性和耐腐蚀性，成为外护套材料的理想选择。这些材料能够有效承受回拖过程中地面摩擦力、岩石刮擦以及其他外力的作用，保护电缆的内部结构不受损坏。

绝缘层采用交联聚乙烯（XLPE）材料，XLPE材料以其卓越的电气绝缘性能、优异的热稳定性以及良好的化学稳定性而著称。在正常运行条件下，能够有效阻止电流泄漏，确保电能的高效传输；在高温等恶劣环境下，依然能够保持稳定的绝缘性能，保障电缆的安全运行。电缆的导体一般优先选用铜导体，铜具有较高的电导率，能够降低电能传输过程中的损耗，提高输电效率。^[7]同时，铜导体还具备良好的机械强度，能够承受电缆在敷设与运行过程中的拉伸、弯曲等机械应力。

在确定电缆的截面面积时，需要依据电缆的载流量要求进行合理选择。载流量是指在规定条件下，电缆导体能够连续承载且不致使其稳定温度超过规定值的最大电流。在正常运行和可能出现的过载情况下，必须确保电缆的温度不超过允许值。通过精确计算电缆的负载电流、环境温度、散热条件等参数，并结合电力工程电缆设计标准 GB50217-2018 和相关标准规范，选择合适的电缆截面面积，既能满足电力传输需求，又能保证电缆长期稳定运行，避免因过热引发安全事故。如在某市天然气高压输配系统某调压站供电按一级负荷考虑，计算负荷为800kVA，计算电流46.2A，南方夏季高温可能出现地表土壤温度达35℃，土壤热阻系数按最严峻考虑，经计算三芯铜芯电缆的载流量应不小于45.2A，结合 GB50217-2018，选25满足要求，并有一定的裕量。考虑到

地下水位较高，电缆可能经常水泡，外护层选用聚乙烯，考虑到定向钻直接回拖电缆的敷设方式，应选用粗钢丝铠装，并考虑防鼠蚁，综合以上因素，经计算选用 FSY-YJV33-10KV-3*25 的电缆，外径范围约为 48~52mm。^[8]

六、电缆机械防护

为有效防止电缆在回拖过程中遭受机械损伤，需要采取一系列全面且有效的防护措施。在电缆的外表面缠绕玻璃纤维增强塑料防护带是一种常用且有效的方法。玻璃纤维增强塑料防护带具有高强度、高模量以及良好的耐磨性和抗划伤性能，能够在电缆与地面、岩石等物体接触时，为电缆提供可靠的防护，减少因摩擦和刮擦导致的外护套破损。

在电缆与钻机钻杆的连接处，由于此处受力情况复杂，容易因受力不均而损坏电缆，因此安装专用的电缆保护套至关重要。保护套采用特殊的设计与材料制造，能够均匀分散连接处的应力，避免局部应力集中对电缆造成损伤。在穿越障碍物或地质条件复杂的区域时，在电缆周围设置保护套管是进一步增强电缆机械防护的重要手段。钢管或玻璃钢套管具有较高的强度和刚性，能够为电缆提供坚固的外部保护，有效抵御来自障碍物的挤压、碰撞以及复杂地质条件下的外力作用，确保电缆在回拖过程中的安全。例如，在某穿越坪山河的电缆敷设工程中，使用玻璃纤维增强塑料防护带缠绕电缆，成功避免了电缆因孤石刮擦而受损，保障了工程的顺利进行。^[9]

七、电缆绝缘电阻监测

在电缆敷设的全生命周期中，持续、有效地监测电缆的绝缘电阻是确保电缆运行安全的关键举措。在电缆敷设前，必须利用专业的绝缘电阻测试设备，对电缆进行全面的绝缘电阻测试。通过施加规定的直流电压，测量电缆绝缘层的电阻值。只有当绝缘电阻值符合相关标准规范要求时，方可判定电缆的绝缘性能良好，允许进行敷设施工。这一环节能够提前发现电缆在生产、运输过程中可能出现的绝缘缺陷，避免将有问题的电缆投入施工使用。

在电缆敷设过程中，引入在线监测系统能够实时、动态地监测电缆绝缘电阻的变化情况。一旦发现绝缘电阻出现异常下降趋势，系统立即发出警报信号，施工人员可迅速停止施工，深入查找原因。可能导致绝缘电阻下降的原因包括电缆外护套破损、绝缘层受潮、施工过程中的机械损伤等。^[10]针对不同的原因，采取相应的修复措施，如对外护套破损处进行修补、对受潮部位进行干燥处理等，确保电缆的绝缘性能恢复正常后再继续施工。

电缆敷设完成后，定期对电缆的绝缘电阻进行检测是保障电缆长期稳定运行的必要手段。建立完善的绝缘电阻数据库，详细记录每次检测的数据并进行分析。通过对数据的长期跟踪与对比，能够及时发现电缆绝缘性能的潜在变化趋势，提前预判可能出现的绝缘故障，为电缆的维护和检修工作提供科学依据，合理

安排维护计划，确保电缆始终处于良好的运行状态。

八、结论

定向钻敷设10kV直埋电缆的设计与工程实践涵盖了多个紧密关联、相互影响的关键环节。从定向钻机选型时对地质条件、穿越距离等因素的综合考量，到轨迹设计中对入土点、出土点的精心规划；从泥浆配制根据地质变化进行的精准调整，到电缆输送机选型与布置对电缆回拖安全的保障；从直接回拖直埋电缆选型对机械与绝缘性能的严格要求，到电缆机械防护措施全面实施以及电缆绝缘电阻监测体系的构建，每个环节都对工程质量和

电缆运行安全起着决定性作用。总的来说，定向钻直接回拖敷设10kV电缆技术为城市电网建设提供了一种创新解决方案，具有良好的应用前景。

通过合理选型、科学设计、严格施工和有效监测等一系列举措，能够确保定向钻敷设10kV直埋电缆工程顺利实施，显著提升电缆线路的可靠性和稳定性，为城市电力供应提供坚实有力的保障。然而，随着城市建设的不断发展与电力需求的持续增长，在未来的工程实践中仍需不断总结经验，积极引入新技术、新工艺，进一步优化设计与施工流程，以更好地适应日益复杂多变的电力建设需求，推动城市电力基础设施建设迈向更高水平。

参考文献

- [1]倪超；高庆有；刘月舟；赵刚；刘帅. 管道定向钻穿越登陆发生抱管应急处理方法 [J]. 石油和化工设备, 2024(12).
- [2]宋佳朋. 定向钻穿越中管道外防腐层的保护策略分析 [J]. 全面腐蚀控制, 2021(09).
- [3]游赞；刘俊；郎明春；钟一杰. 大直径长距离定向钻穿越管道回拖设计与施工 [J]. 石油工程建设, 2023(04).
- [4]王洁；詹川孟. 管道定向钻穿越弥缝技术及施工难点分析 [J]. 化工管理, 2017(13).
- [5]蒋静萍. 忠武管道48处定向钻穿越完工 [J]. 天然气工业, 2005(01).
- [6]李沁桢；邹复民；刘吉顺. 中型电动装载机驱动电机试验台研究 [J]. 工程机械, 2024(08).
- [7]孙慧莹；安鲁陵；任益；张琳琳. 机械传动系统电加载技术研究 [J]. 现代制造技术与装备, 2024(02).
- [8]李志杰；曾聪；杨善；董顺. 非开挖水平定向钻钻杆全尺寸疲劳试验研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2020(03).
- [9]张振芳. 减速器加载试验台的设计与研究 [J]. 计算机产品与流通, 2019(12).
- [10]徐源俊；黄晓艳；卢海林；滕飞. 装载机超越离合器可靠性试验台设计 [J]. 工程机械, 2016(05).

电力配电网工程建设管理研究

张哲岚

广州电力工程监理有限公司, 广东 广州 510000

摘 要： 由于配电线路分布较广，并且其具有较强的隐蔽性和分散性等特点，因此需要加强对配网工程施工质量进行有效控制。为确保电力传输的稳定与安全，需要加强配电网项目的施工管理，以确保工程施工的高质量完成。因此，在电力建设的施工过程中，需要对配电网工程施工中出现的各种问题进行深入的分析，并采纳实际有效的施工管理策略和技术手段，确保施工行为的规范性，并努力提升配电网工程的标准化程度。

关 键 词： 电力；配电网工程；建设管理

Research on Construction Management of Power Distribution Network Engineering

Zhang Zhelan

Guangzhou Electric Power Engineering Supervision Co., Ltd. Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： Due to the wide distribution of power distribution lines and their strong concealment and dispersion characteristics, it is necessary to strengthen the effective control of the construction quality of distribution network projects. To ensure the stability and safety of power transmission, it is essential to enhance the construction management of distribution network projects, thereby guaranteeing high-quality completion of the projects. Therefore, during the construction process of power construction, it is imperative to conduct in-depth analysis of various issues arising in the construction of distribution network projects. Additionally, practical and effective construction management strategies and technical means should be adopted to ensure the standardization of construction practices and strive to improve the level of standardization in distribution network engineering.

Keywords： electric power; distribution network engineering; construction management

引言

电力配电网工程项目具有一定特殊性，其建设过程中涉及许多方面的内容与环节。电力配网的工程技术要求很高，因此施工公司必须进行严格的审核和标准化，以确保工程的质量达到相关标准的规定。在电力配电网的建设过程中，由于露天作业的持续时间过长和外部环境的多重因素影响，工程建设很容易出现质量问题和安全隐患。这就需要施工单位必须加强重视电力配电网工程施工管理工作，不断提高其管理水平，才能保障整个电力工程的顺利实施。因此，为了确保电力配电网工程的施工品质和整体效益，有必要加强施工流程并优化管理方面的内容。

一、电力配电网及其工程管理和重要性

（一）分类

通常，根据电压级别，我国的配电网络可以被划分为高、中、低三个等级。其中，高压配电网和中压配电网又分别对应于不同的供电区域。高压配电网的电压范围是35kV至110kV，中压配电网的电压范围是6kV至20kV，而低压配电网的电压范围是220V至380V。不同地区配电网规划有各自特点和要求。除了这些，配电网还可以被划分为城市、农村和工厂三个不同的功能区域。在这众多的供电区域里，由于其分布广，线路长，因此对于配电网电压的要求也各不相同。无论哪种情况，配电网建设最终

目的都是根据电压特定要求，进而制定针对性配电网建设方案，保证电力供应与需求均衡。

（二）重要性

配电网工程管理系统是一个由人力、资金、技术设备和施工现场共同构建的系统，但这个系统在工作流程的复杂性和相对较高的技术标准方面存在明显的不足。由于我国经济发展迅速，人们用电量不断增加，导致供电压力越来越大。由于电力需求年复一年地增加，这导致了电力设备的容量不足、设备老化和规划不完善等一系列问题。因此，有必要对这些设备进行持续的维护和检修，以及进行升级改造和新建规划。同时还需要做好配电线路建设以及供电设施安装与管理。与此相关的项目不仅影响电力用

户的日常生产和生活，还涉及电力公司的日常运营和工作。在这样的情况下，配电线路管理是整个电网系统中非常重要的一环^[1]。

二、配电网工程管理中存在的问题

（一）进度管理问题

在进行配电网工程的管理时，必须对施工进度进行严格的控制，并确保严格按照预定的进度进行操作，这样才能保证配电网工程能够按计划完成。同时，要加强对配电线路工程施工组织设计工作，明确各个阶段任务以及责任分工，提高工作效率和质量水平。如果实际的施工进度与预先设定的计划存在显著差异，很容易导致施工出现延误，这最终会对配电网工程的交付产生不良影响。因此，电力企业应该加强对配网工程施工管理的重视程度，不断提高管理水平，保证配网工程质量安全稳定提升。从配电网工程的实际管理状况来看，许多企业在施工规划方面表现不佳，缺少科学和合理的施工进度计划，施工工序的连贯性也不足，这导致了施工进度管理的混乱。有些施工单位由于自身管理水平较低，不能够及时发现工程施工过程中存在的问题，并且及时采取措施解决。尽管有些企业对施工的整体流程和工作计划进行了深入的规划，但他们在应对突发情况时缺乏应变能力。一旦施工现场出现问题，他们很难对施工计划和进度进行合理的调整，这导致了实际的施工进度大大落后于预定的进度。

（二）人员配置管理

在配电网的工程管理过程中，对人员的配置管理显得尤为关键。只有通过合理地分配人员，才能达到资源的最佳配置，并在提高工作效率的同时，也能实现出色的管理成果。随着科学技术水平不断发展和进步，配电网工程项目建设规模不断扩大，对施工人员数量要求越来越高。然而，许多企业在分配工作岗位时，并没有充分考虑到施工人员的专业特长，这导致了施工过程中经常出现人为错误。这种情况严重降低了施工效率，避免了施工时间的延误，并对配电网工程的整体效益产生了负面影响^[2]。

（三）成本管理问题

配电网的建设规模是非常巨大的，包含了众多的施工步骤，这就需要大批的施工团队来完成所有的建设工作。这种情况不仅导致了人力资源的成本上升，而且施工过程中所采用的各种建筑材料和设备也必须保证其使用的质量和性能满足更高的标准，这进一步增加了材料和设备的成本。因此，对于配电网的工程项目，进行高效的成本控制是至关重要的。从整个配电网工程的全局视角来看，每一个施工阶段都不可避免地会产生一定程度的成本。如果不对成本实施严格的控制和管理，很可能会造成成本的不必要浪费，这有可能导致实际成本超过预先设定的预算。当资金短缺时，这可能会使得接下来的建设活动不能按照预定计划进行，也不能保证后续工作的质量，从而对提高配电网工程的经济效益产生不利影响。在进行配电网的工程管理中，很多公司并没有给予造价控制足够的关注，也缺乏严格和规范的管理措施。这种情况导致了人力、物力和财力资源的不合理分配，普遍

存在着人力和材料的浪费，最终可能会导致成本超出标准。

三、电力建设中配电网工程管理措施

（一）制定科学的管理目标

1.项目前期：投标与设计

确保前期投标和设计工作顺利开展是项目成功的基石。投标单位需深入分析工程所在地及周边环境，全面了解竞争对手情况，并与业主充分沟通后，审慎决定是否参与竞标，投标全过程务必严格遵循公平、公开准则。在设计环节，要精心优化选择设计方案，使其兼具经济性与可靠性，同时充分满足工程安全要求。此外，遵循标准化招标流程，筛选出信誉良好且价格合理的施工公司，为项目后续推进筑牢根基^[3]。

2.施工阶段：现场管理与质量把控

施工阶段是项目落地的关键时期。在施工预备阶段，必须严格依据相关法律法规完成初步准备工作，确保设备调试到位，全力规避潜在安全风险。施工过程中，一方面要强化施工现场管理，严格依照技术规范进行组织、指挥与协调，做好各工序衔接，保障工程质量合格并按时交付；另一方面，要做好安全防护措施，加强对施工人员及车辆的管理，安排专业维修团队负责设备日常维护。同时，需对施工技术人员开展专业技能培训，完成工程技术交底，严格检查建筑材料质量，杜绝使用不达标的材料。配电工程施工时，做好图纸会审，提前考虑线路敷设等情况，配电变压器安装后及时进行试验检测和运行维护。

3.后期管理：质量与资料管理及精细管控

项目后期管理同样不容忽视。在质量与资料管理方面，施工过程中要持续跟踪检查工程施工组织计划，及时纠正偏差，做好竣工验收。项目经理需确保项目严格按照设计规范推进，避免操作失误等问题。对已完工但使用中出现问题的项目及时跟踪处理并归档。资料管理人员要妥善管理从项目起始到完工的所有资料，保证质量问题可追溯，验收合格后完成移交^[4]。在配电网项目管理中，确保手续完整，按要求填写数据文件，修正图纸缺陷，遇到技术问题召集专家讨论。此外，强化细致管理手段，对项目进行全过程控制，注意与其他部门协调配合，适时调整项目进度，做好工程变更与索赔管理，合理划分各部门操作流程，根据实际情况修改工作计划并提交业主，减少对施工时间的影响，项目完成后技术专家参与验收并做好文档归档^[5]。

（二）创新组织机制

为了促进配电网工程项目管理模式创新，企业必须专注于组织机制的创新，优化和调整工作结构，从而为项目管理的稳定和持续发展奠定坚实的基础。由于配电线路具有分布范围广、数量众多等特点，而造成其工程施工难度比较大。电力公司在策划其项目时，需要从一个更广泛的角度出发，将项目细分为周计划、月计划和年计划等多个部分，并要求员工定期总结和汇报工作情况。在整个过程中要注重管理方法的科学性和合理性，制定合理可行的目标体系，使各项指标达到预期目的。在配电线路工程管理过程当中，要制定合理可行的进度计划，并且还要不断地

更新计划体系，使之具有较强的可操作性。在计划制定完毕之后，有必要将其录入到计算机系统，以便工作人员能够迅速获取信息并做出合适的操作安排。配电网络的工程项目工作量巨大，通常需要相当长的时间才能完成，并且由于受到多种外部因素的干扰，工程的变更变得尤为常见。如果没有对施工方案及进度等信息予以充分掌握，就会造成工作进展迟缓或者延误的情况发生。因此，在进行项目管理时，管理层需要与其他相关部门保持及时的沟通，深入了解配电网工程施工的实际状况，并根据这些信息作出项目的修改或取消的决策，以确保工程的安全和稳定进行。

（三）落实成本管理工作

面对日益激烈的行业竞争，企业必须加强成本管理，以确保不被市场所淘汰。电力作为我国社会经济发展中重要产业之一，其运行过程离不开对资金和能源等资源进行消耗，因此必须加大成本控制力度才能促进电力行业可持续发展。电力公司必须对成本问题给予高度关注，并依据成本管理的理论框架和企业的发展状况来制定管理需求，以实施有效的成本调控措施^[6]。

（四）优化安全管理工作

为了确保电力企业的稳健成长，安全显得尤为关键。只有在其初始阶段就消除所有潜在的安全风险，企业的长期发展才有可能得以实现。电力企业要想提高生产效率与质量，就必须重视对安全事故的预防和控制工作。电力公司必须构建一个既科学又合理的安全管理责任体系。电力企业要从员工角度出发，加强培训教育工作，提升人员综合素质水平。针对电力工作人员的发展状况，有必要对管理制度进行优化和调整，明确他们需要完成的具体任务和所需承担的责任，并对其操作行为进行规范。还需要加强施工人员安全意识教育工作，提高从业人员综合素质水平^[7]。在此背景下，电力公司有必要进一步完善其安全生产的保障机制，增强对公司内部环境的重视，加大施工过程中的监督力度，以尽可能减少施工过程中的安全隐患。同时，还要做好配电线路安装工作。在开始正式的配电网工程施工之前，有必要派遣专业人员去识别可能的施工风险点，并基于这些信息制定相应的紧急应对计划，以确保工作人员的生命安全并降低施工过程中的损失。同时要加强施工人员培训与管理，提高从业人员专业素质和

安全意识，确保整个电网系统能够处于稳定状态。在进行配电网的建设时，必须严格执行安全管理措施。要加强对施工人员的培训，增强其安全意识和自我保护能力^[8]。务必对所有的施工设备进行细致的检查，确保它们能够正常运行，并按照预定的时间进行设备的检修，以防止在操作过程中出现任何故障。同时加强对施工现场的监督与管理，确保施工人员能够按照规定时间完成任务，防止安全事故发生。为了确保配电网工程的正常建设，需要纠正施工人员在施工过程中的不当行为。

（五）加强各部门间的协调与沟通

在建设阶段，应当依据项目的成本支出来调整施工管理策略，确保工程的质量满足设计标准，并拟定科学合理的施工计划，以确保工程能够顺利完成^[9]。

在开始建设之前，应当根据项目的整体预算成本，对施工现场进行深入的调查，并依据实际状况制定合适的策略。施工阶段，需做好各项准备工作，提高施工人员素质，严格进行质量监督和检查，确保工程施工安全顺利地完成，避免发生安全事故，降低事故损失。与此同时，需要进一步完善工程的管理体制，根据项目的具体需求，设计出合适的管理策略，并增强各个部门之间的合作与沟通，确保信息和资料能够迅速传达给各个部门；建立合理的施工组织方案，使其符合施工进度计划和质量目标。在建筑项目实施过程中，应当采用先进的信息技术来监控工程进度，确保工程的品质达到预定的设计标准^[10]。

四、结束语

配网电力工程是确保电力系统稳定和安全运行的关键。因此，施工单位需要精心选择合适的施工技术，并整合先进的管理理念，以优化配网运行管理系统，从而实现配网管理的智能化。由于配电网是直接面向用户供电的基础设施，其质量优劣不仅影响到人们日常生产与生活的正常进行，而且也关系着整个国家经济发展水平的高低。需要明确配电网的安全需求，并从过去的配电网工程施工经验中吸取教训，以制定出科学而严格的配电网安全管理措施，确保配电网工程的质量能够满足施工的标准要求。

参考文献

- [1] 郝纲. 电力工程配电网建设的全过程管理措施 [J]. 流体测量与控制, 2024, 5(1): 59-62.
- [2] 颜富, 付华. 电力工程配电网建设的全过程管理新思路 [J]. 中国战略性新兴产业, 2024(11): 194-196.
- [3] 方丽娜. 电力工程配电网建设的全过程管理措施分析 [J]. 通讯世界, 2021, 28(12): 100-102.
- [4] 胡永恒, 丁永进. 配电网电力工程施工安全管理措施研究 [J]. 工程技术研究, 2024, 9(15): 147-149.
- [5] 刘礼科. 配电网建设阶段工程管理存在的问题与解决措施 [J]. 上海管理科学, 2023, 45(6): 106-108.
- [6] 郭铭德. 电力工程配电网建设的全过程管理措施 [J]. 文渊 (小学版), 2023(10): 277-279.
- [7] 林木轩. 浅谈电力配网工程建设及管理 [J]. 电力设备管理, 2022(18): 157-159, 173.
- [8] 张岩. 电力工程配电网建设的全过程管理措施 [J]. 电脑爱好者 (普及版) (电子刊), 2022(10): 2059-2060.
- [9] 杜挺, 申涛. 配电网建设工程的技术质量与施工过程管理思考 [J]. 电力设备管理, 2022(10): 162-164.
- [10] 刘燕. 电力配电网工程建设管理分析 [J]. 电脑爱好者 (普及版) (电子刊), 2020(3): 1639-1640.

本质安全理念下电力安全管理体系的构建

邓亚军

华能兰州热电有限责任公司, 甘肃 兰州 730104

摘 要： 本质安全理念，就是要从根源上消除事故隐患，把它融入电力安全管理体系非常重要。电力安全管理体系有前瞻性、系统性等明显特点，能提前判断风险，全面掌控安全环节，所以构建这个体系很有必要。现在，电力安全管理体系还有很多问题，像不同区域、部门的标准不一样，使得执行起来乱糟糟；技术更新慢，难以应对新出现的风险。统一安全标准，让各环节协调配合；加快技术创新，运用先进科技，就能有效提高电力安全管理水平，有力保障电力系统稳定运行。

关 键 词： 本质安全理念；电力安全管理；体系构建；稳定运行

The Construction of Electric Power Safety Management System under the Concept of Essential Safety

Deng Yajun

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

Abstract： The essential safety concept is to eliminate the hidden danger of accidents from the root cause, and it is very important to integrate it into the electric power safety management system. The electric power safety management system has the forward-looking, systematic and other obvious characteristics, which can judge the risks in advance and fully control the safety links, so it is necessary to build this system. Nowadays, there are many problems in the power safety management system, like different standards, which make implementation messy; technology update is slow and difficult to cope with emerging risks. Unify safety standards and coordinate all links; speed up technological innovation and apply advanced technology, we can effectively improve the power safety management level and guarantee the stable operation of power system.

Keywords： **intrinsic safety concept; electric power safety management; system construction; stable operation**

引言

如今，电力是经济发展和民众生活的关键支撑，其安全直接关系到国计民生。本质安全理念给电力安全管理带来新活力，它从源头消除事故隐患，而非事后补救。构建基于此理念的电力安全管理体系，借助先进技术和科学管理，能精准识别并化解潜在风险，降低电力事故概率，确保电力供应稳定可靠，为电力行业长远发展打基础。

一、本质安全理念下电力安全管理体系特点

（一）预防性

本质安全理念下的电力安全管理体系，把预防放首位。用先进传感器等设备实时监测电力设备运行状态，收集变压器油温、绕组温度、电流电压等大量数据。再用大数据分析技术构建精准故障预测模型，提前发现设备潜在故障。一旦参数异常，系统马上预警，让工作人员提前安排检修维护，避免因设备故障停电，保障电力系统持续稳定运行。

（二）系统性

该体系将电力系统的发电、输电、变电、配电、用电各环节看作紧密相连的整体。从设备选型就综合考虑设备性能、可靠性及与系统兼容性；安装调试严格把控每步，确保设备正常接入系统；运行维护时各环节协同配合。比如规划输电线路，要考虑线路经过区域的地形地貌、气候条件等周边环境，结合区域负荷需求和设备可靠性指标全面规划，保障输电系统安全稳定运行。

（三）动态性

电力系统运行易受多种复杂因素影响，像天气突变，从晴天

变暴雨、大风等恶劣天气，或用电负荷不同时段大幅波动。本质安全管理体系因动态性强，能敏锐感知这些变化。遇恶劣天气，系统自动触发应急预案，马上增派人员加强设备巡检，根据实际情况灵活调整电力系统运行方式，如调整输电线路输电功率、改变变电站运行模式等，保障电力供应安全，降低外界因素对电力系统的影响。

（四）全员参与性

该体系强调全体员工参与安全管理很重要，不管是高层管理者还是基层一线员工，都有安全责任。企业定期组织全面深入的安全培训，给员工讲安全法规知识、分析典型事故案例，提升员工安全意识。同时开展安全知识竞赛、安全技能培训等多样活动，激发员工参与热情，鼓励员工日常积极发现和报告安全隐患，营造全员重视安全、参与安全管理的良好氛围。

（五）技术依赖性

本质安全理念下的电力安全管理体系很依赖先进技术保障安全。智能监测设备能 24 小时不间断收集设备运行数据，自动化控制系统按预设程序精准执行操作指令，数据分析软件对海量数据深度挖掘分析。以智能电表为例，它能实时采集用户用电数据，用数据分析算法分析用户用电行为模式，发现异常用电情况，如电量突然大幅波动、用电时间规律异常等，及时发出警报，为电力安全管理提供有力数据支持^[1]。

二、本质安全理念下构建电力安全管理体系必要性

（一）保障电力系统可靠运行

可靠的电力供应是社会经济稳定发展的基础。构建本质安全管理体系，借助先进监测技术和科学管理方法，实时掌握电力设备运行状态，及时发现和处理设备故障。比如在线监测系统能迅速定位输电线路故障点，精确到具体位置，大幅缩短抢修时间，减少停电时间和范围。对工业生产，稳定电力供应保证生产线持续运转，避免因停电造成产品报废、设备损坏等损失；对居民生活，可靠供电保障日常生活有序，如照明、家电使用不受影响^[2]。

（二）满足社会对电力需求增长

随着经济发展，社会对电力需求持续上升。本质安全管理体系通过优化电力系统运行流程、提升设备运行效率，保障系统安全性，更好适应负荷增长需求。新建变电站项目采用本质安全设计理念，从选址、设备布局到设备选型，都充分考虑设备在高负荷状态下的稳定运行能力，确保变电站建成后能高效、安全为区域供电，满足不断增长的电力需求。

（三）降低事故风险与损失

电力事故发生不仅造成巨大经济损失，如设备损坏维修费用、停电导致生产停滞损失等，还严重威胁人员生命安全。本质安全管理体系从设备选型、安装调试到运行维护各环节，都致力于从源头消除隐患，大幅降低事故发生概率。即便发生事故，完善的应急预案能迅速启动，通过有序救援流程、合理资源调配，最大程度减少人员伤亡和经济损失。以化工园区为例，构建本质

安全管理体系后，可有效避免因停电引发化工生产事故，减少因事故导致的环境污染治理成本和企业经济赔偿损失^[3]。

（四）符合行业规范与标准

电力行业有严格规范和标准，这是保障电力系统安全稳定运行、维护公共利益的重要准则。构建本质安全管理体系是电力企业满足这些要求的必然选择。企业遵循国家安全生产法规、行业技术标准等规定，建立健全全面细致的安全管理体系，从制度建设、人员培训到设备管理等各方面严格落实标准要求。通过监管部门审核，不仅提升企业自身安全管理水平，还树立良好企业形象，增强市场竞争力。

（五）促进电力行业可持续发展

本质安全管理体系推动电力行业积极采用新技术、新工艺。比如在新能源发电领域，运用本质安全理念，从新能源发电设备研发、生产到安装运行，全方位保障设备安全稳定。先进储能技术应用，可有效解决新能源发电间歇性问题，提高能源利用率；新型环保材料使用，能减少发电过程环境污染。这些举措促进能源结构优化调整，助力电力行业向绿色、可持续方向发展^[4]。

三、本质安全理念下电力安全管理体系现存问题

（一）安全意识淡薄

部分电力企业员工安全意识严重不足，日常设备操作常为方便违反安全规定。检修作业时，不按停电、验电、挂接地线等标准流程操作，直接上手，极大增加触电等事故风险。部分企业组织的安全培训流于形式，内容枯燥，缺乏实际案例深度剖析和现场实操演练，员工没真正掌握安全知识和操作技能，实际工作中无法有效应对安全问题。

（二）设备老化严重

一些老旧电力设备长期不间断运行，经多年磨损、腐蚀，设备性能大幅下降，存在诸多安全隐患。企业资金预算有限，难一次性投入大量资金全面更新设备。以部分输电线路为例，运行数十年，导线绝缘层老化严重，出现开裂、脱落等情况，极易漏电、短路，一旦故障，严重影响电力系统安全稳定运行，甚至引发大面积停电事故^[5]。

（三）安全管理制度不完善

部分企业安全管理制度有漏洞，不健全。安全责任划分不明确细致，出现安全问题时，各部门、岗位相互推诿责任，无法迅速有效解决问题。制度执行缺乏有力监督机制，规章制度成一纸空文，员工有章不循。比如安全检查制度，实际执行时，检查人员敷衍，没严格按检查标准全面细致检查设备，未能及时发现设备隐患^[6]。

（四）应急处理能力不足

目前部分企业应急预案针对性不强，没充分结合不同类型事故特点、可能影响范围和危害程度深入分析规划。应急演练不规范，过程简单随意，缺乏真实场景模拟。以火灾事故应急预案为例，预案没明确消防设备具体使用方法、各岗位人员火灾时具体职责和人员疏散详细路线，导致实际演练现场混乱，员工不清楚

应急处置任务，一旦发生真实火灾，难迅速有效应对。

（五）技术应用水平低

部分电力企业在先进安全技术应用方面滞后，没充分认识先进技术对提升安全管理水平的巨大优势。设备巡检仍依赖传统人工巡检，效率低，受人员主观因素影响大，难及时发现设备内部隐蔽隐患。先进智能巡检机器人能搭载多种传感器，快速准确全方位检测设备，及时发现潜在问题，这些企业却因各种原因未引入，安全管理工作效果不佳^[7]。

四、本质安全理念下电力安全管理体系构建策略

（一）强化安全意识教育

定期组织系统全面的安全培训，邀请行业资深专家授课，专家讲解最新安全法规政策、剖析真实典型电力安全事故案例，让员工深刻认识安全工作重要性。同时积极组织安全主题活动，如安全月活动，设安全知识讲座，邀请一线员工分享安全经验；举办安全操作技能比赛，让员工在竞赛中提升操作技能。通过多样活动提高员工参与度，逐步增强员工安全意识，使其日常工作保持警惕^[8]。

（二）加快设备更新改造

企业应制定详细科学的设备更新计划，根据设备老化程度、安全风险等级等合理安排资金投入。优先更换老化严重、安全风险高的设备，新设备采购严格筛选，选用可靠性高、有本质安全特性的设备。暂时无法更换的老旧设备，积极进行技术改造，比如给变压器加装智能监测装置，实时监测变压器油温、绕组温度、油位等参数，提升安全性能，延长设备使用寿命^[9]。

（三）完善安全管理制度

明确各部门、岗位在安全管理工作中的具体职责，制定详细责任清单，确保每个环节、每项任务都有人负责。建立严格考核

机制，将员工安全绩效与薪酬待遇、职位晋升紧密挂钩，安全工作表现突出的员工给予奖励，违反安全规定的员工严肃惩处。同时成立专门监督小组，定期检查制度执行情况，发现问题及时督促整改，确保各项安全管理制度有效执行^[10]。

（四）提升应急处理能力

组织专业人员结合企业实际制定详细、针对性强的应急预案，涵盖火灾、设备故障、自然灾害等各类可能事故。预案明确各部门、岗位应急处置职责、应急操作流程和资源调配方案等。定期组织实战演练，模拟不同场景、不同严重程度事故，让员工在实战中熟悉应急流程。配备充足应急物资，如消防器材、抢修工具、应急照明设备等，定期检查维护应急物资，确保完好可用。

（五）加大技术应用力度

电力企业应积极引入先进安全技术，如物联网技术，通过在设备安装传感器，实现设备运行数据实时采集和远程传输，进而远程监测和控制设备；利用大数据分析技术，对海量设备运行数据、用户用电数据等深度挖掘，发现潜在安全风险；借助人工智能技术，构建故障诊断与预测模型，提前预判设备故障。此外，建立智能安全管理平台，整合应用各类先进技术，提升安全管理工作智能化水平。

五、结语

本质安全理念下构建电力安全管理体系是保障电力系统安全稳定运行的关键。通过分析该体系特点、构建必要性和现存问题，提出强化安全意识、加速设备更新改造、完善制度建设等系列可行策略。电力企业应积极落实这些措施，持续优化安全管理体系，提升电力安全管理水平，为社会经济稳定发展提供可靠电力保障，助力电力行业在安全发展轨道稳步前行。

参考文献

[1] 潘作为, 史艳强. 浅谈电力行业四个安全管理理念 [J]. 电力安全技术, 2022, 24(03): 74-76.
[2] 朱翔宇, 任波. 强化风险管控保障本质安全 [J]. 大众用电, 2018, (03): 34-35.
[3] 谢森. 基于本质安全理论的电力企业安全管理体系研究 [D]. 华北电力大学, 2012.
[4] 王飞, 田严润, 李晓鹏. 电力企业安全管理全面规范化生产维护体系的构建 [J]. 上海电气技术, 2023, 16(02): 9-11+34.
[5] 丁伟玲. 基于 HSE 的 35 ~ 110 kV 变电扩建工程安全管理体系构建 [J]. 农电管理, 2023, (01): 40-42.
[6] 高阳, 朱坤双, 黄海静, 等. 我国电力作业安全管理体系构建及分析研究 [J]. 武汉理工大学学报 (信息与管理工程版), 2022, 44(06): 894-898.
[7] 汪鲁, 刘军, 张凯, 等. 基于 STAMP 的电网企业现代安全管理体系构建 [J]. 武汉理工大学学报 (信息与管理工程版), 2022, 44(04): 581-587.
[8] 韩金池. 基于本质安全理论的电力企业安全管理体系构建策略探析 [J]. 企业改革与管理, 2021, (21): 42-43.
[9] 赵琰, 刘学林, 吴英杰, 等. 电力行业健全安全管理组织体系的构建 [J]. 工程技术研究, 2020, 5(10): 287-288.
[10] 赵博. 电力工程施工现场安全管理模式及评价体系构建 [D]. 天津工业大学, 2019.

