

采用区域电网多点测量信息的行波故障定位

李振兴¹, 吴李群¹, 田 斌², 谭 洪²

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北省宜昌市 443002;

2. 新能源微电网湖北省协同创新中心(三峡大学), 湖北省宜昌市 443002)

摘要: 利用区域电网多点测量信息进行行波故障测距,能够减少实际的定位装置使用数量,并提高结果可信度。为此,文中提出了一种利用时域行波数据同时进行故障选线和测距的算法。首先,根据模量速度差法初步估算故障距离,然后在不依靠保护动作信息的情况下进行故障选线,同时剔除无效数据。最后,结合单/双端行波法的优点,利用多端数据精确地查找故障位置,提高定位结果的品质。仿真结果表明,该方法需要的定位装置少,适用于各种故障情况且具有较高的测距精度。

关键词: 行波; 故障定位; 优化配置; 故障选线

0 引言

从 20 世纪 80 年代行波的理论研究到目前的应用研究,行波故障测距得到了高速发展,电网中行波定位装置的数量迅速增加,具备了一定的组网条件,能够通过整合全网行波和继电保护动作信息,改善现有故障定位的可靠性和精度^[1]。此外,可通过对定位装置的配置进行优化,在保证线路可观测的情况下,减少实际装置使用数量,降低测距成本^[2-3]。

广域行波故障定位需要合理、精确的定位算法。传统的单端法存在着原理性误差。在复杂网络中,行波折反射的传输路径异常复杂,难以保证准确的波头识别^[4-5]。但单端法无需对时,且测距成本比双端法降低一半以上。双端法只检测初始波头,测距可靠性和准确性更高^[6],但线路两端互感器固定时延不一致、对时系统的随机误差和单个装置故障等硬件因素会造成测距误差^[7-8]。另外,波速的不确定性也是行波测距需要解决的问题^[9-10]。

基于广域信息的故障定位,能够利用多点数据提高测距精度。文献^[11]针对单端辐射状网络,提出建立馈线间的初始波头到达时差矩阵,通过谱范数值差别查找故障馈线。文献^[12]针对多回路测距中可能出现装置故障的问题,提出通过 Dijkstra 算法求得故障线路计算路径,针对不同冗余度的线路提出不同的测距方案。文献^[13]针对多分支线路,以双端法和初始波头到达时间为基础,构建故障

选线矩阵,进行故障选线和测距。文献^[14]提出以最早检测到初始波头的变电站为中心,以到附近站点的最短电气距离为依据,查找故障线路。多数文献中的方法充分利用了多端数据,但需要依靠保护动作状态进行故障选线,或只适用于特定的线路结构,定位的可靠性有赖于保护的正确动作,难以推广应用。

本文根据模量传输时间差与波速之间存在的对应关系^[15-17],利用神经网络估算零模速度,通过模量速度差初步计算故障距离,进一步判断故障线路,故障选线不依赖保护动作信息,同时剔除无效时间,提高定位系统可靠性。通过非故障线路计算实时波速,针对不同线路采用不同的精确测距方案,提高定位精度,缩减系统成本。仿真结果表明,所提方法能够准确识别各种故障线路,且具有较高的定位精度。

1 定位单元配置原则

网络定位可实现全网定位装置统一运行、统一管理,减少实际需要安装的定位装置数目。行波测距的优化配置是指:电力网络中任何一条线路故障,都能确认故障位置的最少行波定位单元数目和位置。

设邻接数 N 为电网中某变电站通过输电线路直接相连接的变电站个数; M 为 N 个变电站中安装定位装置站点的个数。网络拓扑不同,其 N 值和 M 值不同,一般网络参数见附录 A。本文以邻接数为依据,进行行波定位单元的配置,规则如下。

规则 1: $N=1$ 的站点可不配置行波定位装置。

规则 2:与 $N=1$ 的变电站相连的站点必须配

置定位装置。

规则 3: $N=2$ 的站点可不配置行波定位装置。考虑到行波的检测难度,当为长线路时,需要配置行波定位装置。

规则 4: $N=3, M<2$ 时,该变电站必须安装定位装置。

规则 5: $N>3$ 的变电站必须配置定位装置。

规则 6: 当电网中存在环网时,各站点之间的最短路径与初始行波的传输路径可能不一致,则网孔上至少有两个站点需配置定位单元,并尽量配置在 N 较大的站点。

规则 7: 在满足以上 6 条规则的情况下,为使系统具有一定的冗余度,可适当增加定位装置配置数目。

2 故障选线

本文利用初始行波零模和线模的波速差原理进行故障选线,排除保护不正确动作造成的定位失败,使故障选线独立于继电保护,提高定位系统的可靠性。

2.1 模量速度差法测距原理

在行波故障定位中,相模变换可解除三相线路间的电磁耦合,获取传输特性相互独立的模量:线模分量和零模分量。其中线模受传输距离的影响较小,线模分量可视为匀速传输,因此可利用未故障线路的线模速度进行测距计算。随着传播距离的增加,零模波速持续衰减。因此,可以利用线模和零模到达同一检测点的时间差进行故障距离 x 的计算:

$$x = \frac{v_0 v_1 (t_0 - t_1)}{v_1 - v_0} = \frac{v_0 v_1 \Delta t}{v_1 - v_0} \quad (1)$$

式中: v_0 和 v_1 分别为零模波速和线模波速; t_0 和 t_1 分别为零模和线模到达时间; $\Delta t = t_0 - t_1$ 。

另外,基于时间同步的双端行波测距公式为:

$$x = \frac{(t_i - t_j) v_1 + L_{ij}}{2} \quad (2)$$

式中: t_i 和 t_j 分别为初始波头到达第 i 个和第 j 个变电站的绝对时间; L_{ij} 为第 i 个站点经过故障线路到第 j 个站点的最短输电线路长度。

双端法根据初始波头到达线路两端的时间差进行测距,测距精度高。但随着传播距离增大,零模波速持续非线性衰减。零模波速与故障距离、线路分布参数有关,对于给定的线路,零模波速只受故障距离的影响^[13],模量时差 Δt 与零模波速存在对应关系^[15,17],利用神经网络训练学习,可根据模量时间差估算求得零模波速^[16]。

2.2 故障选线步骤

电网发生故障后,故障点产生的暂态行波在整个网络中传播,各行波检测单元记录下扰动数据,测距主站选择合适的信息域。根据各点的模量时间差并通过神经网络训练求得到达检测点的零模波速,线模波速根据电网参数预先设定。设故障线路为 S_{m-n} (变电站 S_m 与 S_n 之间的线路,下文表述相同),选择的信息域中变电站 S_1, S_2, \dots, S_i 都配置了行波检测单元,根据各变电站数据,利用式(1)估算扰动点到站点 S_j 的距离 l_j 。根据行波传输最短路径原则和网络拓扑结构,将距离 S_j 为 l_j 的所有线路组成集合 C_j 。同理,信息域中所有配置了定位装置的站点都能得出一个集合,所有集合中的元素组成集合 C :

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_i \quad (3)$$

C 是疑似故障线路的集合,对集合 C 中的元素出现的次数进行统计,设为 n ,剔除 $n \leq i/2$ 的元素(其中 i 是信息域内配置了定位装置的站点总数),组成新的集合 C^* ,若集合 C^* 中元素对应的线路不相邻,则 n 最大的元素对应的线路即为故障线路。检索集合 C_1, C_2, \dots, C_i ,若某集合中不含故障线路,则对应站点的行波数据将不参与之后精确的故障定位计算,为无效的时间,由此排除单个检测单元故障等情况对定位的影响。

考虑到零模波速的估算存在一定的误差,当故障位于线路端点附近,集合 C^* 中对应的线路可能相邻接于同一点。如图 1 所示,其中 t_i, t_m, t_n, t_j 分别为初始波头到达各站点的时间。在 S_m 右端发生近端故障(故障点距离变电站 S_m 很近),通过模量速度差法,由于误差的存在,线路段 S_{i-m} 和 S_{m-n} 同时被多个站点的信息认为是故障线路,只能确认长线路 S_{i-n} 为故障线路,需要对故障点位置作进一步的确认。此时,对各集合进行检索,不含有 S_{i-m} 或 S_{m-n} 的集合对应的站点信息认为是无效数据,并选择距离 S_{i-n} 较近的未故障线路的数据计算线模波速 v_1^* 。

