

基于 5G 专网的电力配电网自愈系统设计研究

李枵嵘¹ 王大均^{2*}

1. 四川公众项目咨询管理有限公司; 2. 中国电信股份有限公司资阳分公司

摘 要: 对智能电力配电网业务对 5G 通信网络需求进行分析, 提出基于“5G 网络切片 + 基站共享 +UPF 独享”解决方案, 通过通信运营商的资源整合能力实现 5G 网络技术与电力行业的深度融合, 打造综合性的 5G 智能电网应用探索标杆。随着新型电力系统建设急需加快试点步伐, 5G 网络具有高带宽、低时延、海量连接的特点, 并且具有网络切片的特性, 为 5G 网络承载配网区域保护、配网差动保护提供了可行性。

关键词: 5G; 智能电网; 网络切片; UPF 独享; CPE

在电力配电网领域的传统通信方式使用 4G、无线公网或 WiFi 等技术实现, 无线公网承载能力弱、WiFi 网络时延大等缺点无法满足未来“源网荷储”新型智能电网对通信的需求。5G R16 标准冻结不久, 5G CPE 与模组相于 4G 终端及模组成本更高^[1]。随着 5G CPE 与模组在电力配电网中的推广应用持续促进 5G 芯片规模化生产从而降低芯片成本, 嵌入 5G 模组的智能电表、采集设备、机器人无人机、电力自动化设备等终端将加速研发与发展。

1 电力配电网业务对 5G 通信网络需求分析

根据电力部门相关研究对电力配电网末端典型业务通信需求进行分析, 具体指标如下表 1 所示, 该业务特性为低时延、较高带宽、低并发率, 同时单位面积内终端数较少。为保证电力控制类业务的实时接入需求, 无线网需要对该业务采用动态资源预留策略加 5QI (5G QoS Identifier, 5G QoS 标识符) 参数设置保障业务优先级^[2]。

单小区下该业务的 PRB 动态资源占用率 = $\Sigma(\text{推荐 RB 预留数} \times \text{业务终端数} \times \text{并发率}) / 70\%$ 利用率 / 273, 其中: 综合最低传输速率及可靠性的要求, 单终端推荐对应 RB 预留数为 3。RB 资源预留保障业务

带宽的同时建议 5QI 参数设置为 67 用于业务优先级调度。承载网侧需要通过 FlexE+STN 进行硬切片隔离, 将电力业务做独立的硬切片。同时, 切片内采用 SR+VPN 技术将配网自愈 / 配网区域保护业务与其他业务进行软隔离。差动保护通过物理隔离切片承载, 视频监控业务通过逻辑隔离切片, 实现电网安全分区, 如表 2 所示。

核心网侧需求通过地市专用 UPF (User Plane Function, 用户面功能) 承载, 当地市 UPF 宕机后, 流量切换至省级 UPF 进行承载。虚拟专网与国网业务系统安全接入区之间需要设置防火墙, 通过电力光纤专网与业务系统安全接入区互联。

2 基于 5G 专网的配电网自愈系统设计方案

为满足电力配电网自愈系统对 5G 通信技术的需求, 本文提出基于 5G 网络切片 + 基站共享 +UPF 独享解决方案, 如图 1 所示。为不同安全区的电力业务提供差异化的网络通讯, 实现各个业务区不同的时延、抖动、带宽等要求。实现物理(传输层)+逻辑(核心网)隔离, 不同的业务走不同的安全切片, 提供差异化的服务, 对控制业务提供强安全隔离服务^[3]。电力终端连接电力专用 CPE, 经无线接入网及传输网接入到 5G

表 1 电力配电网典型业务通信指标需求

业务名称	隔离需求	时延	带宽	丢包率	每平方公里连接数	并发率
新型配网保护	强隔离	50ms	5Mbps	10-4	5	20%

表 2 电力配电网硬切片业务设计需求

序号	切片标识	承载电力业务类别	带宽需求	时延	可用性	隔离要求
1	生产控制切片	差动保护、配电自动化。	≥ 2Mbps	≤ 15 ms	99.99%	生产 I 区
2	生产非控制切片	电能质量监测	≥ 100Mbps	≤ 100 ms	99.90%	生产非 II 区
3	管理切片	视频监控、智能化巡检、高级计量等	≥ 300Mbps	≤ 100 ms	99.90%	管理区

