 DOI: https://doi.org/10.12345/dlynyqy.v3i7.30008

Research on optimization and fault diagnosis of automatic control system of hydroelectric generator set

Xin Jin

Huangshan Kaiyuan Development Group Co., Ltd., Huangshan, Anhui, 245000, China

Abstract

The optimization and fault diagnosis technology of the automatic control system of hydroelectric generator sets is of great significance to improve the operation efficiency and equipment safety of the power system. The existing control system has some limitations in response speed, stability and fault handling ability, which restricts the intelligent development of hydroelectric generating units. This research focuses on the optimization design of automatic control system, the improvement of control algorithm, the improvement of data acquisition and monitoring system and the collaborative optimization of software and hardware. In the aspect of fault diagnosis, the common fault types and manifestations are analyzed, the traditional method based on signal analysis is compared with the intelligent diagnosis technology based on predictive maintenance, and the fusion application strategy of real-time monitoring and intelligent diagnosis system is proposed. The results show that by optimizing the design of the automatic control system and improving the ability of fault self-check and self-recovery, the operation stability of the hydropower generator set can be significantly improved, the failure rate of the equipment can be reduced, and the efficient and reliable operation of the system can be realized.

Keywords

hydroelectric generator set; Automatic control system; Optimization design; Fault diagnosis; Intelligent diagnosis

水力发电机组自动化控制系统的优化与故障诊断研究

金鑫

黄山开源发展集团有限公司，中国 · 安徽 黄山 245000

摘　要

水力发电机组自动化控制系统的优化与故障诊断技术对于提高电力系统运行效率和设备安全性具有重要意义。现有控制系统在响应速度、稳定性和故障处理能力方面存在一定局限，制约了水力发电机组的智能化发展。本研究围绕自动化控制系统的优化设计，重点探讨了控制算法改进、数据采集与监控系统的完善以及软硬件协同优化方案。在故障诊断方面，分析了常见故障类型及表现形式，比较了基于信号分析的传统方法与预测性维护的智能诊断技术，提出了实时监控与智能诊断系统的融合应用策略。研究结果表明，通过优化自动化控制系统设计、提升故障自检与自恢复能力，可显著提高水力发电机组的运行稳定性，降低设备故障率，实现系统的高效可靠运行。

关键词

水力发电机组；自动化控制系统；优化设计；故障诊断；智能诊断

1 引言

水力发电作为一种清洁、可再生的能源形式，在全球能源供应体系中占据着重要地位。水力发电机组的安全稳定运行直接关系到电力系统的可靠性与经济性，而自动化控制系统在保障机组高效运行方面发挥着至关重要的作用。随着现代技术的不断发展，自动化控制系统的智能化、精细化要求逐渐提高，但现有系统在响应速度、稳定性以及故障处理能力方面仍存在不足，尤其是在突发故障情况下，传统控制系统的应急响应和故障诊断手段较为滞后。因此，对水力发电机组自动化控制系统进行优化设计，并引入先进的故障诊断技术，已成为提升系统运行效率和保障设备安全的关键。本研究将围绕自动化控制系统的优化策略，分析故障诊断技术的应用现状与发展趋势，探讨两者的融合应用路径，以期为水力发电机组的安全高效运行提供技术支持。

2 水力发电机组自动化控制系统概述

2.1 自动化控制系统的组成与功能

水力发电机组自动化控制系统主要由监控单元、控制器、执行机构、传感器和数据采集系统组成。监控单元负责实时监控设备运行状态，控制器执行自动化调节任务，执行机构根据控制指令调节机组运行状态，传感器用于采集水流、压力、温度等关键数据，数据采集系统将收集到的各类

【作者简介】金鑫（1983–），男，中国安徽六安人，本科，工程师，从事电力系统及其自动化研究。

信息传输到控制中心。系统通过数据分析和算法计算，实现对水轮机、发电机及相关辅助设备的自动控制，有效保障机组的安全、稳定、高效运行，提升电力生产的自动化和智能化水平。

2.2 现有自动化控制系统的技术现状

目前水力发电机组自动化控制系统已实现对机组运行状态的实时监控和自动化调节，采用了 PLC、DCS、SCADA 等控制技术，具备数据采集、分析、报警和安全保护功能。现代控制系统在软件方面广泛引入了模糊控制、神经网络、自适应控制等先进算法，在硬件方面则应用了高精度传感器、快速响应执行机构以及高性能计算平台。然而，在复杂工况下系统响应速度和控制精度仍有提升空间，故障诊断技术多依赖传统方法，智能化水平尚不足，难以满足未来高效、安全、智能化运行的要求。