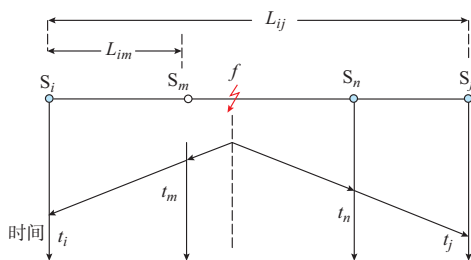


图 1 线模波头传播示意图

Fig.1 Schematic diagram of line-mode wave head propagation

基于时间同步的行波法测距精度较高,误差相对很小,这里可以利用多端数据排除伪故障线路。定位算法需要确认线路段 S_{m-n} 为真故障线路。

1)若 S_m 点配置了行波定位单元,且时间信息有效。分别选取两个时间信息有效的站点,如 S_i 和 S_j ,使得疑似故障线路 S_{i-m} 和 S_{m-n} 分别包含在 S_{i-m} 和 S_{m-n} 的最短路径内,则根据式(2),在误差范围内有:

$$\frac{\Delta t_{im} v_1^* + L_{im}}{2} = L_{im} \quad (4)$$

式中: Δt_{im} 为 t_i 与 t_m 之间的时间差; L_{im} 为第 i 个变电站与第 m 个变电站之间最短路径的长度。

计算结果 L_{im} 为线路 S_{i-m} 的长度。根据变电站 S_j 和 S_m 的数据计算故障距离 L_{jf} 有:

$$L_{jn} < \frac{\Delta t_{jm} v_1^* + L_{jm}}{2} = L_{jf} < L_{jm} \quad (5)$$

由式(4)和式(5)结果可知故障点 f 位于线路 S_{m-n} 内。

2)若站点 S_m 未配置定位单元或时间信息无效,则任选两段时间信息有效的线路,使其最短路径包含线路 S_{i-n} ,如线路段 S_{i-n} 和 S_{i-j} ,并计算故障点到站点 S_i 的距离 L_{if} :

$$\begin{cases} L_{if}^1 = \frac{\Delta t_{in} v_1^* + L_{in}}{2} \\ L_{if}^2 = \frac{\Delta t_{ij} v_1^* + L_{ij}}{2} \end{cases} \quad (6)$$

在误差范围内有:

$$L_{im} < L_{if}^1 = L_{if}^2 < L_{in} \quad (7)$$

因此,可以判断故障点 f 位于线路 S_{m-n} 内。

通过以上分析,综合多点行波数据,通过模量速度差法查找故障线路,同时与继电保护动作信息进行相互校验,剔除无效时间信息,使结果更具可信度。

3 精确故障定位

3.1 精确测距方案分析

在确认故障线路后,剔除无效数据,在距离故障点最近的非故障线路上,选取两个站点的时间数据结合线路拓扑结构,计算出实时的线模波速 v_1^* 。针对不同的故障线路选择不同的精确定位算法,对少数故障线路含有 $N=1$ 的变电站的情况,采用查找特定反射波的方法定位;当故障线路不含 $N=1$ 的变电站,则采取扩展的双端原理进行定位。

1)情形 1:故障线路不含 $N=1$ 的站点

故障定位主站将有效的的时间信息按故障线路两侧分为两组,根据式(2)计算故障距离,分别从两组数据中选取一个初始波头到达时间 t_i 和 t_j ,如图 1

所示,故障点 f 在线路 S_{m-n} 内,则 f 点到站点 S_i 的距离为:

$$x_{ij} = \frac{\Delta t_{ij} v_1^* + L_{ij}}{2} \quad (8)$$

令故障线路的一端 S_m 到站点 S_i 的最短路径长度为 L_{im} ,则点 f 到站点 S_m 的距离为:

$$x_{ij}^* = |x_{ij} - L_{im}| \quad (9)$$

线模分量在线路中传播时,随着传播距离的增大,初始波头的陡度趋缓,波头到达时间的标定误差变大,因此变电站离故障点越远,其数据的测距精度相对越差。设第 i 个变电站经故障线路到第 j 个变电站之间的最短传输路径的长度为 L_{ij} ,则测距主站对 x_{ij}^* 赋予的权重 W_i 为 $1/L_{ij}$ 。

将各组数据的测距结果进行加权求和,得到最终的定位结果,即故障点到故障线路一端 S_i 的距离为:

$$x_i = \frac{\sum_i x_{ij}^* W_i}{\sum_i W_i} \quad (10)$$

2)情形 2:故障线路含 $N=1$ 的站点

当邻接数为 1 的站点配置了检测单元,则根据情形 1 的方法计算精确的故障位置。若 $N=1$ 的站点未配置检测单元,无法使用基于时间同步的多端法进行故障定位,如图 2 中线路 S_{1-2} 和 S_{9-11} ,本文采用与文献[16]类似的方法,通过查找特定的反射波进行故障距离计算。单端行波法定位成功的关键是反射波的准确识别,含有 $N=1$ 的站点的故障线路为终端线路,线路上的波头传播情况相对其他线路简单。当确认故障线路含有 $N=1$ 的站点时,在有效时间数据中选取距离故障线路最近的变电站的信息进行故障距离计算。