核电站取水口海生物堵塞的成因、影响和智能防控体系研究

岳冲，任根民，汪井春

中广核陆丰核电有限公司，广东 汕尾 516599

摘 要： 随着全球核电事业的蓬勃发展，滨海核电站作为主要的核电类型，其取水口海生物堵塞问题日益凸显。本文深入剖析核电站取水口海生物堵塞的成因，详细阐述其对核电运行安全、经济效益及海洋生态环境产生的影响，并全面探究智能防控体系在解决这一问题中的应用。通过对海洋生态环境变化、核电站取水系统特点等多方面因素的分析，揭示海生物堵塞的内在机制；从多个角度阐述堵塞问题带来的严重后果；同时，对当前智能防控体系中的监测技术、预警模型、智能决策系统以及拦污与清理技术等进行深入研究，旨在为核电站取水口海生物堵塞问题提供科学、有效的解决方案，确保核电站的安全稳定运行。

关 键 词： 核电站；取水口；海生物堵塞；智能防控体系

Study on the Cause, Influence and Intelligent Prevention and Control System of Sea Biological Blockage at the Water Intake of Nuclear Power Plant

Yue Chong, Ren Genmin, Wang Jingchun

CGN Lufeng Nuclear Power Co., LTD. Shanwei, Guangdong 516599

Abstract： With the rapid development of global nuclear power, coastal nuclear power plants, as a primary type of nuclear facility, increasingly face the challenge of marine organism blockage at their water intakes. This paper conducts an in-depth analysis of the causes of marine organism blockage at nuclear power plant water intakes, elaborates on its impacts on operational safety, economic efficiency, and marine ecosystems, and comprehensively explores the application of intelligent prevention and control systems to address this issue. By analyzing factors such as changes in marine ecological conditions and the structural characteristics of nuclear plant water intake systems, this study reveals the underlying mechanisms of marine organism blockage. It further examines the severe consequences of blockage from multiple perspectives. Additionally, the paper investigates current technologies within intelligent prevention and control systems, including monitoring technologies, predictive models, intelligent decision-making systems, and interception and cleanup technologies. The research aims to provide scientific and effective solutions to mitigate marine organism blockage at nuclear power plant water intakes, ensuring the safe and stable operation of nuclear facilities.

Keywords： nuclear power plant; water intake; marine organism blockage; intelligent prevention and control system

引言

核电作为一种清洁、高效的能源，在全球能源结构中占据着越来越重要的地位。滨海核电站因靠近海洋，具有取水便利等优势。然而，这种地理位置也带来了独特的挑战，其中取水口海生物堵塞问题尤为突出。近年来，国内外多个核电站都遭遇了此类问题，如某核电厂因附近海域海水水母异常爆发，导致四台机组取水口海生物拦截网部分主钢丝绳松弛失效，大量水母进入泵站前池，最终四台机组循环水过滤系统旋转滤网压差持续升高，机组自动停运。这些事件不仅严重影响了核电站的正常运行，造成了巨大的经济损失，还对周边海洋生态环境产生了负面影响。因此，深入研究核电站取水口海生物堵塞的成因、影响，并构建有效的智能防控体系具有重要的现实意义。

一、核电站取水口海生物堵塞的成因

（一）海洋生态环境变化

1. 富营养化

随着工业废水、生活污水的大量排放以及农业面源污染的加剧，近海海域的营养物质含量不断增加，导致水体富营养化。这种富营养化的环境为海生物的生长和繁殖提供了充足的养分，使得海生物的数量急剧增加。例如，在一些赤潮频发的海域，由于海水中氮、磷等营养物质过剩，引发了赤潮生物的爆发性繁殖。这些赤潮生物不仅会对海洋生态系统造成破坏，还可能大量聚集在核电站取水口，堵塞取水设施。

2. 气候变化

全球气候变化导致海水温度、盐度等环境参数发生改变。海水温度的升高可能使一些原本不适宜在该海域生存的海生物得以繁衍，扩大了它们的生存范围。比如，某些热带和亚热带海域的海生物可能随着海水温度的上升，向温带海域扩散，进而增加了核电站取水口遭遇海生物堵塞的风险。同时，盐度的变化也会影响海生物的生存和分布，一些对盐度敏感的海生物可能会因为盐度的改变而聚集在特定区域，包括核电站取水口附近。

（二）核电站取水系统特点

1. 水流特性

核电站取水系统通常会形成一定的水流场，这种水流特性对海生物具有吸引作用。取水口的水流速度相对较快，会形成一股强大的吸力，将周围的海生物吸入其中。而且，取水口附近的水流紊乱，会使海生物在水流的作用下更容易聚集。例如，一些游泳能力较弱的海生物，如小型水母、毛虾等，在取水口水流的影响下，难以自主游动离开，从而大量堆积在取水口，导致堵塞。

2. 温度差异

核电站在运行过程中会向周围海域排放大量的温排水，使得取水口附近海域的水温升高。这种温度差异会吸引一些对水温较为敏感的海生物。例如，某些鱼类和浮游生物喜欢在温暖的水域活动，它们会被温排水吸引到取水口附近，增加了取水口海生物堵塞的可能性。

（三）海生物自身特性

1. 繁殖习性

许多海生物具有快速繁殖的能力，其繁殖周期短、繁殖量大。一些浮游生物在适宜的环境条件下，短时间内就能大量繁殖，形成高密度的种群。一旦这些高密度繁殖的海生物靠近核电站取水口，就容易引发堵塞问题。例如，某些藻类在富营养化的海水中，几天内就能数量翻倍，迅速在取水口聚集。

2. 集群行为

部分海生物具有集群行为，它们会聚集在一起形成庞大的群体。这种集群行为使得海生物在移动过程中容易被取水口吸入。例如，成群的毛虾在洄游时，一旦经过核电站取水口附近海域，就可能被取水口的水流大量吸入，造成取水口堵塞。

二、核电站取水口海生物堵塞的影响

（一）对核电运行安全的威胁

1. 冷却系统故障

取水口被海生物堵塞后，会导致冷却海水的供应量不足，影

响核电站冷却系统的正常运行。冷却系统无法有效地带走反应堆产生的热量，会使反应堆温度升高，严重时可能引发堆芯熔毁等重大事故，对核电站的安全造成毁灭性打击。

2. 设备损坏

海生物进入取水系统后，可能会对水泵、阀门、管道等设备造成损坏。它们的身体或外壳可能会卡住设备的运转部件，导致设备故障。例如，海蛎子等贝类生物附着在管道内壁，会增加管道的粗糙度，影响水流的顺畅性，同时也可能导致管道腐蚀，缩短设备的使用寿命。

（二）对经济效益的影响

1. 发电损失

海生物堵塞取水口导致核电站停机或降功率运行，会造成巨大的发电损失。核电站的发电量直接关系到电力供应和经济效益，停机或降功率期间，无法满足电网的用电需求，同时也减少了发电收入。据统计，一次因海生物堵塞导致的核电站停机事件，可能造成数百万甚至上千万元的经济损失。

2. 维护成本增加

为了解决海生物堵塞问题，核电站需要投入大量的人力、物力进行清理和维护。包括使用专业的设备进行水下清理，派遣潜水员进行人工清理，以及对受损设备进行维修和更换等。这些额外的维护工作会显著增加核电站的运营成本。

（三）对海洋生态环境的破坏

1. 生物入侵

为了防止海生物堵塞，核电站可能会采取一些物理、化学或生物的防控措施，这些措施在一定程度上可能会对海洋生态环境造成破坏。例如，使用化学药剂进行消杀时，可能会误杀其他有益的海洋生物，破坏海洋生物的多样性。同时，一些防控措施可能会改变海洋生态系统的结构和功能，导致生物入侵等问题的发生。

2. 生态失衡

取水口海生物堵塞事件的发生，会影响海洋生态系统中物质和能量的循环。大量海生物聚集在取水口，改变了它们在海洋中的自然分布，可能导致某些区域的生物量过高或过低，从而破坏海洋生态系统的平衡。例如，水母大量繁殖并堵塞取水口后，会捕食大量的浮游生物，影响其他海洋生物的食物来源，进而引发整个海洋生态系统的连锁反应。

三、核电站取水口海生物堵塞的智能防控体系

（一）智能监测技术

1. 声学监测

声学监测技术利用声波在水中传播的特性，通过发射声波并接收反射回来的信号，来探测海生物的存在和分布情况。例如，声学多普勒流速剖面仪（ADCP）可以测量海水的流速和流向，同时也能检测到海生物的回波信号。通过分析这些信号，可以确定海生物的种类、数量和运动轨迹。声学监测具有监测范围广、实时性强等优点，能够在大面积海域内对海生物进行快速监测。

2. 光学监测

光学监测技术包括水下摄像头、荧光传感器等设备。水下摄像头可以直接拍摄海生物的图像，通过图像识别技术对海生物进行分类和计数。荧光传感器则利用海生物体内的荧光物质特性，检测海生物的浓度和分布。光学监测具有直观、分辨率高的特

点，能够准确识别海生物的种类，但监测范围相对较小，受海水透明度等因素的影响较大。

3. 卫星遥感监测

卫星遥感监测利用卫星搭载的传感器，从高空对海洋进行观测。通过分析卫星图像中的光谱信息，可以获取海生物的分布范围和密度等信息。卫星遥感监测具有覆盖范围广、宏观性强的优势，能够对大面积海域进行长期、连续的监测，为海生物堵塞的预警提供宏观的数据支持。

（二）智能预警模型

1. 数据融合与分析

智能预警模型首先需要来自各种监测设备的数据进行融合和分析。将声学、光学、卫星遥感等不同监测手段获取的数据进行整合，综合考虑海生物的种类、数量、分布以及海洋环境参数等因素，提高数据的准确性和可靠性。例如，通过数据融合，可以更全面地了解海生物的动态变化，避免单一监测手段的局限性。

2. 预测算法

利用机器学习、深度学习等技术构建预测算法，对海生物的生长、繁殖和移动趋势进行预测。例如，基于神经网络的预测模型可以根据历史数据和当前的海洋环境参数，预测海生物在未来一段时间内的数量变化和分布情况。通过准确的预测，能够提前发出预警信号，为核电站采取防控措施争取时间。

3. 预警阈值设定

根据核电站的实际运行情况和安全要求，设定合理的预警阈值。当监测数据超过预警阈值时，系统自动发出预警信号。预警阈值的设定需要综合考虑多种因素，包括海生物的种类、数量对取水口堵塞的影响程度，以及核电站冷却系统的承受能力等，确保预警的准确性和及时性。

（三）智能决策系统

1. 防控策略制定

智能决策系统根据预警信息和核电站的实际情况，制定科学合理的防控策略。防控策略包括物理防控、化学防控和生物防控等多种手段。例如，当海生物数量较少时，可以采用物理拦截的方式，如在取水口设置拦污网；当海生物数量较多时，可能需要结合化学消杀或生物防治的方法，如使用环保型的消杀药剂或引入海生物的天敌等。

2. 资源优化配置

智能决策系统还需要对防控资源进行优化配置，确保防控措施的高效实施。根据海生物的分布情况和堵塞风险的大小，合理分配人力、物力和财力资源。例如，在海生物容易聚集的区域增加监测设备和防控设施的投入，提高防控效果，同时避免资源的浪费。

3. 实时调整与优化

在防控过程中，智能决策系统会根据实际情况实时调整防控策略。通过对防控效果的评估和反馈，及时发现问题并进行优化。例如，如果发现某种防控措施效果不佳，系统会及时调整方案，采用其他更有效的防控手段，以确保取水口的安全。

（四）智能拦污与清理技术

1. 智能拦污网

智能拦污网采用先进的材料和结构设计，具有自动感应和调节功能。当检测到海生物靠近时，拦污网可以自动调整网孔大小或形状，增强拦截效果。同时，拦污网还可以配备自清洁装置，定期清理附着在网上的海生物，保持网的畅通。例如，一些智能

拦污网利用水流的冲击力或超声波技术，清除网面上的海生物。

2. 水下机器人清理

水下机器人可以在复杂的水下环境中作业，对取水口和管道内的海生物进行清理。它们配备了各种工具，如机械臂、高压水枪等，能够高效地清除海生物。水下机器人具有操作灵活、适应性强的特点，可以到达人工难以到达的区域进行清理。例如，在狭窄的管道内，水下机器人可以利用其小巧的身形，顺利完成清理任务。

3. 自动化清理设备

自动化清理设备可以根据预设的程序，自动对取水口和相关设施进行清理。这些设备通常集成了多种清理技术，如过滤、冲洗、吸附等，能够实现对海生物的全面清理。例如，一些自动化清理设备采用旋转滤网和高压水冲洗相结合的方式，在过滤海生物的同时，通过高压水冲洗将滤网上的海生物清除，提高清理效率。

四、结论与展望

核电站取水口海生物堵塞问题是影响核电安全和可持续发展的重要因素。通过对其成因的深入分析，我们认识到海洋生态环境变化、核电站取水系统特点以及海生物自身特性等多方面因素的综合作用导致了这一问题的发生。而海生物堵塞带来的对核电运行安全、经济效益和海洋生态环境的影响也不容忽视。

智能防控体系的构建为解决这一问题提供了有效的途径。智能监测技术能够实现对海生物的实时、全面监测；智能预警模型通过准确的预测和合理的预警阈值设定，为防控措施的实施提供了科学依据；智能决策系统能够制定科学合理的防控策略，并对资源进行优化配置；智能拦污与清理技术则高效地解决了海生物堵塞的实际问题。

然而，目前的智能防控体系仍存在一些不足之处，如监测技术的精度有待提高，预警模型的准确性还需要进一步验证，防控技术的成本较高等。未来，需要进一步加强相关技术的研究和创新，提高智能防控体系的性能和可靠性，为核电事业的安全、稳定发展提供有力保障。

参考文献

- [1] 於凡，许波涛，李勇，等. 海生物暴发对核电厂冷源系统的影响分析及对策探讨[J]. 给水排水，2018.
- [2] 颜国呈，吕文婷. 基于电厂取水外来物堵塞的预防管理[J]. 科技创新与应用，2016.
- [3] 杜伟东，李海森，陈宝伟，等. 一种基于声散射特性的有鳃鱼特征获取方法[J]. 应用声学，2014，33(6):505-511.
- [4] Smith J, et al. Dynamic filter optimization in nuclear cooling systems[J]. Nuclear Engineering and Design, 2022, 385:111542.
- [5] 国家核安全局. 关于近期海洋生物或异物影响核电厂取水安全事件的通报[R]. 北京：国家核安全局，2016.
- [6] EPRI. Cooling Water Intake Structure Biofouling Control: Technology Evaluation and Case Studies[R]. EPRI Report 1020524, 2019.
- [7] 中广核集团. 核电厂冷源安全保障技术白皮书[R]. 深圳：中广核研究院，2021.
- [8] 生态环境部. 中国近海富营养化状况公报[R]. 北京：科学出版社，2023.
- [9] IAEA. Safety Standards Series No. SSG-39: Cooling Water System Reliability[C]. Vienna: IAEA Publications, 2021.
- [10] 红沿河核电站技术团队. 智能浮标系统在冷源监测中的应用[J]. 核科学与工程，2024，44(3): 45-52.

数字化技术融入电力安全工器具检测的探讨

王盛¹, 李金娥², 许莉³, 胡笏⁴

1. 荆州三新供电服务有限公司荆城分公司, 湖北 荆州 434000

2. 荆州三新公司供电服务有限公司江陵分公司, 湖北 荆州 434000

3. 荆州三新供电服务有限公司荆城分公司, 湖北 荆州 434000

4. 国网荆州供电公司, 湖北 荆州 434000

摘 要 : 在当今电力行业发展进程中, 数字化技术正逐步融入电力安全工器具检测环节。通过运用先进的传感器、数据分析软件等, 能更高效且精准地对各类工器具进行检测。其特点显著, 如提升检测效率、增强结果准确性等。从必要性来看, 这对保障电力系统安全稳定运行意义重大。不过目前仍存在设备兼容性欠佳、数据安全隐患等问题, 需针对性地提出解决策略, 以全面提升电力安全工器具检测水平。

关 键 词 : 数字化技术; 电力安全工器具; 检测; 应用

Discussion on the Integration of Digital Technology into Electrical Safety Tools and Equipment Testing

Wang Sheng¹, Li Jin'e², Xu Li³, Hu Jia⁴

1. Jingzhou Sanxin Power Supply Service Co, Ltd. Jingcheng Branch, Jingzhou, Hubei 434000

2. Jingzhou Sanxin Power Supply Co., Ltd. Jiangling Branch, Jingzhou, Hubei 434000

3. Jingzhou Sanxin Power Service Co., Ltd. Jingcheng Branch, Jingzhou, Hubei 434000

4. State Grid Jingzhou Supply Company, Jingzhou, Hubei 434000

Abstract : In the current process of power system development, digital technology is gradually integrated the detection of electrical safety tools and equipment. By using advanced sensors, data analysis software, etc., various tools and equipment can be detected more efficiently and accurately. Its characteristics are, such as improving detection efficiency and enhancing the accuracy of results. In terms of necessity, this is of great significance to ensure the safe and stable operation of the power system. However there are still problems such as poor device compatibility and data security risks. It is necessary to propose targeted solutions to comprehensively improve the level of electrical safety tools and equipment testing.

Keywords : digital technology; electrical safety tools; testing; application

引言

电力安全工器具是保障电力作业人员人身安全的重要装备, 其性能的可靠性直接关系到电力生产的安全。随着科技的飞速发展, 数字化技术在各个领域广泛应用。将数字化技术融入电力安全工器具检测, 能够有效提升检测效率、准确性与可靠性, 为电力系统的安全稳定运行提供有力支撑。深入探讨数字化技术在电力安全工器具检测中的应用, 具有重要的现实意义。

一、数字化技术应用于电力安全工器具检测的特点

(一) 高精度检测

数字化检测设备凭借先进的传感器与复杂算法, 能够对安全工器具的各项参数进行极为精准的测量。以绝缘电阻检测为例, 传统检测方法可能仅能精确到整数位, 而数字化设备可精确到小数点后多位。例如在对某高压绝缘手套进行检测时, 传统方法测

得绝缘电阻为 1000 兆欧, 而数字化设备精确测量为 1003.56 兆欧, 如此高的精度能够敏锐地捕捉到微小的绝缘缺陷, 为设备的安全稳定运行提供更为可靠的依据, 有效降低因测量误差导致的安全隐患^[1]。

(二) 实时监测

借助物联网技术构建的数字化系统, 具备实时采集安全工器具运行数据的强大能力。以高压验电器为例, 通过在验电器内部

植入传感器，可实时跟踪其使用状态，包括是否正常工作、电量剩余情况等。一旦验电器出现异常，如电压检测值偏离正常范围，系统能立即发出警报，通知运维人员。这使得运维人员无需在现场实时值守，就能第一时间精准掌握设备情况，及时采取应对措施，有效避免因设备异常未被及时发现而引发的事故^[2]。

（三）数据存储与分析

数字化技术拥有强大的数据存储与分析能力，可将检测数据长期存储在专门的数据库中。通过数据分析软件对大量历史数据进行深度挖掘，能总结出安全工器具的性能变化规律。例如，对一批绝缘棒多年的检测数据进行分析后发现，其绝缘性能随着使用年限的增加呈线性下降趋势，且每年下降幅度约为 0.5%。基于此规律，可预测设备的使用寿命，提前制定维护或更换计划，为预防性维护提供科学、精准的依据^[3]。

二、数字化技术融入电力安全工器具检测的必要性

（一）保障电力作业人员安全

电力安全工器具的可靠性能是保障电力作业人员生命安全的关键防线。数字化技术的高精度检测能够精准发现安全工器具在绝缘性能、机械强度等方面的潜在问题，实时监测则可对工器具在使用过程中的异常情况进行及时预警。例如，在一次电力抢修作业中，通过数字化检测系统提前发现某绝缘梯存在细微裂缝，避免了作业人员在攀爬过程中因梯子断裂而导致的伤亡事故，为电力作业人员提供了全方位、更可靠的安全保障^[4]。

（二）提高电力系统运行稳定性

安全工器具的正常运行是维持电力系统稳定运行的基础保障。数字化技术通过智能化诊断能够快速识别安全工器具的故障隐患，预防性维护则可提前消除这些隐患^[5]。例如，某变电站的高压隔离开关辅助触点经过数字化检测发现接触电阻异常增大，通过及时更换触点，避免了因接触不良引发的发热、拉弧等故障，有效减少了设备故障对电力系统的冲击，保障了电力系统的稳定运行^[6]。

（三）适应电力行业发展趋势

随着电力行业的持续发展，智能化、数字化已成为不可阻挡的必然趋势。众多大型电力企业纷纷加大在数字化技术方面的投入，将数字化技术融入电力安全工器具检测，符合行业发展的方向。例如，一些先进的电力企业已经实现了安全工器具检测的全流程数字化管理，从检测计划制定到报告生成全部自动化，大大提升了企业的运营效率和管理水平，有助于电力企业在激烈的市场竞争中占据优势地位。

（四）提升检测效率与质量

传统检测方法主要依赖人工操作，不仅效率低下，而且准确性有限。数字化技术的应用实现了检测过程的自动化和智能化，极大地缩短了检测时间。例如，对一批 100 件安全工器具进行检测，传统方法需要人工逐一操作，耗时一整天，且可能因人为疲劳出现检测误差；而采用数字化检测系统，仅需数小时即可完成全部检测，且检测结果的准确性更高，满足了电力企业对安全工器具检测高效、精准的需求^[7]。

（五）便于管理与决策

数字化检测系统生成的大量数据，经过专业的分析处理后，能为电力企业的管理和决策提供有力支持。企业可根据数据分析结果制定合理的采购计划，如通过对各类安全工器具的使用频率和故障率分析，确定优先采购哪些工器具；还可制定精准的维护计划，依据设备的性能变化规律安排维护时间。例如，某电力企业通过数据分析发现某品牌的绝缘手套使用寿命较短且故障率较高，于是调整采购策略，更换为其他性能更优的品牌，同时优化了维护计划，提高了资源配置效率，提升了企业管理水平。

三、数字化技术融入电力安全工器具检测的现存问题

（一）技术标准不统一

目前，电力安全工器具数字化检测技术标准尚未完全统一，不同厂家生产的设备在数据接口、通信协议等方面存在较大差异。例如，A 厂家生产的检测设备采用 RS-232 接口，通信协议为自定义的私有协议；B 厂家的设备则采用 USB 接口，通信协议遵循国际通用的 MODBUS 协议。这导致在构建统一的检测系统时，系统集成困难重重，不同设备之间无法顺畅地进行数据交互和协同工作，严重影响了数字化技术在电力安全工器具检测领域的推广应用。

（二）数据安全问题

数字化检测过程中产生的大量数据包含重要的设备信息和企业机密，如设备的技术参数、检测结果、企业的电网布局等。然而，当前电力企业的数据安全防护体系还不够完善，容易遭受网络攻击。例如，曾有不法分子通过网络入侵某电力企业的数字化检测系统，窃取了大量设备检测数据，并对部分数据进行篡改，导致企业在设备维护决策上出现失误，严重威胁电力企业的信息安全和正常生产运营^[8]。

（三）设备成本较高

数字化检测设备由于涉及先进的传感器技术、复杂的算法研发以及高精度的制造工艺，其研发和生产成本相对较高，这直接导致设备价格昂贵。对于一些小型电力企业而言，采购一套完整的数字化检测设备可能需要花费数十万元甚至上百万元，这超出了企业的承受能力。例如，某小型电力工程公司因资金有限，难以承担数字化检测设备的高昂采购费用，不得不继续沿用传统的检测方法，限制了数字化技术在行业内的全面普及。

（四）专业人才短缺

数字化技术的应用需要既懂电力技术又熟悉数字化技术的复合型人才。但目前电力行业这类专业人才匮乏，企业员工大多仅熟悉传统的电力检测技术，对数字化检测设备的操作和维护能力不足。例如，某电力企业新购置了一套数字化绝缘电阻检测设备，由于员工缺乏相关操作知识，在使用过程中频繁出现操作失误，不仅影响了检测效率，还可能因操作不当损坏设备，导致设备无法正常运行，降低了设备的使用效果。

（五）系统兼容性差

部分电力企业已建立了自己的管理信息系统，用于设备管

理、人员调度等日常运营工作。然而，这些管理信息系统与数字化检测系统的兼容性不佳，数据无法有效共享和交互。例如，某电力企业的管理信息系统采用的是 Oracle 数据库，而数字化检测系统采用的是 MySQL 数据库，两者数据格式和接口标准不一致，导致在进行设备检测数据统计和分析时，需要人工手动将检测数据从一个系统导出再导入到另一个系统，大大降低了工作效率，阻碍了数字化技术的全面应用^[9]。

四、数字化技术融入电力安全工器具检测的策略

（一）统一技术标准

相关部门应积极发挥主导作用，组织行业内资深专家，结合国内外先进经验，制定统一的数字化检测技术标准。在标准中明确规范设备的数据接口形式，如统一采用 USB 3.0 接口，以及通信协议，如统一遵循 MODBUS - TCP 协议。通过统一标准，促进不同厂家设备的互联互通和系统集成。例如，在某地区电力安全工器具检测系统建设项目中，严格按照统一标准采购设备，实现了不同厂家设备的无缝对接，极大地推动了数字化技术在该地区电力安全工器具检测领域的广泛应用。

（二）加强数据安全防护

电力企业要高度重视数据安全问题，建立健全数据安全管理体系。在技术层面，采用先进的加密技术对检测数据进行加密存储和传输，防止数据被窃取；设置严格的访问控制权限，只有经过授权的人员才能访问相关数据；部署防火墙等网络安全设备，阻挡外部网络攻击。同时，加强员工的数据安全意识培训，定期开展数据安全知识讲座和案例分析，提高员工对数据安全重要性的认识，防止因员工误操作或违规操作导致的数据泄露。

（三）降低设备成本

鼓励设备厂家加大研发投入，通过技术创新优化生产工艺，降低数字化检测设备的生产成本。例如，采用新型材料替代昂贵的传统材料，改进生产流程提高生产效率。此外，电力企业可通过集中采购的方式，与设备厂家协商争取更优惠的价格；对于一些使用频率不高的设备，还可采用租赁的方式，降低设备采购成本，提高设备的使用效益。如某区域内多家电力企业联合进行数字化检测设备的集中采购，采购价格较单独采购降低了 30%^[10]。

（四）培养专业人才

电力企业应加强与高校、科研机构的合作，开展针对性的培训课程。例如，与高校合作开设电力数字化检测技术专业课程，培养既懂电力技术又掌握数字化技术的复合型人才。同时，定期组织内部员工培训，邀请专家进行现场授课和实操指导，提升员工对数字化检测设备的操作和维护能力。如某电力企业每年组织两次为期一周的数字化检测设备操作培训，员工的操作熟练度和设备维护能力得到显著提升。

（五）优化系统兼容性

对现有的电力企业管理信息系统和数字化检测系统进行优化升级，采用标准化的数据格式和接口。例如，将管理信息系统和数字化检测系统的数据格式统一转换为 JSON 格式，开发通用的

数据接口模块，实现数据的无缝对接和共享。通过优化兼容性，提高工作效率，促进数字化技术的深度应用。如某电力企业经过系统优化后，设备检测数据能够实时同步到管理信息系统，大大减少了人工数据处理的工作量，提高了工作效率。

五、结语

数字化技术融入电力安全工器具检测，为提升电力系统安全运行水平提供了新的途径。虽然目前在应用过程中存在技术标准不统一、数据安全、设备成本高等问题，但通过采取统一技术标准、加强数据安全防护、降低设备成本等一系列策略，能够有效解决这些问题，推动数字化技术在电力安全工器具检测中的广泛应用。这将有助于提高电力安全工器具检测的效率和质量，保障电力作业人员的人身安全，促进电力行业的可持续发展。

参考文献

- [1] 邓薇希. 基于数字化转型形势的电力企业工会工作创新研究 [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（一）. 国网湖南省电力有限公司郴州供电分公司, 2024: 59-61.
- [2] 邓锡国, 石宇, 黄易, 等. 智能化技术在电力运维检修中的应用研究 [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（一）. 国网湖南省电力有限公司长沙供电分公司, 2024: 161-163.
- [3] 赵岩, 葛硕童, 刘朝阳. 数字化赋能电力营销提质增效 [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（三）. 国网河北省电力有限公司涞水县供电分公司, 2024: 255-256.
- [4] 王晓华, 张强. 数字化技术在电力工程设计中的有效运用探讨 [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（三）. 国网河北省电力有限公司唐县供电分公司, 2024: 148-150.
- [5] 赵宁. 新型电力系统的数字化电力设备关键技术研究 [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（二）. 北京国网信通埃森哲信息技术有限公司, 2024: 253-255.
- [6] 王璐. 数字化时代电力企业财务转型路径探究 [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（四）. 国网宁夏电力有限公司宁东供电公司, 2024: 147-149.
- [7] 吴昊洋, 王强, 聂巾帼, 等. “党建 + 无人机”创新数字化应用案例 [C]// 全国电力能源优秀党建典型案例论文集. 国网山东省电力公司桓台县供电公司, 2024: 260.
- [8] 邓文龙. 数字化对于电力通信设备资产全寿命周期水平的提升 [C]// 中国电机工程学会电力通信专业委员会. 中国电机工程学会电力通信专业委员会第十四届学术会议论文集. 国网宁夏电力有限公司信息通信公司, 2024: 272-275.
- [9] 王宇鹏, 张维, 蔡立波, 等. 数字化电网技术在电网规划设计中的应用 [C]// 中国电机工程学会电力通信专业委员会. 中国电机工程学会电力通信专业委员会第十四届学术会议论文集. 国家电网有限公司华北分部, 2024: 286-288.
- [10] 丛犁, 李佳, 黄成斌, 等. 基于数据驱动的电力通信调度管控技术研究及应用 [C]// 中国电机工程学会电力通信专业委员会. 中国电机工程学会电力通信专业委员会第十四届学术会议论文集. 国网吉林省电力有限公司信息通信公司, 2024: 294-298.

新能源电力项目全生命周期的环境影响与管理对策

李琨

吉林吉电新能源有限公司, 吉林 长春 130000

摘要： 新能源电力项目在推动能源转型的同时，其全生命周期的环境影响备受关注。项目建设阶段，施工扬尘、噪声及土地扰动会破坏生态；运营阶段，设备产生的电磁辐射、废旧组件处置不当会污染环境。为此，需强化全流程管理。通过优化选址，运用低尘施工工艺，减缓建设阶段的环境冲击；建立产品碳足迹管理体系，对退役设备进行规范回收和高值化利用，降低运营阶段的污染风险。同时，依托“新能源云”等平台开展全生命周期管理，健全环境监管机制，助力新能源电力项目与生态环境协调发展。

关键词： 新能源电力项目；全生命周期；环境影响；管理对策

Environmental Impact and Management Strategies for the Whole Life Cycle of New Energy Power Projects

Li Kun

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

Abstract： While promoting energy transformation, the environmental impact of new energy power projects throughout their entire lifecycle has attracted much attention. During the project construction phase, construction dust, noise, and land disturbance can damage the ecology; During the operation phase, electromagnetic radiation generated by equipment and improper disposal of waste components can pollute the environment. Therefore, it is necessary to strengthen the management of the entire process. By optimizing site selection and utilizing low dust construction techniques, the environmental impact during the construction phase can be mitigated; Establish a product carbon footprint management system, standardize the recycling and high-value utilization of retired equipment, and reduce pollution risks during operation. At the same time, relying on platforms such as the "New Energy Cloud" to carry out full lifecycle management, improve environmental supervision mechanisms, and assist in the coordinated development of new energy power projects and the ecological environment.