作者简介: 李枵嵘 (1969—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为 5G 智慧行业应用及电力工程建设。

通讯作者: 王大均 (1995—), 男, 本科, 工程师, 研究方向为 5G 应用及安全生产。

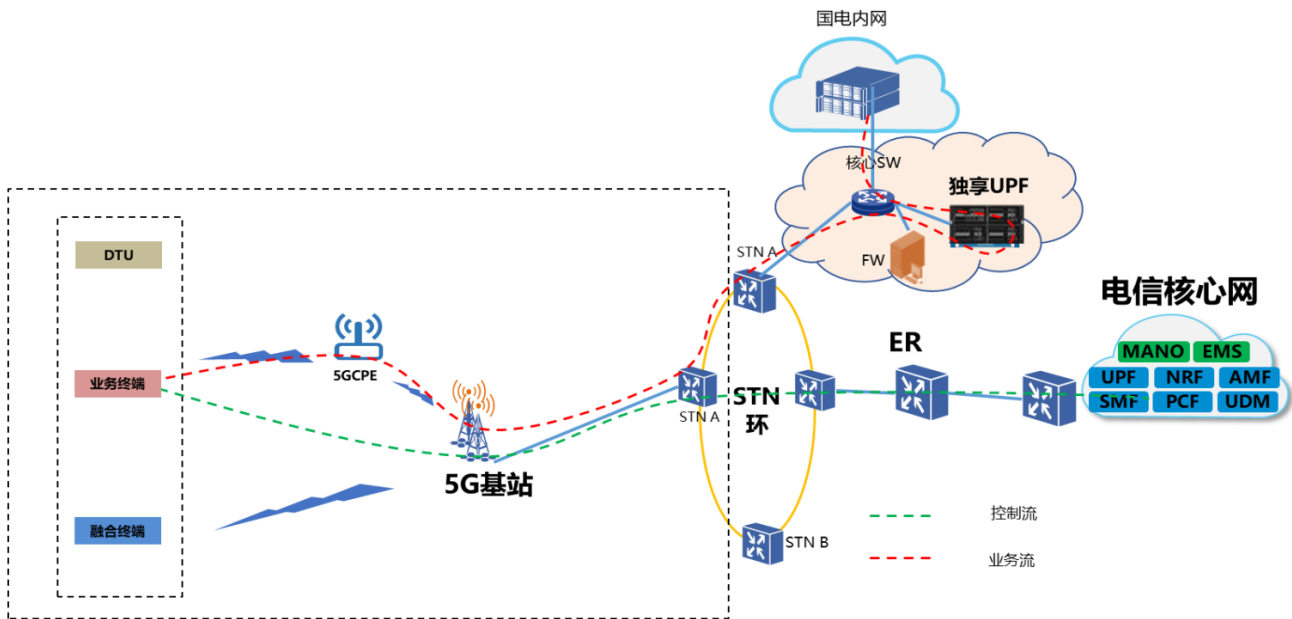


图 1 基于 5G 专网的配电网自愈系统方案图

核心网，再经由核心网接入到电力业务系统。该方案涵盖 5G 新空口、网络切片以及 MEC 等多个新特性，利用 5G 公共网络和电力通信专网融合组网方案，适应电网通信的现状和未来需求。5G 专网采用专用无线室分基站，通过 STN 传输上联到电信 5G ToB 核心网网络，最终通过专线方式连接到国网电力智能化平台。