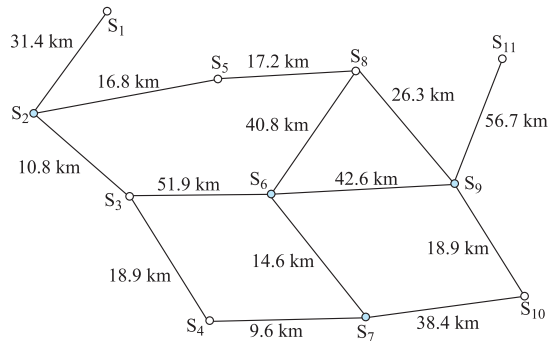
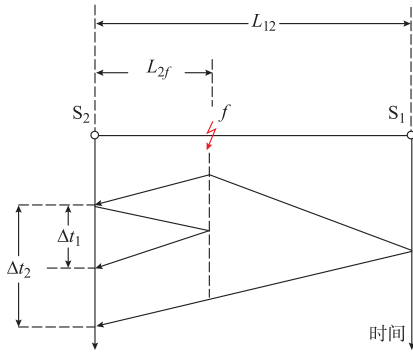


图 2 电网结构仿真模型
Fig.2 Simulation model of power grid

以图 2 中线路 S_{1-2} 故障为例,故障线路行波传播的示意图如图 3 所示。

图3 含 $N=1$ 的故障情况示意图Fig.3 Schematic diagram of fault condition with $N=1$

当确认故障线路后,设 S_2 站点通过模量速度差计算的故障点 f 到 S_2 的距离为 L_{2f} ,若初步估算的 L_{2f} 准确,则有

$$\begin{cases} v_1^* \Delta t_1 = 2L_{2f} \\ v_1^* \Delta t_2 = 2(L_{12} - L_{2f}) \end{cases} \quad (11)$$

式中: Δt_1 为故障点反射波与初始波头的时间差; Δt_2 为对端母线反射波与初始波头的时间差。

进一步得到:

$$v_1^* (\Delta t_1 + \Delta t_2) = 2L_{12} \quad (12)$$

由式(11)可以求出 Δt_1 和 Δt_2 ,设初始波头的到达时间为 t ,考虑模量速度差法存在一定的误差,在变电站 S_2 记录的波形上标记 $t + \Delta t_1$ 和 $t + \Delta t_2$ 点一定范围内的波头,在这些波头中找到两个最接近满足式(12)的波头,即为故障点反射波和对端反射波,其中最接近估算位置的波头即是该波头的实际位置,由此得到准确的 Δt_1 和 Δt_2 ,并计算精确的故障距离为:

$$L_{2f}^* = \frac{\Delta t_1}{\Delta t_1 + \Delta t_2} L_{12} \quad (13)$$

3.2 特殊情况下的定位误差分析

在利用多点数据确定故障线路后,若故障线路含有 $N=1$ 的站点,本文采用组合式单端法进行精确的故障距离计算。由于传统单端行波法固有的原理性缺陷,当故障点位于线路中点或靠近检测点故障时,反射波区分困难。结合本文思想,下面对这些特殊情况下的精确测距进行分析。

1)情形 1:线路中点及其附近故障情况

如图3所示,站点 S_1 的邻接数为1,当故障点位于线路中点及附近位置,考虑到线路一般长达几十到几百千米,则故障点 f 距离检测点 S_2 较远,基于模量速度差法能够较准确地估算出故障距离 L_{2f} ,此时 $L_{2f} \approx L_{12}/2$,可以预见 $|\Delta t_1 - \Delta t_2|$ 很小,甚至为0,即两个波头在时间轴上很靠近。根据上文的方法在记录的波形上寻找两个最接近满足

式(12)的波头,此时需要考虑波头完全重合的可能性。

由于这时难以区分故障点反射波、对端反射波和外部的反射波,导致精确测距计算中可能将波头混淆。假设误将 Δt_2 (对端反射波或者外部的反射波)当作故障点反射波到达时间,则计算的故障距离为 $\Delta t_2 L_{12} / (\Delta t_1 + \Delta t_2)$,此时测距误差为:

$$\epsilon = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\Delta t_1 + \Delta t_2} L_{12} \quad (14)$$

