

DOI:10.12158/j.2096-3203.2022.04.015

基于5G信道的含无测量分支线路综合保护方案

张金虎¹, 陈艳霞¹, 金震², 孙伯龙¹, 宋志伟², 闻宇¹

(1. 国网北京市电力公司, 北京 100031;

2. 南京南瑞继保工程技术有限公司, 江苏 南京 211102)

摘要:现有配电干线常接有若干无法测量的分支,传统三段式过流保护应用于此类线路时灵敏性和快速性均有欠缺,而相量差动保护则存在区外故障制动量过大导致区内故障不灵敏的问题。文中以5G代替光纤作为配电网双端量保护通道,提出面向含无测量分支配电线路的一套综合保护方案。首先分析含无测量分支线路区内、区外故障时两侧负序电流相位特征,提出负序电流比相保护判据;然后,为应对5G通信同步性能无法保证甚至失步的情况,引入正序电流幅值差动保护,在通信中断或正序电流幅值差动保护未启动等极端情形下,采用三段式过流保护,最终形成一套完整的配电网线路综合快速保护方案;最后,在PSCAD/EMTDC中搭建10 kV有源配电网模型,设计多组对比算例进行验证,仿真结果证明了所提保护判据和方案的有效性。

关键词:负序电流比相保护;幅值差动保护;有源配电网;5G通信;同步与失步;含无测量分支线路

中图分类号:TM773

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2022)04-0117-10

0 引言

5G技术具有低时延、高带宽和大连接特性,已快速渗透到诸多工业应用领域^[1-3],其中超低时延和超高可靠的通信(ultra reliable and low latency communication, URLLC)应用场景的时延控制在毫秒级,可靠性达到99.999%,可应用于对时延和可靠性要求极高的行业^[4-7]。5G基站数量增长迅速,信号覆盖范围广,可为传统行业领域革新提供驱动力^[8]。

近年来,配电网呈现更加复杂的形态。随着分布式能源渗透率的稳步上升,传统的单电源配电网呈现主动配电网的鲜明特征^[9]。配电网干线所连负荷可靠性等级高,分布式电源(distributed generation, DG)以及电流变换装置中的核心电力电子器件通常不能耐受长时间的过流冲击,这对保护的选择性、灵敏性和快速性提出更高要求^[10-12]。

通道保护具有绝对的选择性,动作速度快,被广泛应用于输电线路保护,但须配备造价高昂的光纤通道^[13]。配电网大多不具备配置光纤通道的条件,迅猛发展的5G通信有望为通道问题提供理想解决方案^[14]。配电网保护使用的5G电力切片,采用URLLC方式^[15-16],可保障基于通道的双端量保护(如差动保护)动作的可靠性和快速性。

收稿日期:2022-02-23;修回日期:2022-04-19

基金项目:国家电网有限公司总部科技项目“基于物联网的配电网故障快速处理技术研究及应用”(5400-202017106A-0-0-00)

对于通道保护,相量差动保护的应用最为普遍,通道同步性能良好的情况下,相量差动保护性能优异。但根据配网实际情况,配置相量差动保护时存在2个问题:(1)现有配电网线路中往往含有无测量分支,区外故障时,会将无测量分支的电流误辨识为故障电流,造成保护误动;区内故障时,为了躲过该无测量分支,相量差动保护制动量会大幅提升,保护灵敏性低。(2)相量差动保护高度依赖两侧数据严格同步。当通道同步性能变差时,相量差动保护须闭锁。针对问题(1),文中提出负序电流相位比较式保护(负序相差电流纵联保护)。针对问题(2),由于失步不影响幅值,可借助幅值差动保护实现故障辨识与隔离^[17-19]。

文中以5G作为配网双端量保护通道,提出负序电流比相保护,并结合计及无测量分支的正序电流幅值差动保护以及三段式过流保护,形成综合保护方案,最后在PSCAD/EMTDC中搭建模型,验证了该保护方案的有效性。

1 面向含无测量分支线路的负序比相判据

图1为一种有源配电网结构示意图。其中SG为系统电源; $L_1 \sim L_5$ 分别为母线D、E、F、B、C所连接的负荷; L_{ob} 为线路DE中点O连接的分支负荷,出于对配电网设备配置资金预算的考虑,此类分支负荷通常无法测量。类似的线路还有线路BC,文中将这类配网干线命名为含无测量分支线路。考虑到配电网线路的各序阻抗远小于无测量分支的等效序阻抗,且无测量分支接入点相对集中,因此将多

个无测量分支聚合等效,以简化系统拓扑。以图 1 中线路 DE 段为分析对象,发生不对称故障时,作区外和区内故障时的负序阻抗网络等值图。

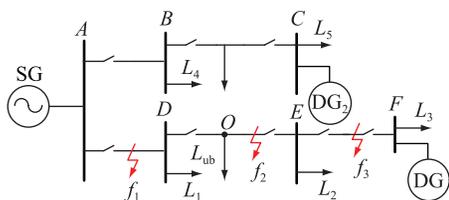


图 1 含无测量分支有源配电网示意

Fig.1 Schematic diagram of active distribution network with unmeasurable branches

图 2 为线路 DE 发生区外故障时的负序阻抗网络等值图。其中 Z_{L2} 为线路 DE 全长的负序等值阻抗; Z_{E2} 为线路 DE 下游 E 侧的系统负序等值阻抗; 故障点将 D 侧系统负序阻抗 Z_{D2} 分为 Z'_{D2} 和 Z''_{D2} ; Z_{ub2} 为无测量分支 L_{ub} 的负序阻抗; λ 为无测量分支 L_{ub} 接入点 O 到母线 D 的线路长度与线路 DE 总长度的比值; \dot{U}_{k2} 为故障附加负序电压; i_{D2} , i_{E2} 分别为线路 DE 两端的负序电流,规定电流正方向为母线流向线路。

