

广域电网故障监测点优化配置及准确定位研究

为提高广域电网下行波测距系统的经济性和最大故障可观测性,提出一种基于双端测距原理的新型广域测距算法。通过算例对IEEE-30标准系统的故障监测点进行配置,并使用PSCAD构建IEEE-30系统,验证新型广域定位算法的正确性。仿真分析表明该定位算法的测距准确度高,且具有一定的容错抗干扰能力。

孙晓明 李 森/国网濮阳供电公司 刘 锋/徐州凯思特机电科技有限公司

0 引言

近年来,随着现代电力系统的空间范围不断扩大,形成了广域系统。借助于现代计算机处理、数字信号处理以及GPS同步定时技术的日益发展,对于广域系统下的继电保护和状态监测研究也逐渐增多^[1-4];为降低故障发生时的损失,达到好的经济效应和社会效益,要对电网的安全状况进行监测,并利用相关技术对故障进行快速定位^[5],尤其对于广域系统这一研究范围,国内外已出现了一些成熟的研究成果^[6-9]。

由于行波法受系统运行参数变化影响较小,且考虑到单端测距法对反射波的辨识较困难,一些改进办法的适用范围也较小,因此,在现代故障定位技术中,多利用小波的时频局部特性,对暂态行波初始波头的到达时刻进行检测,进而使用双端测距法进行测距。这种直接使用行波监测数据进行测距的装置称为数字故障定位器(Digital Fault Locator, DFR)^[10-11],本文将选择DFR作为系统的监测装置。

对广域系统下的行波法测距研究

中,文献[6-8]不考虑投资成本,使所有变电站均安装DFR,但若使用一个复杂的网络,那么以上方法将会受到一定限制;且文献[7]的算法主要针对辐射状配电网,如果系统中含有环网等特殊结构,那么算法将达不到理想要求。文献[9]虽然考虑到系统内DFR的配置问题,但当DFR监测数据中出现一些错误数据时,其算法推导过程会影响最终的测距结果。国内外针对广域系统的相量测量单元(Phase Measurement Unit, PMU)的最优配置已有了大量研究^[12-13],但考虑到满足系统故障可观性的监测点配置算法很少^[14-15]。

对广域系统而言,若直接根据双端测距原理进行测距,故障点位置会直接影响DFR的测距组合,有些故障位置可能产生测量盲区,降低系统可观性。因此,本文在考虑系统最大可观性的基础上,对广域系统的DFR进行最优配置,并在指定DFR配置情况下,提出新型故障定位算法。

1 DFR最优配置算法

DFR配置是基于系统发生故障时,利用若干DFR组合进行双端测距。满足系统故障可观时,所需最少的DFR组合即最优配置算法。

1.1 算法模型建立

假设一个电网系统的拓扑数据如下:节点(母线)数为 N ,线路条数为 R ,任意线路表示为 ij ($i=1,2,\dots,N; j=$



孙晓明/工程师

关键词/Keywords

广域系统·
行波双端测距·
最优配置·
定位算法·
容错能力·

$1, 2, \dots, N; 1 \leq i < j \leq N$), 其长度为 L_{ij} 。线路 ij 在故障点 f 发生故障, f 距线路首端 i 的距离占据整条线路比例为 τ ($0 \leq \tau \leq 1$)。

进一步引入变量 x_k ($1 \leq k \leq N$), 作为各母线是否安装DFR的标识变量, 即满足

$$x_k = \begin{cases} 0 & k \text{ 号母线不安装DFR} \\ 1 & k \text{ 号母线安装DFR} \end{cases} \quad (1)$$

如图1所示, 由于故障行波传播选择最短路径, 所以故障点 f 到达系统中各DFR的最短路径为

$$S_f = \{x_k S_{fk}, k = 1, 2, \dots, N\} \quad (2)$$

式中, S_{fk} 为故障点 f 到指定 k 号母线之间的最短距离, $S_{fk} = \min\{\tau L_{ij} + L_{ik}, (1-\tau)L_{ij} + L_{jk}\}$, L_{ik} 、 L_{jk} 为线路 ij 两端母线 i 、 j 到达 k 号母线的最短距离。

