

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201305

计及5G通信异常工况的有源配电网快速综合保护方案

陈宏山¹, 徐舒², 李正红¹, 金震², 万信书¹, 侯炜², 吴江雄¹, 熊慕文²

(1. 中国南方电网有限责任公司, 广东 广州 510080; 2. 南京南瑞继保工程技术有限公司, 江苏 南京 211102)

摘要: 随着分布式电源的高比例接入, 传统三段式电流保护已难以适应日益复杂的配电网故障形态。在5G通信不断兴起的背景下, 性能完备的电流相量差动保护在配电网中应用前景广阔, 可不再受制于光纤铺设等附加的高额费用。但是, 一旦出现5G通信信号失去同步甚至中断的极端情况, 电流相量差动保护将无法正常工作。对此, 针对5G通信异常场景, 提出一套有源配电网综合快速保护方案, 即适应5G通信失去同步但未中断场景的电流幅值差动保护判据、适应5G通信完全中断场景的相继速动保护判据, 通过实时监测信道环境实现判据自适应切换。在PSCAD/EMTDC中搭建10 kV有源配电网模型。仿真结果表明, 所提保护判据在不同故障场景下均能可靠动作。
关键词: 有源配电网; 幅值差动保护; 相继速动保护; 5G通信; 开环闭环运行

A new fast comprehensive protection scheme of an active distribution network considering the abnormal operating conditions of 5G communication

CHEN Hongshan¹, XU Shu², LI Zhenghong¹, JIN Zhen², WAN Xinsu¹, HOU Wei², WU Jiangxiong¹, XIONG Muwen²
(1. China Southern Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China; 2. NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: With a high proportion of distributed generation integration, it is difficult to adapt conventional three-stage current protection to the increasingly complex fault forms of a distribution network. Given the continuous rise of 5G communication, current phasor differential protection with high performance has a broad application prospect in a distribution network, and is no longer subject to the additional high costs such as laying of optical fiber. However, once the 5G communication signals lose synchronization or even get interrupted in extreme cases, the current phasor differential protection will not work normally. Thus a new fast comprehensive protection scheme for active distribution network dealing with abnormal scenarios of 5G communication is proposed. This contains a current amplitude differential protection criterion adapting to the scenario where 5G communication is out of synchronization but not interrupted, and a fast sequential protection criterion adapting to the scenario where 5G communication is completely interrupted. The criteria can be adaptively switched by real-time monitoring of the channel environment. A 10 kV active distribution network model is established in PSCAD/EMTDC. The simulation results show that the proposed protection criteria can operate reliably in different fault scenarios.

This work is supported by the Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd. (No. 0000002020030103XT00046).

Key words: active distribution network; amplitude differential protection; fast sequential protection; 5G communication; open-loop and closed-loop operation

0 引言

随着分布式电源的广泛接入和柔性配电技术的迅猛发展, 传统单电源辐射型的交流配电网呈现出

双向潮流、交直流混联等复杂形态, 给配电网保护与控制技术带来了严峻的挑战, 国内外学者对此做了大量的研究工作^[1-6]。相比于输电网, 在基础设施建设方面, 我国的配电设备老化、故障停电等问题突出。现有基于单端量的就地式保护(如三段式过流保护、距离保护等)通常难以适配有源配电网的复杂潮流。若线路某处发生故障, 则变电站出线开关跳

基金项目: 中国南方电网有限责任公司科技项目资助(0000002020030103XT00046)

闸，整条线路都会停电，然后依靠配电自动化主站进行故障隔离和供电恢复，整个过程往往持续几分钟至几十分钟，严重影响用户用电感受。

差动保护能够实现故障区段的快速定位与隔离，可靠性高，但要求保护装置之间实时快速通信和数据同步。35 kV 以下配网由于点多面广，光纤通信网络修建维护成本高，所以，目前一般仅在对供电可靠性有特别要求的中心城市配电网中采用光纤通信。3G、4G 等无线通信技术，由于其实时性、安全性和可靠性等指标尚无法达到保护与控制功能的需求，因此通常仅用于配电网监控与电能质量管理等方面。

第 5 代移动通信技术(5G 技术)作为 4G 技术的演进，多个典型指标均遥遥领先于现有的 4G 通信，具有低时延、高带宽和大连接特性^[7-11]，其商业化被多个国家提上议程。5G 在配电网保护控制领域的应用研究有望为电力系统带来新一轮技术革命^[12]，多位学者已对此开展了前期探讨。文献^[13]提出了一种基于 5G 无线通信的配电网拓扑自适应差动保护技术，文献^[14]介绍一种基于 5G 通信的配电网分区保护方法，文献^[15]提出了一种基于智能终端单元的采用分相电流差动与故障电流幅值比较作为故障区段定位原理的分布式故障自愈方案。2019 年 10 月，山东大学电气学院高厚磊教授团队联合国网山东电科院、国网济南供电公司、山东联通公司成功实施了国内首例跨基站 5G 通信配网差动保护试验验证，证明 5G 技术可满足电网控制类业务微秒和毫秒级的低时延和高精度网络授时需求。

从原理上来说，电流差动保护具备绝对选择性，是目前解决上述有源配电网保护新问题的最为有效的途径之一^[16-17]。但是，电流差动保护需要严格的两侧数据同步作为应用条件，不管是依赖光纤还是 5G，都有可能存在同步性能劣化的问题。此时，传统差动保护将被闭锁，通常只能依靠三段式过流保护实现故障隔离，但线路两侧电流幅值仍被正确测量。如果能摆脱对同步的依赖，仅仅依靠幅值实现保护，则有望大幅提高在上述特殊场景下的保护动作速度^[18-22]。相比于传统电流相量差动保护，幅值差动保护仅需要线路两端的电流幅值信息，不需要两侧相量的严格同步，在配电网中具有广阔的应用前景。

为此，本文考虑配电网开环、闭环等不同接线与运行工况，提出了一种有源配电网幅值差动保护判据，并进而基于 5G 通信方式形成了新型配电网综合快速保护方案，利用 PSCAD/EMTDC 建立有源配电网模型，开展多组不同故障场景的仿真，验