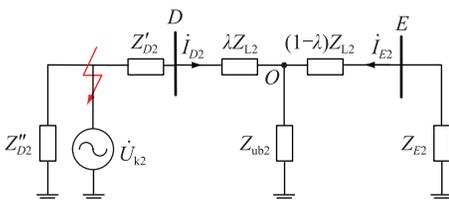


图 2 区外故障负序阻抗示意

Fig.2 Schematic diagram of negative sequence impedance of external fault

由并联阻抗分压可知:

$$i_{E2} = \frac{-Z_{ub2}}{Z_{ub2} + (1-\lambda)Z_{L2} + Z_{E2}} i_{D2} \quad (1)$$

线路 DE 两端负序电流比相为:

$$\arg\left(\frac{i_{D2}}{i_{E2}}\right)_{out} = \arg\left(\frac{Z_{ub2} + (1-\lambda)Z_{L2} + Z_{E2}}{-Z_{ub2}}\right) \quad (2)$$

式中: $\arg(\cdot)$ 表示取用比相运算结果的角度,单位为 rad。

配电网负荷一般为感性负荷,线路两侧的系统等值阻抗、配电线路阻抗也均为感性,有:

$$\begin{cases} \arg(Z_{ub2}) \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right] \\ \arg(Z_{ub2} + (1-\lambda)Z_{L2} + Z_{E2}) \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right] \end{cases} \quad (3)$$

即:

$$\arg\left(\frac{i_{D2}}{i_{E2}}\right)_{out} \in \left[\frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}\right] \quad (4)$$

图 3 为线路 DE 发生区内故障时的负序阻抗网络等值图。其中 γ 为故障点到无测量分支 L_{ub} 接入点 O 的线路长度与母线 E 到 O 的线路长度的比值。

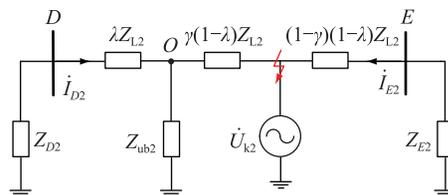


图 3 区内故障负序阻抗示意

Fig.3 Schematic diagram of negative sequence impedance of internal fault

根据基尔霍夫电压定律,有:

$$i_{D2} = \frac{-\dot{U}_{k2}}{Z_{ub2} \parallel [(\lambda Z_{L2} + Z_{D2}) + \gamma(1-\lambda)Z_{L2}]} \times \frac{Z_{ub2}}{Z_{ub2} + \lambda Z_{L2} + Z_{D2}} \quad (5)$$

$$i_{E2} = \frac{-\dot{U}_{k2}}{Z_{E2} + (1-\gamma)(1-\lambda)Z_{L2}} \quad (6)$$

线路 DE 两端负序电流进行比相,有:

$$\arg\left(\frac{i_{D2}}{i_{E2}}\right)_{in} = \arg\left(\frac{Z_{E2} + (1-\gamma)(1-\lambda)Z_{L2}}{Z_{ub2} \parallel [(\lambda Z_{L2} + Z_{D2}) + \gamma(1-\lambda)Z_{L2}]} \times \frac{Z_{ub2}}{Z_{ub2} + \lambda Z_{L2} + Z_{D2}}\right) \quad (7)$$

考虑到配电网负荷等值阻抗,线路两侧的系统等值阻抗、配电线路阻抗一般呈现为感性,且实际配电网中 $|Z_{ub2}| \gg |Z_{L2}| + |Z_{D2}|$, 因此有:

$$\begin{cases} \arg\left(\frac{Z_{E2} + (1-\gamma)(1-\lambda)Z_{L2}}{Z_{ub2} \parallel [(\lambda Z_{L2} + Z_{D2}) + \gamma(1-\lambda)Z_{L2}]}\right) \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right] \\ \arg\left(\frac{Z_{ub2}}{Z_{ub2} + \lambda Z_{L2} + Z_{D2}}\right) \in [-\Delta\theta, \Delta\theta] \end{cases} \quad (8)$$

其中, $\Delta\theta$ 为一个很小的正角度,则:

$$\arg\left(\frac{i_{D2}}{i_{E2}}\right)_{in} \in \left[-\frac{\pi}{2} - \Delta\theta, \frac{\pi}{2} + \Delta\theta\right] \quad (9)$$

区内及区外故障时线路两侧负序电流相位差范围如图 4 所示。

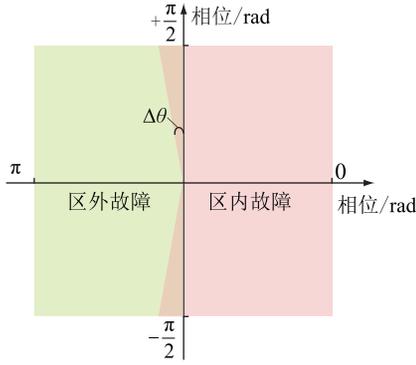


图4 负序电流相角差示意

Fig.4 Schematic diagram of phase angle difference of negative sequence current

区外故障时,比相结果一定在以 $\pm\pi/2$ 为界的左半平面;区内故障时,比相结果基本位于右半平面。为保证区外故障安全性,区内故障的动作判据由式(10)给出:

$$\arg\left(\frac{\dot{I}_{D2}}{\dot{I}_{E2}}\right) \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right] \quad (10)$$

根据判据式(10),极端线路参数和故障条件下,即式(8)的第一式计算值接近 $+\pi/2$ 或 $-\pi/2$ 时,叠加考虑 $\Delta\theta$ 的影响,比相结果在区内故障时有可能落入图4中粉色阴影和绿色阴影重合的区域(即阴影重合区),虽然该阴影重合区在理论上无法排除,但限于极为苛刻的条件,在配电网实际运行中该故障工况发生的可能性甚微,对保护的影响很小。