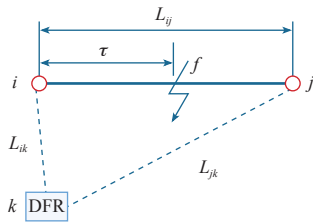


图1 模型说明图

为表示故障行波到达 k 号母线的最短距离 S_{fk} , 引入变量 g_k

$$g_k = \begin{cases} 0 & \text{从} i \text{ 母线离开故障线路} \\ 1 & \text{从} j \text{ 母线离开故障线路} \end{cases} \quad (3)$$

式中, $k = 1, 2, \dots, N$ 。当DFR组合满足推导结论时, 故障点到其他DFR的所有最短路径需满足以下关系

$$1 \leq \sum_{k=1}^N x_k g_k \leq \sum_{k=1}^N x_k - 1 \quad (4)$$

根据以上分析, 建立如下DFR配置模型

$$\min k = \sum_{i=1}^N x_k \quad (5)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} \forall 1 \leq i < j \leq N, \text{ 满足:} \\ \text{对} \forall \tau, 0 \leq \tau \leq 1, \text{ 存在:} \\ 1 \leq \sum_{k=1}^N x_k g_k \leq k - 1 \end{cases} \quad (6)$$

式(6)表示对于系统中任意线路任意位置发生故障时, 均满足式(4)的要求。对于任意线路 ij , 其上故障点 τ 到达 k 号母线的最短距离为

$$S_{fk} = \min\{\tau L_{ij} + L_{ik}, (1-\tau)L_{ij} + L_{jk}\} \quad (7)$$

以故障点位置 τ 为变量, 式(7)的函数图像如图2所示。

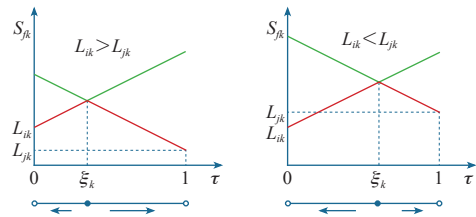


图2 S_{fk} 图像表示

实际上, S_{fk} 表达式取图像粗实线部分, 当右式中两个表达式相等时, 可以得到该线路 ij 的故障位置 τ , 将其定义为临界点 ξ_k , 即

$$\xi_k = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{L_{jk} - L_{ik}}{L_{ij}} \right) \quad (8)$$

图2中的箭头方向表示线路 ij 上两个不同区段: $(0, \xi_k)$ 、 $(\xi_k, 1)$ 发生故障时, 故障点到达 k 号母线的最短路径的走向。

根据上述箭头走向, 可以将表达式 S_{fk} 进一步表达如下

$$S_{fk} = \begin{cases} \tau L_{ij} + L_{ik} & 0 \leq \tau \leq \xi_k \\ (1-\tau)L_{ij} + L_{jk} & \xi_k < \tau \leq 1 \end{cases} \quad (9)$$

如图2所示, 线路 ij 对于系统所有母线的临界点分布满足

$$0 \leq \xi_{k1} < \xi_{k2} < \dots < \xi_{kn} \leq 1 \quad (10)$$

式中, $k1 \sim kn$ 为根据临界点大小的重新编号, 一个临界点 ξ_{ki} ($i = 1, 2, \dots, n$) 可能对应多条母线。

如图3所示, 临界点将线路 ij 分为 $n+1$ 个区间, 即 $(0, \xi_{k1})$, (ξ_{k1}, ξ_{k2}) , $\dots$, (ξ_{kn-1}, ξ_{kn}) , $(\xi_{kn}, 1)$, 并且一一对应相关线路的位置, 其中, 0代表线路首端, 1代表线路末端。

