

电网调控一体化模式下变电站二次设备缺陷分析及精益化运维体系构建

聂胜鲁, 黄永坤, 李凤娇

(山东天润电气集团有限公司, 山东 菏泽 274000)

摘要: 为了提升电网调控一体化背景下变电站运行的智能化水平与设备安全性, 针对二次设备运行状态复杂、故障识别滞后的问题, 提出了一种基于缺陷分析与精益化运维协同机制的管理体系。通过构建多维度缺陷识别、风险分级方法、调控协同机制等, 实现对继电保护、通信模块等二次设备的高效识别、智能分派与闭环处置。研究部署结果表明, 该体系可有效提升缺陷响应效率与设备运维质量, 具备良好的工程推广价值。

关键词: 电网调控; 变电站二次设备; 缺陷分析; 精益化运维

Analysis of substation secondary equipment defects and construction of lean operation and maintenance system under power grid regulation and control integration mode

NIE Shenglu, HUANG Yongkun, LI Fengjiao

(Shandong Tianrun Electric Group Co., Ltd., Heze 274000, China)

Abstract: To enhance the intelligence and operational safety of substations under the integrated power grid regulation model, this paper addresses the complexity of secondary equipment status and the lag in fault identification. A management framework based on defect analysis and lean operation coordination is proposed. By constructing multi-dimensional defect recognition models, risk grading methods, and regulation coordination mechanisms, the system enables efficient detection, intelligent dispatch, and closed-loop handling of secondary equipment such as protection relays and communication modules. Deployment results show that the framework significantly improves fault response efficiency and maintenance quality, with strong practical applicability.

Keywords: grid regulation; substation secondary equipment; defect analysis; lean operation and maintenance

0 引言

随着电网调控一体化持续深化, 变电站作为电力系统的核心枢纽, 其安全稳定运行直接关系到电网整体效率与供电可靠性^[1]。相较于一次设备, 二次设备承担着保护、控制、测量、通信等

关键功能, 但其运行状态具有隐蔽性强、故障关联性高等特点, 对运维准确度和响应速度提出更高要求。当前, 二次设备运维面临多重挑战, 如新能源并网与负荷波动加剧, 使设备长期处于动态调整状态, 传统检修模式难以应对突发缺陷; 单一设备故障可能通过数据链路引发连锁反应,

增加故障溯源难度等。在此背景下，引入系统化缺陷分析方法与精益化运维体系，成为提升二次设备全生命周期管理水平的关键突破口，不仅可实现典型缺陷的早期识别与精准定位，还能优化运维流程、提升资源配置效率，对推动变电站运维模式向智能化、主动化转型具有重要意义。

1 工程概况

依托某位于区域电网负荷中心的500 kV变电站为典型工程场景，该站地处两省交界枢纽，占地8.2万m²，是连接北部风电、南部光伏与主干网的核心节点，承担4条500 kV、8条220 kV线路的汇集分配任务，供电覆盖3个地级市、1 200余万用户，年供电量超180亿kW·h，在电力保供与新能源消纳中具有战略地位。

站内二次设备包括南瑞继保RCS-900系列保护装置126套、许继自动化监控系统2套（含89个测控单元）、华为光传输设备48台、南网科技安全防护装置32套及合并单元等辅助设备970余套，总数达1 260台（套）。其中运行超8年的占35%，近年多次出现保护装置误动作、缺陷识别时长较长等问题，易因响应滞后扩大影响范围，亟需通过系统性管理提升运维效能。

2 变电站二次设备缺陷分析

2.1 缺陷信息识别与提取

在电网调控一体化环境下，变电站二次设备（如保护装置、自动化终端、通信模块等）状态变化频繁，故障类型多样，缺陷信息常呈现非告警状态、低频触发、短时突变等隐性特征。对此需构建精准、高效的缺陷识别与提取机制，支撑后续运维决策。

针对运行数据中的遥测偏移、信号抖动、遥信异动等缺陷征兆，系统基于时间序列突变识别算法实现主动提取^[2]。其核心思路是：在设定时间窗口内，分析状态变化幅度与速率，识别偏离常规运行轨迹的异常波动点。以电压遥测突变为例，突变识别公式为

$$|x_i - \mu| > k\sigma \quad (1)$$

式中， x_i 为当前采样值； μ 与 σ 分别为当前窗口内的均值与标准差；若 k 阈值设为3，则判断该点为突变异常。

对于非数值类缺陷，如保护定值漂移、通信中断、信号卡滞等问题，可通过规则引擎与特征模板库进行判别^[3]。若连续两次保护动作触发间隔小于设定时限，或遥信状态在5 min内频繁翻转超过设限值等，均可自动标记为高疑似缺陷事件。系统还配套主从设备关联识别逻辑，可联动上下游异常波形，提取联锁特征，避免误判与漏判。