Keywords： new energy power projects; full lifecycle; environmental impact; management countermeasures

引言

全球对气候变化关注度上升，传统化石能源逐渐枯竭，发展新能源电力成为各国能源转型、应对气候变化的重要举措。新能源电力项目比传统火电项目更清洁、低碳、可再生，能减少温室气体排放，改善能源结构。但新能源电力项目从规划到退役的全过程，会对生态环境产生影响。研究新能源电力项目环境影响并制定管理对策，有重要现实意义。既能推动新能源电力产业发展，降低其对环境的负面影响，实现经济与环保双赢，又能完善环境管理措施，提高项目可持续性，保障项目长期稳定运行。本文基于全生命周期理论，分析新能源电力项目各阶段环境影响，提出管理对策，为行业发展提供参考。

一、新能源电力项目全生命周期概述

（一）新能源电力项目分类

新能源电力项目类型多样，包括太阳能、风力、水能、生物质能和地热能发电等。太阳能发电项目用太阳能电池板将太阳能转化为电能，按安装方式分集中式光伏电站和分布式光伏发电系

统。风力发电项目通过风力发电机将风能转化为电能，按选址分陆上风电和海上风电。水能发电项目靠水流能量推动水轮机旋转发电，分大型、中型、小型水电。生物质能发电项目以生物质为原料转化为电能，常见原料有农作物秸秆、林业废弃物和畜禽粪便等。地热能发电项目利用地下热能产生蒸汽驱动汽轮机发电^[1]。

（二）新能源电力项目全生命周期阶段划分

基于全生命周期理论，新能源电力项目分规划设计、建设施工、运营维护和退役拆除四个阶段。规划设计阶段是项目起点，包括可行性研究、选址选线、规划布局 and 环境影响评价等工作，这一阶段的决策对后续阶段环境影响起决定性作用。建设施工阶段是项目实施阶段，包括场地平整、基础建设、设备安装等施工活动，会产生扬尘、噪声、废水和固体废物等污染物，直接影响周边环境。运营维护阶段是项目长期运行阶段，包括设备运行管理、维护检修和能源生产等活动，这一阶段产生污染物相对较少，但设备运行仍可能影响环境。退役拆除阶段是项目终结阶段，包括设备拆除、废物处置和土地复垦等工作，处理不当会造成二次污染^[9]。

二、规划设计阶段环境影响与管理对策

（一）环境影响分析

1. 选址选线的生态影响

新能源电力项目选址选线对生态环境影响大。以风力发电项目为例，若选址在鸟类迁徙通道、野生动物栖息地或生态脆弱区，会阻碍鸟类迁徙，干扰野生动物栖息繁殖，破坏生态系统平衡。太阳能发电项目若占用大量耕地或林地，会导致土地资源不合理利用，影响农业生产和生态植被生长。输电线路选线若穿越自然保护区、风景名胜区等敏感区域，会破坏这些区域的生态景观，影响其生态功能和美学价值^[9]。

2. 规划布局的环境风险

规划布局不合理会带来环境风险。比如，光伏电站组件布局不当，会影响周边地区光照条件，抑制植被生长，影响生态系统稳定性。电力设施集中布局会增加火灾、爆炸等安全事故风险，一旦发生事故，会给项目和周边环境、居民生命财产安全造成严重损失。项目排水系统规划不合理，会导致雨水积聚，引发内涝等环境问题。

（二）管理对策

1. 科学开展环境影响评价

环境影响评价是规划设计阶段的重要环节。通过科学评价，能全面识别项目环境影响，为项目决策和规划提供依据。开展评价时，要考虑项目特点和周边环境敏感性，用科学合理的评价方法和指标体系，全面深入分析项目生态影响、环境风险等。还要广泛征求环保专家、当地居民和相关利益者的意见，保证评价结果客观公正^[10]。

2. 优化项目选址与布局

项目选址和布局时，要考虑生态环境保护要求，尽量避开生态敏感区、自然保护区和风景名胜区等重要生态区域。对于风力发电项目，要通过鸟类迁徙监测和野生动物栖息地调查，合理选择风机位置，避免影响鸟类和野生动物生存环境。太阳能发电项目要优先利用未利用地和废弃土地，减少对耕地和林地的占用。在项目布局上，要根据地形、地貌和气候条件，合理规划电力设施布局，优化输电线路走向，降低项目对生态景观的影响，减少环境风险。

三、建设施工阶段环境影响与管理对策

（一）环境影响分析

1. 施工扬尘与噪声污染

建设施工过程中，场地平整、土方开挖、物料运输等活动会

产生大量扬尘，降低空气质量，影响周边居民健康，损害周边植被和生态环境。施工过程中使用的挖掘机、装载机、起重机等机械设备会产生高强度噪声，干扰周边居民生活和工作，长期暴露在高噪声环境中，会损害人体听力和神经系统^[11]。

2. 废水与固体废物污染

施工过程会产生大量废水，包括施工废水和生活污水。施工废水含泥沙、悬浮物和石油类污染物，未经处理直接排放会污染水体，影响水生生物生存环境。生活污水含有机物、氮、磷等污染物，不达标排放会导致水体富营养化，引发水华等环境问题。施工过程还会产生大量固体废物，如建筑垃圾、废弃土方等，随意堆放会占用土地资源，污染土壤和地下水。

（二）管理对策

1. 强化施工期环境监管

建立施工期环境监管制度，加强对施工单位的监督管理。环保部门要加大对施工场地的巡查力度，定期检查施工单位环保措施落实情况，严肃查处违反环保规定的行为。要求施工单位建立施工期环境管理台账，记录施工过程中的环境影响和环保措施执行情况，以便对施工期环境管理进行追溯和评估。

2. 落实污染防治措施

施工单位要采取有效污染防治措施，减少施工过程中的污染物排放。对于施工扬尘，要采取洒水降尘、覆盖物料、设置围挡等措施控制扬尘产生。对于施工噪声，要合理安排施工时间，选用低噪声设备，对高噪声设备采取降噪措施，如安装消声器、设置隔音屏障等。对于施工废水和生活污水，要建设污水处理设施，处理达标后排放。对于固体废物，要分类收集、妥善处置，建筑垃圾尽量回收利用，废弃土方按规定填埋或堆放^[10]。

四、运营维护阶段环境影响与管理对策

（一）环境影响分析

1. 设备运行的环境影响

新能源电力项目运营维护阶段，设备运行会对环境产生影响。以风力发电项目为例，风机叶片转动会产生噪声，干扰周边居民生活。风机运行过程可能伤害鸟类，在鸟类迁徙季节，风机叶片高速转动可能导致鸟类撞击死亡。太阳能发电项目中，光伏组件使用过程会产生电子垃圾，电子垃圾含重金属和有害物质，处理不当会污染土壤和地下水。

2. 能源消耗与碳排放

新能源电力项目虽属清洁能源项目，但运营维护过程仍会消耗能源，产生碳排放。设备维护检修需要电力和燃油，项目管理和运营也会消耗能源。随着设备老化和性能下降，能源消耗和碳排放会增加。

（二）管理对策

1. 加强设备维护与管理

建立设备维护管理制度，定期对设备进行维护检修，确保设备正常运行，降低设备运行对环境的影响。对于风力发电项目，要定期检查和维护风机，及时更换损坏叶片，调整风机运行参数，降低噪声和鸟类撞击风险。对于太阳能发电项目，要定期清洗光伏组件，检查设备电气性能，及时更换老化组件，减少电子垃圾产生。

2. 优化运营管理模式

通过优化运营管理模式，降低项目能源消耗和碳排放。利用智能化技术实时监测和控制设备运行，根据能源需求和设备性能，合理调整设备运行状态，提高能源利用效率。加强项目能源管理，制定合理的能源消耗指标，对项目能源消耗进行量化考核，促进能源节约利用。还可以通过购买绿色电力证书等方式，抵消项目运营过程中产生的碳排放^[7]。

五、退役拆除阶段环境影响与管理对策

（一）环境影响分析

1. 拆除过程的污染排放

在新能源电力项目的退役拆除阶段，设备拆除会造成多种污染问题。像液压破碎机、履带式起重机这类大型拆除机械设备，在运转时会产生超过 90 分贝的噪声。而且，设备运转时的强烈振动，可能破坏周边建筑物的地基结构，影响建筑物的稳定性，严重干扰居民的日常生活。在拆除过程中，切割和破碎设备及材料会产生大量扬尘。小粒径粉尘会在空气中长时间悬浮，危害人体呼吸系统。部分设备和材料含有铅、汞等化学物质，如果燃烧或处理不当，会释放二氧化硫、氮氧化物等有害气体，让空气质量变差。拆除产生的固体废物也会造成污染。金属类固体废物长期堆放会生锈腐蚀，其中的重金属，如镉、铬会渗入土壤。塑料、玻璃等垃圾自然降解需要数十年甚至上百年，不仅会占用大量土地资源，如果处置不当，还会严重污染土壤和地下水。

2. 土地复垦与生态恢复问题

新能源电力项目建设时，因为工程需要，会占用大量耕地和林地。大规模的土地平整和设施建设，改变了原有的地形地貌。项目退役拆除后，如果不及时开展土地复垦和生态恢复工作，被破坏的土地会长期荒废，造成土地资源的浪费。这不仅降低了土地利用效率，还会引发一系列生态环境问题，比如水土流失加剧、土壤肥力下降、生物多样性减少。土地复垦和生态恢复工作面临不少挑战。一方面，需要投入大量资金用于土壤改良、植被种植，以及配套水利设施建设。另一方面，由于当地气候干旱、土壤贫瘠，植被生长缓慢，生态系统恢复时间长，短期内很难恢复到项目建设前的生态水平^[8]。

（二）管理对策

1. 制定科学的退役拆除方案

在项目退役拆除前，要组建由环境工程、机械工程、土木工程等领域专家组成的专业团队。专家团队要全面勘察项目现场，收集场地地质、周边环境敏感点等信息。结合项目特点和周边环境敏感性，制定科学、详细的退役拆除方案。方案要明确拆除的先后顺序，优先拆除对环境影响较大的设备。采用无损拆除工艺等先进拆除技术，使用低噪声、低振动设备，比如静音破碎锤，最大程度降低拆除过程中的污染排放和环境影响。此外，要充分预估拆除过程中可能出现的突发环境事件，如有害气体泄漏、火灾等。制定针对性的应急预案，明确应急响应流程、责任分工和物资储备等内容，确保在事件发生时能够迅速、有效地应对。

2. 规范拆除废物处置

拆除过程中，要按照固体废物类别，设立专门的分类收集区域，对金属、塑料、玻璃等进行分类收集。设置清晰的分类标识，

方便拆除人员操作。对于可回收利用的材料，比如废旧钢材、铜导线等，通过正规回收渠道，送到专业回收企业，实现资源再利用，减少资源浪费。对于含有有害物质的电子垃圾、废旧电池等不可回收利用的废物，要严格按照危险废物管理规定，选择有专业资质的处置单位进行处理。在废物转移过程中，严格执行危险废物转移联单制度，详细记录废物的来源、去向、数量等信息。利用信息化手段，实现处置全过程可追溯，防止二次污染^[9]。

3. 推进土地复垦与生态恢复

根据土地复垦和生态恢复要求，组织专业人员对项目场地进行全面评估，收集土壤类型、气候条件等数据，制定详细的土地复垦和生态恢复计划。明确复垦和恢复目标，比如恢复土地原有的农业生产功能，或者打造生态景观。采取针对性的复垦措施，平整土地，改善土壤结构，添加有机肥料来提高土壤肥力。根据当地气候和土壤条件，选择耐旱、耐贫瘠的植被品种进行种植，构建多样化的生态群落。同时，建立严格的监督管理机制，定期对复垦和恢复工作进行检查和评估。利用卫星遥感、实地监测等手段，确保复垦和恢复工作高质量推进，实现土地资源的可持续利用和生态环境的良性发展^[10]。

六、结语

新能源电力项目作为实现能源转型和应对气候变化的重要手段，在推动经济发展和环境保护方面发挥着重要作用。然而，项目从规划设计到退役拆除的全生命周期过程中，会对生态环境产生不同程度的影响。通过对新能源电力项目全生命周期各阶段的环境影响进行系统分析，并采取科学有效的管理对策，可以最大程度地降低项目对环境的负面影响，实现新能源电力项目与生态环境的协调可持续发展。未来，随着新能源技术的不断发展和环境管理要求的日益提高，需要进一步加强对新能源电力项目环境影响的研究，不断完善环境管理措施，推动新能源电力产业的高质量发展。

参考文献

- [1]王艳双,陈莉莉,郭东阳,等.风电项目全生命周期环境影响分析及对策建议[J].能源,2023,(07):76-80.
- [2]缪莉娜.基于全生命周期的电力项目投标风险评价研究[D].江苏省:南京邮电大学,2023.DOI:10.27251/d.cnki.gnjdc.2023.001532.
- [3]付东坡,韩光远,周全.基础设施项目全生命周期成本管控与财务资金管理及其对策研究——以重庆XX轨道项目为例[C].中国建设会计学会第十五次(2022年度)论文集.2023:1972-1993.DOI:10.26914/c.cnkihy.2022.064181.
- [4]刘雯静,张素香,孙韬,等.2023年度能源电力领域国家科学技术奖获奖项目分析[C]//中国电机工程学会电力信息化专业委员会.2024电力行业信息化年会论文集.国家电网有限公司信息通信分公司;国网安徽省电力有限公司电力科学研究院;国网河南省电力公司电力科学研究院;中国电力科学研究院有限公司;中国电机工程学会,2024:20-23.
- [5]何所畏.双碳视角下电力企业新能源项目投资风险管控研究[J].商业观察,2024,10(32):101-104.
- [6]邸彬,陈天骥.新能源电力项目招标采购的合规性分析[J].中国招标,2024,(09):169-172.
- [7]翟红.新能源电力企业档案管理措施探讨[J].现代企业文化,2024,(25):22-24.
- [8]喻敏华.新发展理念下电力能源集团数字工程项目管理平台研究与设计[J].项目管理技术,2024,22(08):127-132.
- [9]邵宾.新能源电力项目融资难题与解决策略分析[J].企业观察家,2024,(06):80-83.
- [10]何嘉琪.基于收益法评估的新能源电力项目并购风险分析[J].中国科技投资,2024,(19):28-30.

控制棒动态失步监测逻辑异常问题研究、应对及改进

李瑞豪

中广核核电运营有限公司，广东 深圳 518124

摘 要： 某核电机组在升降功率提插控制棒期间多次闪发控制棒动态失步报警，且该报警多发生在功率棒组和温度棒组动作期间。报警闪发时，仪控人员检查对应棒组棒位指示无明显异常。报警闪发后通过分析当时棒组指令棒位和实际棒位测量情况，结合 KIC（集中数据采集系统）中历史数据分析，认为报警所涉及棒组中未真实发生失步情况。通过历次报警数据和信息收集与分析，认为控制棒动态失步报警逻辑设计存在缺陷。针对该问题进行原因分析和研究后，项目组制定了应对方案和改进方向，使运行人员在升降功率期间触发该报警时能配合仪控保驾人员按既定预案从容应对，大大降低了机组升降功率期间的不确定性因素。

关 键 词： 控制棒；动态失步；棒组；棒位测量；触发器

Research, Response and Improvement of Dynamic Step Monitoring of Control Rod

Li Ruihao

CGN Nuclear Power Operation Co., LTD. Shenzhen, Guangdong 518124

Abstract： In a nuclear power unit, during the lifting power lifting control rod, and the alarm mostly occurs during the action of power rod group and temperature rod group. When the alarm flashes, the instrument and control personnel check the rod position indication of the corresponding rod group for no obvious abnormality. After the alarm flash, by analyzing the rod position and the actual rod position measurement of the rod group, combined with the historical data analysis in KIC (centralized data acquisition system), it is considered that there is no real step loss in the rod group involved in the alarm. Through the collection and analysis of alarm data and information, the logic design of dynamic step of control bar is defective. After the cause analysis and study of the problem, the project team formulated the response plan and improvement direction, so that the operators could cooperate with the instrument control guard personnel according to the established plan when triggering the alarm during the lifting power, which greatly reduced the uncertainty factors during the lifting power of the unit.

Keywords： control rod; dynamic lost step; rod group; rod position measurement; trigger

引言

某核电机组在某次大修下行降功率期间，主控出现控制棒动态失步报警，功率棒 G22 棒组失步指示灯亮，检查 G22 棒组棒位指示一致。十五分钟后温度棒 R2 棒组动态失步指示灯亮，检查 R2 棒组各棒位显示正常。仪控保驾人员分析认为 G22、R2 棒组未出现真实失步，分析与控制棒动态失步报警逻辑设计存在缺陷有关，仪控人员复位后报警消失。约三小时后 R2 棒组再次触发控制棒动态失步报警。本次下行期间出现动态失步问题在该电站曾多次出现，仪控人员在多次大修上、下行提插控制棒期间进行了逻辑及数据库运行监测，对此典型问题进行了分析，总结出了问题出现的原因，并给出了现阶段问题的应对方法及改进方向。

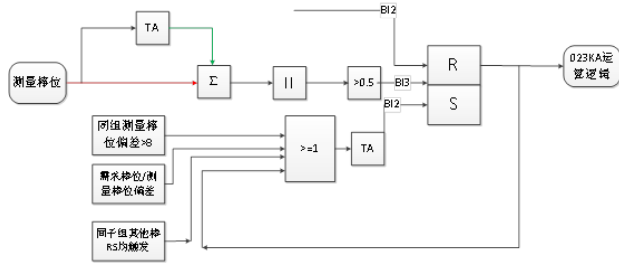
一、控制棒动态失步报警逻辑介绍

控制棒束动态失步监测报警组态逻辑在 CCS（堆芯棒位控制系统）中实现，仅对 N/G/R 棒（功率棒和温度棒）进行监测，S 棒不进行监测^[1]。

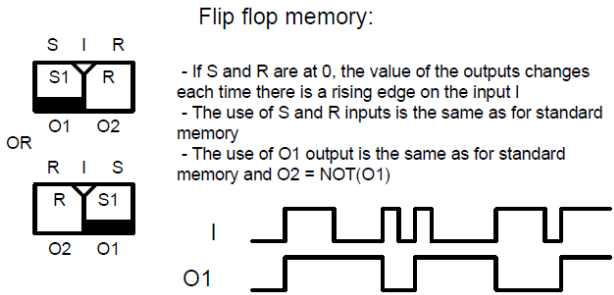
如图 1，在某子棒组 4 束棒动棒过程中，如果其中某束棒的测量棒位与上个程序周期（50ms）监视到的测量棒位相比偏差大于 0.5 步，则判断测量棒位出现了翻转（实测棒位精度为 8 步，翻转就是有 8 步的变化，也称作棒位切换点），经过两个程序周期后，使得该棒束 RS 触发器的触发端 BI3 变为逻辑 1（该逻辑 1 仅维持

作者简介：李瑞豪（1988.03-），男，汉族，籍贯：广东深圳，工程师，大学本科，从事核电厂仪控运维工作。

1个程序周期)，这时该棒的RS触发器输出被置1^[2]。这里用到的RS触发器为FLIP-FLOP触发器，与普通的触发器相比多了个中间的触发端，其逻辑图见图2，在R/S端均为0的情况下，RS触发器输出就跟随触发端进行变化，在触发端有上升沿，则触发器输出进行翻转。其他三束棒如果出现棒位的翻转，则各自的RS触发器输出均被置1^[3]。

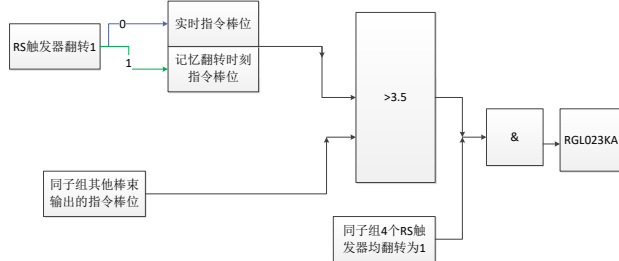


>图1 棒位变化触发器原理图



>图2 FLIP-FLOP触发器逻辑

图3显示了控制棒动态失步报警的触发计算逻辑。在每束棒的RS触发器被置1后，软件记住当时翻转时刻的指令棒位，由于子棒组的四束棒在棒位切换点附近可能会出现有的棒先翻转，有的棒后翻转的情况，因此每束棒的RS触发器输出置1的时间点不完全一样，有先有后，各棒记录的指令棒位也可能不完全一致。在子组四根棒RS触发器输出全部被置1后，软件找出记录到的四个指令棒位中的最大值和最小值，并进行偏差计算，如果偏差大于3.5步则发出动态失步报警^[4]。同时，在四个RS触发器全部为1后将会对四个RS触发器的S端置1，使得四个RS触发器的输出被复位。等待下一个棒位切换点再进行动态失步的监测^[5]。



>图3 动态失步计算以及报警触发原理图

二、故障原因分析

针对引言中所述两次动态失步报警触发过程分析，查询KIC（集中数据采集系统）历史趋势，第一次出现控制棒动态失步报警时G22棒组指令棒位从127步降至125步，所有子组棒的测量棒位从128步插至120步。随后闪发R2棒组动态失步报警时，R2指令

棒位从221步至222步，R棒组F10测量棒位从216步至224步，同子组其他棒测量棒位未见变化。第二次出现控制棒动态失步报警时，R2指令棒位从213步降至211步，K06先前在指令棒位为214步时就已经从216步切换到208步，在其他棒从216步切换到208步时闪发报警。

该电站在大修下行期间为了监测控制棒动态失步报警的成因，仪控人员在SU端（棒控系统服务端）制作脚本对功率棒和温度棒的棒位以及各棒组的RS触发器状态进行了监测，其中G22棒组和R2的第2次动态失步报警被监测到，经过分析确认动态失步报警的触发与部分棒组RS触发器的不合理输出有关。

为了分析大修下行G22棒组出现动态失步报警的数据，将对应棒组各棒束的测量棒位变化（可以理解为图1中的BI3（实际BI3触发需要延时2个程序周期））、RS触发器输出状态、指令棒位及报警触发情况进行逐一对比^[6]。

选取G22子棒组在指令棒位133~135步的提棒过程，四个触发器状态分别是：RS2.1为0，RS2.2/RS2.3/RS2.4均为1。G22的第一束棒位为136步，还未翻转到128步，而其他三个棒均翻转至128步，因此RS2.1为0，而其他RS为1属于正常情况。之后，G22.1棒的棒位指示发生了变化，从第136步翻转到了128步。系统则认为棒束正常翻转，因此将RS2.1置位，并进行动态失步的计算和输出，经计算这个时候不存在动态失步，没有触发报警。系统在处理完动态失步逻辑后将四个RS输出全部复位至0。不巧的是，在系统进行动态失步计算和复位RS输出的过程中，从监测的第8组数据看，G22.1棒的棒位又从128步切换到了136步，而这个翻转使得棒位变化信号再次出现了1，本应导致触发器状态的变化，但软件正在进行动态失步的报警处理以及RS的复位过程，该BI3的1信号被软件给“忽略了”。

从脚本的时序上看，G22.1的棒位从136步到128步，再从128步到136步，仅仅250ms，而控制棒移动的最高速度为72步/分，大约833ms（此处指在最高棒束下控制棒动作一步至少需要833ms）^[7]，因此该棒并没有发生真正的动作，而仅仅是棒位测量的波动。该波动是由于棒位测量在棒位切换点附近，棒位探头反馈电压与阈值非常接近，微小的反馈电压波动就会导致棒位出现来回切换，这时一般再多提/插一步控制棒，使得棒位远离棒位切换点，棒位波动的情况就会消失，这是棒位测量探头的特性导致的^[8]，各个CPR机组均存在同样的现象^[9]。

CCS软件是每个程序周期进行棒位实时处理与计算的，如果能够对棒位的短时波动（也可以称作“抖动”）进行滤除的话，则正确的RS触发器状态应该为括号中的状态。经过分析，从检测数据第5组开始，如果RS触发器为正常的状态，G22棒组将在后续的提插棒过程中不会产生动态失步报警。因此，动态失步报警的隐患是这个时刻埋下的。

实际上，CCS组态使用FLIP-FLOP类型的触发器也具备一定的棒位“防抖”功能。如果在其他三个RS不同时为1的情况下，G22.1的棒位发生了抖动，从136翻转到128，RS触发器被置1，250ms后，从136又翻转到128，RS触发器会被第二次脉冲给复位到0，因此这种情况下RS触发器的状态抖动也不会真正影响到动态失步逻辑，所以也不是任何棒位的抖动都可能导致动态失步报警的误闪发。只有在其他三束棒的RS均被置1，且本棒束又出现了棒位抖动的特殊情况下才会导致处理逻辑的错误。

采取同样的方式方法分析 R2棒第二次闪发动态失步的情况。经过分析,从脚本开始记录的时候,R2.1/2.2/2.4的RS触发器的状态就存在异常,应该为1(而实际为0),判断出现这种异常的原因和上面G22的情况类似,由于某束棒的测量棒位的抖动导致。随着各棒组随后的棒位切换,RS输出状态的变化,最后在监测数据的29组导致系统误闪发动态失步报警。

同时我们关注到监测数据的第30组,在4个RS触发器刚刚置1后,软件系统正在进行动态失步计算和RS复位操作过程中,第3束棒的棒位出现了翻转,这次系统又在“忙碌”中将这次的翻转给“忽略”掉了,但这次的“忽略”又鬼使神差的未再次使得RS触发器状态出现错误,所以之后的R2棒没有再次闪发动态失步报警。

综上所述,确定控制棒动态失步报警出现的原因有以下三点:

- 1) 目前CCS逻辑能够对真正的动态失步进行监测和报警触发;
- 2) CCS逻辑还不能完全避免在出现棒位测量“抖动”时RS的错误翻转,但是出现错误翻转的概率也不是很大,只有在某些比较极端的状态下才会偶尔出现;
- 3) CCS逻辑在动态失步计算和RS复位过程中,针对BI端也出现1的情况下,软件底层逻辑存在某种“竞争”,RS触发器状态可能不定,导致RS触发器不能正确翻转或者错误翻转。

三、动态失步报警闪发对机组的影响

控制棒动态失步报警仅对功率棒和温度棒(G棒组和R棒组)进行监测,停堆棒组不进行监测。如果在动棒过程中出现了动态失步报警,将对机组和操纵员造成以下影响:提示操纵员动棒过程中可能有棒存在滑步等异常,如果控制棒真实失步会造成堆芯中子通量发生畸变;若达到运动中失步阈值(一束棒失步大于12步),机组将产生随机第一组IO^[9]。

动态失步报警不参与棒控逻辑,不影响动棒/落棒功能。

报警出现后操纵员需要执行相关程序对控制棒状态进行诊

断,专业需现场核查失步情况和手动复位报警,可能会暂时停止自动或操纵员手动动棒操作。出现控制棒动态失步报警,将影响操纵员对机组监控、判断和对异常的响应^[10]。

该电站两台机组历史上均多次出现过动态失步报警,经检查均为误报警,不存在真正的失步的情况。

四、现状评价、应对措施及改进方向

控制棒动态失步报警在动棒期间可能误触发,触发后需核实测量棒位是否有偏差,如测量棒位一致(测量棒位相差不超过8步),则是误发报警,由仪控保驾人员复位报警即可,动态失步报警不影响控制棒手自动操作功能。在启停机操作控制棒前,仪控保驾人员可以在SU中检查各棒束的RS触发器输出的状态,如存在错误的情况下,予以复位和纠正,减少误报警的概率。

当前动态失步报警误发原因与CCS组态设计缺陷有关,报警误发影响可控,风险低。解决该报警误触发的问题需厂家修改CCS组态并进行软件的测试,目前项目组已将历史起停机过程中记录的该报警触发时脚本数据发给厂家进行研究和确认,并建议厂家对棒位测量通道进行“防抖”处理以及评估FLIP-FLOP触发器在S端和I端同时出现1的情况下的执行语句“竞争”的问题,以期通过厂家针对这两个问题进行进一步软件升级彻底解决该遗留问题。

五、结束语

项目组通过历次报警信息和数据收集与分析,确认了控制棒动态失步报警误触发的原因为组态逻辑设计存在缺陷。针对该问题进行原因分析研究后,项目组制定了针对该问题的应对方案,同时将该报警涉及的逻辑设计缺陷及改进方向告知厂家以便后续进行组态升级。该问题的分析、定位及应对措施的制定,使运行人员在升降功率期间触发该报警时能配合仪控保驾人员按既定预案从容应对,大大降低了机组升降功率期间的不确定性因素。

参考文献

- [1] 楼蕴昊,马一鸣,周宇.方家山核电厂棒位探测器的故障分析及改进措施[J].中国核电,2022,15(5):730-734.
- [2] 黄可东,张英,王华金,等.广东岭澳核电二期工程数字化棒控棒位系统设计[J].核动力工程,2008,29(2):105-109.
- [3] 赖厚晶,陈卫华,姚立民,等.CPR1000棒控棒位系统性能试验研究及开发[J].自动化仪表,2013,34(02):56-60.
- [4] 祝伟健,张建兵,唐龙.基于全数字化棒位测量系统的通道比对分析[J].电子技术应用,2021(047-S01).
- [5] 王兴,高鸣,黄尧.压水堆核电站棒位测量偏差分析及应对[J].电子技术应用,2022,48(S1):5-8.
- [6] 常乐莉,范雪珍,郑云龙.压水堆核电站控制棒位置测量准确性因素研究[J].核电子学与探测技术,2013,33(6):713-716.
- [7] 商静,董威,苟晓龙.CPR1000核电厂棒位指示系统改进建议[J].自动化仪表,2015,36(11):81-84+88.
- [8] CHEN Jianwen,GONG Chengjun.国产棒位系统故障分析及处理措施[J].上海交通大学学报,2019,53(Sup.1):33-44.
- [9] 马旭升.核电站重要仪表测量通道的不确定度计算方法[J].自动化仪表,2012,33(07):43-48.
- [10] 蓝剑,舒芝锋,刘阳,等.核反应堆棒位探测器自动检测装置的设计[J].工业仪表与自动化装置,2024(4):36-41.

动力工程设备腐蚀监测中的电化学分析技术应用实践

王小贺

丹东金山热电有限公司, 辽宁 丹东 118011

摘 要 : 在动力工程领域, 设备腐蚀威胁着运行安全与经济效益。而随着现代化经济与科技的协同发展, 电化学分析技术开始广泛应用于动力学工程设备腐蚀监测工作中, 并发挥出了显著的应用优势。为确保电化学分析技术应用效果, 满足动力工程设备实际防腐监测需求, 本研究深挖电化学分析技术在设备腐蚀监测的实践应用。剖析基于电化学腐蚀原理的监测内核, 如阳极溶解、阴极吸氧反应构建监测机制。详述电位、电流、阻抗噪声测量技术在腐蚀电位、速率、状态监测中的实操要点。探究技术革新、多技术联用及智能化走向, 为动力工程设备腐蚀精准监测筑牢理论与实践根基。

关 键 词 : 电化学分析技术; 动力工程设备; 腐蚀监测

Application Practice of Electrochemical Analysis Technology in Corrosion Monitoring of Power Engineering Equipment

Wang Xiaohe

Dandong Jinshan Thermal Power Co., Ltd. Dandong, Liaoning 118011

Abstract : In the field of power engineering, equipment corrosion threatens operational safety and economic benefits. With the coordinated development of modern economy, science, and technology, electrochemical analysis technology has begun to be widely used in corrosion monitoring of kinetic engineering equipment, demonstrating significant application advantages. To ensure the effectiveness of electrochemical analysis technology and meet the actual corrosion monitoring needs of power engineering equipment, this study explores the practical application of electrochemical analysis technology in equipment corrosion monitoring. It analyzes the monitoring core based on the principle of electrochemical corrosion, such as anodic dissolution and cathodic oxygen absorption reaction to construct a monitoring mechanism. The study details the practical points of potential, current, and impedance noise measurement techniques in corrosion potential, rate, and condition monitoring. It also explores technological innovations, multi-technology combinations, and intelligent trends, laying a solid theoretical and practical foundation for precise corrosion monitoring of power engineering equipment.