3 应用案例

某省电力公司通过部署电力专用核心网元下沉 UPF/MEC（（Mobile Edge Computing, 移动边缘计算），并在接入运营商网络前增加加密/解密和鉴权设备等，建立 5G 端到端硬切片通道，实现信息传输通道从有线光缆到无线网络的转变，从而大幅减少项目投资，提高生产效率。新型环网柜 DTU（Data Transfer Unit, 数据转换单元）采用 5G 切片技术传送控制信令将大大减少配网光网络的敷设成本，代替 GPON（Gigabit-Capable PON, 千兆以太网无源光网络）等传统方案，不占用市政管道资源，且随着连接数的增多，5G 接入网所带来的边际效应日益突出，结合 UPF 下沉和 MEC 应用，将极大提高电力生产调度工作的效率。为保障电力业务的高可靠性，专属打造电力 5G 定制化专用网，以保证电力配网相关数据仅能传送至电力内网，本项目验证了通过 5G 的高带宽、低延时、广连接以满足电力通信要求。

3.1 建设方案

针对某城市示范区域进行 5G 无线网络部署，对于本项目中涉及地下室环网柜无信号覆盖的场景，由运营商专门为其新建建设 1 台 BBU、3 台 RHUB、3 台 pRRU 满足 22 个环网柜都通过 5G 独立 SA 组网进行

端到端稳定相互通信，现场无线环境要求参数指标满足 $RSRP > -80\text{dbm}$, $SINR > 15$ 。在承载网部分运营商新建接入专网线路资源用以专网接入，满足终端吞吐量预计为 0.22Gbps，并且考虑到未来 5G 终端需求会逐渐增加，以及满足整体业务需求的弹性，新建 STN-A 设备 4 套，每套配置 2 张 10GE 板卡和 2 张 25GE 板卡。核心网部分由运营商在核心网机房侧为电力划分专用资源池用于搭建电力专网 AMF、SMF 核心网资源，新建 UPF+MEC 下沉部署在电力机房，确保数据安全性，业务数据信令不出园区，同时环网柜数据直接进入 MEC 或内网，缩短传输距离，减少时延。本次采用独立 UPF+MEC，由 2 台交换机、1 台带外交换机，5 台服务器组成。满足环网柜（5G 模组） \leftrightarrow 5G 基站 \leftrightarrow UPF/MEC \leftrightarrow 国电内网平台，时延要求低于 35ms。安全建设部分，运营商主要搭建防火墙用于 5G 侧防火墙、UPF 侧防火墙。本项目采用 UPF、MEC 独立部署，采用外置防火墙实现 MEC 和 UPF 的管理、控制平面完全隔离，只允许 UPF 的数据平面与 MEC 应用互通。

3.2 网络测试结果

3.2.1 配电网差动保护

开关站配置 5G 和光纤双通道纵差保护、母差保护、馈线保护、站用变保护、备自投保护、合环保护等 6 类保护装置，以满足高可靠性配电网接线方式的正常、安全运行要求。当开关站主进 2 路同时故障（N-2）时，通过环网带开关站全部负荷，当上级电源 110 千伏站全停时（环网 4 路全停），通过环网间联络线路带开关站全部负荷。应用基于 5G 通信技术的配电网

差动保护,充分发挥其端到端时延小于 10 毫秒,满足差动保护低延时的技术优势。

3.2.2 配电自动化

本案例依托“一体双核”配电自动化系统,配置差异化自动化策略,支持示范区不同网架和供电可靠性要求下的供电保障。对于纳入环网网架结构的配电设备,采用断路器加“双环网合环”运行模式,配置 5G 和光纤差动保护自愈控制型的自动化,实现线路故障快速隔离,用户供电不受影响。发生上级变电站母线故障,通过环间的联络开关实现非故障区域快速恢复供电。针对未纳入环网网架的配电设备,采用智能分布式 FA (Factory Automation, 工厂自动化),实时依据网架结构,调整优化自动化策略,实现故障隔离时间小于 1S,负荷自动转供。通过与断路器配合,实现故障时变电站出线开关不跳闸。对于丽泽范围内其他区域,网架为架空/混网线路,采用主站集中控制式馈线自动化,实现故障区间准确判定、负荷自动转供和线路快速自愈。

