

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201160

## 5G 独立组网模式下的配网保护配置策略及应用

赵艾萱<sup>1</sup>, 黄杨<sup>1</sup>, 宋戈<sup>1</sup>, 朱雨<sup>1</sup>, 张建雨<sup>2</sup>, 张成龙<sup>3</sup>

(1. 国网四川省电力公司成都供电公司, 四川 成都 610000; 2. 许继集团有限公司, 河南 许昌 461000;  
3. 国网能源研究院有限公司, 北京 102209)

**摘要:** 广覆盖高可靠低延时通信的 5G 网络, 对打通配网终端设备之间的互联互通“最后一公里”问题有着极高的应用价值。为提升 5G 独立组网模式下配网保护的实用化水平, 首先分析了配网保护的通信资源需求, 并根据 5G 配网保护的总体架构, 通过时钟信号和数据信号同源传输的方式提出了可靠性更高的对时方案。同时, 在城区配网开展了差动保护和区域保护的应用, 对比了两种保护方法在架空和电缆线路应用时的差异, 结果表明架空线路宜采用区域保护, 电缆线路可兼容差动保护和区域保护。

**关键词:** 5G 独立组网; 区域保护; 差动保护; 配电网; 对时方案

### Configuration strategy and application of distribution network protection based on standalone 5G

ZHAO Aixuan<sup>1</sup>, HUANG Yang<sup>1</sup>, SONG Ge<sup>1</sup>, ZHU Yu<sup>1</sup>, ZHANG Jianyu<sup>2</sup>, ZHANG Chenglong<sup>3</sup>

(1. Chengdu Power Supply Company, State Grid Sichuan Electric Power Co., Ltd., Chengdu 610000, China; 2. XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China; 3. State Grid Energy Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China)

**Abstract:** The 5G network, with its characteristics of wide coverage, high reliability and low delay communication, has a high application value in solving the ‘last kilometer’ problem in interconnection between the terminal equipment of a distribution network. To improve the practical level of distribution network protection based on standalone 5G, the communication resource requirements of distribution network protection are analyzed first. Then, given the overall structure of 5G distribution network protection, a more reliable time synchronization scheme is proposed through the same source transmission of clock signal and data signal. At the same time, differential protection and regional protection are applied in an urban distribution network. The differences between the two protection methods in overhead lines and cables are analyzed. The results show that overhead lines are recommended for regional protection, and cables can be compatible with differential protection and regional protection.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900100) and the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 521904210087).

**Key words:** standalone 5G; regional protection; differential protection; distribution network; time synchronization scheme

## 0 引言

为保证主变的安全运行, 站内 10 kV 线路开关需设置为速断保护, 难以实现故障区域精确隔离<sup>[1]</sup>。此时, 即使配置集中式配网自动化, 也是“先故障跳闸, 再自愈恢复”, 严重影响用户体验。此外, 配网的级差电流保护受电网方式影响较大, 随着配电网不断延伸扩容、拓扑结构日趋复杂, 呈现了多

终端、多分段、多电源的特点, 过流保护定值在复杂配电网不能很好配合而导致整定困难, 配网定值因整定失配造成的故障越级风险日益突出<sup>[2-3]</sup>。

如图 1 所示, 某条馈线上带了 4 个环网柜负荷, 在图中红箭头位置发生故障, 因城区配网线路很难通过定值实现选择性, 故障点的上级保护均可能越级跳闸, 造成停电范围扩大。

因此, 为了更加快速、精准地隔离故障, 在配网中应用差动和区域保护成为了研究和工程实践的新热点, 现阶段各大城市主要以光纤通信构建差动保护<sup>[4-5]</sup>和区域保护<sup>[6-7]</sup>, 并进一步考虑了集中智能

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2016YFB0900100);  
国家电网科技项目资助(521904210087)

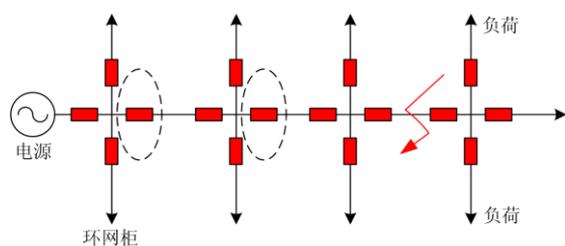


图 1 城区配网故障过流保护越级动作示意图

Fig. 1 Schematic diagram of override action of urban distribution network over current protection

和分布智能相配合故障处理模式<sup>[8]</sup>。然而,受制于建设成本高、施工条件差等因素,光纤只能覆盖部分配电网络,配网终端的“最后一公里”问题亟需解决。

相比于施工难度更大、维护成本更高的光纤通信方案,高带宽、广覆盖、低时延的 5G 技术提出后,在生产控制区开展电力业务有广泛的应用前景<sup>[9-10]</sup>。同时,相比于 4G 和非独立组网的 5G 技术,独立组网的 5G 技术拥有更为成熟的移动边缘计算(Mobile Edge Computing, MEC)能力<sup>[10-11]</sup>,并能提供电力业务的专用切片<sup>[13-15]</sup>,可以同时满足电力业务在快速连接、实时业务、安全与隐私保护等方面的关键需求。其中,利用 5G 超低时延特性构建配网差动保护成为了配网保护领域新的研究方向<sup>[16-18]</sup>。

