

配电网故障自愈关键技术及恢复策略研究

陈栋¹², 李玉平¹², 张玮¹², 胡兵¹², 齐以年¹², 王闰羿¹²

1. 国电南京自动化股份有限公司, 江苏省南京市 210003;

2. 南京国电南自电网自动化有限公司, 江苏省南京市 211153;

Research on Key Technologies of Fault Self-healing and Fault Recovery Strategy for Distribution Network

CHEN Dong¹², LI Yuping¹², ZHANG Wei¹², HU Bing¹², QI Yinian¹², WANG Runyi¹²

1. Guodian Nanjing Automation Co., Ltd., Nanjing 210003, Jiangsu Province, China;

2. Nanjing Guodian Nanzi Grid Automation Co., Ltd., Nanjing 211153, Jiangsu Province, China.

摘要: 为提高配电网的供电可靠性, 提出了的适应配电网特有运行场景的故障自愈关键技术。针对断路器与负荷开关混用的复杂配置场景, 提出了快速充电与普通慢速充电相融合的自愈方案; 结合配电网系统与输电系统中断路器失灵的差异, 优化了断路器失灵逻辑, 实现断路器失灵情况下的故障隔离; 采用了检同期合闸的自愈策略, 以防止分布式电源联切导致的大规模脱网; 基于自愈合闸后负荷转移的计算, 实现了过负荷的预判, 避免合后过负荷导致的负荷转供失败。同时, 分析了线路重合闸、自愈以及各自投在故障恢复中扮演的角色, 并提出了基于优化配合关系的故障恢复策略。最后, 仿真测试验证了方案在各种故障下动作行为的准确性, 有助于提高配电网的供电可靠性。

关键词: 配电网故障自愈; 快速充电; 负荷开关; 负荷转移计算; 三级故障恢复策略

ABSTRACT: In order to improve the reliability of power supply of distribution network, the key technologies of fault self-healing suitable for the unique operation scenario of distribution network are proposed. For the complex scenario of the mixed use of circuit breaker and load switch, a self-healing scheme combining fast charging and ordinary slow charging is proposed; Combined with the difference of circuit breaker failure between distribution network system and transmission system, the breaker failure protection is optimized to realize fault isolation under circuit breaker failure; The self-healing strategy of synchronous closing is adopted to prevent large-scale disconnection caused by the removal of distributed generation; Based on the calculation of load transferred after self-healing closing, whether overload will occur can be judged in advance, which can avoid the failure of load transfer. At the same time, the roles of line reclosing, self-healing and automatic bus transfer in fault recovery are analyzed, and a fault recovery strategy based on optimal cooperation relationship is proposed. Finally, the simulation test verifies the accuracy of the action behavior of the scheme under various faults, which is helpful to improve the power supply reliability of distribution network.

KEY WORD: fault self-healing of distribution network; fast charging; load switch; calculation of load transferred; three-step-strategy of fault recovery

1 引言

配电网扮演着连接电力用户最后一公里的重要角色, 对人们的生产、生活具有极大的影响。传统配电网一般为单端电源结构, 配电网线路以过流保护为主, 级差配合困难, 越级跳闸事故频发。近年来, 随着新能源的发展, 分布式电源大量接入配电网, 配电网结构由单电源向多电源转

变, 使得配电网结构更加复杂化, 进一步影响了保护的选择性和速动性^[1-5]。

目前配电网中的故障自愈普遍采用重合器方式和主站集中控制方式。重合器方式需要开关设备多次重合以实现故障恢复, 自愈时间长。主站集中控制方式基于主站系统获取的区域信息完成故障隔离和恢复, 故障隔离与恢复对主站系统的依赖度高, 且故障处理耗时长^[6-10]。

为解决上述问题,不依赖主站通信的分布式配电保护自愈得到了快速发展,文献[11]提出了一种基于智能终端单元(STU)的分布式故障自愈方案,在负荷开关均为断路器的条件下,实现快速故障区段定位、隔离和非故障区段的供电恢复。文献[12]介绍了继电保护功能配置的优化方案和自愈控制的实现策略,并针对不同的接线形式和基础条件给出了一些工程应用实例。文献[13]提出了一种拓扑自适应、开关协调配合的配电网分布式保护自愈方法,通过动作定值和时序的协调配合,实现故障切除、隔离以及健全区域供电恢复。