2 适应含无测量分支线路的正序电流幅值差动判据

以双端电源配电网线路DE段为分析对象,图5为线路DE发生区外故障时的正序阻抗网络等值图。其中 Z_{L1} 为线路DE全长的正序等值阻抗; Z_{D1} 为线路DE上游D侧的系统正序等值阻抗;故障点将E侧系统负序阻抗 Z_{E1} 分为 Z'_{E1} 和 Z''_{E1} ; Z_{ub1} 为无测量分支 L_{ub} 的正序阻抗; \dot{U}_{k1} 为故障附加正序电压; \dot{I}_{D1} , \dot{I}_{E1} 分别为线路DE两端的正序电流,规定电流正方向为母线流向线路; \dot{E}_D , \dot{E}_E 为两侧电源等值电势。

正常运行时,线路DE及其无测量分支 L_{ub} 上流经负荷电流的相位较为接近,可认为故障前线路DE两侧正序电流的幅值 I_{D1} , I_{E1} 之差近似等于流经无测量分支的正序电流幅值 I_B 。

$$|I_{D1} - I_{E1}| \approx I_B \quad (11)$$

区外故障发生后,无测量分支端电压降低,分支正序等效阻抗不发生突变的情况下,分支汲流减

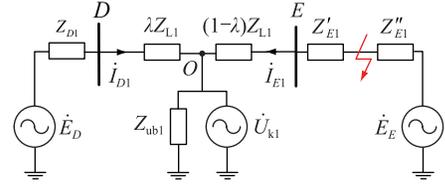


图5 区外故障正序阻抗示意

Fig.5 Schematic diagram of positive sequence impedance of external faults

小,线路DE两侧的正序电流幅值之差将小于故障前的差值,即:

$$I'_B < I_B \quad (12)$$

式中: I'_B 为故障后流经无测量分支的电流幅值。

考虑基尔霍夫电流定律和三角不等式:

$$|I'_{D1} - I'_{E1}| \leq |I'_{D1} + I'_{E1}| = I'_B \quad (13)$$

式中: I'_{D1} , I'_{E1} 分别为故障后的D、E侧正序电流幅值。

综合式(11)一式(13),可得故障后线路两侧正序电流幅值差小于故障前线路两侧的幅值差。即:

$$|I'_{D1} - I'_{E1}| \leq |I_{D1} - I_{E1}| \quad (14)$$

区内故障发生时,线路两侧电源不仅向无测量分支提供负荷电流,还向故障点馈入故障电流,线路两侧的电流差别将增大。DG输出的最大电流为正常运行时的1.2~2倍,逆变类型DG均有最大限流,同步电机类电源向故障点提供的短路电流较大,且故障程度越严重,电流增大特征越显著。因此,对于比较严重的区内故障,由于线路双端电源的差异,两侧正序幅值之差相比于故障前会猛然变大,即:

$$|I'_{D1} - I'_{E1}| > |I_{D1} - I_{E1}| \quad (15)$$

文献[17]和文献[20]已经针对区内故障场景正序电流幅值关系进行了详细推导。为了避免负荷波动造成保护误动,以及无测量分支汲流过小或线路不含分支的情况,以式(16)作为线路的正序电流幅值差动保护判据:

$$|I'_{D1} - I'_{E1}| > \max\{k_{res}|I_{D1} - I_{E1}|, 0.1k_{res}I'_{E1}\} \quad (16)$$

式中: k_{res} 为可靠系数,取值1.2,躲过负荷波动。在无测量分支电流过小时, $|I_{D1} - I_{E1}|$ 接近0, $k_{res}|I_{D1} - I_{E1}|$ 作为制动量失效,用 $0.1k_{res}I'_{E1}$ 作为替代,0.1为计及电流互感器(current transformer, CT)的最大误差10%,以 I'_{E1} 作适应性调节。区内故障时, I'_{E1} 主要为DG向故障点馈入的电流,考虑DG为弱馈以及故障限流特性,该值很小。区外故障时,根据叠加原理, I'_{E1} 等于系统电源对故障点的馈入电流及DG对故障点馈入电流。由于系统电源馈入特

性强,所以 I'_{E1} 数值大。因此以 $0.1k_{res}I'_{E1}$ 作为制动量兼具灵敏性和安全性。

但正序电流幅值差动保护由于仅使用线路两侧的幅值信息,性能不及负序电流比相保护,因此仅作为后备保护。

3 基于 5G 信道的含无测量分支线路综合保护方案

5G 作为一种新型通信手段,可以替代光纤作为配电网线路保护通道,图 6 为 5G 作为双端量保护通道的数据传输过程示意。5G 基站将时钟信息通过空口广播或单播方式传递给 5G 客户终端设备(customer premise equipment, CPE);5G CPE 将时钟信息通过靶场仪器组 B 类码(inter range instrumentation group, IRIG-B 码)接口方式传递给电力终端,实现通信。

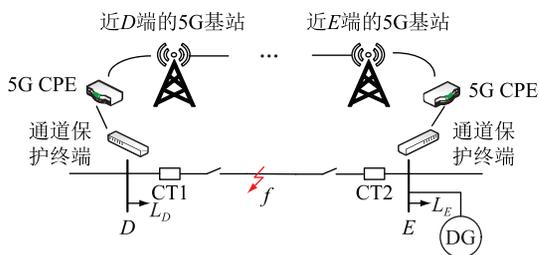


图 6 结合 5G 的通道保护示意
Fig.6 Schematic diagram of 5G-based channel protection

但在 5G 通信网络中,同步授时和数据传输过程受大气情况、环境因素、电磁干扰等影响,存在单一基站或一个区域内基站失去与主网同步甚至通信完全中断的可能性。因此基于 5G 通信,考虑 5G 通信质量,提出一种负序电流比相保护、正序电流幅值差动保护以及传统三段式过流保护相互配合的新型综合保护方案,如图 7 所示。

图 7 中 5G 通信保证同步性的情况下,同时投入 3 种保护。绝大多数不对称故障发生时,负序电流比相保护动作,切除故障。对于对称性故障和极少部分落入图 4 阴影重合区的不对称故障,由正序电流幅值差动保护动作,切除故障。对于极端情景,即正序电流幅值差动保护未启动,同时负序电流比相结果落入图 4 阴影重合区,则由传统三段式保护动作,切除故障。

