

Reliability Improvement of Distribution Automation in the Context of the New Power System

Wenjie Xia

State Grid Jiangling County Power Supply Company, Jingzhou, Hubei, 434100, China

Abstract

With the development of new power systems, massive integration of distributed renewables, energy storage and electric vehicles increases operational uncertainty in distribution networks and complicates fault characteristics, while also intensifying dependence on communication systems. This paper analyzes key reliability weaknesses in field devices, communications, system coordination, data/algorithms and cybersecurity. A set of improvement methods is proposed, including device hardening, communication redundancy and graceful degradation, coordinated master-edge-terminal architecture with disaster recovery, model-and-data fusion for fault diagnosis and self-healing, and security-by-design protection. An implementation roadmap and a metric-based evaluation framework are also provided to support higher self-healing capability and supply reliability.

Keywords

new power system; distribution automation; reliability improvement; self-healing; communication redundancy; cybersecurity

新型电力系统背景下配电自动化的可靠性提升

夏文杰

国网江陵县供电公司, 中国 · 湖北 荆州 434100

摘 要

在新型电力系统建设背景下, 分布式新能源、储能与电动汽车等广泛接入使配电网运行不确定性增强, 故障特征与通信依赖发生显著变化, 配电自动化可靠性面临新挑战。本文分析了设备、通信、系统协同、数据算法及网络安全等薄弱环节, 提出从终端与一次设备加固、通信冗余与降级保障、主站—边缘—终端协同容灾、模型与数据融合的故障研判与自愈策略、以及安全防护体系建设等方面的可靠性提升方法, 并给出分阶段实施路径与指标化评价体系, 为提升配电网自愈能力与供电可靠性提供参考。

关键词

新型电力系统; 配电自动化; 可靠性提升; 故障自愈; 通信冗余; 网络安全

1 引言

随着“双碳”目标推进与新型电力系统建设加速, 配电网承载了分布式新能源、储能、电动汽车及多元负荷的集中接入, 运行形态由传统单向供电逐步转向源网荷储协同与潮流双向流动。与此同时, 用户对供电连续性与电能质量的要求不断提高, 使得配电侧的故障处置速度、恢复能力与抗扰动能力成为提升系统韧性的关键环节。在此背景下, 配电自动化作为实现配电网“可观、可测、可控”的重要技术手段, 其可靠性水平直接影响故障定位、隔离与供电恢复效果, 是保障新型电力系统安全稳定运行的重要支撑。

配电自动化通常由主站系统、通信网络与现场终端(如 FTU/DTU/TTU 等)构成, 具备运行监视、遥测遥信、故障

检测与隔离、自动化恢复等功能, 可显著缩短停电时间、减少停电范围。然而在新型电力系统条件下, 新能源波动性、通信依赖增强、数据量激增及网络安全风险上升, 可能导致终端失效、链路中断、策略失准等问题, 进而降低自动化动作成功率与系统可用性。因此, 研究面向新型电力系统的配电自动化可靠性提升方法, 具有明显的工程价值与现实意义。

2 新型电力系统对配电自动化可靠性的影响与挑战

新型电力系统以高比例新能源为显著特征, 配电网从传统“单电源—辐射式供电”的末端环节, 逐步演变为分布式电源、储能与柔性负荷广泛参与的综合能量枢纽。大量分布式光伏、风电以及电动汽车充放电行为具有随机性与波动性, 使配电网运行状态更易频繁变化, 潮流呈现双向流动、局部电压越限和反向功率等现象增多。运行特性的不确定性

【作者简介】夏文杰(1983—), 男, 中国湖北江陵人, 本科, 助理工程师, 从事电力营销、配电自动化研究。

增加，会削弱基于固定阈值或典型工况假设的自动化策略适用性，导致故障判断、区段划分与恢复方案在复杂场景下出现偏差，进而影响配电自动化动作的准确性与成功率。

在故障机理层面，高渗透率电力电子设备改变了传统短路电流特征，故障电流幅值可能受限、波形畸变明显，分布式电源还可能引入故障反送电，造成故障方向与保护配合关系复杂化。由此，依赖电流幅值、方向判别的故障检测与隔离逻辑面临“看不清、判不准”的风险，容易出现故障定位困难、误隔离或拒动等问题，延长故障处理时间并扩大停电范围。

配电自动化对通信与数据的依赖显著增强也是重要挑战。一方面，终端数量快速增长、业务类型多样（遥测、遥信、控制、视频等），对链路时延、抖动与带宽提出更高要求；另一方面，复杂环境下无线链路易受遮挡、干扰或拥塞影响，光纤链路亦存在施工破坏等风险。通信中断或质量下降会直接导致主站无法获取关键状态量、控制命令无法下发，从而降低馈线自动化（如 FLISR）执行的及时性与可靠性。