然而,现有方案对于配电网中断路器与负荷开关混用的场景以及分布式电源大规模接入等问题未能提出有效的解决方法。本文针对配电网中的特有的应用场景进行了关键技术研究,并对配电网的多种故障恢复方法进行梳理,形成了较为完善的三级故障恢复策略,在保证供电可靠性的前提下,提高配电网网架结构的稳定性。

2 自愈系统架构

分布式自愈功能的实现需依靠安装在不同开关站的自愈装置之间的通信,而不依赖于主站通信。自愈装置之间交互系统运行状态、故障信息、负荷转移情况等信息,实现故障的隔离和恢复。装置之间可以采用光纤通信或者以5G为代表的无线通信方式^[14-16]。

2.1 自愈系统功能配置

针对如图1所示的配电网典型的双环网接线方式,自愈系统方案配置如下:

1) 完善的主保护。故障恢复的实现需依赖于故障的快速可靠隔离完成,因此分布式自愈系统中需配置完善的快速主保护:主干线路配置全线速动的快速主保护,如纵联电流差动保护或纵联方向保护,同时含有完整的后备保护和重合闸功能;开关站母线配置母线差动保护,作为母线故障的快速主保护;馈线和小电源线路以过流和零序过流作为主保护。

2) 自愈及故障隔离。每个开关站按母线配置自愈装置,每段母线配置1台。自愈装置配置故障自愈、备自投和故障解列、无压跳闸、失灵保护等功能。同时装置集成主干线路快速主保护、

母线差动保护、馈线常规线路保护等功能,实现故障定位,并在保护装置拒动时基于故障定位的结果进行故障隔离。

3) 外部优先。当外部独立配置的保护装置中主保护动作时,不再进行自愈装置的故障定位判别,以外部保护装置的动作为准。为获取外部保护装置的动作信息,主干线路保护装置的差动保护动作和后备保护动作出口,以及母差动作出口需接入自愈装置,用以结合断路器位置信息判断故障是否隔离完成。

2.2 主保护功能的灵活配置

自愈装置集成的主干线路快速主保护、母线差动保护、馈线常规线路保护等功能,也可直接作为保护功能使用,在故障发生后动作直接切除故障。因此,主干线保护、母线差动保护以及馈线保护功能可以选择由独立配置的线路或母线保护装置实现,也可由自愈装置实现。当配置独立的保护装置时,自愈装置中的相应保护功能作为故障定位使用,并在独立配置的保护装置主保护拒动时进行故障隔离。

图1中S2~S3的环线展示了采用自愈装置中的保护功能进行故障切除的配置方式,S1~S4的环线展示了外部独立配置保护装置的配置方式,图中每一个保护装置在功能上均可由自愈装置代替。

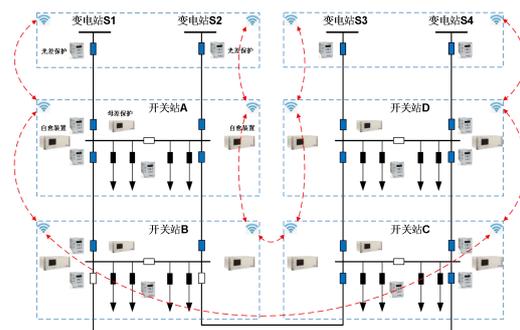


图1 自愈系统架构图

Fig.1 Architecture diagram of self-healing system

灵活的主保护配置方案,可以适应配电网中快速保护自愈新建和改造的不同需求。对于存量开关站,可考虑尽量保留现有的保护装置,自愈装置中相应的保护功能作为故障定位使用;对于新建开关站,为减少开关站内设备数量,保护功能可由自愈装置完成,实现故障的切除和隔离。

3 故障自愈关键技术

与输电系统相比，配电网系统具有很多独有的运行场景，比如：配电网中存在大量的断路器与负荷开关混用的场景；配电网中断路器失灵可能不会影响故障的切除，只会影响故障隔离；配电网中分布式电源的比重越来越高，正在转变为有源配电网；随着负荷的快速增长，故障恢复需要考虑过负荷的问题。这些问题都给故障自愈带来了新的挑战，需要采用新技术进行针对性地处理。

