

5G 通信技术在配网配电自动化实时数据传输中的应用及优化策略

马 雷

国网舟山供电公司 浙江舟山 316000

摘 要: 深化配电自动化系统建设,对配电自动化实时数据传输提出了较高的时延、可靠性和连接规模要求。5G 通信以其低时延高可靠、大规模连接和网络切片等特性被认为是破解传统通信技术瓶颈的关键。本文就 5G 技术应用于配电自动化中主要的应用场景、重点技术手段等进行了全面介绍,提出了采用动态资源配置及网络拓扑优化等手段保障数据传输的需求。
关键词: 5G 通信;配网自动化;实时数据传输;网络切片;RedCap 技术;资源调度优化

1 5G 在配网自动化实时数据传输中的应用场景

1.1 站所终端 DTU 的 5G/RedCap 接入

站所终端 DTU 的 5G 化改造采用模块化设计架构,依托传统的 DTU 硬件,在其上集成多种通信方式,利用 Mini-PCIe 插槽实现 5G 和 RedCap 模块的即插即用,分离了电力协议处理和无线传输的处理单元,实现了 5GNSA 和 SA 模式的切换。从硬件上,采用工业级强抗干扰设计,并对硬件进行了温度范围扩展、防雷、电磁兼容性改善等,满足配电站所应用现场需求。从软件上,下沉了轻实时操作系统和专用电力协议栈,实现了遥控信号变化动作时间小于 2ms,遥测数据更新周期不大于 100ms。

RedCap 技术降低了设备安装和维护的成本。由于 5G 传统设备相比于采用 RedCapDTU 的技术来说可以减少射频连接步骤和调整基本信号处理单元的计算能力的分配,设备成本可以降低约 42%,并且模块功率从 2.5W 减少到 1.2W,可以利用睡眠激活功能提升至少 60% 的电池寿命。此外,在网络部署上,NSA 模式依托现有 4G 核心网资源,可快速实现 5G 覆盖;SA 模式则通过独立部署 5G 核心网,提供端到端切片隔离能力,满足不同安全等级业务需求。

基于动态切换机制的 NSA/SA 双模组网方案,在 SA 网络侧可以获得端到端的覆盖优势并实现独立组网模式,支持端到端的切片及低延迟的优势;在覆盖不连续区域,切换至 NSA 模式,依靠 4G 锚点小区保障服务连续。在核心网部分部署网络暴露功能,便于开放电力服务和通信网络的功能及统一协调管理。

1.2 毫秒级故障自愈与隔离

基于 5G 网络构建的配网故障自愈系统构建“检测-定位-隔离-恢复”的过程管理循环模式,依靠高可靠性的 uRLLC 切片和边缘计算装置协同,将整个故障处理过程控制在 200ms 内。在出现故障时,将故障电流波形图及开关状态信息实时传送至智能装置,并由边缘站点利用站内故障诊断软件在 50ms 内判断出故障类型及其区段位置,随后形成最优隔离方案并下发。相比传统需要靠中心调度台统一裁决的方式,极大缩短了时间,反应效率提升 80% 以上。

在故障测距环节采用“终端协同+边缘计算”的分布式架构。采用设备间 5G 直接通信传输故障信息形成多节点的数据校验,定位精度可以控制在 ± 50 米范围,另外在边界站安装了故障检测和测距算法,综合了电阻法和行波法的优势,实现在 10KV 线路上高达 99.7% 的故障检测准确率。

采用分层式恢复策略对停电地区自动恢复供电:先恢复重要负荷,后恢复一般工商业和居民负荷,基于实时负荷信息和网络拓扑关系的边缘节点可以直接生成转供方案,并将开关动作的控制序列 5G 网络上同步下发,实现多个区段的并发恢复。

5G 故障自愈系统相对于光纤方案的经济性以及可操作性更高。在光纤方案下,需建设专门的保护线缆,平均 8 万人民币一公里的光缆成本需要建设专门的光纤线路;5G 的无线技术可以利用现有的公网线路,每个设备端口的改造成本仅为光纤的一半。对于地形复杂的区域,使用 5G 无线技术安装效率远超光纤线缆建设速度,且能够满足突发情况下的连通需求。

1.3 精准负荷控制与分布式能源管理

5G 网络实现了对配电设备负载情况的毫秒级的双向信息互通途径,由“被动响应”向“主动调控”转变。该系统通过 RedCap 终端采集 10kV 配电变压器低压部分主断路器实时负载量,并利用边缘节点上负载预测技术自动产生调制指令,经由 uRLLC 切片发送给智能化负载管理装置,从而实现精确 $\pm 1\text{kW}$ 的电力调整。