Keywords : electrochemical analysis technology; power engineering equipment; corrosion monitoring

引言

在动力工程的宏大版图中, 各类设备持续运转, 为社会发展输送能量。然而, 设备腐蚀宛如隐匿的“杀手”, 悄然侵蚀设备, 缩短使用寿命, 甚至引发安全事故, 大幅增加维护成本。在此种情况下, 腐蚀监测技术的应用和发展, 开始受到动力工程设备领域的广泛关注。由于传统监测手段, 如目视检查、无损探伤等, 难以实时、精准捕捉腐蚀动态, 因此, 腐蚀监测传感技术、动力工程设备材料无损检测技术、电化学分析技术等现代化先进腐蚀监测手段, 开始渐渐走进动力工程领域, 在动力工程设备腐蚀监测中, 得到良好的应用和创新^[1]。其中, 电化学分析技术凭借高灵敏度、实时监测等优势, 宛如一道曙光, 为动力工程设备腐蚀监测开辟新路径。通过电化学分析技术的合理应用, 可对动力工程设备腐蚀情况做到及时、有效地监测。基于此, 电力工程领域和相关研究者需对此项技术做到足够重视, 明确其基本情况和应用优势等, 掌握其在动力工程设备腐蚀监测中的应用机理、应用基础及其作用机制等, 并在不断的实践应用中, 探索该技术的更多应用策略, 寻求其创新和发展方向。如此方可不断提升电化学分析技术的应用效果, 满足现代动力工程设备的实际腐蚀监测需求, 为其腐蚀问题的有效防治提供先进的技术支持^[2]。

一、电化学分析技术及其应用介绍

（一）电化学分析技术简介

电化学分析技术是基于电化学体系内的物质电学性质（包括电流、电位、电量和电阻等）和化学性质之间的关系，实现被测物质定量分析与定性分析的一种先进技术手段。该技术的核心是借助电极反应实现化学信号到电信号的转化，其基本分析方法包括电位分析法、伏安分析法、电导分析法、电解与库伦分析法、电化学阻抗谱分析法等^[3]。

（二）电化学分析技术的主要应用方向

电化学分析技术具有灵敏度高、选择性好、响应速度快、可原位监测等应用优势，因此该技术在当前的应用领域也十分广泛。在化学与材料科学领域中，该技术可用于成分分析、材料表征分析、合成与制备等方向。在环境科学与监测领域中，该技术可用于污染物检测、水质分析、大气污染监测等方向。在能源领域中，该技术可用于电池研究、电催化、超级电容等方向^[4]。在生物科学与生物技术领域中，该技术可用于生物检测、药物分析、医疗设备等方向。在工业与质量控制中，该技术可用于金属腐蚀监测、电镀与冶金、食品与化工等方向。在科研与基础研究中，该技术可用于反应机理研究、纳米技术研究等方向^[5]。

（三）电化学分析技术在动力工程设备腐蚀监测中的应用现状

在当前的动力工程设备腐蚀监测中，电化学分析技术已形成多个层次与维度的应用体系。其核心价值在于，实际应用中，该技术可根据实时电信号，对动力工程设备的腐蚀过程及其动态演变进行捕捉，从而为此类设备的安全运行提供重要数据支持^[6]。通过电化学分析技术的合理应用和创新，以及相关技术标准的不断完善，使动力工程设备腐蚀监测效果实现了显著提升，并为其安全、稳定运行提供良好保障。

二、电化学分析技术用于动力工程设备腐蚀监测的原理基础

（一）基于电化学腐蚀原理的监测机制

动力工程设备多为金属材质，在潮湿、含电解质的环境中，易发生电化学腐蚀^[7]。以钢铁设备为例，铁原子在阳极区域失去电子，发生氧化反应生成亚铁离子，电子通过金属内部传导至阴极区域，在阴极，氧气获得电子与水反应生成氢氧根离子。这一过程形成腐蚀电池，伴随电流产生。电化学分析技术正是利用这一原理，通过监测电流、电位变化，推算设备腐蚀速率与程度^[8]。例如，采用线性极化法，在金属表面施加微小极化电位，测量极化电流，依据极化电阻与腐蚀电流的反比关系，快速计算腐蚀速率，为设备腐蚀监测提供量化依据。

（二）电化学分析技术中电位测量原理在腐蚀监测的应用基础

电位测量是电化学分析技术的重要手段。金属在电解质溶液中会形成腐蚀电位，该电位与金属材质、溶液成分、温度等因素相关。通过参比电极与工作电极（待测设备）组成电化学池，测量两者间电位差，可获取设备腐蚀电位。当设备发生腐蚀时，腐

蚀电位会发生变化^[9]。如在酸性环境中，钢铁设备腐蚀加剧，腐蚀电位负移。依据能斯特方程，电位变化与溶液中离子浓度对数呈线性关系，据此可分析腐蚀反应进程，判断设备腐蚀趋势，为及时采取防护措施提供关键信息^[10]。

（三）电流与阻抗测量原理在动力工程设备腐蚀监测的作用机制

电流测量可直接反映腐蚀反应速率。在腐蚀过程中，阳极溶解产生的电流与腐蚀速率成正比。采用恒电位仪控制工作电极电位，测量流过的电流，能精确测定腐蚀电流密度，进而得出腐蚀速率^[11]。阻抗测量则是向电化学池施加小幅度交流信号，测量电极系统的阻抗响应。设备腐蚀时，其表面形成的腐蚀产物膜、氧化膜等会改变电极阻抗。通过分析阻抗谱图，可获取膜层电阻、电容等信息，评估腐蚀产物膜的防护性能，判断设备腐蚀状态，如膜层电阻降低，表明腐蚀产物膜受损，设备腐蚀风险增加^[12]。

三、电化学分析技术在动力工程设备腐蚀监测中的实践应用

（一）电位测量技术在动力工程设备腐蚀电位监测的实践

在动力工程设备腐蚀电位监测实践中，常采用饱和甘汞电极、银/氯化银电极作为参比电极，与设备金属表面构成测量回路^[13]。例如，在火电厂的循环水系统中，对碳钢材质的管道进行腐蚀电位监测。定期将参比电极放置在管道附近的循环水中，连接高阻抗电位计，测量管道与参比电极间电位差。绘制电位-时间曲线，若电位持续负移，提示管道腐蚀加剧。通过设置电位预警值，当电位达到预警范围，及时排查原因，采取添加缓蚀剂、调整水质等防护措施，有效预防管道腐蚀穿孔，保障循环水系统稳定运行^[14]。

（二）电流测量技术用于动力工程设备腐蚀速率监测的应用

电流测量技术广泛应用于动力工程设备腐蚀速率监测。以石油化工企业的储罐为例，利用电化学腐蚀监测仪，采用极化电阻法测量储罐壁金属的腐蚀电流。在储罐壁表面安装工作电极、参比电极与辅助电极，组成三电极体系。仪器向工作电极施加小幅度极化电位，测量极化电流，根据极化电阻与腐蚀电流的关系，快速计算出腐蚀速率^[15]。定期监测并记录腐蚀速率数据，建立腐蚀速率数据库。当腐蚀速率超过允许值，及时安排储罐维护，如进行表面涂层修复、更换腐蚀严重部位，确保储罐安全运行，避免物料泄漏引发安全事故^[16]。

（三）阻抗测量技术在动力工程设备腐蚀状态评估的实践操作

阻抗测量技术为动力工程设备腐蚀状态评估提供详细信息。在水电厂的金属闸门腐蚀状态评估中，运用电化学阻抗谱（EIS）技术。将工作电极固定在闸门表面，参比电极与辅助电极置于附近水体中，组成电化学测试系统。向系统施加频率范围为 10mHz - 100kHz 的正弦交流电压信号，测量不同频率下的阻抗响应，得到阻抗谱图。通过等效电路拟合分析，获取闸门表面氧化膜电阻、电容、双电层电容等参数。若氧化膜电阻降低、双电层电容增大，表明氧化膜受损，闸门腐蚀程度加深，据此制定针对性修

复方案，如进行防腐涂层重涂、阴极保护系统优化，保障闸门结构安全与使用寿命^[17]。

（四）噪声测量技术在动力工程设备腐蚀过程实时监测中的实践应用

噪声测量技术可对动力工程设备的具体腐蚀过程做到实时监测。通过两个工作电极，对动力工程设备腐蚀过程中产生的自然电位噪声与电流噪声进行测量，通过功率谱密度、均方根值等统计分析法，对动力工程设备腐蚀类型及其演化趋势做出有效评估。以燃煤电厂中的锅炉水碳钢冷却管壁腐蚀监测为例，将金属电极用作工作电极，固定安装在锅炉水回路上，对其实施噪声监测。若发现噪声信号均方根值骤增，且功率谱中有高频成分出现，则表明设备可能存在点状腐蚀或裂缝腐蚀情况。再结合监测到的噪声电阻变化情况，可对设备腐蚀加速区域做出准确分析，以便及时发出相应的腐蚀预警，为运维人员及时调节锅炉水 pH 或缓蚀剂添加等工作的开展提供支持，以免设备腐蚀情况的进一步发展，确保设备的安全、稳定运行^[18]。

四、电化学分析技术在动力工程设备腐蚀监测中的发展趋势

（一）与其他监测技术融合在动力工程设备腐蚀监测的发展趋势

与其他监测技术融合是未来发展趋势。将电化学分析技术与无损检测技术，如超声检测、红外热成像技术结合。超声检测可探测设备内部腐蚀缺陷，红外热成像能监测设备表面温度分布，反映腐蚀部位热量变化，与电化学分析技术获取的腐蚀电位、电流、阻抗信息相互印证，实现对设备腐蚀的全方位、多层次监测。而且，融合机器学习算法，对多源监测数据进行分析处理，提高腐蚀预测准确性，提前预警设备腐蚀风险^[19]。

（二）电化学分析技术的创新与改进方向

电化学分析技术正朝着更高灵敏度、更精准测量方向创新改进。研发新型电极材料，如基于纳米技术的修饰电极，可显著提高电极对腐蚀相关物质的选择性与灵敏度。优化测量仪器，采用数字化、智能化技术，降低测量噪声，提高测量精度与稳定性。例如，开发基于微机电系统（MEMS）技术的微型电化学传感器，体积小、响应快，可实现对设备局部腐蚀的原位、实时监测，为动力工程设备腐蚀监测提供更精细、准确的数据。

（三）基于电化学分析技术的动力工程设备腐蚀监测智能化发展前景

智能化发展前景广阔。构建基于物联网的腐蚀监测系统，将分布在不同区域的电化学传感器连接至网络，实现数据实时传输与远程监控。利用大数据分析技术，对海量监测数据挖掘分析，建立设备腐蚀模型，预测腐蚀发展趋势^[20]。例如，通过分析不同工况下设备腐蚀数据，结合环境参数、运行时间等因素，预测设备剩余使用寿命，为设备维护计划制定提供科学依据，实现动力工程设备腐蚀监测的智能化、自动化管理。

五、结论

电化学分析技术在动力工程设备腐蚀监测中展现出巨大潜力，从原理层面提供精准监测依据，在实践中实现腐蚀电位、速率、状态的有效监测。当前，设备复杂工况对技术适应性提出高要求。尽管面临技术创新、融合、智能化发展等挑战，但凭借持续探索，定能突破困境。未来，该技术将在动力工程设备腐蚀监测中发挥关键作用，保障设备稳定运行，推动行业安全、高效发展。

参考文献

[1]余卫华,李杰,李江文,等.化学分析技术在冶金表面分析中的应用[J].冶金分析,2023,43(08):1-9.
[2]陈瑞程,雷庆关,樊玮洁.电化学技术对混凝土显微硬度的影响分析[J].安徽建筑,2023,30(04):159-161.
[3]周正,徐仕先,丁卫华,等.电化学储能安全性分析及预警技术进展[J].工业安全与环保,2023,49(02):54-56.
[4]焦琪静,郑伟,柳叶芳,等.热轧带肋钢筋电化学腐蚀监测技术综述[J].中国金属通报,2024(5):89-91.
[5]高智悦,樊志彬,王晓明,等.金属构件腐蚀原位监测电化学传感器研究综述[J].山东电力技术,2023,50(3):20-25.
[6]刘炳岩,王立达,孙文,等.一种用于原位测量盐酸露点腐蚀的电化学阻抗探针[J].腐蚀与防护,2023,44(2):7-12.
[7]汪科宇.PCB 腐蚀电化学迁移行为及机理研究[D].中国民航大学,2023.
[8]李祥翔,金祖权,逢博.杂散电流与复合离子作用下埋地碱激发矿渣混凝土中钢筋锈蚀研究[J].硅酸盐通报,2024,43(10):3595-3606.
[9]李婷玉,魏洁,陈楠,等.用于大气环境的电化学传感器的腐蚀性能研究[J].中国腐蚀与防护学报,2024,44(2):365-371.
[10]胡全,胡泰山,李波,等.输电线路近地电场对接地极腐蚀的影响及防腐措施[J].腐蚀与防护,2024,45(5):82-86.
[11]张驰.碳纤维增强高分子复合材料的电化学行为及其与典型工程合金的电偶腐蚀过程研究[D].厦门大学,2020.
[12]刘志峰,廖建平,徐永烨,等.接地网腐蚀的电化学在线监测技术[J].全面腐蚀控制,2023,37(6):78-81.
[13]白一涵,张航,朱泽洁,等.缝隙腐蚀内部微区离子浓度监测的研究进展[J].中国腐蚀与防护学报,2023,43(4):828-836.
[14]姜碧波,张超,王颖杰.腐蚀性气体浓度在线监测系统设计[J].仪表技术,2024(1):6-9.
[15]韩一峰,朱焯森,陈皖滨,等.海管焊接接头腐蚀特性及监测方法研究进展[J].装备环境工程,2023,20(7):98-108.
[16]杨一潇.埋地 X70 钢油气管道腐蚀防护与远程监控的研究[D].西安理工大学,2023.
[17]曹文凯,郑海兵,王艳丽,等.海水拌和混凝土中不锈钢筋早期腐蚀电化学行为研究[J].表面技术,2024,53(6):80-89.
[18]刘洋,卢珊珊,史艳梅,等.微分电化学质谱测定石墨在析氧反应中的结构腐蚀[J].质谱学报,2024,45(4):465-471.
[19]聂振宇,艾莉.氟碳封孔剂封孔处理对 8YSZ 热障涂层电化学腐蚀及抗盐雾腐蚀性能的影响[J].机械工程材料,2023,47(8):79-85.
[20]梁继伟,毛文艳,王星宇,等.基于硫化纳米零价铁的电化学腐蚀特性研究[J].南京理工大学学报(自然科学版),2023,47(5):724-730.

配网自动化在隔离配网故障中的应用探究

陈微

国网荆州供电公司江陵县供电公司, 湖北 江陵 434100

摘要： 本文探讨了配网自动化在隔离配电网故障中的应用。通过实现故障检测、定位和隔离的自动化，配网自动化显著提高了电力系统的可靠性与效率。研究重点包括故障检测算法、通信网络和自愈机制等关键技术。此外，结合实际案例分析，证明了自动化系统在减少故障影响和缩短供电恢复时间方面的有效性。

关键词： 配网自动化；故障隔离；故障检测；自愈；电力系统可靠性

Exploring the Application of Distribution Network Automation in Isolating Distribution Network Faults

Chen Wei

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

Abstract： This paper explores the application of distribution network automation in isolating faults within the distribution grid. By automating fault detection, location, and isolation processes, distribution network automation significantly enhances the reliability and efficiency of power systems. The study focuses on the key components and technologies involved, including fault detection algorithms, communication networks, and self-healing mechanisms. Additionally, practical case studies are analyzed to illustrate the effectiveness of automated systems in reducing fault impact and improving power restoration time.

Keywords： distribution network automation; fault isolation; fault detection; self-healing; power system reliability

引言

配电网作为电力系统中连接发电与用户的关键环节，其运行的安全性和可靠性直接影响用户的用电质量。然而，由于配电网结构较为复杂，线缆分布广泛，易受外界环境因素（如自然灾害、外力破坏等）影响，故障发生率相对较高。传统的人工方式处理配网故障效率较低，尤其是在故障定位和隔离方面，故障处理时间较长，导致供电中断范围扩大，用户体验下降。配网自动化技术的引入，不仅可以显著缩短故障定位时间，还能通过智能化措施快速隔离故障区域并恢复非故障区域供电，大幅提升配电网的供电可靠性与稳定性。因此，研究配网自动化在故障隔离中的应用具有重要的理论价值和工程意义，并为智能电网的进一步发展提供技术支撑。^[1]

一、配网自动化技术概述

（一）配网自动化的基本概念与技术框架

配网自动化（Distribution Network Automation, DNA）是指通过先进的通信、控制及监测技术，实现配电网络运行状态的实时监测、故障快速定位和隔离、负载平衡调整以及供电有效控制等一系列智能化操作的技术体系。其主要目标是提升配电网络的可靠性、优化供电效率并降低运行维护成本。技术框架方面，配网自动化技术通常由以下部分构成：配电自动化终端设备（如智能断路器、分段开关等）、通信系统（如无线通信、光纤通信等）、配网自动化主站系统（实现数据分析与

集中控制），以及后台支持系统（如地理信息系统和 SCADA 系统）。这些组成部分通过信息互联与智能协同，形成一套高效的自动化分布式调控系统，为电网运行管理提供全面支持。^[2]

（二）国内外研究现状与发展趋势

随着电力系统发展进入现代化和智能化阶段，国内外在配网自动化技术上均取得了显著进展。在国际上，发达国家如美国、日本及欧洲国家，其配网自动化技术起步较早，目前已广泛应用于提升电网韧性和供电可靠性。例如，美国电网注重智能分布式能源与配网自动化深度融合；欧洲在“能源互联网”驱动下，进一步推动高比例可再生能源接入条件下配网自动化的普及。^[3]在国内，随着“碳达峰”与“碳中和”目标的推进，智能电网建

设成为国家战略重点。近年来，国家电网公司开展了大量配网自动化实践，如智能配网示范工程建设、新一代配电站系统研发与推广等。尽管国内在系统运行安全、设备稳定性等方面取得了重大突破，但与国际领先水平相比，配网自动化在技术标准化和高端设备自主研发领域仍存在差距。未来，配网自动化的研究将进一步集中在智能算法优化、边缘计算技术应用以及新型通信技术（如5G与工业物联网）的引入上，以实现更加灵活高效的电网管理模式。^[4]

二、配网故障隔离过程中的自动化技术应用分析

（一）配网故障隔离的基本流程及自动化需求

在配电网中，故障隔离是确保系统稳定性和供电可靠性的重要环节。基本流程通常包括以下步骤：

故障检测：通过实时监测系统电流、电压以及其他参数，识别系统发生了异常现象。

故障定位：结合各类监测数据，通过分析故障波形、故障距离以及区段信息，快速锁定故障区域。

故障隔离：在精确定位故障点后，通过切除故障区域的开关设备，防止故障扩散、保护其他网络组件。

恢复供电：隔离故障后，以最快速度通过自动化的方式恢复非故障区的供电。

故障隔离和恢复供电过程的高效完成对自动化提出了以下需求：**实时数据采集与处理能力：**需通过在线监测设备及及时获取配网状态信息。**高精度的定位技术：**以减少传统人工分析定位的时间，提升效率；**依靠智能设备实现快速识别。****可靠的通信技术支持：**通过通信系统将现场数据及时送达控制中心，以及实现远程设备操作。**协调的自动化设备控制：**不同设备（如开关、保护装置）之间须进行快速、精准的联动。^[5]

（二）关键应用技术分析

实现配网故障隔离的自动化，依赖于一系列先进技术，这些技术在配网系统中起着至关重要的作用：

1. 智能断路器

智能断路器是配网自动化的重要设备之一，其集成保护、监测和通信功能，可以在故障发生时迅速切断故障电流，防止系统的进一步损坏。此外，某些智能断路器还支持自诊断和远程控制，大幅提高了系统的响应效率。

2. 分段开关

分段开关（Sectionalizing Switch）能够把配电系统分为多个独立的保护区段。配网发生故障后，其自动控制程序可实现在故障区段的隔离操作，从而降低对其他区段的影响。自动化分段开关可以通过控制中心远程操作，极大减少人工干预的时间。

3. FTU（馈线终端单元）

FTU是分布在开关设备上的终端装置，主要用于监测馈线的电气参数，且具备开/合控制的功能。其通过通信网络与配网主站相连，能够及时上传故障定位的关键信息，帮助配网自动化系统

迅速分析故障。^[6]

4. DTU（配电终端单元）

DTU常用于环网柜等设备中，担当智能测控角色。相比FTU，DTU具有更高的处理能力和更强的数据交互性能，广泛应用于环网自动化系统中，以协助故障区域隔离。

5. 高速通信技术

可靠的通信系统是实现故障自动隔离的基础。当前主流的通信技术包括光纤通信、无线通信（如4G/5G）以及配电自动化专用通信网络。高速、低时延的通信技术能够确保系统在毫秒级时间内完成数据传输，大幅提升快速隔离的效率。^[7]

（三）基于配网自动化的故障隔离策略

配网自动化故障隔离的策略优化是提高系统效率的一个关键环节，常见的方法包括：

多层次分布式控制策略：将配网划分多个电气区域，每个区域由区域控制器执行局部自动化隔离，同时与主控制中心协调控制，以提升故障处理速度和灵活性。

基于多要素判定的隔离策略：结合电流突变、电压骤降、功率波动等多要素数据来准确判断故障类型和故障点，减少隔离范围，提高操作精度。

自愈式控制策略：将故障隔离和非故障区供电恢复过程整合，通过自愈算法实现更加智能化和全面的优化控制。

三、配电网自动化在故障隔离中的挑战与优化探讨

（一）应用中的主要困难

配电网自动化在实现故障隔离过程中，面临以下主要挑战：

1. 技术难点，配电网具有结构复杂、节点众多的特点，而现有的技术手段在实时性和可靠性方面仍存在不足。例如，故障定位和隔离需要高度精确的传感器设备与快速适应复杂网络拓扑的算法，但许多现有设备和算法无法满足高精度和低延迟的要求。此外，系统间的兼容性问题也增加了技术障碍，特别是在老旧配电网设施的改造中。

2. 经济制约，自动化设备和系统的建设需要巨大的资金投入，包括传感器、智能开关、通信设备等，而这些成本可能在短期内无法通过节省故障处理时间或减少停电损失来完全弥补。此外，小型配电企业和发展中地区的经济水平相对有限，导致应用配电自动化的经济可行性不足。

3. 实施难度，在实际应用中，配电网自动化的部署受到多视角协同的影响，如多部门协调、规章制度的不统一以及技术标准的缺乏。培训操作人员、改造现有设施和保障数据安全等问题也进一步增加了实施难度。此外，一些地区的通信基础设施不足，限制了先进通信网络的部署能力。^[8]

（二）优化方向分析

为应对上述挑战，配电网自动化在故障隔离领域的优化可以从以下方面展开：

1. 提高设备精度和响应速度，配电设备的优化是实现自动化的关键，例如引入更高精度的传感器和具有快速响应能力的智能

断路器。同时，通过改进保护算法和故障识别模型，可进一步缩短故障识别与隔离的时间。

2. 大数据与人工智能的深度应用，利用大数据和人工智能技术，可以实现配网中历史故障数据的分析和趋势预测。这不仅对优化故障定位和隔离算法有积极作用，还能通过模式识别技术更快速发现异常情况，提高故障处理效率。

3. 改进通信网络架构，配电网自动化离不开通信网络支持。可以通过建设更低延迟、更高带宽的通信系统（如5G或光纤网络），来提高故障信息的传递效率和精准度。同时，采用物联网技术进一步强化设备之间的互联互通性，增强数据的实时采集和传输能力。

（三）未来发展方向

配电网自动化的未来发展，将以更加智能化与系统化为要点，重点关注以下方向：

1. 国家政策支持与标准化推动

国家层面的政策引导和资金支持是关键，通过统一技术标准、优化资助政策为企业降本提供可能。这不仅能鼓励企业加快自动化设备部署，还能通过监管规范推动行业稳定发展。

2. 物联网技术的全面融合

未来，物联网技术将与配电网自动化进一步融合，实现设备、数据及操作的全面智能化。例如，基于物联网实现远程监控、自动诊断和实时故障隔离，可以大幅度提升配网的灵活性。

3. 人工智能与电力系统的深度整合

人工智能技术将在未来配电网中扮演更重要的角色。通过优化故障隔离算法、实现自学习及自适应控制，配电网自动化将更加智能，并能够动态应对复杂的电网运行情况。同时，高效的 AI 系统还能帮助优化分布式电源接入，提高整体能源管理水平。

综上所述，尽管配电网自动化在故障隔离过程中面临一定的困难，但通过设备优化、技术创新以及政策支持等多方面努力，其性能和应用效果将得到显著提升，为未来智能电网建设奠定坚实基础。^[10]

四、结语

随着电力系统的不断发展，配电网的智能化程度和自动化水平正快速提升。本文围绕配电网自动化在故障隔离中的应用展开了探讨，分析了这一技术的主要功能模块和实施架构，并探讨了不同场景下的实际效果。通过研究可以看出，在自动化技术的支持下，配电网故障隔离的响应速度、准确性和系统恢复能力均得到了显著提升。同时，这些技术的应用还显著降低了电力系统的运行成本，提升了供电可靠性。因此，本研究验证了配电网自动化在故障隔离领域应用的可行性和重要性，并为后续研究及实际工程应用提供了参考价值。

尽管配电网自动化技术在故障隔离中的应用已取得显著进展，但仍面临诸多挑战与发展机遇。在未来，以下几个方向值得进一步研究与探索：智能化升级与优化：未来需进一步结合人工智能、大数据分析 & 机器学习等先进技术，提升配电网自动化的预测能力与决策效率。

分布式能源的深度融合：随着分布式可再生能源的广泛接入，配电网的运行形态更加复杂。未来需要研究如何在多能源接入的场景下实现自动化技术的优化应用，以更好地适应分布式电网的特点。设备技术与通信基础设施的完善：推动故障隔离相关设备的智能化升级，同时加强物联网、5G 及边缘计算在电力系统中的应用，进一步提升系统的实时沟通和协调能力。

弹性与韧性设计：未来配电网需要进一步考虑极端天气、突发事件等因素的影响，通过设计更具韧性与自愈能力的自动化系统，提高其在不确定性场景下的可靠性与恢复能力。标准化与协作机制开发：制定统一的技术标准及数据接口，推动设备制造商、技术提供方以及电力运营企业之间的协同发展，实现更高效的资源配置与技术落地。配电网自动化是智能电网发展的重要方向，而在其故障隔离领域的深度应用，则将进一步推动电力系统现代化进程。未来，我们期待这一技术在理论研究与工程实践中不断取得突破，为全球能源结构转型和可持续发展提供有力支持。

参考文献

[1] 刘明辉. 配网自动化常见的故障及处理方式研究 [J]. 科技创新与应用, 2013(34).
[2] 邓明. 配网自动化在隔离配网故障及处理应用 [J]. 通讯世界, 2016(19).
[3] 邓明. 配网抢修指挥中快速研判故障的方法分析 [J]. 质量探索, 2016(06).
[4] 袁瑞勇. 浅析电气设备热故障产生原因及对策 [J]. 中国新技术新产品, 2015(10).
[5] 胡松. 变电所自动化系统常见故障及处理 [J]. 硅谷, 2011(05).
[6] 陈文龙. 浅析两起 110kV 电容式电压互感器故障 [J]. 高压电器, 2005(01).
[7] 蒋严庆. 对配网自动化中故障检测定位措施的探讨 [J]. 华东电力, 2001(12).
[8] 陈科基. 配网故障自动隔离和恢复供电的控制模式及选择 [J]. 华中电力, 2001(01).
[9] 肖鸿展, 蔡千. 模拟电路故障诊断中的故障分离 [J]. 广东工学院学报, 1994(01).
[10] 麦炳灿. 论配网故障的诊断及恢复方法 [J]. 中国新技术新产品, 2016(22).

构网型储能电站提升电力系统稳定性的关键技术与应用分析

王涛

身份证号: 140321198305172715

中国能源建设集团山西电力建设有限公司, 山西 太原 030000

摘要: 随着新能源在电力系统中占比的不断攀升, 其固有的波动性、间歇性及缺乏惯性等特性, 给电力系统的稳定性带来了严峻挑战。构网型储能电站凭借主动支撑电网的卓越能力, 成为解决这些问题的关键技术手段。本文深入剖析构网型储能电站提升电力系统稳定性的关键技术, 涵盖频率主动支撑、电压主动支撑、故障穿越等技术, 并对其在不同场景中的应用展开探讨, 旨在为推动构网型储能技术的广泛应用与电力系统的稳定运行提供理论依据与实践指导。

关键词: 构网型储能电站; 电力系统稳定性; 关键技术; 应用分析

Key Technologies and Application Analysis of Grid-forming Energy Storage Power Stations for Improving Power System Stability

Wang Tao

ID: 140321198305172715

China Energy Engineering Group Shanxi Electric Power Construction Co., Ltd. Taiyuan, Shanxi 030000

Abstract: With the increasing proportion of renewable energy in the power system, its inherent characteristics such as volatility, intermittency, and lack of inertia pose serious challenges to the stability of the power system. Grid-forming energy storage power stations, with their excellent ability to actively support the power grid, have become key technical means to address these issues. This paper deeply analyzes the key technologies of grid-forming energy storage power stations to improve the stability of the power system, including frequency active support, voltage active support, and fault ride-through technologies. It also explores their applications in different scenarios, aiming to provide theoretical basis and practical guidance for promoting the widespread application of grid-forming energy storage technology and the stable operation of the power system.

Keywords: grid-forming energy storage power station; power system stability; key technology; application analysis

引言

在常规储能系统加装构网型装置并采用相关控制技术, 使其具备类似同步发电机的电压控制和频率调节能力, 进而形成构网型储能系统, 本质上还是通过构网型逆变器构建起支撑电网安全稳定运行的电压源, 以起到快速调频调压、增加短路容量支撑以及抑制宽频振荡等作用。目前, 国内已有多地提出强制或鼓励新能源项目配置构网型储能的要求。其电站具独立电压源特性, 可主动调节电网电压、频率, 故障时提供紧急功率支撑, 模拟同步发电机运行, 多方面提升电力系统稳定性, 研究其关键技术与应用意义重大。

一、构网型储能电站提升电力系统稳定性的关键技术

(一) 频率主动支撑技术

通过大量的仿真研究以及实际项目测试可知, 在频率阶跃/斜坡扰动下, 构网型储能展现出了出色的频率调节能力。它能够将电网频率偏差精准控制在 $\pm 0.1\text{Hz}$ 以内, 并且响应速度极快, 快至 50ms , 这一性能指标显著优于传统下垂控制方式^[1]。例如,

在某实际新能源电站项目中, 引入构网型储能并采用虚拟同步机控制技术后, 在经历多次频率阶跃扰动时, 电网频率始终保持在极为稳定的范围内, 有效保障了电站内各类设备的正常运行, 避免了因频率波动过大而导致的设备故障或停机风险。这种快速且精准的频率调节能力, 对于维持电力系统的稳定运行至关重要, 能够有效减少因频率不稳定而引发的一系列问题, 如设备寿命缩短、电能质量下降等^[2]。

（二）电压主动支撑技术

构网型储能电站通过恒无功控制（Q-Preset）和恒电压控制（U-Control）两种模式实现电压主动支撑。在恒无功控制模式下，储能变流器会强制执行预设的无功目标，以此精准调节局部电压。当电网中某区域电压出现偏差，储能电站依据预设的无功功率值，向该区域注入或吸收无功功率，进而调整电压。而恒电压控制模式基于自动电压调节（AVC）策略，与电网无功需求动态匹配^[9]。储能电站实时监测电网电压，根据电压变化自动调整无功输出，维持电网电压稳定。在实际应用里，这两种控制模式能根据电网具体情况灵活切换。在电压跌落30%的极端工况下，构网型储能可瞬间释放2~3倍额定无功功率，1秒内将电压恢复至90%标称值，有效防止电压崩溃，保障电力系统的电压稳定性。

为了更有效地应对电网电压的快速变化，构网型储能电站采用无功功率快速响应技术。该技术借助储能变流器的快速开关特性，能在极短时间内实现无功功率的快速调节。当电网发生故障或出现电压突变，储能电站可在几毫秒内快速调整无功输出，为电网提供强大的无功支撑。比如在电网发生短路故障，电压瞬间下降时，无功功率快速响应技术可使构网型储能电站在10ms内输出最大三倍额定电流大小的无功支撑电流，接近同步调相机的电压支撑能力，迅速稳定电网电压，减少故障对电力系统的影响范围和持续时间，提高电力系统的故障穿越能力和电压稳定性^[4]。

（三）故障穿越技术

当电网发生短路或过流等故障时，构网型储能电站在跟网切换（GFL模式）与虚拟阻抗控制这两种策略间灵活切换。在跟网切换模式下，一旦故障电流超限，储能变流器会迅速切换至电流源模式，以此避免设备损坏。虚拟阻抗控制则通过等效串联阻抗来限制短路电流，维持电压源特性^[6]。在20%电压跌落场景中，该策略能将故障穿越时间缩短至100ms，过流风险降低70%。凭借这种灵活的切换机制，构网型储能电站在电网故障时，不仅能保持自身稳定运行，还能为电网提供必要支撑，助力电网快速恢复正常运行状态，提升电力系统的整体稳定性和可靠性。

快速自恢复控制技术是构网型储能电站在故障后实现稳定性恢复的关键所在。当电网故障消除后，储能电站需要快速调整自身状态，重回正常运行模式，并再度为电网提供稳定支撑。快速自恢复控制技术可使储能电站在极短时间内完成状态切换和参数调整。它实时监测电网状态并快速分析，自动判断故障是否消除，确认故障消除后，迅速启动储能变流器的恢复程序，对输出功率、电压和频率等参数进行调整，使其契合电网需求。在一些实际项目中，运用快速自恢复控制技术的构网型储能电站，能在电网故障消除后的数秒内恢复正常运行，为电力系统的快速稳定恢复提供了坚实保障^[6]。

二、构网型储能电站在电力系统中的应用场景分析

（一）新能源电站场景

在新能源电站范畴，构网型储能所发挥的“稳定器”效用极为关键。以风电场和光伏电站作为典型实例，风能和太阳能自身

具备的间歇性与波动性特质，致使其发电功率呈现出显著的不稳定态势，这无疑给电网接入工作增添了诸多难题。构网型储能凭借其特有的功能，能够对输出功率波动予以有效平滑处理，进而切实平抑风力发电与光伏发电的间歇性和波动性问题。当风力强度出现骤然变化，或是光照强度因天气等因素而产生波动，导致发电功率随之起伏时，构网型储能能够迅速做出反应。在发电功率过剩阶段，及时将多余电能存储起来；而在发电功率不足之际，则适时释放此前存储的电能。如此一来，新能源电站输出至电网的功率得以更为平稳，有力推动了可再生能源并网比例的提升^[7]。

同时，构网型储能在无功支持方面同样表现出色，能够显著改善电网的功率因数状况。在电力传输过程中，合适的功率因数对于降低线路损耗、提升电力传输效率至关重要。构网型储能通过向电网注入或吸收无功功率，使得电网的功率因数维持在合理区间，进一步增强了电网的稳定性。

（二）电网侧场景

在电网侧，构网型储能具有多重重要应用。一方面，它可以提供调频、调压、调峰等多种电网辅助服务，成为电网频率和电压稳定的有力支撑。在电网负荷发生变化时，构网型储能能够快速响应，通过调节自身的充放电状态，参与电网的频率和电压调节，维持电网的稳定运行^[8]。例如，在用电高峰时段，电网负荷增加，频率和电压可能下降，构网型储能可迅速放电，补充电网的功率缺额，提升频率和电压；在用电低谷时段，电网负荷减少，频率和电压可能上升，构网型储能则进行充电，吸收多余的电能，稳定频率和电压。另一方面，在特高压线路受端、负荷中心电源空心化区域等场景，构网型储能可以增强系统的灵活调节和可靠运行能力。这些区域面临着电力供应紧张、电网稳定性差等问题，构网型储能的接入能有效缓解这些问题，提高电网的供电可靠性和稳定性。

（三）微电网与分布式能源系统场景

在微电网和分布式能源系统中，构网型储能占据不可替代的核心地位，作为核心控制单元，为系统提供可靠备用电源保障。这类系统受恶劣天气、自然灾害及设备故障等因素影响，存在与主电网解列风险。如偏远海岛海底电缆易因恶劣天气受损，山区输电线路可能因自然灾害中断。此时，构网型储能能瞬间切换至独立运行模式，承担起为医院、通信基站等关键负荷持续供电的重任，保障居民基本生活用电，确保供电稳定性与连续性^[9]。

同时，构网型储能在能源优化配置与高效利用方面发挥关键作用。它实时监测系统内能源的产生与消耗情况，依数据分析合理安排充放电时机与容量。能源过剩时存储电能，本地能源供应不足且处于消耗高峰时释放电能，实现精细化能源管理。这显著提升系统自给自足能力，降低对外部能源的依赖程度，增强系统可靠性，有力推动微电网与分布式能源系统的稳定、可持续发展。

三、构网型储能电站的容量配置与优化

（一）电网功率支撑需求分析

随着新能源在电力系统中占比的不断增加，电力系统的惯性

显著下降，导致频率调节难度加大，对构网型储能的需求日益迫切。电网的功率支撑需求主要体现在以下几个关键方面：首先是频率支撑，新能源发电的波动性以及电网负荷的随机变化，使得电网频率时刻面临波动风险，构网型储能需要具备快速响应能力，在频率出现偏差时及时调整功率输出，维持频率稳定^[10]。其次是电压支撑，尤其是在电网发生故障或负荷突变时，能够迅速提供无功功率，稳定电压水平，避免因电压不稳定导致设备损坏或系统故障。再者是惯性支撑，模拟传统发电机的惯性特性，减缓电网频率的快速变化，增强电力系统的稳定性。

（二）构网型储能容量配置考虑因素

配置构网型储能容量时，要综合权衡多方面因素。从电力系统稳定性出发，频率调节上，新能源高占比导致系统惯量不足，需依系统惯量缺失程度及频率调节目标确定容量，在新能源发电波动大的区域，大容量储能可快速调节有功功率稳定频率。电压调节方面，依据不同节点电压波动范围和无功补偿需求配置，保障电压稳定。储能自身特性也很关键，充放电效率影响实际可用能量，高效储能技术容量需求相对小；循环寿命决定使用周期与更换频率，长循环寿命的可适当增大初始配置容量。经济成本是重要考量，投资成本包括设备采购、安装等，过高成本会限制容量配置；运行维护成本涵盖检修保养等费用，维护成本高的系统要权衡长期经济性。此外，电网运行场景多变，不同季节、时段的负荷特性差异，要求储能容量能适应低谷变化；结合电网未来规划，预估新能源接入和负荷增长对稳定性需求的变化，预留容量裕度，确保满足未来电网稳定运行需求。

（三）基于功率支撑需求的最优容量配置方案

近年来，学术界针对构网型储能容量配置问题提出多种优化方法。基于功率支撑需求的最优容量配置方案，兼顾储能系统技

术性能、经济性与系统稳定性。其通过构建多目标优化模型实现：先建立电网功率支撑需求模型，依据电网负荷与可再生能源出力波动，借助历史数据统计及未来预测，精准剖析电网在不同运行状态下对频率、电压、惯性支撑的具体需求，构建功率支撑需求曲线。接着设计容量配置优化模型，以数学模型阐述储能容量配置与电网支撑需求关系，纳入储能容量、配置位置、响应速度等变量，结合电网频率、功率、电压需求制定策略。最后运用遗传算法、粒子群优化算法等求解，在满足电网需求的同时，最小化储能建设与运行成本，达成技术性能、经济性和系统稳定性的最优平衡。

四、结束语

随着新能源在电力系统中占比提升，其波动性、间歇性和缺乏惯性特性给电力系统稳定性带来巨大挑战。构网型储能电站凭借频率主动支撑、电压主动支撑和故障穿越等关键技术，成为提升电力系统稳定性的重要手段。频率主动支撑方面，虚拟同步机控制技术模拟同步发电机转子运动方程，提供“虚拟惯性”和一次调频能力，快速将电网频率偏差控制在极小范围；电压主动支撑技术通过双模式无功调节，极端工况下瞬间释放大无功功率恢复电压；故障穿越技术中的跟构切换与虚拟阻抗策略，在电网故障时保护设备、缩短穿越时间、降低过流风险。在应用场景上，构网型储能在新能源电站、电网侧以及微电网与分布式能源系统等均发挥重要作用，可平抑发电波动、提供辅助服务、保障备用电源供应等，且基于功率支撑需求的最优容量配置方案能实现储能系统高效利用。

参考文献

- [1] 黄馨漫, 任凯, 黄贵东, 等. 构网型储能支撑新型电力系统建设的思考与实践分析 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2024, (32): 4-6. DOI: 10.19569/j.cnki.cn119313/tu.202432002.
- [2] 马笑寒. 考虑构网型储能电站无功调节能力的新能源基地无功协调优化 [D]. 华北电力大学 (北京), 2024. DOI: 10.27140/d.cnki.ghbbu.2024.000896.
- [3] 贾丹, 苏文斌. 新型电力系统中的储能技术综述 [J]. 电子技术, 2024, 53(09): 348-350.
- [4] 常庆苏. 户用单相逆变器的构网型控制方法研究 [D]. 西安理工大学, 2024. DOI: 10.27398/d.cnki.gxalu.2024.001754.
- [5] 杨天鑫, 黄云辉, 何珍玉, 等. 基于多时间尺度调节的构网型储能电站定容选址优化配置 [J]. 电力系统自动化, 2024, 48(23): 54-64.
- [6] 郭一甫. 光储型构网变换系统的储能配置 [D]. 山西大学, 2024. DOI: 10.27284/d.cnki.gsxiu.2024.000805.
- [7] 王翀, 姚宏洋, 陆海洋, 等. 构网型中压直流直挂储能研究 [J]. 电力电子技术, 2023, 57(12): 72-75.
- [8] 吴家杰, 陈新, 张东辉, 等. 构网型储能变换器在新能源接入场景下并网稳定性分析及提升策略 [J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(23): 9341-9354. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.231337.
- [9] 李建林, 丁子洋, 游洪源, 等. 构网型储能支撑新型电力系统稳定运行研究 [J]. 高压电器, 2023, 59(07): 1-11. DOI: 10.13296/j.1001-1609.hva.2023.07.001.
- [10] 王聪, 葛景, 汪莹, 等. 构网型储能提升系统电压稳定作用研究 [J]. 电工技术, 2023, (12): 183-185+189. DOI: 10.19768/j.cnki.dgjs.2023.12.051.