证了上述方案的动作可靠性。

1 有源配电网幅值差动保护判据

1.1 开环配电网故障特性分析及幅值差动保护判据构建

在图1所示的有源开环配电网中，线路MN下游接有DG，并存在分支负荷。以线路MN段分析，若不计分布式电源控制特性，两侧电势被认为幅值相等，区外故障示意图如图2所示。

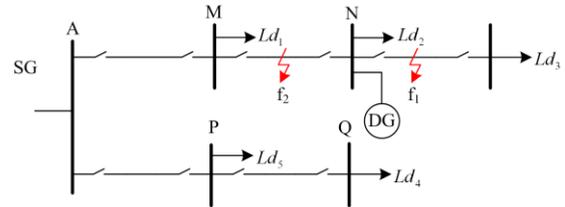


图 1 有源开环配电网示意图

Fig. 1 Active distribution network schematic

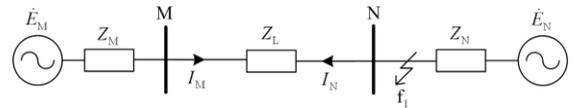


图 2 开环配网区外故障示意图

Fig. 2 Out-of-area fault schematic in open-loop distribution network

图2中， \dot{E}_M 、 \dot{E}_N 对应线路首端和末端电源电势，分别为系统侧电源电动势和分布式电源侧电动势， Z_M 、 Z_N 分别为系统侧和分布式电源侧等效阻抗， Z_L 为线路MN的总阻抗， f_1 为故障点。区外故障时，线路M、N两侧保护检测到的故障电流相量分别为

$$\dot{i}_M = \frac{\dot{E}_M}{Z_M + Z_L} \quad (1)$$

$$\dot{i}_N = -\frac{\dot{E}_N}{Z_N + Z_L} \quad (2)$$

区内 f_2 点故障时，可建立如图 3 所示的开环配网区内故障等效网络， Z_1 、 Z_2 为故障点两侧的线路阻抗，各阻抗之间的换算关系由式(3)给出。

$$\begin{cases} |Z_M| = m|Z_L| \\ |Z_N| = n|Z_L| \\ |Z_1| = \beta|Z_L|, \beta \in [0,1] \\ |Z_2| = (1-\beta)|Z_L| \end{cases} \quad (3)$$

式中： m 为系统侧M等效阻抗与线路阻抗的比值； n 为分布式电源侧N等效阻抗与线路阻抗的比值；系数 β 为故障点 f_2 至母线M侧的距离与线路MN全长的比值。

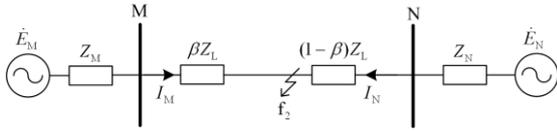


图3 开环配网区内故障示意图

Fig. 3 In-area fault schematic in open-loop distribution network

此时, 线路M、N两侧保护检测到的故障电流相量分别为

$$\dot{i}_M = \frac{\dot{E}_M}{Z_M + \beta Z_L} \quad (4)$$

$$\dot{i}_N = \frac{\dot{E}_N}{Z_N + (1-\beta)Z_L} \quad (5)$$

基于上述故障电流的测量值, 下面具体分析幅值差动保护判据的构成原理。

当某配网线路MN区外故障时, 根据式(1)、式(2), 线路M、N两侧电流幅值 $|\dot{i}_M|$ 、 $|\dot{i}_N|$ 满足式(6)。

$$\left\| \dot{i}_M - \dot{i}_N \right\| = 0 \quad (6)$$

而当区内故障时, 式(4)和式(5)可知, 式(6)不能满足。即 $\left\| \dot{i}_M - \dot{i}_N \right\| \neq 0$, 但是存在一种特殊情况, 在区内故障时, 两侧故障电流的幅值正好相等或极为接近, 式(6)可能会满足, 此时, 应满足条件(7)。

$$\left| \frac{\dot{E}_M}{Z_M + \beta Z_L} - \frac{\dot{E}_N}{Z_N + (1-\beta)Z_L} \right| \quad (7)$$

下面重点对式(7)的场景进行分析。对于含有分布式电源的有源配电网, 由于两侧系统参数的差异往往较大, 当功率流向为M向N侧时, 两侧系统电势一般满足 $|\dot{E}_M| > |\dot{E}_N|$, 此即意味着式(7)左边的数值总大于1。

此外, 对于送端侧M而言, 其等效内阻 Z_M 很小, 而对于受端侧其等效内阻 Z_N 往往很大(高达几十欧姆甚至上百欧姆)^[23]。因此, 即使 β 取最大值($\beta=1$, 故障点位于线路MN末端), 也有式(7)右边的值总小于1, 即式(8)均成立。

$$\left| Z_M + \beta Z_L \right| < \left| Z_N + (1-\beta)Z_L \right| \quad (8)$$

为此, 可以利用上述分析结果, 基于两侧电流幅值信息构建差动保护判据。为了躲过不平衡电流, 设置一个动作门槛 I_{set} , 即制动量 I_r 。幅值差动判据如式(9)所示。

$$\left\| \dot{i}_M - \dot{i}_N \right\| > I_{set} \quad (9)$$

优先保证区外故障时的安全性, I_{set} 为

$$I_{set} = 0.1K_{res} \left| \dot{i}_N \right| \quad (10)$$

式中: 0.1为考虑电流互感器10%误差曲线后的设定; K_{res} 为可靠系数, 综合考虑测量误差, 非周期分量影响以及一定裕度, 取值1.1~1.2。对于一端为强送端, 一端为弱送端的配电网, 以N侧电流幅值 $|\dot{i}_N|$ 作为制动量具有天然的浮动门槛特质。区内故障时, $|\dot{i}_N|$ 的主要构成是分布式电源向故障点馈入的电流, 由于分布式电源相比于系统电源为弱馈端, 且考虑故障限流特性, 该值很小。区外故障时, 根据叠加原理, $|\dot{i}_N|$ 的构成是系统电源向故障点馈入的电流, 加上分布式电源向故障点馈入的电流, 前者值会很大, 所以制动量会很大。以式(10)的方式给出幅值差动制动量整定值, 相比于固定门槛的整定方式, 兼具区内故障灵敏性和区外故障安全性。

