

智能变电站二次设备状态监测与故障预警系统设计

徐亦迅

长江勘测规划设计研究有限责任公司 湖北 武汉 430000

摘要: 新型电力系统加速建设与“双碳”目标提出,使电网安全稳定高效运行面临巨大挑战。智能变电站作为电网核心枢纽,其二次设备(如继电保护装置等)是保障一次设备安全、实现电网自动化的关键。但传统定期检修模式有“欠修”“过修”问题,难以满足高可靠性要求。针对此,本文深入研究并设计智能变电站二次设备状态监测与故障预警系统。先系统梳理二次设备关键状态参量及监测方法;接着构建分层分布式、标准化系统总体架构,详细阐述感知层等各层功能与关键技术;重点提出基于数据与知识驱动结合的故障预警模型,涵盖基于深度学习的异常检测算法和基于知识图谱的故障推理机制。该研究为构建新一代智能化等变电站运维体系提供理论与实践支撑。

关键词: 智能变电站;二次设备;状态监测;故障预警

引言

能源结构转型与数字化推动全球电力工业变革,我国“双碳”目标对电网提出更高要求。智能变电站是坚强智能电网核心节点,兼具电能处理与信息枢纽功能,其中二次设备如同“大脑”“神经”,对一次设备进行监控、测量等操作,其健康状态关乎变电站及区域电网安全稳定。长期以来,电力行业多采用基于时间周期的预防性定期检修(TBM)策略,但存在“过修”与“欠修”问题,造成资源浪费且留下安全隐患。随着电网规模扩大、设备复杂度提升,TBM模式难满足现代电网高可用性、高可靠性需求。在此形势下,以设备实际运行状态为依据的状态检修(CBM)成为必然。而实现CBM需建立科学高效的二次设备状态监测与故障预警系统,实现7×24小时在线监测与准确预警,变被动抢修为主动预防。因此,研究设计该系统意义重大。

1 智能变电站二次设备状态参量体系

要实现精准的状态监测,首先必须明确“监测什么”。二次设备种类繁多,功能各异,但其健康状态均可通过一系列可观测、可量化的状态参量来表征。本文从以下四个维度构建状态参量体系。

1.1 硬件状态参量

硬件是设备运行的物理基础,其老化、损坏是导致故障的主要原因之一。(1) 电源状态:包括工作电源电压、电流、纹波系数。电压过高或过低、纹波过大均可能导致芯片工作异常。(2) 温度状态:关键芯片(如CPU、FPGA、电源模块)的表面温度。持续高温会加速元器件老化,甚至引发热失效。(3) 存储器状态:Flash、RAM等存储介质的读写错误率、坏块数量。存储器故障可能导致程序跑飞或定值丢失。(4) 时钟状态:内部晶

振的频率稳定性。时钟抖动会影响采样精度和通信同步。(5) 物理接口状态:光口/电口的发送/接收光功率、误码率。这是衡量通信链路健康度的核心指标。

1.2 软件与逻辑状态参量

现代二次设备高度依赖嵌入式软件,其逻辑正确性至关重要。(1) CPU/内存负载:CPU使用率、内存占用率。持续高负载可能预示着软件死循环或内存泄漏。(2) 任务执行状态:关键任务(如保护启动、跳闸出口)的执行周期、响应时间。时序异常往往是软件故障的前兆^[1]。(3) 自检与诊断信息:设备上电自检(POST)结果、周期性自诊断报告。这些信息直接反映了设备内部各功能模块的健康状况。(4) 定值与配置一致性:运行定值与基准定值的比对结果。定值被意外修改是严重的安全隐患。

1.3 通信与网络状态参量

智能变电站基于IEC 61850标准构建了复杂的通信网络,通信状态直接影响信息流的可靠性。(1) GOOSE/SV报文状态:报文的收发流量、丢包率、抖动(Jitter)、传输延时。这些是过程层网络健康度的核心指标。(2) MMS通信状态:与站控层SCADA系统的连接状态、服务请求响应时间。(3) 网络拓扑状态:交换机端口状态、VLAN配置、网络环路等。网络拓扑异常会导致通信风暴或分区。(4) 对时状态:IRIG-B、PTP等对时信号的精度和稳定性。全站统一对时是保证事件顺序记录(SOE)准确性的前提。