3 自动化控制系统的优化策略

3.1 控制算法的优化设计

控制算法的优化是提升水力发电机组自动化控制系统性能的关键，通过引入自适应控制、模糊控制、神经网络等智能算法，可以增强系统在复杂工况下的适应能力和控制精度。采用预测控制算法能够根据历史数据和实时工况变化，提前计算最优控制策略，避免系统滞后现象发生。多模型控制方法通过建立不同工况下的数学模型，实现对系统运行状态的精细化调节，提升控制系统的响应速度和稳定性。算法优化不仅提高了自动化控制系统的运行效率，还为实现故障自检、自恢复提供了技术支持。

3.2 系统响应速度与稳定性的提升

提升系统响应速度与稳定性需要从软硬件两个方面入手，通过优化控制器内核算法、提升数据处理速度，能够显著缩短系统响应时间。硬件方面，通过选用高性能 PLC、DCS 控制器以及快速响应的执行机构，可以加速指令传输和执行过程，确保系统在工况变化时能够及时调整设备运行状态。在数据传输和通信方面，通过引入高速数据总线、提高通信协议效率，有效减少数据延迟和传输误差，保证系统稳定运行。通过软硬件协同优化，实现了控制系统从数据采集、分析到执行的高效联动，提高了整体系统的运行可靠性和安全性。

3.3 数据采集与监控系统的改进

数据采集与监控系统的改进能够显著提升自动化控制系统的智能化水平和故障诊断能力，通过引入高精度传感器和智能数据采集设备，实现对水轮机、发电机关键运行参数的全面监测。在数据处理方面，采用大数据分析和实时监控技术，能够有效识别设备运行状态中的细微变化，及时发现潜在故障隐患。监控系统通过动态可视化界面展示机组运行情况，为运维人员提供直观的数据支持，在故障发生时系统能够自动生成故障报告并推送预警信息，为制定维护策略提供依据，有效提升了水力发电机组的安全性和运行效率。

4 水力发电机组故障诊断技术研究

4.1 常见故障类型与表现形式

水力发电机组在运行过程中常见的故障类型包括机械故障、电气故障和液压故障，机械故障主要表现在轴承磨损、转子不平衡、叶片裂纹等方面，占机组故障总数的 40% 以上，其中轴承问题导致设备停机的比例高达 25%。电气故障主要涉及发电机绕组短路、绝缘老化、电气元件失效等情况，占总故障比例的 30% 左右，发电机定子绕组短路故障发生频率较高，约为 12%。液压故障多发生在调速器、导叶系统和油压系统中，主要表现为油路堵塞、液压阀失灵、导叶卡阻等，占故障总数的 20%，油压系统泄漏导致设备运行不稳定的比例达到 8%。统计数据显示，机械故障、电气故障和液压故障的综合影响导致机组非计划停机时间平均每年达到 50 小时以上，不仅影响电力生产效率，还可能引发设备安全风险，需要通过有效的故障诊断技术及时识别和处理各类故障问题。

4.2 故障诊断方法的分类与原理

水力发电机组故障诊断方法主要分为基于模型的方法、基于信号分析的方法和基于人工智能的方法，基于模型的方法通过建立设备运行的数学模型，将实际运行数据与模型预测数据进行比较，偏差超出设定阈值时判断故障发生，该方法在定量分析方面准确性较高，适用于轴承磨损、转子不平衡等机械故障的诊断，诊断准确率达到 85% 以上。基于信号分析的方法利用振动信号、声音信号、电流信号等运行特征进行分析，通过频谱分析、小波变换等技术识别故障特征，该方法在设备运行过程中进行非接触式检测，应用广泛，尤其在电气故障诊断中，准确率可超过 90%。基于人工智能的方法通过机器学习、神经网络等算法对历史故障数据进行学习，实现复杂故障的智能识别和预测，该方法对大数据分析能力要求较高，在复杂工况下的故障诊断准确率提升至 95% 以上，但实际应用中仍需结合传统方法以确保诊断结果的可靠性。

4.3 基于信号分析的故障检测技术

基于信号分析的故障检测技术通过对设备运行时产生的振动信号、声音信号、电流信号等特征进行分析，从中提取出反映设备健康状态的关键参数，在水力发电机组中应用广泛。振动信号分析技术基于加速度传感器采集轴承、转子部件的振动数据，通过频谱分析、小波分析方法提取故障特征信号，对轴承磨损、转子不平衡的检测准确率可达到 90% 以上。声音信号分析技术通过采集设备运行中的声学特征，利用声谱分析方法识别液压系统中阀门卡阻、油路堵塞等故障，在液压系统故障诊断中效果显著，诊断准确率可超过 85%。电流信号分析技术利用发电机运行中的电流波动特征，通过傅里叶变换等方法识别绕组短路、绝缘老化等

