配电网自动化中馈线自动化终端（FTU）的部署策略

段银环　摆新斌　史亚东
国网昌吉供电公司　新疆　昌吉　831100

摘　要：馈线自动化终端（Feeder Terminal Unit, FTU）作为配电网自动化系统的核心感知与执行单元，其科学、高效的部署策略直接决定了整个配电系统的智能化水平、供电可靠性及综合经济效益。本文旨在系统性地探讨FTU部署的关键考量因素与具体策略。首先，文章阐述了FTU在配电网自动化架构中的功能定位与技术内涵；其次，深入剖析了影响部署决策的核心要素，包括网络拓扑结构、负荷特性、通信网络规划、环境适应性及全生命周期成本等；进而，提出了分层级、分区域、分阶段的具体部署策略，并详细论述了不同馈线自动化模式下的FTU配置要点；最后，展望了在人工智能与数字孪生等新兴技术驱动下，FTU部署策略向动态化、自适应化演进的未来发展趋势。本研究为配电网规划与建设提供了理论参考和决策支持。

关键词：配电网自动化；馈线自动化终端（FTU）；部署策略；可靠性

引言

社会经济与人民生活水平提升，用户对电能质量和供电可靠性要求更高。“双碳”目标下，新型负荷大规模接入，传统配电网向复杂有源网络转型，给运行、控制与管理带来挑战。在此背景下，配电网自动化是建设智能电网的关键，成为核心环节。馈线自动化终端（FTU）是部署在10kV配电网馈线关键节点的智能设备，被称为配电网“神经末梢”，集多种功能于一体，可实现故障“自愈”。但FTU大规模部署，初期投资与后期运维成本巨大，“一刀切”全覆盖会给电网企业带来财务负担，部署不足又难以满足供电需求、发挥系统效益。所以，制定一套科学、精准且兼顾技术与经济的FTU部署策略，是当前配电网规划的关键问题。

1 FTU的功能定位与技术内涵

在典型的分层分布式配电网自动化系统架构中，FTU处于最底层的现场设备层，向上通过通信网络与配电子站或配电主站相连，向下直接监控一次设备（如柱上断路器、负荷开关）。其核心功能可概括为以下几个方面：

1.1 数据采集与状态监测

FTU通过高精度互感器持续采集其所在线路的电压、电流、有功功率、无功功率、功率因数等电气量，并实时监测与其相连开关的位置状态（合/分闸）、储能状态以及SF6气体压力等非电量信息。这些海量、实时的数据构成了配电网运行状态全景感知的基础。

1.2 故障检测与处理

这是FTU最核心的价值所在。当线路发生短路或接地故障时，FTU能够基于本地采集的电流突变量、零序电流等特征量，结合预设的过流、速断、零序等保护定值，迅速判断故障的发生[1]。在集中式FA模式下，FTU将故障信息上传至主站，由主站进行全局拓扑分析后下发遥控命令；在分布式FA模式下，相邻FTU之间通过高速对等通信（如GOOSE），依据预设的逻辑协同完成故障区段的就地隔离与恢复，响应速度可达毫秒级。

1.3 远程控制与调节

在正常运行状态下，调度人员可通过主站系统远程对FTU所控开关进行分、合闸操作，实现网络重构、负荷转供、计划检修等功能，极大地提升了配电网的灵活调控能力。

1.4 通信与数据交互

FTU是配电网通信网络的关键节点。它需要支持多种通信规约（如IEC 60870-5-101/104、DNP3.0，以及面向未来的IEC 61850），并与上行通信介质（光纤、无线公网/专网、电力载波等）无缝对接，确保数据传输的实时性、可靠性与安全性。

从技术内涵上看，现代FTU已不仅是简单的数据采集器，而是高度集成的嵌入式工业计算机。其设计必须满足严苛的工业环境要求，包括宽温域工作（通常为-40℃至+75℃）、高等级的电磁兼容性（EMC Level 4及以上）、防潮防腐蚀能力以及长达十年以上的使用寿命。这些特性共同保障了FTU在复杂多变的户外环境中长期、稳定、可靠地运行。

2 FTU 部署策略的核心影响因素

2.1 网络拓扑与结构特征

配电网的物理连接方式是部署决策的基石。对于辐射状网络，FTU 应优先部署在主干线的分段点和重要分支线的首端，以最大化隔离故障的影响范围。对于环网或网格化结构，联络开关处的 FTU 部署则至关重要，它是实现负荷灵活转供、提升供电可靠性的关键。此外，线路长度、分段数量、开关类型（断路器或负荷开关）等也直接影响 FTU 的配置数量与功能选型（“二遥”或“三遥”）。

