

基于电流正序分量相位比较的主动配电网保护方案

彭春华,张艳伟

(华东交通大学 电气与电子工程学院,江西 南昌 330013)

摘要: 主动配电网中分布式电源渗透率的提高和运行方式的复杂性可能引起保护拒动、误动或重合闸失败等问题,为此提出了一种适用于主动配电网的保护方案。该方案基于故障电流正序分量和参考相量的相位比较构造了故障方向判据,可快速准确地定位故障区段,并由此实现故障点上、下游保护有选择性地配合动作。考虑到实际应用中系统误差的存在,通过引入泛化角提高了故障方向判据的鲁棒性。该方案只需要故障后电流信号,可减少电压互感器的装设,且保护配合只需要传输闭锁信号和跳闸信号,可降低对通信的要求。最后通过对不同类型故障的仿真,验证了该方案的有效性。

关键词: 正序; 相位比较; 故障方向; 主动配电网; 继电保护

中图分类号: TM 77

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.06.024

0 引言

传统配电网一般是含单一电源的辐射状网络,且采取中性点不接地或经消弧线圈接地方式,所以通常只配置不带方向的三段式电流保护^[1]。在主动配电网中,分布式电源渗透率的不断提高使得配电网变成一个正常运行功率与故障电流双向流动的有源网络,动态行为更加复杂^[2]。发生故障时,传统三段式电流保护由于不具备方向性,分布式电源作故障穿越运行时,易导致保护误动作、拒动作和灵敏度降低,并有可能引起自动重合闸失败,还有可能导致非计划孤岛。非计划孤岛一旦形成,由于失去了大电网的无功和有功支持,电压、频率变得不可控,同时会威胁运行人员的人身安全^[3]。

为了保证继电保护的可靠性、灵敏性、选择性,在主动配电网中,必须配备相应的能消除分布式电源对故障电流影响的保护方案。文献[4-5]提出采用距离保护方案以克服分布式电源对配电网继电保护的影响;文献[6-8]提出使用故障电流限制器,以限制分布式电源在故障情况下对故障电流的影响,但是电流限制器有较大的调节惯性,不能快速响应电流变化;文献[9]提出分别根据分布式电源联网或离网运行状态对保护进行设定的方案,这种方法需要对电网的连接情况进行拓扑结构识别;文献[10]提出依据故障水平和分布式电源的连接情况实时调整过电流保护整定值的保护方案;文献[11]提出了一种能

根据配电网的运行方式自动调整设定值的新型自适应保护方案;文献[12]提出了一种能适应分布式电源运行情况而自动调整过电流保护定值的网络化自适应保护方案。以上方案均未考虑主动配电网中主动控制方法对保护的影响并且需要提供电压信息。

文献[13]设计了一种仅利用母线上3条以上线路的故障分量电流相位就能判断故障方向的元件,该方向元件不需要电压信息,但是没有就测量过程中的误差对保护判据进行调整,可能会出现误判。欧盟也有采用差动保护和距离保护的主动配电网保护设计方案^[14-16],但是采用的差动保护对通信通道和数据同步要求较高。文献[17]基于特定配电网的拓扑结构,提出一种分级分层的保护方案,不足之处在于该方案不具备普遍性,只是针对特定的电网结构有效。

本文基于以上研究成果存在的不足,提出了一种利用故障电流正序分量及参考相量相位比较导出的故障方向判据,可以判定故障方向及故障线路,通过故障线路上、下游保护的配合,快速、可靠、有选择性地故障线路切除。由于保护方案只需要故障后的电流量,不需要电压量及故障前的负荷电流量,减少了电压互感器的安装量,可以获得明显的经济性,保护间只需要传输闭锁信号和跳闸信号,降低了对通信的要求。保护方案采用正序分量实现保护功能,所以适用于各种类型的短路故障,扩大了保护的适用范围。

1 基于电流相位比较故障方向判据

图1为正向潮流下的故障示意图。图中, E_{s1} 为公用大电网等效电源, E_{s2} 为主动配电网分布式电源和储能设备的等效电源;1和2为装设于母线M和L之间的2个保护; f_1 、 f_2 为短路点。分布式电源中的旋转型电源按等效电源和等效阻抗串联的形式等

收稿日期:2015-12-06;修回日期:2016-03-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51567007);江西省科技支撑计划项目(20142BBE50001);江西省自然科学基金项目(20152ACB20017,20151BAB216020)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51567007), Science & Technology Support Program of Jiangxi Province(20142BBE50001) and Natural Science Foundation of Jiangxi Province(20152ACB20017,20151BAB216020)