配网差动保护虽然应用效果良好,但对设备 CT 抗饱和程度有很高要求<sup>[19-20]</sup>。对于存在大量 T 接线路的配网架空线路,即使 T 接的用户侧终端都加装了差动保护装置,当发生区外故障时 CT 出现饱和和概率依然较高,容易造成差动保护误动。在这种情况下,采用信息数据共享的区域保护更有利于精准隔离故障。

在 5G 独立组网模式下,配网区域保护系统在进行故障点判定时无需再将数据传输到调控主站处理,仅需传输至 MEC 节点即可。故障经 MEC 节点处理完成后,再上传重要信息至主站端的调控云进一步分析。该模式不但缩短了故障后保护动作时间,改进了“先故障跳闸,再自愈恢复”的传统模式,在线路故障时大幅降低了无故障区域用户的停电概率,还可以有效利用 5G 独立组网模式下的云边协同机制,减轻主站端数据传输、处理压力,保证系统的灵活性和实时性<sup>[21]</sup>。

本文充分利用独立组网 5G 技术的低时延和边缘计算能力,在成都配网开展了差动保护和区域保护的应用试点,并在此基础上总结了架空线路和电缆线路在不同应用场景下 5G 配网保护的优化配置

策略,为后续 5G 技术在配网保护中的应用提供了新思路,有助于进一步提高电网可靠性。

## 1 配网保护网络通信建设方案

### 1.1 配网保护通信资源需求分析

根据 IEC61850 通信规约,SV 采样报文用于传输电流、电压瞬时值,配电终端按照传输 6 路模拟量(三相电压、三相电流)、采样频率 4 000 点/s 的典型值计算,通信带宽需要 5.6 Mbps;GOOSE 报文用于传输允许信号、跳闸信号、闭锁信号、开关位置等状态量,维持正常链路心跳报文时间间隔为 5 s。当故障发生时,GOOSE 报文发送时间间隔为 2 ms、2 ms、4 ms、8 ms,按 60 路开关量的典型值计算,通信带宽需要 1 Mbps。5G 配网保护通信资源主要需求如表 1 所示。

表 1 5G 配网保护通信资源需求分析

Table 1 Analysis on communication resource requirements of 5G distribution network protection

指标名称	指标要求
双端通信速率	上行速率>10 Mbps,下行速率>10 Mbps
三端通信速率	上行速率>20 Mbps,下行速率>20 Mbps
端到端链路延时	CPE 间通信总延时<30 ms
数据帧抖动时间	以太网最小帧间隔<数据帧间隔<10 ms
时钟同步精度	<10 μs
误码率	<1×10 <sup>-8</sup>
丢包率	<0.01%

### 1.2 5G 配网保护装置总体架构

5G 配网保护装置的总体架构如图 2 所示。目前,在电缆线路环网柜安装了分布式数据传输单元(Data Transfer Unit, DTU)及客户前置设备(Customer Premise Equipment, CPE)。

其中,DTU 完成间隔模拟量信息、断路器位置的采集及保护功能。配网保护装置、间隔 CT 和断路器相连,两侧通过 5G CPE 终端接入 5G 网络,实时接收对侧模拟量、状态量数据。保护控制信息(封装成 GOOSE、SV 的 UDP 报文)信道采用间隔 DTU 经无线通信终端 CPE 接入 5G 通信网,通过在基站附近下沉的核心网中部署 CPE 路由,实现 DTU 网络的互通。

网络对时的准确性在电力调控与保护体系中是重要技术之一<sup>[22]</sup>,具体包含了两个方面,一是各保护终端获取统一的时钟信号,二是保护终端将保护数据与时钟信号对齐。

相比于通过外部时钟对保护装置终端进行授时的方案<sup>[23-24]</sup>,本项目在获取统一时钟信号方面采用



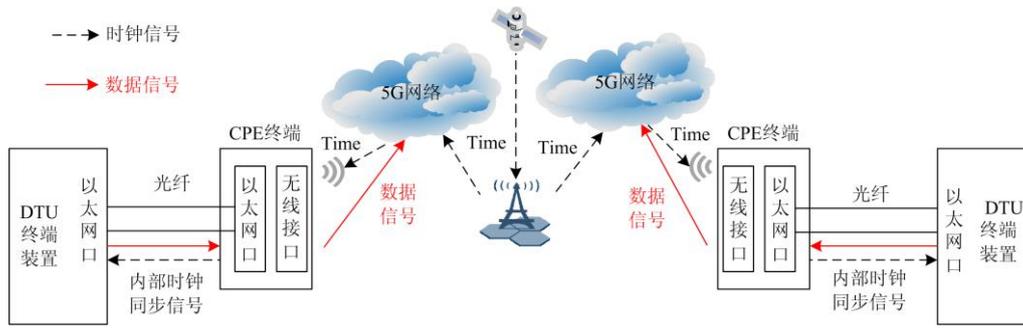


图 2 5G 配网保护装置总体架构

Fig. 2 Overall structure of 5G distribution network protection device

了内部时钟授时方案。以单个配网区域为单位，区域内 5G 基站采用 GPS 或北斗授时，5G 基站对时后，将精确时钟信号下发给各 CPE 终端。CPE 终端接收时钟信号后，再利用 RS485 或光纤口接入 DTU 终端装置，保证区域内各保护装置的时钟信号同步，避免了因北斗/GPS 信号差导致外部时钟授时失步的风险，减少了保护装置维护工作量。