1.2 闭环配电网幅值差动保护判据适应性分析

出于对提高运行灵活性和供电可靠性, 同时限制短路故障电流、控制故障波及范围的考虑, 现有配电网大多采用闭环结构, 开环运行方式(如图4所示), 但在设备检修倒负荷等特殊情况下, 也可能合上联络开关, 从而在较短的时间内进入闭环运行状态。为此, 需对有源闭环配电网进行幅值差动保护判据的适应性进行验证。下面结合图5所示的闭环配网区内故障示意图, 推导其区内故障的可能误动点。

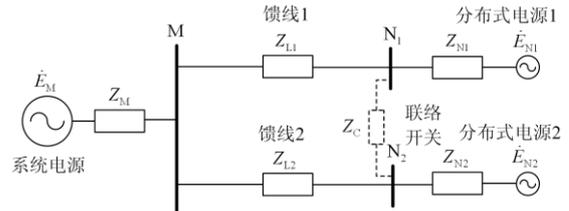


图4 实际配电网阻抗示意图

Fig. 4 Impedance schematic diagram of the actual distribution network

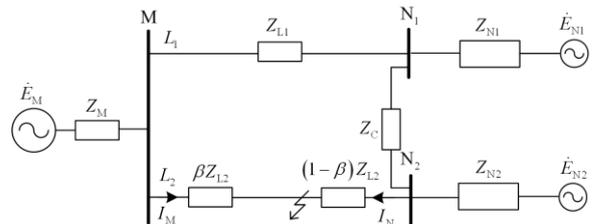


图5 闭环配网区内故障阻抗示意图

Fig. 5 In-area fault schematic in closed-loop distribution network

为了便于分析,认为N侧系统等值阻抗为 Z_N ,等值电源为 \dot{E}_N 。闭环电网的某条线路 L_2 发生故障,利用叠加原理,分别得到电源 \dot{E}_M , \dot{E}_N 向故障线路 L_2 两端提供的电流。

$$\begin{cases} \dot{i}_{M-M} = \frac{\dot{E}_M}{Z_M + [Z_{L1} + (1-\beta)Z_{L2}] \parallel \beta Z_{L2}} \cdot \frac{Z_{L1} + (1-\beta)Z_{L2}}{Z_{L1} + Z_{L2}} \\ \dot{i}_{N-M} = \frac{\dot{E}_N}{Z_N + [Z_{L1} + \beta Z_{L2}] \parallel (1-\beta)Z_{L2}} \cdot \frac{(1-\beta)Z_{L2}}{Z_{L1} + Z_{L2}} \\ \dot{i}_{M-N} = \frac{\dot{E}_M}{Z_M + [Z_{L1} + (1-\beta)Z_{L2}] \parallel \beta Z_{L2}} \cdot \frac{\beta Z_{L2}}{Z_{L1} + Z_{L2}} \\ \dot{i}_{N-N} = \frac{\dot{E}_N}{Z_N + [Z_{L1} + \beta Z_{L2}] \parallel (1-\beta)Z_{L2}} \cdot \frac{Z_{L1} + \beta Z_{L2}}{Z_{L1} + Z_{L2}} \end{cases} \quad (11)$$

式中: \dot{i}_{M-M} 为电源 \dot{E}_M 经 L_2 的M侧向故障点提供的电流; \dot{i}_{N-M} 为电源 \dot{E}_N 经 L_2 的M侧向故障点提供的电流; \dot{i}_{M-N} 为电源 \dot{E}_M 经 L_2 的N侧向故障点提供的电流; \dot{i}_{N-N} 为电源 \dot{E}_N 经 L_2 的N侧向故障点提供的电流。线路两侧测得电流相量为

$$\begin{cases} \dot{i}_M = \dot{i}_{M-M} + \dot{i}_{N-M} \\ \dot{i}_N = \dot{i}_{M-N} + \dot{i}_{N-N} \end{cases} \quad (12)$$

假设配网中的各个元件阻抗角相等,且满足式(13)。

$$\begin{cases} Z_{L1} = \alpha Z_{L2} \\ Z_M = m Z_{L2} \\ Z_N = n Z_{L2} \end{cases} \quad (13)$$

式中: α 为线路 L_1 与线路 L_2 的阻抗比值; m 为系统侧M等效阻抗与线路 L_2 阻抗的比值; n 为分布式电源侧N等效阻抗与线路 L_2 阻抗比值。假设区内某点发生故障时,若上述线路两侧测量电流相等或极为接近,幅值差动保护判据拒动,则应满足式(14)。

$$|\dot{i}_M| = |\dot{i}_N| \quad (14)$$

将式(14)代入式(11)、式(12),得

$$\left| \frac{\alpha + (1-\beta)}{m + \frac{[\alpha + (1-\beta)]\beta}{\alpha + 1}} + \frac{(1-\beta)}{n + \frac{(\alpha + \beta)(1-\beta)}{\alpha + 1}} \right| = \left| \frac{\beta}{m + \frac{[\alpha + (1-\beta)]\beta}{\alpha + 1}} + \frac{\alpha + \beta}{n + \frac{(\alpha + \beta)(1-\beta)}{\alpha + 1}} \right| \quad (15)$$

若考虑两侧符号相反,对式(15)去绝对值,则两边应取相反数,得

$$n = -m + \frac{2\beta^2 - 2\beta - \alpha}{\alpha + 1} \quad (16)$$

式(16)右边恒小于0,左边恒大于0,不可能成立,即条件式(15)不可能满足。

若考虑两侧符号相同,对式(15)去绝对值,则两边应取相等数,得

$$\begin{aligned} [\alpha + (1-2\beta)]n + [\alpha + (1-2\beta)] \frac{(\alpha + \beta)(1-\beta)}{\alpha + 1} = \\ [\alpha + (2\beta - 1)]m + [\alpha + (2\beta - 1)] \frac{[\alpha + (1-\beta)]\beta}{\alpha + 1} \end{aligned} \quad (17)$$

令式(17)左边减去右边为 z ,即

$$z = f(\alpha, \beta) \quad (18)$$

考虑有源配电网中系统侧电源较强、分布式电源侧较弱的实际情况,暂取 $m=1$ 、 $n=5$ 开展进一步分析:考虑线路 L_1 及 L_2 的线路长度差异,在 $\alpha \in [0, 10]$ 、 $\beta \in [0, 1]$ 内对 z 进行遍历分析,在Matlab中绘制 $f(\alpha, \beta)$ 平面,如图6所示。

