

高原地区水电站智慧电厂体系构建研究

——以扎拉水电站为例

刘大庆¹, 谢学东², 蒲进², 熊小康², 滕泽诚²

(1. 西藏藏东南清洁能源开发有限公司, 西藏 昌都 854000;

2. 西藏大唐扎拉水电开发有限公司, 西藏 昌都 854000)

摘要 高原地区水电厂智慧化建设存在独特难点, 扎拉水电站作为西藏首个超百万千瓦级项目、世界首座装备 500 MW 冲击式机组的“藏电外送”关键工程, 此类问题尤为显著。本文针对其高原极端环境、首台套设备经验缺失等核心挑战, 创新构建适配的“1+3+N”(1 个数字化底座、3 大业务领域、N 个智慧应用)智慧电厂体系, 并采用“基建期同步建设”关键路径, 规避传统“先基建、后智慧”模式的改造弊端; 该体系建成后预计可提升发电效率 3%~5%、降低运维成本 20% 以上、减少安全事故 20% 以上, 为高原水电智能化转型及同类项目提供借鉴, 助力电力行业数字化升级。

关键词 扎拉水电站; 首台套冲击式机组; 智慧电厂体系; 提质增效

中图分类号: TV7

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.36.027

0 引言

近年来, 全球能源转型加速推动电力行业向数字化、智能化方向升级, 智慧电厂已成为新型电力系统的核心发展方向。国家能源局《“十四五”现代能源体系规划》明确提出加快能源产业智能化升级, 推动现代信息技术与能源产业深度融合^[1]。刘吉臻团队于 2017 年系统构建了智能发电厂的技术架构, 为智慧电厂建设奠定了理论基础^[2]。然而, 传统“先基建、后智慧”的建设模式存在后期改造困难、结构破坏和停机损失大等难点。王曦钊等提出的“三位一体”建设框架强调了基建阶段同步规划信息化架构的必要性^[3]。数字孪生作为新兴数字化技术, 近年来广泛应用于水电厂设备设施健康状态评估与智慧化建设^[4-7]。

扎拉水电站作为西藏首个超百万千瓦级电源项目, 总装机容量 101.5 万千瓦, 是“藏电外送”工程的关键支撑点。电站装备世界首台 500 MW 冲击式水轮发电机组, 面临“高水头、冲击式、深竖井、多断裂带”等技术难题^[8], 以及高原极端环境和人才短缺的挑战。本研究旨在从基建初期同步规划与建设智慧电厂, 融合数字孪生、智能传感、机器人巡检等先进技术, 解决“首台套设备无经验、高原人才短缺、极端环境”三大核心矛盾, 保障电站安全高效运行。

1 工程概况

扎拉水电站位于西藏自治区昌都市左贡县碧土乡扎郎村与林芝市察隅县察瓦龙乡珠拉村之间, 是玉曲河干流 7 级开发方案中的第 6 级电站。该水电站充分利用玉曲河约 60 km 的大拐弯天然落差, 通过“裁弯取直”的引水式开发方式, 形成高达 671 m 的额定水头。工程采用两级竖井布置方案, 总高度达 570.58 m, 开挖直径达 6.9 m, 地质条件复杂, 存在围岩稳定、有害气体及地热等多重挑战, 施工难度在国内水电项目中极为罕见。

为应对高原复杂环境下运营挑战, 扎拉水电站率先提出“脑力靠模型、体力靠机器”的创新理念, 通过部署机器人巡检系统、智能传感设备和全方位视频监控网络, 对水电站人、机、环等要素进行实时监测; 通过通用大模型+专用模型进行智慧决策; 现场仅保留必要应急人员, 常规运维工作由智能系统自动执行, 大幅降低对人力的依赖。

2 高原地区水电站智慧电厂体系构建面临的挑战与问题

扎拉水电站作为世界首座装备 500 MW 冲击式水轮发电机组的水电工程, 其智慧电厂建设面临多重挑战, 既源于独特的地理环境条件, 也来自技术本身的创新性与

复杂性，更受到高海拔地区特殊环境的制约。具体而言，电站面临“首台套设备无经验、高原人才短缺、极端环境”三大核心矛盾，对传统运营模式提出了严峻挑战。

2.1 极端自然环境

扎拉水电站所在的西藏高原地区，平均海拔超过 3 600 m，其极端自然环境构成了智慧电厂建设的基础性挑战。高海拔直接导致空气稀薄与低气压，使传统风冷散热效率下降可达 30% 以上，严重影响了服务器、功率器件等核心电子设备的运行寿命与可靠性^[9]；同时，常年低于 5℃ 的平均气温与超过 20℃ 的昼夜温差，使电子元器件易因热应力损坏，而强紫外线持续照射则加速电缆绝缘层等非金属材料的老化脆化，导致传感器测量数据漂移甚至失效，直接威胁数字孪生系统的数据基础。在人员作业层面，缺氧环境不仅使现场人员面临高原病风险^[10]，更导致其复杂任务执行效率降低 15%~20%，大幅增加了设备安装、调试与巡检的作业难度与安全风险。此外，站点地处复杂地质带，交通条件极为不便，暴雨冰雪易引发道路中断，使备件运输与设备维修周期显著延长、成本急剧上升。这些自然条件的多重制约，共同凸显了构建具备高环境适应性、少人化远程运维能力的智能系统在扎拉水电站的极端必要性及紧迫性。