2.2 负荷重要性与分布特性

不同区域的负荷对供电可靠性的敏感度差异巨大。城市核心区、医院、数据中心等一级负荷区域，其停电损失远高于普通居民区。因此，在 FTU 部署规划中，必须引入负荷重要度权重，优先保障高价值负荷的供电连续性。同时，负荷的密度与分布也决定了单位 FTU 所能覆盖的有效服务范围。

2.3 通信网络的规划与制约

“无通信，不自动化”。FTU 效能的发挥高度依赖于稳定、可靠的通信网络。在部署 FTU 之前，必须同步规划其通信接入方案。光纤通信带宽大、抗干扰强，但建设成本高昂，适用于主干道或重要区域；无线公网（如 4G/5G）部署灵活、成本较低，但存在信号盲区和安全风险；电力线载波则受限于线路噪声和阻抗变化[2]。FTU 的最终部署位置往往需要在理想电气位置与可行通信接入点之间寻求折衷。

2.4 环境适应性与安装条件

FTU 多安装于户外电线杆或台架上，需直面日晒、雨淋、风沙、盐雾、极端高低温以及强电磁干扰等恶劣环境。部署策略必须充分评估目标区域的气候地理条件，选择满足相应防护等级（IP65 及以上）和 EMC 标准的设备型号。此外，老旧城区普遍存在杆塔空间不足、通道资源紧张等问题，这也对 FTU 的小型化、集成化设计及其安装可行性提出了挑战。

2.5 全生命周期成本（LCC）考量

FTU 部署的经济性评价不能仅着眼于采购和安装的初始投资（CAPEX），更应纳入其在整个寿命周期内的运行维护成本（OPEX）、故障停电损失成本以及退役处置成本。全生命周期成本（Life Cycle Cost, LCC）模型能够提供一个更全面、长远的经济视角，帮助决策者识别出综合效益最优而非初始价格最低的部署方案。

3 配电网自动化中馈线自动化终端（FTU）的部署策略

3.1 分层级部署策略

该策略根据配电网的层级结构，差异化地配置 FTU。（1）主干线层级：主干线是配电网的“主动脉”，承载着绝大部分负荷。在此层级，应采用高可靠性的“三遥”（遥测、遥信、遥控）FTU 进行全覆盖或高密度部署。重点部署在主干线的首端、末端以及所有具备分段功能的开关处。这确保了主干线任何区段发生故障时，都能被快速、精确地隔离。（2）次级分支线层级：对于直接从主干线 T 接出来的、长度较长或负荷较重的次级分支线，应在分支线首端部署“三遥”或“二遥”（遥测、遥信）FTU。这可以有效防止分支线故障蔓延至主干线，造成更大范围的停电。（3）末端用户支线层级：对于直接服务于用户的末端支线，通常不部署 FTU，而是通过其他手段（如智能电表的失压上报）进行故障感知。但对于服务于重要用户的专线，则应视情况部署简易型 FTU 或故障指示器。

3.2 分区域部署策略

该策略依据供电区域的性质和可靠性要求，实施差异化部署。（1）A+、A 类高可靠性区域（如城市核心区、CBD）：在此类区域，应追求“分钟级”甚至“秒级”的自愈能力。部署策略应以分布式智能 FA 为主，要求所有关键开关（包括分段和联络）均配备支持高速对等通信的“三遥”FTU，并形成手拉手环网或网格化结构，实现 N-1 甚至 N-2 的供电保障[3]。（2）B、C 类一般可靠性区域（如普通城区、郊区）：此类区域可采用集中式 FA 与就地式 FA 相结合的模式。主干线关键分段点和联络点部署“三遥”FTU，其余部分可部署成本更低的“二遥”FTU 或故障指示器，由主站进行半自动或全自动的故障处理。（3）D、E 类低可靠性区域（如农村、偏远地区）：考虑到成本效益，应以就地式 FA 为主。可在主干线长线路的适当位置部署具备基本保护和故障指示功能的 FTU 或智能断路器，实现故障的就地切除，缩小停电范围。通信方式可优先选用无线公网等低成本方案。

3.3 分阶段部署策略

考虑到资金限制和技术演进，FTU 部署应遵循循序渐进的原则。（1）第一阶段（基础感知层）：优先在所有柱上开关处部署“二遥”FTU 或智能故障指示器，解决“看不见、摸不着”的问题，实现故障区段的快速定位，大幅缩短巡线时间。（2）第二阶段（局部自

