

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.220308

基于 5G 通信模式下的配电网自愈保护应用

李文君¹, 段登伟¹, 朱雨¹, 杜凌翔¹, 罗劲塘²

(1. 国网成都供电公司, 四川 成都 610000; 2. 国网四川省电力公司经济技术研究院, 四川 成都 610000)

摘要: 因配电网线路分段、分支开关数量多, 导致配电网保护级差配合困难, 故障切除模糊, 故障范围扩大。应用配电自动化系统, 可解决这一问题并完成配电网自愈。目前, 配电自动化多采用主站集中式, 即收集各节点电气量和开关量信息上送至主站, 主站完成逻辑判断, 进行策略下发, 实现故障隔离和电网自愈。但主站式方式数据传输、校验环节多, 故障隔离时间通常在分钟级, 在配电网自愈时, 需短时对主供线路停电。采用基于 5G 通信技术的分布式馈线自动化, 通过下沉计算及逻辑判别节点至配电终端, 实现了毫秒级的故障就地隔离及网络重构, 故障切除精准。探索的配网保护定值优化方案, 通过配网保护定值与分布式馈线自动化故障判别策略的融合配合, 实现了主供线路不停电情况下的故障隔离和配电网重构, 做到了用户停电“零感知”。工程在成都市配电网首次实施应用, 取得了良好效果, 有效解决了城区保护级差配合困难的问题, 为 5G 通信保护在配电网及其他电压等级电网上的拓展应用积累了经验。

关键词: 5G; 分布式馈线自动化; 配电网保护; 整定计算; 自愈系统

Application of distribution network protection based on a 5G end-to-end communication mode

LI Wenjun¹, DUAN Dengwei¹, ZHU Yu¹, DU Lingxiang¹, LUO Jingtang²

(1. State Grid Chengdu Power Supply Company, Chengdu 610000, China; 2. Economic and Technological Research Institute of State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610000, China)

Abstract: Because of the large number of line sections and branch switches in a distribution network, it is difficult to coordinate the protection level difference of the network, and fault removal is fuzzy, and the fault range is expanded. The application of a distribution automation system can solve this problem and complete the self-healing of the network. At present, distribution automation is mainly centralized by the master station, that is, the information on electrical and switching quantity of each node is collected and sent to the master station. The master station completes logic judgment and issues strategies to realize fault isolation and power grid self-healing. There are many data transmission and verification links in the master station mode, and the fault isolation time is usually at the minute level. When the distribution network is self-healing, the main power supply line needs to be powered off for a short time. In this paper, distributed feeder automation based on 5G communication technology is adopted, and millisecond level fault local isolation and network reconstruction are realized through sinking calculation and logical discrimination between nodes and distribution terminals, with accurate fault removal. The explored optimization scheme of distribution network protection setting realizes fault isolation and distribution network reconstruction when the main power supply line is not powered off, and achieves the "zero perception" of power failure by users through the integration of distribution network protection setting and distributed feeder automation fault discrimination strategy. The project has been implemented and applied in the Chengdu urban distribution network for the first time, achieving good results, effectively solving the problem of difficult coordination of protection level difference in urban areas, and accumulating experience for the expansion and application of 5G communication protection in distribution networks and other voltage level power grids.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52190421018Q).

Key words: 5G; distributed feeder automation; distribution network protection; setting calculation; self-cure

基金项目: 国家自然科学基金项目资助“电力网与信息网相依耦合作用下智能电网连锁故障演化与防控机理研究”(52190421018Q)

0 引言

城市配电网地处城市人口密集区, 主要采用电缆连接环网柜、分支箱的形式构成网络连接, 并以手拉手方式提高供电可靠性。由于配网线路上分段开关、联络开关和分支开关级数多, 故障切除时间要求短, 使得保护级差配合困难。选取重要分段和分支开关进行保护配合, 故障切除范围模糊, 故障后陪停用户数量多, 因此, 大型城市配电网保护级差配合的问题亟待解决^[1-4]。

采用专用光纤通道的配电网差动保护解决配网级差的问题, 系统建设和运维成本高, 施工难度大。文献[5-8]提出基于 5G 通信的配网差动保护方案。文献[9]提出一种新的电流差动保护判据, 解决差动保护采样同步的问题。文献[10]提出了一种考虑多 DG 接入配电网的自适应电流主保护方案。文献[11]提出一种基于改进花授粉算法的继电保护定值优化方法。文献[12]提出了一种基于故障电流幅值比与制动系数相配合的有源配电网差动保护方法。文献[13]提出差动保护还须解决 CT 饱和造成差动保护误动或拒动的问题, 差动保护两侧采样的通道时延、抖动造成的精度不足等仍是影响差动保护正确动作的因素。