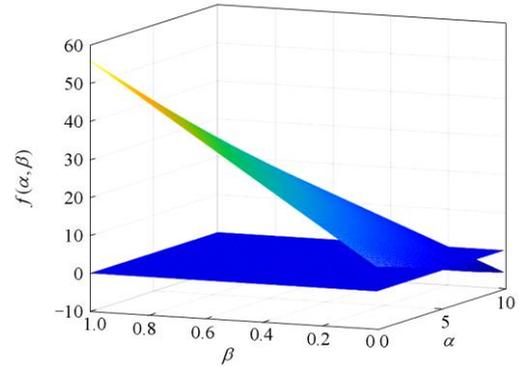


图6 $f(\alpha, \beta)$ 与 $z=0$ 相对位置示意图

Fig. 6 Relative position of $f(\alpha, \beta)$ to $z=0$

图6中, $f(\alpha, \beta)$ 面为上方斜面,其与 $z=0$ 平面的交界线即为区内故障拒动点。对于一端为强送端,一端为弱送端的闭环配电网,遍历 α 、 β 两个变化参数,可以看出对于区内故障,仅在 α 取值较大, β 取值较小时,两个面有交界,交界线段很短。即虽然幅值差动保护对于闭环电网区内故障有拒动的可能性,但可能性极小。若出现这种可能性极小的场景,那么区内故障时,幅值差动保护将出现拒动,这即是幅值差动保护的死区问题,对该极小范围内的死区问题,有待后续论文加以解决。

2 基于5G通信的有源配电网综合保护方案

2.1 利用5G通信实现线路两侧数据传输的可行性分析

5G相对4G具有超低的时延和超高可靠的通信(Ultra Reliable and Low Latency Communication,

URLLC)以支持对时延和可靠性要求极高的行业应用,采用 URLLC 通信方式,可靠性达到 99.999%,即使跨基站,其工程性通信时延测试也可控制在 10 ms 以内。由此,可利用 5G 通信实现幅值差动保护两侧数据的传输,目前国网和南网都已在此方向开展了示范应用。

结合 5G 的差动保护方案如图 7 所示(以幅值差动为例),将 5G 代替传统差动保护中的光纤,有望大幅度降低配电网的建设成本。

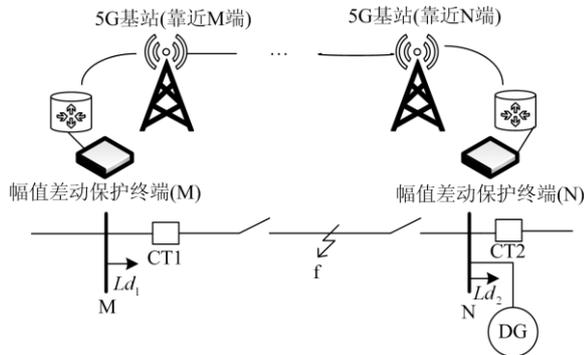


图 7 结合 5G 的幅值差动保护方案示意图

Fig. 7 A diagram combined with a 5G amplitude differential protection scheme

两侧数据同步是差动保护赖以正确工作的基础。针对 5G 通信数据同步的问题,其技术实现流程包括:GPS 或者北斗提供时钟源,基站通过自身 GPS 天线或北斗天线获取时钟,或通过 1588 V2 协议从承载网获取同步时钟。5G 推荐采用 GPS 或北斗+1588 V2 异构组网、实现天地互备,大幅提高网络授时的安全可靠;5G 基站将时钟信息通过空口广播(带内 SIB16)或单播(携带 SFN 指示时钟参考点)方式传递给 5G CPE;5G CPE 将时钟信息通过 IRIG-B 码接口方式传递给电力终端,最终实现电力终端间微秒级的高精时钟同步需求。

但是,在 5G 通信网络中,通信技术的同步授时过程受大气情况、环境因素以及电磁干扰等影响,不排除气象条件恶劣或是强电磁干扰时单一基站或一个区域内的基站失去与主网同步的现象。所以,5G 通信仍可能会出现两侧数据采样失步,上述差动保护所需要的数据同步可能无法得到满足的情况,甚至发生通信中断的极端场景。为此,目前 5G 通信系统设计了共视法和 PING 命令等技术的一系列方案措施,用来判别上述异常情况。

为了界定网络的同步性是否失去,5G 相关标准提出了网络满足同步授时的指标要求,如失去外部牵引信号的一定时间内维持同步、牵引状态下脉冲

码无错码、时间同步的输出信号如串行口时间报文、网络时间报文无异常等。5G 的运营配置有专用监测系统,可对全网同步运行质量进行实时监控和管理。在监测方式方面,包括基于网络设备自身监测功能实现的相对性能监测,以及采用探针等外部设备进行的绝对性能监测。

针对 5G 同步的监测手段,通常基于共视法的原理。以 GPS 作为同步途径为例,两基站或多基站同时观测同一颗 GPS 卫星,以实现两站或多站之间的时间同步,这个过程称为 GPS 共视时间传递。假设两个共视接收机分别安装在观测站 A 和 B,两站的坐标需要精确测定。两站在同一时刻观测同一颗 GPS 卫星。根据单向时间传递原理,有

$$\begin{aligned}\Delta t_{iA} &= (t_i - t_A) \\ \Delta t_{iB} &= (t_i - t_B)\end{aligned}\quad (19)$$

式中: t_i 为卫星时间; t_A 、 t_B 为接收机钟 A、B 对应的的时间; Δt_{iA} 、 Δt_{iB} 为卫星与接收机钟对应钟差,可得 A、B 两站的钟差 t_{BA} 为

$$t_{BA} = \Delta t_{iA} - \Delta t_{iB} = t_B - t_A \quad (20)$$

实际共视对比中,参与共视的两基站以相同的方法处理数据可以去掉星载原子钟的影响,消除多数情况下附加时延的影响,提高时间传递精度。

在网络中的适当位置部署支持卫星共视功能的外部探针设备作为监测点,同时全网配置一个公共的参考基准站和数据处理中心。基于卫星共视法,可以获取网络中各个监测点与公共参考基准站之间的时间偏差,通过数据处理中心的大数据分析处理,以监控评估指标反映全网同步的运行状况。另外,对于基于网络设备自身监测功能实现的相对性能监测,具体监测项目和监测要求在相关标准中已有规范^[24]。时钟同步的性能表现作为 5G 通信重点关注的指标,可以随时提供给电力保护系统使用。

