

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201312

基于5G通信智能分布式馈线自动化应用

梁子龙¹, 李晓悦², 邹荣庆³, 季国鹏³

(1. 国网胶州市供电公司, 山东 青岛 266300; 2. 国网青岛供电公司, 山东 青岛 266002;
3. 上海道博电气有限公司, 上海 201799)

摘要: 近年来, 配电自动化技术应用取得了长足进步, 覆盖范围不断扩大。但智能分布式馈线自动化等先进自动化技术, 仍然受到光纤通信的制约。5G通信技术拥有更加安全可靠、高速率、低延时、广覆盖、海量连接等特点, 为配电自动化发展提供了新思路。针对5G通信技术应用于智能分布式配电自动化进行了详细论证, 并搭建了实验台, 对5G通信条件下的自动化终端通信延迟、动作反应时间及稳定性进行了验证, 并与集中型馈线自动化进行比较分析, 实现了配网故障快速处理过程由分钟级提升至毫秒级, 具有十分广阔的应用前景。

关键词: 配电网; 智能分布式; 馈线自动化; 5G通信; GOOSE

Intelligent distributed feeder automation application based on 5G communication

LIANG Zilong¹, LI Xiaoyue², ZOU Rongqing³, JI Guopeng³

(1. State Grid Jiaozhou Power Supply Company, Qingdao 266300, China; 2. State Grid Qingdao Power Supply Company, Qingdao 266002, China; 3. Shanghai Daobo Electric Co., Ltd., Shanghai 201799, China)

Abstract: In recent years, the application of power distribution automation technology has made great progress, and coverage has been continuously expanded. However, advanced automation technologies such as intelligent distributed feeder automation are still restricted by optical fiber communication. 5G communication technology has the characteristics of more safety and reliability, high speed, low latency, wide coverage, and massive connections. These provide new ideas for the development of distribution automation. In this paper, the application of 5G communication technology to intelligent distributed distribution automation is demonstrated in detail, and an experimental platform is built to verify the communication delay, action response time and stability of automated terminals under 5G communication conditions. The feeder automation is compared and analyzed, and the rapid processing process of the distribution network fault has been upgraded from the minute level to the millisecond level. This offers a very broad application prospect.

This work is supported by Shandong Provincial Key Research and Development Program "Research on the Method of Beam Tracking and Multiplexing based on Codebook in Millimeter Wave Wireless Communication" (No. 2019GGX101015).

Key words: distribution network; intelligent distribution; feeder automation; 5G communication; GOOSE

0 引言

配电网在整个电力网络中起到分配电能的作用, 将电流与相关用户连接起来, 在供电过程中起到至关重要的作用。及时发现配电网中的故障, 并采取相关措施予以排除, 不仅能减少供电企业的经

济损失, 还能为用电者谋取福利, 提升用电体验^[1]。10 kV 配电线路自动化常见实现方式有: 主站集中型自动化、电压-时间型自动化技术及智能分布式技术^[2]。前两种自动化技术都依赖于变电站出线开关跳闸隔离, 造成整条供电线路停电, 大大降低供电可靠性。智能分布式技术作为新一代配电自动化技术, 以其独特的快速定位故障技术, 能够实现现在变电站开关保护延迟时间范围内隔离故障区域和恢复非故障区域供电^[3-5], 从而避免了变电站出线开关跳

基金项目: 山东省重点研发计划“毫米波无线通信基于码本的波束跟踪与复用方法研究”(2019GGX101015)

闸导致的停电范围扩大。智能分布式馈线自动化需要超低延迟、可靠的通信网络支撑,目前实现智能分布式自动化的地区均通过光纤通信组网,然而光纤通信网由于受到配电网网架分布广、散、杂、多等特征的影响,配网光纤大规模应用面临很多实际困难,如:网络结构不稳定、老城区施工难、建设成本高等,使其不能广泛覆盖整个配电网。无线通信作为配电网的通信组网中光纤通信的补充^[6-8],可以弥补光纤通信网的不足。基于上述问题,寻找一种可替代光纤通信实现智能分布式馈线自动化的技术是非常迫切的。本文根据国际标准组织 3GPP 定义的 5G 三大应用场景中的高可靠低延时连接(uRLLC),探索研究基于新一代 5G 无线通信技术,替代以光纤通信实现智能分布式馈线自动化的技术,此项技术的应用可覆盖更多的配电网,提升了配电网的整体供电可靠性,减少了停电时间和范围。