配电自动化是目前大型城市配电网中广泛使用的故障隔离和自动恢复供电的系统, 主要分为集中式馈线自动化和分布式馈线自动化。集中式馈线自动化, 通过光纤进行通信, 将配电终端收集的运行数据上传至主站, 进行逻辑判断, 以及将主站策略下发至各运行终端, 实现故障隔离, 多采用 GOOSE 模式。集中式控制方式, 需要进行终端与主站信息的来回返校, 其故障判别及恢复时间均在分钟级, 此外, 光纤敷设通道资源占用量大。分布式馈线自动化依赖具备“三遥”功能的配电终端, 不须依赖主站或子站, 实现了故障就地判别控制, 并能及时响应配网网架结构变化, 可精准、快速地实现配电网故障隔离^[14-25]。

本文利用 5G 通信网络的高安全性、高可靠性、低延时的优势, 将其通道作为安全、可靠的数据传输通道^[26-28]。以最小化的数据交换方式, 进行配电终端之间的信息交互, 实现毫秒级的故障隔离, 有效解决了配电网保护级差配合难的问题。通过优化配电网保护定值与分布式馈线自动化 (feeder automation, FA) 策略定值, 构建配电网保护与分布式馈线自动化融合方案, 实现毫秒级配电网故障就地隔离及网络重构。构建的零感知自愈系统, 大幅降低了停电用户数量, 提高了供电可靠性。此外,

本文采用的方案不使用差动保护功能, 避免了 5G 差动保护受 CT 饱和、延时抖动、多节点部署时配电终端 CPU 资源占用量大等因素导致的不可靠动作, 以致通信费用高昂等^[29]。本文提出的改进方案, 在成都电网中进行了实际应用, 取得了良好的效果, 有一定的推广意义。

1 配置 5G 通信模块的配电终端通信方案

在城市配电网环网柜中配置带有 5G 通信模块的配电终端, 可实现终端与终端之间的通信。以环网柜为单元, 将环网柜中开关电流、电压、开关量等数据传递给相邻终端, 并用以逻辑判断及故障隔离。这种通信方式不依赖主站, 通信路径短。相比传统的通过配电终端上传主站模式, 逻辑判断不受其他节点影响, 故障信息收集及判别时间短, 故障隔离快。图 1 展示了各配电终端间的通信方案。

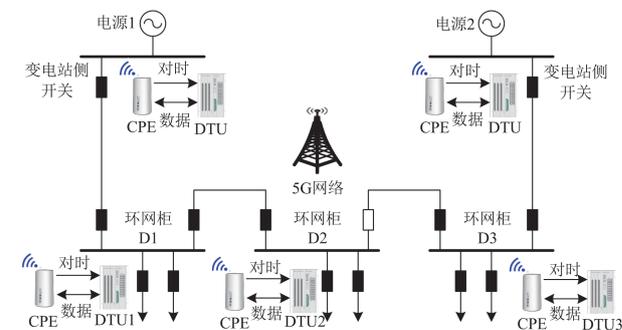


图 1 配电网线路环网柜间通信方案

Fig. 1 Connection between distribution network line and ring network cabinet

配电终端上配置的数据传输单元 (data transfer unit, DTU), 可完成间隔模拟量信息、断路器位置的采集及运行数据、信号的上送, 同时具备开断故障电流的功能。客户前置终端设备 (customer premise equipment, CPE) 为客户前置设备, 将 DTU 需实现的功能上送至 5G 网络进行数据交换。经验证, 端到端链路延时, 即 CPE 间通信总延时小于 30 ms。

在配电网线路上, 配电终端的通信对象是与之相邻的配电终端或预先配置需要进行网络重构的配电终端。各配电终端间通过 5G 网络进行数据交换, 通过配置唯一属性的 IP 地址, 保证了身份的唯一性。

对于当配电网改造时环网柜位置发生变更的情况, 只需要重新下发线路各终端的 IP 配置文件, 即可实现整条线路的故障隔离策略及自愈逻辑更改。逻辑调试及配置下发在一次设备接线方式确定后即可开展, 不受土建施工限制及通信通道施工影响, 具有较高的运行灵活性。各配电终端的 5G 授时采

用内部时钟授时,即 5G 基站通过 GPS 或北斗授时,采用该种方式,对通道延时和抖动要求低。

2 零感知自愈系统构成

2.1 配网保护与分布式馈线自动化融合方案基本策略

在配网重构方式上,集中式配电自动化采用子站上送电气量、开关量等数据至主站,再由主站统一进行策略分析,判断故障后,通过断开变电站侧开关、跳开故障点最近的配电网开关隔离故障。故障隔离成功后,再由主站下发故障恢复方案至各遥控终端,完成配电网恢复供电及网络重构^[30]。这种研判手段,需主站反复确认子站上送或接收的信息及执行反馈的正确性,因此故障隔离及恢复供电通常需要数分钟,甚至采取人工研判的方式。因此,集中式配电自动化方案虽然相较于点熄法,查找故障已大大节省了故障隔离时间及用户停电数量,但是仍不满足故障线路上的非故障用户停电时间。

