

新能源电力变电站运维中的集群智能系统研究

姜燕坤 张国东

内蒙古电力(集团)有限责任公司阿拉善供电分公司 内蒙古 阿拉善盟 750300

摘要:针对新能源变电站运维中数据孤岛与协同困难问题,本文构建集群智能运维系统理论框架。通过全域感知与多源异构数据融合生成群体态势认知,利用多智能体算法实现任务动态调度与路径规划,并建立人机协同决策模式。同时提出通信受限下的协同策略与故障容错机制,增强系统韧性。该研究打通“感知-决策-执行”闭环,有效提升高比例新能源接入下变电站集群的运维效率与安全稳定性。

关键词:新能源电力;变电站运维;集群智能;多智能体系统

引言:随着高比例新能源接入电网,变电站运维面临设备异构、工况波动大及信息孤岛等挑战,传统单站人工运维模式已难以适配。为此,本文引入集群智能技术,构建多站协同、全域感知的智能运维理论框架。重点研究多维感知体系、多源数据融合、群体态势生成及多智能体自主决策机制,并探讨通信约束下的系统韧性保障策略。旨在通过智能化手段打破数据壁垒,实现运维资源动态调度与风险协同处置,为新能源电力系统的安全高效运行提供理论支撑。

1 新能源变电站集群智能运维系统理论框架

新能源变电站集群智能运维系统理论框架,以多站协同、全域感知、智能决策为核心逻辑,突破传统单站运维的信息孤岛局限。框架底层为全域感知层,融合边缘物联终端、高精度传感网络与北斗授时同步技术,实时采集集群内光伏、风电配套变电站的设备状态、环境参数、并网潮流等多源异构数据,解决新能源场景下数据采集不同步、工况波动大的痛点^[1]。中间层为边缘-云端协同计算层,依托数字孪生构建集群全站级镜像模型,嵌入轻量化故障特征提取算法,在边缘端完成设备异常的毫秒级初判,云端则通过联邦学习实现跨站运维模型迭代,在保障数据安全的前提下共享多站缺陷样本,破解新能源设备故障样本不足的难题。顶层为智能决策与协同管控层,基于多智能体强化学习算法,实现集群内运维资源动态调度、缺陷分级联动处置、无功电压协同优化等功能,替代传统人工巡检的经验式决策。该框架打通“感知-分析-决策-执行”的闭环,为高比例新能源接入下的变电站集群安全高效运行提供系统性理论支撑。

2 新能源变电站集群智能协同感知与态势生成

2.1 变电站多维感知体系构建

变电站多维感知体系是集群智能运维系统的数据基础,针对新能源变电站设备种类多、运行状态变量繁杂、故障隐蔽性强的特点,构建涵盖电气量、状态量、环境量、设备本体参量的全域立体化感知架构。体系以变电站一次、二次核心设备为感知主体,覆盖变压器、断路器、隔离开关、互感器、继电保护装置等关键设备,同时兼顾站内温湿度、风力、光照、污秽等环境参数及并网新能源出力参数。通过部署高清摄像头、红外测温传感器、振动传感器、电气采集终端、环境监测装置等多类型感知设备,实现设备运行状态、工况参数、环境信息的全天候、高精度、高频次采集。同时,依托分层组网架构,优化感知节点布局,规避感知盲区与数据冗余问题,建立前端采集、边缘预处理、云端汇总的三级感知传输架构。该体系突破传统单一电气感知的局限,实现变电站运行状态的全方位、多维度精准采集,为后续数据融合、态势研判、智能决策提供全面、可靠、实时的基础数据支撑,保障集群运维的精准度。

2.2 多源异构数据的协同融合方法

新能源变电站集群运维场景下,感知数据存在来源多样、格式异构、维度不一、时序错乱等问题,包含结构化电气数据、半结构化设备台账数据、非结构化图像视频数据,不同站点、不同设备的采集频率、数据精度、传输协议差异较大,易导致数据利用率低、态势研判偏差等问题。为此,多源异构数据协同融合方法针对数据预处理、层级融合、特征挖掘全流程开展优化研究^[2]。首先通过数据清洗、缺失补全、异常剔除、时序对齐完成基础预处理,消除数据噪声与时序偏差;其次构建分层融合架构,实现数据级、特征级、决策级的逐

级融合,打通跨站点、跨设备的数据壁垒;最后引入加权融合算法与深度学习特征提取技术,挖掘多源数据背后的关联特征与隐性规律。该方法可有效整合集群内零散异构数据,剔除无效冗余信息,提升数据完整性与有效性,将碎片化原始数据转化为标准化、结构化的运维特征数据,为集群态势认知与智能决策提供高质量数据支撑。