5G 通信的可靠实现使分布式光伏并网控制基于“源-网-荷-储”协调控制体系。分布式光伏终端 5G 通信实时上传工作信息至中央计算单元,边缘计算单元根据网压大小主动控制逆变器的无功功率输出,进而使有功功率由功率因素 0.9 超前到 0.9 滞后可以发生灵活变化。当光线强度变化明显时,提前 200ms 进行逆变器输出的变化控制,使逆变器输出波动幅度控制在 $\pm 10\%$ 之内,不使系统出现超过限值的电压。

基于 5G 网络切片虚拟电厂组网,将分布式电源进行整合与优化调度,VPP 聚合商利用 mMTC 切片连接了数以千计的分布式能源聚合商,在监控总调节能力的基础上,在执行电力系统调度指令时进行功率的控制。基于 5G 网络的大范围覆盖,可将负荷控制范围延伸至最终用户侧智能终端,采用 RedCap 技术的智能空调、热水器等动态负荷通过加入需求响应计划参与进来,在负荷高峰期接受控载指令,并自动调整自身运行工况。

2 实时数据传输优化策略研究

2.1 动态资源调度算法应用

动态资源调度是加快 5G 配电网络自动化数据传播效率的关键,通过智能分配无线资源实现频谱效率与传输时延的动态平衡。传统的优化算法贪心算法“一次取最优”,在每个调度时刻选择信道质量最优的用户分配资源块,使得其计算复杂度低,能够满足微秒级别的调度需求。遗传算法通过模拟生命进化机制进行全局优化,将资源分配问题编码为染色体,经过选择、交叉、变异等方法求得最优结果。对于这个分布式配电网模型,算法可以同时优化延时、稳定、带宽等多种因素的指标,在 200 个用户同时接入时,网络的带宽比贪心策略提高了 22%,但是计算难度也同时增加了许多,调度时间需 8ms,更加适用与非实时的服务优化。改良遗传算法中采用自适应交叉和变异概率,收敛速度提高 40%,优化效果较好又满足准实时调度需求。AI 预测性调度模型

融合深度学习与强化学习技术,构建基于 LSTM 的网络状态预测器与 DDPG 的决策控制器。预测器通过分析历史信道质量与业务特征,实现未来 5 个时隙的信道增益预测;控制器根据预测结果动态调整资源分配策略,在保证高优先级业务时延需求的同时,最大化系统吞吐量。资源调度采取分层决策架构,物理层进行资源调度采用贪婪策略,以满足实时性要求;mac 层进行业务优先级调度,采用改进遗传算法调度资源;应用层进行预测性调度,采用人工智能模型进行优化。

2.2 网络拓扑与负载均衡优化

结合 5G 配网自动化应用需求提升覆盖面积和抗破坏性,采用网络拓扑优化方法重新部署基站位置、调整传输路径,形成基于“宏站+微站”双层组网模式,以宏站覆盖所有配网区域为基础,微站覆盖高密点缺口为辅,构建出“全方位覆盖+局部重点覆盖”的立体化网络。通过射线追踪法模拟基站位置、天线方向等优化方法,将配网设备 5G 信号场强增强 12-15dBm,覆盖边缘区信噪比由 10dB 提高到 18dB,解决配网末端设备最后 1 段距离的覆盖问题。动态频谱管理方案是利用服务需求以及信道质量来进行动态的资源分配。该方案将 20MHz 分成一系列的小信道,并用频谱感知的手段不断监视每个小信道的干扰水平,然后将网络服务动态移动到受干扰最小的那一个小信道上。对于例如保护管理这种需要的重要任务我们采用“频谱预先占用”来保证在特殊情况下还能使用这些资源;而对于需要即时监测但不是非常关键的服务则利用智能无线的技术来获取与占用未被使用的频率,从而将其使用效果增加了 45%。

使用图论优化的网络拓扑重构算法,将配电网络仿真成具有权重的无环图,基于 Kruskal 算法找到最小生成树使得传输路径的损耗最小。当系统检测出线路故障后,该系统会自动启动快速修复功能,基于 Dijkstra 算法在 50ms 内完成备用路径切换,切换过程中采用缓存重传机制避免数据丢失。负载均衡优化通过多维参数动态调整实现网络流量均匀分布。建立基于业务量、信道质量、终端类型的综合负载评估模型,当基站负载超过阈值时,启动负载转移机制:通过小区呼吸效应将边缘用户切换至邻区;采用载波聚合技术将高负载小区用户调度至空闲载波;对 RedCap 终端实施半静态调度,减少信令开销。跨域协同调度机制通过核心网级的负载信息共享,实现不同运营商、不同频段网络资源的协同