效;逆变器型电源按文献[11]提供的方法进行等效,且等效电势和阻抗并不能简单等效为一个定值,而应包含有逆变器的控制过程,是非线性的^[18];储能设备同样按照文献[11]中的方法进行等效,依据等效电源电流方向确定储能设备处于电源或负荷状态。为了下文表述方便,对于每个保护安装点,本文将位于其远离公用大电网侧方向的故障称为其正向故障,将位于其靠近公用大电网侧方向的故障称为其反向故障;对于每条线路,本文将位于其靠近大电网侧的保护称为其上游保护,将位于其远离大电网侧的保护称为其下游保护。本文方案的最大特点是利用故障后电流就能检测故障方向,仅需分离出故障电流及其正导数、负导数的基频量,该过程可以利用全相位快速傅里叶变换(FFT)方法实现。

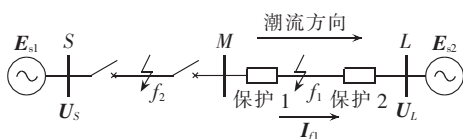


图 1 正向潮流下故障示意图

Fig.1 Schematic diagram of fault in condition of forward power flow

采用文献[19]的约定,规定保护的正方向是由母线流向线路,所有的电气量相位统一到 $[-\pi, \pi)$ 内。故障电流 I_{f1} 的参考方向如图 1 所示, I_{f2} 选择和 I_{f1} 相同的参考方向。假设:当故障发生在 f_1 处时,母线 S 到点 f_1 的阻抗为 Z_{sf1} 且其相角为 α ;当故障发生在 f_2 处时,母线 L 到点 f_2 的阻抗为 Z_{lf2} 且相角为 β 。

电力系统中单相故障发生的概率最大,本节以单相故障为例推导故障方向判据。

在图 1 所示的电路中,讨论正向故障和反向故障时的电流情况。

1.1 正向潮流下出现故障

a. 正向故障示意图如图 2 所示。正向故障时假设公共电网母线电压 $U_s = U_s \angle \varphi$ (U_s 、 φ 分别为 U_s 的模值和相角)。

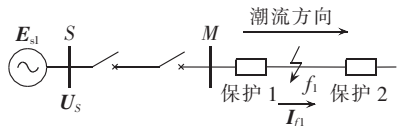


图 2 正向故障时电路

Fig.2 Circuit of forward fault

保护 1 正向故障时,故障电流为:

$$I_{f1} = \frac{U_s}{Z_{sf1}} = \frac{U_s \angle \varphi}{|Z_{sf1}| \angle \alpha} = \frac{U_s}{|Z_{sf1}|} \angle (\varphi - \alpha) = |I_{f1}| \angle (\varphi - \alpha) = |I_{f1}| [\cos(\varphi - \alpha) + j\sin(\varphi - \alpha)] \quad (1)$$

为方便说明,本文将相量导数简称为正导数,将相量导数取负简称为负导数。

设 $f = \cos(\varphi - \alpha) + j\sin(\varphi - \alpha)$, 则 I_{f1} 的正导数为:

$$I'_{f1+} = |I'_{f1}| f' = |I'_{f1}| [-\sin(\varphi - \alpha) + j\cos(\varphi - \alpha)] = |I'_{f1}| \angle \left(\varphi - \alpha + \frac{\pi}{2} \right) \quad (2)$$

I_{f1} 的负导数为:

$$I'_{f1-} = -I'_{f1+} = |I'_{f1}| \angle \left(\varphi - \alpha + \frac{3\pi}{2} \right) = |I'_{f1}| \angle \left(\varphi - \alpha - \frac{\pi}{2} \right) \quad (3)$$

为了把各个电气量相角调整到 $[-\pi, \pi)$ 范围内,当相角大于 π 时减 2π ,当相角小于 $-\pi$ 时加 2π 。建立参考相量 I_{ref} 用于检测故障方向:

$$I_{ref} = |I'_{f1}| \angle \left(\frac{\arg I'_{f1-} + \arg I'_{f1+}}{2} + \frac{\pi}{2} \right) = |I'_{f1}| \angle \left(\varphi - \alpha + \frac{\pi}{2} \right) \quad (4)$$

b. 反向故障示意图如图 3 所示。反向故障时假设负荷侧母线电压 $U_L = U_L \angle \gamma$ (U_L 、 γ 分别为 U_L 的模值和相角)。