1 电力 5G 通信概述

1.1 5G 通信基本概念

第五代移动通信技术简称 5G,也是新一代蜂窝移动通信技术,其主要特点有大带宽、超高速率、超低延迟和超大网络容量。2019 年 11 月我国三大运营商正式推出 5G 商用。

1.2 5G 通信技术与国家电网的结合点

5G 通信核心网关键技术主要包括:网络功能虚拟化(NFV)、软件定义网络(SDN)、网络切片和多接入边缘计算(MEC)。其中网络切片是基于虚拟化技术,将一张 5G 物联网络在逻辑上切割成多张虚拟的端到端网络。每张虚拟网络之间和网络内的核心网、承载网、无线网都是相互隔离、逻辑独立的,任何一张虚拟网络故障都不会影响到其他虚拟网络。电网业务的多元化发展趋势,需要具备按需编排、业务隔离、超低延迟、超大连接等特征的网络。5G 网络可以满足电网业务的多元化需求^[9-10]。

国际标准组织 3GPP 定义的 5G 三大应用场景:eMBB(增强移动宽带)、uRLLC 以及 mMTC(海量大连接),在国家智能电网的建设过程中,这些应用场景都有需求^[11-13]。5G 通信网络为国家电网带来诸多益处,能灵活应对不同的应用场景为国家电网带来了更高附加值。

2 智能分布式馈线自动化

2.1 智能分布式馈线自动化介绍

智能分布式馈线自动化简称分布式 FA,它是一种快速的故障处理方案。通过保护终端之间的信息交互,实现快速的故障隔离和非故障区域恢复供电,

并将故障处理的结果上报给配电主站。它借助于通信网络,实现保护终端之间的对等通信,完成故障判定的选择性和快速性,将故障识别、故障隔离、恢复供电一次性完成。

2.2 智能分布式馈线自动化信息交互模型

智能分布式馈线自动化整个故障处理过程仅依赖于拓扑中相邻保护终端的对等通信实现,不依赖于集中式控制,示意图如图 1 所示。

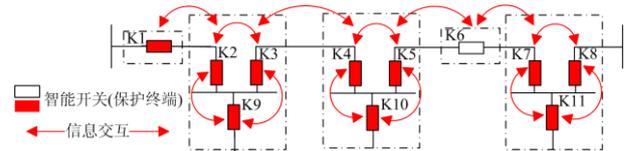


图 1 信息交互示意图

Fig. 1 Schematic diagram of information interaction

2.3 故障定位、隔离恢复原理

智能分布式故障定位原理如图 2 所示。

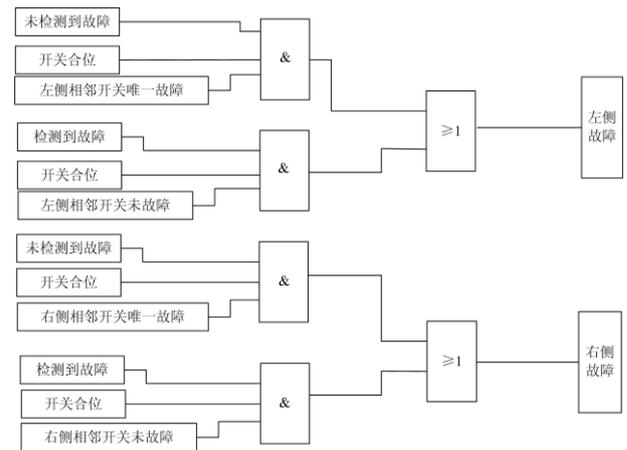


图 2 故障定位逻辑图

Fig. 2 Fault location logic diagram

智能分布式馈线自动化中各智能开关按照实际的网架拓扑来配置左右两侧相邻所有开关的连接关系。

1) 对于一个检测到相间短路故障的闭合开关,如果其右侧相邻所有闭合的开关都没有检测到相间短路故障,则表明故障点在其右侧节点;左侧亦然。

2) 对于一个未检测到相间短路故障的闭合开关,如果其左侧相邻所有闭合的开关有且只有一个开关检测到相间短路故障,则表明故障点在它左侧节点;右侧亦然。

例:如图 1 中 K3、K4 之间发生相间短路,K3 检测到电流值大于过流保护定值,则触发向相邻的开关发送故障信息;K4 收到 K3 故障信息后,触发向相邻的开关发送故障信息。对于 K3 是检测到故