为了简化对时回路，提高对时精度，对时信号采用了 B 码<sup>[25]</sup>。B 码技术成熟可靠，在国内变电站自动化系统对时方案中得到了广泛的应用，已形成了相应的标准<sup>[26]</sup>。

### 1.3 基于 5G 网络对时数据的保护波形对齐算法

在保护数据与时钟信号对齐方面，本文采用了以下同步调整方法。

1) 在配电网区域中，使用北斗/GPS 授时的 5G 基站下发精确时钟信号，区域内的 CPE 通信终端接收时钟信号后，再对 DTU 配电终端的时钟进行了同步；

2) 各间隔 DTU 以绝对统一的采样起始时刻，对本间隔数据进行就地采样，并将统一了采样序号后的数据通过 CPE 终端发送至 5G 基站；

3) 各间隔 DTU 自 5G 基站接收带有采样序号的其他间隔采样数据，采用序号对齐的方式同步各侧数据，进行保护计算。

在此方案中，由于时钟信号与数据信号先在 5G 配网保护终端中进行一一对齐后，再将对齐后的数据进行同源传输，故不存在保护数据收发时延不一致影响数据正常传输的情况，避免了因 5G 网络不同步带来的保护误动隐患。

### 1.4 用于配网保护的 5G 网络时延特性分析

根据华电高强教授研究结果显示，在传输距离较长或 5G 网络负载较重时，网络时延不一定能满足配网保护的要求<sup>[27]</sup>，故需要合理安排配网保护装置的物理空间范围和网络负载。

在本方案中，采用了独立组网模式实现 5G 网络覆盖。在不考虑网络切片以及 D2D 通信技术的情况下，测试结果显示 5G 网络已可实现 15 ms 端到端通信时延(对比 LTE 网络下典型端到端时延大于 30 ms)，且在 UPF 下沉情况下，时延抖动能进一步满足配网保护通信通道需要。

同时，配网的差动保护最少仅需在两个网络节点之间就可进行判断，避免了过多的中间节点造成的时延抖动问题。

本文在锦悦、三圣、双桥子等变电站部署了 MEC 节点，严格限制区域内网络节点数量。在 5G 独立组网并采用 UPF(用户面功能)下沉后、网络状况良好的情况下，在实验室测试实现了网络端到端时延<10 ms，时延抖动<1 ms。在此技术指标下，利用 5G 网络授时进行保护数据对齐，时间同步精度<10 μs，可实现 5G 保护出口时间<60 ms，能够满足配网保护需求。

## 2 配网保护的方案及应用

### 2.1 配网差动保护应用分析

目前，城市配网线路主要包括了架空线和电缆两种形式。10 kV 架空线路自变电站出线，在一定长度后设置分段开关，而各用户负荷则 T 接架空至线路上。10 kV 架空线路典型运行方式如图 3 所示，其中红色开关为合位，绿色开关为分位。

从图 3 中可以看出，若要实现 10 kV 线路分段开关间的差动保护(如判断 E1 处的线路故障)，还需各用户侧加装差动保护装置。由于大部分用户目前配置是低压跌落式开关，因此并不具备差动保护需要。

同时，若此区域内再有负荷 T 接，差动保护控制策略将会更加复杂。此外，过多的分支点容易导致 CT 在区外故障时出现饱和现象，导致差动保护误动，而相应增加的网络中间节点也容易导致时延、抖动超标的情况。

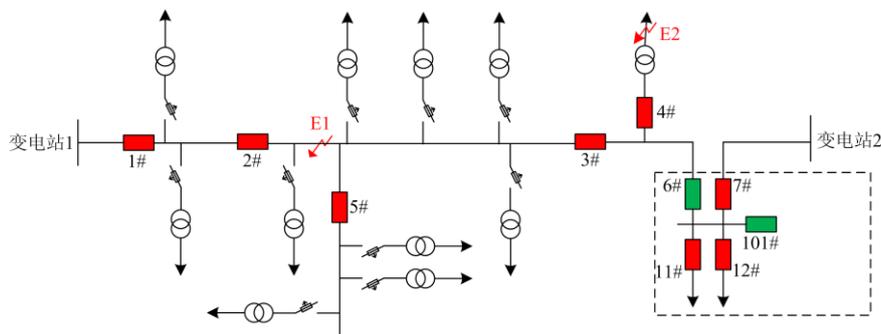


图 3 10 kV 架空线路差动保护及区域保护策略

Fig. 3 Differential protection and regional protection strategy of 10 kV distribution overhead line