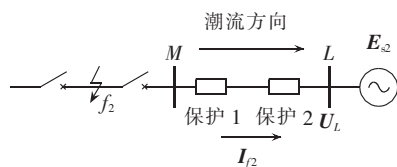


图 3 反向故障时电路

Fig.3 Circuit of backward fault

故障电流为:

$$I_{f2} = -\frac{U_L}{Z_{lf2}} = -\frac{U_L \angle \gamma}{|Z_{lf2}| \angle \beta} = -\frac{U_L}{|Z_{lf2}|} \angle (\gamma - \beta) = |I_{f2}| \angle (\gamma - \beta + \pi) \quad (5)$$

I_{f2} 的正导数为:

$$I'_{f2+} = |I'_{f2}| \angle \left(\gamma - \beta + \frac{3\pi}{2} \right) = |I'_{f2}| \angle \left(\gamma - \beta - \frac{\pi}{2} \right) \quad (6)$$

I_{f2} 的负导数为:

$$I'_{f2-} = |I'_{f2}| \angle \left(\gamma - \beta + \pi - \frac{\pi}{2} \right) = |I'_{f2}| \angle \left(\gamma - \beta + \frac{\pi}{2} \right) \quad (7)$$

可得参考相量:

$$I_{ref} = |I'_{f2}| \angle \left(\frac{\arg I'_{f2-} + \arg I'_{f2+}}{2} + \frac{\pi}{2} \right) = |I'_{f2}| \angle \left(\gamma - \beta + \frac{\pi}{2} \right) \quad (8)$$

以上分别针对正向潮流条件下正向故障和反向故障计算出了故障电流和参考相量,设置故障方向判据:

$$\Delta = \arg I_{ref} - \arg I_f \quad (9)$$

其中, I_f 为故障后电流。

由以上分析得正向故障时有:

$$\Delta_{f1} = \frac{\pi}{2} \quad (10)$$

反向故障时有:

$$\Delta_{f2} = -\frac{\pi}{2} \quad (11)$$

图 4(a)、(b)分别是正向潮流条件下,正向故障、反向故障时的故障电流及其正导数、负导数和参考相量的相量图。

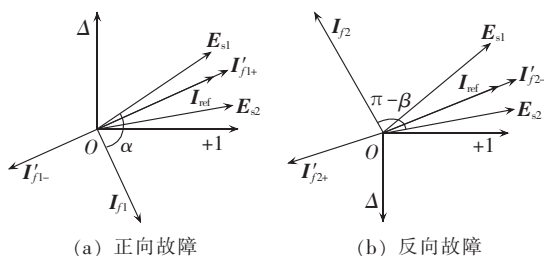


图 4 正向潮流条件下相量图

Fig.4 Phasor diagram in condition of forward power flow

依据式(10)和(11),正向潮流时参考相量与故障电流相角差 Δ 可以作为判断故障方向的判据,当判据 $\Delta = \pi/2$ 时,应判断为正向故障;当判据 $\Delta = -\pi/2$ 时,应判断为反向故障。

由此得出如下故障方向判据:

$$\begin{cases} \Delta = \frac{\pi}{2} & \Leftrightarrow \text{正方向故障} \\ \Delta = -\frac{\pi}{2} \text{ 或 } \frac{3\pi}{2} & \Leftrightarrow \text{反方向故障} \end{cases} \quad (12)$$

实际系统在测量过程中会产生误差^[20],从而有可能导致相角差 Δ 的计算值存在一定的偏差。假设 Δ 偏差的范围为 $[-\delta, \delta]$,为了提高故障方向判据的鲁棒性,可进一步将上述等式判据泛化为区间形式的判据,即将方向判据泛化为如图 5 所示的 2 个对称的扇形区域。

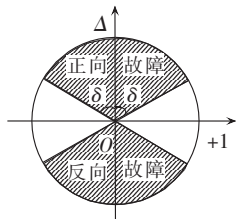


图 5 方向判据泛化区间
Fig.5 Generalized sections of fault direction criterion

图 5 中 δ 定为泛化角,由此可得到如式(13)所示的改进型故障方向判据。

$$\begin{cases} \frac{\pi}{2} - \delta < \Delta < \frac{\pi}{2} + \delta & \Leftrightarrow \text{正方向故障} \\ \frac{3\pi}{2} - \delta < \Delta < \frac{3\pi}{2} + \delta & \Leftrightarrow \text{反方向故障} \end{cases} \quad (13)$$