利用。

网络拓扑与负载均衡优化系统部署智能运维平台,通过数字孪生技术构建网络虚拟映射,实时模拟不同优化策略的实施效果。平台内置拓扑健康度评估模型,从覆盖完整性、链路冗余度、负载均衡度三个维度进行量化评分,自动生成优化方案。

2.3 能效比与传输可靠性提升

通过 RedCap 低功耗技术的多样性优化,切实降低配电网终端设备消耗,物理层采用半持续调度模式,降低对 PDCCH 信道监测产生的功耗损耗;把终端激活期利用率从 100% 下降到 30%;在 MAC 层新增设置非连续接收到周期,并根据应用环境,动态调整终端的睡眠时长,降低终端的工作电压从 200mA 降低到 85mA;采用异构算力结构构建终端硬件,并将实时性管理工作交由 M4 核心处理,数据计算由 A53 核心负责,实现精确算力和功率的配比。URLLC 传输机制通过空口增强与协议优化,保障配网关键业务的传输可靠性。物理层采用正交频分复用与单载波频分多址混合调制,在相同带宽下将信噪比要求降低 3dB;采用跳频传输与交织编码,对抗频率选择性衰落,使无线链路可靠性提升至 99.99%。从协议栈对分组数据汇聚协议的处理过程进行优化,并删除数据重复检查功能,优化后处理延迟由 8ms 降低到 2ms。同时引入超可靠型数据传送,可靠型数据传送方法可以适用于保护控制命令的传输,通过重发请求与前向纠错编码方式实现高可靠传输。

通过多域协同处理的抗干扰技术成功减小了配电网复杂电磁环境对通信的影响。通过智能天线波束赋形的措施实现了空间域优化,使信号至少减小了 25dB 的干扰信号;通过干扰同频同步技术中的基站间协作协调,使其在同一频带内的干扰叠加比例由以前的 30% 降低到 5%;通过引入频域自适应跳频模式,实时监测和识别频谱空白点,需要时进行载波的动态更改,跳跃速率为 500Hz/s。该方法在电网强电磁干扰环境下,即包含大型电力设备环境下,使终端接收信息的质量得到了进一步提升,增益达到 8dB,降低数据丢失比例由原来的 6% 降低到 0.3%,大大增强了通信系统的稳定可靠。为了提高系统的通信可靠性,可设计多维度保障体系:空间上采用双连接技术,即终端同时与主用、备用基站

连接并实现切换;时间上采用数据包副本传送技术,关键指令通过两条独立的信道发送,接收端采用先进先出的原则接收;在协议层,加入网络编码技术,使得多个数据包可以合并传输来提高其抗丢包性能。该保护体系在恶劣天气环境下信号掉包率达 30% 的条件下可以保证 99.99% 以上的通讯可靠性,是常规技术的 10 倍以上。

能效比优化系统部署能源管理平台,对配网终端能耗进行实时监测与智能调度。平台基于终端电池状态、太阳能供电情况、业务优先级动态调整工作模式:当 SOC<20% 时,自动切换至节能模式;当光照充足时,启用太阳能充电优先策略。某偏远地区配网试点显示,该平台可使终端续航时间延长至 18 个月,电池更换成本降低 70%,显著提升系统运维经济性。

结束语:5G 通信技术利用其 uRLLC 特性以及 RedCap 接入方式,可提供一种全新的方式来满足配电系统自动化实时上传数据的需求。与动态资源调度算法以及边缘计算相配合,可将故障处理时间缩短至毫秒级别,且可进一步提升电力分配准确率至 $\pm 1\text{kW}$,且可提高网络利用率至 40%。相较于传统通信技术,实现了突破性改变。

参考文献:

- [1] 杜铭展. 配电自动化系统中无线通信技术应用研究[J]. 中国宽带, 2025, 21 (11): 130-132.
- [2] 张晓春, 张治华. 5G 通信网络中的高效数据传输技术分析与应用[J]. 数字技术与应用, 2025, 43 (07): 75-77.
- [3] 杨柳. 基于 5G 的配电自动化通信网络改造方案研究[J]. 江西通信科技, 2025, (02): 18-21.
- [4] 李欣欣, 张庆收, 王红红. 5G 通信系统中的大容量数据传输技术研究[J]. 电子元器件与信息技术, 2024, 8 (06): 123-125.
- [5] 刘宏伟. 5G 通信技术在配电网建设改造中的应用[J]. 中国宽带, 2024, 20 (03): 58-60.
- [6] 任晓东, 徐敬国. 基于 5G 移动通信技术的电力通信系统研究[J]. 光源与照明, 2023, (11): 69-71.

作者简介: 马雷 (1978—), 男, 汉族, 本科, 浙江慈溪, 技师, 研究方向: 配电自动化