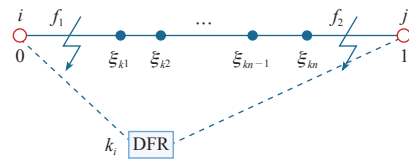


图3 任意线路 ij 对各DFR的临界点

在式(6)中, DFR的配置 x_k 对变量 τ 的影响特别敏感, 根据以上的推导结论, 可将模型转化为分析母线处DFR的配置, 使得系统中所有线路的最值

临界点区间 $[\min \xi, \max \xi]$ 最大, 即式 (11) 所示

$$\begin{aligned} & \min \sum_{k=1}^{N_l} x_k \\ & \text{s. t.} \begin{cases} \forall l, l=1 \sim R, \text{ 满足:} \\ \max(\max \xi_l - \min \xi_l) \end{cases} \end{aligned} \quad (11)$$

式中, $\max \xi_l$ 为线路 l 对应的最大临界点值; $\min \xi_l$ 同理。

可见, 式 (11) 与式 (6) 等价, 且约束条件更少, 由于 $\max \xi_l$ 和 $\min \xi_l$ 都是随着母线处 DFR 的配置, 即 x_k 值的变化而变化, ξ_l 求解方法简单, 因此更易求解。

1.2 算法模型求解

模型求解原则是满足最大可观性下的最优 DFR 配置, 当系统中所有母线都安装 DFR 时, 对于任意的线路 l , $\max(\max \xi_l - \min \xi_l)$ 的值一定存在并且唯一。

假设系统母线有 N 个, 线路有 R 条。求解步骤如下。

1) 初始化。 N 条母线位置均安装 DFR。计算得到 R 条线路安装的 DFR 临界点矩阵: $\mathbf{P} = (\xi_l)_{R \times 1} = (\xi_{ln})_{R \times N}$, $l=1 \sim R$, $n=1 \sim N$ 。

2) 处理数据。寻到每条线路 l 对 N 个 DFR 临界点 ξ_l 的最小值 $\min \xi_l$ 和最大值 $\max \xi_l$ 所对应的母线集合 ∇_{l0} 、 ∇_{l1} , 构成最值所对应安装 DFR 的母线号集合矩阵 $\mathbf{B} = (\nabla_{li})_{R \times 2}$, $l=1 \sim R$, $i=0,1$ 。

3) 求解 DFR。针对矩阵 $\mathbf{B}$, 寻找必须安装 DFR 以及可能安装 DFR 的母线号, 输出最优解。

根据 2) 的数据处理, 得到

$$\mathbf{B} = \begin{matrix} & \min & \max \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ \vdots \\ l \\ \vdots \\ R \end{matrix} & \begin{pmatrix} \nabla_{l0} & \nabla_{l1} \\ \nabla_{20} & \nabla_{21} \\ \vdots & \vdots \\ \nabla_{l0} & \nabla_{l1} \\ \vdots & \vdots \\ \nabla_{R0} & \nabla_{R1} \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (12)$$

式中, ∇_{l0} 和 ∇_{l1} 为母线号集合, 分别代表第 l 条线路临界点的最小值和最大值对应 DFR 安装处的母线号集合; $|\nabla_{li}|$ 为 ∇_{li} 中的母线数量, 使用以下原则得

到 DFR 配置的最优解。

原则 1: $|\nabla_{li}|=1$ 表示 ∇_{li} 内只有一条母线, 此时, 由于只有在此母线安装 DFR 时才能达到线路临界点的最小值或最大值, 所以此母线必须安装 DFR。

根据原则 1, 将得到所有必须安装 DFR 的母线作为集合 $\mathbf{B}_M$ 。在母线号集合矩阵 $\mathbf{B}$ 中, 只要其中任意元素 ∇_{li} 中对应的母线集合含有 $\mathbf{B}_M$ 中的某条母线, 那么这个元素 ∇_{li} 对应的临界点的最小值或最大值便可达到, 元素 ∇_{li} 内的其他母线不用再配置 DFR, 使得必须配置的 DFR 最少。

