

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201153

# 基于5G组网的智能分布式配电网保护研究与应用

于洋<sup>1</sup>, 王同文<sup>1</sup>, 谢民<sup>1</sup>, 张代新<sup>2</sup>, 孙伟<sup>3</sup>, 张骏<sup>1</sup>

(1. 国网安徽省电力有限公司, 安徽 合肥 230022; 2. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102;  
3. 合肥工业大学电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:** 为解决分布式电源接入下的多源网络问题, 以及传统配电网阶段式过流保护在整定配合上的难题, 提出配电网保护纵联化、广域化解决方案, 实现多种运行方式下配网相间短路故障的全线速动。利用5G uRLLC高可靠低时延网络技术, 提出了基于5G通信的配电终端自组网、快速对等通信以及组网方案。基于QoS+DNN+UPF专享的端到端网络组网方式, 有效降低了配网保护业务时延, 同时保障了数据传输的安全性。该技术路线已于2019年8月在安徽电网完成了国内首次试点应用, 实践证明, 所提出的方案能有效实现配网故障的精准定位与隔离, 显著提升配网供电可靠性, 具有较好的实用性和推广价值。

**关键词:** 5G; 智能分布式; 配电网保护; 故障隔离; 供电可靠性

## Research and application of intelligent distributed distribution network protection based on a 5G network

YU Yang<sup>1</sup>, WANG Tongwen<sup>1</sup>, XIE Min<sup>1</sup>, ZHANG Daixin<sup>2</sup>, SUN Wei<sup>3</sup>, ZHANG Jun<sup>1</sup>

(1. State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Hefei 230022, China; 2. Nanjing Nanrui Relay Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China; 3. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** There is a problem of a multi-source network being accessed by distributed power sources and a difficulty in setting the coordination of staged over-current protection of a traditional distribution network. A solution for vertical connection and wide-area distribution network protection is proposed to realize the interphase of distribution network full-line quick action for short-circuit faults. Using 5G uRLLC high-reliability and low-latency network technology and a 5G communication power distribution terminal self-organizing network, fast peer-to-peer communication and networking solutions are proposed. Based on the exclusive end-to-end network networking mode of QoS+DNN+UPF, it effectively reduces the delay of the distribution network protection service and ensures the security of data transmission. The technology completed its first domestic pilot application in the Anhui Power Grid in 2019. Practice has proved that the proposed solution can effectively realize the precise location and isolation of distribution network faults, significantly improve the reliability of distribution network power supply, and has good practicability and application value.

This work is supported by the General Project of National Natural Science Foundation of China (No. 51877060) and the Science and Technology Project of State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd. (No. 52120018005C).

**Key words:** 5G; intelligent distributed; distribution network protection; fault isolation; power supply reliability

## 0 引言

随着社会的发展和人民生活水平的提高, 用户对供电可靠性和电能质量的要求越来越高, 作为电力系统中面向终端用户的最终环节, 配电网对供电

质量有直接的影响<sup>[1-2]</sup>。另一方面, 分布式能源(DER)大量接入配电网, 使配电网成为能量双向流动的有源网络, 且DER出力的分散性、间歇性使配电网潮流与电压的波动性增加, 给配电网的保护控制和运行管理带来了新的挑战<sup>[3-8]</sup>。

传统的控制方式包括集中控制和就地控制<sup>[9-12]</sup>, 其中基于主站的集中控制方式可以利用全局信息, 能够获得优化的控制性能, 但其涉及环节多, 使得

基金项目: 国家自然科学基金面上项目资助(51877060); 国网安徽省电力有限公司科技项目资助(52120018005C)

响应速度较慢。就地控制方式应用最广的就是三段式过流保护,只利用装置安装处的信息,易于实现,动作速度快,但是由于其利用的信息有限,控制性能不完善。特别是配网存在许多级联线路,每段线路的距离短、级数多,导致过流保护整定配合困难,往往一条线路某一段故障,却要切掉整条线路,给故障点查找带来不便<sup>[13-15]</sup>。配网保护设备处于电网末端,长期受制于“最后一公里”通信条件制约,大规模部署光纤网络难度极大、成本极高,使得纵联比较技术在配网领域难以施展。配网保护设备运行监视手段缺失,装置自身发生的各类缺陷、告警等无法及时告知运维人员或调度监控人员,保护设备动作情况也无法第一时间远程获取,对配网故障研判及抢修指挥基本无支撑能力,配网保护设备的智能化水平总体较低<sup>[16]</sup>。

