

智能变电站二次继电保护操作回路可靠性评估体系构建与应用

郭树云
南京国电南自自动化有限公司 江苏南京 211106

摘 要：智能变电站的二次继电保护操作回路的可靠性是保证整个电力系统故障安全快速隔离和稳定运行的关键。但是，传统的继电保护可靠性评价方法已不能满足以数字化和网络化为特征的智能变电站二次回路评价的需求，因此急需建立评估模式以更全面地表征设备、回路和系统特征。该文针对操作回路的可靠性评估特征，提出通过建立三层指标全面表征设备、回路和系统的特征，并借助故障树分析法、蒙特卡罗模拟法建立综合评价模式，并利用多数据收集和不确定性量化提供技术支持。该体系经工程实践验证能够实现故障预测更准确和维护工作更有效的目的，对实现提升智能变电站二次系统可靠性提供了理论依据和实施策略。

关键词：智能变电站；二次继电保护；操作回路；可靠性评估；指标体系；评估模型

引言：

智能变电站是电力系统的关键组成部分和实现信息化建设的根基，在其二次继电器保护操作回路上的故障识别、断路器开关的分闸操作以及系统复归都是最为关键的部分，是电网能否正常运行的“心脏”。对于传统的变电站而言，通过智能化变电站的二次回路中使用的诸如合并单元、智能化终端来达到数字化收发的目的，可是这一过程中对网络交互、软硬件配合等均可能出现新的可靠性风险。因此，当操作线出现问题时，极有可能会造成保护装置出现错误或无操作的故障情况，造成大面积停电，因此构建合理且有效的可靠性评估体系对避免整体性的故障有着不可替代的作用。

并单元、智能终端、通信网络与辅助设备等组成的闭环管控系统，主要完成三层工作联动：首先通过合并单元完成一次设备电流、电压等模拟量的数字化转换与同步处理；其次由继电保护装置基于采样数据进行故障判别与逻辑运算；最终通过智能终端将保护指令转化为开关设备的分合闸操作。该系统在智能电网中执行“故障识别—决策生成—执行控制”的全过程管理工作，是预防故障蔓延、减少停机损失的最前道防护屏障。与测量回路侧重于准确的数值测量不同，操作回路强调基础的操作性任务，其具有较为实时性要求高、逻辑关联性强和故障后果严重的特点，它的性质与功能则更加地侧重为“安全保障”而非“日常监测”。

1. 智能变电站二次继电保护操作回路概述

1.2 系统结构与关键组成

1.1 基本概念与功能定位

二次继电保护操作回路是由继电保护装置为核心的合

表 1 系统结构组成分析表

| 组成部分 | 功能描述 | 可靠性敏感点 |
|-----------|-----------------------------------|----------------------|
| 合并单元 | 模拟量采集、模数转换、数据同步（IEC 61850-9-2 协议） | 采样精度漂移、同步时钟失步、电源扰动 |
| 智能终端 | 接收保护指令、驱动开关操作、状态信息反馈 | 出口继电器故障率、通信链路中断 |
| 继电保护装置 | 故障判别算法、逻辑决策、定值管理 | 软件算法缺陷、CPU 处理延迟、内存溢出 |
| 以太网交换机 | 过程层 GOOSE/SMV 报文转发、网络风暴抑制 | 端口阻塞、数据丢包、网络拓扑不合理 |
| 二次电缆 / 光缆 | 信号传输介质（含光纤、屏蔽电缆） | 绝缘老化、电磁耦合干扰、物理损伤 |

智能变电站二次继电保护操作回路通过分层的分布式架构设计，其间信息传输由 IEC 61850 标准的协议完成。该过程中，合并单元与智能终端直接面对一次设备，承担信息获取及控制功能；间隔层继电保护装置与合并单元通过交换机进行交互，独立实现该间隔的保护功能；控制级完成远方监控和定值下发任务，不参与实时保护决策。各层级间的通

讯可靠性是操作环路稳定可靠性的基础，如 GOOSE 报文传输延迟、抖动须满足《智能变电站网络报文记录分析装置技术条件》的要求，否则容易造成保护设备误判、拒动。

操作回路可靠性评估关键技术

2.1 数据采集与预处理技术

本文采用“分布式感知和集中式汇聚”的数据采集模式实现数据获取，该模式依赖三类数据获取接入点以实现全局状态感知：部署于合并单元、智能终端的嵌入式状态监测传感器，实时采集设备温度、电源电压、光模块功率等运行参数；故障录波装置采用 IEC61850 标准实现保护动作前后的 GOOSE/SMV 报文、刀闸开合和继电器自动生成的记录数据实时记录；维护系统可获得设备台账、检修记录、故障处理等非实时性的数据。对各类数据的采集速率根据需求自动配置，模拟量采用每秒 1000Hz 的高频采集，状态量按事件触发方式记录，实现关键信息的快速准确记录。