障的合位开关, 右侧相邻闭合开关未检测到故障, 则 K3 判断故障点在其右侧。对于 K4 是未检测到故障的合位开关, 左侧相邻所有闭合开关有且只有 K3 检测到故障, 则 K4 判断其故障点在左侧。

智能分布式故障隔离原理如图 3 所示。

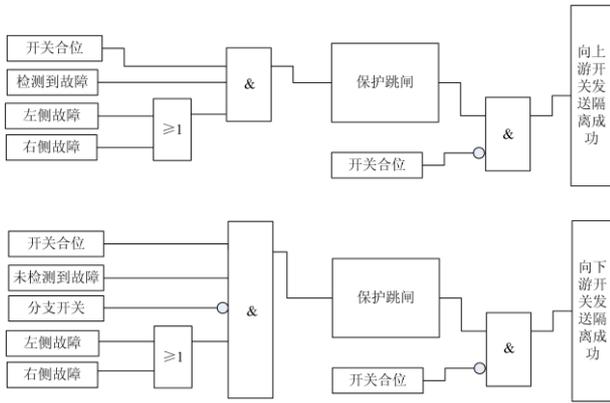


图 3 故障隔离逻辑图

Fig. 3 Fault isolation logic diagram

1) 对于一个闭合开关来说, 如果相间短路故障点不在其左侧或右侧节点, 则不进行隔离;

2) 对于一个闭合开关, 如果在判定相间短路故障点在其左侧或右侧节点, 则: a) 若检测到相间短路故障, 则直接跳闸; 开关分遥信返回后, 向联络开关发送隔离成功信号; b) 若未检测到相间短路故障且为故障对侧分支开关, 则不隔离; 若未检测到相间短路故障且为故障对侧非分支开关, 则直接跳闸, 开关分遥信返回后, 向联络开关发送隔离成功信号。

例: 如图 1 中 K2、K3 之间发生相间短路, K2 检测到电流值大于过流保护定值, 则触发向相邻的开关发送故障信息; K3、K9 收到 K2 故障信息后, 触发向相邻的开关发送故障信息。对于 K2 是检测到故障的合位开关, 其右侧相邻闭合开关未检测到故障, 则 K2 判断故障点在其右侧, K2 保护跳闸, 开关分遥信返回后, 向上游开关发生隔离成功信息。对于 K3、K9 是未检测到故障的合位开关, 其左侧相邻所有闭合开关有且只有 K2 检测到故障, 则 K3、K9 判断其故障点在其左侧, 由于 K9 为分支开关则不执行保护跳闸, K3 保护跳闸, 开关分遥信返回后, 向下游开关发生隔离成功信息。

智能分布式非故障区域恢复原理如下所述。

1) 电源信息转发

变电站下游第一个开关称为电源点开关, 每个电源侧有压的电源点开关间隔 5 s, 周期性向下游发送电源点开关信息和剩余负荷(额定负荷减去电源

点开关负载)信息, 主干合位开关依次传递该信息, 一直传送到联络开关后停止。

2) 联络信息转发

处于分闸状态的开关收到来自某侧的电源点开关信息后, 立即向对侧发送联络信息。主干合位开关依次转发该信息, 一直传送到电源点出线开关或者另一个联络开关后停止传送。

3) 恢复信息转发

当线路发生故障, 故障点下游开关隔离成功后, 根据电源点开关剩余负荷判断启用哪个联络开关进行自愈。并将包括最优联络开关的恢复信息往待恢复区域方向转发, 当符合要求的联络开关收到该恢复信息后, 合闸完成负荷转供。

3 5G 智能分布式馈线自动化可行性研究

3.1 5G 智能分布式馈线自动化如何实现跨网传输

为实现配电终端之间实时数据的快速传输, IEC61850 中 GOOSE 通信技术成为首选。GOOSE 具有超低时延特性, 且 GOOSE 是以高速的 P2P 通信为基础, GOOSE 应用层协议中包含数据有效性检测和 GOOSE 消息的丢失、检查重发机制, 可以保障其实时性和可靠性^[14-16]。实际配电网应用中, 配电终端沿线路安装点多面广, 设备与设备之间安装 5G 通信终端实现信息交换, 需要跨网通信。IEC61850 变电站中 GOOSE 传输机制还不能够直接引用, 文献[17]介绍的一种基于 GOOSE over UDP 的传输方式, 可在 WAN 中传输, 通信协议栈示意图如图 4 所示。GOOSE over UDP 同样在信息安全方面有显著的优势, 通信量只被传输到基于多播地址表的授权端^[18]。