愈层）：在主干线、重要分支线以及关键联络线上，将“二遥”设备升级为“三遥”FTU，并配套建设可靠的通信网络，实现重点区域的故障自动隔离与恢复。（3）第三阶段（全面智能层）：随着技术成熟和成本下降，逐步扩大“三遥”FTU 的覆盖范围，深化分布式智能 FA 的应用，并与高级应用（如电压无功优化、分布式能源协调控制）深度融合，实现配电网的全面智能化。

3.4 不同 FA 模式下的 FTU 配置要点

FTU 的部署细节还需紧密结合所采用的馈线自动化模式。（1）集中式 FA 模式：对主站依赖性强，要求 FTU 具备稳定的上行通信能力，能准确上报故障信息（SOE）。FTU 本身无需复杂的逻辑处理能力，但对通信的实时性和可靠性要求极高。部署时需确保通信链路冗余。（2）分布式 FA（智能分布式）模式：对 FTU 的本地计算能力和横向通信能力要求高。相邻 FTU 之间必须能通过光纤或高速无线专网进行点对点通信，交换电流、开关状态等信息，并内置协同控制逻辑。部署时需成组、成片地考虑，确保逻辑配合关系的完整性[4]。（3）就地式 FA（电压-时间型/电流计数型）模式：FTU（或智能开关控制器）根据预设的电压失压/复位延时或过流次数来动作，无需通信。部署策略相对简单，但自愈逻辑固化，灵活性差，且可能产生多次重合闸冲击。适用于通信条件极差的区域。

4 未来发展趋势：迈向智能与自适应部署

一是与数字孪生深度融合。数字孪生构建配电网高保真虚拟镜像，实现物理与信息世界实时交互与闭环优化。未来 FTU 部署规划可在数字孪生体仿真推演，规划人员模拟不同方案在故障场景表现，评估可靠性与经济性，提前筛选最优方案。部署后，FTU 作为物理实体数据入口，持续为数字孪生体提供数据，支撑在线状态评估、故障预测与健康管理等高级应用。二是人工智能驱动动态优化。传统部署策略多为静态规划，但配电网运行状态动态变化，负荷增长等因素会改变最优部署点。借助人工智能的机器学习和强化学习，可构建自我学习、演进的动态部署优化引擎，基于海量历史与实时数据，持续评估现有 FTU 配置有效性，必要时提出增补、迁移或功能升级建议，实现部署策略自适应优化。三是边缘智能与云边协同。未来 FTU 不仅是数据采集转发者，更是具强大边缘计算能力的智能节点，集成轻量化 AI 模型可实现故障波形就地智能诊断等，减轻主站计算负担、提升响应速度。云边协同架构使复杂全局优化任务在云端完成，实时本地控制决策在边缘侧执行，形成高效敏捷的智能部署与运行体系。

5 结语

馈线自动化终端（FTU）的部署策略是配电网自动化建设成败的关键。本文系统论述了 FTU 的功能定位，深入剖析了影响其部署决策的网络拓扑、负荷特性、通信规划、环境适应性及全生命周期成本等核心因素。在此基础上，提出了分层级、分区域、分阶段的具体部署策略，并详细论述了不同馈线自动化模式下的 FTU 配置要点。这套策略体系兼顾了技术可行性与经济合理性，具有较强的工程指导价值。展望未来，FTU 的部署将不再是孤立的、静态的工程行为，而是在数字孪生平台支撑下，由人工智能驱动的、动态演进的智能决策过程。通过深度融合新兴信息技术，未来的 FTU 部署策略将更加精准、高效、自适应，为构建安全、可靠、绿色、高效的现代智能配电网提供坚实的技术基石。

参考文献

[1] 梅林. 配电网自动化中实现馈线自动化的方法分析 [C]//中国电力设备管理协会. 全国绿色数智电力设备技术创新成果展示会论文集（三）. 国网湖北省电力有限公司黄冈供电公司;,2024:169-171.

[2] 陈利忠. 配电网馈线自动化终端系统的设计 [J]. 自动化应用,2024,65(05):218-220.

[3] 张文杰, 尹若峣, 张帆, 等. 馈线自动化终端 FTU 电源管理装置的研制 [J]. 机电信息,2024,(18):5-8.

[4] 刘安芷, 付宇, 肖小兵. 双模通信配电网自动化馈线终端的设计与实现 [J]. 微型电脑应用,2024,40(12):123-126.