2.3 运维态势的群体共同认知生成

运维态势群体共同认知生成是集群智能运维的核心环节,旨在依托多站点融合数据,构建集群层面统一、精准、全域的运维态势认知结果,解决单站态势研判片面、集群状态认知割裂的问题。该机制以多源融合数据为基础,整合各变电站设备运行状态、故障隐患、负荷水平、新能源出力、环境工况等核心信息,构建标准化的运维态势评价指标体系,涵盖设备健康度、运行稳定度、故障风险度、运维充裕度等核心维度。通过态势特征提取、状态分级研判、风险关联分析,实现对单站点及集群整体运行态势的量化评估。同时,结合集群运维的协同特性,建立跨站点态势关联映射模型,挖掘站点间运行工况的耦合关系与风险传导规律,摒弃单站独立研判的局限性。最终生成全域统一的群体态势认知结果,清晰呈现集群整体运行状态、潜在故障隐患及运维薄弱环节,为后续运维任务规划、智能决策调度提供直观、精准的态势依据。

2.4 感知质量的自适应评估

感知数据的质量直接决定集群运维态势研判与决策调度的准确性,受恶劣天气、设备老化、通信干扰、传感器故障等因素影响,变电站感知数据易出现失真、缺失、延迟、偏差等质量问题,因此需建立感知质量自适应评估机制。该机制围绕数据完整性、准确性、实时性、有效性、一致性五大核心指标,构建量化评估模型,对集群内所有感知节点的输出数据进行动态监测与实时评估。通过设定分级阈值,精准识别异常数据、失效感知节点与数据传输故障,同时结合变电站运行工况的动态变化,实现评估阈值与评估权重的自适应调整,适配不同场景下的感知质量评价需求。针对评估发现的低质量数据,自动完成筛选剔除与修复补偿,对故障感知节点及时标记预警。该技术可实时把控全域感知体系的运行状态,规避劣质数据导致的态势误判、决策失误等问题,保障集群运维感知体系的稳定性与可靠性。

3 基于集群智能的变电站运维自主决策机制

3.1 运维任务建模与动态优先级划分

新能源变电站集群运维任务类型繁杂,涵盖设备巡检、状态监测、故障排查、隐患整改、设备检修、参数校准等多项内容,不同任务的紧急程度、风险等级、资源需求差异显著,且运维任务随电网工况、设备状态动态生成,传统固定任务排序模式适配性极差。为此,需构建精细化的集群运维任务建模体系,梳理各类运维任务的执行流程、资源消耗、时间约束、安全约束与风险影响,建立标准化任务数学模型,实现运维任务的数字化、结构化表征。同时,综合考量设备故障风险、电网运行安全、任务延误损失、运维资源余量等多重因素,设计动态优先级划分算法,摒弃静态排序规则。根据变电站集群实时运行态势,动态调整各运维任务的优先级等级,对紧急故障处置、高危隐患整改等核心任务优先排布,对常规巡检、日常维护任务合理错峰。该机制可实现运维任务的科学统筹,最大化提升集群运维效率,规避关键运维任务延误引发的安全风险^[3]。

3.2 多智能体协同路径规划与运动控制

新能源变电站集群运维依赖巡检机器人、运维终端、作业班组等多智能体协同作业,多站点分散布局、作业场景复杂、任务点位分散的特点,对智能体路径规划与运动控制的协同性、精准性、实时性提出极高要求。针对单智能体作业效率低、多智能体路径冲突、作业重叠遗漏等问题,构建多智能体协同路径规划与运动控制体系。结合各变电站地理位置、作业点位分布、障碍物分布、实时作业任务,采用改进智能优化算法,实现多智能体全局路径统筹规划,规避路径交叉、作业盲区与重复作业问题。同时设计动态运动控制策略,支持智能体根据现场工况变化、临时任务插入、突发故障预警实时调整行进路径与作业姿态。建立智能体协同避障、动态避让、时序作业机制,保障多智能体并行作业、高效协同。该技术可实现集群运维作业的全域统筹,大幅提升巡检、故障处置、设备维护的作业效率,适配规模化变电站集群的运维作业需求。

3.3 人机协同的混合决策模式

新能源变电站集群运维场景复杂,极端故障、新型隐患、特殊工况等场景无法完全依靠智能算法自主决策,单一智能决策存在容错性不足、场景适配性差的问题,因此需构建人机协同的混合决策模式。该模式充分融合机器智能的高效算力、精准研判优势与人工运维人员的经验判断、应急处置优势,划分人机决策权责边界,建立智能预判、人工校核、协同决策的运行机制。常规运维任务、常态状态研判、简单故障处置由智能系统自主完成决策调度,实现高效自动化运维;针对重大