5G 失步时,须闭锁负序电流比相保护,在区内故障特殊情形下,正序电流幅值差动保护未启动,则由传统三段式保护切除故障。

若 5G 通信完全中断,则正序电流幅值差动保护须闭锁,由传统三段式过流保护动作,切除故障。

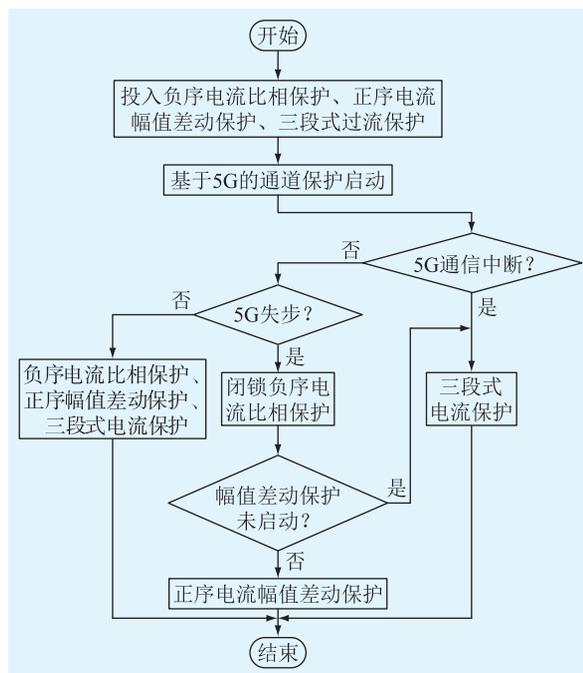


图 7 结合 5G 的配电网故障快速保护方案
Fig.7 5G-based rapid protection scheme for distribution network faults

对于通信是否失步,以及是否完全中断,配电网保护模块可以依据通信模块的可靠报文,作出对应保护的投入或闭锁操作^[21-23]。

需要指出的是,已投运的 5G 通信及相关业务能够保障其通信质量。各类 5G 运营商须进行众多的测试,使得 5G 通信的同步性、延时、丢包率等多项重要指标满足国际国内的高标准要求后,再向电力行业提供相关业务^[24-25]。5G 失步概率极低,完全中断则更为罕见。

4 基于 5G 信道的含无测量分支保护方案算例仿真

为验证文中所提含无测量分支线路的 5G 综合保护方案的性能,基于 PSCAD/EMTDC 搭建图 8 所示 10 kV 含 DG 配电网线路模型。其中,中性点不接地,系统阻抗为 $j0.416 \Omega$;变压器变比为 35:10,采用 Y- Δ 接线方式,阻抗电压为 0.1 倍,容量为 10 MV·A;线路 AD、DE、EF、AB、BC 的长度分别为 2 km、8 km、4 km、2 km、4 km;负荷 L_1, L_2, L_3, L_4 分别为 1 MV·A, 1 MV·A, 1.5 MV·A, 1.5 MV·A。考虑到无测量分支负荷一般不超过总负荷的 10%,将无测量分支负荷 L_{ub} 设置为 0.5 MV·A,接于线路 DE 中点。2 个 DG 额定容量均为 1.2 MV·A,线路正序阻抗为 $0.345+j0.27 \Omega/\text{km}$ 。图中 f_1 为 D 区外出口出现故障; f_2 为 D 区内出现故障; f_3 为 DE 中点出现故障; f_4 为 E 区内出现故障; f_5 为 E 区外出口出现故障; f_6

为E区外远端出现故障。

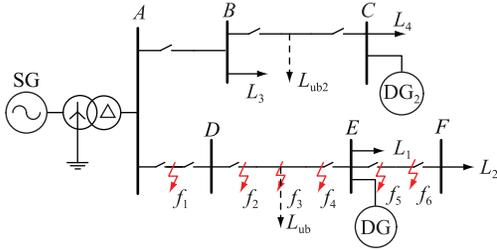


图8 10 kV有源配电网模型

Fig.8 10 kV active distribution network model

图8中,负荷使用电感并联电阻的无源阻抗模型,分支负荷的容量和阻抗角可发生变化,其余负荷功率因数角为0.85。DG考虑电机类和逆变类2种情形,前者等值为系统电源,后者由于故障时存在限流控制环节,等值为正序压控电流源,具体如图9所示。其中 U_{DG} , I_{DG} 分别为DG对外等值电压和输出电流; E_{ST} , Z_{ST} 分别为外部系统的等效电动势和内阻^[17]。

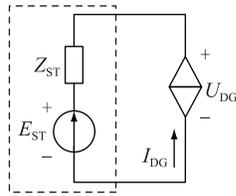


图9 逆变型DG接入后故障等值模型

Fig.9 Fault equivalent model with inverter-interfaced DG

4.1 负序电流比相保护仿真分析

以图8中线路DE为例,在线路中点设置50Ω过渡电阻两相接地故障(BCG),得到如图10所示的负序比相结果,其中故障发生在1s,可以看出比相结果在区内故障后快速变化,根据判据式(10),保护可靠动作。

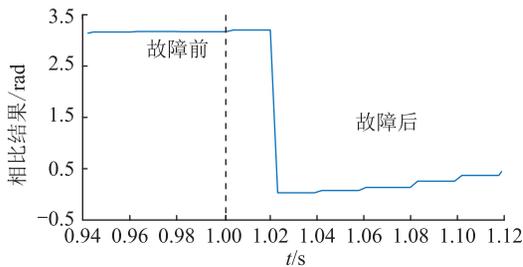


图10 50Ω过渡电阻两相接地故障时比相结果

Fig.10 Phase comparison results at 50Ω transition resistance two-phase grounding fault