以5G技术为代表的无线通信技术的发展,解决了配电网光缆不足、通信条件差等长期面临的制约因素,为配网保护的纵联化应用带来了曙光<sup>[17]</sup>。特别是随着5G R16标准的正式冻结,支持了低时延高可靠的工业级场景,将进一步推动5G的大规模商用,同时也为配电网保护领域提供更为可靠的通信通道。目前在配网领域研究全线快速保护较多的是采用基于5G的差动保护技术,但其存在着依靠外部对时、配网分支节点较多不满足多端差动的条件、通信流量大等问题<sup>[18-19]</sup>。本文将5G技术应用于智能分布式配网保护,提出了配网保护纵联化、广域化解决措施,提升了配网保护动作性能,将故障隔离时间由“分钟级”缩短至“毫秒级”,同时提出了适应于分布式配网保护的5G组网方案,并成功在国内实现了首次试点应用。

## 1 智能分布式配网保护

### 1.1 保护原理

分布式配网保护(或称之为网络拓扑保护),是利用配网保护装置间的横向通信,与同一环网内相邻终端设备进行信息交互,通过比对相邻点保护装置启动、故障方向判断结果等信息,相互传递过流标记、过流方向标记等信号,构成配网纵联保护,从而准确定位故障点,实现区内、区外故障快速定位与隔离,无需考虑配网多级开关的级差配合<sup>[20]</sup>。

保护动作的逻辑分析如下,图1为一条简单的单电源辐射状线路,开关1—开关5均配置分布式配网保护装置,若条件具备,变电站10kV出线开关处也可加装分布式配网保护装置。

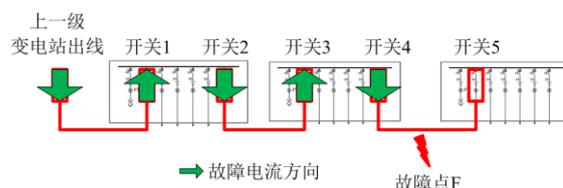


图1 分布式配网保护原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of distributed distribution network protection principle

各配网保护装置与其相邻终端通信,如图1所示,开关2与开关3通信,开关4与开关5通信。保护装置的启动逻辑如下:当自身电流大于过流门槛值,装置启动,并向对侧开关发送启动信号,同时在一个时间窗内(该时间窗可根据通道的最大传输延时自由设置,最大时间窗不超过50ms)持续接收来自对侧装置的启动信号,通过自身启动信号与对侧装置启动信号两者构成或逻辑,最终判断装置是否出口跳闸,从而实现区内、区外故障快速定位与隔离。以F点故障为例,流过开关1、开关2、开关3、开关4的电流大于设定的门槛值,分布式保护装置均启动,开关2向开关3发送启动信号,开关3向开关2发送启动信号,开关4向开关5发送启动信号,因开关5处于故障点下游,未流过故障电流,该保护装置不启动发信,开关2、开关3都收到了对侧发来的启动信号,且自身也启动,因此开关2、开关3保护被闭锁出口;开关4在一个时间窗内未收到开关5发来的启动信号,则判别故障点在区内,保护动作出口跳开开关4;开关5因收到对侧启动信号,且本侧未启动,因此开关5判定故障点在区内,保护动作出口跳开开关5。其动作逻辑如图2所示。

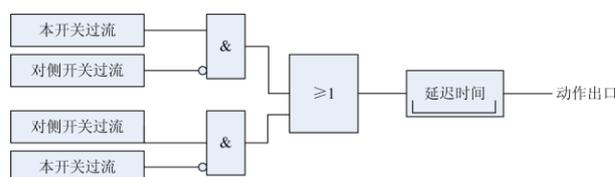


图2 保护动作逻辑框图

Fig. 2 Logic block diagram of protection action

该保护逻辑仅需判断本侧和对侧装置启动情况,采用基于图论、拓扑分析技术,自动实现配网保护的广域化,通过主站下发网络实时拓扑,建立相邻设备间的连接关系,达到快速准确切除和隔离配网故障的目的,因此能够很好地适用于配网结构变换较频繁的地区和配电网<sup>[21]</sup>。若装置内部采用方向元件判断故障电流方向,即可适应于分布式电源接入下的多源配电网,其故障分析见图3。

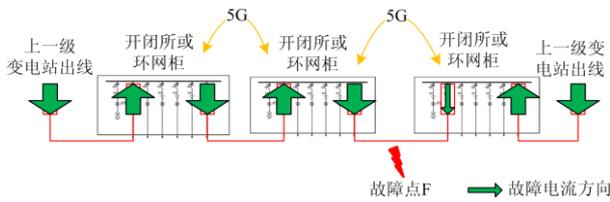


图 3 多源配电网下的分布式保护故障分析

Fig. 3 Fault analysis of distributed protection in multi-source distribution network

若 F 点发生故障，电流方向以流出母线为正，流进母线为负，当线路两侧保护均判别为正方向时，保护出口动作跳闸；线路两侧保护若判别方向不一致则不出口跳闸。其动作逻辑如表 1。

表 1 保护动作逻辑框图(带方向元件)

Table 1 Protection action logic block diagram (with directional element)

