

Reliability Design and Operation Optimization of Automation Control System for Electric Power Engineering

Dehai Yang¹ Haoran Yang²

1. Shuifa Energy Group Co., Ltd., Jinan, Shandong, 250104, China

2. Shuifa Huaxia Group Co., Ltd., Jinan, Shandong, 250104, China

Abstract

With the continuous expansion of modern power grid scale and the sustained improvement of intelligentization levels, power engineering automation control systems play a pivotal role in ensuring grid safety and stability, achieving efficient energy dispatching, and implementing intelligent control. The system's reliability directly impacts power transmission and distribution efficiency as well as operational safety. Starting from the structural characteristics of power automation control systems, this paper systematically analyzes reliability influencing factors under complex operating environments. It explores the application mechanisms of hardware redundancy, software fault tolerance, network security, and intelligent algorithm optimization in system design, while proposing operation optimization strategies based on data-driven and adaptive control. Research findings demonstrate that establishing a multi-layer defense system, optimizing information interaction structures, and introducing intelligent predictive algorithms can significantly enhance the reliability, interference resistance, and operational efficiency of power automation systems. These findings provide theoretical support and engineering references for the safe, economical, and efficient operation of smart grids.

Keywords

power engineering; automation control; reliability design

电力工程自动化控制系统的可靠性设计与运行优化

杨德海¹ 杨皓然²

1. 水发能源集团有限公司, 中国·山东 济南 250104

2. 水发华夏集团有限公司, 中国·山东 济南 250104

摘要

随着现代电网规模的不断扩大与智能化水平的持续提升, 电力工程自动化控制系统在保障电网安全稳定运行、实现能源高效调度与智能控制方面发挥着核心作用。系统的可靠性直接关系到电力输配效率与运行安全。本文从电力自动化控制系统的结构特征出发, 系统分析其在复杂运行环境下的可靠性影响因素, 探讨硬件冗余、软件容错、网络安全与智能算法优化在系统设计中的应用机制, 并提出基于数据驱动与自适应控制的运行优化策略。研究表明, 通过建立多层防御体系、优化信息交互结构与引入智能预测算法, 可显著提高电力自动化系统的可靠性、抗干扰性与运行效率, 为智能电网的安全、经济与高效运行提供理论支撑与工程参考。

关键词

电力工程; 自动化控制; 可靠性设计

1 引言

电力工程自动化控制系统是电力系统稳定、安全、高效运行的技术核心, 其通过实时监测、数据传输与智能调度实现对发电、输电、配电全过程的自动化控制。电力系统的运行环境具有高负载、多扰动、非线性耦合等特征, 任何单元故障都可能引发连锁反应, 导致大面积停电或设备损坏。可靠性设计不仅是技术问题, 更是系统工程问题, 涉及硬件

结构、通信网络、软件逻辑及人机交互等多方面。本文立足于电力自动化控制系统的工程实践, 研究可靠性设计原理与运行优化策略, 旨在为智能电网建设与复杂电力系统运行提供技术支撑与理论依据。

2 电力工程自动化控制系统的结构与运行特征

2.1 系统结构组成与功能划分

电力工程自动化控制系统通常构建为多层分布式架构, 由数据采集与监控(SCADA)层、通信传输层、控制执行层与决策优化层组成, 形成纵向互联、横向协同的控制体系。SCADA层通过传感器、智能测控终端与采集单元实时获取电压、电流、功率因数、频率及负荷等运行参数, 完成设备

【作者简介】杨德海(1970-), 男, 中国山东成武人, 硕士, 高级工程师, 从事电力工程、机械设计和制造、智能系统设计、数字经济研究。

监测、故障报警与操作指令下达。通信传输层采用光纤以太网、5G 专网及工业无线协议，实现多通道冗余通信，确保数据传输的实时性与可靠性^[1]。控制执行层涵盖调压、无功补偿、保护装置及负荷控制设备，是电能调度与执行的关键环节。决策优化层基于算法模型与运行策略，对电力网络进行预测分析、能量管理与自适应优化调控。各层通过标准通信协议（如 IEC 61850、Modbus、DNP3）实现数据交互，形成信息流、能量流与控制流的有机融合，从而支撑系统的智能化与自动化运行。

2.2 自动化控制的运行机理

电力自动化控制系统以实时数据为驱动，通过采集、传输、判断与执行构成闭环控制链，实现对电力系统运行状态的动态调节与优化。系统依托反馈机制维持电压稳定、频率平衡及负载合理分配。传统的 PID 控制结构简单、响应迅速，适用于稳态运行场景；而在复杂波动条件下，自适应控制与模糊控制通过参数在线调整与逻辑推理可实现更高的鲁棒性。现代控制系统进一步引入人工智能、大数据与云计算技术，通过历史运行数据挖掘与模型学习，形成基于数据驱动的智能控制模式。此模式具备预测性与自学习能力，能在运行参数变化前提前进行调整，从“被动响应”转向“主动调度”。智能控制策略的引入使系统具备更强的自愈能力与动态适应性，显著提升了电网的运行效率与抗扰动性能。