分别在区内、区外的6个位置($f_1 \sim f_6$)设置不同类型,不同过渡电阻的不对称故障,其中 f_1, f_5, f_6 为区外故障, f_2, f_3, f_4 为区内故障。负序比相结果如表1和表2所示。

表1 相间故障时负序比相结果

Table 1 Negative sequence phase comparison results in case of phase-to-phase faults rad

故障位置	过渡电阻/Ω				
	0	3	10	30	100
f_1	3.132	3.132	3.152	3.152	3.152
f_2	0.932	0.926	0.925	0.638	0.506
f_3	0.812	0.816	0.810	0.814	0.807
f_4	0.780	0.769	0.773	0.773	0.768
f_5	3.128	3.128	3.128	3.128	3.128
f_6	3.128	3.128	3.128	3.128	3.128

表2 两相接地故障时负序比相结果

Table 2 Negative sequence phase comparison results in case of two-phase grounding faults rad

故障位置	过渡电阻/Ω				
	0	3	10	30	100
f_1	3.132	3.131	3.152	3.151	3.150
f_2	0.931	0.924	0.673	0.410	0.388
f_3	0.812	0.806	0.811	0.711	0.695
f_4	0.772	0.785	0.773	0.771	0.745
f_5	3.129	3.128	3.128	3.128	3.129
f_6	3.128	3.128	3.128	3.128	3.128

从表1和表2可知,区内故障时负序电流比相结果并未落入图4中的阴影重合区,不会拒动,区内、区外故障的比相结果差别明显。

4.2 正序电流幅值差动保护仿真

配电网单相接地故障的过渡电阻值可能会偏高,但两相故障,两相接地故障,三相故障的过渡电阻大多不超过30Ω。以图8中线路DE为例,分别在区内、区外的6个位置进行经30Ω过渡电阻短路故障的仿真,配电网正常运行时,两侧电流的幅值差为0.0266kA。由此,根据式(16),在考虑1.2倍可靠系数后,可整定正序电流幅值差动保护动作门槛为0.032kA,表3为不同位置故障后正序电流的幅值差动值。

表3 30Ω过渡电阻故障时幅值差动值

Table 3 Amplitude differences of 30Ω transition resistance faults kA

故障位置	故障类型			动作情况
	BC	BCG	ABC	
f_1	0.025 9	0.026 1	0.025 9	×
f_2	0.196 2	0.131 9	0.202 6	√
f_3	0.179 5	0.126 1	0.190 2	√
f_4	0.161 9	0.120 3	0.177 3	√
f_5	0.025 1	0.025 6	0.025 0	×
f_6	0.025 1	0.025 5	0.025 1	×

表中“×”为保护不动作,“√”为保护动作,BC

为 BC 相间故障,BCG 为 BC 两相接地故障,ABC 为三相对称故障,后文亦同。由表 3 可见,对于不同故障类型,经 30 Ω 过渡电阻故障时保护均可以正确动作。

考虑高阻故障时正序电流幅值差动保护的适用性。图 11 为线路 DE 中点经 100 Ω 过渡电阻 BC 两相接地故障时正序电流幅值差,故障发生在 1 s。由图可见,正序电流幅值差动保护在经 100 Ω 过渡电阻故障时依然可以动作。图 12 为线路 DE 中点经 600 Ω 过渡电阻 BC 两相接地故障时正序电流幅值差。由图可知,过渡电阻高达 600 Ω 时保护仍能正确动作,说明在数据测量精度能够得到保证的前提下,所提判据能够满足配电网故障隔离的需要。

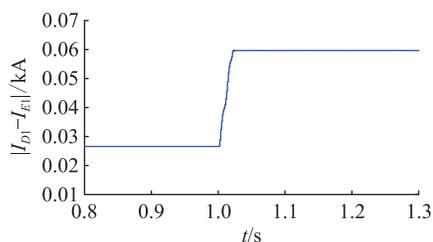


图 11 100 Ω 两相接地故障正序电流幅值差
Fig.11 The positive sequence current amplitude difference of 100 Ω two-phase grounding fault

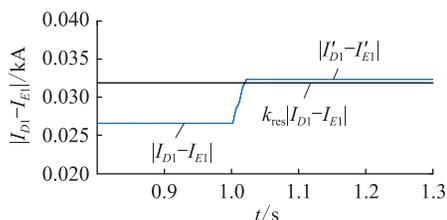


图 12 600 Ω 两相接地故障正序电流幅值差
Fig.12 The positive sequence current amplitude difference of 600 Ω two-phase grounding fault

另外,区内和区外各选一个典型点,仿真对比不同失步条件下,发生经 30 Ω 过渡电阻 BC 相间故障时 2 种保护的動作情况,如表 4 所示。

表 4 失步情况下 2 种保护判据的動作情况
Table 4 Two protection criteria's action situation if out of step

失步角度/(°)	f_3		f_5	
	负序	正序	负序	正序
60	√	√	×	×
120	√	√	√	×
180	×	√	√	×
240	×	√	√	×
300	×	√	×	×

表 4 中,负序电流比相保护简称负序,正序电流

幅值差动保护简称正序,下同。由表 4 可以看出,负序电流比相保护对于通信同步性能有较高要求,通信失步后,区内故障会拒动,区外故障可能误动。因此,5G 同步条件不能保证时,应及时闭锁负序电流比相保护,但正序电流幅值差动保护仍能正确动作。

4.3 含无测量分支线路负荷水平变化时的仿真

实际配电网中无测量分支负荷大小有可能发生变化,须验证所提判据对负荷变化的鲁棒性。以图 8 中线路 DE 为例,分别在区内、区外的 6 个位置设置过渡电阻为 100 Ω 的 BC 两相接地故障,改变无测量分支负荷水平时,2 种保护的仿真结果见表 5、表 6。