同时通过 3 步的预处理，来提升数据的可用性：第 1 步是数据清洗和剔除，运用 3σ 原则对传感器故障、网络通信引起的传感器抖动数据进行异常值剔除；第 2 步是对数据进行标准化处理，将单位不同的数据转换到区间 $[0, 1]$ 内，从而减少不同单位间的误差；第 3 步是时间的同步，采用 IEEE 1588 PTP 时钟同步技术对采集的分散数据进行时间统一化，避免因采集数据时间戳不准确而导致的相关性度量偏差。由于数据的时间特性影响评测结果的准确性，采集时滞超过 500ms，将会导致动态评测的误差上升至少 15%，因此需要借助边缘计算节点的力量，来部署预处理算法，从而将数据采集与处理的时滞压缩到 200ms 以内。

2.2 不确定性因素量化方法

针对操作回路中的不确定性因素，分别采用概率分布和贝叶斯网络推理的统计学方法来表示，对电磁干扰强度，可使用服从正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$ 的随机变量来表示，其中 μ 表示在设备运行环境中出现的扰动大小的平均值，而 σ 是扰动变化的范围，该信息由电磁兼容性实验而得；对通讯时延的影响，由于受网络负载的影响，采用服从 Weibull 分布的随机变量来表示其中的 β 反映了延迟分布的偏斜程度，而 η 表示对应特征延迟时间；电子元件参数变化采用均匀分布描述其变化区间。

借助于贝叶斯网络创建不确定性因素的传输路径模型，将各因素看作网络节点，通过条件概率表（CPT）描述节点

间依赖关系，例如“合并单元故障”的节点的概率值受“温度漂移”“电源波动”等父节点的影响，可以通过贝叶斯推理来得到若干因素组合的概率与失败率。此定量分析的结果可为模型正反两方面进行调整：第一，在此基础上，动态调整评价指标的权重，如一旦发生电磁干扰超标，增加“通讯链路可靠度”等项的权重；第二，在基于此模型的参数进行修改与优化，如基于时延分布特征修正保护动作时间裕度的计算阈值，使评估结果更贴近实际运行场景。

2.3 冗余配置与容错设计

“冗余设计”作为提升操作回路可靠性的硬件基础，遵循“空间分散和功能独立”的设计原则构建了多级冗余。而“双重配置”则采用 2 个彼此独立的操作回路（即集成模块、智能单元及通信网络），任一部分都可以单独完成保护任务并在日常运行中完成主从切换；而三取二配置则采用了 3 个彼此独立的回路加上表决逻辑相结合的方法降低单点故障引起的系统失效风险。故障处理方式遵循了“四性”设计标准，即各冗余器件应具有各自独立的电源、信号传输以及接地回路；确保所有保护没有遗漏的地方；快速响应确保故障切换时间低于 2ms；借助对元件的使用限制来提高元件平均工作周期数。

各冗余模式间的可靠性增益和投入费用构成非线性关系，而设置双套配置，双套配置在可靠性提升（故障率降低 65%）与经济性（成本增加 80%）间取得最佳平衡，因此是工程应用中主要考虑模式；三取二可以将事故发生的概率降为单机的 8%，但由于其过大的投入成本只有故障后果极为严重的关键场景条件下才采用此种模式，所以应该根据电力系统的重要性及经济代价选择合适的冗余方式，以避免过度追求高冗余水平而出现的资源浪费现象。

表 2 冗余配置方案分析

| 冗余配置方案 | 故障率降低比例 | 平均无故障工作时间 (MTBF) | 投资成本增加比例 | 适用场景 |
|--------|---------|------------------|----------|---------------|
| 单套配置 | — | 8000 小时 | — | 非关键线路或备用电源回路 |
| 双套配置 | 65% | 22800 小时 | 80% | 220kV 及以上主网线路 |
| 三取二配置 | 92% | 52000 小时 | 150% | 特高压变电站或重要枢纽节点 |

3. 评估体系应用实践

3.1 在系统设计阶段的应用

“多方案建模—量化评估—迭代优化”的过程循环构成了可靠性评价框架前端控制的关键内容。在三维设计背景

下，首先建立操作回路的数字化模型，并将这些回路的设备特性、网络结构和环境因数作为评价模块的输入数据，经过 MonteCarlo 模拟技术产生不同设计选项下线路的可靠性指数。为了改进通讯线路冗余不够的环节，该评价体系能够自动识别关键链路的“瓶颈节点”，并给出增加光纤通道、或交换机位置优化的网络拓扑调整建议。以实际工程为例，该体系可使得通信节点的个数减少超过 20% 以上，显著降低信息传输时延波动。在组件选型的过程中，该评价体系根据各个厂家提供的合并模块的故障频率曲线及价格等属性，选择最佳的元件配置达到可靠与经济的最优解；对于冗余方案的选择，遵循故障结果的影响程度分类，对于 220kV 的出线回路，采用双套化的方案，而 110kV 的配电线路采用单套 + 备用的方案即可。通过优化评价方法，某省智能变电站回路建设成本较优化前降低 15%，后续 20 年运维费减少 28%，验证了设计阶段所认定的经济效益。