理论上泛化角 δ 只要小于 $\pi/2$,则式(13)中判断正反方向的 2 个泛化区间便不会有交集,该判据便不会出现故障方向不明确或误判的现象,能保证保护的可靠性。同时,保护的灵敏性也与 δ 有关, δ 越大,则判据覆盖角度范围越大,保护的灵敏性越高。当 δ 设定为 $\pi/2$ 时,灵敏性最高,但易出现故障方向不明确或误判的现象,故应设定适当的泛化角 δ 。考虑到互感器、保护装置等可能引起的误差并增加一定的裕度量^[21-22], δ 可根据下式确定:

$$\delta \geq \delta_{TA} + \delta_{PD} + \delta_Y \quad (14)$$

其中, δ_{TA} 为互感器产生的误差,互感器的负载按照 10% 误差曲线选择,其最大误差角约为 7° ; δ_{PD} 为微机保护装置本身的误差角,按照每周 24 点采样可定为 15° ; δ_Y 为裕度角,通常可设为 10° ;因此, δ 取值不应小于 32° ,否则难以保证足够的灵敏性。综合上述对判据的灵敏性和可靠性的要求,本文在应用中将泛化角 δ 设为 $\pi/3$ 。

同样的方法可应用于线路另一侧的保护 2 判断故障方向。当保护 1 判断为正向故障而保护 2 判断反向故障时,即可判断出故障位于保护 1 和保护 2 之间的线路上。

1.2 反向潮流情况下出现故障

借鉴 1.1 节对正向潮流条件下故障电流及其正导数、负导数、参考相量相位关系的推导,可得出反向潮流下,故障方向判据与正向潮流时的判据相同,各相量关系如图 6 所示。

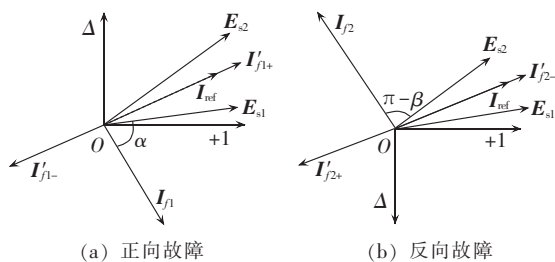


图 6 反向潮流条件下相量图

Fig.6 Phasor diagram in condition of backward power flow

2 基于故障电流正序分量相位比较的判据

以上提出的保护原理只是基于单相或三相短路故障导出的,不能对所有类型故障的方向进行正确判断。由于正序分量存在于对称短路故障和非对称短路故障中,可以从故障电流中分离出正序分量来进行故障方向的判断。

若选择 a 相作为基准相,在正向潮流条件下发生正向故障时,故障线路的上游最近的保护 1 检测到的 a 相电流正序分量为 $I_{a(1)} = |I_{a(1)}| \angle \varepsilon$ (ε 为 $I_{a(1)}$ 的相角),则 $I_{a(1)}$ 的正导数为:

$$I'_{a(1)+} = |I'_{a(1)}| \angle \left(\varepsilon + \frac{\pi}{2} \right) \quad (15)$$

$I_{a(1)}$ 的负导数为:

$$I'_{a(1)-} = |I'_{a(1)}| \angle \left(\varepsilon + \frac{3\pi}{2} \right) = |I'_{a(1)}| \angle \left(\varepsilon - \frac{\pi}{2} \right) \quad (16)$$

可得参考相量为:

$$I_{ref(1)} = |I'_{a(1)}| \angle \left(\frac{\arg I'_{a(1)+} + \arg I'_{a(1)-}}{2} + \frac{\pi}{2} \right) = |I'_{a(1)}| \angle \left(\varepsilon + \frac{\pi}{2} \right) \quad (17)$$

以上计算了正向潮流条件下正向故障的故障电流和参考相量,设置故障方向判据为:

$$\Delta_{(1)} = \arg I_{\text{ref}(1)} - \arg I_{f(1)} \quad (18)$$

其中, $I_{f(1)}$ 为故障后电流的正序分量。

同样可得出正向故障时有:

$$\Delta_{f1} = \frac{\pi}{2} \quad (19)$$

反向故障时有:

$$\Delta_{f2} = -\frac{\pi}{2} \quad (20)$$

可以看出,正向潮流下基于故障电流相位比较的故障方向判据同样适用于故障电流的正序分量。

同理可得反向潮流下基于正序分量的故障方向判据与式(19)、(20)相同,下游保护的故障方向判断方法和上游保护相同,在此不再赘述。

因此各种类型的短路故障均可采用式(13)作为方向判据。

3 基于故障电流正序分量相位比较的保护配合

方案以馈电线路段为单位实现保护功能。将馈电线路分段,分段的标准有很多,可以按接入的负荷或发电机分段,也可以根据地理位置或经济技术标准分段。保护装设于主动配电网中可能出现双向潮流的线路的两端,在潮流只能单向流动的线路上只在线路始端装设保护装置,各个保护之间可以实现信息交互,发送或接收闭锁信号、跳闸信号 2 类逻辑信号。