由式(14)可知,在满足式(12)的基础上,故障点越靠近线路中点,故障点反射波和对端反射波的时间差越小,测距误差就越小;故障点越远离线路中点,两个波头的时间差越大,波头的区分变得越容易,就能够根据式(13)计算准确的故障位置。

2)情形 2:线路出口故障

若含 $N=1$ 站点的线路出口发生故障,即故障点距离检测点很近,如图3所示,行波在故障点 f 和检测点 S_2 之间来回多次反射,考虑到线路一般较长,因此检测点 S_2 记录的波形上,第1个为初始波头,第2个一定是故障点反射波,时间差为 Δt_{12} 。当故障距离 L_{2f} 足够小,小于行波检测装置的分辨率 δ_{step} ,导致初始波头与第2个波头之间可能存在一个或多个波头未被检测到。此时,当 $\Delta t_{12} v_1^* \leq 2\delta_{step}$,可以认为线路发生了出口故障,即故障点在距离检测点 $2\delta_{step}$ 内。

实际工程上高采样率行波检测装置能在微秒水平分辨波头,0.3 km 以上的距离可较准确区分波头,即可以取 $\delta_{step} = 300$ m,这基本满足了测距精度的要求。

4 故障定位流程

线路发生故障后,故障定位主站读取区域网络内各站点记录的行波和网络结构信息,首先判别故障所在的线路,同时剔除无效时间信息,利用经验证的有效数据,针对不同的故障线路采取不同的测距方案,具体过程如下。

1)根据配置原则在电网中安装定位装置,并在电网调度中心或合适站点安装行波定位主站系统。

2)线路发生扰动后,对检测到的初始波头进行相模变换,记录线模分量和零模分量的到达时间,并向测距主站上传数据。

3)测距主站根据初始波头到达时间,按式(1)估算故障距离,进一步确认故障线路,同时检验初始行波到达时间,剔除无效数据。

4)选取临近故障点的变电站数据计算实时的线模波速。

5) 根据故障选线的结果, 如果故障线路不含 $N=1$ 站点, 按式(10)精确计算故障点的距离; 如果故障线路含 $N=1$ 的站点, 查找特定反射波, 并按式(13)精确计算故障点位置。

5 基于区域多信息的故障定位的具体实现

5.1 行波定位装置的配置

本文以图 2 的线路结构为模型进行 EMTDC 仿真分析。电网中共 11 个变电站, 选择合适的站点安装定位装置。

根据上文的安装原则进行如下测距装置配置。

1) 对于邻接数为 1 的终端变电站 S_1 和 S_{11} , 根据配置规则 1 可知, 可以不安装行波定位装置。

2) 与邻接数为 1 的变电站相邻, 根据配置规则 2, 站点 S_2 和 S_9 必须安装行波定位装置。

3) 根据配置规则 3, 邻接数为 2 的站点 S_4 和 S_5 无需配置定位装置。

4) 变电站 S_6 的邻接数为 4, 按配置规则 5 要求必须安装定位装置, 本文将 S_6 站点设为测距主站。

5) 变电站 S_3 和 S_8 邻接数为 3, 其邻接变电站都有两个站点配置了定位装置; 变电站 S_7 的邻接数为 3, 其邻接站点只有 S_6 配置了定位装置。按照配置规则 3, S_3 和 S_8 不需要安装定位装置, S_7 需要安装定位装置。

6) 检查网络中定位装置的配置情况, 符合规则 6。

综上分析, 安装行波定位装置数量最少的方案是在 S_2, S_6, S_7, S_9 共 4 个站点安装定位装置。

5.2 故障选线和测距步骤

仿真以一般线路单相故障为例说明故障选线和测距步骤。设置线路 S_{5-8} 内距离 S_8 变电站 3 km 的 f_1 点处发生 A 相接地故障, 在故障点产生一个向整个网络传播的故障行波信号, 各变电站首先检测到故障初始波头。

1) 确定信息域。测距主站根据初始波头到达时间的先后顺序结合网络结构, 选取变电站 S_2, S_6, S_7, S_9 的初始波头的零模和线模分量到达时间作为故障定位的信息来源。

2) 采用模量速度差法查找故障线路。根据仿真线路参数设定线模波速 $v_1 = 2.965 \times 10^5$ km/s。变电站 S_2, S_6, S_7, S_9 分别将初始波头到达时间送入已经训练好的神经网络, 从而估算出零模波速, 由模量速度差法计算出故障距离, 并根据网络结构和行波传播的最短路径原则, 找到疑似故障线路, 具体结果参见表 1。