3.1 快速充电技术

配电网中存在大量断路器与负荷开关混用的场景，如图 2 所示，开关站 B 与 C 之间的线路两侧为负荷开关 QL₅ 和 QL₆，其他主干线开关为断路器。

由于负荷开关无法切除故障电流，需在故障切除后才能断开。对于 F₁ 故障，参照配电网的传统处理方式，自愈动作逻辑为：1) 上一级后备保护跳闸跳开 QF₈ 断路器，切除故障；2) 故障切除后，根据故障定位信息跳开负荷开关 QL₅ 和 QL₆，实现故障隔离；3) 故障隔离完成后，开环点开关 QF₄ 自愈合闸。自愈合闸后可以恢复开关站 B 的供电，但开关站 C 无法恢复供电。因此，负荷开关配置场景下，对于上一级跳闸所产生的失电区域，传统自愈方法无法恢复供电。

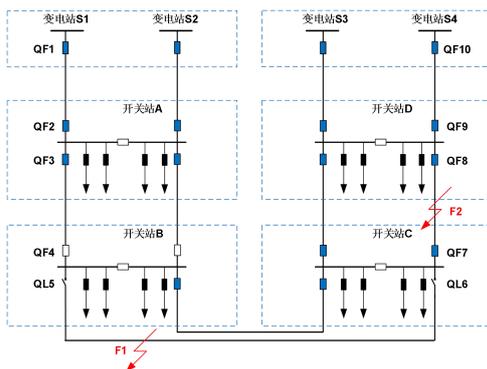


图 2 断路器与负荷开关混用场景

Fig.2 Mixed use of circuit breaker and load switch

为解决上述问题，需优化自愈逻辑，在自愈功能中增加快速充电动作逻辑。快速充电功能仅用于后备保护动作跳开的断路器，且仅在后备保护动作后短时投入，动作逻辑为：1) 在后备保护动作且满足自愈充电条件后，经短延时充电完成；

2) 在收到故障隔离完成信号后，合后备保护跳开的开关，实现供电恢复。

对于上述 F₁ 故障，快速充电逻辑的动作过程如下：1) QF₈ 后备保护动作跳开断路器后，经短延时完成以 QF₈ 为开环点自愈充电；2) 故障切除后，跳开负荷开关 QL₅ 和 QL₆，完成故障隔离；3) 收到故障隔离完成信号后，合 QF₈ 断路器，完成开关站 C 的供电恢复。

基于快速充电与普通慢速充电自愈逻辑的结合，快速保护自愈系统可以适应断路器与负荷开关混合配置的复杂场景，最大程度地恢复故障区段两侧非故障区段的供电，降低故障情况下负荷开关带来的影响。

3.2 基于双位置的失灵判别

断路器失灵保护一般在主网中应用较多，防止保护跳闸后，断路器失灵无法跳开，此时跳开与失灵断路器相邻的所有断路器。其主要判别方法：收到保护跳闸命令后，故障电流一直存在，经延时后失灵保护动作。

配电网中配置了具备选择性的快速保护和自愈功能，对可靠准确地隔离故障也提出了要求。对于线路故障，需线路两侧的断路器均跳开，自愈才能动作，以实现非故障区段的供电恢复，否则将合于故障。

配电网中单端电源比较多，线路故障时，电源侧断路器跳开后，故障即已切除，同时跳闸命令收回。线路另一侧断路器失灵时，不存在故障电流，也无跳闸开入，因此无法参考主网的失灵判断方法。如图 2 中 F₂ 故障时，QF₈ 跳开后，QF₇ 失灵的情况。

本文提出了基于双位置的失灵判别方法：1) 对于需要进行失灵判别的主干线开关，装置分别接入断路器合位和跳位两个辅助触点；2) 装置收到跳闸开入后，根据失灵延时定值的大小自适应调整跳闸开入的展宽时间，也即失灵判别的开放时间。正常运行时，断路器合位为 1，分位为 0；收到保护跳闸开入后，持续判断断路器双点位置，在跳闸开入开放时间内，仅当合位和分位均未变化，且延时满足失灵跳闸延时定值时，失灵保护动作。采用双点位置判断失灵，可有效防止断路器某一辅助触点异常时，失灵保护误动，提高可靠性。