根据边缘计算的思想,采用分布式馈线自动化,将计算节点下沉至每个配电终端上,并通过 5G 通信实现毫秒级信息交互、故障就地判别与隔离,不需要反复与主站确认信息。故障隔离成功后,通过预先配置的重构点终端,实现网络重构,恢复无故障线路供电,最后再将故障信息及动作信号上送至主站,作为动作依据供调度人员进行信息查询。

具体实施方案为:构建的自愈系统采用以 FA 优先切除故障及网络重构,保护作为配电自动化故障或通信失效等异常情况下的最后一道防线,尽可能地防止故障越级。在线路或用户侧故障后,由配电终端直接收集、计算、判别故障后,断开与故障最近的开关,故障隔离成功后,发送隔离成功信号,再自动进行网络重构,实现系统自愈。

2.2 配电终端判断逻辑及故障隔离策略

以典型的的城市配电网中手拉手式接线方式为例,如图 2 所示,负荷由电源 1 或电源 2 进行主供,其中,任意环网柜中的进出线开关均可作为联络开关,联络开关为 D2-1。D1 环网柜中,进出线开关为 D1-1 和 D1-2,馈线开关为 D1-3、D1-4。馈线开关直接接入用户侧高配或通过分支箱接入用户侧高压配电室。环网柜的进出线开关首位相连构成了配电网的主线开关,对于用户侧故障,不越级至主线开关或变电站侧开关可以大幅缩小停电范围。

对于环网柜进出线开关,可通过与之相邻开关进行通信,进行柜内母线故障或下游出线故障的判别依据。具体实现为:从变电站侧向线路侧供电为正方向,靠近电源侧的开关为上游开关,靠近负荷侧的开关为下游开关。如 D3 环网柜中开关 D3-2,其上游开关为 D4-2,下游开关为 D3-1。

对于母线故障,如图 2 中 K8 故障,D4-1、D4-2、D3-2 均流过故障电流,D4 环网柜的进出线均流过故障电流,D4 环网柜判断故障不在本柜内,且 D4-2 开关判断其上下游开关均有故障电流,判断故障在 D3-2 下游,因此,可有效闭锁不动作。对于 D3-2,其上游开关 D4-2 有故障电流,但下游开关 D3-1 无故障电流,D3 环网柜可判断故障在本环网柜母线上,因此跳开 D3-2 开关。

对于当主线上 K9 发生故障时,故障电流由电源 2 流向故障点,开关 D4-1、D4-2 流过故障电流,对于 D4 环网柜,通过判断本身进出线开关流过穿越性故障判断故障在区外,由于 D3-2 未流过故障电流且 D4-1 流过故障电流判断故障发生在开关 D4-2 下游,D4-2 跳开后,故障切除。具体逻辑框图如图 3 所示。