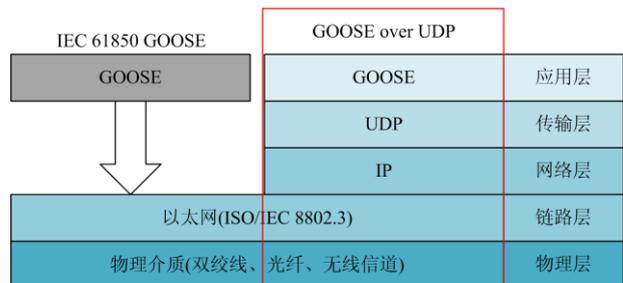


图 4 GOOSE over UDP 通信协议栈

Fig. 4 Transmission stack of GOOSE over UDP

3.2 5G 通信智能分布式馈线自动化关键参数

智能分布式馈线自动化相较主站集中型自动化、电压-时间型自动化技术, 其核心优势在于能够在变电站出口开关动作前完成故障隔离, 从而避免整条故障输电线路停电。为提高供电可靠性, 大多

数地区变电站 10 kV 出线开关保护设定了 0.15~0.3 s 的延时^[19-21], 10 kV 高压断路器分闸动作时间 35~70 ms, 假设变电站出口保护延时设为 150 ms, 由此可见终端保护固有动作时间小于 80 ms(150-70 ms)即可。

以某电气分布式保护终端为例, 其检测到相间故障启动智能分布式馈线自动化动作时序图如图 5, 检测到故障的本地终端不仅会向相邻开关发生故障信息, 触发相邻开关启动分布式 FA, 且同时启动倒计时故障搜索时间 T_3 。故障搜索时间结束后, 本地终端会结合相邻开关的交互信息进行 FA 判断。而故障搜索时间相当于相邻终端之间信息交互时间, 设定的长短取决于终端之间通信延迟。由时序图 5 列出式(1)。

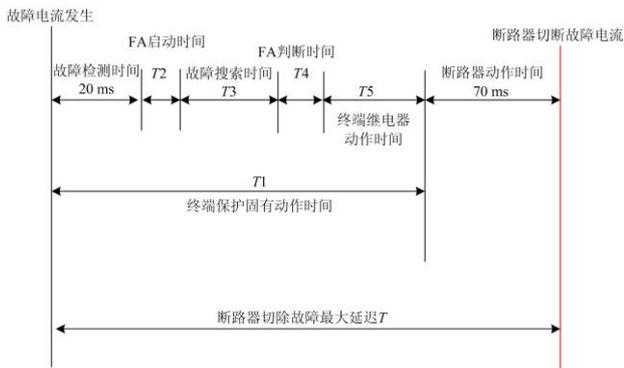


图 5 动作时序图

Fig. 5 Action sequence diagram

$$T_3 < (T_1 - 20 \text{ ms} - T_2 - T_4 - T_5) \quad (1)$$

式中: T_1 终端保护固有动作时间需小于 80 ms, 20 ms 为故障检测工频周期, $T_2 < 5 \text{ ms}$ 、 $T_4 < 10 \text{ ms}$ 、 $T_5 < 10 \text{ ms}$, 通过式(1)可计算出 $T_3 < 35 \text{ ms}$ 。

由此分析可知, 实现 5G 智能分布式馈线自动化关键参数故障搜索时间(信息交互时间)应小于 35 ms, 才能够先于变电站出口开关跳闸, 达到故障快速切除和减少停电范围的目的。

3.3 5G 智能分布式馈线自动化线路故障模拟测试

为验证 5G 通信网下智能分布式馈线自动化能起到快速隔离故障和减少停电范围。在青岛供电公司搭建 5G 智能分布式试验台, 其系统架构如图 6, 由某分布式保护终端、工业 5G 通信路由、模拟断路器组成。目前青岛供电公司联合中国电信青岛分公司以及华为公司已建成 5G-SA 组网模式的电力通信专网, 并且在青岛市供电公司就地部署 MEC 设备, 4 张 5G 电力切片专网, 其 5G 通信单向 ping 时延最小达 7 ms。