失灵保护动作后, 可仅跳开主干线路、分段和小电源线路, 而不跳开负荷线路, 以便于后续快速恢复运行方式。失灵动作可远跳对侧, 以实现故障的可靠隔离。

3.3 分布式电源的处理

自愈和备自投功能均在母线无压后启动, 故障发生后, 尽管故障被快速切除, 但是由于分布式电源的支撑作用, 母线电压可能无法满足无压条件, 导致自愈无法动作。而分布式电源单独供电的电能质量较差, 会对电网设备造成影响。

为创造无压条件, 故障发生后保护跳闸时, 自愈装置需经延时联切分布式电源。联切的原则为失电区域内的所有分布式电源均切除, 也即联切故障点与开环点之间的所有分布式电源, 范围外为非故障区段, 分布式电源可以正常运行。同时配置故障解列作为后备功能, 在电压或频率异常时, 经延时解列分布式电源。

采用上述方法时, 在故障情况下, 失电区域内的所有分布式电源必然会被切除。然而, 随着分布式电源的大量接入, 其比重越来越高, 联切将导致大规模脱网, 对分布式电源很不友好。

因此需研究分布式电源并网运行下的自愈方案, 本文采用了快速检同期处理方案, 在保留分布式电源情况下进行自愈同期合闸。这对自愈功能有两点要求: 1) 由于分布式电源的带负荷能力有限, 自愈合闸需在短时间内完成, 同时合闸时间需考虑分布式电源的故障穿越能力并与分布式电源侧的保护配合, 防止分布式电源提前脱网; 2) 自愈需进行检同期合闸, 防止对分布式电源产生冲击, 当在一定时间内一直不满足同期条件时, 则直接联切分布式电源, 确保后续自愈逻辑的顺利执行。

3.4 合后过负荷保护与负荷转移计算

从供电的角度来讲, 故障自愈就是在故障情况下实现负荷的转移, 确保不损失负荷。然而, 对于运行线路来说, 转移来的新增负荷可能会导致过负荷运行。针对这种情况, 传统的方法是配置过负荷保护。对于自愈系统, 在自愈合闸后, 需要实时检测主干线上的每一个接点的过负荷状态, 当任一接点出现过负荷时, 表明单端电源无法支撑所有负荷, 此时将过负荷标志传递给开环点装置, 跳开开环点, 结束自愈逻辑。

然而, 这种方法只能在事后进行过负荷处理, 可能会对设备造成一定的影响。为避免这种情况, 需考虑预判线路的过负荷状态, 若合闸后转移的负荷会导致过负荷的发生, 则不再合开环点, 防止在自愈合闸后出现过负荷运行情况。基于转移负荷的正确识别可以实现过负荷的额预判, 以图2中 F_2 故障为例, 方法如下:

1) 本线路所能支撑的最大负荷整定。

自愈系统的首开关 QF_2 和 QF_9 分别对应 S_1 和 S_2 两个变电站出线, 两个开关处整定对变电站出线所能支撑的最大负荷 W_{QF2m} 、 W_{QF9m} 。

2) 实时负荷及转移负荷计算。

自愈装置实时计算的两个首开关的当前负荷 W_{QF2} 、 W_{QF9} 。

故障隔离完成后, 已跳开的、靠近开环点的主干线路开关在故障前的负荷即为自愈动作后的转移负荷。如图2所示, F_2 故障发生后, 线路差动动作跳开 QF_7 和 QF_8 , QF_7 为更靠近开环点的断路器, 其故障前的负荷 W_{QF7} 即为转移的负荷。

3) 自愈后的过负荷预判。

基于转移负荷计算非故障区域首开关 QF_9 自愈后的负荷 W_{QF9}' , 其大小为当前负荷与转移负荷之和, 即 $W_{QF9}' = W_{QF9} + W_{QF7}$ 。当自愈后负荷 W_{QF9}' 大于线路最大负荷能力 W_{QF9m} 时, 闭锁自愈, 否则允许自愈合闸。由此可实现自愈动作后的过负荷预判, 避免合闸后过负荷, 降低对系统的冲击。

4 三级故障恢复策略

配电网故障恢复主要基于三个功能实现: 线路重合闸、备用电源自投以及故障自愈系统。由于传统的就地型和集中式故障恢复方法自愈时间长, 难以实现三者的有机结合。基于分布式自愈系统速动性和可靠性的提升, 以及对配电网复杂应用场景的广泛适应, 故障自愈功能已经具备了与线路重合闸以及备用电源自投配合的能力。