表 1 模量速度差法故障选线结果
Table 1 Fault line selection results based on modulus velocity difference method

变电站 S_i	估算距离 l_i /km	疑似故障线路集合 C_i
S_2	31.962	$S_{3-6}, S_{4-7}, S_{5-8}$
S_6	44.166	$S_{2-5}, S_{3-6}, S_{5-8}, S_{7-10}, S_{8-9}, S_{9-10}, S_{9-11}$
S_7	58.924	$S_{1-2}, S_{3-6}, S_{5-8}, S_{8-9}, S_{9-11}$
S_9	29.973	$S_{5-8}, S_{6-8}, S_{6-9}, S_{7-10}, S_{9-11}$

由式(3)可得: $C = C_2 + C_6 + C_7 + C_9$, 且定位单元数目 $M = 4$ 。

统计集合 C 中元素出现的次数 n 。线路 $S_{1-2}, S_{2-5}, S_{3-6}, S_{4-7}, S_{5-8}, S_{6-8}, S_{6-9}, S_{7-10}, S_{8-9}, S_{9-10}, S_{9-11}$ 出现次数 n 分别对应为 1, 1, 3, 1, 4, 1, 1, 2, 2, 1, 3。

去除集合 C 中 $n \leq 4/2 = 2$ 的元素, 得到新的集合 C^* , 因此 C^* 中包含 3 个元素, 分别是 $S_{5-8}, S_{3-6}, S_{9-11}$, 显然这 3 条线路并不相邻, 其中出现次数最多的为 S_{5-8} , 因此确认故障线路为 S_{5-8} 。

3) 剔除无效时间。检索集合 C_2, C_6, C_7, C_9 共 4 个集合中的元素, 都包含 S_{5-8} , 所以 4 个变电站的数据都认为有效。

4) 计算实时的线模波速。取距离故障线路最近的非故障线路 S_{6-7} 的数据计算实时波速, 得线模波速为 2.926×10^5 km/s。

5) 精确的故障位置计算。将故障线路 S_{5-8} 两侧变电站分为两组, 根据式(2)计算精确的故障距离。

6) 给定位结果赋予权值。按变电站 S_i 和 S_j 之间经过故障线路的最短路径长度给 3 个计算结果赋予权重(参见附录 B)。

7) 加权求和得到最终结果。由式(10)可计算出故障点到变电站 S_8 的距离为 3.010 km。

基于区域信息的行波法故障定位结果显示, 线路 S_{5-8} 为故障线路, 故障点到变电站 S_8 的距离为 3.010 km, 误差为 10 m, 定位精度较高。

5.3 特殊故障情况分析

5.3.1 情形 1: 含 $N=1$ 站点线路的故障测距

1) 线路中点及其附近故障

仿真设置线路 S_{1-2} 中点附近位置发生两相短路接地故障(BCG), 利用模量速度差法已经定位到故障点位于线路 S_{1-2} 内, 因故障线路含有邻接数为 1 的站点, 采用组合式单端法测距。根据模量速度差法估算出故障点和 S_1 反射波的大概位置, 并在其附近查找最接近满足式(12)的两个波头, 最后根据式(13)计算出精确的故障距离。故障距离和测距结果如表 2 所示, 结果表明该方法对线路中点及附近故障具有较高的定位精度。

表 2 多种故障情况测距结果
Table 2 Ranging results under different fault conditions

故障位置	$\Delta t_{12} v_1^*$ km	故障距离/ km	测距结果/ km	误差/km
中点 附近	—	14.0	14.324	0.324
	—	15.0	15.415	0.415
	—	15.7	15.973	0.273
	—	17.0	17.354	0.354
线路 出口	0.586	0.300	0.600	0.300
	0.799	0.500	0.799	0.299
	1.051	0.700	1.051	0.351
	1.287	1.000	1.287	0.287

注：“—”表示无此数据，下表同。

2) 线路出口故障

仿真设置线路 S_{1-2} 内的变电站 S_2 附近发生单相接地故障(BG),故障距离如表 2 所示。根据模量速度差法已经确认故障线路为 S_{1-2} ,并发现故障点距离 S_2 较近,需要判断是否发生线路出口故障。测距结果见表 2。仿真表明,该方法能够较准确辨识线路出口故障,并具有一定的定位精度。