通过以上方式,电力保护系统会从 5G 通信系统得知所在基站的时钟同步性能以及是否失去同步。

对于另一类异常工况,即通信中断的极端情况,5G 网络则以连接于同一根服务器的两个基站互 PING 的方式可以实时进行测试^[25]。PING 命令通过发送网际消息控制协议(Internet Control Message Protocol, ICMP)回响请求消息来验证与另一台主机的 IP 级连接。使用 ICMP 在两台主机之间简单地发送一个数据包并请求应答,根据控制消息判断出双方能否正常通信^[26]。若连接于同一服务器的两个 5G 基站均未出现错误信息如 Request timed out(请求超时)或 Destination host Unreachable(目标主机不可达),则认为 5G 通信正常,否则不正常。

通信判断过程如图 8 所示。

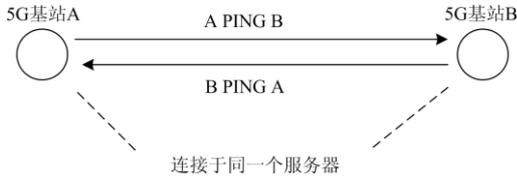


图 8 5G 两基站互 PING 测试示意图

Fig. 8 Schematic of two 5G base stations ping each other test

利用上述技术,5G 通信系统可以实时准确地判别基站之间是否发生了通信中断或同步性能劣化,为基于 5G 通信的双端差动保护可用性分析及适应性判据选择提供了便利条件。

2.2 考虑通信中断场景的过流二段加速保护判据

在 5G 通信中断场景下,无论是传统相量差动保护,还是本论文提出的幅值差动保护都将无法使用。此时,线路保护只能退化为传统的三段式过流保护。为了加快保护动作速度,可以考虑通过相继速动,对传统过流 II 段进行加速。

当发生不对称故障时,相继速动保护基于负序电流二次突变的原理动作。配电网由正常运行状态变为故障状态,负序幅值分量发生第一次突变,对端断路器若能由 I 段保护跳开故障相,必将引起负序幅值分量发生第二次突变,本端电流保护装置通过检测到负序分量的两次突变,即可构造基于负序电流二次突变量的相继速动保护判据。

相继速动保护和配电网中已有的过流三段式电流保护配合以保证选择性。故障发生后,仅当本侧过流 II 段保护连续动作且不返回时,认定为区内故障,从而加速跳开本侧断路器;否则认定为区外故障,本侧断路器不动作。即

$$I_a > I_{a.set}^{II} \quad (21)$$

式中: $I_{a.set}^{II}$ 为过流电流 II 段整定值; I_a 为过流电流幅值。

结合相继速动保护的突变量判据和区间判据,给出图 9 所示的不对称故障时相继速动逻辑图。

采用相继速动保护加速传统电流三段式保护的 II 段,有望极大缩短动作时长。其整体用时为

$$t = t_{st} + \Delta t_2 \quad (22)$$

式中: t_{st} 为 II 段保护启动用时,不超过对侧 I 段保护的启动时间,小于 20 ms; Δt_2 表示为躲过瞬时故障,给出的短延时,取值 100 ms。方案整体可保证在 120 ms 内切除故障线路,远低于等待传统 II 段保护动作耗时。

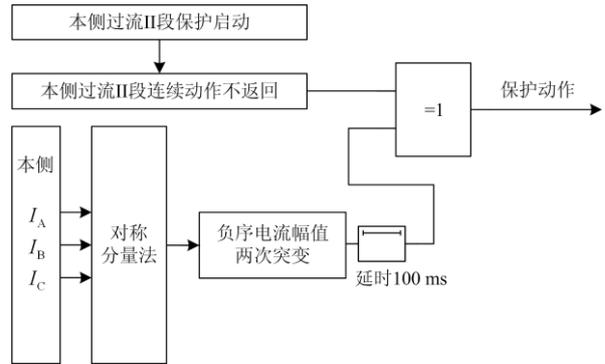


图 9 不对称故障时相继速动逻辑图

Fig. 9 Successive quick action logic diagrams in asymmetric fault

但是,对于配电网中不常见的对称短路故障,上述相继速动方法由于测量不到负序电流,不能发挥效用,这是不利于加速保护动作的一个缺陷,有待今后继续研究完善。

2.3 有源配电网新型快速综合保护方案

综合考量 5G 通信的不同数据同步工况,主要针对 5G 通信异常情景,基于前述幅值差动保护判据和相继速动判据,提出一套配电网故障快速动作方案,如图 10 所示。

5G 通信正常时,基站之间数据传输正常,时延小,且在 5G 通信条件下配电网端到端的时间同步可以保证。此种情况下,以 5G 通信代替传统光纤,可为配电网线路提供电流相量差动保护条件,动作准确,耗时最短。

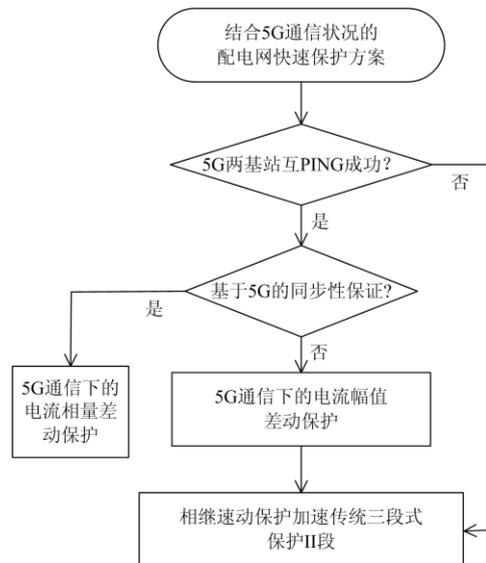


图 10 结合 5G 的配电网故障快速保护方案

Fig. 10 Distribution network fault fast protection scheme combined with 5G

若 5G 通信系统发生同步性能劣化, 即虽然基站之间数据传输正常, 但配电网线路两端的时间同步不能保证。此种情况下, 可借助 5G 系统, 采用本文所提出的幅值差动判据, 为配电网线路提供电流幅值差动保护。幅值差动保护虽然动作性能不及传统电流相量差动保护, 但通过充分利用两侧电流幅值信息, 仍可提供接近全线范围的速动保护。