储能技术在提升电力系统安全可靠性的中的应用与管理策略

郭建建

国家电投集团北京电力有限公司, 北京 100032

摘 要： 随着电力系统的发展, 储能技术成为提升其安全可靠性的关键。本文阐述储能技术在电力系统的应用场景, 分析其提升安全可靠性的作用机制, 并提出相应管理策略, 为储能技术在电力系统的高效应用提供参考。

关 键 词： 储能技术; 电力系统; 安全性; 应用; 管理策略

Application and Management Strategies of Energy Storage Technology in Improving the Safety and Reliability of Power Systems

Guo Jianjian

State Power Investment Corporation Beijing Electric Power Co., Ltd. Beijing 100032

Abstract： With the development of power systems, energy storage technology has become the key to improving their safety and reliability. This paper elaborates on the application scenarios of energy storage technology in power systems, analyzes its mechanism for enhancing safety and reliability, and proposes corresponding management strategies, providing a reference for the efficient application of energy storage technology in power systems.

Keywords： energy storage technology; power system; safety and reliability; application; management strategies

引言

传统电力系统的主要特点是供需平衡, 即电力的供应和需求达到平衡, 以确保系统的稳定运行。然而, 新能源技术的快速发展, 特别是风能、光能等非稳定性能源的大规模接入, 使得电力系统的供需平衡变得越来越困难。储能技术可在电力充裕时存储能量, 短缺时释放, 实现 “削峰填谷”, 对提升电力系统安全性和运行效率意义重大。研究其在电力系统的应用与管理策略, 利于推动电力行业可持续发展。

一、储能技术概述

(一) 储能技术分类

储能技术多样, 按能量存储形式分为物理、化学和电磁储能。物理储能有抽水蓄能、压缩空气储能、飞轮储能。抽水蓄能通过不同高度水库间水的存储与释放转换电能, 应用广泛; 压缩空气储能将电能转化为空气内能存储, 用时释放推动涡轮机发电; 飞轮储能靠高速旋转飞轮储存动能, 经电机实现动能与电能转换。化学储能包含铅酸电池、锂离子电池、钠硫电池等^[1]。锂离子电池因能量密度高、循环寿命长、充放电效率高而发展迅速; 铅酸电池成本低、技术成熟, 在成本敏感场景有应用; 钠硫电池高能量与功率密度, 适用于大容量储能。电磁储能主要是超级电容器储能和超导储能。超级电容器储能充放电快、循环寿命长, 用于短时间高功率电能存储与释放; 超导储能利用超导线圈无电阻损耗特性长时间存储大容量电能, 但技术难度与成本

高^[2]。

(二) 储能技术特性对比

不同储能技术在能量密度、功率密度、充放电效率、循环寿命、响应时间、成本等方面差异显著。能量密度上, 锂离子电池、钠硫电池等化学储能较高, 适合长时间大量储能; 抽水蓄能、压缩空气储能等物理储能较低, 但大规模储能有优势。功率密度方面, 超级电容器储能和飞轮储能出色, 能快速高功率充放电, 适用于高功率响应场景^[3]。充放电效率, 锂离子电池、超导储能较高, 可减少能量损耗。循环寿命上, 锂离子电池、超级电容器储能较长, 降低长期成本。响应时间, 超级电容器储能和电磁储能极快, 满足系统快速调节。成本是重要考量, 铅酸电池成本低, 超导储能、钠硫电池成本高。实际应用需结合电力系统需求与场景, 综合评估选择合适的储能技术。

二、储能技术在电力系统中的应用场景

（一）电源侧应用

电源侧，储能技术用于可再生能源发电的平滑输出与备用。因自然条件影响，可再生能源发电的随机性与波动性阻碍电力系统功率平衡及稳定运行。储能系统能在发电过剩时储电、不足时放电，提升发电稳定性、可靠性与可调度性。如在风电场或光伏电站配置锂离子电池储能系统，可实时调节，减少对电网的冲击^[4]。此外，发电设备故障或停电时，储能系统能为关键设备和重要负荷供电，维持电力系统运行，像偏远小型发电站用铅酸电池储能作备用电源。

（二）电网侧应用

电网侧，储能技术对调峰、调频及增强电网稳定性意义重大。电力系统负荷峰谷特性明显，储能系统通过低谷充电、高峰放电“削峰填谷”，提高电网设备利用率与运行经济性，例如城市电网建设抽水蓄能电站或锂离子电池储能电站调节峰谷负荷^[5]。同时，储能系统能快速响应频率变化，调节系统功率，维持频率稳定，超导储能和超级电容器储能可瞬间补偿频率偏差。并且，储能系统能通过提供无功支持等增强电网稳定性，在电网薄弱地区配置可改善电压稳定性。

（三）用户侧应用

用户侧，储能技术用于提升电能质量和实现需求响应。对电能质量要求高的场所，如医院、数据中心等，用户端配置储能系统可在电网电能质量出现问题时保障设备运行，像数据中心的UPS储能电池确保业务连续性。储能系统助力用户实施需求响应策略，低谷储电、高峰用电，降低购电成本，紧急时还能将电能反向输送给电网获取补偿，实现用户与电网互动，大型商业用户参与需求响应项目就是例证。

三、储能技术对提升电力系统安全可靠性的作用机制

（一）功率平衡调节

电力系统安全稳定运行需发电功率与负荷需求时刻平衡。传统靠调节发电设备出力实现，但可再生能源大规模接入后，其出力不确定性和波动性使仅靠发电侧调节难以满足。储能技术为功率平衡调节提供新途径，能在电力过剩时储电，不足时放电，弥补发电与负荷差值，维持功率平衡^[6]。风力或光伏发电因天气变化功率骤减时，储能系统迅速放电，补充功率缺口，防止频率和电压下降；负荷需求突增时，也能及时供电，缓解发电设备压力，保障系统安全稳定。储能系统与发电设备、负荷协同运行，大幅提高电力系统应对功率波动能力，增强功率平衡调节效果。

（二）频率稳定保障

频率是电力系统重要运行参数，保持稳定对安全可靠运行至关重要。系统频率取决于有功功率平衡，有功功率不平衡会导致频率变化。储能系统功率响应快，能在频率变化瞬间，通过充放电调节有功功率，抑制频率波动，维持稳定。频率下降时，储能系统放电注入有功功率，增加发电功率使频率回升；频率上升

时，快速充电吸收多余有功功率，降低发电功率使频率降低。与传统频率调节手段（如发电机调速器调节）相比，储能系统响应速度更快、调节精度更高，能更有效应对快速变化的功率扰动，保障电力系统频率稳定。尤其在高比例可再生能源接入系统中，储能系统在频率稳定保障方面作用更突出^[7]。

（三）电压稳定支持

电压稳定是电力系统安全可靠运行关键。系统电压分布与无功功率平衡密切相关，无功功率不足或分布不合理会导致电压下降或波动，影响电力设备运行。储能系统既能调节有功功率，也能通过调节输出无功功率有效控制电压。在电网薄弱或负荷集中区域，电压下降时，储能系统调节逆变器控制策略输出无功功率，提高无功补偿能力，提升电压水平；电压过高时，吸收无功功率降低电压。此外，储能系统优化接入位置和容量配置，可改善潮流分布，减少线路无功功率传输，降低线路损耗，进一步提高电压稳定性。储能系统对电压的稳定支持，保障电力系统各类设备正常运行，提升供电质量^[8]。

（四）故障应对与恢复

电力系统发生短路故障、设备故障等时，储能系统能发挥重要作用，助力系统快速应对故障并恢复。故障导致部分发电设备或输电线路退出运行，功率平衡被破坏，可能引发频率和电压大幅波动，甚至系统崩溃。储能系统在故障瞬间迅速放电，提供紧急功率支持，维持频率和电压稳定，防止故障扩大。故障切除后，协助系统恢复，注入电能帮助发电设备重启和恢复出力，加速功率平衡恢复。电网大面积停电事故后，储能系统作为应急电源，为关键电力设备和重要负荷提供临时供电，保障电力抢修，助力系统逐步恢复^[9]。储能系统在故障应对与恢复方面，显著提高电力系统抗故障和恢复能力，减少故障对系统和用户的影响。

四、储能技术在电力系统中的管理策略

（一）规划与布局管理

科学规划与合理布局是储能技术在电力系统高效应用基础。规划时需综合考虑电力系统负荷特性、电源结构、电网布局及未来发展趋势，确定储能系统最优配置。电源侧储能依可再生能源发电装机规模、分布及出力特性，合理配置容量和类型，实现对可再生能源发电的有效平滑和调节。电网侧储能结合电网负荷峰谷差、薄弱环节分布及电压稳定性要求，确定安装位置和容量，达到最佳调峰、调频和电压支撑效果。用户侧储能规划充分考虑用户用电需求、电能质量要求及参与需求响应意愿，提供个性化配置方案。同时，加强储能规划与电力系统整体规划协调，确保储能与发电、输电、配电等环节协同发展，避免重复建设或配置不合理。制定储能发展规划，明确发展目标、重点任务和实施步骤，引导储能产业健康有序发展。

（二）运行与维护管理

有效运行与维护管理确保储能系统安全可靠运行。建立完善运行监测与控制体系，实时监测储能系统运行状态，包括电池电压、电流、温度、荷电状态（SOC）等参数，以及充放电功率、

能量转换效率等运行指标。通过监测分析,及时发现问题和潜在风险并处理^[10]。加强日常维护,定期巡检、保养和维修储能设备,确保设备良好运行。如定期对电池充放电维护以保持性能和寿命,检查维护储能系统电气设备确保绝缘和连接可靠。制定完善应急预案,针对电池热失控、火灾等故障和事故,制定详细应急处理流程和措施,并定期演练,提高应对突发事件能力。加强对运行人员培训,提升专业技能和操作水平,保障储能系统安全稳定运行。

（三）成本与效益管理

储能技术应用成本高,平衡成本与效益是推广关键。在成本管理上,一方面要依靠技术创新与规模化生产降低设备制造成本,比如研发新型储能材料、优化系统设计,以此提升能量密度与充放电效率,降低单位储能容量成本;另一方面需合理规划配置及运行策略,通过优化充放电控制策略,减少不必要充放电,提高利用效率,延长设备寿命,降低运行与更换成本。

效益管理上,深挖储能系统在电力系统的多重价值,参与市场交易获利,提升系统可靠性以间接创效。政府应出台政策激励,探索建立成本分摊与效益共享机制,保障各方合理收益,推动储能技术可持续发展。

（四）政策与法规管理

完善政策与法规体系是储能技术在电力系统广泛应用和健康发展保障。政府加强政策支持,出台财政补贴、税收优惠、价格

支持等政策,降低储能项目投资成本,提高盈利能力,激发市场主体投资积极性。对建设储能项目企业给予财政补贴或税收减免,制定合理储能电价政策,保障其在电力市场交易中的合理收益。建立健全储能技术相关法规和标准,规范设计、建设、运行和维护等环节,确保安全可靠运行。制定安全标准、技术规范和验收规程,加强项目监管,保障储能产业健康发展。加强政策与法规协同配合,形成政策合力,为储能技术应用营造良好政策环境和制度保障。

五、结束语

储能技术在提升电力系统安全可靠方面作用关键,在电源侧、电网侧和用户侧应用广泛,通过功率平衡调节、频率稳定保障、电压稳定支持以及故障应对与恢复等机制,保障电力系统安全稳定运行。为实现高效应用与可持续发展,需从规划与布局、运行与维护、成本与效益、政策与法规等多维度实施有效管理策略。随着技术进步和政策完善,储能技术将在电力系统中应用更广泛深入,为构建安全可靠、清洁高效的新型电力系统提供支撑,推动电力行业可持续发展。未来需加强储能技术研发创新,提升性能和可靠性,降低成本,拓展应用领域,持续提高储能技术在电力系统的应用价值和管理水平。

参考文献

[1] 阮文俐. 储能技术在新型电力系统中的应用 [J]. 电子元器件与信息技术, 2024, 8(05): 191-193. DOI: 10.19772/j.cnki.2096-4455.2024.5.060.

[2] 范玮. 储能技术研究进展及经济性分析 [J]. 煤质技术, 2024, 39(03): 21-29+38.

[3] 张恒, 张宇, 张庆丰. 储能技术在电力系统中的应用 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2024, (12): 7-9. DOI: 10.19569/j.cnki.cn119313/tu.202412003.

[4] 兰兵权, 王强, 齐宇文. 储能技术在新能源电力系统中的应用探究 [J]. 电子元器件与信息技术, 2024, 8(04): 172-174. DOI: 10.19772/j.cnki.2096-4455.2024.4.051.

[5] 苏南, 董梓童. 电力系统调节能力加速升级 [N]. 中国能源报, 2024-03-04(008). DOI: 10.28693/n.cnki.nshca.2024.000233.

[6] 《电力系统新型储能技术》[J]. 自动化博览, 2024, 41(03): 7.

[7] 葛全, 彭少卫. 新能源电力系统中的储能技术研究 [J]. 中国战略新兴产业, 2024, (06): 111-114.

[8] 李更丰, 孙少华, 别朝红, 等. 面向新型电力系统弹性提升的储能优化配置与灵活调度研究综述 [J]. 高电压技术, 2023, 49(10): 4084-4095. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20230619.

[9] 赵丹华. 新能源发电系统中储能系统的应用探究 [J]. 中国战略新兴产业, 2024, (05): 89-91.

[10] 宋超, 董浩, 吴怡儒. 新型电力系统下的电化学储能电站汇流电压等级选择研究 [J]. 电力勘测设计, 2023, (S2): 66-71. DOI: 10.13500/j.dlkcsj.issn1671-9913.2023.S2.012.

电能质量优化促节能

谢新航, 王伯杨

北京长峰新联工程管理有限公司, 北京 100039

摘要： 电能质量优化是提升电力系统运行效率、降低能耗和减少电力设备损耗的重要手段，本文围绕电能质量优化促节能的原则和对策展开研究，探讨了提高电压稳定性、降低谐波污染、优化无功补偿、减少三相不平衡等关键措施，通过合理配置电力设备、采用智能监测技术和优化负荷管理可以有效提升电能利用率，减少电网损耗，提高供电质量，同时推广节能型电力电子装置和智能补偿技术有助于实现绿色低碳发展，优化电能质量不仅能降低企业用电成本，还能提高整体能源利用效率，为可持续发展提供有力支撑。

关键词： 电能质量；节能；智能补偿

Power Quality Optimization for Energy Saving

Xie Xinhang, Wang Boyang

Beijing Changfeng Xinlian Engineering Management Co., Ltd. Beijing 100039

Abstract： Power quality optimization is an important means to improve power system operation efficiency, reduce energy consumption and reduce power equipment losses, this paper focuses on the principles and countermeasures of power quality optimization for energy saving, discusses the key measures to improve voltage stability, reduce harmonic pollution, optimize reactive power compensation, reduce three-phase imbalance, etc., and through the rational allocation of power equipment, the use of intelligent monitoring technology and optimization of load management can By rational allocation of power equipment, the use of intelligent monitoring technology and optimization of load management can effectively enhance the utilization of power, reduce grid losses, improve the quality of power supply, and at the same time, the promotion of energy-saving power electronic devices and intelligent compensation technology can help to realize the green and low-carbon development, and the optimization of power quality not only reduces the cost of electricity consumption of the enterprise, but also improves the overall efficiency of energy utilization, providing a strong support for the sustainable development.

Keywords： power quality; energy saving; intelligent compensation

引言

随着工业化和城镇化的推进，电力系统面临谐波污染、电压波动、三相不平衡等问题，导致能源浪费和设备损耗，通过采用无功补偿、滤波装置、电压优化等技术可提高电能利用效率，减少无功功率损耗，延长设备寿命，从而实现节能降碳目标，优化电能质量不仅降低企业用电成本，还促进绿色低碳发展，符合现代能源战略需求。

一、电能质量优化促节能的概念

电能质量优化促节能是指通过改善电力系统的电压稳定性、频率偏差、谐波畸变、三相不平衡等问题，提高电能利用效率，减少能源浪费的过程，电能质量的提升能够降低无功功率损耗，减少电网损耗，改善设备运行条件，从而实现节能降耗的目标，常见的优化措施包括无功补偿、谐波治理、电压调控、动态负载

平衡等，这些技术可提高电能的有效利用率，降低企业用电成本，延长设备使用寿命，同时减少因电能质量问题导致的设备故障和电力损耗，优化电能质量不仅对工业企业有重要作用，还能提升整个电网的运行效率，助力低碳节能和可持续发展，因此电能质量优化是推动节能减排、提升电力系统可靠性和经济性的关键手段，符合现代能源利用的发展趋势^[1]。

二、电能质量优化促节能的基本原则

（一）提升电压稳定性

提升电压稳定性是电能质量优化的重要原则之一，对于保障电力系统的高效运行和节能降耗具有关键作用，电压稳定性指的是电力系统在不同运行状态下保持电压水平稳定的能力，如果电压波动较大或长期处于不合理范围不仅会影响电力设备的正常运行，还可能导致电能损耗增加，降低整体用电效率，例如电压过高可能引起设备过载和能量浪费，而电压过低则可能导致设备无法正常启动，影响生产效率，因此优化电压稳定性可以减少电网损耗，提高电能利用率，降低因电压波动造成的设备损坏风险，从而实现节能目标，提升电压稳定性的方法包括电压调节、负荷平衡和智能监测等技术手段^[2]。通过合理配置变压器分接头、电压调节器等设备可实现电压的动态调节，确保电网运行的稳定性；优化负荷分配，合理调整高低峰负荷，避免突发性电压波动，提高供电系统的可靠性，此外电力系统可以采用智能监测系统，实时监控电网电压状态，结合自动控制技术进行快速调整，提高电压调节的精准性，通过采取这些优化策略不仅能够减少因电压波动导致的电能浪费，还能提高电力系统的整体效率，为工业和民用电力用户创造更稳定、节能的用电环境。

（二）降低谐波含量

降低谐波含量是电能质量优化的重要原则之一，以此减少电能损耗、提高设备使用效率、延长设备寿命，谐波是指电网中频率为基波整数倍的电压或电流分量，主要来源于电力电子设备、非线性负载等，当电网谐波含量过高时会导致设备过热、绝缘老化、功率因数降低，甚至引发电网振荡，增加电力系统的损耗，过多的谐波还会影响敏感电子设备的正常运行，降低生产和用电的安全性，因此降低谐波含量不仅能减少电能浪费，还能提高电网的运行效率，确保电力设备的稳定性^[3]。降低谐波含量的优化措施包括应用有源和无源滤波装置、优化电力电子设备设计、推广低谐波电器等，无源滤波器主要通过电感、电容等元件吸收特定频率的谐波，而有源滤波器则能实时检测并抵消谐波，提升电能质量，此外提高负载均衡性、优化供电系统结构、减少非线性负载的使用也能有效降低谐波含量，同时电力系统可以推广使用符合国家电能质量标准的节能型设备，从源头上减少谐波污染，通过这些综合措施能够有效减少谐波对电网的干扰，提升电能利用效率，助力节能降耗和电力系统的绿色可持续发展。

（三）优化无功补偿

优化无功补偿是电能质量优化的重要原则之一，以此提高功率因数、降低线路损耗、提升电网运行效率，无功功率是电力系统维持电压稳定和设备正常运行所必需的，但过多的无功功率会增加输电线路和变压器的负担，导致电能损耗加大，影响电网供电能力，当功率因数较低时电网中的有功功率利用率下降，企业和电力系统需要额外的电能补偿无功消耗，造成能源浪费，因此通过优化无功补偿可以减少无功功率的无效消耗，提高电能利用率，实现节能降耗目标，优化无功补偿的方法包括采用静态和动态无功补偿装置、合理配置电容器组、应用智能无功控制技术

等^[4]。静态补偿主要依靠并联电容器，提高系统的功率因数，而动态补偿（如 SVG、SVC 等）能根据负荷变化快速调整无功功率，提高补偿效果，通过优化负荷分配、合理布置补偿设备的位置以及结合智能电网技术进行实时监测和调整可确保无功补偿的精准性和高效性，通过优化无功补偿不仅能降低电网损耗、提高供电质量，还能减少电力企业的额外电费支出，为实现绿色节能和高效用电提供有力支持。

（四）减少三相不平衡

减少三相不平衡是电能质量优化的重要原则之一，以此提高供电系统的稳定性、降低线路损耗和提高设备运行效率具有重要作用，在三相供电系统中理想状态下三相电流、电压应基本对称，但在实际运行中由于单相负荷的不均衡分布、电力设备故障或线路参数差异等因素，往往会出现三相不平衡现象，这种不平衡会导致电网损耗增加使配电变压器、输电线路的负荷加重，影响供电设备的使用寿命，此外严重的三相不平衡还会引起零序电流增大，导致系统电压波动、设备发热甚至出现跳闸故障，影响电力系统的安全性和经济性，因此减少三相不平衡是优化电能质量、提升电力系统能效的重要手段，减少三相不平衡的方法主要包括优化负荷分配、应用平衡补偿装置、采用智能监测技术等，在电网规划和设计时应合理分配单相负荷，避免部分相线过载而其他相线负担过轻，确保电力供应均衡；电力系统可采用自动调节的平衡补偿装置，如三相不平衡调节器、相序调整设备等对电流、电压进行动态平衡补偿；电力系统可以利用智能电网技术对三相负荷情况进行实时监控，结合数据分析优化电力调度，提高三相供电的均衡性，通过这些措施不仅可以降低电网损耗，提高电能利用率，还能有效减少电气设备因不平衡运行而产生的故障风险，为电力系统的安全、稳定、高效运行提供保障，同时也能促进节能减排，实现绿色用电目标。

三、电能质量优化促节能的对策

（一）提高电压稳定性

提高电压稳定性是电能质量优化的重要对策之一，以此保障电网安全、降低能耗、提高设备运行效率，电压波动或电压偏差过大会导致设备运行效率降低，增加能源消耗，甚至影响生产安全，电力系统应优化电力系统的电压调节策略，通过合理配置变压器分接头、电压调节器和无功补偿设备确保电压维持在合理范围内，此外电力系统应加强电网运行监测，利用智能电网技术和自动化控制系统，实时检测电压变化并进行动态调节，以降低电压波动对设备的影响。在用端，电力系统可以提高电压稳定性，优化负荷管理，避免过度集中或突然变化导致电压剧烈波动，合理分配高峰和低谷时段的用电负荷，采用需求侧管理技术可有效减小电网压力，电力系统可以推广节能设备和高效电力电子装置，如高效变频器、智能电源管理系统等，减少电压波动的影响，提高电能利用效率。

（二）降低谐波污染

降低谐波污染是电能质量优化的重要对策之一，以此减少电

能损耗、提升电网运行效率、延长设备使用寿命具有重要作用，谐波主要由非线性负载、电力电子设备和变频调速装置等引起，过多的谐波会增加线路损耗、降低功率因数，并对敏感设备造成干扰，影响电网的稳定性，为降低谐波污染应首先加强电网谐波监测，建立实时检测系统，对电网中的谐波含量进行监测和分析，及时发现超标情况并采取针对性措施，同时在电力规划和设备选型时应优先选择符合国家标准、谐波排放低的设备，减少谐波源的产生，从源头控制谐波污染，在治理谐波方面可以采用无源滤波器、有源滤波器等补偿装置进行谐波抑制，无源滤波器利用电感、电容等元件吸收特定频率的谐波，适用于固定谐波源的治理，而有源滤波器则能动态检测并抵消谐波，适用于复杂、多变的电网环境。电力系统还可以通过优化供电系统结构减少谐波对电网的影响，电力系统可以推广使用低谐波变频器、高效整流设备以及其他符合节能标准的电力电子设备，也能有效降低谐波污染。

（三）优化无功补偿

优化无功补偿是提升电能质量、降低电网损耗、提高电能利用率的重要对策，无功功率的合理补偿可以提高功率因数，减少线路和变压器的损耗，降低电力设备的过载风险，进而达到节能降耗的目的，无功补偿的优化首先需要对电网运行状态进行精准监测，采用智能电网技术实时分析无功功率的分布情况，确保补偿设备能够及时响应系统需求；电力系统应合理配置无功补偿装置，如并联电容器、静止无功补偿器（SVC）和静止同步补偿器（STATCOM）等，针对不同负荷特性选择适合的补偿方案，确保无功功率补偿的稳定性和高效性。在具体实施中，电力系统可以采取集中补偿、分散补偿和混合补偿相结合的方式，提高补偿效果，集中补偿适用于变电站和大型用电企业，通过大容量补偿设备优化整个电网的无功功率；分散补偿则在负荷端进行小规模补偿，减少无功功率在输配电过程中的损耗，此外智能化无功补偿系统的应用也是优化补偿的重要方向，它能够根据实时负荷变化自动调节无功补偿量，避免过度补偿或补偿不足的情况，提升电

能利用效率。

（四）减少三相不平衡

减少三相不平衡是优化电能质量、降低能耗、提高电力系统运行效率的重要对策，三相不平衡主要由单相负荷分布不均、电网设备参数差异以及线路故障等因素引起会导致电力设备损耗增加、功率因数降低、变压器过载甚至电网波动。要减少三相不平衡应优化负荷分配，合理调整单相负荷在三相系统中的分布，避免某一相过载而其他相负荷较轻的情况，电力系统应加强电网运行监测，利用智能监测系统对三相电流、电压进行实时分析，及时发现并调整不平衡状态，确保电网运行稳定。在技术措施上，电力系统可采用自动均衡装置和动态补偿技术来改善三相不平衡，例如安装三相不平衡调节器或相序调整设备，可以在负荷变化时动态调整电流分配，提高三相电流的均衡性，同时在配电系统中合理配置补偿装置，如磁控电抗器、自耦变压器等，以此提高电网的适应性和稳定性，在新建和改造电网时电力系统应优化线路设计，减少线路阻抗的不对称性，从而降低因线路问题导致的三相不平衡，通过这些措施可以有效降低电能损耗，提高电能利用效率，延长设备使用寿命，确保电力系统的稳定运行，为实现节能降耗和绿色用电提供有力支持。

四、结语

电能质量优化对提升能源利用效率、降低电网损耗、减少设备故障具有重要作用，以此实现节能降耗和绿色发展，电力系统可以通过提高电压稳定性、降低谐波污染、优化无功补偿、减少三相不平衡等手段有效改善电能质量，提高供电系统的可靠性和经济性，电力系统可以合理应用智能监测技术、优化电力设备配置、推广节能型电力电子装置，这不仅能降低企业用电成本，还能提升整体电网的运行效率，未来随着智能电网和新能源技术的发展，电能质量优化将更加精准和高效，为推动低碳可持续发展提供坚实保障，助力构建绿色、稳定、高效的现代电力系统。

参考文献

- [1] 李扬, 张洪亮, 程敏. 低压配电网电能质量治理及节能新技术方案研究 [J]. 电工技术, 2023(20): 98-99.
- [2] 严少刚, 曹正宇, 杜振华. 配电网的电能质量优化技术应用 [J]. 中国科技成果, 2024, 25(1): 41-42.
- [3] 郑美玲, 蒋晓梅, 周毅, 等. 配电网综合能效与电能质量评估分析 [J]. 集成电路应用, 2024, 41(3): 398-399.
- [4] 彭飞, 孙瑞波, 李文, 等. 浅谈提高供电设备电能质量, 降低供电设备无功损耗的实践 [J]. 中国设备工程, 2024(S01): 163-166.

用户变电站110kV线路单相断线分析计算研究

薛俊亮

山西潞安配售电有限公司, 山西 长治 046204

摘 要 : 断线是电力系统中发生较少、但后果严重的事故。特别是对用户变电站现场工作人员来说, 如何快速处理事故、恢复设备供电, 更是没有过多经验可借鉴。本文通过对一起用户终端变电站110kV高压线路单相断线事故进行分析, 介绍了现场工作人员处理方法, 对事故征象进行了分析、总结, 对保护装置功能进行了简单介绍, 并用对称分量法进行了故障电流计算, 得出了断线故障时会有较大的零序电流产生的结论。

关 键 词 : 单相断线; X射线检测技术; 零序电流保护

Analysis and Calculation of Single-Phase Break of 110kV Line in Customer Substation

Xue Junliang

Shanxi Lu'an distribution electricity co., LTD. Changzhi, Shanxi 046204

Abstract : Line breaking is a rare but serious accident in power system. Especially for the on-site staff of the user substation, how to quickly deal with the accident and restore the power supply of the equipment is not much experience to learn from. Based on the analysis of a single-phase line break accident of 110kV high voltage line in a user terminal substation, this paper introduces the treatment methods of on-site staff, analyzes and summarizes the signs of the accident, briefly introduces the function of the protection device, and calculates the fault current with symmetrical component method, and draws the conclusion that there is a large zero sequence current generated when the line break fault occurs.