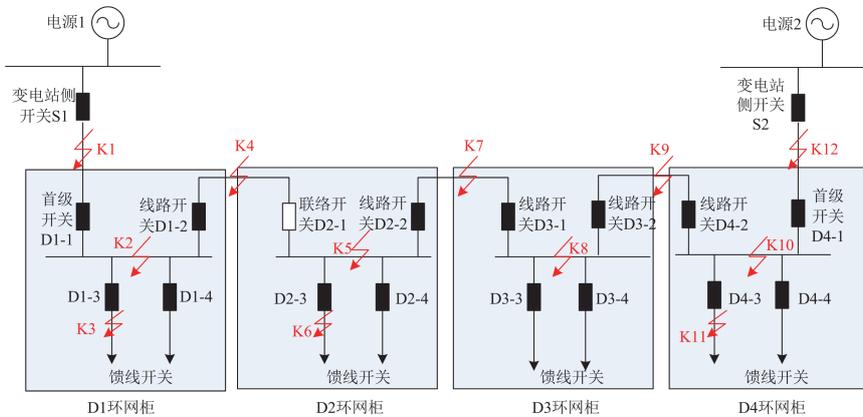


图 2 手拉手式城市配电网典型接线方式

Fig. 2 Typical wiring mode of hand-in-hand urban distribution network

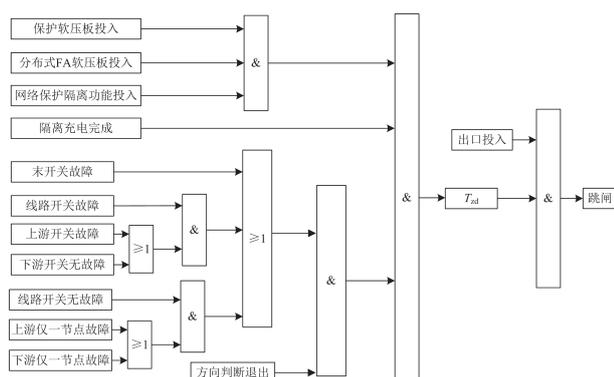


图3 分布式馈线自动化故障隔离逻辑图

Fig. 3 Logic diagram of distributed distribution automation fault isolation

2.3 自愈系统网络重构方案

配电网主干线连接电缆线路, 相较于馈线线路(如馈线开关 D1-3)所带用户线路及高压配电房, 故障发生概率低。另外, 考虑主线故障时, 即便有时间级差配合, 也不能避免其下游所带负荷停电的情况, 因此在主干线上实现快速隔离故障并快速恢复供电对减少用户停电范围具有重要意义。

由此, 在图2中 K9 发生故障后, 系统需要 D2-1 能够迅速合闸, 恢复对失压环网柜 D3 的供电。在逻辑设置上, 考虑 D3-2 收到 D4 环网柜发来的 D4-2 故障判断及动作信号, D3-2 跳开隔离故障, 同时发送故障隔离成功信号给具有联络开关的环网柜, 如图2中的 D2 环网柜, D2 环网柜收到故障隔离成功信息, 合上 D2-1, 恢复 D3 环网柜供电。具体逻辑如图4所示。

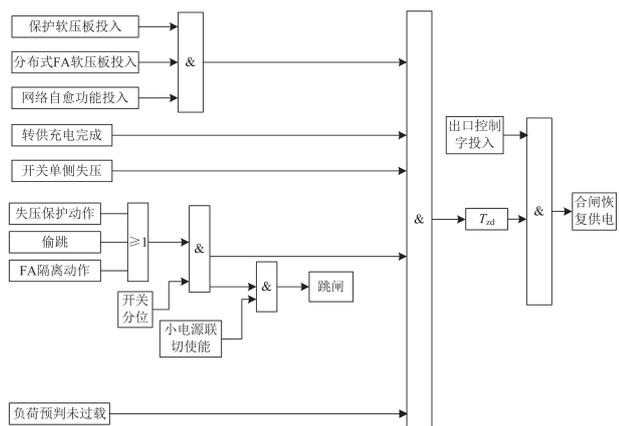


图4 分布式馈线自动化重构逻辑图

Fig. 4 Logic diagram of distributed feeder automation reconfiguration

若配电网中有分布式电源接入, 故障隔离后, 合闸转供之前, 先切除小电源上网开关。

根据上述分析, 在主干线上配置分布式馈线自动化完成主线自愈, 主线开关的保护可投入发信功能。经实验验证, 其故障隔离时间小于 50 ms, 自愈时间受通信的环网柜数量影响, 仍可控制在毫秒级以内。由此, 主干线上可退出保护, 将保护级差留给用户侧开关。在环网柜型手拉手方式的配电网线路上, 可以采用 FA 对主线故障重构的方案进行融合配置。

2.4 首级开关跳闸优化方案

由于变电站侧开关 S1、S2 暂时未配置 5G 通信装置, 在 K1 点发生故障时, 变电站侧开关跳闸, 导致线路上故障点下游环网柜 D1 失压, 此时, 若要进行线路自愈, 需 D1-1 跳闸, D2-1 合闸来恢复供电。因此, 方案考虑优化 D1-1 逻辑, 设置为与变电站相连的首级开关, 其跳闸逻辑需判断本环网柜无故障且本环网柜出线无故障, 但环网柜失压, 则首级开关动作跳闸。逻辑如图5所示。

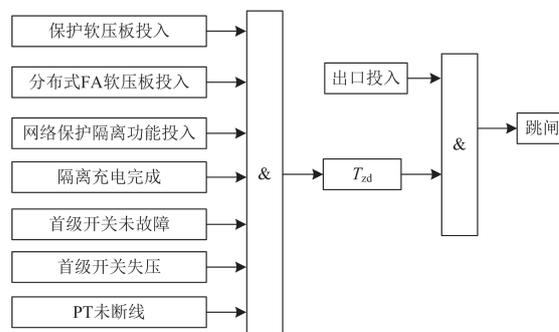


图5 首级开关跳闸优化逻辑图

Fig. 5 Optimization logic diagram of primary switch tripping

此外, 通过开关分位(如 D2-1)且判断两侧环网柜(D1 与 D3)有电压, 自适应识别该开关为网络上的联络开关。从而, 在整条线的故障判断上, 不需要进行方向判别。拓扑寻找方向, 自动识别为电源侧开关向联络开关方向。

2.5 馈线开关保护配置及整定原则

由于主干线上采用 FA 与保护融合配置已经大幅缩短故障隔离及自愈时间, 则馈线开关可采用传统的过流保护或一起纳入 FA 进行判断。对于馈线开关纳入 FA 的模式, 只增加上下游开关配置即可实现。若馈线开关只配置过流保护, 其过流 I 段和过流 II 段分别按照躲过变压器励磁涌流及负荷电流整定, 过流 II 段时间与变电站过流 II 段时间配合。