开关 1	正方向	反方向
开关 2		
正方向	√	×
反方向	×	—

### 1.2 装置工作流程

智能分布式配网保护是配网保护装置间通过高速通信网络，与同一环网内相邻终端设备进行信息交互，通过比对相邻点信息，实现快速故障定位与隔离。采用基于 GOOSE 的分布式纵联原理时，配电网全线的分段开关均可以配置该保护，保护的过流元件启动值可以按照线路末端短路电流整定，且全线可以整定为相同的定值，时间定值按照网络传输延时整定，光纤 20 ms、5G 为 50 ms 左右，当主干线发生故障时，将由故障点两侧的保护装置横向对等通信，准确隔离故障，同时减小停电范围，提升供电可靠性。

图 4 为装置的工作流程图，智能分布式配网保护不再基于配电主站完成动作策略，仅通过终端之间相互传递保护控制数据实现分布式配电保护控制功能，配电主站仅完成网络拓扑的实时下发，各终端间根据下发的网络拓扑完成网络参数配置、相邻设备间的通信握手，包括协议版本、加密算法及密钥等，建立可靠加密的通信链路。故障发生后，装置若达到启动电流门槛值，装置启动，并向相邻设备发送动作报文，同时接收来自相邻设备的动作报文，根据自身动作信号以及接收的相邻设备动作信号，完成逻辑判断、动作出口，同时将动作信号上传配电主站。

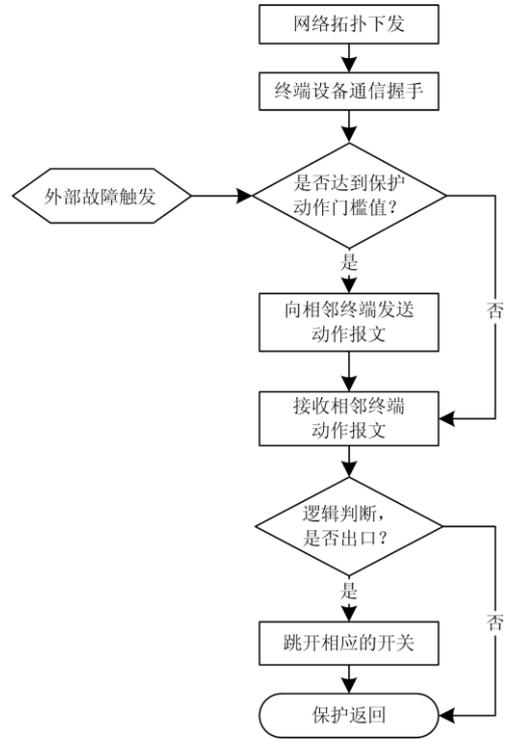


图 4 保护装置工作流程图

Fig. 4 Protection device design flow chart

基于 GOOSE 的分布式纵联技术已经在部分发达地区成功应用，该技术对通信质量要求较高，一般采用光纤通信，但配电网点多面广，光缆建设及运营成本较高，难以覆盖柱上开关等分布式节点，从经济性和运维工作量上，使用光纤承载分布式配网保护业务难以为继。在实际情况中，应用了该技术的城市核心区多为电缆线路，其故障率相对较低，提升相对有限，而光纤未覆盖的市郊或是农网多为架空线路，故障率明显高于电缆线路，因此，更需要采用无线通信来实现分布式纵联技术。

## 2 通信业务需求

### 2.1 带宽需求

分布式配网保护相较于差动保护，其原理不依赖时间同步，装置间互相收发的是 R-GOOSE 报文，即带有 IP 头的 GOOSE 报文，其长度不固定，但一般为 200 字节左右。在线路正常运行时，装置间每 5 s 发送一帧心跳报文，当故障发生时，会产生突变报文，突变报文默认按照 2 ms-2 ms-4 ms-8 ms 的间隔连续发送 4 帧。带宽计算公式为

$$\text{最大带宽(bps)} = \frac{\text{报文长度(Byte)}}{\text{报文间最小间隔(ms)}} \times \text{相邻终端个数} \times 8 \times 1000$$

考虑比较极限的情况,每个终端需同时和自身的4个相邻终端通信,其上/下行最大带宽均为

$$\text{最大带宽(bps)} = \frac{200}{2} \times 4 \times 8 \times 1000 = 3.2 \text{ Mbps}$$

若想降低带宽,可增大突变报文的发送间隔,如改为4 ms-4 ms-8 ms-16 ms,带宽将变为1.6 Mbps,但保护延时需增2 ms,若改为8 ms-8 ms-16 ms-32 ms,带宽将进一步降低为0.8 Mbps,延时相应地增加6 ms,对保护影响并不大。