表 5 负序电流比相结果
Table 5 Negative sequence current phase comparison results rad

故障位置	无测量分支负荷水平/(MV·A)				
	0.1	0.3	0.8	1.5	2.5
f_1	3.144	3.151	3.156	3.154	3.203
f_2	0.543	0.645	0.665	0.798	0.779
f_3	0.670	0.715	0.665	0.773	0.803
f_4	0.779	0.774	0.768	0.813	0.743
f_5	3.139	3.134	3.121	3.103	3.079
f_6	3.139	3.134	3.121	3.103	3.078

表 6 正序电流幅值差动值
Table 6 Positive sequence current amplitude differences kA

故障位置	无测量分支负荷水平/(MV·A)				
	0.1	0.3	0.8	1.5	2.5
故障前	0.005 5	0.016 1	0.042 2	0.078 0	0.127 4
f_1	0.005 4	0.016 0	0.041 8	0.077 5	0.126 7
f_2	0.040 2	0.050 8	0.076 7	0.112 1	0.161 1
f_3	0.039 0	0.049 4	0.075 0	0.110 0	0.158 3
f_4	0.037 4	0.047 8	0.073 5	0.108 5	0.156 8
f_5	0.005 4	0.015 9	0.041 7	0.077 1	0.125 9
f_6	0.005 4	0.015 8	0.041 7	0.077 0	0.125 9

依据式(16),表 6 中故障后正序电流幅值差若大于相应故障前幅值差的 1.2 倍,则保护动作。由表中数据可见,区内故障时正序电流幅值差均大于制动量,区外故障时小于制动量。

由表 5、表 6 可知,无测量分支的负荷水平变化时,负序电流比相保护和正序电流幅值差动保护在经 100 Ω 过渡电阻故障时可正确动作,适应性良好。

进一步地,考察无测量分支负荷阻抗角(感性)变化时保护方案的性能。在区内、区外各选取一个具有代表性的故障点,设置过渡电阻 100 Ω 的 BC

两相接地故障,无测量分支线上接有容量为 $2 \text{ MV}\cdot\text{A}$ 的感性负荷,改变负荷阻抗角,2种保护的動作情况如表7所示。

表7 不同分支负荷阻抗角时保护动作情况

Table 7 Protect action when different branch load impedance angles

保护类型 (故障点)	无测量分支负荷阻抗角/rad				
	0.175	0.436	0.698	1.047	1.483
负序(f_3)	√	√	√	√	√
负序(f_6)	×	×	×	×	×
正序(f_3)	√	√	√	√	√
正序(f_6)	×	×	×	×	×

从表7可以看出,所提负序电流比相判据和正序电流幅值差动判据不受无测量分支负荷阻抗角的影响,可正确动作,与理论分析一致。

分析相量差动保护应用于配电线路的動作性能。考虑到无测量分支的电流会呈现为差流特征,为了保证区外故障时的安全性,相量差动保护需要整定较高的動作门槛,从而降低灵敏性。以无测量分支负荷 $2 \text{ MV}\cdot\text{A}$, BC 两相接地故障为例,考虑负荷的波动,以正常运行时线路两侧电流相量和的2倍作为相量差动保护的動作门槛。则正常运行和区外短路时相量差动保护不误动。区内故障时,不同过渡电阻下,3种保护的動作情况如表8所示。

表8 3种保护不同过渡电阻区内故障时動作情况

Table 8 Internal fault actions of the three types of protections when different transition resistance

保护类型	过渡电阻/ Ω				
	0	10	30	100	300
相量差动	√	√	×	×	×
负序比相	√	√	√	√	√
正序幅值	√	√	√	√	√

从表8可看出,负序电流比相保护和正序电流幅值差动保护可以保证无测量分支存在情况下的灵敏度,性能明显优于相量差动保护。

4.4 不同DG类型及渗透率时保护适应性验证

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控制策略是否会对動作性能产生影响。与4.1节相比,改变E侧所连接DG,针对光伏(PV)、双馈风机(DFIG)、小水电(W)3种类型DG,考虑30%以下不同渗透率,在区内、区外各一个具有代表性的点设置BC相间故障:E侧区内(f_4)经过渡电阻 50Ω 故障,E侧区外出口(f_5)金属性故障,验证所提保护的動作情况,其结果如图13、图14所示。

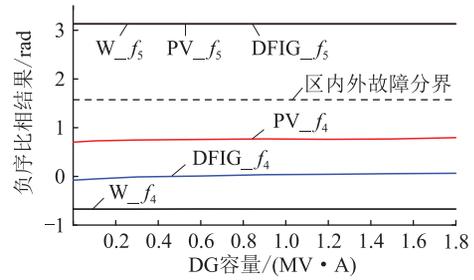


图13 不同类型和容量DG的负序比相结果

Fig.13 Negative sequence phase comparison for different types of DG with different capacity

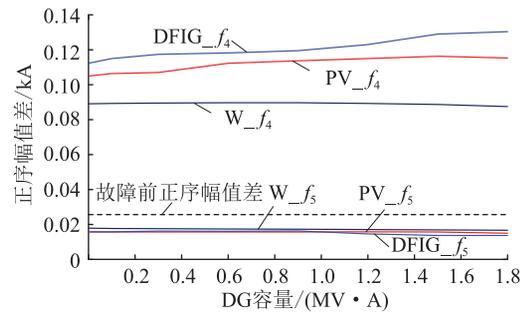


图14 不同类型和容量DG的正序幅值差

Fig.14 Positive sequence amplitude difference for different types of DG with different capacity

由图13可以看出,使用负序比相判据时,区内、区外故障分界非常清晰。区外故障时,各种类型的DG负序比相结果均稳定在 π 附近,区内故障时,负序比相结果的大小与DG的类型有关,几乎不随DG容量变化而改变,保护不发生拒动与误动。

由图14可以看出,使用正序幅值差判据时,以故障前线路两侧的正序幅值差作为制动量。区外故障时,3种类型DG的线路正序幅值差(动作量)均小于制动量,区内故障时,3种类型DG的线路正序幅值差均明显大于制动量,光伏和双馈风机的故障限流特性更强,且其容量越大,故障发生后的限流特征越显著,与系统侧电源的差异程度越高,因此故障后的幅值差变化量更大。从图14可看出,计及分支的正序电流幅值差动保护判据具有可靠性。