配电网中某一段线路故障后,保护会采取以下措施。

a. 装设于各线路两端的保护判断故障方向:故障点上游的保护判断出正向故障,故障点下游的保护判断出反向故障,确定故障线路。

b. 故障线路两端保护向上、下游邻近保护发送闭锁信号,向故障线路对端保护发送动作信号,故障线路两端保护同时动作,防止非同期跳闸引起非计划孤岛。

以上基于故障电流正序分量与参考相量相位比较的故障方向判断及保护配合方法中,保护采集本地电流信号进行处理,不需要电压信号以及故障前的电流信号,并可将处理结果传送到线路对端保护。保护流程如图 7 所示,其中故障条件具体可参考文献[21]和[23],如可采用 2 个相邻工频周期内的电流是否发生突变来判断是否发生故障。

故障方向判据是对故障电流经过严格的数学推导得出的。故障电流由接地电阻、故障类型、分布式电源渗透率以及故障初相角等因素组合产生,对于任意组合方式产生的故障电流都可以得出相同的结论,

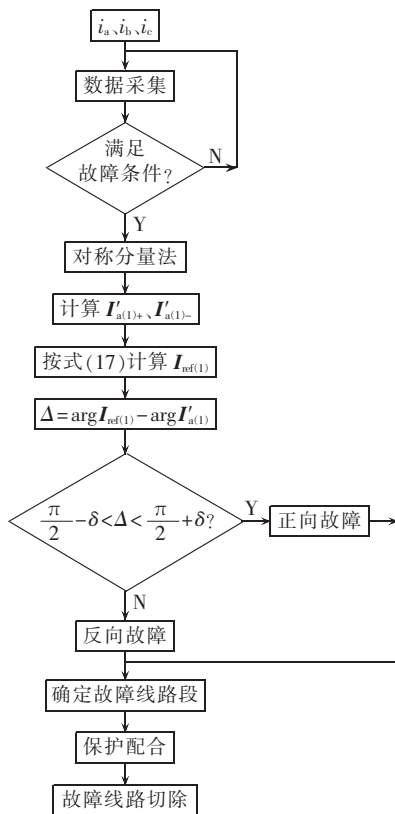


图 7 保护方案流程图

Fig.7 Flowchart of protection scheme

且各种故障情况下都存在正序故障电流分量。因此,故障电流正序分量相位比较方案可以适用于各种故障条件下、各种类型的故障,即判据具有普遍适用性,故障条件的改变不影响保护的正确性、可靠性。

4 仿真分析

图 8 所示系统的基准容量为 500 MV·A,基准电压为 10.5 kV。线路 AB、BC、AF 为架空线路,线路参数为 $x_1=0.347 \Omega/\text{km}$ 、 $r_1=0.27 \Omega/\text{km}$;线路 CD、DE、FG 为地下电缆,线路参数为 $x_1=0.093 \Omega/\text{km}$ 、 $r_1=0.259 \Omega/\text{km}$ 。在每个节点处接入额定容量为 1.5 MV·A、额定功率因数为 0.85 的负荷。利用 PSCAD/EMTDC 仿真软件对此系统进行仿真分析。仿真实验验证保护 2 的动作情况,母线 B、C 接有容量为 2 MV·A 的分布式电源。相角测量采用文献[20]的方法。

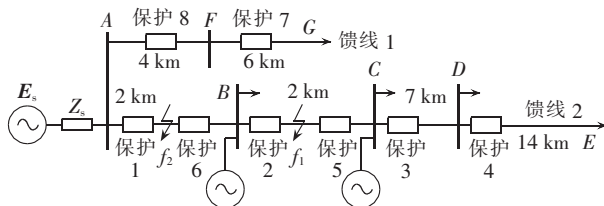


图 8 主动配电网示意图

Fig.8 Schematic diagram of active distribution network

表 1 为线路 BC 故障时各相量相角,其中, $\varphi_{I(1)}$ 、

$\varphi_{+f(1)}$ 、 $\varphi_{-f(1)}$ 、 $\varphi_{\text{ref}(1)}$ 分别表示故障电流、故障电流正序分量 $I'_{f(1)}$ 及其正导数 $I'_{f(1)+}$ 、负导数 $I'_{f(1)-}$ 和参考相量 I_{ref} 的相角,后同。从表 1 可以看出,在保护 2 的正、反方向分别出现单相接地、两相接地、三相接地故障时,仿真结果和数学推导的分析结果一致,验证了基于故障电流正序分量相位比较的主动配电网保护方案能可靠、正确地区分故障方向。