若 5G 通信出现传输中断, 即不能在配电网保护允许的时间范围内完成数据传输。此种情况下, 以相继速动保护加速传统的 II 段保护。发生区内不对称故障时, 相继速动保护相比于传统三段式过流保护, 可以快速切除故障线路。

3 仿真分析

为验证本文所提计及 5G 通信异常工况的有源配电网新型综合快速保护的应用效果, 基于 PSCAD/EMTDC 仿真软件, 搭建图 11 所示的 10 kV 含 DG 电缆配网模型。鉴于分布式电源在工业园区配网和城市配电网中接入更为广泛, 而在上述配电网中, 大都采用电缆线路, 配网模型的中性点经小电阻接地, 接地电阻值为 10Ω 。其中, 线路 AM、MN、NO 的长度分别为 2 km、8 km、4 km, 负荷 Ld1、Ld2、Ld3 为 1.5 MV A, 功率因数为 0.85; DG 为逆变型, 额定容量为 1.5 MV A; 线路单位正序阻抗均为 $0.088+j0.069 \Omega/\text{km}$; K_{res} 取值 1.1。由于相量差动保护的技术已经非常成熟, 本节重点针对区内外故障的幅值差动保护和相继速动保护开展仿真分析。

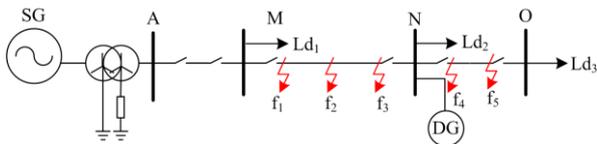


图 11 10 kV 有源配电网模型

Fig. 11 10 kV active distribution network model

3.1 幅值差动保护判据仿真分析

3.1.1 区外故障

以线路 MN 为例, 在其区外下游出口的 f_4 处以及距离出口 4 km 的 f_5 处设置不同类型的金属性短路故障, 考察判据在区外故障场景下的动作安全性。所提幅值差动保护方案动作情况如表 1 所示。

动作情况: “×”表示保护不动作, “√”表示保护动作, 下同。

对于区外故障, 所提新型幅值差动保护方案在不同故障位置、不同故障类型的情况下均不动作, 显示出在区外故障场景的动作安全性。

表 1 区外故障时保护方案动作情况

Table 1 Protection scheme action in the event of an out-of-area fault

故障位置	故障类型	差动量/A	制动量/A	动作情况
区外出口	三相对称故障	0.374	315	×
	两相接地故障	0.352	289	×
	两相相间故障	0.416	282	×
	单相接地故障	0.295	116	×
距离出口 4 km	三相对称故障	0.619	263	×
	两相接地故障	0.602	243	×
	两相相间故障	0.294	233	×
	单相接地故障	0.643	104	×

3.1.2 区内故障

以线路 MN 为例, 在其区内靠近母线 M 的 f_1 处, 线路中点 f_2 处以及靠近母线 N 的 f_3 处设置不同类型、不同过渡电阻的短路故障, 考察判据在区内故障场景的动作灵敏性。所提的幅值差动保护方案在 50Ω 过渡电阻情况下动作情况如表 2 所示。

表 2 区内 50Ω 过渡电阻故障时保护方案动作情况

Table 2 Protection scheme action in the event of a 50Ω transition resistance failure in the zone

故障位置	故障类型	差动量/A	制动量/A	动作情况
靠近母线 M	三相对称故障	95.1	26.2	√
	两相接地故障	90.9	25.5	√
	两相相间故障	133	26.5	√
	单相接地故障	85.9	25.0	√
线路中点	三相对称故障	93.7	26.1	√
	两相接地故障	89.2	25.4	√
	两相相间故障	129	26.5	√
	单相接地故障	84.2	24.9	√
靠近母线 N	三相对称故障	91.8	26.1	√
	两相接地故障	87.2	25.2	√
	两相相间故障	126.3	26.4	√

对于区内故障, 所提结合 5G 的幅值差动保护方案在各种故障类型, 过渡电阻的情况下均能正确动作。仿真后发现, 较高过渡电阻时, 所提方案依然可以快速准确动作, 三相、两相接地以及单相接地故障的动作边界电阻均大于 300Ω , 两相故障的动作边界电阻大于 450Ω 。图 12 给出线路中点 f_2 处发生单相经 300Ω 电阻接地短路故障时, 差动量与制动量曲线, 故障发生在 1 s。

3.1.3 考虑不同 DG 类型及渗透率的保护适应性验证

为验证不同类型 DG 及其在不同渗透率时的判据适应性, 仿真分析 DG 处于弱送端时, 线路故障后的 DG 控制策略是否会对动作正确性产生影响。

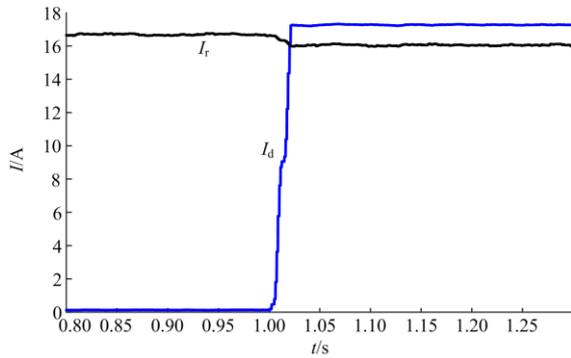


图 12 区内中点单相经 300 Ω 电阻故障差动制动电流
Fig. 12 Mid-point single phase in the zone is subjected to a differential brake current curve by a 300 Ω resistance fault