对于架空线路等可投入重合闸功能的配电网系统, 故障切除后, 采用重合闸实现瞬时性故障的供电恢复; 对于永久性故障重合闸无法恢复供电, 或者电缆线路不投入重合闸时^[7], 采用自愈功能实现供电恢复; 当自愈完成后发生转换性故障等复杂场景, 无法恢复供电时, 由备自投完成

供电恢复。由此构成重合闸、故障自愈、备用电源自投三级故障恢复策略。

4.1 自愈与重合闸功能的配合

为实现自愈功能与重合闸功能的配合，设置自愈跳闸时间定值，按躲过重合闸时间整定，同时要求自愈合闸之前必须先执行跳闸命令。若独立配置的线路差动保护正确动作，自愈装置经自愈跳闸时间定值延时后执行跟跳命令，之后才能执行自愈合闸；若独立配置的差动保护拒动，自愈装置的故障定位功能经延时跳闸，之后执行自愈合闸，从而确保重合闸优先动作。时间配合关系如图 3 所示。

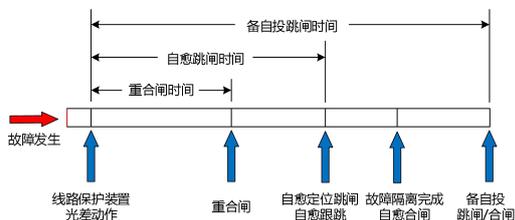


图 3 自愈、重合闸及备自投时间配合图

Fig.3 Time coordination of self-healing, reclosing and automatic bus transfer

4.2 自愈与备用电源自投功能的配合

对于配置自愈功能的配电网系统，其备自投功能一般仅保留分段备自投功能，自愈功能采用主干线路开环点开关实现供电恢复，此时两段母线仍然独立运行；备自投采用分段开关，依靠另一段母线实现本环的供电恢复。

为实现自愈优先，备自投作为后备的故障恢复原则，自愈和备自投功能需做如下配合：1) 自愈和备自投同时充电时，自愈动作，备自投不动作；2) 自愈动作完成后，若供电未恢复，备自投仍然可以继续动作。为此，可通过自愈充电情况下闭锁备自投出口，而不是直接放电的方式来实现。

为了灵活应用，自愈与备自投逻辑中也可不设置优先级，两者可以通过动作时间进行配合，确定动作时间先后顺序，时间配合关系如图 2 所示，由此实现灵活选择。

基于重合闸、故障自愈、备用电源自投三级

故障恢复策略，可以实现瞬时性故障就地快速恢复、永久性故障主干线转供，并在复杂转换性故障情况下不损失负荷，在保证供电可靠性的前提下，提高配电网网架结构的稳定性。

5 仿真试验

为验证本文快速保护自愈方案的准确性，基于图 1 的典型接线方式，基于实时数字仿真系统 (RTDS) 搭建了如图 4 所示仿真模型。系统采用双环网接线方式，共 4 个开关站，其中开关站 A、C、D 各 2 条进线、1 条馈线，开关站 B 配置 2 条进线和 1 条小电源线路。由于双环网中两个环线的结构和配置相同，本次试验针对 S1 与 S4 变电站之间的环网开展。保护配置参照第一章中保护自愈方案配置，其中线路、母线均配置独立的保护装置，自愈装置的保护功能作为定位使用。

为验证各种运行工况下发生故障时，自愈装置的动作情况，RTDS 系统共设置 102、103、104、105、405、404、403 和 402 开关共 8 个开环点运行方式，每种运行方式下模拟 F1~F15 共 15 个故障点，每个故障点模拟单相接地故障和相间短路 2 种故障类型，每种故障类型下模拟保护正确动作切除故障、保护拒动、开关失灵 3 种场景，考核自愈装置的动作行为准确性。