2.2 缺陷风险等级评估

在完成缺陷信息识别与提取后，需进一步对各类缺陷进行风险等级评估，以实现运维资源的差异化配置和精益化管理^[4]。由于变电站二次设备缺陷在严重程度、波及范围、影响持续时间上存在显著差异，单一维度的评估方式难以全面反映风险全貌，需引入多因子综合量化机制。

构建基于设备关键性 K 、缺陷触发频次 F 、影响范围 S 和历史故障关联性 R 的四维评价模型^[5]。通过加权评分法设定权重矩阵，最终将缺陷划分为高、中、低三级风险等级。各权重值依据专家经验及历史运维数据动态调整，提升评估准确度。评估标准见表1。

表1 不同类型缺陷的风险等级评估指标

Tab. 1 Risk assessment indicators for different types of defects

缺陷类型	设备 关键性 $K(1 \sim 5)$	触发 频次 $F(\text{次/月})$	影响 范围 $S(\text{节点数})$	历史 故障率 $R(\%)$	风险 等级
保护装置拒动作	5	≥ 2	≥ 5	≥ 10	高
遥信频繁跳变	3	5~10	2~4	< 5	中
通信链路卡滞	4	1~2	1~2	≥ 8	中
定值漂移异常	5	≤ 1	≥ 4	≥ 15	高
时钟同步偏移	2	≥ 3	1	< 3	低

系统根据评估结果对缺陷生成风险标签，并接入后续的告警压缩、运维分派与闭环整改流程，确保高风险优先闭环、低风险定期巡查，实现差异化精益运维的落地执行。同时，该模型可通过AI训练持续迭代优化，使其在设备更新和运行工况变化的背景下保持评估有效性。

2.3 缺陷关联路径建模与传播机制分析

在变电站二次设备监测中，采用基于因果推理的缺陷传播路径建模方法，结合故障树分析（FTA）与失效模式影响分析（FMEA），融合根因分析（RCA）思想，建立缺陷传播路径图，如图1所示。该模型节点代表具体设备或功能单元，边代表缺陷触发的逻辑关系，通过引入置信度因子（Confidence Factor, CF）量化节点之间的传导概率^[6]。如在继电保护异常后，若数据网同步失败的CF值达到0.72，则系统将判定存在高风险级联可能性，触发联动校核机制。

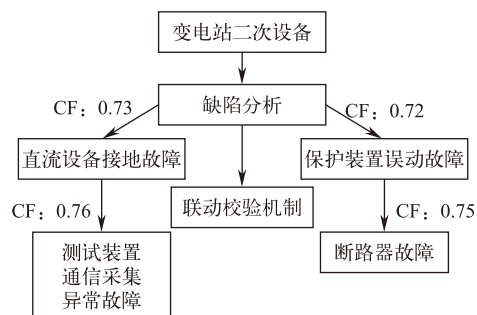


图1 缺陷传播路径建模与响应示意图

Fig. 1 Schematic diagram of defect propagation path modeling and response

此外，通过引入有向无环图（DAG）对故障事件进行结构化表达，可有效解决传统缺陷分类中存在的交叉归因问题，提升告警压缩与工单派发的智能化水平^[7]。系统还结合历史工单数据和SCADA监控日志，采用滑动时间窗口机制识别缺陷共现频次，动态更新路径权重，形成基于运行场景的缺陷传播热力图，增强对复杂场景下缺陷演化逻辑的把控能力。

3 精益化运维体系构建

3.1 运维数据分析与决策支持平台

电网调控一体化模式对变电站二次设备运

维决策的实时性与协同性提出更高要求，该平台以数据全流程管理为核心，通过“采集-分析-反馈”闭环机制构建调控与运维协同中枢^[8]。

运维数据分析交互流程为：首先，通过IEC 61850协议对接站内设备，每秒采集保护动作信号、通信状态等2 000余项参数，经预处理形成标准化数据库；其次，分析层挖掘参数异常特征，识别设备状态与调控操作的耦合关系；最后，分析结果反馈至决策模块，驱动运维方案生成与指令推送。

基于上述交互流程，平台设置三大核心功能：一是实时数据集成，可实现调控指令、设备状态及运维记录的归一化存储与动态更新；二是协同决策，其结合设备运行年限、负荷重要度匹配调控窗口期，按优先级排序任务；三是可视化展示，通过BI工具将数据关联结果转化为动态图表，直观呈现设备健康度与调控影响范围。