分布式配网保护的目的是为了快速定位配网开关间的故障,使变电站10 kV开关不动作从而缩小停电范围,而变电站10 kV开关的II段保护(保护主干线路全长)的时间一般为0.3 s,若通信时延大于50 ms,再加上保护自身的计算、处理以及装置继电器出口时间,其最终出口时间将大于100 ms,与变电站保护300 ms的时间级差有竞争风险,所以分布式配网保护对时延的要求是不大于50 ms;考虑到时延抖动会影响保护动作,分布式配网保护对时延抖动的要求是不大于3 ms。

## 2.2 安全需求

终端间的横向对等通信涉及保护控制类业务,属于生产控制大区(I、II区),应采用专用通道承载相应业务,与管理信息大区(III、IV区)业务物理隔离,因此需部署独立的5G私有网络,终端通过各自的5G无线接入设备接入该5G私有网络,网络安全级别较高。而终端无法通过私有网络接入配网主站,各终端需额外配置通信设备,通过5G公网与主站进行通信。为满足网络安全需求,考虑在公共网络上建立虚拟专网,采用双向认证及加密方式实现配电主站与装置间的双向身份鉴别,确保数据机密性和完整性。在配电主站边界安全防护上,通过无线网络接入生产控制大区的装置均通过安全接入区接入配网主站;在装置安全防护上,通过身份认证、运维管控等措施,提高装置的防护水平。配网保护装置与纵向通信网络之间应部署电力专用纵向加密认证装置,采用电力专用加密算法,在装置和配电主站前置机之间建立安全通道,实现基于电力调度数字证书的双向身份认证和数据加密,保证链路通信安全。

## 3 5G 承载网络构架

### 3.1 5G 通信技术

第五代移动通信标准(5G),相对于以往几代移动通信技术,5G主要有三点优势,分别为面向更多的业务场景、更强的网络承载能力以及提供更安全开放的行业专网服务<sup>[22]</sup>。ITU定义了5G的三大应

用场景,增强移动带宽 eMBB,海量机器通信 mMTC,高可靠低时延通信 uRLLC。在电力生产领域,eMBB主要面向电力生产管理系统中的移动应用类场景,如无人机或者机器人定期巡检,高清视频监控,AR/VR辅助维修,以及各种自然灾害保护等工作;mMTC主要面向大量电力基础设施的信息采集类需求,比如管理和状态监控,能耗管理,路灯控制,智能抄表等业务,连接数巨大,时延和带宽要求不高;uRLLC主要面向电力系统生产控制类需求,比如配电分布式自动化,配电网差动保护,分布式电源接入控制等应用,需要达到99.999%的可靠性,时延需求从10 ms到50 ms不等。

### 3.2 5G 组网构架

基于配网保护的通信需求及安全防护要求,本文提出采用QoS+DNN+UPF专享的SA独立组网方式,数据专网能够通过用户面功能(User Plane Function, UPF)的分流、数据网络名称标识(Data Network Name ID, DNN ID)数据区分以及物理数据专网链路等,实现与公用网络的物理、虚拟、计费的区分和隔离,提高电力业务的网络专用型和隔离性,与4G的接入点名称(Access Point Name, APN)专网相比有效提高了电力业务在公网传输的安全性。同时通过UPF的本地数据卸载转发,进一步降低业务的时延,实现专网数据回传且数据不出园区。

UPF可以灵活地部署在从基站附近到中央数据网络的不同位置(见图5)。通过UPF提供流量识别、分流、信息开放、计费、QoS、移动性等基础网络能力,并将内容和业务引入到本地,满足低时延的边缘计算需求。5G基站、UPF N2/N4接口和5G核

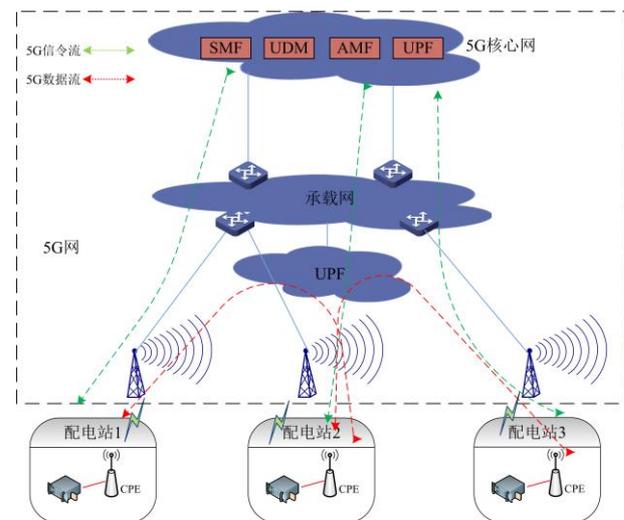


图5 采用UPF方式的通信组网架构

Fig. 5 Communication network architecture using UPF mode

心网采用 IP 承载网专用虚拟专用网络(Virtual Private Network, VPN)承载, 通过软交换网元 CE(Customer Edge)完成 IP 承载网至本地 PTN/SPN 的网络连接。5G SA 基站与本地 UPF 间的 N3 接口采用 PTN/SPN 承载, UPF 接入 5G 核心网通过 IP 专网 5G 网管 VPN 承载。VPN 主要采用隧道技术、加解密技术、密钥管理技术保证数据传输的安全性。