综上, 10 kV 架空线路典型结构中, 由于分支点过多, 不满足配置多端差动保护条件, 需研究其他保护方案。

随着配网下地改造的推进, 城市配网电缆化程度逐渐提升。10 kV 电缆线路主要采用环网柜实现电缆进出线连接, 即变电站 10 kV 出线电缆接入环网柜支路开关, 所有用户负荷线路均从环网柜支路开关接入。环网柜的每个配电支路均设一台开关柜, 过去安装的环网柜中各支路一般设置高压熔断器加负荷开关, 近年已逐步升级为全断路器配置。

如图 4 所示, 在 10 kV 电缆线路上, 电缆线路两端均配置了 5G 配网差动保护, 利用差动保护装置两端的差流判断并切除相应线路上发生的故障。

在 10 kV 电缆网络典型结构中, 可部署多套端到端 5G 配网差动保护。

若图 4 中环网柜间联络电缆 E1 处出现故障时, 差动保护可以跳开环网柜 2 中 2# 开关和环网柜 3 中的 1# 开关, 实现快速而精确的故障切除, 避免了变电站内开关速断保护动作, 缩小了故障停电范围。若用户侧设备不满足差动保护安装条件, 则无法在环网柜至用户侧电缆上配置差动保护, 这部分线路故障后差动保护无法确定故障位置, 将无法通过差动保护切除故障。因此, 在配网保护中仅采用差动保护不能覆盖全部情况, 需要再引入区域保护系统配合使用。

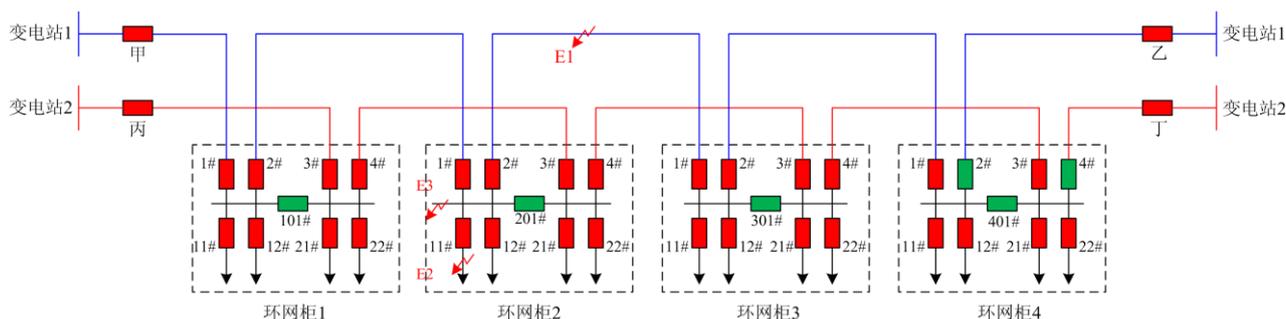


图 4 10 kV 配网电缆差动保护及区域保护策略

Fig. 4 Differential protection and regional protection strategy of 10 kV distribution cable

## 2.2 配网区域保护应用分析

### 2.2.1 区域保护原理

为实现区域保护功能, 线路各侧配置了 5G 配网区域保护终端, 能够将本端数据与上端、下端进行交互, 实现在线判别故障位置的功能。

架空线路区域保护原理如图 5 所示: 当保护装置检测故障电流大于过流定值时, 区域保护启动, 包含了 2 个动作时限, 分别是  $T_1$ 、 $T_2$ , 且  $T_1 < T_2$ 。

若架空线路故障, 则本侧收到相邻各侧的电流启动信号后, 判定故障点在区内或区外。通信

正常时, 本侧过流启动, 收到相邻各侧正转负(以变电站流出为正方向)或失去电流方向的启动信号, 区域保护经  $T_1$  时限动作跳开各侧开关。若本侧终端通信中断, 开关会自动启用自适应过流保护, 经  $T_2$  时限跳开本侧开关, 确保设备安全。

若馈出线出现故障(用户故障), 则直接启用馈线过流速断保护跳开馈出线开关。

电缆线路区域保护原理如图 6 所示: 当保护装置检测故障电流大于过流定值时, 区域保护启动, 包含了 3 个动作时限, 分别是  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ , 且  $T_1 < T_2 < T_3$ 。

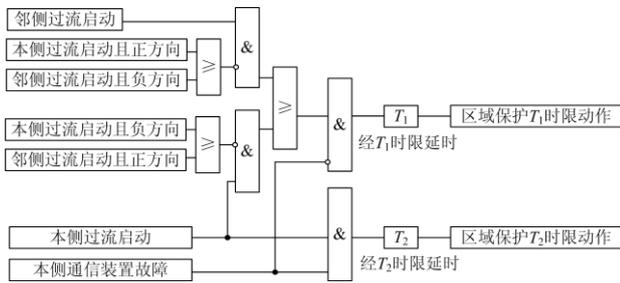


图 5 配网架空线路区域保护逻辑框图  
Fig. 5 Regional protection logic diagram of distribution overhead line

