

配电自动化终端故障自诊断算法 在城镇电网中的实现研究

刘 鑫

(丽水市正好供电服务有限公司, 浙江 丽水 323000)

摘 要 城镇配电网终端规模扩大与运行环境复杂化使故障隐蔽性增强, 传统依赖人工巡检的处置模式难以满足快速定位需求。本研究围绕配电自动化终端运行数据特征, 构建终端故障特征建模方法, 设计面向终端侧的故障自诊断算法, 形成运行状态识别、故障模式判定与结果有效性校核的完整技术路径, 并提出算法在城镇电网中的部署与主站协同实现方式。工程应用表明, 该方法可提升终端故障识别及时性与运维处置效率。

关键词 配电自动化终端; 故障自诊断算法; 城镇电网; 运行状态识别

中图分类号: TM76

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.06.011

0 引言

配电网是指从输电网或地区发电厂接收电能, 通过配电设施就地分配或按电压逐级分配给各类用户的电力网。配电网是由架空线路、电缆、杆塔、配电变压器、隔离开关、无功补偿器及一些附属设施等组成的, 在电力网中起到重要的分配电能作用。城镇配电网在高负荷密集运行和自动化终端广泛部署条件下, 终端设备长期处于复杂电磁与通信环境中, 电源异常、采样失准和通信中断等问题呈现出突发性和隐蔽性特征, 增加了运行风险与运维压力。现有运维模式对终端状态感知依赖人工分析与事后判断, 难以适应故障快速演化的运行需求。本研究围绕终端运行数据的内在关联关系, 研究在终端侧引入故障自诊断算法, 构建从状态识别到诊断结果输出的技术体系, 并探索其在城镇配电网中的工程化实现路径, 为后续算法设计与应用分析提供基础。

1 配电自动化终端故障特征建模基础

城镇配电网工况下终端故障特征建模以运行量测、设备自检与通信状态为统一观测集, 按时间戳对齐后建立“电源—通信—采样—控制”四类异常特征族^[1]。电源故障以母线电压跌落、纹波幅值上升、掉电复位计数增加为主, 配合电源告警位形成持续性判据; 通信故障以链路中断时长、丢包率、重连次数和时钟漂移累积量刻画, 约束报文间隔与心跳一致性; 采样故

障以零漂偏置、量程饱和、相量突变率异常与噪声方差抬升表征, 结合邻近测点相关性检验剔除外部扰动; 控制故障以遥控失败码、输出继电器状态回读不一致和动作时延超限识别。特征描述框架采用滑动窗口统计、残差序列与事件序列编码输出定长向量, 支持后续自诊断算法直接调用。

2 配电自动化终端自诊断算法设计

2.1 终端运行状态的在线识别逻辑

终端侧在线识别以电压、电流、通信状态、自检码构成的多源序列作为输入, 先完成时间戳对齐、缺测补位标记与异常值屏蔽, 采样端出现抖动或报文间隔漂移时维持上一有效值的状态标签, 避免瞬态畸变触发频繁状态翻转^[2]。状态判别采用“稳态约束+事件触发”并行结构: 稳态约束以量测波动带宽、心跳间隔上限、自检码连续一致性限定正常运行域, 并引入数据质量位参与门控, 质量位异常时仅更新缓存不更新状态; 事件触发以电压跌落、电流突变、链路中断、自检故障位翻转作为进入疑似状态的条件, 触发后进入固定观测窗口累计证据。

2.2 故障模式的判定规则与分类流程

故障模式判定建立在稳定状态识别结果之上, 输入为固定时间窗口内的多源特征向量, 分类流程以“约束筛选—差异度判别”为主线组织^[3]。约束筛选阶段利用已知工程规律对特征组合进行快速裁剪, 限定可

作者简介: 刘鑫(1983-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 电气自动化。

行的故障候选集合，减少特征重叠引发的类别扩散。进入判别阶段后，引入基于模板差异的距离度量，对候选故障类别逐一计算特征偏离程度，距离最小的类别作为当前窗口的判定结果。该度量形式如下：

$$D_k = \sum_i \frac{|x_i - \mu_{k,i}|}{\sigma_{k,i}} \quad (1)$$

式(1)中， D_k 表示与第 k 类故障模板的综合偏离度， x_i 为观测特征， $\mu_{k,i}$ 与 $\sigma_{k,i}$ 为对应模板参数。在工程实现中，距离结果不直接触发结论，而是作为分类置信参考参与后续判别，避免单窗口异常主导决策。若相邻窗口内最小距离对应类别保持一致，分类结果进入锁定状态；若类别频繁切换，则延迟输出并回退至候选集合。