2.3 复杂运行环境下的稳定性特征

电力自动化控制系统运行于多源、高负荷和复杂电磁环境中，其稳定性受外部扰动、设备老化、网络延迟及通信干扰等多重因素影响。高压设备切换、雷击、电磁脉冲及谐波干扰均可能引起信号畸变，导致保护动作失灵或控制误判。与此同时，网络通信延迟与节点丢包会降低系统响应速度，影响指令执行的同步性与精确性。在此背景下，系统稳定性不仅依赖硬件抗干扰性能，还取决于控制算法的鲁棒性与容错机制。为提高系统抗扰性，应在架构设计中引入结构冗余与信息冗余，形成多层防护与自恢复机制。关键控制链路需具备冗余通道与智能切换功能，以保障在异常工况下仍能维持持续运行。通过“结构强化—算法优化—容错恢复”的协同设计，系统可在复杂环境中保持高稳定性与长期运行可靠性。

3 自动化控制系统可靠性设计原则

3.1 硬件冗余与结构防护设计

硬件冗余是电力工程自动化控制系统可靠性设计的首要保障，其核心目标在于通过多层次冗余配置实现系统的容错与自恢复能力^[2]。通过设置双机热备份、双通道通信及多电源自动切换机制，可在任意单元设备发生故障时实现无缝接管，确保系统持续运行不受中断。关键控制设备如 PLC、RTU 及变电站测控单元应采用双 CPU 并行架构与双总线通讯结构，以提升抗单点故障与实时响应能力。在高电

磁干扰、高温及振动环境中，应强化屏蔽接地设计与电涌防护，确保信号传输稳定。结构设计应遵循模块化、可更换化原则，使故障模块能够快速隔离与替换，减少系统停机时间。通过硬件冗余与防护结构的协同优化，可实现电力控制系统的高可用性、易维护性与长期运行的可持续稳定。

3.2 软件容错与逻辑自校验机制

软件层的稳定性对电力自动化控制系统的可靠运行至关重要。软件容错设计通过多算法冗余与逻辑交叉校验机制，有效防止控制逻辑异常与程序崩溃。控制系统应建立多级自诊断与故障隔离功能，当检测到信号异常或参数漂移时，能够自动切换至备用逻辑或安全运行模式，以防系统失控。容错策略可通过时间冗余、空间冗余与信息冗余实现程序自适应校正；例如，多线程并行监测与一致性校验技术可确保指令执行的准确性与实时性。软件体系应设立版本回滚机制及安全加密算法，防止恶意篡改与攻击破坏控制逻辑。同时，通过周期性自检与数据校验，实现程序逻辑的持续优化与运行安全性提升，使控制系统在复杂环境下保持高稳定性与鲁棒性。

3.3 网络安全与信息防护体系

在智能电网与工业互联网深度融合的背景下，电力自动化控制系统的网络安全成为影响可靠性的关键环节。通信网络的开放性使系统面临数据泄露、恶意攻击与控制指令伪造等风险。为确保数据传输与系统运行安全，应构建纵深防御体系，涵盖物理隔离、防火墙、入侵检测与身份认证等多维防护手段。通过 VPN 专网与加密通信协议（如 IEC 62351）实现信息在传输过程中的保密性与完整性。关键控制节点应实行分级访问与权限管理，防止越权操作和非法接入。系统日志与操作审计机制可实现行为可追溯与安全事件的快速响应。此外，建立基于人工智能的网络安全监测系统，可对流量异常进行实时检测与预警，形成主动防御能力。多层信息防护体系的建立，确保电力控制系统在开放网络环境下的高可靠性与抗攻击韧性。

4 系统运行优化与智能调控策略

4.1 数据驱动的自适应优化控制

电力工程自动化控制系统的智能化发展趋势推动了控制模式由传统的经验控制向数据驱动的自适应控制转变。依托海量历史运行数据与实时监测信息，系统通过建立动态数据模型对电力负荷、运行状态及外部扰动进行全面表征。基于神经网络、模糊逻辑及强化学习算法的融合应用，可实现非线性系统的预测性调节与自学习控制。自适应控制系统能够根据运行环境变化自动调整控制参数，使系统在负荷波动、突发扰动及设备老化条件下依然保持最优性能。通过多维数据融合与在线学习机制，系统可不断修正模型偏差，实现对复杂电力系统运行状态的精准响应。该方法显著提高了控制系统的动态鲁棒性与能效水平，为实现智能化、柔性化