通过数据采集的全面性、分析的精准性与功能协同，平台可实现运维策略与电网运行方式的动态适配，以显著提升少人值守变电站的响应效率与决策精准度，为调控-运维协同提供技术支撑。

3.2 运维资源智能调配系统设计

为满足调控一体化模式下变电站二次设备运维资源精准投放需求，运维资源智能调配系统以调控指令优先级为导向，构建“需求感知-资源匹配-动态调度”一体化运作体系，如图2所示。

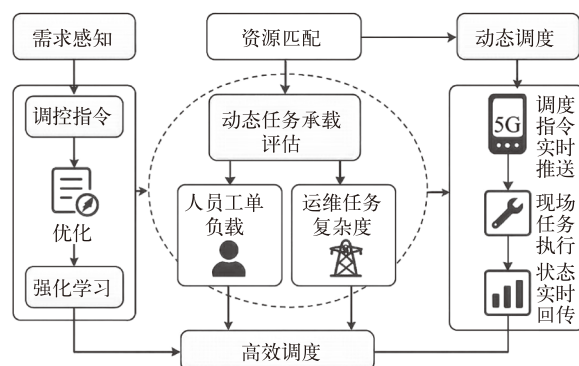


图2 “需求感知-资源匹配-动态调度”一体化运作体系

Fig. 2 Integrated operation system of “demand perception - resource matching - dynamic scheduling”

系统引入强化学习（RL）机制，基于调控操作与二次设备响应的历史数据，持续优化资源调配策略。通过动态任务承载评估模型，结合人员工单负载与二次设备运维任务复杂度，智能平衡工作分配，从而确保高技能人员优先处理与调控紧密相关的关键设备运维任务^[9]。同时，依托第五代移动通信技术，系统可实现调度指令实时推送与作业进度反馈，形成“调控指令下达-现场任务执行-状态实时回传”的高效协同链路^[10]。其内置任务集约化逻辑，按设备关联性合并工单，减少无效作业往返频次，显著提升跨站点运维效率，实现资源投入与设备可靠性的双重优化。

3.3 运维流程闭环与精益执行机制

针对调控一体化模式下变电站二次设备运维与调控业务深度耦合的特性，运维流程闭环与精益执行机制以全流程数字化为核心，构建起覆盖“任务生成-执行管控-效果评估-优化反馈”的完整管理体系，如图3所示。

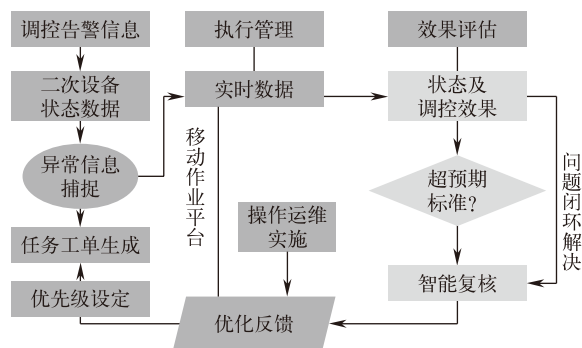


图3 任务生成-执行管控-效果评估-优化反馈的完整管理体系

Fig. 3 Complete management system of task generation - execution control - effect evaluation - optimization feedback

该体系首先通过实时对接调控告警信息与二次设备运行状态数据，一旦捕捉到异常信号，便依据预设规则自动生成带有优先级的任务工单，确保运维工作能够快速响应调控需求，实现运维任务与调控业务的精准匹配；在任务执行环节，运维人员依托移动作业平台接收工单后，需在作业过程中实时回传操作影像与日志数据，系统基于实时数据校验操作合规性与时效性，保障调控指令精准执行；任务完成后，系统自动评

估设备状态与调控效果，若未达预期，则触发智能复核，确保问题闭环解决，持续推动运维向精益化演进，以提升电网运行可靠性与调控协同水平^[11]。

4 实际部署验证与效果评估

4.1 缺陷分析与运维体系部署方案

依托某500 kV枢纽变电站，在电网调控一体化架构下，构建了面向二次设备的智能缺陷分析与精益运维系统，核心对象包括继电保护装置、测控单元、通信模块、时间同步系统等关键设备，旨在实现故障主动识别、风险等级量化与精准闭环处置。

部署主要包含三层结构：①数据接入层，统一采集遥测、保护动作记录、通信状态日志等，作为缺陷识别的基础数据；②智能识别层，本地边缘设备加载模型进行故障判断，风险等级上传至调控主站；③调控执行层，融合SCADA调度平台与OMS运维系统，通过标准化接口派发工单和追踪处置状态。