系统结构层面，配电自动化逐渐呈现“主站—边缘—终端”协同形态，虽可提升就地响应能力，但也引入了更多节点与接口，形成新的单点故障与联动风险。例如主站平台故障、边缘节点资源不足、软件升级不一致或配置错误，都可能引起业务中断或策略失效。此外，多系统融合（调度、计量、分布式电源管理等）带来数据模型、时标与接口标准不统一问题，影响数据一致性与可用性。

最后，网络安全风险在配电侧更加突出。终端广泛分布、维护条件差，若身份认证、访问控制或补丁管理不足，易成为攻击入口；一旦遭受恶意入侵或数据篡改，可能引发误动作、拒动甚至大范围停电。综上，新型电力系统背景下配电自动化可靠性面临设备、通信、算法与安全多维挑战，需要从薄弱环节入手开展系统性改进。

3 配电自动化可靠性提升的关键技术与方法

面向新型电力系统运行不确定性增强、故障特征复杂化及通信依赖加深等问题，配电自动化可靠性提升应遵循“分层加固、冗余容错、快速自愈、持续运维、安全可控”的总体思路，从设备层、通信层、系统层、数据与算法层及安全防护层协同发力。设备层：提升终端与一次设备的可用性与可维护性：配电自动化现场终端（FTU/DTU/TTU 等）是可靠性的第一道关口。可通过关键元器件选型与加固设计提高环境适应性（耐高低温、抗潮湿、抗电磁干扰、雷击浪涌防护），并引入冗余与容错机制（双电源、关键模块热备/冷备）。同时建立终端自检与健康度评估功能，覆盖采样异常、通信异常、时钟漂移、存储/CPU 过载等典型故障，实现“异常告警—远程诊断—快速复位/替换”的闭环。对开关、互感器等一次设备，可结合在线监测（温度、局放、机械特性）与预测性维护降低误动、拒动和开关失灵概率。

通信层：保障关键业务“可达、可控、可降级”：通信可靠性直接决定自动化动作是否“看得到、控得住”。一是构建双链路或多通道备份（如光纤+无线/专网+公网应急），对故障定位、隔离与恢复等关键控制业务设置更高优先级与带宽保障，必要时支持本地直控通道。二是建立通信质量监测与自愈机制，对时延、丢包、抖动进行在线评估与告警，并通过链路切换、路由重选、业务降采样/压缩等方式实现“降级可用”。三是统一通信规约与时间同步策略，减少多厂家、多协议带来的联调成本和数据不一致。系统层：主站—边缘—终端协同与容灾体系：在系统架构上，建议采用“集中决策+边缘快速响应”的协同模式：主站负责全局拓扑、策略生成与资源协调，边缘节点承担就地故障研判、快速隔离与分段恢复（如 FLISR 的本地闭环），在通信不稳定时仍可维持基本自愈能力。为避免单点失效，应配置主站双机热备/异地容灾、数据库与历史数据备份、关键服务微服务化与弹性伸缩，并完善配置管理与版本一致性校验，降低升级与参数误配引发的系统性风险。对于分布式电源接入区域，应强化与保护、无功电压控制、DMS/DERMS 等系统的协同逻辑，确保故障后解列、重合闸、转供恢复等流程一致可控。数据与算法层：从“规则驱动”走向“自适应与校核”：针对短路电流受限、反送电等新特征，可采用“模型+数据”融合策略提升故障识别鲁棒性：利用拓扑辨识与状态估计修正遥测误差与缺失数据；引入异常检测识别量测突变、终端离线与数据篡改迹象；对故障选线、区段定位与恢复方案，可由固定阈值逻辑升级为自适应整定与多源信息校核（电流/电压暂态特征、开关状态、分布式电源出力等联合判据）。同时建立策略仿真验证与在线回放机制，确保算法更新可验证、可追溯、可回滚。安全防护：把网络安全纳入“可靠性”范畴统一设计：可靠性提升必须与安全防护同步推进。应落实终端身份认证与最小权限访问控制，关键指令采用加密与完整性校验；对主站、边缘节点建立日志审计与异常行为检测；强化补丁与资产管理，避免“带病运行”；关键业务网络建议分区隔离，设置白名单通信策略，降低横向扩散风险。通过“安全基线+持续监测+应急处置预案”，将安全事件对供电可靠性的影响降至最低。

以上多层措施相互支撑：设备与通信决定“基础可用”，系统架构决定“故障不扩散”，算法与数据决定“判断与动作正确”，安全防护决定“长期稳定可控”，共同构成面向新型电力系统的配电自动化可靠性提升路径。