2.2 首台套设备运行经验缺乏与高原人才短缺

扎拉水电站安装的世界最大单机容量 500 MW 冲击式水轮发电机组，其技术参数远超国内外现有应用水平（国外单机容量最大的是瑞士毕奥德隆电站 423.13 MW 机组）。这种“高水头、大容量、冲击式、深竖井”的组合在世界范围内尚无运行先例，相关技术经验与运行数据的严重缺失，使得设备在高海拔复杂环境下的安全稳定运行面临巨大挑战。此外，西藏地区高海拔、高寒环境条件艰苦，专业人才引进面临较大困难，人员数量与专业性不足已成为制约电站正常运行的重要因素。

2.3 信息基础设施建设困难

在高原复杂环境下建设覆盖全面的信息基础设施同样面临多重挑战。恶劣气候条件影响传感器和通信设备的正常工作；远程控制的实时性和可靠性要求与网络延迟存在矛盾。无人机巡检在高海拔地区面临续航时间短、飞行稳定性差等问题；机器人巡检系统需适应低温、低氧环境，对设备可靠性要求更高；远程监控系统受高海拔大气条件影响，图像传输质量下降。这些问题都需要针对高海拔环境进行专门的技术研发和系统设计。智慧企业是站在企业整体的角度，在实现业务量化的基础上，强化物联网建设，深化大数据挖掘，推进管理变革创新，将先进的信息技术、工业

技术和管理技术深度融合，实现管理的数字化感知、网络化传输、大数据处理和智能化应用，从而使企业呈现出风险识别自动化、决策管理智能化、纠偏升级自主化的柔性组织形态和新型管理模式。然而，在扎拉水电站的特殊环境下，这些技术的实现面临更大挑战，需要针对高海拔环境进行专门优化设计。

3 智慧电厂体系设计

扎拉智慧电厂建设以“创造效益、提高效率、提升效能”为根本目标，聚焦“全面感知、全面数字、全面互联、全面智能、全面可视”核心方向，依托“1+3+N”架构（1 个一体化数字化底座、3 大业务领域、N 个智慧应用场景），构建基于数字孪生的多维可视化管控平台，打通数据、服务与流程通道，实现过程层、单元层、厂站层与应用层的有机融合，为高海拔环境下首台套冲击式机组的安全稳定运行及电站智能化运营提供技术支撑。

数字化底座是智慧电厂实现“全面感知、全面数字、全面互联、全面智能”的核心支撑架构，其架构如图 1，采用“感知对象—感知服务—传输通道—一体化平台—智慧应用”五层分层设计，实现从底层数据采集到上层业务应用的端到端贯通，为智慧电厂全场景智能化提供“数据—技术—应用”全链条支撑。

3.1 感知对象层

感知对象层聚焦智慧电厂运行过程中的人、机、料、环、法五大核心要素，作为数字化底座的基础感知单元，通过对人员行为与生理状态、设备工况与外观特征、物料数量与存储状态、环境参数（如厂房温湿度、库区水文、地质灾害指标）及企业管理规范等信息的采集，为后续数字化感知与处理提供原始数据支撑，构建智慧电厂的“物理信息采集靶标体系”。

3.2 感知服务层

感知服务层作为数字化底座的数据采集中枢，依托多类型智能终端与专业业务系统，实现生产、运维、经营全场景的多模态数据采集，为上层数据处理与分析提供“全维度原始数据集”。

3.3 传输通道层

传输通道层遵循电力系统“安全分区、网络专用、横向隔离、纵向认证”的安全防护原则，构建“多网络融合+智能网关”的高效数据传输架构。

3.4 一体化平台层

一体化平台层是数字化底座的核心技术能力载体，通过基础设施整合与六大支撑平台的协同构建，实现“算力—数据—算法—模型”全链条技术支撑。

3.5 智慧应用

智慧应用层依托一体化平台层的技术能力输出,聚焦智慧生产、智慧安全、智慧管理三大业务领域,落地多类细分智能应用场景。在智慧生产领域,涵盖智能监测、智能诊断、设备控制、智慧巡检等应用模块,可实现水轮发电机组等核心设备的“精准调控、预知维护”,显著提升生产过程的智能化水平;在智慧安全领域,集成智慧门禁、智慧安防、地灾风险监测、应急管理等功能,能够构建高海拔环境下电厂安全运行的全方位防护体系;在智慧管理领域,包含智慧经营、智慧仓储、智慧用能、统一身份认证等场景,助力电厂运营效率提升与精益化管理目标的实现。