1.4 环境与辅助状态参量

设备运行环境对其寿命有显著影响。(1) 温湿度:屏柜内的环境温度和湿度。湿度过高易导致凝露,引发短路。(2) 电磁干扰:局部放电量、空间电磁场强度。强电磁干扰可能使设备误动或拒动。(3) 振动:由附近

一次设备操作或外部因素引起的机械振动。长期振动可能导致接线松动。

2 系统总体架构设计

为有效管理和利用上述多维状态参量，本文设计了一个遵循“云-边-端”协同理念的四层系统架构。

2.1 感知层（端）

感知层是系统的数据源头，负责原始状态信息的采集。（1）内置监测单元：充分利用智能二次设备自身强大的自诊断能力。通过设备提供的MMS服务或专用诊断接口，实时读取2.2节所述的软件与逻辑状态参量。（2）外置传感器：对于设备自身无法提供的参量（如硬件温度、环境温湿度、光功率等），部署微型化、低功耗的物联网（IoT）传感器。这些传感器通过RS485、CAN或无线（如LoRa）方式接入^[2]。（3）网络探针：在网络关键节点（如过程层交换机镜像端口）部署网络探针，对GOOSE、SV、MMS等报文进行无损镜像和深度解析，提取2.3节所述的通信状态参量。所有感知层设备均支持即插即用，并能根据IEC 61850标准进行建模，确保数据的标准化。

2.2 网络层（边）

网络层负责将感知层的数据高效、可靠地传输至平台层，并承担部分边缘计算任务。站控层网络采用双星型冗余以太网，承载MMS、SNTP等管理信息。过程层网络采用高可靠性的工业以太网，承载GOOSE、SV等实时信息。边缘计算节点在变电站本地部署边缘服务器。其主要功能包括：（1）数据汇聚与预处理：对来自不同源的数据进行时间戳对齐、格式转换、噪声滤除和数据压缩。（2）本地快速预警：对于一些规则明确、后果严重的故障（如电源失压、严重通信中断），在边缘侧即可完成判断并发出紧急告警，缩短响应时间。（3）数据安全隔离：作为内外网之间的安全屏障，对上传数据进行过滤和加密。

2.3 平台层（云）

平台层是系统的核心大脑，提供强大的数据存储、计算和管理能力。（1）大数据平台：采用分布式架构（如Hadoop/HBase或时序数据库TDengine），用于存储海量的历史状态数据、事件记录和预警日志。时序数据库特别适合存储带有时间戳的监测数据。（2）微服务架构：将系统功能拆分为独立的微服务，如数据接入服务、数据治理服务、模型管理服务、告警服务等。这种架构提高了系统的灵活性、可维护性和可扩展性。（3）数字孪生底座：构建变电站及二次设备的数字孪生模型。该模型不仅包含设备的静态属性（型号、参数），还实时映射其

动态状态（各项参量数值），为上层应用提供直观、统一的可视化视图。

2.4 应用层

应用层面向最终用户，提供具体的业务功能。（1）全景状态监视：以图形化方式展示全站二次设备的实时健康状态，支持按设备类型、间隔、健康度等级进行筛选和钻取^[3]。（2）智能故障预警：核心功能模块，将在下一章详细阐述。（3）辅助决策支持：根据预警结果和设备历史数据，自动生成检修建议、风险评估报告和备品备件清单。（4）移动应用：支持运维人员通过手机APP随时随地查看设备状态和接收告警信息。

3 智能故障预警模型设计

传统的阈值告警方法难以捕捉设备早期、渐进式的性能退化。为此，本文提出一种“数据驱动+知识驱动”的混合智能预警模型，旨在兼顾异常发现的灵敏性与故障诊断的可解释性。

3.1 基于深度学习的异常检测（数据驱动）

数据驱动方法的核心优势在于能够从海量历史数据中自动学习正常模式，并敏锐地识别出任何偏离该模式的异常行为，尤其擅长发现未知的、复杂的故障征兆。在本系统中，我们选用了长短期记忆网络（LSTM）作为基础模型，因为它独特的记忆单元结构使其能够有效捕捉时间序列数据中的长期依赖关系，而这正是状态监测数据的典型特征。模型的输入并非单一参量，而是将同一台设备在一段时间窗口（例如10分钟）内产生的多维状态参量（如CPU负载、关键芯片温度、通信丢包率等）构成的联合时间序列。在模型训练阶段，我们主要采用无监督或半监督的学习方式，利用设备在长期正常运行期间积累的大量数据，训练LSTM模型学习并重构正常状态下的数据分布规律，其优化目标是最小化对正常序列的重构误差。当系统在线运行时，新采集的数据序列会被送入训练好的模型进行实时重构。如果重构误差超过了根据历史误差统计分布自适应调整的动态阈值，系统便会判定当前状态为异常。这一机制使得系统能够比传统固定阈值法更早、更准确地发现设备性能的细微劣化。