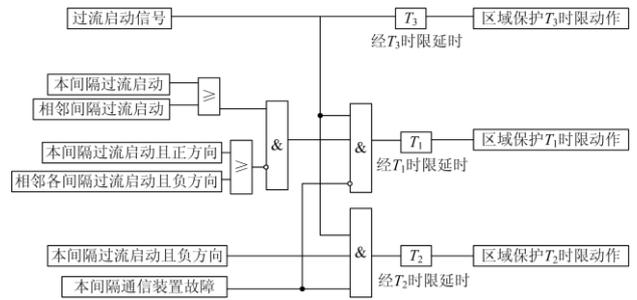


图 7 环网柜母线区域保护逻辑框图  
Fig. 7 Regional protection logic diagram of bus line in ring main unit

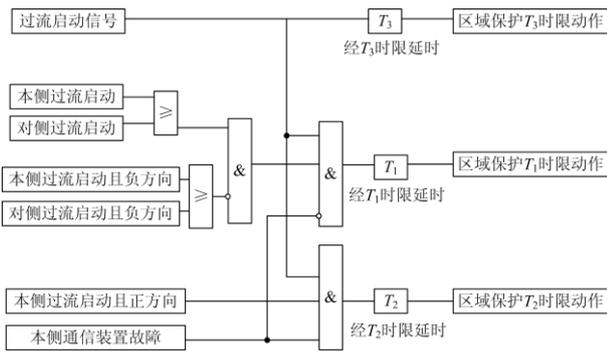


图 6 配网电缆线路区域保护逻辑框图

Fig. 6 Regional protection logic diagram of distribution cable

若电缆线路故障，本侧开关收到对侧开关的电流启动信号后，判定故障点在线路区内或区外。通信正常时，本侧开关取得方向信号(以环网柜母线流出方向为正方向，流入环网柜母线为负方向)，对侧开关电流极性应为本侧开关的相反方向。此时若发生故障，本侧和对侧开关过流，且方向信号均变为正方向或一侧失去电流方向，区域保护经  $T_1$  时限动作跳开两侧开关。若本侧通信终端故障，有选择性地切除本线路故障，当本侧过流且为正方向，区域保护经  $T_2$  延时动作跳开本侧开关。若故障发生在用户侧，保护动作方式与架空线一致。

如图 7 所示，若环网柜母线故障，则同一母线的环网进出线及母联保护装置相互收发电流启动信号，确定故障点发生在母线区内或区外。通信正常时，本间隔过流且负方向，收到相邻间隔正转负或失去电流方向信号，区域保护经  $T_1$  延时动作，跳开故障母线上所有开关。在本间隔通信终端故障时，本间隔过流且负方向，区域保护经  $T_2$  延时动作，跳开母线上所有开关以及下一级进出线开关。区域保护  $T_3$  延时作为前述开关失灵的后备保护，固定时延后动作，跳开故障母线上所有开关，以及上一级进出线开关。

在故障隔离后，随后判断联络电源是否符合转供条件。若符合转供，则自动合上 10 kV 联络开关恢复非故障区域的供电。

本地区配网主要采用了“闭环结构、开环运行”的方式，以单端供电为主，区域保护应用效果良好。多端和含分布式电源线路更适合采用差动保护，若条件确实不允许采用差动保护，在所有电源端都接入区域保护后，可增加电流启动限值作为保护动作开放条件，并在故障时联切电源线路，最终实现区域保护功能。

值得注意的是，在区域保护通信系统除了本开关间隔通信中断情况外，还考虑了整个区域基站通信中断时的情况。中断后，所有间隔自适应过流保护开放，其动作条件为本间隔侧过流，经  $T_3$  延时动作。

与差动保护相比，区域保护可避免 CT 饱和影响，且无需进行高精度对时，所需网络条件更简单。

### 2.2.2 架空线路区域保护配置方案及应用

在具体实施过程中，10 kV 架空线路可根据线路设备实际情况，在线路分段开关上安装区域保护设备以减少停电范围，同时可在满足区域保护要求的用户侧开关上安装区域保护设备，以最大化提高保护选择性，最小化故障停电范围。

当 10 kV 架空线路主线发生故障后，线路上所有分段开关区域保护设备判断故障电流方向，并通过 5G 进行数据共享。如图 3 所示，当故障发生在主线区段 E1 处时，靠近变电站电源侧的保护终端采集的电流方向仍为正方向，而远离电源侧的部分保护终端判断采集的故障电流方向由正转负或失去电流方向，即判断具体故障发生位置在主线，并切除故障点 E1 处的 2#、3#、5# 开关。在具备转供条件时，3# 开关跳开后，区域保护装置会自动合上 6# 开关，缩小停电范围。

当 10 kV 架空线路用户侧 E2 处发生故障后，线路上所有分段开关区域保护设备也需要判断故障电流方向，并均判断为正方向，判断故障处于主线

区段外。用户侧开关检测到故障后, 直接启动馈线过流速断保护, 通过跳开 4#开关后对故障点 E2 进行切除; 若用户侧 4#开关拒动, 区域保护切除相邻的 3#分段开关, 避免全线停电。若 5#所在馈线上发生故障, 将导致 3#、4#开关保护失去电流方向, 5#开关将会第一时间通过馈线过流速断保护切除故障, 利用保护时限的级差配合避免 3#、4#开关误动。