表 1 线路 BC 故障时各相量相角
Table 1 Phasor angles for different faults of line BC

故障类型	故障位置	$\varphi_{f(1)}/(^{\circ})$	$\varphi_{+f(1)}/(^{\circ})$	$\varphi_{-f(1)}/(^{\circ})$	$\varphi_{\text{ref}(1)}/(^{\circ})$	$\Delta/(^{\circ})$	判断结果
A 相接地	f_1	-52.8	37.2	-142.8	37.2	90	正向故障
A 相接地	f_2	135.4	-134.6	45.4	45.4	-90	反向故障
AB 相接地	f_1	-41.6	48.4	-131.6	48.4	90	正向故障
AB 相接地	f_2	133.3	-136.7	43.3	43.3	-90	反向故障
三相接地	f_1	-40.8	49.2	-130.8	49.2	90	正向故障
三相接地	f_2	130.9	-139.1	40.9	40.9	-90	反向故障

线路 BC 中点三相故障时,对应的仿真结果如表 2 所示,表中各相量的相角均已统一到 $[-\pi, \pi]$ 区间内。

表 2 线路 BC 中点三相故障时各相量相角
Table 2 Phasor angles of three-phase fault in middle of line BC

电流位置	$\varphi_{f(1)}/(^{\circ})$	$\varphi_{+f(1)}/(^{\circ})$	$\varphi_{-f(1)}/(^{\circ})$	$\varphi_{\text{ref}(1)}/(^{\circ})$	$\Delta/(^{\circ})$	故障方向
保护 1	-62.7	27.3	-152.7	27.3	90	正向故障
保护 2	-60.8	29.2	-150.8	29.2	90	正向故障
保护 3	127.4	-142.6	37.4	37.4	-90	反向故障
保护 4	128.5	-141.5	38.5	38.5	-90	反向故障
保护 5	149.5	-120.5	59.5	59.5	-90	反向故障
保护 6	-62.8	27.2	-152.8	27.2	90	正向故障

表 2 表明,保护 1、2、6 对故障的判断结果是正向故障,而保护 3、4、5 的判断结果是反向故障,可以判断出故障位于保护 2、5 之间的线路上,其中保护 3 的正序分量的正导数的相角为 217.4° ,超出了约定的 $[-\pi, \pi]$ 区间范围,将其调整为 -142.6° ,保护 4、5 的相角进行了同样的调整。可见,保护可以正确识别出故障线路,保护 2、5 动作,切除故障线路,其他保护不应动作。

线路 BC 中点两相故障时,相应的仿真结果如表 3 所示。

表 3 线路 BC 中点两相故障时各相量相角
Table 3 Phasor angles of inter-phase fault in middle of line BC

电流位置	$\varphi_{f(1)}/(^{\circ})$	$\varphi_{+f(1)}/(^{\circ})$	$\varphi_{-f(1)}/(^{\circ})$	$\varphi_{\text{ref}(1)}/(^{\circ})$	$\Delta/(^{\circ})$	故障方向
保护 1	-61.2	28.8	-151.2	28.8	90	正向故障
保护 2	-65.4	24.6	-155.4	24.6	90	正向故障
保护 3	146.2	-123.8	56.2	56.2	-90	反向故障
保护 4	146.3	-123.7	56.3	56.3	-90	反向故障
保护 5	117.2	-152.8	27.2	27.2	-90	反向故障
保护 6	-61.3	28.7	-151.3	28.7	90	正向故障

表 3 表明,保护 1、2、6 的判断结果是正向故障,而保护 3、4、5 的判断结果是反向故障,可以判断出故障位于保护 2、5 之间的线路上,保护可以正确识别出故障线路段;保护 2、5 分别向保护 6、3 发送闭锁信号,同时向对端发送跳闸信号,保护 2、5 动作,切除故障线路,其他保护不应动作,保证了保护的选择性。其中保护 3 的正序分量的正导数的相角为 236.2° ,超出了约定的 $[-\pi, \pi]$ 区间范围,将其调整为 -123.8° ,保护 4、5 的相角进行了同样的调整。

假设互感器的负载按照 10% 误差曲线选择,误差角设定为 5° ;微机保护装置一周采样 24 点,误差角设定为 15° 。计及相角误差后,线路 BC 中点三故障时,对应的仿真结果如表 4 所示。

表 4 计及保护误差时,线路 BC 中点三相故障时各相量相角

Table 4 Phasor angles of three-phase fault in middle of line BC when protection error is considered						
电流位置	$\varphi_{f(1)}/(^{\circ})$	$\varphi_{+f(1)}/(^{\circ})$	$\varphi_{-f(1)}/(^{\circ})$	$\varphi_{\text{ref}(1)}/(^{\circ})$	$\Delta/(^{\circ})$	故障方向
保护 1	-42.7	47.3	-132.7	47.3	90	正向故障
保护 2	-40.8	49.2	-130.8	49.2	90	正向故障
保护 3	147.4	-122.6	57.4	57.4	-90	反向故障
保护 4	148.5	-121.5	-121.5	58.5	-90	反向故障
保护 5	169.5	-100.5	79.5	79.5	-90	反向故障
保护 6	-42.8	47.2	-132.8	47.2	90	正向故障