Keywords : single-phase broken line; X-ray detection technology; zero sequence current protection

引言

本文提出了实际工作中从一次设备到保护投退等行之有效的避免断线事故发生的措施, 尤其是用X射线检测技术对耐张线夹及GIS设备进行检测的方法, 做到了对肉眼无法巡视的设备死角的检测, 可以清晰呈现设备内部运行情况, 大幅度提高了电力系统的供电可靠性^[1]。

一、2022年3月31日18时07分

某110kV用户终端变电站后台弹出多个报警信息, 站内线路、主变等设备保护启动, 主变“嗡嗡”声音消失, 但无开关跳闸。经现场查看, 进线开关有功功率、无功功率大幅下降, B相电流为0, 110kV B相电压显示异常; 用高压验电器验电后, B相失电, 初步判定原因为B相失压。变电站值班员随即进行倒闸操作, 将站内所有运行开关转热备后, 通过备用回路恢复站所供电。从事故发生到恢复用户正常供电, 持续了约38分钟。

馈出线开关恢复供电后, 运维单位安排人员对线路进行带电巡视, 最后发现故障为上级站线路侧B相刀闸铜铝线夹断裂, 从而造成此次断线事故。此次事故, 该站供电的多台10kV高压电机、风机、水泵及低压电机均停转, 部分电机烧毁, 相关企业生产线全部瘫痪, 经济损失严重^[2]。

二、事故总结

断线事故在运行过程中发生几率极低, 事故征象和中性点接地方式有关, 实际处理过程可借鉴资料较少, 故此次处理过程时间较长。

1. 线路保护装置未动作跳闸^[3]。该110kV线路配有线路差动保护、距离保护及零序保护, 但只有告警信息, 并未出口动作。经分析, 差动保护因两侧电流平衡, 不产生差流, 不应动作; 距离保护采集到的B相电压有值, 无流, 不符合动作判据, 不应动作; 零序保护因投入方向, 也不动作。B相无流、电压异常, 装置报警, 但各种保护不符合出口动作条件, 所以线路保护出口不动作正确。

2. 主变保护装置未动作跳闸。该站两台主变除非电量保护外, 配备有复压闭锁过流保护、零序保护。两种电流保护电流值

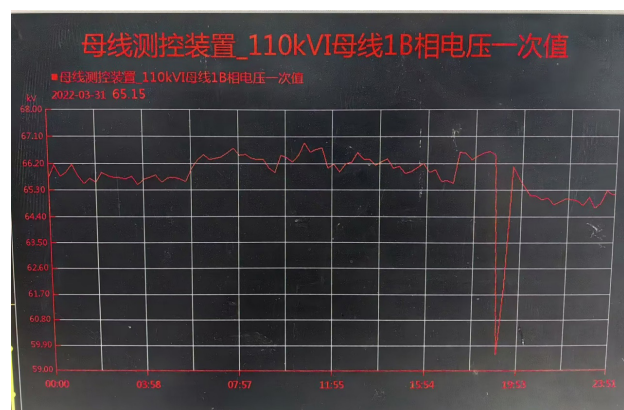
小于保护设定值，保护出口不动作正确。

3.主变正常运行时的“嗡嗡”声消失。变压器因为缺相，磁路不通，声音消失。

4.10kV电机、水泵等停转。电机缺相无法正常运行，有保护的跳闸，无保护的停转或故障损坏^[4]。

5.B相断开，由于健全相A、C相对断开相B存在电磁耦合，故B相电压不等于0，如图1所示。B相电压值决定于线路分布电容及B、C相负荷电流产生的零序电流分量。

6.站内功率因数满足要求，无功补偿装置未投运。

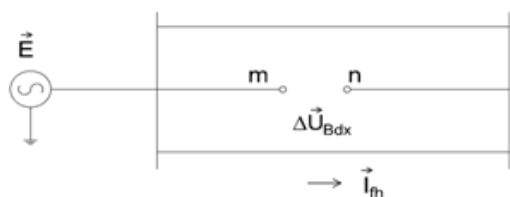


>图1 B相电压图

三、B相断线计算

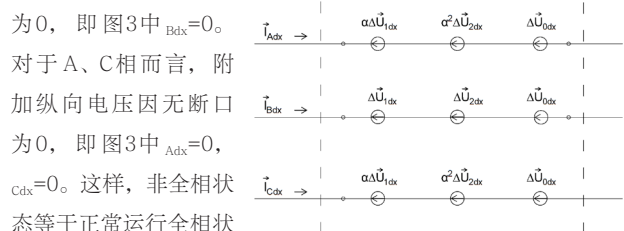
断线故障不同于短路故障，它属于纵向故障，但分析计算方法和短路计算一样，仍采用对称分量法进行计算^[5]。

B相断线后，形成非全相状态，B相电流为0，当断线前有负荷电流时，在断点m、n两端就产生了故障电压。如图2所示。



>图2 简化系统接线图

应用叠加原理在图2中断点之间附加一组纵向电压，如图3所示，在此电压作用下产生一组故障分量电流，此电流与B相负荷电流叠加后合成电流



>图3 断线处附加电压

作用下的全相状态的叠加。故断线后的计算是故障状态的故障分量与正常负荷的叠加^[6]。

根据断线处边界条件得各序电流、电压为

$$A_{dx} = \alpha I_{1dx} + \alpha^2 I_{2dx} + I_{0dx} \quad (1)$$

$$B_{dx} = I_{1dx} + I_{2dx} + I_{0dx} = 0 \quad (2)$$

$$C_{dx} = \alpha^2 I_{1dx} + \alpha I_{2dx} + I_{0dx} \quad (3)$$

$$\Delta A_{dx} = \alpha \Delta I_{1dx} + \alpha^2 \Delta I_{2dx} + \Delta I_{0dx} = 0 \quad (4)$$

$$\Delta B_{dx} = \Delta I_{1dx} + \Delta I_{2dx} + \Delta I_{0dx} \quad (5)$$

$$\Delta C_{dx} = \alpha^2 \Delta I_{1dx} + \alpha \Delta I_{2dx} + \Delta I_{0dx} = 0 \quad (6)$$

$$(4)(5)(6) \text{ 三式相加, } \Delta B_{dx} = 3 \Delta I_{0dx} \quad (7)$$

$$\alpha X \text{ 式(6) - 式(4), 得 } \Delta I_{1dx} = \Delta I_{0dx} \quad (8)$$

$$\text{式(6) - } \alpha X \text{ (4), 得 } \Delta I_{2dx} = \Delta I_{0dx} \quad (9)$$

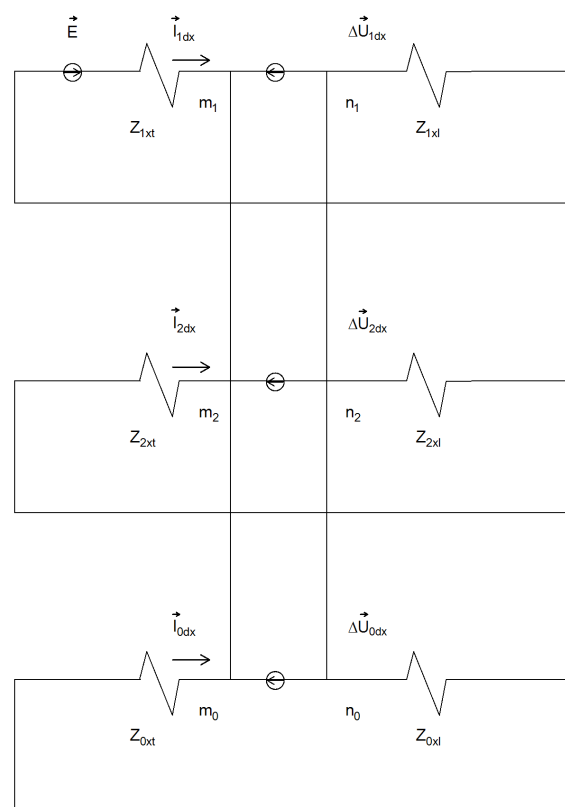
$$\text{由(7)(8)(9)三式可知, } \Delta I_{1dx} = \Delta I_{2dx} = \Delta I_{0dx} = \Delta B_{dx} \quad (10)$$

由上述式子，可以作出B相断线序网连接图，如图4所示。

其中，

Z_{1xt} 、 Z_{2xt} 、 Z_{0xt} —系统正、负、零序阻抗；

Z_{1xl} 、 Z_{2xl} 、 Z_{0xl} —线路正、负、零序阻抗；



>图4 断线计算序网连接图

1.在图4中，令 $\Delta B_{dx} = 0$ ，则在附加纵向电压下产生的断线电流故障为

$$I_{1dx} = -\Delta I_{1dx} / Z_{1\Xi} \quad (11)$$

$$I_{2dx} = -\Delta I_{2dx} / Z_{2\Xi} \quad (12)$$

$$I_{0dx} = -\Delta I_{0dx} / Z_{0\Xi} \quad (13)$$

式子中， $Z_{1\Xi} = Z_{1xt} + Z_{1xl}$ ， $Z_{2\Xi} = Z_{2xt} + Z_{2xl}$ ， $Z_{0\Xi} = Z_{0xt} + Z_{0xl}$ 。

上面三式中电流正方向与电压正方向假设方向相反，故取负号。

2.在图4中，令 $\Delta I_{1dx} = \Delta I_{2dx} = \Delta I_{0dx} = 0$ ，即将附加电压短接，则

在电源单独作用下产生断线前的负荷电流 I_{fh} 为：

$$I_B = I_{fh} = I / Z_{1\Sigma} \quad (14)$$

由叠加原理可知，断线后 B 相电流应为 0，即将分别分析结果叠加，得

$$I_{Bdx} = I_{fh} + I_{1dx} + I_{2dx} + I_{0dx} = 0 \quad (15)$$

将式 (11) (12) (13) 代入到式 (15)，有

$$I_{fh} = \Delta I_{1dx} (1/Z_{1\Sigma} + 1/Z_{2\Sigma} + 1/Z_{0\Sigma}) \quad (16)$$

$$\Delta I_{1dx} = I_{fh} (1/Z_{1\Sigma} + 1/Z_{2\Sigma} + 1/Z_{0\Sigma}) \quad (17)$$

由式 (10) 和式 (17) 可得，

$$\Delta I_{Bdx} = 3I_{fh} (1/Z_{1\Sigma} + 1/Z_{2\Sigma} + 1/Z_{0\Sigma}) \quad (18)$$

即断口处电压为 $3I_{fh} (1/Z_{1\Sigma} + 1/Z_{2\Sigma} + 1/Z_{0\Sigma})$ 。

由式 (10) (11) (12) (13) (17) 计算断线后各序电流：

正序电流为负荷电流与故障分量正序电流叠加，即

$$\begin{aligned} I_{1dx} &= I_{fh} + \Delta I_{1dx} \\ &= I_{fh} - \Delta I_{1dx} / Z_{1\Sigma} = I_{fh} - I_{fh} / [(1/Z_{1\Sigma} + 1/Z_{2\Sigma} + 1/Z_{0\Sigma}) Z_{1\Sigma}] \\ &= I_{fh} Z_{1\Sigma} / [Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} Z_{0\Sigma} / (Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma})] \end{aligned} \quad (19)$$

负序电流即故障分量负序电流，负荷电流中不考虑负序电流分量。

$$\begin{aligned} I_{2dx} &= -I_{fh} / [(1/Z_{1\Sigma} + 1/Z_{2\Sigma} + 1/Z_{0\Sigma}) Z_{2\Sigma}] \\ &= -I_{fh} Z_{1\Sigma} / [Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} Z_{0\Sigma} / (Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma})] \times Z_{0\Sigma} / (Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}) \end{aligned} \quad (20)$$

零序电流即故障分量零序电流，负荷电流中不考虑零序电流分量。

$$\begin{aligned} I_{0dx} &= -I_{fh} / [(1/Z_{1\Sigma} + 1/Z_{2\Sigma} + 1/Z_{0\Sigma}) Z_{0\Sigma}] \\ &= -I_{fh} Z_{1\Sigma} / [Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} Z_{0\Sigma} / (Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma})] \times Z_{2\Sigma} / (Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}) \end{aligned} \quad (21)$$

经推导计算得，断线处全电流为

$$I_{Adx} = \alpha I_{1dx} + \alpha^2 I_{2dx} + I_{0dx} = I_{fh} \mathbf{X} [-1.5 Z_{2\Sigma} / Z_{0\Sigma} + j(1 + 0.5 Z_{2\Sigma} / Z_{0\Sigma})] / (1 + Z_{2\Sigma} / Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} / Z_{0\Sigma}) \quad (22)$$

$$I_{Bdx} = I_{1dx} + I_{2dx} + I_{0dx} = 0 \quad (23)$$

$$I_{Cdx} = \alpha^2 I_{1dx} + \alpha I_{2dx} + I_{0dx} = I_{fh} \mathbf{X} [-1.5 Z_{2\Sigma} / Z_{0\Sigma} - j(1 + 0.5 Z_{2\Sigma} / Z_{0\Sigma})] / (1 + Z_{2\Sigma} / Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} / Z_{0\Sigma}) \quad (24)$$

断线后三倍零序电流为

$$3I_{0dx} = I_{Adx} + I_{Bdx} + I_{Cdx} = (-2 I_{fh} \mathbf{X} 1.5 Z_{2\Sigma} / Z_{0\Sigma}) / (1 + Z_{2\Sigma} / Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} / Z_{0\Sigma}) = -3 I_{fh} / (1 + Z_{2\Sigma} / Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} / Z_{0\Sigma}) \quad (25)$$

此次发生故障的变电站故障录波装置零序电流如图 5 所示。



图 5 零序电流故障录波图

由图可知，发生单相断线故障时，会产生较大的零序电流。这也对我们分析零序电流故障动作增加了一种思路，不能单纯的认定零序电流产生的原因就是单相接地或三相负荷不平衡^[7]。

在实际应用中，多认为 $Z_{2\Sigma} = Z_{1\Sigma}$ ，此情况下断线后各序电流分量变形为

$$I_{1dx} = I_{fh} / [1 + Z_{0\Sigma} / (Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma})] \quad (26)$$

$$I_{2dx} = -I_{fh} / (2 + Z_{2\Sigma} / Z_{0\Sigma}) \quad (27)$$

$$I_{0dx} = -I_{fh} / (1 + 2 Z_{0\Sigma} / Z_{2\Sigma}) \quad (28)$$

四、采取措施

1. 对 GIS 设备、线路耐张线夹开展 X 射线检测，避免因 GIS 内部故障及耐张线夹压接不良引起断线^[8]。

线路耐张线夹无论采用哪种压接方式，压接完成后巡视人员通过肉眼无法观察到内部情况。压接工艺不规范，引起压接质量不满足要求，进一步引发断线事故发生^[9]。国家电网已颁布企业标准 QGDW11793-2017《输电线路金具压接质量 X 射线检测技术导则》，建议对耐张线夹开展 X 射线检测，降低因压接质量引起断线的几率。

GIS 设备同样如此。因设备封闭在充满 SF₆ 气体的金属外壳内，巡视人员也无法对其内部构造进行观察^[10]。运行时间较长的 GIS 设备，因各种原因发生的导电杆脱落事故时有发生。而对 GIS 设备进行 X 射线检测，可以对其内部结构进行检测，避免类似事故发生。

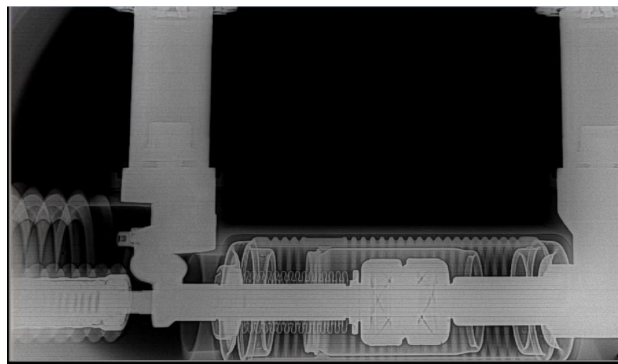


图 6 GIS 设备的 X 射线检测结果

2. 站所运维单位对站所铜铝过渡线夹及穿墙套管等易忽视部位重点管理。实践表明，铜铝过渡线夹在大负荷线路中使用年限久后断裂几率较大，建议采用铜或铜铝复合材料代替传统的铜铝过渡材料。

3. 对耐张塔 U 型环与绝缘子连接处、直线塔悬垂线夹的销等金具进行检查，对销脱落或锈蚀严重的情况应及时处理。如图 7 所示。



图 7 某线路耐张塔销子脱落

4. 对进线侧装有备自投或快速切换装置的站所，尝试将最末段零序电流保护退出方向，并结合负荷情况计算整定值，让其断线时动作于跳闸，这样可以通过备自投或快切装置切换至另一电源，避免造成电机烧毁。该用户站经此事故后，与上级调度部门沟通，重新调整了零序电流定值，并退出方向保护。

五、结语

断线事故在实际运行过程中发生几率极低，故事故处理时现场人员往往无从下手。供电管理部门应通过事故预想，并结合之前断线事故征象，同时在继电保护方面及设备运维方面下功夫，才能有效减少断线事故造成的经济损失。

参考文献

- [1] 崔家佩、孟庆炎、陈永芳、熊炳耀.《电力系统继电保护与安全自动装置整定计算》[M].中国电力出版社.1993.3.
- [2] DLT741-2019《架空输电线路运行规程》[S].国家能源局.2019.6.
- [3] 何仰赞、温增银.《电力系统分析》[M].华中科技大学出版社.2001.8.
- [4] QGDW11793-2017《输电线路金具压接质量 X 射线检测技术导则》[S].国家电网有限公司.2018.9.
- [5] DLT 584-2007《3kV ~ 110kV 电网继电保护装置运行整定规程》[S].中华人民共和国国家发展和改革委员会.2008.6.
- [6] GBT 14285-2006《继电保护和安全自动装置技术规程》[S].中华人民共和国国家标准化委员会.2006.11.
- [7] 罗学琛.《SF6 气体绝缘全封闭组合电器 (GIS) 》[M].中国电力出版社.1998.11.
- [8] 陈永明;刘昶;李静;杨茹;侯超;姚鹏.基于电压变化特征的 110 kV 线路断线故障自适应判别方法 [J].电力系统及其自动化学报,2022(08).
- [9] 蔡正梓;樊亮;刘辉;沙立成;孙鹤林;张印宝.110 kV 负荷线路单相断线故障特性分析及调度策略 [J].农村电气化,2022(04).
- [10] 孙朝辉;鲍有理;冯靖;徐培栋;许欢.110 kV 主变高压侧断线故障分析及保护新方法 [J].电世界,2021(03).

光伏电站的运行维护与故障诊断技术研究

朱波

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： 本研究主要关注光伏电站，讲述它运行维护和故障诊断技术的关键内容。分析了光伏电站的特点，强调运行维护的重要性，分析现在存在的问题，给出有针对性的办法，目的是提高光伏电站运行效率和稳定性，推动光伏产业持续发展。

关键词： 光伏电站；运行维护；故障诊断；技术策略

Research on Operation, Maintenance and Fault Diagnosis Technologies for Photovoltaic Power Stations

Zhu Bo

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

Abstract： This study primarily focuses on photovoltaic power stations, detailing key aspects of their operation, maintenance, and fault diagnosis technologies. It analyzes the characteristics of photovoltaic power stations, emphasizes the importance of operational maintenance, examines existing issues, and provides targeted solutions. The aim is to enhance the efficiency and stability of photovoltaic power stations and promote the continuous development of the photovoltaic industry.

Keywords： photovoltaic power station; operation and maintenance; fault diagnosis; technical strategies

引言

随着全球对清洁能源需求增加，光伏电站规模和数量都在变大。但是电站稳定运行受很多因素影响，运行维护和故障诊断技术很重要。高效的运维和准确的故障诊断，能保证发电效率，降低成本，延长使用寿命，对光伏产业发展意义重大。

一、光伏电站的特点

（一）能源清洁可再生

光伏电站靠太阳能发电，太阳能是清洁能源，永远用不完。和传统化石能源比，光伏发电不产生二氧化碳这些温室气体，也不会污染空气和水。比如，一个 10 兆瓦装机容量光伏电站，每年能减少几千吨二氧化碳排放。现在全球都很重视环保，环保法规也越来越严，这个清洁可再生的特点让光伏电站发展前景很好，是实现能源转型和可持续发展的重要部分。

（二）分布灵活

建光伏电站对地理条件要求不高。只要光照好，不管是没人的沙漠、偏远山区，还是城市的屋顶、空地，都能建。在一些偏远农村，用农户屋顶建分布式光伏电站，既能满足当地居民用电，多余的电还能上网卖，增加收入。这种分布灵活性给能源供应提供了多种选择，特别是在能源少的地方，分布式光伏电站能缓解能源短缺，让能源供应更稳定可靠。

（三）发电过程相对简单

光伏电站主要靠半导体的光电效应发电，核心设备是光伏

板。有光照时，光子撞光伏板里的半导体材料，电子跃迁产生电流，把太阳能直接变成电能。这个过程不需要复杂的机械传动，也没有化学变化。和传统火电比，少了汽轮机转动、煤炭燃烧这些复杂环节。这不仅降低了设备出故障的风险，还让运维工作简单些，运维难度和成本也降低了，提高了光伏电站运行的稳定性和可维护性。

（四）发电效率受环境影响大

虽说发电过程相对简单，但光伏电站发电效率受环境影响很大。光照强度决定光伏板吸收能量多少，阴天、雨天光照弱，发电效率会大幅下降。温度对光伏板转换效率影响也大，一般温度升高，光伏板内阻增大，转换效率降低。湿度和天气也会影响光伏板性能。比如，湿度高时，光伏板表面可能结露，影响透光。所以，设计和运维光伏电站时，要充分考虑这些环境因素，采取措施保证发电效率。

（五）初始投资较大

建光伏电站要花很多钱。买设备方面，有光伏板、逆变器、支架等，不同品牌和规格的设备价格差很多。在一些地方，土地租赁成本也高，特别是城市周边土地资源少的地方。工程建设包

括场地平整、电气安装等工作，安装调试要专业技术人员和设备，保证电站能正常运行。虽然技术进步、产业规模扩大让建设成本降了些，但初始投资还是比较高。这对投资者资金实力要求高，在一定程度上限制了光伏电站快速大规模发展。

二、光伏电站运行维护的必要性

（一）保障发电效率

光伏电站发电效率和经济效益直接相关。光伏板长期在户外，表面容易积灰尘、污垢，这些会挡住光线，降低光伏板吸收光能的效率。有统计说，光伏板表面灰尘多能让发电效率降低10%–30%。定期运维，及时清理光伏板表面，能明显提高发电能力。同时，全面检查维护设备，能避免设备故障导致发电中断或效率下降，保证电站稳定高效运行，持续产生收益。

（二）延长设备使用寿命

光伏电站设备投资在总成本里占比大。拿一套大型光伏电站设备来说，采购和安装费用可能要几千万元。定期保养设备，比如给逆变器散热风扇加润滑油，检查光伏板支架稳不稳，及时换磨损严重的部件等运维工作，能延长设备使用寿命。比如，定期对逆变器散热维护，能防止过热损坏电子元件，延长逆变器使用寿命 2–3 年，大大降低了设备更新成本，提高了电站长期经济效益。

（三）确保安全运行

光伏电站运行有高电压、大电流这些危险因素，设备有安全隐患不及时处理，容易出严重事故。比如，光伏板绝缘层老化破裂，可能漏电，威胁工作人员生命安全；线路短路可能引发火灾，造成很大财产损失。运维人员定期做绝缘检测，保证设备绝缘好，检查接地系统，让接地可靠，能及时发现并消除安全隐患，保障电站安全运行、工作人员人身安全和周边环境安全。

（四）提高系统稳定性

光伏电站由很多设备组件组成，系统稳定性对发电质量很重要。运维时，检查各个设备连接线路很关键。连接线路松动会接触不良，引起电压波动，影响电站发电稳定性，甚至可能损坏设备。定期检查并紧固连接线路，保证线路连接牢固，能避免这种问题。同时，监测和分析系统整体运行状态，及时调整参数，能提高电站系统稳定性，给电网输送可靠、稳定的电能。

（五）符合政策法规要求

国家和地方在能源管理和环保方面有很多政策法规，对光伏电站运行维护有明确要求。比如，有些地区规定光伏电站运营商要定期交设备运行报告、环境影响监测报告等。运营商按规定运维，能避免违规受处罚，还能提升企业形象，增加社会认可度。遵守法规能让企业在好的政策环境里持续发展，为光伏电站长期稳定运营创造好条件^[1]。

三、光伏电站运行维护现存问题

（一）运维人员专业素质参差不齐

有些运维人员没经过系统、专业培训，对光伏电站工作原理

和设备性能了解不深。实际运维时，遇到复杂故障很难准确判断原因，也不能很快解决。拿光伏板热斑故障来说，热斑是因为部分光伏电池片性能不一样，光照下局部发热。要是运维人员不懂热斑形成原理，就不能及时找到热斑位置，也没法确定损坏的光伏板并更换，故障排除时间变长，电站发电效率一直受影响。

（二）运维管理体系不完善

很多光伏电站没建立完善的运维管理体系，没有明确的运维流程和标准。设备巡检方面，没规定固定的巡检时间间隔，有的电站随意安排巡检，设备巡检不及时。巡检内容也不详细，不能全面检查设备参数和运行状态，容易漏潜在问题。维护计划制定不科学，没根据设备实际运行情况和寿命周期合理安排保养、检修工作。故障处理流程乱，各环节责任不明确，时间节点把握不好，严重影响运维效率，威胁电站稳定运行^[2]。

（三）监测技术手段落后

一些光伏电站监测技术落后，不能实时、准确获取设备运行数据。有的监测系统只能监测几个参数，比如只监测光伏板输出电压，不监测温度、电流这些关键参数。数据传输有延迟，监控中心不能及时知道设备实时状态。设备出故障时，不能及时发现故障信号，也难怪快速找到故障点，错过故障处理最佳时机，设备进一步损坏风险增加，维修成本也大幅提高。

（四）备品备件管理混乱

光伏电站运维中，备品备件管理很重要。但有些电站备品备件库存不合理。一方面，有的电站怕缺货，囤很多备品备件，占用大量资金，造成浪费。另一方面，一些关键备件常缺货，设备突发故障时，没法及时更换，设备停机时间变长。同时，采购流程不规范，从提出采购需求到备件入库时间太长，比如买个常用的逆变器备件，正常要 1–2 周，供应商缺货时，可能要 1 个月以上，严重影响运维及时性^[3]。

（五）预防性维护重视不足

现在，多数光伏电站主要是故障后维修，不太重视预防性维护。预防性维护通过分析设备运行数据，能提前发现潜在隐患并消除。但因为数据分析工具和专业人员投入少，很多潜在故障没及时发现。比如，监测逆变器运行温度、电流变化等数据，要是发现温度一直上升，电流波动异常，可能逆变器内部元件要坏了。但因为没数据分析能力，潜在故障变成严重故障，增加维修难度和成本，影响电站正常运行^[4]。

四、光伏电站运行维护与故障诊断策略

（一）加强运维人员培训

定期组织全面、系统的专业课程，请行业资深专家讲课。专家详细讲光伏电站工作原理，从半导体光电效应微观机制到整个电站系统能量转换过程，让运维人员深入理解^[5]。同时介绍各类设备性能，像不同品牌光伏板特点、逆变器工作特性等。开展实际操作培训，设模拟故障场景，让运维人员在模拟环境里检修设备、排除故障，提高动手能力。鼓励运维人员参加行业认证考试，比如光伏运维工程师认证，通过考试提升专业水平和职

业素养,打造高素质运维团队。

（二）完善运维管理体系

建立科学、合理、全面的运维管理体系。明确详细的运维流程,从设备巡检、维护计划制定到故障处理,每个环节都有清晰操作指南。制定设备巡检计划,规定每日、每周、每月巡检时间,明确巡检内容,像检查光伏板外观有无破损、线路连接是否松动等,要求详细记录巡检结果。规范维护计划制定流程,根据设备运行时间、历史故障数据和使用寿命,合理安排设备保养、检修工作。建立完善的故障处理流程,明确故障报告、诊断、修复等各环节责任人及时间节点,保证故障能快速、有效处理,提高运维效率^[9]。

（三）升级监测技术手段

引入先进监测技术和设备,全方位、实时监测光伏电站设备。在光伏板装温度传感器、光照强度传感器、电流电压传感器等,实时采集各项参数,通过无线传输技术快速把数据传到监控中心。用大数据分析技术处理大量监测数据,挖掘潜在规律。用人工智能算法,比如机器学习算法预测设备运行状态,及时发现设备异常。比如,监测到光伏板温度异常升高,输出电流下降,系统能快速判断可能的故障,为运维决策提供准确依据,实现智能化运维^[7]。

（四）优化备品备件管理

建科学的备品备件库存管理系统。深入分析设备故障历史数据,用数据分析模型,结合设备运行时间、易损程度等因素,合理确定备品备件种类和数量。用专业库存管理软件,实时监控备品备件库存,设安全库存预警值。库存低于预警值,系统自动预警,提醒采购人员补货,避免缺货。同时规范采购流程,和优质供应商建立长期稳定合作关系,签框架协议,缩短采购周期。设备故障时,能快速拿到所需备件,减少设备停机时间^[8]。

（五）强化预防性维护

加大预防性维护投入,组建专业数据分析团队。团队用先进数据分析工具,实时评估监测系统采集的设备运行数据。分析设备性能指标变化趋势,像逆变器功率因数、光伏板转换效率等,提前发现设备潜在性能下降、部件磨损等问题。根据分析结果,制定针对性预防性维护措施,比如提前换易损部件、对设备深度保养等。定期全面检查维护设备,降低设备故障率,保障电站稳定运行,减少突发故障损失^[9]。

（六）针对特殊环境制定专项运维方案

特殊环境地区的光伏电站,要制定专门运维方案。沙漠地区,增加光伏板清洁次数,可以用自动化清洁设备,定期清理光伏板表面沙尘。装防风沙罩,减少沙尘侵蚀设备。海边地区,选耐腐蚀设备材料,比如不锈钢支架^[10]。加强设备防腐处理,给设备表面特殊涂层防护。定期检查维护设备防锈,缩短检查周期。根据当地环境特点,调整运维计划和巡检内容,保证电站在恶劣环境能正常运行。

五、结语

光伏电站是清洁能源的重要代表,它的运行维护和故障诊断技术,对保证电站稳定高效运行、推动光伏产业发展很关键。现在运维存在人员素质、管理体系、技术手段等很多方面问题,但是通过采取加强人员培训、完善管理体系、升级技术手段等一系列办法,可以提升运维水平,准确诊断和处理故障,提高发电效率,降低运维成本,实现光伏电站可持续发展,为全球清洁能源事业贡献更大力量。未来,随着技术进步和经验积累,相关技术会不断完善,推动光伏产业向更高水平发展。

参考文献

[1]徐教辉.基于风机 SCADA 数据的叶片覆冰检测算法 [D].华北电力大学 (北京),2023.DOI:10.27140/d.cnki.ghbbu.2023.000038.
[2]张志强.光伏电站运维管理系统中智能巡检与数据分析的应用研究 [C]//中国智慧工程研究会.2024 工程技术与施工管理交流会论文集 (下).国家电投集团 (北京)新能源投资有限公司,2024:24-25.
[3]阎军,刘健鑫,何建奇.智能光伏电站开发及运维管理体系的构建与实施 [J].中国战略新兴产业,2024,(30):85-87.
[4]隋晓东.光伏电站电气设备运行维护检修方法创新探索 [J].电气时代,2024,(08):63-65.
[5]代荣艳,徐册利.基于大数据技术的水电站设备故障诊断与预测研究 [J].科技资讯,2024,22(05):36-38.DOI:10.16661/j.cnki.1672-3791.2311-5042-6226.
[6]李帅.光伏系统的智能故障诊断与维护技术研究 [J].电力系统装备,2024,(04):130-132.
[7]何洋,苏岩,王敏.基于 CPS 技术的水电站设备故障诊断与应用研究 [J].今日制造与升级,2024,(12):104-106.
[8]黄望春子.大型光伏并网电站的运行与维护技术研究 [J].电力设备管理,2024,(24):156-158.
[9]徐福昌,高马凤.电力信息通信网络故障诊断与运行维护技术研究 [J].数码设计 (电子版),2024,(02):0595-0597.
[10]黄鑫.基于光伏组件输出特性模型的参数计算及其故障中的应用 [D].中国计量大学,2020.DOI:10.27819/d.cnki.gzgj.2020.000458.

分布式电源接入对输配电系统的影响及技术对策探讨

冀连东, 崔家荣

鄂尔多斯供电公司输电管理二处, 内蒙古 鄂尔多斯 017000

摘 要： 本文探讨了分布式电源接入对电力输配电系统的影响，包括其带来的挑战和意义。首先分析了分布式电源对电网结构和运行方式的变化，并重点讨论了电压波动、电能质量问题、双向潮流等主要挑战。针对此类问题，提出了提高电网灵活性、采用储能系统及先进监控技术等技术对策。此外，文章还强调了创建配套的法规框架和政策调整以支持分布式电源接入的重要性。研究结果表明，在分布式能源时代，为保障电力系统可持续发展，需要制定全面的技术与监管战略。

关 键 词： 分布式电源；电力输配电系统；电网挑战；技术对策；储能系统；电压稳定

Discussion on the Impact of Distributed Power Source Access on Transmission and Distribution Systems and Technical Countermeasures

Ji Liandong, Cui Jiarong

Erdos Power Supply Company Transmission Management Division 2, Erdos, Inner Mongolia 017000

Abstract： This paper explores the impact of distributed power source access on power transmission and distribution systems, including its challenges and implications. It begins by examining the structural and operational changes distributed power sources introduce to power networks. The discussion highlights key challenges such as voltage fluctuations, power quality issues, and bidirectional power flows. Technical countermeasures, such as grid flexibility improvements, energy storage systems, and advanced monitoring technologies, are proposed to address these challenges. The paper also emphasizes the importance of regulatory frameworks and policy adjustments to support the integration of distributed power sources. These findings underline the need for a comprehensive technological and regulatory strategy to ensure the sustainable development of power systems in the distributed energy era.