### 2.2.3 电缆线路区域保护配置方案及应用

10 kV 电缆线路经过不断更新, 在环网柜中的各开关逐步升级为断路器, 因此本文在 10 kV 电缆网中的每个环网柜每个开关上均安装区域保护装置, 实现了 10 kV 电缆配网线路的全域保护。

如图 4 所示, 当环网柜间 E1 处的 10 kV 电缆线路发生故障后, 线路上所有环网柜的开关区域保护装置判断故障电流方向(正常情况下电缆线路两侧开关电流方向应为一正一负), 并通过 5G 网络进行数据共享。此时, E1 故障点两端的配网保护终端采集的电流方向均为正方向, 则判断具体故障发生位置在环网柜间的 10 kV 线路上, 此时环网柜 2、3 中甲乙线的区域保护功能经  $T_1$  延时后跳开环网柜 2 中 2#开关和环网柜 3 中的 1#开关。

若 E1 处线路故障时, 环网柜 2 的 2#开关或环网柜 3 的 1#开关存在终端通信故障现象, 则环网柜 2、3 中甲乙线的区域保护终端经  $T_2$  延时后跳开环网柜 2 中 2#开关或环网柜 3 中的 1#开关。

若环网柜 2 中 2#开关或环网柜 3 中的 1#开关出现失灵, 则扩大一级经  $T_3$  延时后跳开环网柜 2 中 1#开关或环网柜 3 中的 2#开关。

当用户侧馈出线 E2 处发生故障后, 线路上所有环网柜区域保护终端确定故障电流方向, 此时虽然达到了过流启动条件, 但进出线开关两侧电流方向仍为一正一负, 故判断故障发生在区外。环网柜 2 的 11#馈线采集到馈出线故障后, 馈线过流速断保护启动环网柜 2 的 11#开关分闸, 隔离故障, 非故障区段不受影响。

若环网柜 2 的 11#开关出现失灵, 则扩大一级跳开环网柜 2 中 1#开关和环网柜 2 中的 2#开关。

当环网柜 2 的 I 段母线 E3 处发生故障后, 同一母线的进出线及母联保护装置相互收发电流启动信号, 确定故障点发生在母线区内或区外。通信正常时, 环网柜 2 的 I 母上各间隔故障过流且判断为负方向, 同时收到同一母线上相邻间隔过流启动信号, 此时区域保护经  $T_1$  延时动作, 跳开环网柜 2 的 I 母上所有开关。

在本间隔通信终端故障时, 本间隔过流且反方向, 区域保护经  $T_2$  延时动作, 跳开环网柜 2 的 I 母

上所有开关以及环网柜 3 的 1#开关。区域保护  $T_3$  延时作为前述开关失灵(环网柜 2 的 I 母上所有开关、环网柜 3 的 1#开关)的后备保护, 跳开环网柜 2 的 I 母上所有开关, 以及环网柜 1 的 2#开关、环网柜 3 的 2#开关。

当故障隔离后, 在符合转供电条件时, 系统自动合上环网柜 4 的 2#开关, 恢复非故障区域的供电。

电缆线路既可采用差动保护, 也可采用区域保护。从选择性和动作时限看, 差动保护更具优势, 对电缆绝缘也有保护作用。差动保护相较区域保护对网络需求更高, 若电缆线路所在区域因障碍物、外界干扰导致网络条件不佳时, 会导致数据丢包率过高, 端到端网络时延增加, 不能实时满足差动保护网络需求, 此情况下更适合采用区域保护。

### 2.3 5G 独立组网模式下配网保护工程应用情况

本项目在成都青白江区域的高楼变电站 10 kV 楼港线进行了工程应用, 在 10 kV 楼港线的变电站出线开关柜、环网柜以及馈线开关上进行配网区域保护装置安装挂网试点。

试点区域共安装了 5G 配网保护装置 8 台, 其中 110 kV 高楼变电站 10 kV 出线柜 1 台, 环网柜进出线开关 5 台, 环网柜馈线开关 2 台。环网柜共包含 3 个, #1 环网柜距离高楼站 0.8 km, #2 环网柜距离#1 环网柜 4.5 km, #3 环网柜距离#2 环网柜 1.8 km。各配网保护终端在柜间通过 5G 网络通信, 柜内通过交换机通信。

为验证 5G 独立组网模式下的网络时延是否符合现场应用要求, 在 10 kV 楼港线进行了现场实测。结果发现, 受通信资源和外界环境影响, 网络端到端时延及其抖动测试数据有所增加。

10 kV 楼港线在运 5G 配网保护终端的时延测试结果如图 8 所示, 其中端到端的平均时延数据 18.7 ms, 时延抖动 4.2 ms。由于本文采用了基站对

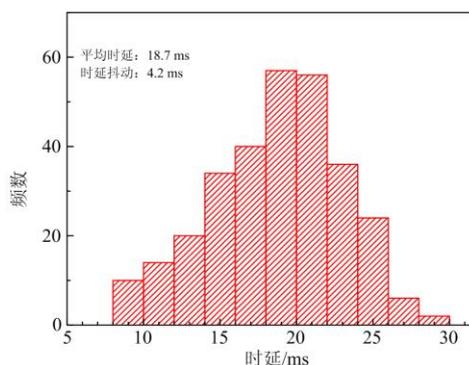


图 8 10 kV 楼港线端到端时延现场实测结果  
Fig. 8 Field measurement results of end-to-end time delay for 10 kV Lougang line