图 6 为采用 5G 独立组网的智能分布式配网保护总体架构。该组网优势如下: 通过 UPF 用户面网元设备的下沉, 实现区域内广域的各类电网数据的

本地分流, 为实时性业务提供更好的时延支持; 针对不同业务场景, 根据不同的网络要求需求切出部分资源给电网, 保证传输层空口带宽独占; 对电网的各类 DTU、FTU 等终端装置定义独立用户 ID 号码, 并单独批量制作独立的 SIM 卡; 基于核心网网关控制和用户数据分离架构, 数据会在 UPF 区域内闭环, 实现数据不出实验区域, 节省 IP 承载网时间, 同时与公网的数据进行物理隔离, 进一步提高数据的安全性。

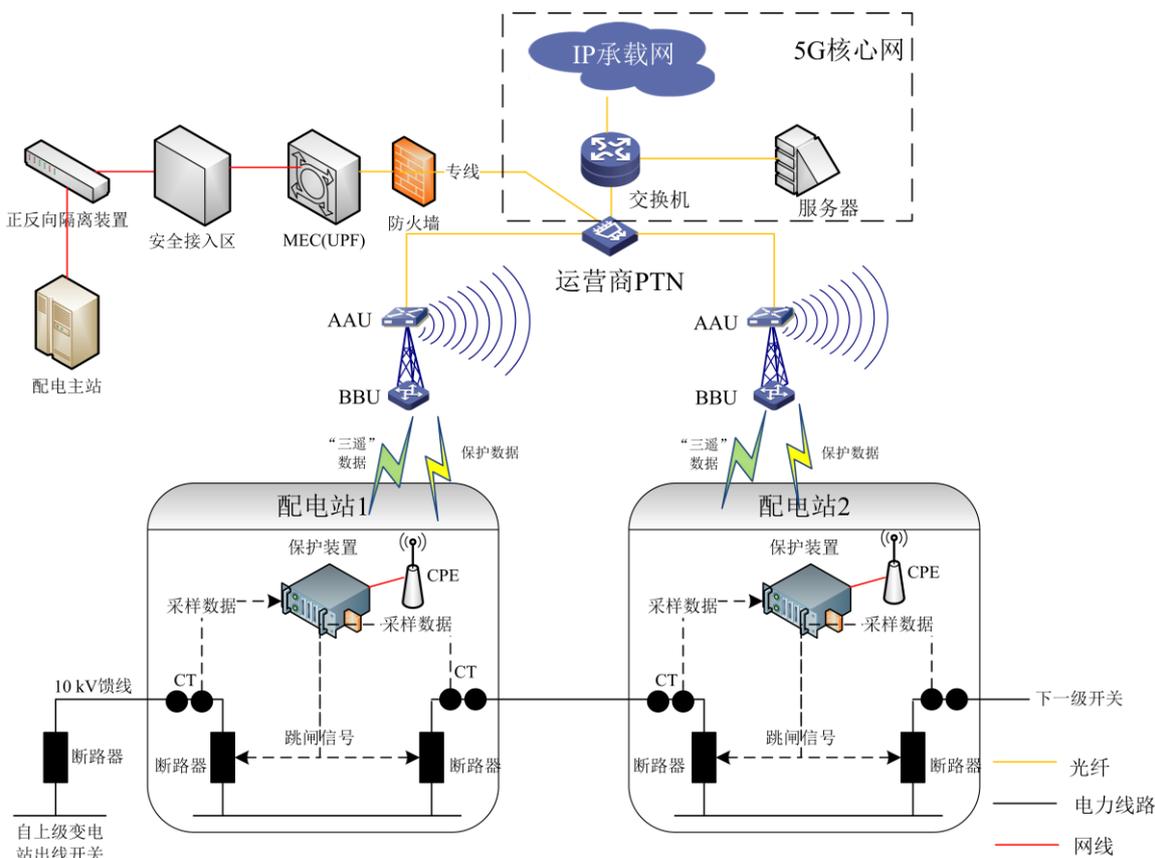


图 6 基于 5G 的智能分布式配网保护总体架构

Fig. 6 Overall architecture of 5G-based intelligent distributed distribution network protection

### 3.3 配网保护改造方案

基于 5G 的智能分布式配网保护技术, 不改变原有的保护装置模式, 外置一台无线通信终端设备, 通过以太网口将保护装置与无线通信终端进行连接, 通过无线信号传输实现保护装置之间的点对点通信, 以完成分布式保护的逻辑。分布式配网保护装置可安装在开闭所、环网柜、柱上开关等位置, 通过电力电缆与间隔电流互感器 CT 连接完成电流采样, 通过控制电缆接入断路器的控制回路, 实现保护动作出口跳闸。保护装置采用网线与客户