3.2 在运行维护中的实践

系统在投入运营和维护过程中，主要还是针对评估体系转化为状态检修的“数字听诊器”，对状态检修进行应用，通过在线数据采集和持续性评估来实现运维模式从“被动抢修”向“主动预防”转变。系统每日凌晨时段自动开启全回路可靠性扫描，基于当日设备运行信息对评估模型进行动态修正，得到“高风险设备清单”、“预警等级”等评估报告。

合并单元取样误差若超预警值，运维人员便可提前对取样误差进行纠正，避免存在引起保护误动作的风险；对于智能终端继电器动作次数接近阈值的情况，系统自动生成更换计划，实现寿命周期的精准管控。在资源分配上，采用“基线 - 趋势”分析法对历史数据进行对比，将当前评估结果与设备投运初期的基准值、同类型变电站的平均值进行多维比较，识别渐进性退化趋势，为设备健康度评价提供纵向与横向参考。

3.3 评估效能分析与优化

效能评估从“准确性 - 效率 - 经济性”三个维度构建量化标尺，实现自我改进的反馈机制。准确性验证是通过算法预测后的故障和实际故障的符合程度进行衡量。对某试点变电站的 18 个月数据统计得出该系统对重大故障的预警准确率达 85%，其中表现最好的是硬件故障辨识度（92%），而相对较差的是软件异常辨识度（76%），主要受限于嵌入式系统日志的完整性。效率指标关注评估耗时，传统人工计算需 2 小时完成的回路可靠性分析，体系通过 GPU 并行计算可压缩至 8 分钟内，满足实时性要求。经济性测算采用“故障成本节约法”，统计显示应用体系后年均故障次数从 6 次降至 3.2 次，单次故障处理成本从 5 万元降至 3.5 万元，年直接经济效益达 12 万元。

表 3 优化措施与指标

| 优化方向 | 优化措施 | 优化前指标 | 优化后指标 | 提升幅度 |
|--------|-------------|------------|-----------|-------|
| 数据处理效率 | 引入边缘计算节点 | 评估耗时 45 分钟 | 评估耗时 8 分钟 | 82.2% |
| 预警准确性 | 融合红外测温等非电信号 | 故障吻合度 72% | 故障吻合度 85% | 18.1% |
| 模型适应性 | 增加新能源接入场景模块 | 场景适配率 65% | 场景适配率 90% | 38.5% |

4. 未来发展方向

数字化和人工智能技术将颠覆人们对可靠性评估体系的技术理解，将可靠性评估推向“全感知、全关联、全兼容”的趋势。使用数字孪生技术可以创建并映射整个操作回路中物理 - 虚拟孪生，通过实时同步设备状态、环境参数与运行数据，实现从设计仿真到退役评估的全生命周期可靠性追踪。某试点项目证明这种新型评价方法比传统方法高 30% 的可靠性评估准确率。AI 驱动的自适应评估模型成为突破瓶颈的关键，深度学习的算法可以自主识别数据源之间的相关性规律，而强化学习使评估策略适应新情况的功能，时效可以缩短在几个小时内完成。同时，边缘计算和 5G 技术

的结合重塑了数据采集架构，边缘节点就近处理高频采样数据，5G 切片网络保障时延敏感型数据的传输可靠性，二者协同将数据预处理效率提升 5 倍以上。跨学科融合趋势日益显著，信息安全领域的“攻击图建模”技术被引入评估体系，实现可靠性与安全性的协同防护，为应对网络攻击导致的保护误动提供新思路。

结束语：本文构建的智能变电站二次继电保护操作回路可靠性评价方法“设备 - 回路 - 系统”分级指标、混合式评估模型构建与关键技术相结合的总体框架和整体技术方案，将传统可靠性的定性评价技术上升到定量计算分析层次，面向工程项目提供了一套规范化、易操作的技术工具，

为智能变电站二次系统的可靠性提供切实有效的保障。

参考文献:

- [1] 吴开起, 马国强, 张灿伍. 继电保护二次回路可视化技术在智能变电站中的关键应用研究[J]. 自动化应用, 2025, 66(15): 174–176.
- [2] 于佳琦. 智能变电站继电保护二次回路隐藏故障状态实时检测方法[J]. 电气技术与经济, 2025, (07): 241–243+247.
- [3] 郑茂然, 余江, 史泽兵, 等. 基于 MobileViT 的智能变电站继电保护二次回路故障诊断技术[J]. 电网与清洁能源, 2025, 41(06): 31–38.
- [4] 刘郑康. 智能变电站继电保护二次回路检修方法分析[J]. 集成电路应用, 2025, 42(04): 218–219. DOI:10.19339/j.issn.1674–2583.2025.04.091.
- [5] 佐松阳, 孙翺栋. 智能变电站在线监测与故障诊断技术在继电保护二次回路中的应用[J]. 光源与照明, 2025, (03): 108–110.
- [6] 祁立. 继电保护二次回路可视化技术在智能变电站中的应用研究[J]. 自动化应用, 2024, 65(S2): 65–67.
- [7] 陈超. 智能变电站继电保护二次回路的运行状态监测技术探讨[J]. 电力设备管理, 2024, (23): 39–41.
- [8] 吴凡. 智能变电站继电保护二次回路检修方法研究[J]. 自动化应用, 2024, 65(17): 192–194+197.