4 智慧电厂提质增效的成效分析

4.1 发电效率提升

通过智能发电调度系统的应用,扎拉水电站能够根据实时水情、电网负荷以及设备状态,精准优化发电计划,实现机组的高效稳定运行。根据故障诊断系统对设备分析、评估及故障预测能力,确保机组稳定可靠运行,减少检修时间、实现日常抢发电量、汛期增发电量;通过汛期水位动态控制、水电流域一体化经济调度(EDC)、富余水电外送等方式,实现增发电量;在线智慧监测系统实时监测设备状态,过水大部件磨损监测、防泥沙,通过监测提高设备防护安全稳定水平,及时发现设备隐患提前干预,规避设备损坏、电量损失、电网考核等事件,实现企业效益最大化。智慧电厂建成后,预计增加发电量 3%~5%。同时,智能发电调度系统能够快速响应电网负荷变化,及时调整发电出力,避免了因发电与用电需求不匹配导致的电能浪费,进一步提升了发电效率与电力供应的稳定性。

4.2 运维运营成本降低

设备智能运维体系的建立,使得扎拉水电站从传统的定期检修与事后维修模式转变为基于状态的预测性维护模式。通过实时监测设备运行状态,提前预测设备故障,企业能够有针对性地安排设备维护计划,可减少不必要的定期检修,降低维护成本。通过引入机器人、无人机、智能设备装置,建设自动巡检系统、智能诊断系统、数字管理系统,减少现场作业工作量、提高劳产率,推进电厂无人化、少人化,改善基层员工工作环境,让员工在电厂智慧化转型中更有获得感、幸福感。自动化水平的提升可减少电厂现场作业人员,助力电厂减员增效,推进电厂高效经营,运行成本降低 20% 以上。

4.3 安全可靠性能增强

通过视频监控与 AI 图像处理技术,对人员不安全行为的识别准确率可达到 95% 以上,及时纠正员工的

违规操作行为,有效预防了安全事故的发生。人员定位与电子围栏技术实现了对厂区人员与车辆的精准管控,对危险区域的闯入预警响应时间缩短至 1 秒以内,大大提高了对危险情况的处置效率。无人机、机器人、视频分析等智能物联手段,实现对边、远、偏、危地区自动巡检,在保障巡检业务精细可靠前提下,降低人工作业带来的安全隐患;系统准入、故障预警、作业联动、环境管理和应急管理为电厂生产安全、人员安全、环境安全提供全方位保障,助力电厂安全运营,实现电厂本质安全目标,安全事故减少 20% 以上。

5 结束语

在水电行业竞争日趋激烈、能源转型诉求愈发迫切的背景下,扎拉水电站智慧电厂建设对保障电站安全稳定运行、提升经营管理效能具有重要价值,不仅可提升扎拉水电站的发电效率、降低运维成本,还能够提高安全管理水平,推动绿色可持续发展,有力促进经营体制的全方位优化。未来,随着技术的不断革新,智慧电厂在扎拉水电站的应用将持续深化与拓展,在巩固现有成果的基础上,进一步探索创新应用场景,一方面通过 AI 优化负荷预测与调度精度,提升能源利用效率;另一方面拓展综合能源服务领域,推动电站从“单一发电”向“多元能源服务”转型。

参考文献:

- [1] “十四五”现代能源体系规划:210 号[R]. 国家发展改革委国家能源局,2022.
- [2] 刘吉臻,胡勇,曾德良,等.智能发电厂的架构及特征[J].中国电机工程学报,2017,37(22):6463-6470,6758.
- [3] 王曦钊,刘胜军,王德军,等.智能电站框架研究与信息化工程实践[J].电信科学,2016,32(04):181-185.
- [4] 严兴煜,高赐威,陈涛,等.数字孪生虚拟电厂系统框架设计及其实践展望[J].中国电机工程学报,2023,43(02):604-619.
- [5] 梁艳,徐希涛,徐静波,等.基于数字孪生的智能水电厂建设初步研究[J].水电与抽水蓄能,2023,09(06):103-107.
- [6] 王超,刘兵.数字孪生技术在智慧电厂安全管理中的应用[J].东北电力技术,2025,46(01):5-8.
- [7] 李东明,李龙龙,晁阳,等.大坝安全监测数字孪生系统应用研究[J].水力发电,2024,50(09):110-117.
- [8] 胡向阳,胡中平.西藏扎拉水电站工程关键技术综述[J].水利水电快报,2024,45(06):1-7.
- [9] 王飞,张浏骏,许佩佩,等.海拔高度对变频器散热影响的研究[J].电子机械工程,2016,32(01):9-15.
- [10] 俞楚,朱亮,马成勇,等.浅析海拔对急进高原人群出现急性高原反应的中医症状学影响[J].辽宁中医杂志,2023,50(02):29-34.