5.3.2 情形 2:近端故障选线

设置线路 S_{8-9} 距离 S_9 站点 1 km 处发生双相接地故障(ABG),测距站首先经模量速度差法估算故障距离,并判断故障线路,结果如表 3 所示,其中变电站 S_9 难以测量初始波头的零模和线模分量到达时间差,可认为故障点距离 S_9 较近。

表 3 近端故障时选线结果

Table 3 Fault line selection results when a fault is near the station

变电站	估算距离 l_i /km	疑似故障线路集合 C_i
S_2	58.670	$S_{3-6}, S_{5-8}, S_{6-9}, S_{8-9}, S_{7-10}$
S_6	42.391	$S_{3-4}, S_{3-6}, S_{5-8}, S_{6-9}, S_{8-9}, S_{7-10}$
S_7	56.943	$S_{1-2}, S_{3-8}, S_{6-9}, S_{8-9}, S_{9-10}$
S_9	—	$S_{6-9}, S_{8-9}, S_{9-10}, S_{9-11}$

由表 3 可知,集合 C^* 包含 S_{8-9} 和 S_{6-9} ,都出现 4 次,认为所有站点数据有效,进一步利用多端数据确认故障线路。

设故障点位于线路 S_{6-9} ,将变电站 S_6 和 S_9 的数据代入式(3),计算得到故障点距离 S_9 为 -0.017 km,考虑到误差的存在,可认为故障点不在线路 S_{6-9} 内,由变电站 S_2 和 S_9 的数据计算出故障点距离 S_9 为 1.179 km,综上可知故障点位于线路 S_{2-9} 内。

6 结语

本文提出了一种行波故障定位新算法,第 1 步利用初始波头的模量速度差实现快速选线;第 2 步利用组合式行波法进行精确故障定位。实验表明,

所提方法测距精度高,一次投入设备少。可以预见,网络结构越复杂,可利用的数据越多,测距结果品质越高。

此外,由于行波折反射情况复杂,电网内存在众多信号干扰,同时实现全网时间同步有一定困难。因此,后续将针对行波信号的精确检测进行深入研究,并完善测距算法,提高其抗干扰能力。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] 李泽文,姚建刚,曾祥君,等.基于整个电网行波时差的故障定位方法[J].中国电机工程学报,2009,29(4):60-64.
LI Zewen, YAO Jiangan, ZENG Xiangjun, et al. Fault location based on traveling wave time difference in power grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(4): 60-64.
- [2] 李泽文,易志鹏,杨毅,等.基于遗传算法的电网故障行波定位装置的优化配置[J].电力系统保护与控制,2015,43(3):77-83.
LI Zewen, YI Zhipeng, YANG Yi, et al. Optimal placement of traveling wave fault location equipment for power grid based on genetic algorithm [J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 77-83.
- [3] 邓丰,陈楠,曾祥君.基于图论的电网故障行波定位装置最优配置算法[J].电力系统自动化,2010,34(11):87-92.
DENG Feng, CHEN Nan, ZENG Xiangjun. An optimal configuration algorithm for traveling wave fault location equipments in power grid based on graph theory [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(11): 87-92.
- [4] 高本锋,刘辛晔,张云晓,等.高压直流输电线路行波特性与保护定值整定[J].电力系统自动化,2015,39(16):120-125. DOI: 10.7500/AEPS20141217010.
GAO Benfeng, LIU Xinye, ZHANG Yunxiao, et al. Characteristics and protection value setting of traveling wave on HVDC transmission line [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(16): 120-125. DOI: 10.7500/AEPS20141217010.
- [5] 梁睿,孙式想,靳征.单双端行波特征综合考虑的辐射状电网组合测距技术[J].高电压技术,2014,40(5):1461-1467.
LIANG Rui, SUN Shixiang, JIN Zheng. Fault location in radial power grid after analyzing characteristics of both single-terminal and double-terminal traveling waves [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(5): 1461-1467.
- [6] 陈羽,刘东,徐丙垠.基于 IEC 61850 的行波测距装置建模[J].电力系统自动化,2013,37(2):86-90.
CHEN Yu, LIU Dong, XU Bingyin. Traveling wave fault location equipment modeling based on IEC 61850 [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(2): 86-90.
- [7] 李泽文,刘柏罕,范彩兄,等.基于 Rogowski 线圈的新型电压行波传感器[J].电力系统自动化,2016,40(9):94-99. DOI: 10.7500/AEPS20150722004.
LI Zewen, LIU Bohan, FAN Caixiong, et al. Rogowski coil based voltage traveling wave sensor [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(9): 94-99. DOI: 10.7500/AEPS20150722004.