4 可靠性提升的实施路径与评价体系

配电自动化可靠性提升不仅是技术堆叠，更需要形成“规划—建设—验证—运维—持续改进”的工程化闭环。为兼顾投资效率与实际效果，建议以分阶段实施路径为主线，以量化评价体系为抓手，将可靠性目标落实到设备、通信、系统与运维全过程。

实施路径: 从试点到规模化的分层推进: 规划设计阶段: 围绕供电可靠性目标与典型故障场景, 开展配电网现状评估与薄弱环节识别, 明确关键馈线、重要用户与高渗透率分布式电源区域的优先级; 同步确定终端配置原则、通信冗余方案、主站/边缘协同架构与安全防护边界, 形成可落地的技术路线与投资测算。试点验证阶段: 选择代表性区域(如分布式光伏集中区、城市核心区、工业园区)开展试点, 重点验证故障检测与定位准确性、隔离恢复时效、通信降级可用性以及终端自检与远程维护能力, 形成可复制的参数模板、流程规范与运维手册。分阶段推广阶段: 按照“关键线路先行—主干带动支线—区域滚动迭代”的方式推广, 优先覆盖对停电敏感的负荷与故障高发区; 同时建立统一的资产编码、模型数据标准与接口规范, 避免规模化建设后出现数据割裂与重复改造。运维闭环优化阶段: 将可靠性指标纳入日常考核, 基于故障与告警数据开展根因分析(终端故障、通信质量、策略失准、配置差错等), 通过参数整定、补强改造与策略迭代持续提升自动化有效性。

运维机制: 在线监测与预测性维护并重: 可靠性提升最终落到运维能力。建议建立“三类监测+两类维护”机制: 在线监测: 终端在线率、通信链路可用率、关键业务时延/丢包、主站与边缘资源占用、策略执行日志等, 形成可视化看板与趋势分析。缺陷管理: 将告警分级(一般/重要/紧急), 建立工单闭环, 做到“发现—定位—处置—复盘”可追溯。预测性维护: 结合开关动作次数、温升、局放、通信误码率等健康指标, 提前安排检修或更换, 减少突发失效。版本与配置治理: 对终端程序、主站策略库、边缘应用版本实行统一发布与回滚机制, 设置配置校验与变更审批, 降低人为误操作引起的系统性风险。

评价指标体系: 从“供电结果”到“自动化能力”的量化考核: 评价指标应同时覆盖用户侧结果、过程能力与支撑能力, 建议分三层设置: 供电可靠性结果指标: 停电频率与停电时间类指标(如用户平均停电时间、停电次数等), 以及关键用户供电保障水平; 也可补充故障影响范围(停电用户数、停电负荷)。故障处置过程指标: 故障定位时间、

隔离时间、转供/恢复时间; FLISR 自动化动作成功率、重合闸成功率、误动/拒动率等。支撑能力指标: 终端在线率与健康度达标率、通信可用率与关键业务时延达标率、主站/边缘平台可用率(SLA)、数据完整率与一致性、策略库覆盖率及更新合规率等。对安全维度可增加安全事件数、异常访问拦截率、补丁及时率等“可靠性相关安全指标”。

通过上述实施路径与评价体系, 可将可靠性提升从“经验驱动”转变为“数据驱动、闭环改进”, 实现配电网自动化在新型电力系统条件下的持续稳定运行与可衡量增益。

5 结语

在新型电力系统建设背景下, 配电网运行形态呈现源网荷储高度耦合、潮流双向与波动性增强等特点, 传统以固定阈值与单一信息源为主的配电网自动化模式面临适用性下降与可靠性风险上升。本文围绕“可靠性提升”这一核心目标, 系统分析了分布式电源广泛接入、故障特征变化、通信依赖增强以及网络安全风险扩大的主要挑战, 并提出从设备层、通信层、系统层、数据与算法层及安全防护层协同提升的技术思路。总体来看, 可靠性提升的关键在于: 夯实终端与一次设备的可用性基础, 构建具备冗余与降级能力的通信保障体系, 形成主站—边缘—终端协同的容灾架构, 并通过模型与数据融合提高故障研判与自愈策略的准确性, 同时将网络安全纳入可靠性体系统一设计与治理。

参考文献

1. 艾灿, 刘会家. 考虑多场景下自动化设备故障的主动配电网可靠性评估[J]. 现代电力, 2024, 41(3): 412-420.
2. 刘健, 张志华, 张小庆, 郑剑敏. 继电保护与配电网自动化配合的配电网故障处理[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(16): 53-57, 113.
3. 王宝华, 许贵东. 配电网馈线自动化故障恢复系统探讨[J]. 电力自动化设备, 2001, 21(10): 23-26.
4. 徐丙垠. 馈线自动化技术[J]. 电网技术, 1998, 22(3): 54-60.
5. 林功平. 配电网馈线自动化技术及其应用[J]. 电力系统自动化, 1998, 22(4): 64-68.