终端设备(Customer Premise Equipment, CPE)的 RJ45 网口连接, 采用 R-GOOSE 通信协议。面向对象的变电站事件(Generic Object Oriented Substation Event, GOOSE)是 IEC61850 中定义的一种快速报文传输机制, 用来传输跳合闸信号等信息, 但其基于物理层 MAC 传输, 无法实现跨网段通信, 而 R-GOOSE 报文具备路由功能, 可以在广域系统中交互。由于分布式配网保护对于实时性要求不是特别高, 且报文流量不大, 可通过配置虚拟专用网络 VPN 来实现 R-GOOSE 报文的网络传输, 在保护装

置内完成 VPN 的报文封包。

智能分布式配网保护作为配电线路的主保护, 其装置内部配置有阶段式过流保护做后备保护, 正常运行方式下, 阶段式过流保护按照配网整定级差原则进行整定, 并经分布式配网保护闭锁; 当发生通信中断或主保护功能未投入, 则取消闭锁, 自动投入阶段式过流后备保护, 确保区域内保护仍有选择性。

#### 4 工程应用与测试

基于上述方案, 2019 年在安徽合肥某供电区域完成了国内首个基于 5G 通信的智能分布式配网保护试运行。该试点区域的配电网采用双环网结构设计, 方案改造涉及四个开闭所, 分别为塘金公用所、湖滨#1 总所、文场#1 总所以及中通公用所, 如图 7 所示, 其中西广变 07 开关、京南变 24 开关、山秀变 22 开关和西广变 24 开关均为变电站站内 20 kV 出线开关, 代表四路电源。

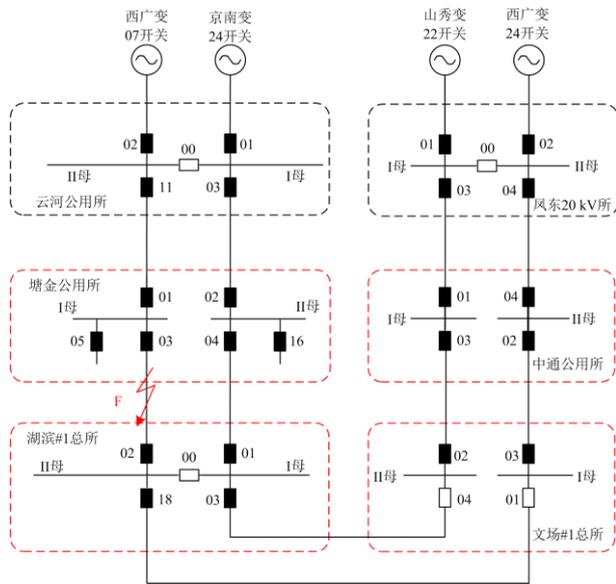


图 7 试点区域配网接线示意图

Fig. 7 Schematic diagram of distribution network wiring in the pilot area

在本次 5G 分布式配网保护试验期间, CPE 终端配置完成后开机自动连接无线公网, 网页端配置开启隔离区 (Demilitarized Zone, DMZ) 功能, 实现 CPE 下挂的 PC 可以 ping 通另一台 CPE 获取的公网 IP 地址; 由此实现 CPE 下挂设备之间的通信。使用 ping 工具进行 CPE 间互访时延测试, 经现场测试, 单基站下 CPE 间平均往返通信时延为 26.5 ms (如图 8、图 9), 即 CPE 间单向通信时延为 13.25 ms, 满

足分布式配网保护不大于 50 ms 的端到端传输时延要求。经过分析, CPE 端到端访问路径时延主要由 CPE A、基站 A、核心网、基站 B、CPE B 等 5 个以上节点构成, 其中承载网和核心网的时延基本稳定 (最大不超过 8 ms), 时延主要发生在基站到 CPE 装置间的空口抖动, 以及民用 CPE 装置自身的处理时延, 这两者都与周围环境、温湿度、电磁干扰等密切相关, 也是目前不可避免的。