4.5 基于5G通信的保护实时性分析

与基于光纤通道直联的单元式保护不同,基于5G通信双端量保护的时延主要由配电网保护的信息采集、算法处理以及5G的传输总时延构成。

其中,配电网电流信息采集与保护的数据处理的耗用时 t_{end} 表示,可看作是与5G信道无关的動作延时。将配电自动化终端视为5G网络中的用户,对于线路DE的两侧配电终端,分别视为用户1和用户2,则5G通信导致的延时由无线网络空中接口的双向延迟 t_0 与基站间的传输延迟 t_1 构成。整体

的时延可表示为:

$$T_{\text{delay}} = t_{\text{end}} + t_0 + t_1 \quad (17)$$

对于 t_{end} , 负序电流比相保护, 正序电流幅值差动保护动作的时间窗与常用的相量差动保护相近, 受制于全周傅里叶算法, 保护出口时间在 20 ms 左右。对于 t_0 , URLLC 的规定是 1 ms, 考虑多个示范工程的实际测试结果, 并附加一定裕度, 取 10 ms^[26-28]。对于 t_1 , 可由数据包延迟预算 (packet delay budget, PDB) 给定最大值。PDB 定义了在使用户面功能体 (user plane function, UPF) 的用户和 N6 终止点 (UPF 和外部 DN 间的接口) 之间可能延迟数据包的时间上限。根据 5G 配网差动类保护所用延迟技术协议类型, PDB 取值 3~5 ms^[4]。示范工程测试结果也显示该部分延迟在 3 ms 左右^[26-28]。

综上, 通信环节总延时大致为 13~15 ms, 考虑加密过程需要额外耗费约 10 ms, 则计及加密的通信环节总延时 23~25 ms。

考虑算法本身的时间窗, 以故障发生时刻为起点, 基于 5G 通信的负序比相保护和正序电流幅值差动保护整体出口在 43~45 ms 以内。而传统的三段式过流保护, II、III 段时延 0.3 s 以上, 并且 II 段整定配合困难时, 必须依赖 III 段动作, III 段动作时延累积可能很长。过流 I 段在 20 ms 内动作, 有些情形出于躲过避雷器放电电流和变压器励磁涌流的考虑, 也整定 0.1 s 延时动作, 并且对于复杂的有源配电网线路, I 段的保护范围可能极小甚至缺失。相比而言, 文中所提方案里的前 2 种保护判据动作速度略慢于能瞬时动作的过流 I 段 (20 ms), 但明显快于过流 II、III 段。由于无需额外的通信建设成本即可显著提高含无测量分支线路保护的可靠性和速动性, 文中所提方案有望在重要城市的重要配电干线上得到应用。

5 结论

文中提出一种基于 5G 信道、计及配网线路无测量分支影响的配电网快速综合保护方案。该方案可以兼顾区外故障的安全性和区内故障的灵敏性。

(1) 在 5G 通信系统两侧数据同步性得到保证时, 负序电流比相保护判据可以为线路提供快速的可靠保护。

(2) 若 5G 失步, 正序电流幅值差动保护仍可为线路提供快速的灵敏保护, 且可以有效弥补负序电流比相保护不能响应对称性故障的缺陷。

(3) 若 5G 完全中断, 负序电流比相保护和正

序电流幅值差动保护自动闭锁, 三段式过流保护仍可有效发挥作用。因此, 所提综合快速保护方案大大提升了传统三段式过流保护的可靠性和快速性。

考虑到我国中压配电网多采用中性点非有效接地方式, 在发生单相接地故障时电流数值很小, 负序角度和正序幅值变化量都可能测量不够准确, 因此为保证保护动作可靠性, 可不启动负序电流比相保护和正序电流幅值差动保护。如何有效解决非有效接地配电网单相故障快速辨识的问题, 有待后续进一步的研究。

本文得到国网北京市电力公司科技项目“基于新型无线通信技术的配电网保护技术研究”(520223190042) 资助, 谨此致谢!

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 谢石木林. 基于 5G 的变电站电气设备智能巡检技术研究与应用[J]. 电力信息与通信技术, 2021, 19(12): 109-116.
XIE Shimulin. Research and application of intelligent inspection technology for substation electrical equipment based on 5G[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2021, 19(12): 109-116.
- [3] 陈文伟, 朱玉坤, 张宁池, 等. 面向能源互联网的 5G 关键技术及应用场景研究[J]. 电力信息与通信技术, 2021, 19(8): 83-90.
CHEN Wenwei, ZHU Yukun, ZHANG Ningchi, et al. Research on 5G key technologies and application scenarios for energy internet [J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2021, 19(8): 83-90.
- [4] 3GPP Technical specification (TS) 23.501. System architecture for the 5G system (5GS) [S]. 2018.
- [5] 3GPP Technical specification (TS) 23.502. Procedures for the 5G system (5GS) [S]. 2018.
- [6] 3GPP Technical specification (TS) 23.503. Policy and charging control framework for the 5G system (5GS) [S]. 2018.
- [7] 滕玲, 李健, 吴赛, 等. 利用 5G 无线终端实现高精度授时的研究[J]. 电力信息与通信技术, 2021, 19(1): 36-42.
TENG Ling, LI Jian, WU Sai, et al. Research on high precision time service using 5G wireless terminal [J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2021, 19(1): 36-42.
- [8] 陆平, 李建华, 赵维铎. 5G 在垂直行业中的应用[J]. 中兴通讯技术, 2019, 25(1): 67-74.
LU Ping, LI Jianhua, ZHAO Weiduo. Applications of 5G in vertical industry [J]. ZTE Technology Journal, 2019, 25(1): 67-74.
- [9] 苑吉河, 张曦, 黄虎, 等. 基于电流序分量的多源配电网故障