3.2 基于知识图谱的故障推理（知识驱动）

数据驱动方法虽在异常检测上表现出色，但本质是“黑盒”，难解释异常原因与潜在风险。为此引入知识驱动方法，通过构建故障知识图谱赋予系统推理和解释能力。知识图谱构建是知识工程过程，核心实体有二次设备实例、预定义故障模式（如“CPU过载”）、可能根本原因（如“软件BUG”）及故障导致的严重后果（如“保护拒动”）。这些实体通过丰富语义关系（如“设备-具

有一故障模式”）相连，形成语义网络。知识来源多元，整合设备厂商技术说明书、电力行业运维规程、历史故障案例库及领域专家经验。数据驱动模型检测到异常后，故障推理引擎被激活。它以异常具体特征为查询条件，在知识图谱中进行多跳、关联式推理搜索。如系统发现某保护装置CPU负载持续超95%，与智能终端间GOOSE报文抖动增大，推理引擎能在图谱中找到关联这两个特征的故障路径，推断出“装置内部可能存在软件死循环，耗尽计算资源，影响通信报文正常处理”^[4]。最终，系统输出不再是简单“异常”标签，而是包含“疑似故障类型”“可能原因”“潜在风险”的综合性诊断报告，大幅提升预警信息实用价值与可操作性。

3.3 预警信息分级与发布

为了避免告警信息泛滥导致运维人员产生“告警疲劳”，系统对预警信息实施了精细化的分级管理策略。一级预警被定义为紧急级别，指那些直接威胁电网安全稳定运行的故障，例如保护装置的直流电源完全失压，或者双重化配置的两套主保护同时出现严重异常。对于此类告警，系统会立即通过站内声光报警、短信、电话以及移动APP推送等多种渠道，以最高优先级通知相关值班和检修人员，要求其必须立即响应和处理。二级预警属于重要级别，表示设备已出现明显的故障征兆，虽未立即危及安全，但若不及时干预，极有可能在短期内发展为严重故障。典型的例子包括单套保护装置的CPU持续高负载、关键通信链路的误码率持续超标等。系统会要求运维人员在24小时内安排专项检查。三级预警则为一般级别，通常反映设备性能略有下降或处于亚健康状态，但

仍在安全运行的允许范围内。这类预警信息会被记录在案，并建议在下次计划性检修时予以关注和处理，例如屏柜内环境温度偏高或某些非关键后台任务的响应时间略有增加。通过这种分级发布机制，系统确保了告警信息的有效性和针对性，优化了运维资源的分配。

4 结语

本文针对智能变电站二次设备运维痛点，设计先进状态监测与故障预警系统。该系统构建全面状态参量体系、采用标准化分层架构，融合深度学习与知识图谱技术，弥补传统方法在监测维度、数据利用和预警智能性上的不足。未来研究聚焦三个方向：一是探索在线学习、联邦学习等技术，让预警模型持续自我进化，适应电网动态发展；二是将研究从单站拓展到区域电网，构建跨站协同分析平台，聚合同类型设备群体数据，提升故障诊断准确性与普适性；三是打通一、二次设备信息壁垒，深度融合两者状态数据，构建全站设备一体化健康评估与综合风险预警体系，为打造“无人值守、智能运维”的新一代变电站奠定基础。

参考文献

- [1]杨刚.智能变电站二次设备状态监测研究[J].中国战略新兴产业,2022,(32):136-138.
- [2]周建.智能变电站二次设备故障状态自动化监测系统设计[J].中国科技投资,2021,(14):59-60.
- [3]韦戈山,杨杰.智能变电站二次设备状态监测技术研究[J].中国新通信,2020,22(02):133-134.
- [4]代小翔,胡绍谦,张亮.智能变电站二次设备隐藏故障自动检测方法[J].自动化应用,2026,67(02):176-178.