3.2.3 智能监控和数据采集

新建开关站柜内加装局放监测、机械特性、接头测温、电动操作底盘、视频摄像头等一次设备本体监测装置,全部配电设备具备数字化全局状态感知、智能化评估设备健康状态、预测性维护以及运维资产日志等功能,实现设备全生命周期管理。实现智能巡检作业,加装轨道智能机器人及站室环境监测、消防、安防等装置,综合各类数据实时分析站室设备运行情况,实现采集监控、作业现场安全监护联动及无人化巡检。应用一次设备物联网化技术,对断路器分合闸线圈及储能电机曲线进行高密度采集,开展状态监视及在线检修工作,将开关寿命应用最大化。通过柜内状态量的监测及告警,联动智能机器人进行二次检查确认,降低设备抢修成本。强化站端数据分析处理能力,采用视频分析、数据挖掘、智能联控等技术,对多种传感器采集的数据进行联合分析,实现电气、环境、安防、能效等多维度的监控、联动和调控,提升数据区域化、差异化、预测性分析能力。加装自主知识产权的电能质量采集终端,采用基于 5G 虚拟仪器技术实现母线电能质量在线监测,开展实时波形显示、有效值和谐波计算、暂降预警等功能应用,提升电能质量管理水平。

3.2.4 自愈效率分析

利用测试装置对故障配电网系统进行检测之后,

对传统配电网自愈系统方法以及本文智能自愈系统方法的检测结果进行绘图,结果如图 4 所示。试点项目使用电力专用 5G 软切片进行承载,配网自愈运行良好,传动试验正常,带负荷测试正常,采样信号准确。现场进行了故障模拟测试,故障判断准确,跳闸信号正确,机构动作正确。在 200 毫秒内跳开 10kV 旗竹路线出线及分段开关,1 秒内完成联络开关合闸动作,实现秒级恢复供电。

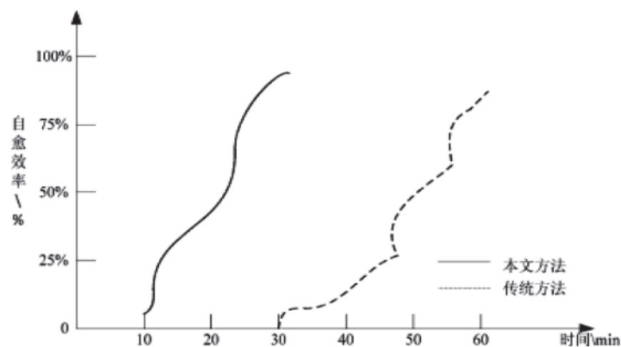


图 2 电力配电网自愈效率分析图

4 结语

2021 年国家电网已开展基于 5G 的配网自动化自愈试点工作,5G+ 配电网自愈系统在故障发生后快速判断故障原因将其隔离,并通过 5G 电力专网,实现秒级恢复供电,最大程度降低故障停电带来的损伤。目前,针对 3500M 频段 5G 系统设备作为 ToC 网络最普遍的频谱,具备规模化生产和组网的能力。未来,配电网 5G 自愈系统将会大规模应用,采用覆盖更广、穿透性更强的 700MHz 频谱 5G 网络进行复杂环境的智能配电网应用。智能电网业务场景众多,传感器种类众多,各个业务各有特色,全面涵盖了 5G 大带宽、低时延高可靠、大连接的场景。5G 终端与模组的应用,将推动电力业务创新,例如在配电网中使用差动保护,进一步提高配网故障定位与隔离能力。电力企业提出自身特色需求,如高精度授时,与 5G 技术结合,5G 终端与模组适配电力需求,促进电力与 5G 融合发展,共同促进智能电网和能源互联网发展。

参考文献:

- [1] 魏金泓. 简谈智能配电网自愈系统的自动化控制 [J]. 大众标准化, 2020(21):187-188.
- [2] 郑海娇. 10kV 配电网自愈系统的应用 [J]. 电子测试, 2021(24):68-70.
- [3] 逯怀东, 王思源, 武刚, 等. 10kV 配电网自愈系统的应用 [J]. 电子测试, 2021(24):1-10.