- 定位方法[J]. 电力工程技术, 2020, 39(5): 204-210.
- YUAN Jihe, ZHANG Xi, HUANG Hu, et al. Multi-source distribution network fault location method based on current sequence component[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(5): 204-210.
- [10] 祁欢欢, 荆平, 戴朝波, 等. 分布式电源对配电网保护的影响及保护配置分析[J]. 智能电网, 2015, 3(1): 8-16.
- QI Huanhuan, JING Ping, DAI Chaobo, et al. Impact of distributed generation upon distribution systems protection and analysis of protection configuration[J]. Smart Grid, 2015, 3(1): 8-16.
- [11] 谢维兵, 刘敏, 周晓霞, 等. 含电压逆变型分布式电源配电网的短路电流计算[J]. 重庆大学学报, 2017, 40(2): 70-79.
- XIE Weibing, LIU Min, ZHOU Xiaoxia, et al. Short-circuit current calculation of inverter interfaced distributed generator based on voltage control in distribution network[J]. Journal of Chongqing University, 2017, 40(2): 70-79.
- [12] 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.
- [13] 陈忠颖. 高压线路光纤保护通道的应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- CHEN Zhongying. The research on the practical application of the fiber protection channel for high-tension line[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- [14] 林军, 韦恬静, 蒋红亮, 等. 一种基于5G通信的配电网差动保护算法[J]. 电力信息与通信技术, 2021, 19(10): 20-29.
- LIN Jun, WEI Tianjing, JIANG Hongliang, et al. A differential protection method for distribution network with 5G mobile communication[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2021, 19(10): 20-29.
- [15] 贺金红, 张港红, 高建. 5G切片技术在电力物联网应用的智能化管理[J]. 电力信息与通信技术, 2020, 18(5): 19-25.
- HE Jinhong, ZHANG Ganghong, GAO Jian. Intelligent management of 5G slices in the application of power internet of things[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2020, 18(5): 19-25.
- [16] 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.
- [17] 张雪松, 马啸, 章雷其, 等. 有源配电网含不可测分支线路新型电流幅值差动保护判据[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(2): 76-84.
- ZHANG Xuesong, MA Xiao, ZHANG Leiqi, et al. Novel current amplitude differential protection criterion for line with unmeasurable branch in active distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(2): 76-84.
- [18] 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(S1): 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.
- [19] 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.
- [20] 和敬涵, 李文立, 张大海, 等. 基于节点分支电流幅值的含DG配网差动保护原理[J]. 电网技术, 2018, 42(11): 3601-3609.
- HE Jinghan, LI Wenli, ZHANG Dahai, et al. Differential protection scheme based on current amplitude of branch node for distribution network with DG[J]. Power System Technology, 2018, 42(11): 3601-3609.
- [21] 李由由, 武建锋, 王康. 面向5G网络应用的精确时间同步协议测试与分析[J]. 全球定位系统, 2020, 45(5): 90-96.
- LI Youyou, WU Jianfeng, WANG Kang. Testing and analysis of precise time synchronization protocol for 5G network applications[J]. GNSS World of China, 2020, 45(5): 90-96.
- [22] 曾庆琦. 高精度网络时间同步的研究与实现[D]. 中国科学院大学(中国科学院武汉物理与数学研究所), 2020.
- ZENG Qingqi. Research and implementation of high-precision network time synchronization[D]. University of Chinese Academy of Sciences(Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Sciences), 2020.
- [23] 蒋政波, 郭翀, 洪伟. 5G毫米波测试方法研究进展[J]. 中国科学基金, 2020, 34(2): 126-132.
- JIANG Zhengbo, GUO Chong, HONG Wei. Research and progress in 5G millimeter wave testing: an overview[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2020, 34(2): 126-132.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.

[27] 张建雨,姜睿智,李俊刚,等. 基于 5G 通信的配电网差动保护技术研究[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(7):17-23.
ZHANG Jianyu,JIANG Ruizhi,LI Jungang, et al. Research on differential protection of a distribution network based on 5G communication[J]. Power System Protection and Control, 2021,49(7):17-23.

[28] 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. Discussion on adaptive differential protection technology of distribution network based on 5G wireless communication[J]. Distribution &

Utilization,2019,36(9):18-21,27.

作者简介:



张金虎

张金虎(1984),男,博士,工程师,从事继电保护技术相关工作(E-mail:jintu212@163.com);

陈艳霞(1974),女,博士,教授级高级工程师,从事继电保护及自动化技术相关工作;

金震(1977),男,硕士,高级工程师,从事继电保护技术相关工作。

Comprehensive protection scheme for lines with unmeasurable branches based on 5G channels

ZHANG Jinhu¹, CHENG Yanxia¹, JIN Zhen², SUN Bolong¹, SONG Zhiwei², WEN Yu¹

(1. State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 100031, China;

2. NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: There are many unmeasurable branches along with distribution lines. The sensitivity and speed of traditional three-stage overcurrent protection lacks when applied to these lines. Even the phasor differential protection cannot identify internal faults sensitively to maintain sufficient safety under external faults. With 5G communication is penetrating the field of power grid automation, a comprehensive protection scheme for branched distribution lines is proposed. Firstly, analyze negative sequence currents phase characteristics under internal or external faults, and negative-sequence current phase-comparison protection is proposed. Secondly, in some harsh working conditions, 5G communication's synchronization cannot be guaranteed, or even out of step. A positive sequence amplitude differential protection is introduced. Finally, the three-stage overcurrent protection is combined to form a complete set of protection coordination schemes when communication interruption or some extreme situations. A 10 kV active distribution network model is built in PSCAD/EMTDC to verify the proposed protection criteria and scheme. The simulation results demonstrate the effectiveness of the proposed protection criteria and scheme.

Keywords: negative sequence phase comparison protection; positive sequence amplitude differential protection; active distribution network; 5G communication; synchronization and loss of synchronization; lines with unmeasured branches

(编辑 方晶)