2.3 自诊断结果的有效性判别机制

自诊断有效性判别以分类结果为输入，目标在于抑制瞬态扰动和偶发噪声对终端故障结论的放大效应。判别逻辑围绕持续性、一致性和历史可复现性展开，先对当前故障状态的时间连续性进行约束，要求异常在多个相邻窗口内保持稳定，避免短时波动直接形成告警。在一致性层面，引入跨窗口特征演化约束，判别特征变化方向是否与既定故障模式保持一致，防止类别抖动引发误判。三类约束被压缩为统一可信度指标，其计算形式为：

$$C = \min(1, \frac{T}{\tau})S \quad (2)$$

式(2)中， C 表示诊断可信度， T 为故障持续时间， τ 为持续性阈值， S 为一致性评分。在工程应用中，可信度用于控制诊断结果的输出层级，高可信度结果触发告警并冻结类别，低可信度结果仅进入缓存等待复核。

3 自诊断算法在城镇电网中的实现机制

3.1 终端侧自诊断功能的工程化部署

终端侧部署以“采控任务不被打断”为硬约束，将自诊断模块做成低优先级常驻服务，采样、遥测、遥控链路保持原有调度优先级不变，自诊断只读取共享缓冲区与事件队列，不直接占用采控链路的实时资源^[4]。数据进入自诊断前在终端侧完成时间戳对齐与去抖，窗口化聚合后再进入状态识别与模式判定，避免对单点瞬态值做高频计算引起CPU抖动。

为量化自诊断对终端算力的占用并形成可配置的资源上限，可引入单周期计算负载比作为调度约束，引出如下计算式：

$$L = \frac{t_d}{T} \quad (3)$$

式(3)中， L 为计算负载比， t_d 为自诊断在一个

调度周期内的CPU占用时间， T 为调度周期。工程配置以负载比阈值约束自诊断的执行片段长度，诊断计算按片执行并允许跨周期续算，负载比接近阈值时暂停模板判别与历史匹配，仅保留状态更新与事件缓存，负载比回落后恢复全流程判定。

3.2 主站系统对诊断信息的处理方式

主站侧接收链路按“接入校验—去重归并—关联分析—告警分级”组织，接入校验对上送报文执行签名校验、时间一致性检查与设备标识绑定，剔除重放与越权报文；去重归并以终端标识与事件键合并重复上送，保留最新一次的诊断结论与可信度字段，避免告警风暴造成队列拥塞^[5]。关联分析在馈线、台区、站所三层对象上聚合终端诊断事件，将通信类告警与上联通道状态、交换设备告警做同源核对，将电源类告警与站用电、直流系统监测做一致性核对，将采样类告警与同馈线量测相关性做交叉验证，输出“终端故障优先级—影响范围—建议处置动作”的结构化结果并进入告警引擎。

为量化主站对终端自诊断信息的接收、处理与告警输出效果，统计主站运行过程中关键处理指标并汇总，见表1。

表1 主站诊断信息处理统计表(单日样例)

指标项	数值
接收诊断报文总量(条)	18 650
去重后有效事件量(条)	7 420
进入关联分析事件量(条)	5 080
生成告警工单量(单)	860
I级告警量(条)	120
II级告警量(条)	740
III级告警量(条)	1 560
平均入库延迟(ms)	420
峰值入库队列长度(条)	980
人工复核事件量(条)	260

报文总量与有效事件量差异明显，去重归并对重复上送与抖动事件具有直接削减作用，关联分析后的事件量进一步收敛，说明跨层核对能过滤缺乏外部支撑的孤立告警。告警工单量低于告警总量，反映分级策略将大量低风险事件留在观察队列，减少工单系统负荷。入库延迟维持在毫秒级且峰值队列长度未出现失控增长，接收、去重、分析链路的计算开销处于可

承受区间，人工复核事件量占比有限，主站侧规则配置与关联策略能把不确定性集中到少量边界样本上。

3.3 城镇电网运行条件下的应用实施流程

城镇电网应用流程从终端侧“诊断生成”开始：终端在本地窗口内完成状态识别、模式判定与有效性校核，输出包含故障类型、发生时刻、持续窗口数、可信度等级的事件记录，事件先写入本地环形缓存并打上递增序号。上送策略按告警等级触发，等级达到上送门限时立即上送，等级不足时进入延迟队列并等待后续窗口补强证据；通信不畅时启用断点续传机制，依据序号补发缺失事件，避免网络抖动造成主站侧事件链断裂，终端侧在补发完成后清理缓存，保证“先确认后删除”的一致性。