配网保护终端授时, 配网保护终端对采集数据标记时序的方案, 故数据在采集时就已对时, 实际的时间同步精度小于  $10 \mu\text{s}$ 。

目前, 试点运行的 5G 配网保护装置已在 10 kV 楼港线上完成了带负荷测试和传动试验, 采样信号准确, 5G 差动和区域保护均可以正确动作。

### 3 结论

本文给出了 5G 独立组网模式下的配网保护配置策略, 并进行了工程应用, 主要包括:

1) 独立组网模式下, 合理控制中间节点位置、数量和网络负载后, 可以满足 5G 条件下差动保护的网路需求。通过采用 5G 基站向配网保护终端授时, 配网保护终端对采集数据标记时序的方案, 实现了时钟信号与数据信号同源传输, 避免了保护数据在 5G 网络中收发时延不一致所带来的保护误动隐患。

2) 配网架空线路因 T 接线路多、网络中间节点多等原因不宜采用配网差动保护, 更适合采用区域保护。电缆线路可以兼容差动保护和区域保护, 在对时、网络负载、时延等条件允许的线路上宜采用速度更快的差动保护; 而在网络状态不佳、CT 容量有限的线路可采用区域保护。

随着 5G 网络建设, 本项目后续将进一步测试 QoS、UPF 资源预分配、电力专用切片等不同方式下的端到端通信指标, 同时充分利用 MEC 边缘计算带来的低时延优势, 进一步强化调控云和边缘计算节点的云边协同功能, 为今后智能配电、智能用电、智能分布式电源等应用提供技术支持。

### 参考文献

- [1] 刘健, 赵树仁, 张小庆. 中国配电自动化的进展及若干建议[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(19): 6-10, 21.  
LIU Jian, ZHAO Shuren, ZHANG Xiaoqing. Development of distribution automation in China and some suggestions[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(19): 6-10, 21.
- [2] 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.
- [3] SINGH M. Protection coordination in distribution systems with and without distributed energy resources - a review[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(3): 294-310. DOI: 10.1186/s41601-017-0061-1.
- [4] 李娟, 高厚磊, 武志刚, 等. 有源配电网差动保护自同步原理及误差分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(9): 78-85.  
LI Juan, GAO Houlei, WU Zhigang, et al. Data self-synchronization method and error analysis of differential protection in active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(9): 78-85.
- [5] 段运鑫, 刘宝江, 魏勇, 等. 基于光纤网络的 10 kV 智能配电网差动保护方案设计[J]. 电器与能效管理技术, 2015, 56(13): 28-31, 49.  
DUAN Yunxin, LIU Baojiang, WEI Yong, et al. Differential relay protection scheme design for 10 kV smart distribution network based on optical fiber network[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2015, 56(13): 28-31, 49.
- [6] 郝国隆. 基于 EPON 技术构建配电网通信网的研究[D]. 天津: 天津大学, 2013.  
HAO Guolong. Research on construct the distribution communication network based on EPON technology[D]. Tianjin: Tianjin University, 2013.
- [7] 田欣. 配电自动化在济南电网中的应用[D]. 济南: 山东大学, 2018.  
TIAN Xin. Application of distribution automation in Jinan Power Grid[D]. Jinan: Shandong University, 2018.
- [8] 刘健, 张小庆, 陈星莺, 等. 集中智能与分布智能协调配合的配电网故障处理模式[J]. 电网技术, 2013, 37(9): 2608-2614.  
LIU Jian, ZHANG Xiaoqing, CHEN Xingying, et al. Fault location and service restoration for distribution networks based on coordination of centralized intelligence and distribution intelligence[J]. Power System Technology, 2013, 37(9): 2608-2614.
- [9] 王智慧, 汪洋, 孟萨出拉, 等. 5G 技术架构及电力应用关键技术概述[J]. 电力信息与通信技术, 2020, 18(8): 8-19.  
WANG Zhihui, WANG Yang, MENG Sachula, et al. 5G technology architecture and key technologies of power application[J]. Electric Power ICT, 2020, 18(8): 8-19.
- [10] 王毅, 陈启鑫, 张宁, 等. 5G 通信与泛在电力物联网的融合: 应用分析与研究展望[J]. 电网技术, 2019, 43(5): 1575-1585.  
WANG Yi, CHEN Qixin, ZHANG Ning, et al. Fusion of the 5G communication and the ubiquitous electric internet of things: application analysis and research prospects[J]. Power System Technology, 2019, 43(5): 1575-1585.
- [11] TRAN T, HAJISAMI A, PANDEY P, et al. Collaborative mobile edge computing in 5G networks: new paradigms, scenarios, and challenges[J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(4): 54-61.
- [12] SOLDANI D, MANZALINI A. Horizon 2020 and beyond: on the 5G operating system for a true digital society[J].