- AEPS20150722004.
- [8] 刘慧海, 张晓莉, 姜博. 行波故障测距装置的检测与评价[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 145-149.
LIU Huihai, ZHANG Xiaoli, JIANG Bo. Testing and evaluation method of fault location equipment based on traveling wave[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 145-149.
- [9] KORKALI M, LEV-ARI H, ABUR A. Traveling-wave-based fault-location technique for transmission grids via wide-area synchronized voltage measurements[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2012, 27(2): 1003-1011.
- [10] 彭向阳, 毛先胤, 李鑫. 架空输电线路故障分布式行波定位误差分析[J]. 高电压技术, 2013, 39(11): 2706-2713.
PENG Xiangyang, MAO Xianying, LI Xin. Errors analysis of overhead transmission line fault location based on distributed travelling-wave[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(11): 2706-2713.
- [11] 梁睿, 崔连华, 都志立, 等. 基于广域行波初始波头时差关系矩阵的配电网故障选线及测距[J]. 高电压技术, 2014, 40(11): 3411-3417.
LIANG Rui, CUI Lianhua, DU Zhili, et al. Fault line selection and location in distribution power network based on traveling wave time difference of arrival relationships[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(11): 3411-3417.
- [12] 蒋怡然, 黄龙, 叶皖. 复杂输电网络行波故障定位方法[J]. 电测与仪表, 2015, 52(11): 36-42.
JIANG Yiran, HUANG Long, YE Wan. Travelling-wave-based fault location method in complex transmission grid[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2015, 52(11): 36-42.
- [13] 范新桥, 朱永利. 基于双端行波原理的多端输电线路故障定位新方法[J]. 电网技术, 2013, 37(1): 261-269.
FAN Xinqiao, ZHU Yongli. A novel fault location scheme for multi-terminal transmission lines based on principle of double-ended traveling wave[J]. Power System Technology, 2013, 37(1): 261-269.
- [14] 陈羽, 刘东, 徐丙垠. 基于广域网络信息的行波测距算法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(11): 65-70.
CHEN Yu, LIU Dong, XU Bingyin. A travelling wave location algorithm based on wide area network information [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(11): 65-70.
- [15] 张帆, 潘贞存, 马琳. 基于模量行波传输时间差的线路接地故障测距与保护[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(10): 78-83.
ZHANG Fan, PAN Zhencun, MA Lin. Transmission line fault location and protection based on the gap between zero mode and aerial mode traveling wave propagation time [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(10): 78-83.
- [16] 梁睿, 孙式想. 单端行波故障测距的组合方法研究[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 699-706.
LIANG Rui, SUN Shixiang. A combined method for single-ended traveling wave fault location [J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 699-706.
- [17] 刘朕志, 舒勤, 韩晓言. 基于行波模量速度差的配电网故障测距迭代算法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 88-93.
LIU Zhenzhi, SHU Qin, HAN Xiaoyan. An iterative fault location algorithm using the difference of wave velocity between zero mode component and aerial mode component of traveling wave [J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 88-93.

李振兴(1977—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 电力系统继电保护与安全稳定控制。E-mail: lzx2007001@163.com

吴李群(1990—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向: 电力系统继电保护与安全稳定控制。E-mail: wuliqunde@126.com

田斌(1989—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 电力系统继电保护与安全稳定控制。E-mail: 534549459@qq.com

(编辑 蔡静雯)

Traveling Wave Fault Location Using Multi-point Measurement Information of Regional Power Grid

LI Zhenxing¹, WU Liqun¹, TIAN Bin², TAN Hong²

(1. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. Hubei Provincial Collaborative Innovation Center for New Energy Microgrid (China Three Gorges University), Yichang 443002, China)

Abstract: By using multi-point information of regional power grid, the traveling wave fault location can reduce the number of fault location equipment and increase the credibility of the location results. An algorithm using traveling wave data in the time domain is proposed to simultaneously select the fault line and locate the fault point. Firstly, the rough value of fault distance is calculated based on the wave velocity contrast between zero-mode and line-mode. Then the fault line is selected without relying on protection action information, and the invalid data are rejected at the same time. Combining with the advantages of the single-terminal and the double-terminal traveling wave fault location methods, an accurate fault distance is obtained by using multi-terminal data, while the quality of the location results is improved. Finally, the simulation results show that a reliable and accurate location result can be obtained for all lines, even with limited location equipment in the network.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51507091).

Key words: traveling wave; fault location; optimal placement; fault line selection