原则 2: 从 $\mathbf{B}$ 中删除仅由 $\mathbf{B}_M$ 中的母线即可达到临界点要求的元素, 剩下的元素按临界点分为最小值对应的元素集合矩阵 $\mathbf{B}_{p0}$ 和最大值对应的元素集合矩阵 $\mathbf{B}_{p1}$ 。

$$\begin{aligned} \text{令} \quad \mathbf{B}_{p0} &= \begin{pmatrix} \nabla_{p1} & \nabla_{p2} & \cdots & \nabla_{pm} \end{pmatrix} \\ \mathbf{B}_{p1} &= \begin{pmatrix} \nabla_{q1} & \nabla_{q2} & \cdots & \nabla_{qn} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (13)$$

式中, $\mathbf{B}_{p0}$ 与 $\mathbf{B}_{p1}$ 的元素数量分别为 m 和 n 个, 并且其中所有元素内的母线数量不少于 2 个, 即 $|\nabla_{pi}|$, $|\nabla_{qi}| \geq 2$ 。

根据以上原则 1 和原则 2, 得到必须配置 DFR 的母线数量, 并对可能配置 DFR 的母线集合进行操作, 即可寻找到最少的 DFR 配置数量, 使其满足线路的最大可观性。

2 广域新型定位算法

2.1 识别测距组合的原则

假定在满足系统最大可观性的前提下, 系统安装 K 个 DFR 装置, 在系统任意线路发生故障时, K 个 DFR 中至少存在一组 DFR 满足双端测距原理。在故障发生时, 从 DFR 得到的 K 组测量数据中, 必存在一个检测最小值, 设 i 号母线安装的 DFR 对应最小时间, 如图 4 所示, 其中 j_{1-4} 代表母线 i 的相邻母线编号。

由于 K 个 DFR 中至少存在一组 DFR 满足双端测距原理, 并且 i 号母线一定可以与剩余 $K-1$ 个 DFR 中的至少一个 DFR 构成测距组合, 将 i 号母线单独

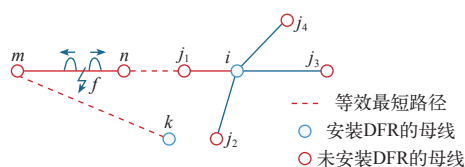


图4 测距组合识别说明图

进行分析。

识别测距组合应满足以下三项基本原则。

1) 最小时间对应的DFR所在母线 i ，一定可以与其他 $K-1$ 个DFR中至少一个DFR组成双端测距组合，如图4中的 k 号母线对应的DFR。

2) 一段线路发生故障时，故障行波一定沿最短路径到达所有的故障监测点。

3) 构成双端测距时，两个DFR之间的最短路径，一定经过母线 i 相邻母线的其中一个母线。

此外，故障时间 t 是测距中的关键变量，当使用双端测距时，可以通过速度、时间和路程之间的关系求解得到

$$t_0 = \frac{1}{2}(t_i + t_k) - \frac{L_{ik}}{2c_{\text{aerial}}} \quad (14)$$

2.2 定位算法实现

根据判断错误数据对得到的监测数据进行处理，并借助故障发生时间 t_0 来提高测距准确度，从而实现广域新型定位算法。算法步骤如下。

初始化：①指定配置 k 个DFR，分别对应母线为 $I_M = [I_1, I_2, \dots, I_k]$ ；②系统中各母线节点之间的最短距离；③记录安装DFR母线的相邻母线节点情况，并记录这些节点到各DFR的最短距离；④确定行波传播速度 c_a 。

将以上初始化数据存入数据库SQL-0。

设故障发生时， k 个DFR同步检测到故障电压，通过模变换，识别故障初始行波波头的到达时间，得到 K 组测量数据： $T_M = [T_1, T_2, T_3, \dots, T_k]$ 。

1) 根据 T_M 值，寻找到最小值 T_i ，得到对应DFR的安装母线位置 I_i 及母线 I_i 的相邻母线情况。假设母线 I_i 共 p 条相邻母线，表示为 $I_V = [I_{V1}, I_{V2}, \dots, I_{Vp}]$ ， I_V 内母线到达其他 K 个DFR的最短路径 $D = [D_{V1}, D_{V2}, \dots, D_{Vp}] = \{[D_{11}, D_{12}, \dots, D_{1k}], [D_{21}, D_{22}, \dots,$