2.6 5G 通信故障、开关失灵的异常处理

通过实验室模拟, 两个配电终端间的通信时长最短可达 20 ms, 多数情况下小于 50 ms, 但仍然存在通信短时中断继而恢复的情况。针对通信的短时不正常, 配电终端上分布式 FA 可以经短时闭锁后

自动重启,对于长时间的通信异常,FA将退出自动判别功能,防止误动导致用户停电。

当环网柜开关失灵时,可通过跳相邻开关或联络进出线开关保证故障切除范围最小。如环网柜进线开关失灵,依据故障点位置,跳本环网柜出线开关及失灵开关的上一级开关;出线开关失灵,跳本环网柜进线开关及失灵开关的下一级开关;馈线开关失灵,解闭锁本环网柜进线、出线开关。

重构方案的放电逻辑如图6所示。

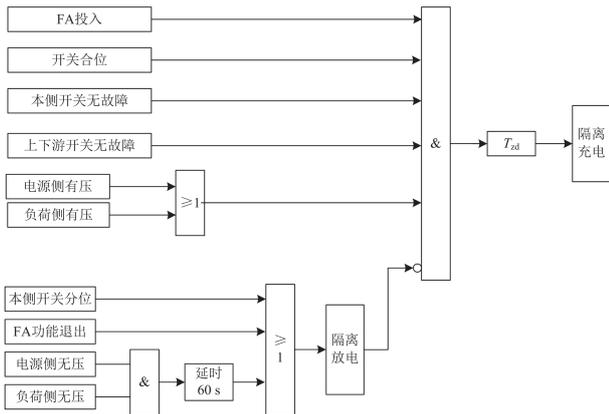


图6 重构功能充放电逻辑图

Fig. 6 Logic diagram of reconfiguration function charge/discharge

3 分布式馈线自动化与配电网保护融合方案的应用

3.1 成都电网的配电网保护配置情况

本工程在成都配电网塔子山片区进行了试点应

用,共在18台环网柜上配置带5G通信模块的配电终端,配电网接线图如图7所示,电网结构如图8所示,各条线路为典型的手拉手式。

其中,110kV塔子山变电站、110kV海椒市变电站、220kV双桥子变电站的10kV出线开关配置两段式过流保护,整定值分别如表1所示,考虑城区配电网所处地区人口密集、电缆故障多为永久性故障等,配电网退出重合闸功能。