的电力调度提供了技术支撑。

4.2 智能预测与决策支持系统

智能预测与决策支持系统是提升电力自动化控制系统运行可靠性的核心技术之一。通过整合数据分析、模型预测与调度优化功能，系统能够在运行早期阶段识别潜在风险并实施动态干预。基于深度学习、时序建模与灰色关联分析的算法框架，可实现电压波动、频率异常与负荷突变的快速识别与趋势预测。依托云计算和边缘计算架构，系统可实现大规模数据的并行处理与多源信息融合，大幅提升预测精度与响应速度。在调度层面，智能算法能够根据实时负荷与电价信号自动优化发电与输配资源配置，协调供需关系，减少能量损耗。智能决策系统的应用使电力网络具备更高的自主判断与调节能力，为实现安全、经济、稳定的电力运行提供了强有力的决策支持。

4.3 故障诊断与自愈控制机制

电力自动化系统的故障诊断与自愈控制是确保电网安全与连续供电的关键环节。系统通过多维信号监测与模式识别技术，对电流、电压、频率及相角等关键参数进行实时分析，识别异常特征并判断故障类型及位置。基于逻辑推理与数据驱动的诊断算法，可在毫秒级完成故障定位与隔离操作，防止故障蔓延。自愈控制依托分布式控制架构，各节点具备独立决策能力，当局部单元出现异常时可迅速切换至备用通道或执行单元，保证系统局部故障不影响整体运行。结合储能系统与分布式能源，自愈机制还可在电源侧实现快速供电恢复，形成具备自检测、自修复与自优化能力的智能电力系统，从而显著提升电网的韧性与可靠性。

5 运行可靠性提升与维护优化路径

5.1 系统冗余与层级防护协同

电力工程自动化控制系统的可靠性提升应从结构与运行两个层面协同推进。结构层面通过冗余设计构建系统防御基础，运行层面则实现故障隔离与功能自恢复。多层次冗余设计涵盖硬件、通信与软件三个方面：硬件冗余通过双机热备、并行控制与电源切换机制保障核心设备稳定运行；通信冗余通过多通道数据链路和多协议容错机制防止信息传输中断；软件冗余则利用逻辑校验、容错算法与多线程监测实现故障自愈^[3]。为进一步增强系统韧性，应在系统架构中建立“主动防御—被动保护—自恢复”的层级防护机制，对控制中心、远程终端及执行单元实行分级容错设计。多路径传输与关键节点冗余部署使系统在部分模块失效时仍能保持核心功能运行，从而有效提升系统的抗干扰能力与运行鲁棒性。

5.2 设备健康管理 with 预测性维护

设备健康管理（PHM）理念的引入为电力自动化系统

的可靠性维护提供了科学支撑。通过安装多类型传感器，对设备振动、温度、电流、绝缘电阻等关键参数进行实时采集，可全面掌握设备运行状态。基于多源数据融合建立健康指数模型（HI），可实现设备性能衰退的量化描述。结合机器学习算法，如随机森林、支持向量机或深度神经网络，可对设备劣化趋势进行预测，实现由“事后维修”向“预测性维护”的转变。该模式能够提前识别潜在隐患，减少突发性停机，延长设备生命周期。通过在线监测与周期性检修相结合，可实现维护策略的动态优化，确保维护资源分配的合理性与成本控制的最优性，为系统稳定运行提供持续支撑。

5.3 运行数据闭环反馈与持续优化

运行数据的闭环反馈机制是实现系统持续优化的核心路径。通过构建覆盖采集、分析、决策与执行的全流程数据管理体系，系统可实现状态自感知与自调节。控制中心应建立基于大数据的运行评价模型，对能效、稳定性与安全性指标进行动态分析与综合评估。借助数据挖掘与异常检测算法，可识别系统潜在风险点，发现控制参数偏差与隐性故障趋势，并以反馈结果驱动控制策略优化。闭环管理模式实现了“监测—诊断—优化—验证”的循环迭代，使系统性能持续改善。通过与云计算平台的结合，可实现跨区域数据共享与智能决策支持，推动电力自动化控制系统从被动响应向主动优化转型，最终实现高可靠性与智能化运行的融合发展。

6 结语

电力工程自动化控制系统的可靠性设计与运行优化是现代智能电网建设的重要基础。可靠性不仅取决于硬件设备的性能，更依赖于系统架构的合理性、软件算法的鲁棒性及运行维护的科学性。研究表明，通过构建冗余防护体系、强化软件容错机制、完善网络安全防线，并结合数据驱动的自适应控制与预测性维护策略，可显著提升系统的稳定性与自愈能力。未来，随着人工智能、数字孪生与区块链等新兴技术的深入应用，电力自动化系统将逐步实现从“被动响应”向“主动优化”的转变，形成集感知、决策与自学习于一体的智能控制格局，为构建安全、绿色与高效的现代电力系统提供坚实支撑。

参考文献

- [1] 王佩歌.智能变电站自动化系统可靠性模型与评估方法[D].华中科技大学,2019.
- [2] 王旭东,面向可靠性提升的配电自动化终端优化配置技术.天津市,国网天津市电力公司,2015-08-22.
- [3] 雒丽娟.电力自动化实时数据库系统高可靠性的设计与实现[J].中小企业管理与科技(下旬刊),2014,(09):233-234.