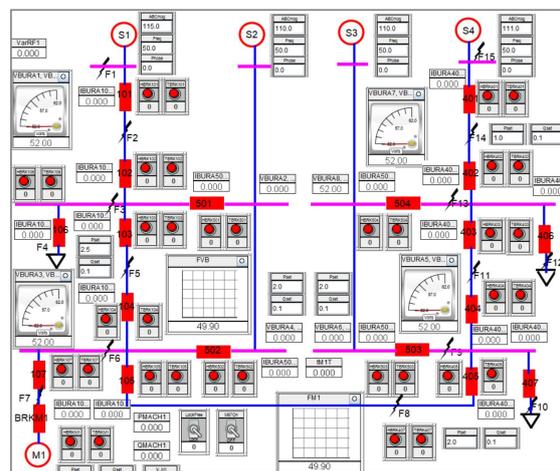


图 4 仿真系统图

Fig.4 Diagram of simulation system

以 105 开关开环运行方式下的 F3、F4、F5 和 F6 故障为例，自愈装置动作情况如表 1 所示：

表 1 105 开关开环运行方式下发生故障时的自愈动作情况
Table 1 Action of self-healing device in case of open-loop operation of circuit breaker 105

故障点	保护动作情况	开关动作情况	自愈装置动作情况
F3 故障	母差保护动作	开关正确动作	自愈合 105 开关
F3 故障	母差保护动作	104 开关失灵	自愈合 105 开关
F3 故障	母差保护动作	103 开关失灵	自愈合 105 开关
F3 故障	母差保护拒动	开关正确动作	上级后备保护动作; 自愈母差定位动作; 自愈合 105 开关
F4 故障	馈线保护动作	开关正确动作	自愈不动作、不放电
F4 故障	馈线保护动作	106 开关失灵	自愈失灵动作; 自愈合 105 开关
F4 故障	馈线保护拒动	开关正确动作	上级后备保护动作; 自愈馈线定位动作跳 106 开关; 自愈合 105 开关
F5 故障	线路差动动作	开关正确动作	自愈合 105 开关
F5 故障	线路差动动作	103 开关失灵	上级后备保护动作跳 101 开关; 自愈合 105 开关
F5 故障	线路差动动作	104 开关失灵	自愈失灵动作; 自愈放电
F5 故障	线路差动拒动	开关正确动作	后备保护动作; 自愈线路差动定位动作; 自愈合 105 开关
F5 故障 (永久性故障, 投入重合闸)	线路差动动作	开关正确动作	重合闸动作; 线路差动动作; 自愈合 105 开关
F6 故障	母差保护动作	开关正确动作	自愈放电
F6 故障	母差保护拒动	开关正确动作	上级后备保护动作; 自愈母差定位动作; 自愈放电

由表 1 可知, 外部独立配置的保护装置动作跳开断路器时, 故障被成功隔离; 当独立配置保护拒动时, 由后备保护动作切除故障, 之后自愈装置根据自身的故障定位功能进行故障隔离; 当开关失灵时, 会启动自愈失灵逻辑, 以实现故障隔离。在故障隔离完成后, 根据故障点发生的位置判断是否能完成供电恢复, 若开环点能恢复非故障区域供电, 则自愈合闸; 若无法恢复供电则自愈放电, 停止后续操作。

6 结论

本文针对配电网特有而又普遍存在的运行场景, 提出了针对性的解决方案: 1) 针对断路器与负荷开关混用的复杂配置场景, 提出了快速充电与普通慢速充电相融合自愈方案; 2) 针对配电网系统与输电系统中断路器失灵的差异, 优化了断路器失灵逻辑, 实现断路器失灵情况下的故障隔离; 3) 针对分布式电源大规模接入的趋势, 提出了检同期合闸的自愈策略, 提高分布式电源接入的友好程度; 4) 针对负荷转供后过负荷运行的风险, 提出了基于负荷转移计算的过负荷预判方法, 避免合后过负荷导致的负荷转供失败。

同时, 基于对线路重合闸、自愈以及备自投在故障恢复作用的分析, 提出了基于优化配合关系的三级故障恢复策略, 实现瞬时性故障就地快速恢复和永久性故障的主干线转供, 并在复杂转