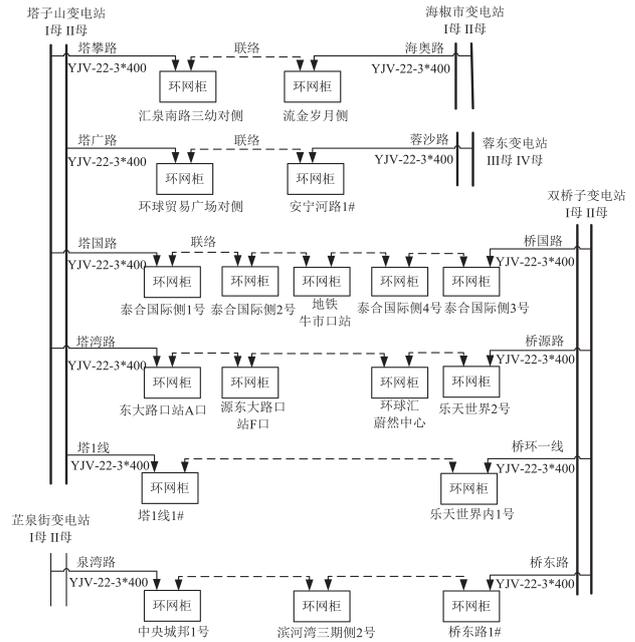


图7 塔子片区配电网接线图

Fig. 7 Distribution network wiring diagram of Tazi area

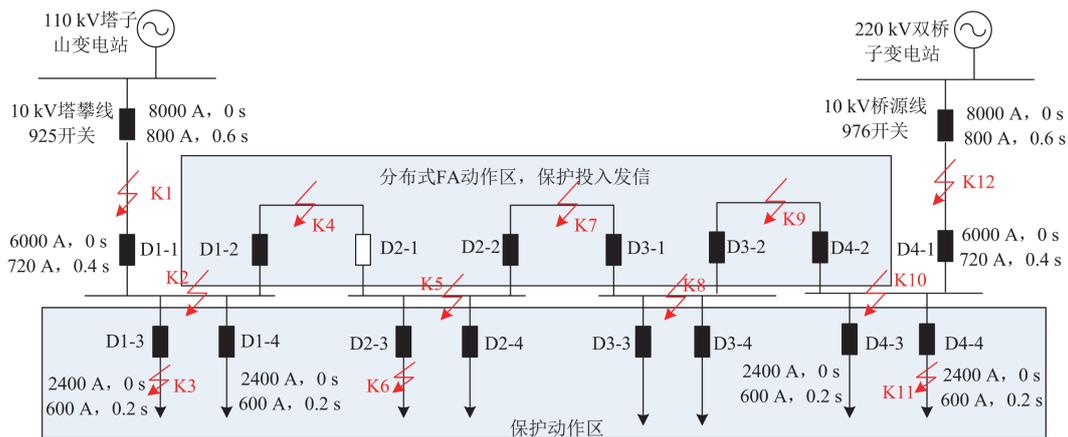


图8 自愈系统FA与保护融合方案整定值配置图

Fig. 8 Setting value configuration diagram of self-cure system FA and protection integration scheme

3.2 分布式馈线自动化启动值的优化

结合国网成都供电公司配电网保护整定值运行情况,给出配电网主线开关和馈线开关的整定值表,如表2所示。

由于变电站侧开关投入了速断保护,在配电网上发生故障后,需要FA进行一定延时的故障保持功能,用以在故障消失后(变电站开关先跳闸情况下),进行逻辑判断。

表 1 变电站侧开关保护整定值

Table 1 Setting value of switch protection at substation side

变电站侧 开关名称	保护整定值过流 I 段	保护整定值过流 II 段
10 kV 塔攀线 925 开关	8000 A, 0 s, 跳闸, 重合闸退	800 A, 0.6 s, 跳闸, 重合闸退
10 kV 桥源线 976 开关	8000 A, 0 s, 跳闸, 重合闸退	800 A, 0.6 s, 跳闸, 重合闸退

表 2 配电终端各开关 FA 整定值及保护整定值

Table 2 FA setting value and protection setting value of distribution terminal switch

变电站侧 开关名称	FA 动作情况	保护整定值
首级开关	600 A, 0.3 s, 跳闸	—
进出线(非首 级开关)	600 A, 0.3 s, 跳闸	—
馈线开关	—	2400 A, 0 s, 跳闸 800 A, 0.6 s, 跳闸

3.3 各种故障下的动作结果分析(表 3)

表 3 各种故障情况下自愈系统动作结果

Table 3 Action results of self-healing system under various faults

故障电流	故障位置	动作结果
≥8000 A	K1 故障 (K12 故障 同理)	S1 速断跳闸; D1 首开关失压保护跳 D1-1 完成 K1 区域故障隔离; D2 终端合闸恢复供电。
	K2 母线故 障(K5、 K8、K10 同理)	S1 速断跳闸; D1 终端跳开 D1-1、D1-2 完成母线 区域故障隔离; D2 终端合闸恢复供电。
	K3 故障 (K6、K11 同理)	S1 速断跳闸; D1 终端的过流速断跳开 D1-5 完成 馈线故障隔离; D2 终端合闸恢复供电。
	K7 故障 (K4、K9 同理)	S2 速断跳闸; D2 终端跳 D2-2、D3 终端跳 D3-2 完成干线区域故障隔离; D2 终端合闸恢复供电。
[800, 8000)A	K1 故障 (K12 故障 同理)	S1 II 段保护跳闸; D1 首开关失压保护跳 D1-1, 完成 K1 区域故障隔离; D2 终端合闸恢复供电。
	K2 母线故 障(K5、 K8、K10 同理)	S1 速断跳闸; D1 终端跳开 D1-1、D1-2 完成 母线区域故障隔离; D2 终端合闸恢复供电。
	K3 故障 (K6、K11 同理)	S1 速断跳闸; D1 终端的过流速断跳开 D1-5 完成 馈线故障隔离; D2 终端合闸恢复供电。
	K7 故障 (K4、K9 同理)	S2 速断跳闸; D2 终端跳 D2-2、D3 终端跳 D3-2 完成干线区域故障隔离; D2 终端合闸恢复供电。

3.4 应用亮点

综上, 本文所提的分布式馈线自动化动作值与保护定值的配合整定, 在配电网变电站侧开关投入速断保护且停用重合闸的情况下, 分布式馈线自动化能以最小负荷损失范围隔离故障。这是与集中式馈线自动化、目前主流分布式馈线自动化的不同之处。

对于馈线故障, 利用环网柜或线路开关自带的保护动作跳闸且闭锁分布式馈线自动化系统, 可确保主线路不失压, 并节约了馈线自动化判断时间, 降低了通道资源的占用量。

采用 5G 通信代替光纤通信, 可大幅减少敷设光纤对城市建设的影响, 且在运行维护上, 只需要对配电网环网柜或开关进行一次性维护。此外, 在配电网改造上, 5G 通信方式较光纤通信方式更为灵活, 适应性更强。