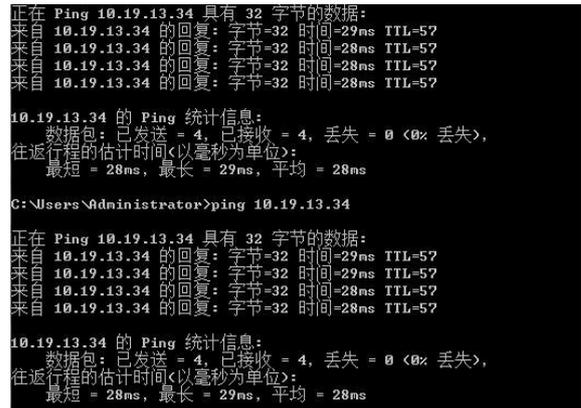


图 8 现场 ping 工具测试时延  
Fig. 8 On-site ping tool test delay

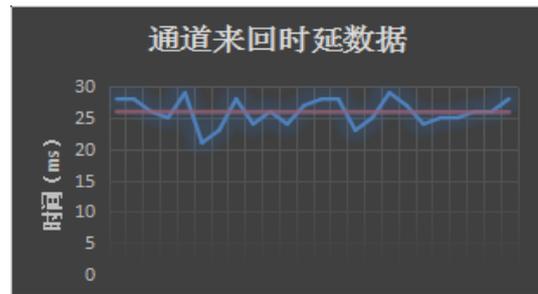


图 9 5G 通道往返时延测试数据  
Fig. 9 5G channel round-trip delay test data

由于双环网的两条主环线在动作行为上基本相同, 故在现场测试时仅以单条主环线为例进行分析说明。运行方式为联络开关位于文场#1 总所, 且各开闭所的分段开关均处于分闸状态 (图 7 中白色开关表示)。通过继电保护测试仪在塘金 03 开关保护绕组上加交流电流量, 模拟区内 F 点 ABC 三相短路故障, 在未配置分布式配网保护的情况下, 按照传统的两段式过流保护整定, 西广变 07 开关、塘金 03 开关均会动作跳闸, 通过远程操作“拉开湖滨 02 开关”隔离故障点, 并进行相应的操作恢复非故障区段正常供电; 在部署分布式配网保护后, 通过塘金公用所和湖滨#1 总所两处的 5G 配网保护交互过流启动信号, 最终完成塘金 03 开关和对侧湖滨 02 开关的动作跳闸, 保护动作范围、动作时间以及故

障隔离时间见表 2。与改造前的故障处理效果相比,除了缩小了停电范围,还将故障隔离时间由 10 s 左右缩短至 100 ms 之内,大大减轻了基层运维人员的故障处置压力,显著提高了供电可靠性。

表 2 5G 通信下保护动作时间

Table 2 Protection action time under 5G communication

F 点故障	改造前		改造后	
动作范围	西广变 07 开关	塘金 03 开关	塘金 03 开关	湖滨 02 开关
保护动作 时间/ms	35	32	44	46
故障隔离 时间	约 10 s 左右		95 ms	

## 5 结论

本文介绍了基于 5G 承载网的智能分布式配网保护,分析了保护动作逻辑以及装置工作原理,提出了适用于配网保护的 5G 通信组网方案,并在国内首次开展工程试点。该方案解决了传统配网阶段式过流保护在整定配合上的难题,以及光缆资源受限等通信通道问题,将 5G 的低时延高可靠性与分布式配网保护紧密融合在一起,实现了配网故障的快速定位与隔离,为 5G 赋能配电网提供了技术探索。

## 参考文献

- [1] 余贻鑫. 面向 21 世纪的智能配电网[J]. 南方电力技术研究, 2006, 2(6): 14-16.  
YU Yixin. Intelli-D-grid for the 21st century[J]. Southern Power System Technology, 2006, 2(6): 14-16.
- [2] 李捷, 华秀娟, 李正红, 等. 基于光伏并网的网源协调保护配合方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(9): 103-110.  
LI Jie, HUA Xiujuan, LI Zhenghong, et al. Research on coordination and protection of network sources based on grid-connection of photovoltaic[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(9): 103-110.
- [3] 谢民, 王同文, 徐靖东, 等. 分布式电源对配网继电保护影响及综合改进保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(19): 78-84.  
XIE Min, WANG Tongwen, XU Jingdong, et al. Effect of distributed generation on relay protection of distribution network and comprehensive improvement of protection scheme[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(19): 78-84.
- [4] 彭业, 金震, 陈宏山, 等. 含分布式电源的合环配电网保护策略[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(10): 90-95.  
PENG Ye, JIN Zhen, CHEN Hongshan, et al. Protection strategy for closed-loop distribution network with distributed generation[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(10): 90-95.
- [5] 邵庆祝, 杨畅, 谢民, 等. 基于 RTDS 的光伏接入配电网故障特征研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(22): 1-8.  
SHAO Qingzhu, YANG Chang, XIE Min, et al. Research on fault characteristics of distributed photovoltaic system in distributed network based on RTDS[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(22): 1-8.
- [6] TYAGI A, KUMAR K, ANSARI M A, et al. An efficient load flow solution for distribution system with addition of distributed generation using improved harmony search algorithms[J]. Journal of Electrical Systems and Information Technology, 2020, 7(7).
- [7] 林霞, 陆于平, 王联合. 分布式发电条件下的新型电流保护方案[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(20): 51-56.  
LIN Xia, LU Yuping, WANG Lianhe. New current protection scheme considering distributed generation impact[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (20): 51-56.
- [8] 倪良华, 历馨, 吕干云, 等. 基于虚拟阻抗的复杂配电网故障区段定位新方法[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(2): 1-8.  
NI Lianghua, LI Xin, LÜ Ganyun, et al. A new approach of fault section location in complicated distribution network based on virtual impedance[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(2): 1-8.
- [9] 黄昱翰, 蔡泽祥, 潘天亮, 等. 面向闭环运行配电网的广域保护控制方案[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(2): 47-52.  
HUANG Yihan, CAI Zexiang, PAN Tianliang, et al. Research on wide area protection and control scheme for closed-loop distribution network[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(2): 47-52.
- [10] 吴悦华, 高厚磊, 徐彬, 等. 有源配电网分布式故障自愈方案与实现[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(9): 140-155.  
WU Yuehua, GAO Houlei, XU Bin, et al. Distributed fault self-healing scheme and its implementation for active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(9): 140-155.