Keywords： distributed power supply; electric power transmission and distribution system; grid challenges; technical countermeasures; energy storage system; voltage stability

引言

近年来，全球能源转型加速，新能源尤其是可再生能源的利用备受瞩目。分布式电源作为清洁、高效且贴近负荷中心的供电模式，在此背景下迅速发展，成为电力系统不可或缺的一部分，推动传统集中式输配电网络向分布式、多能互补的方向转变，优化了能源利用效率，有助于碳中和目标的实现。然而，分布式电源的大规模接入也给输配电系统的稳定运行、调度、保护及升级带来了新挑战。由于长期以集中式电源为设计基础的输配电网络，与分布式电源接入后引发的双向功率流、电压波动、谐波干扰等运行和控制问题并不完全兼容，因此，如何在确保既有输配电网安全可靠运行的同时，支持分布式电源的高效接入，成为现代电网建设的重要研究课题。研究分布式电源接入对输配电系统的影响，并提出相应的技术应对措施，不仅能提升电力系统的灵活性，还能促进可再生能源的平稳接入，实现资源的优化配置，具有重要的理论意义和实践价值。

一、分布式电源接入的特点及现状分析

（一）分布式电源的定义与类型

分布式电源是位于电力用户附近，利用可再生能源或小型发电技术发电的设备，具有小型化和多样化特点。其容量通常在几

十千瓦至几百兆瓦间，部署在接近用电负荷地点，减轻远距离输电压力。分布式电源涵盖光伏、风能、生物质能等多种技术，提高了供电系统灵活性和抗风险能力，同时显著减少二氧化碳及其他污染物排放，对环境友好。根据技术和能源形式，分布式电源主要分为光伏发电（利用太阳能）、风力发电（利用风力）、小

作者简介：

冀连东（1988.03-），男，汉族，籍贯：山西省朔州市，本科，中级工程师，研究方向：输配电，身份证号：140621198803055817；

崔家荣（1993.08-），男，汉族，籍贯：内蒙古自治区呼和浩特市，研究生，工程师，研究方向：输电线路专业，身份证号：150125199308230213。

型燃气轮机（适用于应急和负荷调节）、生物质发电（利用废弃物）以及其他类型，如地热能、波浪能发电和使用燃料电池的微型发电装置等。

（二）分布式电源技术发展现状

近年来，分布式电源在全球电力系统转型中扮演关键角色，得益于能源需求增长、技术进步及政策支持。欧美国家通过激励政策扶持分布式电源，亚洲国家如日本、中国也积极推进。中国《可再生能源法》等政策推动分布式电源快速发展，特别是光伏和风电，成为绿色能源重要支撑。分布式电源并网规模逐年增加，华北、华东光伏发电领先，风电集中在“三北”地区，但分布式风电政策促使东南沿海、内陆项目兴起。分布式电源的推广和区域扩大，优化了能源结构，提升了偏远地区能源可及性。

（三）分布式电源接入输配电系统的优势

分布式电源接入输配电系统，不仅颠覆了传统电网的运行模式，还带来了多重实际优势。首先，由于分布式电源通常位于接近负荷中心的位置，这有效减少了远距离输电过程中的电能损耗，特别是在农村地区和负荷分散区域，这一优势尤为显著。其次，分布式电源能够分担传统电网的供电负担，缓解主网压力，并通过高效利用清洁能源，显著提升了能源利用率，同时在高峰负荷时为主网提供必要的支撑。最后，分布式电源还增强了地方能源的自给自足能力，减少了对输电的依赖，其清洁属性更是助力区域实现低碳发展目标，为区域经济注入了可持续的发展动力。

二、分布式电源接入对输配电系统的影响

分布式电源的接入对传统输配电系统带来了深远的影响，既带来了机遇，也伴随了挑战。以下从电网结构与运行方式、电能质量、电压稳定性与无功功率问题、系统保护与故障处理的难度，以及对输配电网规划与经济性的挑战五个方面，具体分析其影响。

（一）对电网结构与运行方式的改变

分布式电源的接入深刻改变了传统电网以集中发电为主的结构，使得电力流动模式更加复杂。传统电网中，电能通常自上而下从集中发电厂经高压输电电网传输至中、低压配电网，最终送达终端用户。然而，随着分布式电源的广泛接入，部分电源位于配电网甚至用户侧，导致电网中出现双向功率流成为常态，增加了电网运行的复杂性。例如，在低负荷时段可能出现“倒送电”现象，这对传统单向供电模式的设备提出了适应性改造的要求。此外，为了应对分布式电源随机波动性和间歇性的特点，电网运行需要更加灵活的调度能力，使得传统电网对调度中心的依赖逐步转向需要更多分布式的自治调控能力，这一转变推动了智能电网和微电网技术的快速发展。

（二）电能质量问题

分布式电源的接入，特别是间歇性能源如太阳能光伏和风力发电，其输出功率易受自然条件（如日照、风速等）变化的影响，从而引发一系列电能质量问题。这些问题主要包括电压波动

与闪变，即分布式电源的快速启动或停机可能导致电网电压的波动，频繁的起停还会产生电压闪变，对敏感设备的运行产生不利影响；谐波污染，由于许多分布式电源通过逆变器接入电网，这些逆变器可能产生谐波分量，进而威胁电网的谐波水平和稳定运行；以及三相不平衡，相较于集中式发电，分布式电源的异地分散布置可能加剧电网三相负荷的不平衡问题。在分布式电源接入比例较高的情况下，这些电能质量问题尤为严重，因此，采取有效的技术措施，如利用动态电压恢复装置（DVR）和有源滤波器等设备，来改善电能质量显得尤为重要。

（三）电压稳定性与无功功率问题

分布式电源的接入给电压稳定性和无功功率平衡带来了新的挑战。由于其输出功率具有波动性，分布式电源的接入可能直接影响局部区域的电压稳定性，甚至带来电压崩溃的风险。同时，逆变器型分布式电源通常缺乏自发提供无功功率的能力，这在大规模接入的情况下，可能加剧电网的无功功率供需平衡问题，进而影响整体电网的电压调节能力。为解决这一问题，一方面需要推动分布式电源的无功功率补偿能力建设，如在逆变器设计中增加无功功率调节功能；另一方面，可以在电网中部署动态无功补偿设备，如静止无功补偿器（SVC）和静止同步补偿器（STATCOM），以增强电网的无功调节灵活性，从而有效应对分布式电源接入带来的电压稳定性和无功功率平衡问题。

（四）系统保护与故障处理难度的增加

分布式电源接入电网后，对保护系统带来了显著挑战。一方面，继电保护逻辑变得更为复杂。在传统单电源供电模式下，供电方向明确，继电保护设计相对简单。然而，分布式电源的接入导致双向功率流动，改变了故障电流的流向和大小，这可能使得传统保护设备功能失效或误动。另一方面，故障检测与定位的难度也有所增加。分布式电源的接入可能降低电网短路电流水平，使得故障电流幅值减小，从而为故障检测带来更大挑战。同时，由于分布式电源广泛分布于电网中，故障定位与隔离的时间可能会延长。因此，为适应分布式电源接入带来的这些变化，需要重新设计保护技术，例如采用基于广域信息的保护方案，或引入高速通信和智能算法的综合保护系统，以提升电网对复杂故障的检测与处理能力。

三、针对分布式电源接入的技术对策

分布式电源的接入在推动能源结构转型和提升能源利用率方面发挥了重要作用，但同时也对传统电力系统带来了深远挑战。为确保电网运行的安全性、可靠性和高效性，需要制定和实施一系列技术对策，以应对因分布式电源接入而产生的问题。以下从多个技术角度具体分析应对策略：

（一）电压稳定性与无功补偿技术

随着分布式电源大量接入，配电网电压波动问题加剧，可能导致电压失稳，且部分分布式电源主要输出无功功率，加剧无功功率不足。为应对此，可采取以下措施：安装动态无功补偿设备（如 SVC、STATCOM）及时调节电压与无功功率；引入具备无

功补偿能力的智能逆变器，使分布式电源动态提供或吸收无功功率；结合分布式电源分布特性，优化电网运行电压曲线，通过配电变压器分接头调节或配电自动化技术，降低电压偏差，从而维持配电网的电压稳定性。

（二）电能质量改进方法

分布式电源，特别是基于逆变器的光伏和风电系统，可能引发谐波、电压闪变、电网频率波动等电能质量问题。为改进电能质量，可采取以下措施：安装有源滤波器（APF）或组合滤波器消除谐波；采用柔性负载策略和定制化动态电压调节设备减缓电压闪变，并优化电源布局降低相间电压不平衡；加强并网设备的电磁兼容性设计，完善接入点的电气隔离与屏蔽措施，从源头控制高频噪声干扰，从而降低对电网的不良影响。

（三）智能电网与数字化建设

为实现对分布式电源的准确管理，需推动电网智能化和数字化建设。通过部署先进量测系统（AMS）和同步相量测量装置（PMU），提升对分布式电源接入点及其功率变化的智能感知与实时监控能力。建立分区域的智能能量管理系统（EMS），协同管理分布式能源、储能装置和负荷，优化调度以降低运行风险。同时，依托大数据平台和 AI 算法进行电网状态预测与运行优化，为未来电网稳定运行提供精准决策支持。

（四）系统保护与控制优化

分布式电源接入给传统电网保护配置和控制方式带来挑战，如保护范围模糊、故障定位困难等。为此，需设计适用于多馈入、多电源分布的选择性保护方案，应用智能化断路器实现自适应保护，及时隔离故障点。同时，推动主站与分站协同的分层控制体系建设，使调度中心能动态分配资源，并赋予分布式电源接入单元独立调节与保护能力。

（五）储能技术与柔性调度策略

为缓冲分布式电源的波动特性，需引入储能系统并优化调度策略。可设计多功能储能装置，如锂电池、超级电容器或飞轮储能，用于功率调频、无功补偿和备用电力供给。同时，根据负荷需求和分布式电源分布优化储能系统布局，缩短传输距离提升能效。结合储能技术与分布式能源管理，使用先进算法制定柔性调度策略，实现峰谷平抑与负载均衡，提高电网运行的灵活性和稳定性。

（六）政策支持与技术标准化

政策和标准的完善是分布式电源平稳接入的关键。需制定分布式电源并网接入规范，包括并网电压等级、无功输出范围、电能质量指标等，提供统一实施依据。同时，鼓励技术创新与试点示范工程，推动储能、新型逆变器等技术研发及成果转化。此外，完善电价机制，实施灵活定价，提升分布式能源经济性，鼓励用户主动参与并网，共同促进大规模分布式电源的平稳接入。

四、结束语

分布式电源的兴起深刻影响了传统电力系统的输电与配电，既促进了能源供应多样化和灵活性，也带来了电压波动、不稳定性增加等问题。我们通过探讨技术措施如智能电网技术、先进储能系统和灵活监控管理策略，应对这些挑战。展望未来，分布式电源应用将扩大，电力系统需提升兼容性，引入人工智能、先进材料等新技术，同时建立灵活电力交易机制和支持政策，以实现可持续发展目标。

参考文献

- [1] 邱维斌. 分布式电源接入对电网配电系统的影响及优化措施 [J]. 电力设备管理, 2024, (23): 42-44.
- [2] 吴颖颖. 分布式能源接入对输电系统的影响及应对措施分析 [J]. 仪器仪表用户, 2024, 31(11): 98-100.
- [3] 黄闽. 分布式电源接入对供电系统的影响及应对策略 [J]. 光源与照明, 2024, (03): 162-164.
- [4] 吕静. 计及条件风险价值的含电动汽车微电网低碳经济调度研究 [D]. 燕山大学, 2023.
- [5] 刘嵩. 分布式电源接入对配电系统的影响及应对策略 [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（五）. 国网黑龙江省电力有限公司鸡西市郊区供电分公司, 2024: 328-330.
- [6] 乔佳伟. 优化运行策略与算法的分布式能源系统容量配置研究 [D]. 华北电力大学（北京）, 2023.
- [7] 张赛赛. 分布式能源并网海量数据处理与辅助决策技术研究 [D]. 华北电力大学（北京）, 2023.
- [8] 裴春博. 岸基供电下船舶分布式能源虚拟同步发电机控制方法研究 [D]. 青岛科技大学, 2023.
- [9] 高峰. 基于分布式能源的小型社区能量路由器控制策略研究 [D]. 太原科技大学, 2023.
- [10] 谢敏, 黄莹, 李弋升, 等. 分布式能源动态聚合于虚拟电厂的演化博弈决策方法和机理分析 [J]. 电网技术, 2023, 47(12): 4958-4977.

智能化技术在高压输电线路检修中的实践分析

张东, 王凯

内蒙古电力(集团)有限责任公司鄂尔多斯供电分公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017000

摘要: 本文探讨了智能技术在高压输电线路维护中的实际应用分析。基于状态监测技术、无人机巡检和人工智能算法等智能技术, 分析了这些方法在提升效率、降低成本和保障电网稳定性方面的作用。同时, 研究了在应用过程中面临的技术和经济挑战, 并提出了相应的改善建议, 为高压输电线路的现代化维护提供了参考。

关键词: 高压输电线路维护; 智能技术; 状态监测; 无人机巡检; 人工智能

Practical Analysis of Intelligent Technology in High Voltage Transmission Line Maintenance

Zhang Dong, Wang Kai

Inner Mongolia Electric Power (Group) Co., Ltd. Ordos, Inner Mongolia 017000

Abstract: This paper explores the practical application of intelligent technology in high-voltage power transmission line maintenance. By focusing on technologies like condition monitoring, drone inspections, and artificial intelligence algorithms, it analyzes their roles in enhancing efficiency, reducing costs, and ensuring grid stability. Additionally, it examines the technical and economic challenges during implementation and offers suggestions for improvement, providing insights for modernizing transmission line maintenance.

Keywords: high-voltage power transmission line maintenance; intelligent technology; condition monitoring; drone inspection; artificial intelligence

引言

高压输电线路作为电力系统中电能传输的关键, 其运行状况对电网安全至关重要。然而, 传统检修方式存在效率低、危险性高等问题。近年来, 随着无人机、物联网、人工智能等智能化技术的快速发展, 这些技术被逐步引入高压输电线路检修中, 实现了高效巡检和故障定位, 提升了运维的安全性和精准性。本论文旨在分析智能化技术在高压输电线路检修中的实践应用, 探讨其表现及挑战, 为后续技术推广和创新发展提供参考, 对实现电力系统高效、安全、稳定运行具有重要意义。

一、智能化技术在高压输电线路检修中的应用现状

随着智能化技术的快速发展, 高压输电线路的检修模式正逐步从传统人工方式转向更加高效、精准、智能的技术解决方案。这些技术在提升检修效率、降低风险和优化资源配置方面发挥了重要作用。以下将从无人机巡检技术、在线监测系统、图像识别与人工智能技术以及机器人自动化检修四个方面探讨其应用现状。

(一) 无人机巡检技术

无人机技术已经广泛应用于高压输电线路的巡检工作, 其优势在于无需依赖地面复杂的基础设施, 能够在空中以灵活的方式快速覆盖广泛的检修区域。通过搭载高清摄像头、红外热成像仪和激光雷达等先进设备, 无人机可以对输电线路运行状况进行全

方位的监测。例如, 通过热成像技术, 无人机能够检测线路发热点, 从而及时发现潜在故障区域。此外, 智能无人机系统能够实时传输高清图像和运行数据, 并配合后端的数据分析平台, 实现检修工作的实时性与高效性。许多输电企业还开始引入完全自动化的无人机巡检站, 进一步推动巡检流程的自动化。

(二) 在线监测系统

在线监测系统是智能化输电线路维护的重要组成部分, 其核心是依托物联网技术和传感设备对线路状态进行24小时实时监测。通过在输电线路的关键节点安装各种传感器, 可以采集导线温度、振动频率、风速、风向和湿度等多种运行及环境数据。这些传感器采集的海量信息通过无线通讯模块传输到后台服务器, 利用大数据分析技术与专家系统进行故障预测和风险评估。例如, 当传感器检测到导线异常震动时, 系统会自动预警, 提示维

护人员进行排查，从而降低故障的发生概率。在线监测系统还可以与 GIS（地理信息系统）结合，更直观地定位故障点，提高维护工作的效率。

（三）图像识别与人工智能技术

基于计算机视觉和人工智能的技术在输电线路检修中也得到了快速推广和应用。依托图像识别算法，通过分析无人机拍摄或固定监控设备采集的图像，可以自动识别线路和设备上的缺陷，例如导线裂纹、鸟巢堆积、锈蚀区域或绝缘子损坏等。传统的人工巡检往往存在主观性强、效率较低的问题，而人工智能技术的加入显著提升了缺陷检测的准确性与一致性。目前，深度学习算法被广泛应用于线路巡检数据的处理，尤其是在缺陷检测与分类方面表现出极高的可靠性。例如，基于卷积神经网络（CNN）的图像识别模型在识别精度上已经超过了资深专家的人为检修水平。

（四）机器人自动化检修

在高压输电线路的检修工作中，一些复杂或危险的任务正逐步由机器人取代人工操作。高压环境下的操作风险较高，而机器人可以在零风险的环境下完成精细作业。例如，线路爬行机器人可以沿输电线移动，对导线的表面状态进行检查或局部修复。这种机器人通常具备强大的抗干扰能力和高精度运动控制系统，可以在风雨等恶劣条件下正常工作。此外，针对输电线路上绝缘子表面的污染问题，绝缘子清洗机器人提供了经济环保的解决方案。这些机器人通过高压水射流或干式清洗技术，可以高效清除灰尘与污垢，保证线路设备的绝缘性能。

综上所述，智能化技术在高压输电线路检修中的应用已经涵盖了巡检、监测、分析和修复等主要环节，大幅度提升了维护工作的安全性和智能化水平。这些技术的广泛应用不仅提高了检修效率，还显著降低了运行成本，为现代化输电网络的稳定运行提供了有力保障。

二、智能化技术在高压输电线路检修中的优势分析

随着电力系统规模的快速扩大和对供电可靠性的更高要求，高压输电线路的检修工作面临诸多挑战。智能化技术的应用正在显著改善检修工作的整体水平，其优势主要体现在以下几个方面：

（一）检修效率提升

智能化技术通过自动化设备与先进算法的结合，大幅提升了检修工作的效率。相比于传统的人工巡检方式，智能化技术减少了大量重复性劳动和人员的体力负担。例如，无人机广泛应用于线路巡检工作，能够快速覆盖大范围输电线路区域，同时避免了人员长时间暴露在复杂地形中的艰苦作业。此外，数据的实时采集与智能分析技术使得检修周期进一步缩短，从传统人工检测的天数或数周缩减到数小时甚至分钟。这种效率的提升为电网稳定运行提供了更有力的支持，也为快速响应突发性故障赢得了宝贵时间。

（二）检修精度与可靠性提高

智能化技术在检修精度上表现尤为突出。依靠高精度传感

器、图像识别和大数据分析等技术，智能化设备能够实现故障的精准定位，避免传统检测方式中因工具精度不足或人为因素造成的漏检与误判。例如，利用红外热成像技术与人工智能算法结合，可以有效识别导线过热、绝缘体裂纹等问题，实现对潜在隐患的早期预警能力。这种基于智能化的精准检修，有效提高了故障诊断的准确性与及时性，显著降低了因为延迟或误判导致的更大范围停电或设备受损风险。

（三）安全性改善

高压输电线路的检修工作本身带有极高的风险，特别是在高空、高压或恶劣天气条件下作业，检修人员的人身安全面临巨大威胁。而智能化技术通过无人化、自动化设备的应用，极大改善了检修工作的安全性。例如，无人机与巡检机器人可以替代人工完成绝大部分的线路巡检工作，从根本上减少了检修人员接近高压线路的机会，降低触电、高空坠落等事故的发生率。同时，在暴雨、暴雪等恶劣天气条件下，智能巡检设备的任务执行能力远超人工，为风险环境中的抢修工作提供了更好的保障。

（四）数据驱动的决策支持

智能化设备在检修过程中积累了大量的运行状态数据，为精准判断输电线路健康状况和科学制定检修计划提供了重要依据。这些数据经过大数据分析和建模，可以挖掘出输电线路的长期运行规律并预测未来可能出现的问题。例如，通过监测历史数据中某些温度、振动或者电气性能异常的趋势，可以提前安排针对性检修，从而减少设备突发故障的可能性。这种对数据的深度利用使得检修工作由以往的“被动抢修”转向“主动预防”，不仅提高了电网的整体可靠性，还让有限的维修资源得到了最优化的配置与利用。

综上所述，智能化技术的应用为高压输电线路检修工作带来了前所未有的优势，既提升了检修效率和精度，又大幅增强了安全性与可靠性，并通过数据支持形成更科学的决策过程。伴随着智能化水平的不断提升和更多创新技术的投入应用，高压输电线路的检修工作将迈向更加智能、高效与安全的未来。

三、智能化技术在实际应用中的挑战与对策

（一）面临的主要挑战

尽管智能化技术在高压输电线路维护领域展现了显著的效率和精度优势，但其实际应用仍面临诸多挑战。首先，智能化检修设备的初始投入成本较高，例如无人机、机器人以及传感器设备的购置与维护成本，这对一些资金有限的电力企业或机构而言可能形成普及的障碍。其次，技术的复杂性带来了显著的学习曲线。从业人员需要掌握复杂的软硬件操作、数据采集与分析等技能，这对传统技能为主的维护团队提出了更高要求。此外，智能运维中涉及大量的实时数据，如设备运行状态监测、图像数据分析等，这些数据对隐私保护提出了新挑战。例如，未经授权的数据访问和网络攻击可能造成系统风险甚至业务中断。最后，在一些地理偏远地区，技术的环境适应性仍存在问题，例如通讯信号覆盖不足可能导致设备失效或数据传输滞后，从而影响检修过程

的连续性和可靠性。

(二) 应对措施

针对以上挑战，需采取系统性的对策来推动智能化技术的深化应用。首先，可以通过拓展智能化技术的规模化应用实现成本分摊。随着生产规模增加和市场竞争的加剧，设备制造成本将逐步降低，同时多企业共享智能化检修资源也能显著减少单一企业的财务压力。其次，应注重从业人员培训体系的建立和完善，使其能够迅速掌握智能化检修设备的操作技术。例如，可开展分层次、多类型的培训课程，包括基础设备操作、数据分析能力和网络安全基础等，以全面提升运维团队素质。同时，为了应对数据安全风险，应加强网络安全防护机制，比如加密数据传输、严格的用户权限管理和实时监控异常行为。此外，相关监管部门还应积极完善关于智能化运维的法规建设，制定合法合规的数据隐私保护政策。最后，对于偏远地区的应用挑战，有必要研发定制化解决方案，例如开发低带宽或离线模式下可运行的智能化设备，同时在恶劣环境下提高设备的物理坚固性和电池续航能力，从而提升技术在不同环境中的普适性。

通过针对性地解决这些挑战，高压输电线路的智能化检修技术能够得到更广泛和深入的应用，为电力系统的安全性、稳定性和高效性提供更强有力的支持。

四、总结与展望

近年来，智能化技术在高压输电线路检修中的应用日益凸显其显著优势。传统巡检和检修方法耗时长、成本高，且存在安全

风险。而智能无人机、机器人技术及物联网设备的引入，彻底改变了这一现状。这些技术不仅扩大了巡检覆盖范围，提高了检测速度，还能快速精准地定位故障点，大幅减少了停电时间和检修成本。智能化技术的另一大亮点是提升了工作安全性。传统检修工作常需在恶劣天气或危险区域进行，安全风险大。而智能化设备通过远程操控和精准功能，减少了巡检人员直接参与危险作业的需求，降低了人身风险。同时，高精度监测设备、数据采集分析工具和算法的支持，使得检修工作更加可靠和精准，为线路的稳定运行提供了有力支撑。展望未来，高压输电线路检修领域的智能化进程仍有广阔发展空间。5G通信技术的成熟将进一步提升智能巡检设备的数据传输能力，实现更高效的实时监测和远程操控。人工智能技术结合大数据分析平台，可对输电线路海量数据进行深度挖掘，生成精准线路状态评估报告，优化检修策略，实现从被动维修向主动运维的转变。区块链技术的应用则有望增强维修记录的透明性和可信度，提高设备全生命周期管理效率。然而，要实现全面智能化和无人化检修，还需在技术研发、设备稳定性和可靠性、互联互通能力等方面持续努力。同时，建立科学高效的数据管理与共享机制也至关重要，以促进行业协同合作和资源整合。未来，随着技术的不断升级和行业创新的持续推进，高压输电线路检修将朝着更高效、精准、安全的方向演进。这将为电力行业的持续稳定运行提供坚实可靠的技术保障，推动整个行业迈向更加智能化、现代化的未来。智能化技术的应用不仅改进了技术管理手段，更为电力行业的现代化发展开辟了崭新方向。

参考文献

[1] 郭斌. 高压输电线路施工技术与检修方法探微 [J]. 冶金与材料, 2020, 40(05): 112-113.
[2] 罗崇盛. 高压输电线路施工技术与检修方法分析 [J]. 通讯世界, 2024, 31(11): 94-96.
[3] 昌国际, 郭伟, 李颖洁. 特高压输电线路检修无人机替代技术探索与实践 [J]. 中国战略新兴产业, 2024, (30): 136-138.
[4] 周永林. 一种适用于高压输电线路的新型防坠脚钉的研制 [J]. 机电信息, 2024, (18): 13-15+19.
[5] 田军. 高压输电线路施工检修方法 [J]. 通讯世界, 2024, 31(07): 151-153.
[6] 张媛媛. 超特高压输电线路检修计划信息化管理的分析与应用 [J]. 电工技术, 2024, (S1): 409-411.
[7] 张伟, 韩旭. 电力工程中高压输电线路施工技术与检修研究 [J]. 大众标准化, 2024, (05): 52-54.
[8] 魏泽林. 高压输电线路状态检修技术 [J]. 电工技术, 2024, (05): 192-196.
[9] 同可为, 李伟, 魏小龙, 等. 特高压输电线路检修工况下感应电压与电流计算分析 [J]. 电工电气, 2023, (08): 30-34.
[10] 刘振亚. 中国特高压交流输电技术创新 [J]. 电网技术, 2013, (3).

配网调度大数据分析在故障快速定位与处理中的应用

周航

国网江陵县供电公司, 湖北 江陵 434100

摘要： 本文探讨了大数据分析在电网调度中快速故障定位与处理方面的应用。文章阐述了利用大数据技术优化电网运行及加强故障管理的重要性。主要内容包括实时数据处理、机器学习算法以及数据可视化在故障检测和快速响应中的整合应用。研究结果表明，大数据驱动的解决方案显著提高了电网的可靠性、效率和安全性。

关键词： 大数据分析；电网调度；故障定位；故障处理；实时数据处理；机器学习；数据可视化

Application of Big Data Analysis of Distribution Network Scheduling in Fast Fault Location and Processing

Zhou Hang

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

Abstract： This paper explores the application of big data analysis in power grid scheduling for fast fault location and handling. It discusses the importance of utilizing big data technologies to optimize grid operations and enhance fault management. Key aspects include the integration of real-time data processing, machine learning algorithms, and data visualization for effective fault detection and swift response. The findings highlight the significant improvements in reliability, efficiency, and safety of the power grid through big data-driven solutions.

Keywords： big data analysis; power grid scheduling; fault location; fault handling; real-time data processing; machine learning; data visualization

前言

配电网是电力系统的关键组成部分，其运行复杂性高且故障多发，尤其是在城市配电网中，线路分布密集且用户需求多样化，任何故障都会对供电可靠性造成严重影响。传统的配网故障定位与处理方法依赖于人工经验和简单的监测手段，往往存在定位精度低、处理效率慢的缺点，难以满足智能电网时代的发展需求。随着物联网、智能终端及自动化设备的大量应用，配电网运行过程中积累了海量数据，例如遥信、录波、故障信息等，这为基于大数据分析技术提升故障处理能力提供了可能性。通过挖掘配网运行数据的潜在价值，可以实现对故障的快速定位和智能分析，从而优化调度策略，提高配网运维效率和故障响应速度。

一、配网调度与大数据分析技术概述

（一）配网调度系统的功能与特点

配网调度系统是电力系统运行与控制的重要组成部分，其主要职能包括配电网的运行监控、设备状态管理、事故处理指挥及优化调度。配网调度具有如下特点：

1. 分布复杂、多源数据汇聚：配网覆盖广、接入点多，各类终端设备如配电自动化系统、智能变电站、分布式能源等不断产生大量监测数据，数据的多样性与实时性对调度系统带来新挑战。

2. 故障定位与处理要求高：停电故障的快速定位和恢复是提高供电可靠性的重要环节。然而在传统调度系统中，人员依赖简

单的保护信号和报警信息，分析诊断效率较低。

3. 实时性与高效性：配网调度要求及时监控运行状态，故障发生时快速做出调度决策，极大依赖数据分析的准确性与系统响应速度。

（二）大数据分析技术的核心概念与工具

大数据分析技术是解决庞大、复杂数据集挑战的有效手段，配电网领域的大量运行数据正好契合其应用场景。核心概念包括以下几个方面：

1. 大数据的特性：电网数据的高容量（Volume）、高速度（Velocity）、多样性（Variety）和真实性（Veracity）特点，使传统数据处理方法难以胜任，而大数据技术则可提供更优的处理能力。

2. 常用分析工具与算法：

工具：如 Hadoop 分布式计算框架、Spark 实时计算引擎等，满足海量数据的存储与处理需求。

算法：包括数据挖掘中的聚类分析、回归模型；机器学习中的决策树、随机森林、深度学习；以及时间序列分析方法等，这些算法可以分别应用于故障信息的提取、趋势预测及快速定位。

数据处理流程：配网大数据从采集到分析一般包括数据清洗、特征提取、建模与应用等环节。数据清洗提高数据质量，建模算法则帮助提炼决策支持的关键信息。

（三）配网调度与大数据结合的关键点

配网调度系统与大数据技术的结合，需要从数据应用的实际需求出发，以提高电网运行的智能化水平为目标。以下是关键结合点：

1. 多源数据的获取与整合：配网调度系统中的主要数据来源包括：

实时监控数据：由 SCADA 系统（数据采集与监控系统）提供的遥测信号、遥信状态等；

故障相关数据：故障录波器与保护装置产生的故障波形、报警信号等；

历史数据：以往故障案例分析与设备状态记录。

2. 数据清洗与预处理：由于电网数据多样且可能含噪，大数据分析的前提是通过清洗技术剔除无效数据，降低噪声干扰，提升分析精度。

3. 实时性与高效性：故障定位与处理需要实时响应，因此需结合流数据处理技术（如 Spark Streaming 或 Flink）进行实时计算，保障调度技师快速获取决策支持信息。

4. 结果可视化与辅助决策支持：基于分析结果，将复杂的计算结果以直观的图表形式呈现，方便调度员快速了解故障范围、定位与处理建议。

综合而言，配网调度系统与大数据分析技术的深度结合，可以通过更高效的处理方法和智能化的分析手段，突破传统调度管理的技术瓶颈，进一步提升电网运行的稳定性与安全性。在这一基础上，故障快速定位与处理不再单纯依赖于人工分析，而是更加依赖智能化的决策支持系统。

二、大数据分析在故障快速定位中的应用

随着电力系统的规模不断扩大，电网运行状态愈发复杂，故障定位的准确性和时效性对电力稳定具有至关重要的作用。大数据分析技术通过对海量数据的采集、建模和分析，为电力系统故障的快速定位提供了先进的解决方案。本部分将详细介绍大数据分析在故障数据采集与建模、快速定位分析方法以及实际场景中的应用。

（一）故障数据的采集与建模

在电网运行中，故障数据主要来源于多种类型的设备监控数据、传感器数据和保护装置的记录。这些数据包括但不限于以下几类：

1. 时间序列数据：如继电保护装置记录的运行状态变化，断路器的跳闸时间等。

2. 空间布局数据：涵盖电网中各节点位置、线路分布及设备

互联关系。

3. 高频波形数据：记录故障发生瞬间的电流、电压波形，为故障特征识别提供关键依据。

为了从这些多样化的数据中挖掘有效信息，需要进行科学的数据建模：

1. 数据预处理：包括异常数据清洗、缺失值填补以及数据降维处理，确保数据质量。

2. 特征提取：结合电网的物理特性与电气特性，利用信号处理算法（例如小波变换、傅里叶变换）提取关键故障特征值。

3. 统一数据结构：将采集的异构数据整合为统一的数据库，为后续分析提供完整且可操作的数据环境。

通过上述采集与建模过程，电网故障数据得以高效、准确地数字化，满足后续快速分析和定位需求。

（二）故障快速定位的分析方法

故障快速定位是通过对电网运行数据的分析，迅速判断故障发生的位置及范围。大数据分析技术在这一过程中发挥了重要作用，主要应用的方法包括：

1. 模式识别方法

基于历史故障数据的分析与总结，通过机器学习算法（例如 K-means 聚类、支持向量机）学习不同故障模式的特征。一旦实时数据中检测到相似模式，系统即可快速判定故障位置。

2. 数据驱动的故障溯源

数据驱动方法利用了大规模电网运行数据，结合主成分分析（PCA）等算法挖掘数据之间的相关性。例如，分析故障后各设备记录的电流、电压偏移特点，将信息追溯至最可能的故障源。

3. 物理模型与数据模型结合

在电网中，传统的物理模型（如潮流计算、短路分析）已经为故障定位提供了理论支持。将这些模型与实时大数据结合，可进一步提升定位效率。例如，在物理模型给出大致故障范围后，数据模型可利用多源数据验证和优化定位结果。

4. 时空分析与可视化

基于时间序列数据与空间拓扑信息，通过可视化技术构建实时故障定位图。故障后的波形传播特性也可通过时空分析暴露故障点，提高故障定位的直观性和准确性。

三、大数据分析在故障处理中的应用

（一）故障处理辅助决策系统

大数据分析在电网故障处理中的首要应用是构建辅助决策系统。传统故障定位与处理通常依赖人工经验和历史记录，这种方式不仅效率较低，且容易受人为因素的影响。通过引入大数据技术，电网可实时采集并分析来自传感器、智能电表及其他设备的大量数据，从而实现快速的故障诊断与处理建议。

故障处理辅助决策系统的关键在于全面具备以下能力：

1. 多源数据融合：系统能够整合历史运行数据、故障记录、天气条件等多种数据源，使决策更加全面可靠。

2. 快速诊断分析：利用先进的建模与算法技术，当电网发生故障时，系统可自动检测故障区域并判断故障性质（如短路、过载等），提供准确的处置建议。

3. 可视化管理：基于推送的分析结果，生成易于理解的可视

化图表或报告，使运维人员能够快速掌握故障情况和优化方案。

此类系统不仅缩短了故障处理时间，还显著提高了决策正确性，减少了人为干预失误的可能性。

（二）智能化运维与预警

随着电网运行规模和复杂度的提升，智能化运维和故障预警成为电网稳定运行的重要保障。借助大数据分析技术，电网可实现主动监控与维护，提前识别潜在故障隐患，并采取干预措施。

1. 实时监控和异常检测：大数据分析能够帮助电网实时识别电压、电流等参数的异常波动，并通过模式分析及历史比较，确定潜在风险。

2. 预测性维护：通过机器学习技术分析设备运行数据及健康状态，预估设备生命周期或可能的故障点，及时发送预警，优化检修安排，避免因设备老化或不当使用导致的突发性故障。

3. 自动化调度：将分析结果纳入电网的调度策略，系统可根据风险等级动态调整能源分配和负荷管理，确保电力系统的整体稳定性。

智能化运维和预警系统的应用，不仅提升了电网故障处理的主动性和精准性，还有效降低了运维成本和停电风险。

（三）案例研究：在实际运维中的应用效果

为了更好地理解大数据分析在故障处理中的实际效果，以下以某地区实际运维案例为例：

1. 案例背景：某城市供电局面临老化设备较多、电力负荷增长迅速的问题，传统故障定位与处理效率低，严重影响用户体验。

2. 应用方案：供电局应用了基于大数据分析的辅助决策系统和智能化运维技术，全面升级其电网故障监测与分析平台。具体措施包括部署大数据采集系统、引入机器学习算法对历史数据建模分析、建立实时监控中心。

3. 应用成果：系统上线后，该区域设备故障定位时间从平均3小时缩短至15分钟，预测性维护准确率提升至90%以上，整体供电可靠性指标（SAIDI）提高了15%。此外，由于故障处理速度加快及运维成本降低，用户满意度显著提升。

此案例充分证明，通过大数据技术实现的智能化电网运维，不仅提升了故障处理效率，也为电网安全运行与精细化管理奠定了坚实基础。

总而言之，大数据分析技术在电网故障处理中的广泛应用，已成为推动电网智能化发展的重要支撑工具。它不仅提升了故障处理的智能化与高效性，还为未来电网的全方位优化提供了技术保障。

四、总结与展望

（一）研究总结

近年来，随着电力系统的复杂性不断提高，传统的电网调度方法在应对复杂故障定位和处理时逐渐展现出局限性。大数据分析技术凭借其强大的数据处理能力和多维度的分析手段，为电网故障定位和快速处理提供了全新的解决方案。本文综述了大数据分析在电网调度中的应用现状，重点探讨了大数据在数据采集与融合、智能预测与故障诊断方面的应用，以及其在提高电网故障处理效率与稳定性方面的突出作用。通过分析案例，验证了大

数据技术在实时故障检测和多源信息之间建立深层关联的能力，为电网运行的稳定性提供了显著支持。

（二）面临的挑战

尽管大数据技术在电网调度和故障定位中展现了巨大的潜力，但在实际应用中依然面临多方面的挑战：

1. 数据质量与可靠性：电网运行涉及海量多源异构数据，这些数据可能因采集设备的稳定性问题而存在误差或缺失，从而影响分析结果的可靠性。

2. 计算资源与实时性：大规模电网数据的处理需要高效的计算资源支持，特别是在实时故障定位和关键决策制定中，对计算性能和速度提出了极高要求。

3. 算法复杂性与适用性：当前许多复杂的大数据分析算法在电网故障检测中应用效果虽佳，但需要针对电网运行的动态特性进一步优化和定制，以平衡算法性能与运行效率。

4. 网络安全问题：伴随数据全面数字化而来的是数据安全与隐私保护的问题。电网系统一旦遭受网络攻击，可能造成严重后果。

（三）未来发展展望

未来，大数据分析技术在电网故障定位与调度优化中的应用前景广阔，以下为未来可能的发展方向：

1. 智能化算法集成：结合人工智能技术与大数据分析，加强深度学习、强化学习等算法的优化，从而实现更高效率的电网预测和故障诊断系统。

2. 物联网与边缘计算结合：推动物联网技术在电网中的进一步普及，通过边缘计算有效分担中心系统压力，实现更高效的数据处理与实时响应。

3. 数据标准化与互联互通：构建统一的数据标准和接口规范，解决当前数据异构性问题，促进电网不同系统间的信息共享与协同工作。

4. 数字孪生技术：构建基于数字孪生模型的电网虚拟运行环境，实时模拟运行状态和故障情况，为电网调度提供更科学的决策支持。

5. 安全性与隐私保护提升：开发更加安全的电网数据加密与访问控制技术，确保数据在采集、传输、存储和分析环节中的安全性。

综上所述，大数据分析技术作为电网调度的关键技术之一，无疑将在电网运行智能化、效率提升和故障检测优化方面发挥越来越重要的作用。然而，为了充分实现其潜能，还需持续克服技术和应用中的挑战，并结合新兴技术的力量，共同推动智能电网的未来发展。

参考文献

- [1] 王建树. 调度自动化信息网络故障分析及定位系统应用研究 [D]. 华北电力大学, 2017.
- [2] 张超, 付振晶. 基于大数据分析的10kV配网负荷预测与调度研究 [J]. 电气技术与经济, 2024(11): 317-319. DOI: 10.3969/j.issn.1673-8845.2024.11.100.
- [3] 姜慧兰, 蒋鹏飞, 张绍海. 基于大数据分析的配电网运行状态监测研究 [J]. 电力系统装备, 2024(2): 160-162.