4 结论及展望

本文提出了一种基于 5G 通信的配电网保护定值与分布式馈线自动化融合的配电网自愈系统, 通过实际应用验证了该方案的可行性。该自愈系统有以下优点: 1) 将故障隔离及恢复供电时间缩短至毫秒级, 做到了用户停电零感知; 2) 通过保护与分布式馈线自动化定值的配合整定, 解决了配电网级差配合的问题, 故障定位及隔离更加准确, 大幅缩小配网故障波及范围; 3) 减少了变电站侧开关跳闸次数, 大幅节省了运维成本; 4) 在配电网一次网络结构发生变化时, 配电终端可及时随一次设备变化而调整, 节省了敷设光纤所需的高昂费用; 5) 5G 通信通过 UPF 下沉, 经测算, 按照每个 UPF 可支撑 10G 业务量, 单个业务成本比使用光纤通信成本下降了 300~400 元; 6) 逻辑适应性强, 仅需要更改本开关与上下游开关的配置, 即可扩展应用于有多个联络开关的配电网网络。

采用 5G 通信作为电气量、信号的传输通道, 可以拓展应用在需要进行信息交互、开关互控的变电站上, 例如需要实现区域各自投功能的两座或多座变电站上, 可以彻底解决大型城市内通信光纤线缆敷设不易的问题。此外, 若通过 5G 网络传播方式, 在故障自愈基础上, 可更快速地寻找到配电网上的联络点, 更进一步提高故障处置效率。

参考文献

- [1] 王玲, 邓志, 马明, 等. 基于状态估计残差比较的配电网故障区段定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(14): 132-139.

- WANG Ling, DENG Zhi, MA Ming, et al. A method for locating fault sections in distribution networks based on the comparison of state estimation residual errors[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(14): 132-139.
- [2] 何国庆, 王伟胜, 刘纯, 等. 分布式电源并网技术标准研究[J]. 中国电力, 2020, 53(4): 1-12, 176.
HE Guoqing, WANG Weisheng, LIU Chun, et al. Study on technical standard of distributed resources grid integration[J]. Electric Power, 2020, 53(4): 1-12, 176.
- [3] 谌江波, 陈碧云, 王楚通. 含超导元件的配电网继电保护方案研究[J]. 智慧电力, 2020, 48(8): 84-90.
CHEN Jiangbo, CHEN Biyun, WANG Chutong. Distribution grid relay protection scheme with superconducting device[J]. Smart Power, 2020, 48(8): 84-90.
- [4] 蒋原, 李擎, 冯茜, 等. 基于 BP 神经网络的直流电网故障定位与保护方法[J]. 高压电器, 2020, 56(8): 23-28.
JIANG Yuan, LI Qing, FENG Qian, et al. Fault location and protection method for DC power grid based on BP neural network[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(8): 23-28.
- [5] 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, WANG Xiaofan. Research of security protection strategy for differential protection of 5G-based distribution network[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2020, 43(6): 60-65.
- [6] 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.
- [7] 胡光宇, 张影, 孔为为, 等. 5G 环境下差动保护在电力系统中的应用[J]. 山东电力技术, 2020, 47(6): 10-17.
HU Guangyu, ZHANG Ying, KONG Weiwei, et al. Research on application of differential protection in power system under 5G environment[J]. Shandong Electric Power, 2020, 47(6): 10-17.
- [8] 娄为, 韩学军, 韩俊, 等. 基于 5G 和光纤综合通道的输电线路差动保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(1): 158-166.
LOU Wei, HAN Xuejun, HAN Jun, et al. A transmission line differential protection method based on 5G and optical fiber integrated channels[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(1): 158-166.
- [9] 李斌, 范玲, 姚斌, 等. 数据自同步条件下的配网馈线电流差动保护[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(10): 1-8.
LI Bin, FAN Ling, YAO Bin, et al. Current differential protection for feeders in distribution network under data self-synchronization condition[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2020, 32(10): 1-8.
- [10] 全蕾, 詹红霞, 张勇, 等. 考虑多 DG 接入的配电网自适应电流主保护方案[J]. 智慧电力, 2021, 49(8): 63-69.
QUAN Lei, ZHAN Hongxia, ZHANG Yong, et al. Adaptive current main protection scheme of distribution network accessed with multiple distributed Generations[J]. Smart Power, 2021, 49(8): 63-69.
- [11] 焦飞, 闫冬, 李仲青, 等. 基于改进离散花授粉算法的继电保护定值优化方法的研究[J]. 智慧电力, 2021, 49(5): 48-55.
JIAO Fei, YAN Dong, LI Zhongqing, et al. Relay protection setting optimization based on improved discrete flower pollination algorithm[J]. Smart Power, 2021, 49(5): 48-55.
- [12] 崔子轩, 袁婉玲, 郝正航, 等. 基于电流幅值关系与制动系数相配合的有源配电网差动保护方案[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(12): 1-7.
CUI Zixuan, YUAN Wanling, HAO Zhenghang, et al. Differential protection scheme of active distribution network based on current amplitude relation and braking coefficient[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(12): 1-7.
- [13] 田涛, 张兆君, 张帆, 等. CT 饱和和影响因素及其对差动保护的影响分析[J]. 电工技术, 2020(17): 89-92.
TIAN Tao, ZHANG Zhaojun, ZHANG Fan, et al. Factors affecting CT saturation and its impact on differential protection[J]. Electric Engineering, 2020(17): 89-92.
- [14] 梁子龙, 李晓悦, 邹荣庆, 等. 基于 5G 通信智能分布式馈线自动化应用[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(7): 24-30.
LIANG Zilong, LI Xiaoyue, ZOU Rongqing, et al. Intelligent distributed feeder automation application based on 5G communication[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(7): 24-30.
- [15] 王哲, 葛磊蛟, 王浩鸣. 10 kV 配电网馈线自动化的优化配置方式[J]. 电力系统自动化学报, 2016, 28(3): 65-70.
WANG Zhe, GE Leijiao, WANG Haoming. Optimal configuration of 10 kV feeder automation for distribution systems[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2016, 28(3): 65-70.
- [16] 金文佩. 城市配电网智能分布式馈线自动化系统研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2016.
JIN Wenpei. Research on intelligent distributed feeder