表 4 表明,考虑保护误差后,本文方法仍能够可靠地对故障区段做出正确判断,即设置保护的范化区间后,保护可以正确动作。

以上仿真结果验证了在各种类型故障下,本文所提出的保护方案都能正确、可靠地区分故障方向并采取正确的措施。

5 结论

文章针对主动配电网提出了一种新的保护方案,该方案仅需要故障后的电流信号就能判断出故障方向,从而确定故障线路,故障线路两端装设的保护向故障线路上、下游的保护发送闭锁信号,向对端发送跳闸信号,最后两端保护同时跳闸,切除故障线路。该方案的主要优点在于:

- a. 仅仅利用故障后电流信号的正序分量就能通过相位比较判断出故障方向,不需要电压信号,也不需要正常运行时的负荷电流,相对传统的基于电压信号的保护方案具有更高的实用性和更广的适用范围,减少了电压互感器的装设要求,具有明显的经济性;
- b. 相对传统的电流保护方案,该方案不受潮流方向、接地电阻、故障类型、分布式电源连接位置和并网容量的影响,能同时用于主动配电网保护和传统的被动式配电网保护,具有高度的可靠性;

c. 在对故障方向做出明确判断的基础上,故障线路两端装设的保护向故障线路上、下游的保护发送闭锁信号,最后故障线路两端的保护同时跳闸,切除故障线路,具有较高的选择性并且能有效避免非同期跳闸从而避免非计划孤岛;

d. 基于故障后电流相位比较的保护方案本质上也是一种克服分布式电源对配电网继电保护影响的有效方法。

参考文献:

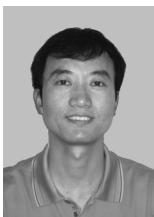
- [1] 孔祥平,张哲,尹项根,等. 含逆变型分布式电源的电网故障电流特性与故障分析方法研究[J]. 中国电机工程学报,2013,33(34):65-74.
KONG Xiangping,ZHANG Zhe,YIN Xianggen,et al. Study on fault current characteristics and fault analysis method of power grid with inverter interfaced distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(34):65-74.
- [2] 程宏波,吴思宇,詹骥文,等. 面向自愈的智能配电网健康状态综合评价研究[J]. 华东交通大学学报,2015,32(4):90-97.
CHENG Hongbo,WU Siyu,ZHAN Jiwen,et al. Health evaluation of smart distribution grid for self-healing[J]. Journal of East China Jiaotong University,2015,32(4):90-97.
- [3] JOUYBARI-MOGHADDEM H,HOSSEINIAN S H,VAHIDI B. Active distribution networks islanding issues:an introduction[C]//Environment and Electrical Engineering (EEEIC). Kyoto,Japan:[s.n.],2012:719-724.
- [4] 张尧,晁勤,王厚军,等. 基于自适应分支系数的并网光伏电站接地距离保护[J]. 电力自动化设备,2015,35(9):113-117.
ZHANG Yao,CHAO Qin,WANG Houjun,et al. Grounding distance protection based on adaptive branch coefficient for grid-connected PV power station[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(9):113-117.
- [5] 张尧,晁勤,李育强,等. 基于过渡电阻倾斜角的光伏并网自适应距离保护[J]. 电力自动化设备,2016,36(1):30-34.
ZHANG Yao,CHAO Qin,LI Yuqiang,et al. Adaptive distance protection based on tilt angle of transition resistance for grid-connected PV station[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(1):30-34.
- [6] 郑健超. 故障电流限制器发展现状与应用前景[J]. 中国电机工程学报,2014,34(29):5140-5148.
ZHENG Jianchao. Current status and application prospect of fault current limiters[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(29):5140-5148.
- [7] AGHELI A,ABYANEH H A,CHABANLOO R M,et al. Reducing the impact of DG in distribution networks protection using fault current limiters[C]//Power Engineering and Optimization Conference(PEOCO). Selangor,Malaysia:[s.n.],2010:298-303.
- [8] 杨东,周勤勇,刘玉田. 基于灵敏度分析的限流方案优化决策[J]. 电力自动化设备,2015,35(5):111-118.
YANG Dong,ZHOU Qinyong,LIU Yutian. Short circuit current limiting strategy optimization based on sensitivity analysis[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(5):111-118.
- [9] BARAN M,EL-MARKABI I. Adaptive over current protection for distribution feeders with distributed generators[C]//Power Systems Conference and Exposition. New York,USA:[s.n.],2004:715-719.
- [10] SCHAEFER N,DEGNER T,SHUSTOV A,et al. Adaptive protection system for distribution networks with distributed energy resources[C]//Developments in Power System Protection(DPSP 2010). Manchester,United Kingdom:[s.n.],2010:1-5.
- [11] 马静,王希,王增平,等. 含分布式电源的配电网自适应保护新方法[J]. 电网技术,2011,35(10):204-208.
MA Jing,WANG Xi,WANG Zengping,et al. A novel adaptive protection scheme for distribution networks with distributed generator[J]. Power System Technology,2011,35(10):204-208.
- [12] COFFELE F,BOOTH C,DYSKO A. An adaptive overcurrent protection scheme for distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2015,30(2):561-568.
- [13] 刘凯,李幼仪. 主动配电网保护方案的研究[J]. 中国电机工程学报,2014,34(16):2584-2590.
LIU Kai,LI Youyi. Research on the protection scheme for active distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(16):2584-2590.
- [14] HASHMI M,HANNINEN S,MAKI K. Survey of smart grid concepts,architectures,and technological demonstrations worldwide[C]//Innovative Smart Grid Technologies ISGT. Medelin,Columbia:IEEE,2011:1-7.
- [15] REPO S,MAKI K,JARVENTAUSTA P,et al. ADINE-EU demonstration project of active distribution network[C]//Smart Grids for Distribution,2008. IET-CIRED. Frankfurt,Germany:[s.n.],2008:1-5.
- [16] SAMUELSSON O,REPO S,JESSLER R,et al. Active distribution network-demonstration project ADINE[C]//Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe(ISGT Europe). Istanbul,Turkey:[s.n.],2010:1-8.
- [17] LIANG C,KHODAYAR M E,SHAHIDEHPOUR M. Adaptive protection system for microgrids:protection practices of a functional microgrid system[J]. IEEE Electrification Magazine,2014,2(1):66-80.
- [18] 许偲轩,陆于平. 适用于含分布式电源配电网的纵联保护方案[J]. 电力系统自动化,2015,39(9):113-118.
XU Jiaxuan,LU Yuping. A novel pilot protection scheme for distribution networks with distributed generation[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(9):113-118.
- [19] 都洪基,陈伦琼,康明才. 电力系统继电保护原理[M]. 南京:东南大学出版社,2007:28-40.
- [20] JALILIAN A,HAGH M T,HASHEMI S M. An innovative directional relaying scheme based on postfault current[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2014,29(6):2640-2647.
- [21] GAO H,CROSSLEY P. Design and evaluation of a directional algorithm for transmission-line protection based on positive sequence fault components[J]. IEEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution,2006,153(6):711-718.
- [22] 李振兴,尹项根,张哲,等. 基于序电流相位比较和幅值比较的广域后备保护方法[J]. 电工技术学报,2013,28(1):242-250.
LI Zhenxing,YIN Xianggen,ZHANG Zhe,et al. Algorithm of

wide-area protection on comparison of current phase and amplitude[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013,28(1):242-250.

[23] 邵玉槐,秦文萍. 电力系统继电保护原理[M]. 北京:中国电力出版社,2007:84-88.

作者简介:

彭春华(1973—),男,江西乐平人,教授,博士研究生



彭春华

导师,博士,研究方向为电力系统优化调度、配电网规划与保护(E-mail:chinapch@163.com);

张艳伟(1988—),男,河南商水人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统继电保护、分布式发电技术。

Protection scheme based on phase comparison of positive-sequence fault current for active distribution network

PENG Chunhua,ZHANG Yanwei

(School of Electrical and Electronic Engineering,East China Jiaotong University,Nanchang 330013,China)

Abstract: Since the increased penetration of distributed generation and the operational complexity of active distribution network may cause the improper operation and reclosing failure of protections,a protection scheme is proposed for it,which constructs the fault direction criterion based on the comparison between the positive-sequence fault current and the reference phasor to quickly and accurately locate the fault zone and then realize the selectively cooperative actions of the upstream and downstream protections. Due to the system error,the generalized angle is adopted in the actual application to enhance the robustness of direction criterion. Since this scheme needs only the post-fault current information,less voltage transformers are installed. As the cooperation between protections needs only the transmission of blocking signal and trip signal,the demand of communication is reduced. The efficiency of the proposed scheme is verified by the simulations in different fault conditions.

Key words: positive sequence; phase comparison; fault direction; active distribution networks; relay protection