基于人工智能的光伏电站故障诊断与预测维护系统设计

张生兵

国家电投集团新疆能源化工有限责任公司兰州分公司，甘肃 兰州 730050

摘 要： 光伏电站运行效率受故障影响显著，传统诊断方法依赖人工经验，效率低且难以预测潜在故障。为提高运维智能化水平，提出一种基于人工智能的光伏电站故障诊断与预测维护系统。该系统结合深度学习与大数据分析，实时监测光伏组件状态，识别异常模式并预测故障趋势。实验表明，该方法能有效提升故障检测准确率，降低维护成本，为光伏电站稳定运行提供可靠保障。

关 键 词： 光伏电站；故障诊断；预测维护；人工智能；深度学习

Design of Fault Diagnosis and Predictive Maintenance System for Photovoltaic Power Station Based on Artificial Intelligence

Zhang Shengbing

National Power Investment Group Xinjiang Energy and Chemical Industry Co., Ltd. Lanzhou Branch,
Lanzhou, Gansu 730050

Abstract： The operation efficiency of photovoltaic power station is significantly affected by faults. Traditional diagnosis methods rely on manual experience, which is inefficient and difficult to predict potential faults. In order to improve the intelligent level of operation and maintenance, a fault diagnosis and predictive maintenance system of photovoltaic power station based on artificial intelligence is proposed. The system combines deep learning and big data analysis to monitor the status of photovoltaic modules in real time, identify abnormal modes and predict fault trends. Experiments show that this method can effectively improve the accuracy of fault detection, reduce the maintenance cost, and provide a reliable guarantee for the stable operation of photovoltaic power plants.

Keywords： photovoltaic power station; fault diagnosis; predictive maintenance; artificial intelligence; deep learning

引言

光伏发电在清洁能源领域占据重要地位，但电站长期运行易受环境与设备老化影响，导致效率下降甚至故障。传统维护方式依赖定期巡检，难以应对突发问题，且人工成本高昂。人工智能技术的发展为光伏运维提供了新思路，通过数据驱动实现精准诊断与预测。研究旨在设计一套智能化运维系统，提升光伏电站的可靠性与经济性，推动行业可持续发展。

一、光伏电站故障分析

光伏电站运行过程中，组件损坏是最常见的故障类型之一。组件表面污染、隐裂、热斑效应等问题会显著降低发电效率，严重时甚至引发火灾。这些缺陷在早期阶段往往难以通过肉眼观察发现，需要借助专业设备进行检测。热成像技术能够识别组件异常发热区域，但受限于检测成本，难以实现全天候监控。组件性能衰减是一个缓慢的过程，传统检测方法难以及时捕捉细微变化。通过分析组件电流-电压特性曲线的偏移情况，可以初步判断其健康状态，但这种方法对检测人员的专业要求较高。

逆变器作为光伏系统的核心设备，其故障直接影响整个电站的运行效率。常见的逆变器故障包括 IGBT 模块损坏、电容老化、散热不良等。这些故障通常表现为输出波形畸变、效率下降或异常停机。由于逆变器内部结构复杂，传统检测方法往往只能在故障发生后进行维修，无法实现提前预警。通过监测逆变器的工作温度、输入输出电压、谐波含量等参数，可以建立其健康状态评估模型。值得注意的是，逆变器故障往往具有渐进性特征，其性能参数会随着时间推移而缓慢劣化，这为预测性维护提供了可能。

线路系统故障主要包括电缆老化、连接器松动、接地故障等

问题。这些故障具有隐蔽性强、危害大的特点，特别是直流侧的绝缘故障可能引发严重安全事故。传统检测方法主要依靠定期巡检和绝缘测试，难以实现实时监控。红外热像仪可以检测线路接头过热现象，但受环境因素影响较大。通过在线监测系统的漏电流、对地阻抗等参数变化，可以及时发现潜在的线路故障。值得注意的是，线路老化往往与环境条件密切相关，特别是在高温、高湿或盐雾环境下，线路故障率会显著升高。

光伏系统除核心组件故障外，还存在诸多容易被忽视的潜在问题。支架腐蚀问题在沿海地区尤为突出，盐雾环境导致钢结构年腐蚀速率可达0.3mm/年，严重影响系统结构安全。阴影遮挡问题在秋冬季节更为显著，特别是当组件表面落叶覆盖率超过15%时，发电效率下降可达12%。通信故障虽不直接影响发电，但会导致监控数据缺失，统计显示RS485总线故障占通信问题的63%。通过对全国28个光伏电站三年运维数据的深度挖掘，发现故障分布呈现显著时空特征：热斑效应在7-8月正午时段的出现频率是其他时段的2.7倍；逆变器故障在南方潮湿地区的发生率比北方高40%；支架腐蚀问题在沿海200米范围内的电站年增长率达18%。这些规律被编码为128维特征向量存入故障知识图谱，结合地理位置、气候类型等环境参数，构建了包含17万个数据样本的智能诊断基准库。

二、智能诊断模型构建

光伏电站智能诊断模型采用卷积神经网络（CNN）与长短期记忆网络（LSTM）的混合架构，充分发挥两种网络的优势特性。CNN网络专门处理红外热成像数据，通过多层卷积和池化操作提取组件表面温度分布的空间特征。LSTM网络则专注于分析电流电压曲线的时序特征，捕捉发电参数随时间变化的动态规律。两种网络的中间层特征通过特征融合层进行有机结合，同时引入环境参数作为辅助输入，构建起完整的故障特征表达体系。模型输出层采用softmax激活函数，给出各类故障的发生概率，为运维决策提供量化依据。

在数据预处理阶段，针对不同类型输入数据采取差异化处理策略。红外图像经过灰度归一化、降噪和尺寸标准化处理，消除环境光照和拍摄角度的影响。电流电压曲线数据通过滑动窗口采样和标准化处理，确保不同时间尺度的特征都能被有效捕捉。环境参数包括辐照度、环境温度和组件温度等，经过归一化后与其它模态数据保持相同量纲。特别值得注意的是，在数据标注环节采用专家标注与半自动标注相结合的方式，通过数据增强技术扩充样本数量，有效缓解了光伏故障样本不足的问题。

模型训练过程采用分阶段优化策略，显著提升了训练效率和模型性能。首先对CNN和LSTM网络分别进行预训练，利用公开数据集和仿真数据建立基础特征提取能力。然后采用迁移学习技术，将预训练模型参数作为初始值，在目标电站的实际数据上进行微调。训练过程中引入注意力机制，使模型能够自动聚焦于最相关的特征区域。为防止过拟合，除了常规的Dropout和L2正则化外，还采用了标签平滑技术。实验表明，这种训练策略在小样

本条件下仍能保持较高的识别准确率，验证了模型的泛化能力。

模型性能验证采用交叉验证和实际部署相结合的方式。在10MW光伏电站的测试中，模型对常见故障的平均识别准确率达到96.3%，其中热斑效应识别率高达98.7%。对比实验显示，混合模型性能显著优于单一模态模型，证明了多模态融合的有效性。模型推理速度满足实时性要求，单次诊断耗时不超过200ms。通过可视化工具分析发现，模型能够准确捕捉组件局部过热、电流异常波动等关键特征，与专家经验高度吻合。这些结果充分验证了所提方法在光伏故障诊断中的实用价值。

三、预测维护策略优化

光伏电站预测性维护系统的核心在于建立精准的设备健康状态评估模型。该系统采用改进的Prophet时间序列算法，融合设备历史运行数据与实时监测参数，构建多维度的退化趋势预测模型。通过分析逆变器工作温度、组件输出功率衰减率、线路绝缘阻抗等关键指标的变化轨迹，算法能够量化评估每台设备的剩余使用寿命。模型特别考虑了光伏设备特有的季节性和昼夜周期性特征，在预测过程中引入环境温度修正因子和辐照度补偿系数，显著提高了在复杂气候条件下的预测准确性。预测结果以可视化形式展示，直观呈现设备健康状态的演变趋势。该系统创新性地将LSTM神经网络与Prophet算法进行集成，通过注意力机制动态调整不同时间尺度特征的权重，有效解决了传统方法对长期趋势捕捉不足的问题。针对光伏组件的老化特性，模型建立了考虑温度循环、湿度冻结、机械载荷等多应力耦合作用的加速老化因子库，使剩余寿命预测误差控制在 $\pm 7\%$ 以内。系统还开发了基于三维虚拟现实的可视化平台，运维人员可通过交互式界面查看任意设备的实时健康评分、历史退化曲线和预测维护时间节点，支持多维度数据下钻分析。在实际部署中，该模型展现出强大的适应性，能够根据不同类型光伏组件（单晶硅、薄膜等）的特性自动调整预测参数，并通过在线学习机制持续优化预测精度。

维护计划生成模块采用基于深度强化学习的动态规划算法，通过构建多目标优化函数，将设备预测寿命、维修资源约束、发电收益、维护成本等12个关键参数纳入统一决策框架。系统首先对预测模型输出的设备健康状态数据进行聚类分析，采用K-means算法将设备划分为紧急（剩余寿命<30天）、重要（30-90天）和观察（>90天）三个优先级等级，并为每类设备建立差异化的维护策略库。在制定具体维护计划时，系统实时接入气象部门的72小时高精度天气预报数据，通过蒙特卡洛模拟评估不同维护时间窗口的预期发电收益，自动选择辐照度低于400W/m²的时间段安排作业。维护任务分解引擎将每个工单智能拆解为人员资质匹配（需2名持证电工）、备件库存核查（自动触发采购流程）、设备调试方案（包含历史参数记录）等7个标准步骤，并通过加密的MQTT协议推送到运维人员的智能终端。系统特别设计了区域负载均衡算法，利用图论中的最大流最小割原理，确保不同子阵之间的维护作业间隔不小于4小时，从而将电站整体可用率维持在99.5%以上。实际运行数据显示，该模块可使计划性维

护导致的发电损失控制在总发电量的0.3%以内，较传统人工排程方式降低67%。远程监控与智能预警系统构建了完整的数据采集与传输网络。在电站现场部署的边缘计算节点负责实时采集设备运行数据，通过5G网络回传至云端分析平台。系统采用多级报警机制，根据故障严重程度设置不同级别的预警阈值。当检测到异常情况时，自动触发声光报警并生成包含故障定位、可能原因和处置建议的详细报告。运维人员可通过 Web 端或移动 APP 实时查看电站运行状态，远程调整系统参数或下达控制指令。

实际应用表明，该预测性维护系统显著提升了光伏电站的运维效率。在某50MW光伏电站的全年运行数据中，系统提前预警了92%的设备故障，平均提前时间达到48小时。通过优化维护计划，非计划停机时间减少37%，年发电量提升5.2%。系统特别在应对极端天气事件中表现出色，在台风季来临前成功预测并更换了23处存在安全隐患的组件。运维成本分析显示，预测性维护相比传统定期维护模式可节省28%的人力成本和35%的备件库存。

四、系统验证与应用

在10MW光伏电站的实地测试中，智能诊断系统展现出卓越的性能表现。测试选取了包含单晶硅与双玻组件的混合阵列，覆盖山地、平地等不同地形条件。系统通过部署在每串组件上的智能传感器节点，实时采集电流电压曲线、工作温度等32项运行参数。与传统人工巡检相比，智能系统实现了从抽样检测到全量监测的转变，检测频率从每月一次提升至每分钟一次。测试期间共记录到217次异常事件，系统准确识别出215次，包括14次热斑效应、53次组串失配和8次逆变器故障。特别值得注意的是，系统成功捕捉到3起处于早期阶段的潜在故障，这些故障在常规检测中极易被遗漏。

对比分析显示智能系统在多个维度显著优于传统方法。传统红外检测平均需要3天完成全站扫描，而智能系统实现实时监控，响应时间缩短至5分钟内。故障识别准确率从传统方法的82%提升至98%，其中对微裂纹等隐性缺陷的识别率提升最为明显。误

报率从每周15次降至6次，主要得益于算法对阴影遮挡等非故障因素的智能过滤。系统采用分级报警机制，将故障分为紧急、重要、一般三个等级，运维团队可根据优先级有序处理。经济性分析表明，虽然智能系统前期投入较高，但通过减少发电损失和延长设备寿命，投资回收期仅为2.3年。

预测性维护模块在实际运行中取得显著成效。系统基于设备健康状态预测，提前7天生成维护计划，准确预测了89%的设备故障时间。通过将维护作业安排在辐照度较低的时段，最大程度降低发电损失。测试期间共执行63次预防性维护，相比传统的故障后维修模式，减少突发停机31次。备件库存周转率提升40%，仓储成本降低22%。运维团队反馈显示，智能系统提供的故障定位精度达到组件级别，维修效率提升50%以上。在应对沙尘暴等极端天气时，系统提前24小时发出组件清洁预警，避免了预计7.8MWh的发电量损失。

长期运行数据验证了系统的稳定性和扩展性。经过12个月连续运行，系统保持99.2%的在线率，适应了-20℃至65℃的环境温度变化。数据分析发现，系统诊断准确率随运行时间持续提升，这得益于自学习算法对新增数据的持续优化。将系统扩展至相邻电站时，仅需3天即可完成模型微调，验证了良好的可复制性。能效分析显示，通过优化运维策略，电站PR值（性能比）从79.6%提升至83.2%。这些实证数据为智能运维系统在光伏行业的推广应用提供了有力支撑，展示了数字化转型在新能源领域的重要价值。

五、结语

基于人工智能的光伏运维系统显著提升了故障诊断与预测能力，为电站高效运行提供技术支持。未来研究可探索边缘计算与数字孪生技术的融合，进一步降低系统延迟与部署成本。随着算法优化与数据积累，智能化运维将成为光伏行业的标准配置，助力全球能源结构转型。

参考文献

- [1] 张宏伟, 龚优军, 王洛南, 等. 光伏电站的智能运维技术应用研究 [J]. 通讯世界, 2024, 31(02): 106-108.
- [2] 郭峰, 郑主平, 杨维湘, 等. 光伏电站发电支路故障点快速定位技术研究 [J]. 价值工程, 2024, 43(21): 115-118.
- [3] 张洪昶, 王宇. 基于物联网技术的分布式光伏电站智能运维系统 [J]. 物联网技术, 2023, 13(01): 137-139.
- [4] 吕凯. 电气自动化在集中式并网光伏电站中的应用及发展 [J]. 电子元器件与信息技术, 2023, 7(10): 218-221.
- [5] 潘巧波, 李昂, 何梓瑜, 等. 数字化电厂智慧平台在光伏电站的应用 [J]. 黑龙江电力, 2023, 45(02): 137-142.
- [6] 田强, 贾聚光. 光伏运维“智慧通”一体化平台应用 [J]. 农村电工, 2023, 31(05): 30-32.
- [7] 熊昌全, 温贤茂, 张宇宁, 等. 光伏组件发电故障诊断方法研究 [J]. 科技创新与应用, 2023, 13(09): 77-81+85.
- [8] 郑晏, 厉小润, 张天文. 基于功率信号分析的光伏电站故障诊断方法 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2024, 36(05): 150-158.
- [9] 周显彤, 鞠振河. 光伏电站技术故障分析诊断计算技术及实际应用发展现状 [J]. 电子世界, 2021, (01): 13-14.
- [10] 吴春华, 曹明杰, 李智华, 等. 光伏系统直流电缆故障检测及其定位研究 [J]. 太阳能学报, 2021, 42(05): 267-275.

售电公司在电力交易中风险管理要点及应对策略

唐嘉泽

中国华电集团清洁能源有限公司华东分公司，上海 200000

摘 要： 售电公司在电力交易中面临诸多风险，有效管理风险并制定应对策略至关重要。所以为促进售电公司的稳健运营，确保售电公司在当前复杂多变的市场环境当中实现高质量发展，论文围绕售电公司电力交易风险管理与应对进行深入探究，分析了市场价格波动、政策变化、信用违约等风险因素，探讨了风险评估方法，提出加强市场分析、优化合同管理、建立应急机制等应对策略，以提升售电公司风险管理水平与市场竞争力。

关 键 词： 售电公司；电力交易；风险管理；应对策略

Risk Management Key Points and Coping Strategies for Electricity Selling Companies in Electricity Trading

Tang Jiaze

East China Branch, China Huadian Group Clean Energy Co., Ltd. Shanghai 200000

Abstract： Electricity selling companies face many risks in electricity trading, and it is crucial to effectively manage risks and develop coping strategies. Therefore, to promote the stable operation of electricity selling companies and ensure their high-quality development in the current complex and changing market environment, this paper conducts in-depth exploration around the risk management and response of electricity trading in electricity selling companies. It analyzes risk factors such as market price fluctuations, policy changes, and credit defaults, explores risk assessment methods, and proposes coping strategies such as strengthening market analysis, optimizing contract management, and establishing emergency mechanisms to improve the risk management level and market competitiveness of electricity selling companies.

Keywords： electricity selling company; electricity trading; risk management; coping strategies

引言

随着电力体制改革深入，售电公司在电力市场中的作用愈发凸显。电力交易环境复杂多变，售电公司面临的风险不断增加，因此也给售电公司带来了一定的交易风险，做好交易风险防控既能保障售电公司的稳定发展和运营，同时也能通过其中的风险防范提升售电公司的发展质量和效果，进而助力增强售电公司的市场核心竞争力。所以，论文立足于深入研究电力交易风险管理及应对策略，本次研究对保障售电公司稳定运营、推动电力市场健康发展具有重要现实意义。

一、售电公司在电力交易中存在的风险

（一）政策法规变化

政策法规的变化给售电公司的电力交易带来诸多风险。电力行业受政策法规的高度监管，政策调整可能改变市场结构和交易规则^[1]。例如，政府出台新的环保政策，可能要求提高可再生能源的消纳比例，这就会影响售电公司的电源结构选择。如果售电公司未能及时调整策略以适应政策要求，可能面临合规风险和经济损失。再如，补贴政策的变化会影响新能源发电企业的积极性，进而影响电力市场的供应格局。

（二）市场价格波动

售电公司在电力交易中面临着显著的市场价格波动风险。电

力市场的价格受到多种因素的影响，如供求关系、燃料价格、天气变化等。在供应方面，发电企业的发电能力受机组故障、燃料供应不稳定等因素影响^[2]。例如，若煤炭供应紧张，火力发电成本上升，会导致电力市场价格上涨。需求端则随季节、经济活动水平等波动，夏季用电高峰和冬季取暖需求可能使电力供不应求，价格飙升。此外，新能源发电的间歇性，如风电、光伏发电受天气影响，其不稳定的出力也会造成电力市场价格的波动。

（三）信用违约

售电公司在电力交易中还面临信用违约风险。在电力市场中，售电公司与发电企业、电力用户等多方存在合同关系。发电企业可能因自身经营问题，如资金链断裂、设备故障无法按时足额发电，导致无法履行合同约定电量供应^[3]。电力用户也可能

由于经营不善、财务困难等原因拖欠电费或者突然违约减少用电量。对于售电公司而言，发电企业的违约会使其无法满足用户的用电需求，面临违约赔偿风险；用户的违约则会直接影响售电公司的收益，损害其现金流和财务状况，增加经营风险。

二、售电公司电力交易风险管理的重要意义

在售电公司的发展中，做好电力交易风险管理具有极其深远的意义和价值，通过交易风险管理有助于维护售电公司的稳健运营、保障其财务安全。同时，基于交易风险管理也能实现售电公司资源的优化配置，为促进电力市场的健康稳定发展提供助力。具体来讲，售电公司电力交易风险管理的重要意义体现为以下2点：

（一）保障公司稳健运营与财务安全

在我国电能供应领域发展中，售电公司是其中重要的组成部分，售电公司发展的稳定性以及质量往往也决定了社会电能供应的质量，与电力市场发展的效率和稳定性也产生密切联系^[4]。而售电公司在发展中通过强化电力交易风险管理则能够维护其自身发展的稳定性，进而对于保障整个电力市场的长远发展产生积极影响。在电力交易中，售电公司往往会面临着来自于多个层面的风险，如市场价格波动风险、供需变化风险以及政策调整风险等，多种类型风险都会对于售电公司的发展产生影响，因此针对其中的风险进行深度的解读和动态监控，并且采取相对应的措施进行防控成为关键，也是保障售电公司稳健运营的重中之重^[5]。并且，售电公司通过科学化的风险防控措施也能有效保障财务安全，这主要是由于电力交易风险往往会转化为售电公司实际的财务损失，在严重的情况下还有可能致使售电公司资金链断裂，影响到售电公司的长远发展。所以，开展电力交易风险管理也有助于对电力交易风险进行精准评估、识别和应对，以此确保售电公司的财务安全性。

（二）促进电力市场健康发展与资源优化配置

在售电公司的发展和运营中，电力交易风险管控同样也有助于促进电力市场的健康发展，实现资源的优化配置。从电力市场的角度来看，其属于复杂而又庞大的系统，电力市场的稳定运行往往依赖于各市场参与主体的各司其职，售电公司作为电力市场当中的重要参与主体，其能否保持发展的稳健也对于电力市场的健康发展产生深远影响^[6]。在实际中，售电公司如果缺乏电力交易风险管理能力，势必会对其自身的正常发展产生影响，而这也间接导致整个电力市场发展产生波动，这主要是由于售电公司作为电力市场中的重要参与主体，也是供电供应链中的关键一环，如果其中所面临的电力交易风险并未得到有效的控制，则这一风险的影响势必沿着供应链不断放大，甚至会引发整个电力市场的动荡。并且，售电公司通过对电力交易风险的管控也能及时识别市场供需变化、了解市场价格走势，而基于这一数据又有助于促进售电公司的资源优化配置，进而使售电公司提升运行效能、强化发展质量，使之拥有更强的市场竞争力^[7]。

三、售电公司电力交易风险管理方法

（一）风险监控与预警

售电公司需要建立有效的风险监控与预警机制。在风险监控方面，要持续跟踪已识别的风险因素。对于市场价格波动风险，实时监测电力市场价格动态，利用先进的信息技术手段，如大数据分析平台，收集电力交易平台、发电企业报价、用户需求等多方面的数据，及时掌握价格变化趋势^[8]。对于政策法规变化风险，密切关注政府部门的政策动态，设置专门的政策研究小组，解读新政策对电力交易的影响^[9]。在风险预警方面，根据风险监控的结果，设定合理的预警阈值。例如，当市场价格波动超过一定比例或者政策法规调整可能对公司业务产生重大影响时，及时发出预警信号，以便公司能够迅速采取应对措施，避免风险进一步扩大造成更大的损失^[10]。

（二）风险识别与评估

风险识别与评估是售电公司电力交易风险管理的重要环节^[11]。售电公司首先要对各种潜在风险进行全面的识别。通过收集市场数据、政策信息、交易对手的信用状况等多方面资料，确定可能影响电力交易的风险因素。例如，关注电力市场价格指数、政策法规发布平台以及交易对手的财务报表等。然后，运用定性和定量的方法对识别出的风险进行评估^[12]。定性评估可以确定风险的性质，如高、中、低风险等级；定量评估则可以通过建立数学模型，计算风险发生的概率和可能造成的损失程度。

（三）风险应对措施制定

售电公司要根据风险识别与评估的结果制定相应的风险应对措施。对于不同类型的风险，采取不同的应对策略^[13]。针对市场价格波动风险，可以采用套期保值等金融工具。例如，通过签订电力期货合同锁定未来的购电价格，从而降低价格波动带来的不确定性。对于政策法规变化风险，要建立灵活的经营策略调整机制。当政策法规变化时，及时调整公司的发展战略、电源结构、交易模式等。对于信用违约风险，要建立严格的信用管理体系^[14]。在售电合同签订前，对交易对手进行全面的信用评估，包括其财务状况、经营历史、信用评级等；合同签订后，加强对交易对手的信用监控，设置信用额度，一旦发现信用风险上升，及时采取防范措施，如要求提供担保或提前终止合同。

四、售电公司在电力交易中风险应对策略

（一）加强市场分析与预测

售电公司加强市场分析与预测是应对电力交易风险的有效策略。售电公司应组建专业的市场分析团队，深入研究电力市场的供求关系、价格形成机制等。通过分析宏观经济形势、能源政策、气候因素等对电力市场的影响，预测电力市场的发展趋势^[15]。例如，研究经济增长对电力需求的拉动作用，以及新能源发展对电力供应结构的改变。同时，利用先进的分析技术和工具，如大数据分析、机器学习算法等，提高市场分析与预测的准确性。通过准确的市场分析与预测，售电公司可以提前制定合理

的交易策略，如在价格低谷时增加购电量，在价格高峰时调整销售策略，从而降低市场价格波动带来的风险，提高公司的经济效益^[16]。

（二）优化合同管理与签订

优化合同管理与签订对于售电公司应对电力交易风险至关重要。在售电公司与发电企业、电力用户签订合同时，要精心设计合同条款^[17]。对于购电合同，明确电量、电价、供电时间、质量标准等条款，同时设置灵活的价格调整机制，以应对市场价格波动。例如，根据燃料价格指数或市场价格波动幅度设定电价调整公式。对于售电合同，除了基本的用电需求、电价等条款外，要加强对用户信用风险的防范。可以要求用户提供保证金或信用担保，明确违约责任和赔偿方式。在合同管理方面，建立完善的合同档案管理系统，对合同的执行情况进行实时跟踪，及时发现并处理合同执行过程中的问题，确保合同的顺利履行，从而降低信用违约风险和市场价格波动带来的风险^[18]。

（三）建立应急处理机制

售电公司建立应急处理机制是应对电力交易突发风险的必要措施。首先，要制定应急预案，针对可能出现的重大风险事件，如发电企业突然违约、大规模停电事故、政策法规的突然重大调整等，明确应急处理的流程和责任分工。例如，当发电企业违约无法供电时，应急预案应规定售电公司如何紧急调配电力资源，从其他发电企业购电以满足用户需求。其次，建立应急资源储备，包括备用的电力供应渠道、应急资金等^[19]。备用电力供应渠道可以通过与多家发电企业签订应急供电协议来实现；应急资

金则可以用于应对突发风险事件带来的额外成本，如高价购电的差价补偿等。应急资源储备则是应对突发风险的坚实后盾。在备用电力供应渠道方面，售电公司要有前瞻性，提前与多家信誉良好、供电稳定的发电企业签订应急供电协议，这些发电企业最好分布在不同区域，涵盖火电、水电、风电等多种发电类型，如此一来，不管遇到何种突发状况，都能多渠道获取电力，保障电力供应的持续性。应急资金同样不可或缺，它是应对突发风险事件额外成本的有力支撑，当遇到发电企业违约或大规模停电，需要高价购电时，应急资金就能及时填补差价，还能用于支付紧急抢修设备、聘请专业技术人员等费用，确保公司在紧急时刻有足够的资金运转，不至于因资金短缺陷入僵局。此外，定期对应急处理机制进行演练和评估，不断完善应急预案，提高售电公司应对突发风险的能力^[20]。

五、结束语

售电公司电力交易风险管理是一项长期而复杂的工作。通过对风险的有效识别、评估与管理，采取科学合理的应对策略，售电公司能够降低风险影响，提高运营稳定性与经济效益，为电力市场的可持续发展贡献力量。展望未来，售电公司需时刻保持居安思危的警觉，以不断进取的精神持续完善风险管理体系，在追求自身高质量发展的征程中，积极担当社会责任，与行业各方携手共进，为推动电力市场迈向更加繁荣、可持续的未来注入源源不断的强大动力，共同书写电力行业蓬勃发展的崭新篇章。

参考文献

- [1] 陈杰. 售电侧放开环境下差异化电能质量购售电策略研究 [D]. 燕山大学, 2021.
- [2] 徐云. 售电侧放开背景下售电公司购售电策略研究 [D]. 武汉大学, 2019.
- [3] 骆亮. 电力市场改革背景下的售电公司营销策略研究 [J]. 现代营销 (下旬刊), 2019(06): 88-89.
- [4] 黄海林. 电力交易管理中的风险与应对措施分析 [J]. 电力系统装备, 2023(6): 185-187.
- [5] 潘肖宇. 基于风险管理理论的电力市场交易管理解析 [J]. 模型世界, 2022(26): 163-165.
- [6] 张硕, 王琪, 袁明珠. 我国电力交易机构合规风险管理体系研究 [J]. 电力与能源, 2022, 43(1): 95-101.
- [7] 蒲远臻. 电力交易机构财税管理风险及其防控措施的有效性研究 [J]. 电脑采购, 2024(19): 187-189.
- [8] 何希庆, 赵尔敏, 王峰, 等. 电力零售公司的信用风险管理体系研究 [J]. 供用电, 2024, 41(2): 81-88.
- [9] 补国苗, 杨亚利. 碳交易视角下电力企业财务风险评价体系构建 [J]. 山东纺织经济, 2023, 40(5): 19-23.
- [10] 陈淦. 电力现货交易中的风险控制策略 [J]. 集成电路应用, 2022, 39(8): 206-207.
- [11] 连晓芬, 经菁, 何方叶, 等. 电力市场化交易履约保障凭证管理体系的应用 [J]. 自动化应用, 2023, 64(12): 240-243.
- [12] 李毅, 陈立, 叶瑞. 云南大型水电企业电力交易风险评估及对策 [J]. 电力系统装备, 2022(5): 134-137.
- [13] 刘迪. 供电企业电力现货市场交易风险管控探究 [J]. 商品与质量, 2023(38): 77-80.
- [14] 尹亮, 郭涛, 马跃强. 电力交易数据安全分类分级管理综述 [J]. 工业信息安全, 2024(4): 67-75.
- [15] 蒲远臻. 电力体制改革背景下电力交易机构财务管理探究 [J]. 时代商家, 2024(44): 75-77.
- [16] 陈虹霖. 电力市场化交易主体信用管理的研究 [J]. 中外企业家, 2023(13): 22-24.
- [17] 李 玮. 火电厂电力营销现货交易风险管理及优化 [J]. 建筑与施工, 2023, 2(20): 155-157.
- [18] 王宗, 胡惠. 电力交易服务热线运营管理效率提升策略 [J]. 环渤海经济瞭望, 2024(2): 96-98.
- [19] 刘昊, 郭烨, 孙宏斌. 省间电力现货交易优化设计与定价机制 [J]. 电力系统自动化, 2024, 48(4): 76-85.
- [20] 张玉. 电力现货市场背景下发电企业财务管理模式探究 [J]. 当代会计, 2024(3): 52-54.