- automation system for urban distribution network[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2016.
- [17] 葛晨. 分布式馈线自动化在旅顺 10 kV 农网的应用研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- GE Chen. Research on the application of distributed feeder automation in LVSHUN 10 kV rural network[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [18] 缪锐. 考虑分布式电源接入的配电网线路保护研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- MIU Rui. Research on distribution network line protection considering distributed generation access[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [19] 曾照新. 配电网馈线自动化技术研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
- ZENG Zhaoxin. Research on distribution feeder automation[D]. Changsha: Hunan University, 2013.
- [20] 高孟友. 智能配电网分布式馈线自动化技术[D]. 济南: 山东大学, 2016.
- GAO Mengyou. Distributed feeder automation technology for smart distribution network[D]. Jinan: Shandong University, 2016.
- [21] 陈春. 智能配电网自愈控制关键技术与方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
- CHEN Chun. Research on self-healing control key technologies and methods of smart distribution systems[D]. Changsha: Hunan University, 2016.
- [22] 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 suggestion[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(19): 6-10, 21.
- [23] 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.
- [24] 配电网分布式馈线自动化技术规范: DL/T1910—2018[S].
- Technical specifications for distributed feeder automation of distribution networks: DL/T1910—2018[S].
- [25] 刘东, 盛珑. 配电自动化实用模式[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(5): 40-44.
- LIU Dong, SHENG Long. Some practical schemes of distribution automation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(5): 40-44.
- [26] 于洋, 孙辉, 方照, 等. 配电网保护通信时延需求约束的 5G 通信切片接入优化研究[J]. 供用电, 2021, 38(5): 29-34.
- YU Yang, SUN Hui, FANG Zhao, et al. Research on 5G communication slice access optimization with communication delay demand constraint of distribution network protection[J]. Distribution & Utilization, 2021, 38(5): 29-34.
- [27] ZHANG Qiang, YA Ping, LI Zhijun, et al. Exploration and application of 5G network slice in electric power[C] // 2021 IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference, 2021: 644-648.
- [28] 赵艾萱, 黄杨, 宋戈, 等. 5G 独立组网模式下的配网保护配置策略及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(8): 24-31.
- ZHAO Aixuan, HUANG Yang, SONG Ge, et al. Configuration strategy and application of distribution network protection based on standalone 5G[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(8): 24-31.
- [29] 赵宏大, 王哲, 朱铭霞, 等. 5G 通信技术在泛在电力物联网的应用[J]. 南方电网技术, 2020, 14(7): 9-17.
- ZHAO Hongda, WANG Zhe, ZHU Mingxia, et al. Application of 5G communication technology in ubiquitous power internet of things[J]. Southern Power System Technology, 2020, 14(7): 9-17.
- [30] 刘健, 赵树仁, 贡保记, 等. 分布智能型馈线自动化系统快速自愈技术及可靠性保障措施[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(17): 67-71.
- LIU Jian, ZHAO Shuren, YUN Baoji, et al. Fast self-healing technology in distributed intelligent feeder automation systems and its reliability enhancement[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(17): 67-71.

收稿日期: 2022-03-08; 修回日期: 2022-08-14

作者简介:

李文君(1983—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向为配电网继电保护; E-mail: liwenjun911@sina.com

段登伟(1974—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 研究方向为地区电网调度管理。

(编辑 姜新丽)