换性故障情况下不损失负荷, 在保证供电可靠性的前提下, 提高配电网网架结构的稳定性。

仿真试验验证了本文关键技术及恢复策略的可靠性, 方案有助于提高配电网的供电可靠性。

参 考 文 献

- [1] 孙景钊, 李永丽, 李盛伟, 等. 含分布式电源配电网保护方案[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(1): 81-84.
SUN Jingliao, LI Yongli, LI Shengwei, et al. A Protection Scheme for Distribution System with Distributed Generations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(1): 81-84.
- [2] 范忻蓉, 张沛超, 方陈. 辐射型主动配电网的自适应方向保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(18): 150-155.
FAN Xinrong, ZHANG Peichao, FANG Chen. Adaptive directional protection scheme for radial active distributional network[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(18): 150-155.
- [3] 林霞, 时永, 李强, 等. 基于 DG 接入的配网自动化系统保护策略的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(13): 137-144.
LIN Xia, SHI Yong, LI Qiang, et al. Research on the protection strategy of distribution automation system based on DG access[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(13): 137-144.
- [4] 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): 50-56.
LIN Xia, LU Yuping, WANG Lianhe. New current protection scheme considering distributed generation impact[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(20): 50-56.
- [5] 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.
- [6] 徐丙垠, 李天友, 薛永端, 等. 配电网继电保护与自动化[M]. 北京: 中国电力出版社, 2017, 459-476.
- [7] 张波, 吕军, 宁昕, 等. 就地型馈线自动化差异化应用模式[J]. 供用电, 2017, 34(10): 48-53, 13.
ZHANG Bo, LÜ Jun, NING Xin, et al. Differential application mode of local type feeder automation[J]. Distribution & Utilization, 2017, 34(10): 48-53, 13.
- [8] 王良. 智能配电网自动化应用实践的几点探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20)12-16.
WANG Liang. Discussion on application practice of distribution automation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(20)12-16.
- [9] 张延辉, 郑栋梁, 熊伟. 10kV 馈线自动化解决方案探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(16): 150-152, 156.
ZHANG Yanhui, ZHENG Dongliang, XIONG Wei. Discussion of 10 kV feeder automation solutions[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(16): 150-152, 156.
- [10] 周文俊, 李春健, 王良, 等. 分层分区的馈线自动化配置方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(17): 71-76.
ZHOU Wenjun, LI Chunjian, WANG Liang, et al. Study on hierarchical and divisional configuration scheme of feeder automation[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(17): 71-76.
- [11] 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.
- [12] 王彦国, 赵希才. 智能分布式配电保护及自愈控制系统[J]. 供用电, 2019, 36(9): 2-8.
WANG Yanguo, ZHAO Xicai. Intelligent distributed protection and self-healing control system for distribution network[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(9): 2-8.
- [13] 戴观权, 蔡泽祥, 蔡煜, 等. 基于动态拓扑的配电网分布式保护自愈方法[J]. 供用电, 2019, 36(9): 22-27.
DAI Guanquan, CAI Zexiang, CAI Yu, et al. Distributed protection and self-healing method for distribution network based on dynamic topology[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(9): 22-27.
- [14] 高维良, 高厚磊, 徐彬, 等. 5G 用作配电网差动保护通道的可行性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(8): 1-7.
GAO Weiliang, GAO Houlei, XU Bin, et al. Feasibility analysis of adopting 5G in differential protection of distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(8): 1-7.
- [15] 张宁, 杨经纬, 王毅, 等. 面向泛在电力物联网的 5G 通信: 技术原理与典型应用[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(14): 4015-4025.
ZHANG Ning, YANG Jingwei, WANG Yi, et al. 5G Communication for the ubiquitous internet of things in electricity: technical principles and typical applications[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(14): 4015-4025.
- [16] 朱红梅, 林奕琳, 刘洁. 5G URLLC 标准、关键技术及网络架构的研究[J]. 移动通信, 2017, 41(17): 28-33.
ZHU Hongmei, LIN Yilin, LIU Jie. Research on URLLC standard, key technique and network architecture for 5G[J]. Mobile Communications, 2017, 41(17): 28-33.
- [17] 国家能源局. 3kV~110kV 电网继电保护装置运行整定规程: DL/T 584-2017[S]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- 收稿日期:**
作者简介:
姓名 (出生年-), 性别, 籍贯, 学历, 职称, 研究方向
陈栋(1988 -), 男, 通信作者, 山东新泰人, 本科, 工程师, 研究方向为电力系统继电保护原理研究及装置应用开发。E-mail: ch-dong.chen@sac-china.com
李玉平 (1978 -), 男, 湖南长沙人, 本科, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护原理研究及装置应用开发。E-mail: yuping-li@sac-china.com
张玮 (1980 -), 男, 江苏南京人, 研究生, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护原理研究及装置应用开发。E-mail: eniac-wei.zhang@sac-china.com