事实上,前面两个仿真算例中,总负荷 4.5 MV A,而逆变型电源出力(光伏)1.5 MV A, DG 的渗透率已经达到 30%以上。因此,在下面的故障仿真中,针对光伏(PV)、双馈风机(DFIG)、小水电三种类型 DG,考虑 30%以下的不同渗透率,通过设置过渡电阻 50 Ω 的接地故障,验证幅值差动保护的動作情况,其结果如表 3 所示。

可以看出,不同类型 DG 及不同渗透率时,所提幅值差动保护判据均能可靠动作。另外,由于不同 DG 的故障特性不同,考虑到逆变型分布式电源具有故障限流特性,双馈风机在机端电压骤降后会投入撬棒电阻运行以降低故障电流,所以通常情况下,上述 DG 类型相比于同步机类型的分布式电源,线路两侧的电流量值差异将更为显著,幅值保护判据也具有更好的保护效果。

表 3 DG 在不同渗透率时的保护方案动作情况

Table 3 Protection scheme action of the different DGs at different permeability

DG 出力	故障位置	动作情况		
		光伏	水电	风电
0.4	区外出口	×	×	×
	区内靠近 M	√	√	√
	区内中点	√	√	√
	区内靠近 N	√	√	√
0.8	区外出口	×	×	×
	区内靠近 M	√	√	√
	区内中点	√	√	√
	区内靠近 N	√	√	√
1.2	区外出口	×	×	×
	区内靠近 M	√	√	√
	区内中点	√	√	√
	区内靠近 N	√	√	√

进而,针对上述三种 DG 类型(容量均为 1 MVA),通过设置不同的负荷水平和线路故障过渡电阻大小,分别将故障点设置于线路靠近 M 端、靠近 N 段以及中点,扫描仿真了所提幅值差动保护判据可耐受的过渡电阻极限,具体如图 13 所示。

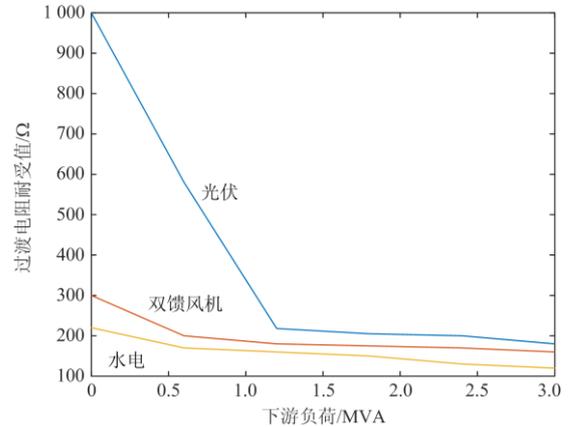


图 13 不同 DG 区内故障过渡电阻耐受值

Fig. 13 In-area fault tolerance value of transition resistance of different DGs

可以看出,逆变型光伏电源由于其故障限流特性,导致两侧电流量值差异增大,耐受过渡电阻的能力较强,双馈风机表现次之,而同步电机类型的 DG,耐受过渡电阻的能力较弱,但依然大于 100 Ω,充分验证了本文所提幅值差动保护判据工程应用价值。

3.1.4 考虑配网网架结构变化的适应性验证

为验证幅值差动保护判据对于闭环配电网的适用性,在图 11 所示的开环配电网基础上搭建闭环配电网,根据第 1 部分的理论分析,这里 α 选为 2, DG 选为双馈风机(DFIG),出力为 1.0 MV A。为考察判据对于区内故障的灵敏性,在不同故障位置、不同故障类型时开展仿真验证,其动作情况如表 4 所示。

表 4 闭环电网 100 Ω 过渡电阻故障时保护方案动作情况

Table 4 Protection scheme action in the event of a failure of the closed-loop grid's 100 Ω transition resistor

故障类型	故障位置/动作情况			
	区外出口	区内靠近 M	区内中点	区内靠近 N
三相对称故障	×	√	√	√
两相接地故障	×	√	√	√
两相相间故障	×	√	√	√
单相接地故障	×	√	√	√

可以看出, 对于闭环配电网, 幅值差动保护判据能保证区内故障的灵敏性和区外故障的安全性, 方案对于闭环有源配电网具有适用性。

3.2 通信中断场景下所提保护方案性能验证

以线路 MN 的 M 端为例, 在区内靠近 N 端位置(距 N 端 1 km), 区外下级线路近端(距 N 端 0.5 km)和远端(距 N 端 3.5 km)分别设置金属性不对称故障, 考察相继保护性能。对于区内外故障的表现特性, M 处相继保护的启动与动作情况如表 5 所示。

表 5 两相金属性故障时 M 处相继保护的启动与动作情况

Table 5 Start and action of sequential protection at M in case of two-phase gold attribute failure

故障位置	故障相别	故障类型	启动情况	动作情况
区外距 N 0.5 km	AB	永久故障	√	×
	AC	永久故障	√	×
	BC	永久故障	√	×
区外距 N 3.5 km	AB	永久故障	×	×
	AC	永久故障	×	×
	BC	永久故障	×	×
区内距 N 1 km	AB	永久故障	√	√
		瞬时故障	√	×
	AC	永久故障	√	√
		瞬时故障	√	×
	BC	永久故障	√	√
		瞬时故障	√	×

区内靠近对端(N 端)发生故障时, 由于不在 M 端 I 段保护动作区, 其相继速动保护启动, 向断路器发动作信号, 保证故障线路被切除。对端(N 端)区外近区故障时, M 端的相继速动保护虽然会启动, 但对端过流 I 段动作、相应断路器跳开后本端保护将返回。对端区外远端故障时, M 端的相继速动保护不启动, 区外故障下相继速动保护不会误动。

4 结论

5G 作为一种新兴通信方式, 能够在配电网差动保护中发挥作用。考虑同步和通信可靠性可能出现异常, 本文提出一种计及 5G 通信异常工况的有源配电网快速综合保护方案。该方案可以适应不同的通信数据传输场景, 并且兼顾区外故障的安全性和区内故障的灵敏性。

1) 本文提出了一种电流幅值差动保护判据, 在 5G 通信系统两侧数据同步性破坏或者劣化导致传统相量差动保护退出时, 基于 5G 通信的幅值差动保护可仅利用两侧电流数据的幅值信息, 为线路提供尽可能的保护。