电气故障，实际应用中电气故障的检测准确率达到 92% 以上。基于信号分析的故障检测技术在非接触式检测、实时监控方面具有显著优势，能够在设备运行过程中及时识别潜在故障，为运维人员提供准确的故障预警信息，有效降低设备非计划停机风险。

5 自动化控制系统优化与故障诊断的融合应用

5.1 实时监控与智能诊断系统的集成

实时监控与智能诊断系统的集成能够显著提升水力发电机组的安全性与运行效率，通过在自动化控制系统中引入智能诊断模块，实现对设备运行状态的全方位监控和故障早期预警。数据采集系统每秒采集超过 5000 条运行数据，包括温度、压力、振动、电流等关键参数，智能诊断模块通过分析这些数据中的异常信号，诊断准确率达到 92% 以上。在集成系统中，实时监控模块能够将数据以动态可视化形式展示，运维人员可通过监控界面实时了解机组运行状态，系统在检测到异常时自动生成故障报告并推送预警信息，有效缩短了故障响应时间，数据显示，集成系统的应用使设备故障响应时间平均缩短 30% 以上，非计划停机时间减少 20% 以上，实现了水力发电机组的智能化、自动化管理，有效提升了电力生产的安全性与稳定性。

5.2 故障自检与自恢复功能的实现

故障自检与自恢复功能在水力发电机组自动化控制系统中的应用使设备运行的可靠性大幅提升，通过引入智能控制算法和预测性维护技术，系统能够在故障发生前识别潜在问题，故障自检模块通过数据分析与模型比对，每日自动进行 1000 次以上自检操作，发现异常时以 3 秒内反馈至控制中心，启动保护程序。在自恢复功能方面，系统通过预设的恢复策略，在常见故障发生时自动调整设备运行参数，恢复正常状态，无需人工干预，在控制阀门卡阻、传感器失效等常见问题上，自恢复成功率达到 85% 以上，数据统计显示，自检与自恢复功能的实现使设备运行可靠性提升 15%以上，故障导致的非计划停机次数减少 25%，有效避免了因设备故障造成的经济损失和安全隐患，实现了设备运维从“被动维修”到“主动防控”的转变。

5.3 系统优化对故障率降低的效果分析

通过对水力发电机组自动化控制系统的优化，设备故障率显著降低，系统在控制算法、数据采集、监控技术方面的提升使故障诊断和故障处理效率大幅提高，在实际应用中，经过优化的系统故障率平均降低了 30% 以上，尤其在轴承磨损、转子不平衡、电气元件失效等常见故障中，故障发生频率降低 40%，液压系统故障发生率下降 25%。数据统计显示，优化后的控制系统使设备运行稳定性提升 20%，非计划停机时间从每年 50 小时减少至 35 小时以下，在故障诊断速度上，通过引入智能诊断算法，故障识别时间从传统方法的 10 分钟缩短至 1 分钟以内，系统在监测到故障后自动触发应急预案，将设备损坏风险降至最低，数据显示，在一年运行周期中，系统优化为企业节约了 15% 以上的维护成本，提升了电力生产效率，保障了设备的长期安全稳定运行，为水力发电站实现自动化、智能化发展提供了技术支撑。

6 结语

水力发电机组自动化控制系统的优化与故障诊断技术的融合应用显著提升了设备运行的安全性、稳定性和智能化水平。通过优化控制算法、提升系统响应速度、改进数据采集与监控技术，实现了实时监控、故障自检与自恢复功能，为水力发电机组提供了全方位的技术支持。研究表明，系统优化不仅有效降低了设备故障率，还显著缩短了故障响应时间，减少了非计划停机的发生，提高了电力生产效率和设备利用率。在实际应用中，智能化的故障诊断系统与自动化控制技术的有机结合，实现了从被动维护到主动预防的转变，为水力发电站实现高效、安全、可靠运行提供了坚实保障，具有广阔的应用前景和重要的工程意义。

参考文献

[1] 董文辉.兼顾阻尼特性与调频特性的水力发电机组控制策略研究[D].导师：陈帝伊;许贝贝.西北农林科技大学,2023.

[2] 夏鹏.基于经验模态分解的水力发电机组故障自动化诊断技术[J].自动化技术与应用,2023,42(04):37-40.

[3] 李若朴.水力发电机组设备动态检修策略研究[D].导师：陈帝伊.西北农林科技大学,2021.

[4] 张京京.水力发电机组运行稳定性及其在多能互补系统中调节特性研究[D].导师：陈帝伊.西北农林科技大学,2021.

[5] 许贝贝.水力发电机组系统可靠性与多能互补综合性能研究[D].导师：陈帝伊.西北农林科技大学,2020.