水电站电气设备运行状态监测与自动化管控体系构建

李 庚
十堰市郧阳区水利事业发展中心 湖北 十堰 442500

摘 要：水电站电气设备长期连续服役，工况动态波动明显，设备性能衰减具备隐蔽性与渐进性特征，传统人工巡检与周期性监测模式，难以捕捉设备细微运行异常，整体管控精细化程度不足。本文结合水电站电气设备运行规律与传统管控模式的现存短板，梳理适配电站复杂工况的状态感知、数据溯源、智能识别与联动控制技术，搭建分层化、闭环式的自动化管控体系，多维度优化监测布局与管控机制，有效提升电气设备运行稳定性与电站整体管控智能化水平。

关键词：水电站；电气设备；状态监测；自动化管控；智能研判

引言：电气设备是水电站电能生产、输送与分配的关键载体，设备运行的稳定状态直接决定电站整体运维质量与供电可靠性。水电站特殊潮湿密闭的作业环境、动态波动的运行负荷，都会持续影响电气元器件工作性能，逐步诱发各类隐性运行缺陷。传统运维模式依赖人工经验开展定期检测，数据采集间断、隐患识别滞后，难以适配电气系统连续、动态的运行管控需求。自动化、智能化管控模式的引入，能够补齐传统运维短板，推动水电站电气设备管控模式的全面升级。

1 水电站电气设备运行特征与管控现存短板

1.1 水电站主要电气设备运行工况特征

水电站电气设备涵盖发电、变电、配电及控制等多类装置，整体设备体系构成繁杂，运行工况具备较强的连续性与稳定性[1]。设备长期处于不间断服役状态，负荷状态随库区来水、电网调度需求产生动态波动，运行参数始终处于微调变化的状态。厂房内部湿度偏高、水汽聚集明显，部分设备长期处于封闭潮湿的作业环境，外部环境因素会持续作用于设备本体。系统电气设备联动运行紧密，单类设备的运行波动会传导至整套电气系统，形成相互影响的运行关系，对设备运行稳定性与工况一致性有着较高要求。

1.2 电气设备长期运行的状态演变规律

水电站电气设备在长期带电、持续负荷的运行条件下，内部元器件会出现缓慢的性能衰减变化。绝缘结构会随运行时长逐步老化，耐受电压能力与密封性能持续下降，设备内部损耗不断累积。导电构件、连接部位受长期发热与电磁作用影响，会出现接触状态变化与材质损耗。常规发电机组定子绕组正常运行温度保持在80℃至120℃区间，长期超温运行会加速绝缘材质老化，缩短设备服役年限。设备运行状态的演变具备渐进性与隐蔽性，初期异常变化难以直观显现。工况劣化会随运行时间持续累积，从轻微性能衰减逐步发展为明显运行缺陷，最终引发设备运行异常，干扰电气系统平稳运行。

1.3 传统设备状态监测模式的运行局限

传统水电站电气设备监测工作以定期人工巡检、阶段性仪器检测为主要方式，监测工作存在明显的时段性间隔。人工排查依赖人员作业经验，对设备细微工况变化、隐性性能损耗的识别能力不足，容易遗漏初期隐患。监测数据多为阶段性静态数值，无法完整捕捉设备连续运行过程中的动态参数波动。监测记录依靠人工整理归档，数据更新节奏慢，难以形成连贯的设备状态研判依据，无法适配电气设备连续运行的监测需求。

1.4 传统管控模式自动化适配短板

传统电气设备管控体系以人工统筹、线下管控为主要模式，数字化与自动化接入程度偏低。管控流程较为固化，依托固定周期开展运维处置，无法根据设备实时运行状态灵活调整管控重点。各类设备运行数据独立记录存储，数据互通性弱，难以形成系统化的状态研判条件。现有管控逻辑缺少自动感知、智能预警、自主处置的适配能力，难以应对设备动态变化的运行工况，无法适配水电站电气系统智能化、自动化的发展趋势。

2 水电站电气设备自动化监测与管控关键技术

2.1 电气设备多维度状态感知采集技术

水电站电气设备运行状态涵盖电气参数、物理形变、环境工况等多项内容，单一采集维度无法完整还原设备真实运行状态。多维度状态感知采集技术依托各类高精度传感终端，覆盖机组、主变、开关柜、互感器等核心设备的监测场景。设备可实现每秒钟数次的数据采集频次，精准捕捉运行温度、负荷电流、工作电压、振动幅值与绝缘电阻等关键指标，有效覆盖设备本体运行