故障、复杂异常、新型隐患、高危工况等复杂场景,智能系统完成态势分析、风险预判、方案推荐后,由运维人员进行人工校核、优化调整与最终决策。同时搭建人机交互可视化平台,实现态势数据、决策方案、作业进度的实时共享。该混合决策模式兼顾运维效率与决策安全性,有效弥补纯智能决策的短板,提升集群运维决策的精准度与可靠性。

4 通信约束与异常工况下的集群韧性保障

4.1 通信受限场景下的协同策略

新能源变电站多地处偏远区域,受地形遮挡、电磁干扰、网络覆盖不足等因素影响,集群运维过程中频繁出现通信延迟、数据丢包、带宽受限、局部断联等通信受限问题,导致跨站点协同运维中断、决策调度滞后、数据同步失效等故障。为解决上述问题,针对性构建通信受限场景下的集群协同运维策略,建立分层分级的通信协同调度机制。在全域通信正常时,采用云端集中协同模式,实现集群数据实时同步、任务统一调度;在局部通信受限、网络带宽不足时,自动切换为边缘分布式协同模式,各站点边缘节点自主完成本地态势研判与任务执行,减少跨站点数据传输压力。同时优化数据传输机制,采用关键数据优先传输、非核心数据延时同步、数据压缩传输的方式,降低通信负载。通过通信状态实时监测与协同模式自适应切换,有效规避通信受限对集群运维的影响,保障复杂通信场景下运维协同的连续性与稳定性。

4.2 单智能体失效的容错机制

新能源变电站集群智能运维系统依托多智能体协同运行,长期复杂工况下易出现感知智能体、执行智能体、决策智能体单点失效问题,包括传感器故障、巡检设备宕机、终端程序异常等,单智能体失效易导致局部运维任务停滞、数据缺失、协同链路断裂,影响集群整体运维效果。为此,构建完善的单智能体失效容错机制,实现故障快速识别、任务无缝转接、运维流程不间断。系统通过实时监测各智能体的运行状态、任务执行进度、数据输出状态,精准判定失效智能体及故障类型^[4]。基于集群冗余运维资源,建立任务动态迁移机制,将失效智能体未完成的巡检、监测、处置任务,自动分配至集群内正常运行的同类智能体。同时启用数据冗余备份机制,弥补失效智能体导致的数据缺失,通过相邻节点数据关联推演,还原缺失的运维态势信息,有

效规避单点故障引发的局部运维瘫痪,提升集群系统运行容错能力。

4.3 集群系统的弹性恢复策略

新能源变电站集群运维系统易受极端天气、电网故障、设备大规模异常、通信瘫痪等突发扰动影响,出现集群运维功能降级、协同体系紊乱、任务执行中断等问题,亟需构建弹性恢复策略,提升系统极端工况下的韧性能力。该策略以“快速响应、分级恢复、全域重构”为核心,首先建立扰动分级识别模型,根据系统故障影响范围、功能受损程度,将扰动划分为轻微、中度、重度三个等级,匹配差异化恢复方案。针对轻微扰动,通过局部参数修正、任务重启、数据补全实现快速自愈;针对中重度扰动,启动系统冗余资源,重构运维感知、决策、执行协同链路,优先恢复核心运维功能与电网安全保障相关任务。同时建立事后复盘优化机制,总结扰动诱因与恢复短板,自适应优化系统协同策略与容错参数,持续提升集群系统抗扰动能力与自主恢复能力,保障极端工况下新能源变电站集群运维体系的稳定可靠运行。

结束语

本文构建了新能源变电站集群智能运维系统框架,实现从全域感知、数据融合到群体态势生成的全流程闭环。通过多智能体协同决策与人机混合模式,解决了任务调度与路径规划难题,并提出通信受限与单体失效下的韧性保障策略。研究表明,该系统能有效打破信息孤岛,提升运维自动化水平与抗扰动能力。未来将进一步优化算法算力适配,推动集群智能技术在新型电力系统中的深度应用与推广。

参考文献

- [1] 江浩. 新能源电力变电站运维中的集群智能系统研究[J]. 中国高新科技, 2025(21):58-60.
- [2] 吉远喆, 张毅飞. 新型储能电站与变电站协同运维模式及关键技术研究[J]. 通信电源技术, 2025, 42(15):206-208, 212.
- [3] 曾琦. 新能源分布式发电对变电站保护及自动化影响[J]. 电气开关, 2024, 62(5):87-89, 94.
- [4] 耿新, 马文恒, 武琼, 等. 新能源大规模并网环境下变电站防孤岛技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(3):161-171.