$D_{2k}], \dots, [D_{p1}, D_{p2}, \dots, D_{pk}]\}$ 。

2) 处理母线 I_i 的相邻母线 I_V 。选择 I_V 中一条相邻母线 I_{Vj} ($j=1 \sim p$)，初始 $j=1$ 。查1)中 D 表得到此母线到所有DFR的最短距离为 D_V ，令母线 I_i 对应的DFR分别与其他 $K-1$ 个DFR构成双端测距组合，测量的故障距离 $S_M = [S_{M1}, S_{M2}, S_{M3}, \dots, S_{M(K-1)}]$ ，确定故障线路 $R_M = [R_{M1}, R_{M2}, \dots, R_{M(K-1)}]$ 。

3) 处理故障信息 S_M 、 R_M 。初始令 $t=1$ ，根据故障距离 S_{Mt} 以及故障线路 R_{Mt} ，确定原系统中故障点位置，并将其作为新母线节点 f 更新整个系统。

4) 计算此新母线节点 f 到各DFR的距离 $S_f = [S_{f1}, S_{f2}, S_{f3}, \dots, S_{fk}]$ ，由 $S_f = c_a T_f$ 计算节点 f 到达各DFR的故障时间 $T_f = [T_{f1}, T_{f2}, T_{f3}, \dots, T_{fk}]$ 。

5) 对 T_f 与 T_M 使用曼哈顿距离计算，令 $H_t = \|T_f - T_M\|$ ，记录此值。

6) 判断矩阵 S_M 与 R_M 中的故障信息是否处理完毕，是则到达下一步，否则 $t=t+1$ ，返回3)。

7) 由以上3)~6)，得到曼哈顿距离矩阵 $H = [H_1, H_2, \dots, H_{(k-1)}]$ ，寻找矩阵 H 中的最小值，令 $\Delta T_j = \min H$ ，并记录对应的故障距离、故障线路以及测距组合，暂时存入数据库SQL-1。判断母线 I_i 的相邻母线节点是否全部处理完毕，是则到达下一步，否则 $j=j+1$ ，返回2)。

8) 由以上2)~7)，得到根据所有 p 条相邻母线，分别计算的最小曼哈顿距离矩阵 $\Delta T = [\Delta T_1, \Delta T_2, \dots, \Delta T_p]$ ，寻找 ΔT 中的最小值，查询数据库SQL-1，得到最小值对应的故障距离、故障线路以及测距组合。由式(14)得到故障发生时间 t_0 。

9) 利用已知测量数据，根据 $S_i = c_a(T_{Mi} - t_0)$ ，得到故障点到各DFR的距离，再根据相应线路走向，得到各DFR测得的实际故障线路离线路首端的故障距离 $S_{\text{fact}} = \{S_{\text{fact}i}, i=1 \sim k\}$ 。

10) 数据处理。由于测量数据 T_M 中可能存在错误数据，所以必须对9)得到的结果 S_{fact} 进行处理。

11) 数据处理结束，假设还有 m 组数据组成计算数据组 S_{fact}^* ，则得到最终测量故障距离为 $S =$

$$\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_{\text{facti}}^*$$

2.3 容错能力分析

在复杂系统中, 更容易出现监测故障, 这将影响测量数据的准确性, 因此, 对于算法的容错能力分析十分必要。

每次进入2) 计算故障距离 S_{M_i} 时, 对各DFR组合对应的故障距离 S_{M_i} ($i=1,2,\dots,K-1$), 要判断其与故障线路长度的关系, 若故障距离大于线路长度或者故障距离小于0, 这两种情况均不成立, 则记录 $S_{M_i}=\infty$ 。如果对应DFR测量数据属于错误数据, 那在每次进入2) 中进行计算时, S_{M_i} 值一定是 ∞ 。