主站汇聚后进入运行管理链路：告警引擎按馈线影响范围、终端位置与设备重要度生成处置优先级，工单系统按优先级下发到站所或运维班组，并附带诊断证据摘要与推荐核查点位，减少现场排查的试错路径。图 1 反映了城镇电网运行条件下配电自动化终端自诊断结果的应用流程，流程涵盖终端生成、主站处置及结果回写等关键环节。

该图围绕城镇电网运行场景，清晰刻画了配电自动化终端自诊断结果的闭环应用路径：终端侧依次完成状态识别、有效性校核与事件生成，并结合本地缓存与门限判断决定是否上送；诊断事件进入主站后，按接收、汇聚、告警分级和处置优先级生成顺序推进，最终形成工单并完成现场处置；处置结果回传主站并用于诊断规则与参数更新，构成终端—主站—运维之间可追溯的运行闭环。

4 结束语

本研究围绕城镇配电网运行环境下配电自动化终端故障识别难题，构建了覆盖电源、通信、采样与控制环节的故障特征建模方法，形成可直接用于终端侧计算的统一特征描述体系。在此基础上设计了具备状态识别、模式判定与有效性校核的自诊断算法，并结合嵌入式资源约束完成终端侧工程化部署，确保诊断计算对采控业务的影响受控。主站侧建立了诊断信息去重、关联与分级处理机制，实现终端诊断结果与运行管理流程的有效衔接。工程应用表明，该技术路径可缩短故障发现时延、降低无效告警数量并提升运维处置针对性，具备在城镇配电网规模化推广的可行性，后续可围绕诊断知识自更新与跨区域协同应用进一步拓展。

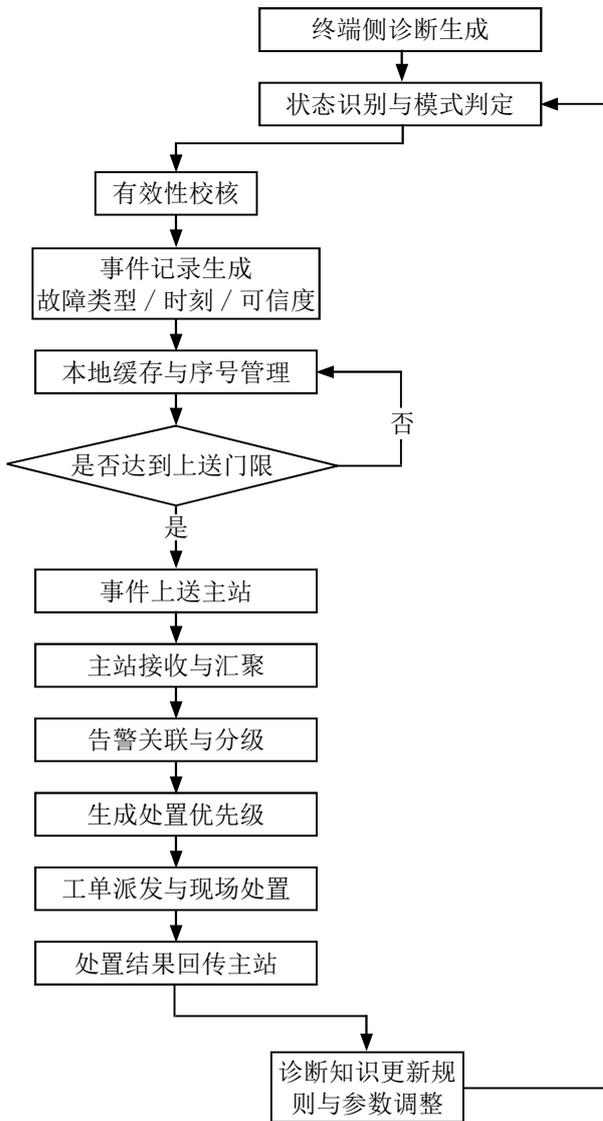


图 1 城镇电网配电自动化终端自诊断应用流程示意图

参考文献：

- [1] 陈星辰. 配电自动化终端的常见故障分析及运维管理探讨 [J]. 通讯世界, 2025, 32(01): 92-94.
- [2] 李文昭, 王琛. 配电网自动化系统设计与故障定位技术分析 [J]. 光源与照明, 2023, (10): 210-212.
- [3] 史德生. 配电自动化终端设备的故障与状态评估分析 [J]. 集成电路应用, 2023, 40(10): 76-77.
- [4] 周永志. 船舶电气系统绝缘故障自适应诊断技术探究 [J]. 船舶物资与市场, 2023, 31(09): 91-93.
- [5] 郑军生, 杨俊哲, 许文秀, 等. 配电自动化终端调试过程中故障诊断方法 [J]. 微型电脑应用, 2023, 39(08): 111-113, 121.