4.2 运行效果与指标评估

将二次设备缺陷分析与精益化运维系统部署于500 kV变电站中，系统在电网调控一体化模式对典型二次设备进行连续90天的监测与状态分析，旨在评估其识别准确率、响应时效与处理闭环能力等关键指标。系统运行期间，累计处理有效缺陷184项，初步评估结果见表2。

表2 缺陷识别与闭环响应关键指标评估

Tab. 2 Key indicators assessment for defect identification and closed-loop response

指标项目	部署前 平均值	部署后 平均值	提升幅度 (%)
缺陷识别平均时延	76 min	21 min	↓ 72.4
缺陷等级判别准确率	84.6%	95.3%	↑ 12.7
闭环处理平均周期	9.2 h	3.8 h	↓ 58.7
工单误派率	11.2%	3.1%	↓ 72.3
重大缺陷（I级）处置达标率	73.5%	97.65%	↑ 24.1

上述数据表明，缺陷分析机制在系统中发挥

了关键作用，不仅显著缩短了识别时延和处理周期，还提升了缺陷等级识别的准确性和派发指令的准确度，显著减少了人工干预和误操作风险。特别是在重大故障早期识别与闭环处置方面，系统具备更高的前置判断与协同控制能力，为变电站设备状态管理提供了科学决策基础。

为进一步验证该系统对企业侧二次设备运维管理的支撑效果，对不同设备类别的响应质量进行细化统计，详情见表3。

表 3 不同二次设备缺陷运维表现对比分析
Tab. 3 Comparative analysis of defect maintenance performance of different secondary equipment

二次设备类别	缺陷样本数	平均修复时间/h	工单派发数量	平均响应时间/min	完成度(%)
继电保护	62	2.5	56	15	98.2
测控装置	48	3.0	42	20	96.7
通信模块	38	3.5	34	25	94.5
时间同步系统	36	4.0	30	28	92.8

由表3可知，系统部署后，显著提升了不同二次设备在运维管理方面的表现。继电保护类设备的平均修复时间最短，且修复完成度较高，表明该设备的故障响应和恢复能力较强；而通信模块和时间同步系统相对复杂，平均修复时间略长，但仍在合理范围内，且整体运维完成度较高。系统增强了运维管理的整体可控性，进一步提升了电网调控一体化模式下变电站设备的长期稳定性与可靠性。

5 结束语

在电网调控一体化推进的背景下，本文构建了融合多源数据的二次设备缺陷分析模型，突破经验诊断局限，实现缺陷精准归类与溯源；同时建立了“数据驱动-分级响应-闭环优化”的精益化运维体系，动态适配调控与运维计划，解决响应滞后、资源错配问题；另外，搭建了调控-运维协同决策框架，打通了数据壁垒，推动了运维从被动处置转向主动预防。系统通过全流程自动化管理，显著提升了二次设备的响应效率与运行可靠性，为复杂电网环境下二次设备的精益化管

理提供了可复制的技术路径，对提升变电站二次设备全生命周期管理水平、支撑电网调控一体化模式深化具有重要意义。

参考文献

[1] 黄国平, 区伟潮, 廖峰, 等. 考虑储能系统不确定性的电网风险分析与鲁棒优化[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(6): 2473-2475.

[2] 盛振明, 郭耀松, 刘超, 等. 基于深度学习的电网指标数据异常检测方法研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2025, 44(4): 59-65.

[3] 刘承. 农村智能电网配电运维一体化建设要点探析[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2025(15): 10-12.

[4] 朱春雷, 沙海源, 邢刚, 等. 大型机场供配电网智慧管控系统设计研究[J]. 民航学报, 2025, 9(3): 54-58, 63.

[5] 董锋. 电网调控一体化运行管理模式研究[J]. 财富时代, 2025(4): 66-67.

[6] 陈天成, 唐萃, 许耀琦, 等. 光伏并网对配电网故障特性以及保护研究[J]. 电气应用, 2024, 43(10): 61-68.

[7] 何富浩, 陈诗伦. 基于电磁时间反转的电网故障定位方法[J]. 电气应用, 2023, 42(11): 90-98.

[8] 李俊业. 面向电网调控多业务的数据组织结构选配与迁移管理方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2023.

[9] 蔡凌. 福州地区电网调控一体化系统的研究与应用[D]. 福州: 福州大学, 2022.

[10] 刘书阁, 赵笑笑, 王玺, 等. 职业教育“电网运行与控制”虚拟仿真实训基地建设研究[J]. 中国电力教育, 2021(7): 27-29.

[11] 尹永昌, 张科. 供电企业增量配电网调控业务接入管理探索[J]. 机电信息, 2021(17): 5-8.

作者简介

聂胜鲁(1989—), 男, 工程师, 主要研究方向为电网变电设计。

(收稿日期: 2025-05-25)