将某保护终端故障搜索时间 T_3 参数设定由 25~35 ms(步长 1 ms), 分别进行 30 次 K1 与 K2 环网柜之间线路短路故障模拟测试, 检验分布式 FA 动作逻辑是否如图 7 正确动作, 经测试 $T_3 \geq 28 \text{ ms}$ 时, 分布式 FA 处理过程正确率可达 100%。相同故障模拟方法, 将通信卡换为 4G 后, 即使故障搜索时间 T_3 设为 40 ms, 其动作依然有误动概率, 由此可见 4G 通信不适用智能分布式技术。

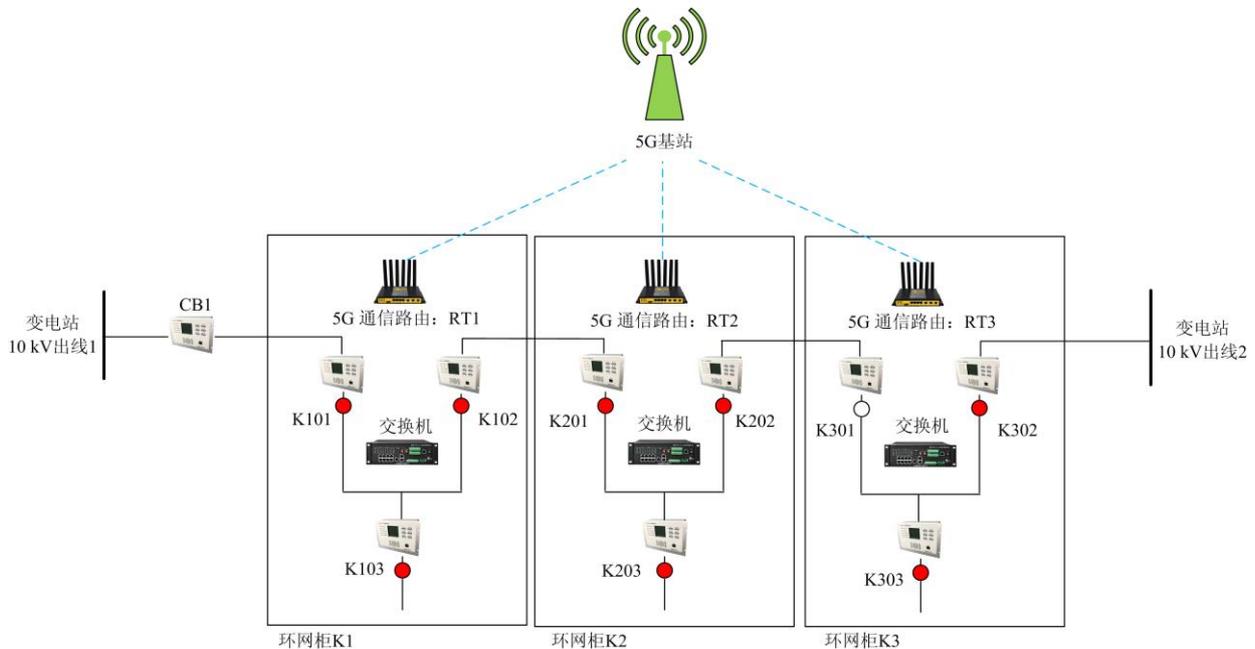


图 6 系统架构示意图

Fig. 6 System architecture diagram

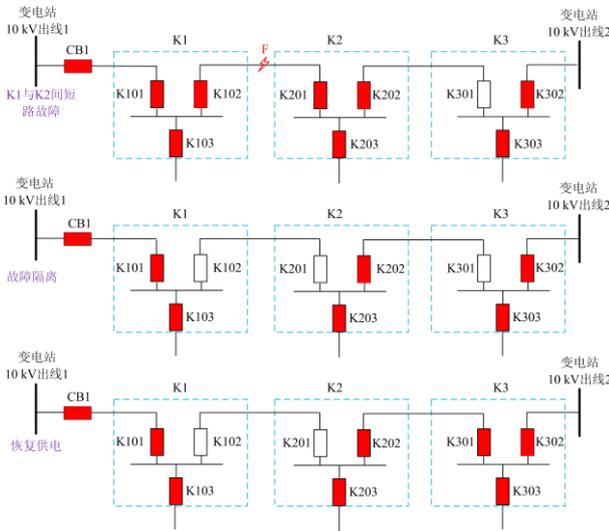


图 7 故障处理过程示意图
Fig. 7 Fault handling process diagram

结合智能分布式原理和动作时序图 5，可得出图 7 中 F 点发生故障后，分段及联络开关动作图 8。为测得图 8 中所示关键时间参数，即故障隔离最大延时 T_g 和联络开关恢复最大延时 T_f ，可将保护终端故障搜索时间 T_3 统一设定为 30 ms，进行故障模拟测试。由于测试模拟开关设备为继电器搭建的模拟断路器，所以最终测得的时间需要加上真实断路器的分闸和合闸动作时间。通过继电保护测试仪施加故障电流和监测 K102 和 K301 保护终端的动作时间，进行了 10 次模拟测试，数据记录见表 1，由表 1 可见 K102 开关加上高压断路器分闸时间 70 ms，故障隔离最大延时也小于 150 ms；由表 1 可见 K301 联络开关动作时间若考虑到真实开关分闸(70 ms)和合闸时间(80 ms)，那么其联络恢复供电时间也最快在 300 ms 以内。

然后测试了 K1、K2、K3 母线故障和 K2、K3 之间故障，由于故障搜索时间倒计时相同，其故障隔离时间与表 1 相似，隔离故障的终端分闸出口时

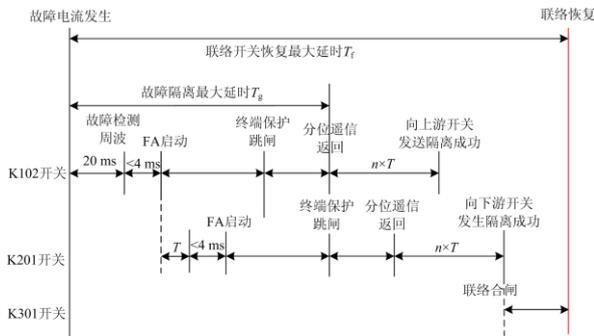


图 8 F 故障点开关动作图
Fig. 8 F failure point switch action figure

表 1 终端动作时间

Table 1 Action time of the terminal

试验次数	5G SA 通信模式(故障搜索 30 ms)	
	K102 动作时间/ms	K301 动作时间/ms
第 1 次	72.19	121.89