状态与周边环境变化。彻底摆脱人工巡检采集间隔长、精度偏低的短板，实现设备运行状态的全天候精细化捕捉[2]。持续输出稳定、有效的原始数据，为后端数据处理、工况分析与智能管控提供可靠的数据支撑。

2.2 运行数据传输规整与溯源技术

设备现场采集的原始数据来源分散、格式不一，杂乱的数据内容会干扰状态分析的精准度。运行数据传输规整与溯源技术搭建稳定可靠的场内数据传输链路，保障前端采集数据有序、完整上传。对多源异构数据开展统一规整处理，完成数据筛选、纠错与标准化转换，剔除无效冗余信息，规范数据存储格式。搭建结构化数据存储台账，对每一组运行数据标注采集节点与设备对应信息。构建完整的数据溯源链条，支撑设备工况复盘、异常成因排查，提升数据资源的利用价值与可追溯性。

2.3 电气运行异常智能识别研判技术

水电站电气设备性能劣化具备渐进特征，早期异常工况隐蔽性强，常规人工研判难以提前察觉。电气运行异常智能识别研判技术依托连续规整的海量运行数据，结合电气设备固有运行阈值搭建专属分析逻辑。系统可精准识别小幅参数偏移、谐波畸变、温度异常等隐性问题，对超出标准区间的运行参数进行重点标记。依托长期数据积累梳理工况波动规律，区分正常负荷波动与实质性设备缺陷。转变传统事后排查的管控模式，实现设备异常隐患的前置识别与精准判定，提升电气系统风险防控的主动性与精准性。

2.4 电气设备自动化联动控制技术

水电站电气系统整体关联性强，单台设备工况波动可对局部系统运行状态造成影响。电气设备自动化联动控制技术依托平台智能研判结果，搭建跨设备、跨区域的协同管控逻辑。系统可依据电压、频率、负荷等关键参数的波动幅度，匹配分级调控策略，自主完成参数微调、工况约束、保护性闭锁等操作。打破单设备独立管控的孤立模式，打通电气系统内部的管控壁垒，构建整体性调控机制。有效削弱设备异常带来的系统扰动，维持水电站电气系统长期、平稳、有序的运行状态。

3 水电站电气设备自动化管控体系构建路径

3.1 管控体系整体架构与层级搭建

水电站电气设备自动化管控体系的稳定运行，需要依托科学完整的整体架构作为支撑。结合水电站电气系统的运行规律与管控需求，划分功能清晰、衔接有序的多层级管控结构。明确各层级的运行职能与管理边界，理顺数据流转、状态监测、智能研判与自动管控之间的内在关系。统筹设备监测、数据处理、风险预警、运行调控等核心功能，搭建一体化的管控框架。规避结构层级混乱、功能交叉重叠带来的运行问题，让整体体系具备规范的运行逻辑与拓展空间，为后续分项模块建设提供规整的整体框架支撑[3]。

3.2 前端感知监测网络规划布设

前端感知网络是自动化管控体系获取设备运行状态的底层载体，直接决定监测工作的全面性与精准度。结合水电站主变、开关柜、发电机组、互感器等核心电气设备的分布位置，针对性规划感知点位的布设范围。依据不同设备的运行特征匹配适配的传感监测装置，覆盖电气参数、设备温度、绝缘状态、振动变化等关键监测维度。优化监测点位排布密度，补齐设备盲区的监测短板，实现场内电气设备全覆盖监测布局。规范监测设备安装标准与运行调校要求，保障前端采集工作长期稳定开展，持续输出精准、连续的现场运行数据。

3.3 数字化管控平台模块搭建

数字化管控平台是整合监测数据、落实智能管控的核心载体，承担数据归集、状态展示、风险研判与流程管控的核心职能。按照电气设备管控工作的实际需求，拆分搭建独立且相互联动的功能模块。设置数据存储模块、设备状态展示模块、异常分析模块、运维管理模块与流程管控模块，细化各模块的功能范围与运行逻辑。统一平台数据接入标准与交互规范，实现前端感知数据的稳定接入与规整处理。依托模块化布局完善平台整体功能，实现设备状态可视、异常隐患可判、运维流程可管的数字化管控模式。

3.4 自动化管控流程与运行机制构建

完善的运行流程与管控机制，是保障自动化体系高效运转的关键条件。结合水电站电气设备运行工况与风险特征，梳理标准化的自动化管控流程。规范数据采集、传输处理、状态研判、异常预警、调控处置、台账留存的全流程运行步骤，形成闭环式管控链路。建立适配电气系统动态运行的管控机制，规范设备正常工况与异常工况的处置逻辑。明确系统触发预警、自主调控、人工复核的适用场景与执行标准，固化常态化管控流程。有效规范设备运维管理秩序，提升电气设备自动化管控的规范性与实效性。