- [11] 李艳, 张安龙, 郑曦. 配电网广域保护信息流建模与通信性能分析[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(2): 53-60.  
LI Yan, ZHANG Anlong, ZHENG Xi. Modeling and communication performance analysis of wide-area protection information flow in distribution network[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(2): 53-60.
- [12] 马帅, 武志刚, 高厚磊, 等. 适配高渗透率 DG 接入配电网的幅值比较式保护[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(4): 43-50.  
MA Shuai, WU Zhigang, GAO Houlei, et al. Amplitude comparison protection for distribution network with high permeability distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(4): 43-50.
- [13] JAMALI S, BAHMANYAR A, RANJBAR S. Hybrid classifier for fault location in active distribution networks[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(2): 174-182. DOI: 10.1186/s41601-020-00162-y.
- [14] HE Jinghan, LIU Lin, DING Fanfan, et al. A new coordinated backup protection scheme for distribution network containing distributed generation[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(1): 102-110. DOI: 10.1186/s41601-017-0043-3.
- [15] 贺家李, 宋从矩. 电力系统继电保护原理[M]. 增订版. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [16] 黄鸣宇, 祁升龙, 芦翔, 等. 面向配网保护的集分联合馈线自动化控制方法[J]. 河南师范大学学报: 自然科学版, 2020, 48(5): 49-54.  
HUANG Mingyu, QI Shenglong, LU Xiang, et al. Combined centralized and distributed control method for distribution network protection[J]. Journal of Henan Normal University: Natural Science Edition, 2020, 48(5): 49-54.
- [17] 刘健, 张志华, 张小庆, 等. 继电保护与配电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.  
LIU Jian, ZHANG Zhihua, ZHANG Xiaoqing, et al. Relay protection and distribution automation based fault allocation and restoration for distribution systems[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(16): 53-57.
- [18] 吕玉祥, 杨阳, 董亚文, 等. 5G 技术在配电网电流差动保护业务中的应用[J]. 电信科学, 2020, 36(2): 83-89.  
Lǚ Yuxiang, YANG Yang, DONG Yawen, et al. Application of 5G technology in current differential protection of distribution network[J]. Telecommunication Science, 2020, 36(2): 83-89.
- [19] 袁通, 高厚磊, 徐彬, 等. 5G 高精度时间同步及在电网中的应用模式研究[J]. 电力信息与通信技术, 2020, 18(8): 47-53.  
YUAN Tong, GAO Houlei, XU Bin, et al. Research on 5G high-precision time synchronization and its application mode in power grid[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2020, 18(8): 47-53.
- [20] 杜东威, 叶志锋, 许永军. 基于 GOOSE 的综合型智能分布式馈线自动化方案[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(24): 183-190.  
DU Dongwei, YE Zhifeng, XU Yongjun. A solution of integrated intelligent distributed feeder automation based on GOOSE[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(24): 183-190.
- [21] 戴观权, 蔡泽祥, 蔡煜, 等. 基于 IEC 61850 的配电网网络化保护通信建模与实时性可靠性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(20): 97-103.  
DAI Guanquan, CAI Zexiang, CAI Yu, et al. Modeling and real-time reliability analysis of communication network for networked protection of distribution network based on IEC 61850[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(20): 97-103.
- [22] 王常玲, 赵元. 基于 5G 承载网的电力差动保护业务时延抖动分析[J]. 通信世界, 2019, 32: 33-36.  
WANG Changling, ZHAO Yuan. Delay jitter analysis of power differential protection service based on 5G bearer network[J]. Communication World, 2019, 32: 33-36.

收稿日期: 2020-09-18; 修回日期: 2021-02-26

作者简介:

于洋(1986—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向为继电保护技术; E-mail: yuy0@ah.sgcc.com.cn

王同文(1981—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 研究方向为继电保护技术; E-mail: wangtw1259@ah.sgcc.com.cn

谢民(1975—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为继电保护技术。E-mail: xiem261x@ah.sgcc.com.cn

(编辑 许威)