第 2 次	71.65	125.81
第 3 次	71.62	129.68
第 4 次	72.21	125.57
第 5 次	72.11	133.72
第 6 次	71.57	126.42
第 7 次	72.16	130.22
第 8 次	72.17	121.55
第 9 次	71.65	133.98
第 10 次	72.57	122.15

间小于 73 ms，由此可见故障隔离时间不受故障点位置影响。联络开关动作时间 K1 母线故障时最大，联络开关动作时间平均 138 ms，是由于故障隔离成功信息是逐级向联络开关发送，每过一个开关柜节点，通信延时和终端信息处理时间和增加不大于 15 ms。

最后测试了发生在变电站出线开关与首开关之间的故障，由于其实际运用中变电站内开关保护装置和线路开关保护装置有差异性，无法实时交互故障信息，且故障隔离需站内开关跳闸。基于上述原因仅测试了通过设定了线路首进线开关失压分闸功能触发 5G 分布式 FA 的负荷转供，恢复非故障区域供电。试验结果：故障隔离时间和恢复时间受限于失压分闸延迟时间参数，通常恢复时间在 5 s 以上，相比集中式恢复时间依然有显著提升。

4 5G 智能分布式馈线自动化应用前景分析

10 kV 电缆线路(封闭的)一般不会发生瞬时性故障，发生故障基本都是永久性的，重合闸易加剧输电线路的绝缘损坏程度，5G 智能分布式馈线自动化无需重合闸即可完成输电线路的故障定位及自愈，相比电压-时间型自动化技术可广泛应用于 10 kV 电缆输电线路或架空线路。

主站集中型自动化技术与智能分布式技术同样依赖通信。主站集中型自动化故障处理过程需要在分钟级，而 5G 分布式 FA 可缩短至毫秒级，从而避免变电站出线开关跳闸，缩小停电范围，进一步提升配电网的供电可靠性。

传统智能分布式馈线自动化保护是基于光纤通信实现，光纤通信虽有延时低、带宽高、信号传输

稳定等优势,但同时存在一些缺陷,例如:需要单独铺设光缆、成本高昂、施工难度大,且部分地区不具备铺设光纤的条件。5G 通信同样可满足配电网智能分布式馈线自动化通信要求,可作为光纤通信实现分布式 FA 的一种补充。5G 通信核心网段和传输网段切片特性同时可满足电网通信信息的物理和逻辑隔离,以适应安全需求;配电网设备分布广、数量众多,基于无线通信技术实现不仅能够更广泛覆盖整个配电网,并且对于存量设备改造及新增设备仅需安装 5G 通信终端,即可实现 5G 分布式 FA 功能。由此可见,5G 通信实现分布式 FA 弥补了光纤分布式 FA 的不足,亦可在 10 kV 配电网中部署。