4 水电站电气设备管控体系优化与迭代方向

4.1 设备监测体系精细化优化方式

水电站电气设备监测工作长期存在监测维度粗放、点位布设固化的问题，常规监测模式难以捕捉设备细微工况变化。对现有监测体系开展精细化优化，可从采集精度、监测维度、点位布局多个维度完善监测机制。结

合不同电气设备的结构特性与损耗规律，细化差异化监测内容，针对绝缘老化、构件发热、参数偏移等不同缺陷类型，增设针对性监测指标。调整固定化监测模式，依据设备运行负荷变化调整数据采集频次，弱化无效数据堆积带来的资源浪费。细化监测点位布设标准，针对设备连接节点、密封部位、核心元器件等薄弱区域加密监测点位，填补精细化监测盲区[4]。通过持续优化监测架构与采集规则，让监测工作更加贴合设备实际运行状态，为工况分析与隐患排查提供更为细致、精准的数据支撑。

4.2 多设备协同联动管控优化思路

现阶段水电站电气设备管控多以单设备独立管控为主，设备之间的数据交互与工况联动分析不足，系统层面的管控效能难以充分发挥。推进多设备协同联动管控优化，能够打破单设备管控的孤立格局，适配电气系统整体运行的管控需求。梳理各电气设备之间的运行关联关系，明确不同设备工况波动对周边配套装置的影响逻辑。搭建跨设备的数据共享与联动分析机制，整合多设备运行数据开展整体工况研判，规避单一设备数据研判带来的片面性。优化系统管控逻辑，让不同设备的监测、预警、调控工作相互衔接，形成整体性的管控链路。完善多设备协同处置机制，针对系统级工况波动制定统筹管控方案，提升电气系统整体运行的稳定性与协调性。

4.3 复杂工况自动化适配能力提升

水电站电气系统运行工况具备明显的动态波动性，负荷切换、环境变化、电网调度调整都会催生复杂运行场景。现有自动化管控体系的适配能力较为固定，运行参数与调控逻辑多为标准化设置，难以适配特殊复杂工况的管控需求。针对复杂工况开展适配能力升级，可结合高低负荷交替、温湿度大幅波动、短时工况突变等特殊场景，优化监测预警阈值与调控参数。丰富系统工况识别逻辑，细化不同复杂场景的判定标准与处置策略，提升系统对非常规工况的识别精度。优化自动化调控策略的灵活度，根据现场实际工况动态调整管控力度与处置方式，摆脱固定管控模式的局限性，强化体系对各类复杂运行场景的适应能力与风险防控水平。

4.4 智能管控体系迭代升级方向

水电站电气设备自动化管控体系仍处于持续完善的发展阶段，多数功能集中于数据采集、状态监测与基础预警层面，智能化深度仍有较大提升空间。体系迭代升级可聚焦数据深度应用、智能研判升级、管控模式升级等核心方向稳步推进。深挖设备运行数据的潜在价值，依托长期积累的工况数据总结设备性能衰减规律，实现隐患提前预判与预防性管控。持续优化平台智能分析算法，提升复杂工况下异常识别、故障研判的精准程度，减少误判、漏判问题[5]。拓展平台智能化功能，逐步完善自主研判、智能调控、运维智能规划等进阶功能，丰富体系应用场景。持续完善一体化智能管控架构，推动电气设备管控从自动化监测处置向智能化、精细化、主动化管控升级，适配水电站电气系统长效稳定运行的建设需求。

结束语

电气设备工况演变的渐进特征与电站复杂运行环境，对水电运维管控工作提出更高标准的要求。依托多维度感知采集、数据规整溯源、智能异常研判与联动调控技术，可搭建适配水电站运行场景的自动化管控体系，完善从前端监测、平台处理到闭环处置的完整运行流程。持续优化监测精细化水平、多设备协同机制与复杂工况适配能力，能够持续提升电气系统运维质量，为水电站安全稳定运行提供坚实的技术保障。

参考文献

[1]王毅伟.水电站电气一次设备故障检修与处理方法[J].大众用电,2024,39(05):54-55.

[2]张平.水电站电气设备运行监测中的预防性试验分析[J].中国科技纵横,2025(1):104-106.

[3]韩云.基于大数据加速分析的水电站电气设备运行监测技术[J].电器工业,2023(7):54-57.

[4]任媛.水电站电气设备运行维护技术构架探究[J].价值工程,2026,45(15):131-133.

[5]程小敏,周靖康,王思琪.基于数据挖掘的水电站电气设备状态自动化监测系统[J].自动化与仪表,2025,40(4):82-85,90.