- IEEE Vehicular Technology Magazine, 2015, 10(1): 32-42.
- [13] 王志勤, 徐菲. 关于 5G 组网技术路线的分析与建议[J]. 电信科学, 2019, 35(7): 3-7.  
WANG Zhiqin, XU Fei. Analysis and suggestion on 5G networking technology route[J]. Telecommunications Science, 2019, 35(7): 3-7.
- [14] NAKAO A, DU P, KIRIHA Y, et al. End-to-end network slicing for 5G mobile networks[J]. Journal of Information Processing, 2017, 25: 153-163.
- [15] 夏旭, 朱雪田, 梅承力, 等. 5G 切片在电力物联网中的研究和实践[J]. 移动通信, 2019, 43(1): 63-69.  
XIA Xu, ZHU Xuetian, MEI Chengli, et al. Research and practice on 5G slicing in power internet of things[J]. Mobile Communications, 2019, 43(1): 63-69.
- [16] 王廷凰, 余江, 许健, 等. 基于 5G 无线通信的配电网自适应差动保护技术探讨[J]. 供用电, 2019, 36(9): 18-21.  
WANG Tinghuang, YU Jiang, XU Jian, et al. Discussion on adaptive differential protection technology of distribution network based on 5G wireless communication[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(9): 18-21, 27.
- [17] 黄福全, 王廷凰, 张海台, 等. 基于 5G 通信和动态时间规划算法的配电网线路差动保护[J/OL]. 重庆大学学报: 1-12[2020-09-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1044.N.20200828.1621.004.html>.  
HUANG Fuquan, WANG Tinghuang, ZHANG Haitai, et al. Differential protection of the distribution line based on 5G communication and dynamic time wrapping algorithm[J]. Journal of Chongqing University: 1-12 [2020-09-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1044.N.20200828.1621.004.html>.
- [18] 陈皓勇, 李志豪, 陈永波, 等. 基于 5G 的泛在电力物联网[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(3): 1-8.  
CHEN Haoyong, LI Zhihao, CHEN Yongbo, et al. Ubiquitous power internet of things based on 5G[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3): 1-8.
- [19] 罗慧, 周卿松, 苗洪雷, 等. 基于 LMD 母线差动保护 CT 饱和和检测方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 49-54.  
LUO Hui, ZHOU Qingsong, MIAO Honglei, et al. A method for CT saturation detection based on LMD in busbar differential protection[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 49-54.
- [20] 吴梓亮, 曾耿晖, 李一泉, 等. 基于双门槛值的变压器 Hausdorff 距离快速保护新判据[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(18): 128-135.  
WU Ziliang, ZENG Genghui, LI Yiquan, et al. A novel criterion for fast protection of transformer based on Hausdorff distance and double threshold[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(18): 128-135.
- [21] 司羽飞, 谭阳红, 汪泓, 等. 面向电力物联网的云边协同结构模型[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(24): 7973-7979.  
SI Yufei, TAN Yanghong, WANG Feng, et al. Cloud-edge collaborative structure model for power internet of things[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(24): 7973-7979.
- [22] APPASANI B, MOHANTA D K. A review on synchrophasor communication system: communication technologies, standards and applications[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(4): 383-399. DOI: 10.1186/s41601-018-0110-4.
- [23] 张星, 徐文斌, 赵东森. 基于 5G 技术的配网差动保护应用[J]. 宁夏电力, 2020(3): 18-21.  
ZHANG Xing, XU Wenbin, ZHAO Dongsen. Research on application of differential protection for distribution network based on 5G—technology[J]. Ningxia Electric Power, 2020(3): 18-21.
- [24] 张泰, 杨雪, 汪晓帆. 基于 5G 配电网差动保护安全防护策略研究[J]. 四川电力技术, 2020, 43(6): 60-65.  
ZHANG Tai, YANG Xue, JIANG Xiaofan. Research of security protection strategy for differential protection of 5G—based distribution network[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2020, 43(6): 60-65.
- [25] 赵侠, 陈一强, 陈其铭. 基于 5G 的电力系统时间同步方案[J]. 移动通信, 2020, 44(7): 7-12.  
ZHAO Xia, CHEN Yiqiang, CHEN Qiming. Power system time synchronization solution based on 5G[J]. Mobile Communications, 2020, 44(7): 7-12.
- [26] 电力系统的时间同步系统: DL/T 1100[S]. 北京: 国家能源局, 2018.
- [27] 魏向欣, 何涛, 李一航, 等. 5G 网络切片承载电力系统业务的时延特性研究[J]. 电力信息与通信技术, 2019, 17(8): 7-12.  
WEI Xiangxin, HE Tao, LI Yihang, et al. Research on time delay characteristics of 5G network slice in carrying power communication service[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2019, 17(8): 7-12.

收稿日期: 2020-09-20; 修回日期: 2021-03-11

作者简介:

赵艾萱(1991—), 男, 博士, 工程师, 研究方向为输配电继电保护, 电缆载流量与绝缘诊断; E-mail: zhaoaixuanOoscar@126.com

黄杨(1986—), 男, 通信作者, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统分析与控制、大容量储能技术; E-mail: y-huang05@163.com

宋戈(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为调控系统通信、安全与保护。Email: 1324091@qq.com

(编辑 许威)