未来配电网随着分布式能源的渗入,5G 智能分布式馈线自动化仅需增加文献[22]中介绍的基于暂态能量的方向元件作为故障定位判据,即可适应现有分布式 FA 的模式完成故障隔离,非故障区域供电恢复可参照文献[23]中的恢复方法,从而可进一步提升含分布式能源的配电网故障处理水平。

5 结论

本文提出的一种通过 5G 通信通道来实现 10 kV 配电线路智能分布式馈线自动化技术,同样可发挥其故障快速处理的优势。可作为光纤网络实现智能分布式馈线自动化一种补充,利用 5G 通信覆盖优势、成本优势、便于升级改造等优势可广泛应用于整个 10 kV 配电线路。其故障识别、故障隔离、恢复供电一次性快速完成,相较于主流集中型馈线自动化和电压-时间型自动化技术,不仅可减小停电范围,还能将非故障区域恢复供电时间由分钟级缩短至毫秒级,提升整个供电网络的可靠性。

参考文献

- [1] 吕瞳, 崔文, 王雨晨, 等. 配网生产抢修指挥支撑技术的应用探析[J]. 消费导刊, 2018, 28: 98-99.
LÜ Tong, CUI Wen, WANG Yuchen, et al. Analysis on the application of command support technology for production emergency repair of distribution network[J]. Consumer Periodical, 2018, 28: 98-99.
- [2] 范伟松. 10 kV 配电线路中配电自动化及其对故障的处理[J]. 水利与电力, 2015, 31: 69-70.
FAN Weisong. Distribution automation in 10 kV distribution line and its fault treatment[J]. Water Conservancy and Electricity, 2015, 31: 69-70.
- [3] 应俊, 蔡月明, 刘明祥, 等. 基于分布智能控制的供电恢复方案研究[J]. 智慧电力, 2019, 47(7): 62-68, 110.
YING Jun, CAI Yueming, LIU Mingxiang, et al. Power supply recovery scheme based on distributed intelligence control[J]. Smart Power, 2019, 47(7): 62-68, 110.
- [4] 赵丽萍, 王岩鹏, 李建萍, 等. 分布式馈线自动化方案的研究与实现[J]. 配电自动化, 2015(6): 33-36.
ZHAO Liping, WANG Yanpeng, LI Jianping, et al. Research and implementation of distributed feeder automation scheme[J]. Distribution Automation, 2015(6): 33-36.
- [5] 王亚琦. 智能分布式配网自动化系统的应用[J]. 中国新技术新产品, 2019(8): 127-129.
WANG Yaqi. Application of intelligent distributed distribution automation system[J]. New Technology and New Products in China, 2019(8): 127-129.
- [6] 杨昊. 配电网通信技术综合比较分析[J]. 电力大数据, 2018, 21(6): 87-91.
YANG Hao. Comprehensive comparative analysis of distribution network communication technology[J]. Power Big Data, 2018, 21(6): 87-91.
- [7] 熊海军, 张凯. 电力设备监控系统无线网络结构设计策略研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(21): 24-30.
XIONG Haijun, ZHANG Kai. Research on design strategy of wireless network structure in power equipment monitoring systems[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(21): 24-30.
- [8] 王哲, 赵宏大, 朱铭霞, 等. 电力无线专网在泛在电力物联网中的应用[J]. 中国电力, 2019, 52(12): 27-38.
WANG Zhe, ZHAO Hongda, ZHU Mingxia, et al. Application of power wireless private network in ubiquitous power internet of things[J]. Electric Power, 2019, 52(12): 27-38.
- [9] 王莹, 王雪, 刘嫚, 等. 面向智能电网的 5G 网络切片应用前瞻性思考[J]. 电力信息与通信技术, 2020, 18(8): 1-7.
WANG Ying, WANG Xue, LIU Man, et al. Prospective thinking of 5G network slicing application in smart grid[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2020, 18(8): 1-7.
- [10] 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, 2019, 48(3): 2-8.
CHEN Haoyong, LI Zhihao, CHEN Yongbo, et al. Ubiquitous power internet of things based on 5G[J]. Power System Protection and Control, 2019, 48(3): 2-8.
- [11] 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 Information and Communication Technology, 2020, 18(8): 8-19.
- [12] 王宏延, 顾舒娴, 完颜绍澎, 等. 5G技术在电力系统中的应用[J]. 广东电力, 2019, 47(20): 78-85.
- WANG Hongyan, GU Shuxian, WANYAN Shaopeng, et al. Research and application of 5G technology in power systems[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 47(20): 78-85.