2) 当 5G 通信系统出现传输中断时, 可采用本文建议的相继速动保护加速传统过流保护 II 段, 保

证在线路严重故障时断路器的快速动作。

3) 为了验证综合保护方案的性能, 开展不同故障位置、不同故障类型、不同过渡电阻情景的仿真测试, 验证了所提综合保护方案的性能。方案可以保证区外故障的绝对安全性, 相继速动保护可以有效加速 II 段保护, 进一步提高故障隔离速度。

参考文献

- [1] BADAL F R, DAS P, SARKER S K, et al. A survey on control issues in renewable energy integration and microgrid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(1): 87-113. DOI: 10.1186/s41601-019-0122-8.
- [2] 张孟琛, 牛益国, 宣文华. 含 DG 配电网分层分区协同故障定位隔离技术[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(23): 115-121.
ZHANG Mengchen, NIU Yiguo, XUAN Wenhua. Hierarchical zoning collaborative fault location and isolation technology for distribution networks containing DG[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(23): 115-121.
- [3] PRADHAN A K, ROUSTRAY A, GUDIPALLI S M. Fault direction estimation in radial distribution system using phase change in sequence current[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(4): 2065-2071.
- [4] 彭克, 张聪, 徐丙垠, 等. 含高密度分布式电源的配电网故障分析关键问题[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(24): 184-192.
PENG Ke, ZHANG Cong, XU Bingyin, et al. Key issues of fault analysis on distribution system with high-density distributed generations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(24): 184-192.
- [5] 张兆云, 林璞, 王星华. 交直流混合配电网继电保护研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(5): 179-187.
ZHANG Zhaoyun, LIN Pu, WANG Xinghua. Review on relay protection of AC/DC hybrid distribution grids[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(5): 179-187.
- [6] 高厚磊, 李娟, 朱国防, 等. 有源配电网电流差动保护应用技术探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 40-44.
GAO Houlei, LI Juan, ZHU Guofang, et al. Study on application technology of current differential protection in active distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 40-44.
- [7] 信息通信行业发展规划(2016—2020 年)[J]. 中国电信业, 2017(2): 50-63.
- [8] SHAFI M, MOLISCH A F, SMITH P J, et al. 5G: a tutorial overview of standards, trials, challenges, deployment, and practice[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35(6): 1201-1221.
- [9] IUT. ITU-R M. 2083 IMT vision-framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond[S]. Geneva: ITU-R, 2015.
- [10] BALTRUNAS D, ELMOKASHFI A, KVALBEIN A.

- Measuring the reliability of mobile broadband networks[C] // Proceedings of the 2014 Conference on Internet Measurement Conference, 2014, Vancouver, BC, Canada: 45-58.
- [11] 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.
- [12] 于洋, 王同文, 谢民, 等. 基于 5G 组网的智能分布式配电网保护研究与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(8): 16-23.
YU Yang, WANG Tongwen, XIE Min, et al. Research and application of intelligent distributed distribution network protection based on a 5G network[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(8): 16-23.
- [13] 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, 27.
WANG Tinghuang, YU Jiang, XU Jian, et al. Distributed protection and self-healing method for distribution network based on dynamic topology[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(9): 18-21, 27.
- [14] 陈栋, 胡兵, 李玉平, 等. 一种基于 5G 通信的配电网分区保护方法: 中国, CN111030058A[P]. 2020-04-17.
- [15] 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.
- [16] 陈建平, 桑林卫, 汤拓, 等. 自适应幅值比的有源配电网差动保护方案[J/OL]. 电测与仪表: 1-7. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20200819.1356.008.html>.
CHEN Jianping, SANG Linwei, TANG Tuo, et al. Adaptive distribution network differential protection scheme with adaptive amplitude ratio[J/OL]. Electrical Measurement & Instrumentation, 1-7. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20200819.1356.008.html>.
- [17] 李彦宾, 贾科, 毕天姝, 等. 电流差动保护在逆变型新能源场站送出线路中的适应性分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(12): 100-105.
LI Yanbin, JIA Ke, BI Tianshu, et al. Adaptability analysis of current differential protection of outgoing transmission line emanating from inverter-interfaced renewable energy power plants[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12): 100-105.
- [18] 丛伟, 张琳琳, 程学启, 等. 基于故障电流幅值与相位差的电流差动保护判据[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(5): 26-30.
CONG Wei, ZHANG Linlin, CHENG Xueqi, et al. Wavelet analysis based modal parameter identification from multiple signals[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(5): 26-30.
- [19] HE Y, ZHENG X, TAI N, et al. An improved scheme of active power differential protection for transmission line[C] // 2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), August 5-10, 2018, Portland, OR, USA: 1-5.
- [20] LIN Xiangning, MA Xiao, WANG Zixuan, et al. A novel current amplitude differential protection for active distribution network considering the source-effect of IM-type unmeasurable load branches[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2021, 129.
- [21] 朱妍, 陆于平. 含 DG 配网充分式优选制综合电流幅值差动保护[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(增刊 1): 68-74.
ZHU Yan, LU Yuping. Sufficient optimized comprehensive current amplitude differential protection for distribution network with distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(S1): 68-74.
- [22] 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.
- [23] 宋馥霖. 电流幅值差动保护的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
SONG Fuluan. Research on differential current amplitude protection[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.
- [24] 基于分组网络的同步网操作管理维护(OAM)技术要求: YD/T 2879—2015[S].
- [25] MUNIR H A, SAAF N, YUSOFF M Z, et al. PING experimental for different topology between PLC and computer via Ethernet[C] // 2011 National Postgraduate Conference, September 19-20, 2011, Perak, Malaysia: 1-5.
- [26] 陈杰. 浅析 Ping 命令在网络运维中的应用[J]. 网络安全技术与应用, 2014(4): 94-95.
CHEN Jie. Application of Ping in the network operation and maintenance[J]. Network Security Technology & Application, 2014(4): 94-95.

收稿日期: 2020-10-29; 修回日期: 2021-05-10

作者简介:

陈宏山(1979—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事电力系统继电保护工作; E-mail: chenhs@csg.cn

徐舒(1979—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事电力系统继电保护研发工作; E-mail: xus@nrec.com

李正红(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事电力系统继电保护工作。E-mail: 15889623932@163.com

(编辑 周金梅)