- [13] 柳曦, 胡波, 王宾, 等. 5G通信技术在火电厂的应用[J]. 热力发电, 2020, 49(11): 8-13.
- LIU Xi, HU Bo, WANG Bin, et al. Applications of 5G communication technology in thermal power plants[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(11): 8-13.
- [14] 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 Yi, et al. Modeling and real-time reliability analysis of communication network for network protection of distribution network based on IEC 61850[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(20): 97-103.
- [15] 刘刚, 王秀茹, 黄进, 等. 配电网自动化信息在不同传输协议下的性能分析[J]. 电测与仪表, 2020, 57(17): 99-105.
- LIU Gang, WANG Xiuru, HUANG Jin, et al. Analysis of performance for information of distribution network automation under different transmission protocols[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(17): 99-105.
- [16] 韩国政, 陈羽, 徐丙垠. 基于 IEC 61850 的配电网故障检测与保护信息模型[J]. 供用电, 2019, 36(7): 8-12.
- HAN Guozheng, CHEN Yu, XU Bingyin. Information model for distribution network fault detection and protection based on IEC 61850[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(7): 8-12.
- [17] 范开俊, 徐丙垠, 陈羽, 等. 配电网分布式控制实时数据的 GOOSE over UDP 传输方式[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(4): 115-120.
- FAN Kaijun, XU Bingyin, CHEN Yu, et al. GOOSE over UDP transmission mode of real time data of distributed control in distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(4): 115-120.
- [18] SEEWALD M G. Scalable network architecture based on IP multicast for power system networks[C] // Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), February 19-22, 2014, Washington, DC, USA: 19-22.
- [19] 黄伟杰. 变电站继电保护的配置及整定计算[J]. 工程技术, 2016(8): 30-31.
- HUANG Weijie. Calculation and configuration of relay protection in substation[J]. Engineering Technology, 2016(8): 30-31.
- [20] 李品远. 县级电网 35 kV 变电站 10 kV 出线继电保护简易整定[J]. 通讯世界, 2017(6): 201-202.
- LI Pinyuan. Simple setting of relay protection for 10 kV outgoing line of 35 kV substation in County Power Grid[J]. Communication World, 2017(6): 201-202.
- [21] 黎大健, 张磊, 余长厅, 等. 10 kV 出线速断保护短时延对变压器的影响分析[J]. 广西电力, 2019, 42(2): 56-57.
- NI Dajian, ZHANG Lei, YU Changting, et al. Analysis of influence of short time delay of 10 kV outgoing line quick break protection on transformer[J]. Guangxi Electric Power, 2019, 42(2): 56-57.
- [22] 张维, 宋国兵, 豆敏娜, 等. 适应分布式电源接入的双模式馈线自动化研究[J]. 供用电, 2019, 36(5): 66-71.
- ZHANG Wei, SONG Guobing, DOU Minna, et al. Research on dual mode feeder automation solution for distribution networks with distributed generation[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(5): 66-71.
- [23] 刘刚, 陈莎, 全进, 等. 含分布式电源接入的配电网故障恢复方法[J]. 电测与仪表, 2020, 57(18): 50-56.
- LIU Gang, CHEN Sha, TONG Jin, et al. Fault restoration method for power distribution networks considering distributed generations[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(18): 50-56.

收稿日期: 2020-10-29; 修回日期: 2021-03-07

作者简介:

梁子龙(1988—), 男, 通信作者, 本科, 主要从事配电网自动化及保护装置相关技术研究; E-mail: qd_lzl@189.cn

李晓悦(1990—), 男, 本科, 主要从事配电网自动化及配电网运维相关技术研究; E-mail: li-xiao-yue@126.com

邹荣庆(1984—), 男, 本科, 主要从事配电网自动化保护装置工程方案设计研究。E-mail: zourongqing@daobo-elec.com

(编辑 姜新丽)