借助2) 算法修正, 在8) 中能很快剔除错误数据, 且在9) 中进一步处理, 这三个步骤对数据的处理, 可以最大限度地保证算法实现中使用的测量数据的准确性, 即该算法具有了一定的容错能力, 能保证测距结果的准确性。

3 算例分析及验证

本文对于DFR配置和定位算法的算例, 均使用IEEE-30标准系统, 如图5所示, 其线路数据见文献[9]。

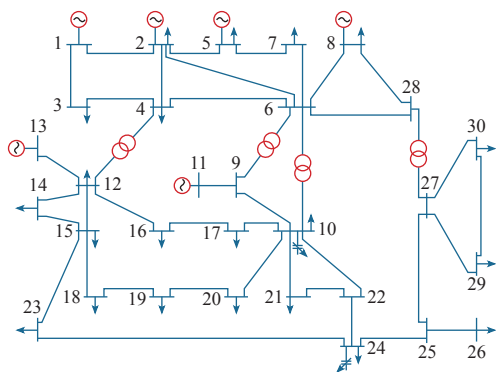


图5 IEEE-30标准系统

3.1 配置算法验证

根据算法步骤: $B_M=[3,8,11,13,14,21,26,29,30]$, 说明3、8、11、13、14、21、26、29、30号9条母线必须安装DFR; $B_{P_0}=\{[5,7], [5,7], [16,17], [15,18,19,20], [15,18,19,23,24], [16,17],$

$[10,18,19,20]\}$; $B_{P_1}=\{[1,2,5], [1,2], [1,2], [1,2,5], [15,18,19]\}$ 。

由算法原则1~2, 得到: $B_{P_0}=\{[5,7], [16,17], [10,18,19,20]\}$; $B_{P_1}=\{[1,2], [15,18,19]\}$ 。由于 $[10,18,19,20]$ 与 $[15,18,19]$ 具有交集 $[18,19]$, 在18或19号母线上安装DFR, 可同时使两个元素满足最值要求, 减少DFR的配置数量, 并且其他元素均不相交, 最终得到配置最少的DFR数目为13个, 除了必须安装的9条母线外, 另外4个DFR为 $[5,7], [16,17], [1,2], [18,19]$ 4个集合中各取一条母线进行安装, 通过处理集合矩阵 B , 在保证最小检测盲区的前提下, 得到DFR的配置结果如表1所示。

3.2 定位算法验证

使用PSCAD对整个系统进行建模仿真, 设置故障线路为线路4-6, 故障发生在距离4母线25 km处, 故障类型为ABC相间短路故障。故障发生时间为20 ms, 故障维持10 ms。

对各DFR监测到的三相电压进行相模变换, 采用db6小波做离散变换, 得到模极大值对应的初始行波到达时间 T_M , 如表2所示。

从表2可知, $\min T_M=t_{13}$ 。得到其他DFR与13号DFR的测距组合, 测距结果如表3所示。

表3中, 曼哈顿距离最小为13号DFR与30号DFR的组合, 因此, 以13号和30号得到的测距结果作为以后计算的基础, 故障线路为4~6, 故障距离距25号母线25.072 9 km, 故障时间 t_0 取为20.000 4 ms, 实际故障时间为20 ms, 绝对误差为0.42 μ s。

按照步骤9), 以故障时间 t_0 作为计算数据, 各DFR测得的故障距离如表4所示。

最终按照步骤11), 得到故障线路与故障距离为: 4~6线路, 距离4母线25.016 9 km, 绝对误差为16.90 m, 相对误差为0.07%。

为验证此算法的容错能力, 对5号、16号和26号母线上的DFR设置错误检测值, 分别对应22.973 ms、22.505 ms和25.577 ms, 表2中其他DFR均为正确检测数据。根据修正算法, 将5号、

16号和26号母线上DFR的监测数据删掉，使用余下数据进行分析，得到各DFR测得的故障距离 S_{fact} ，如表5所示。最终按照步骤11），得到故障线路与故障距离为：4~6线路，距离4母线25.000 6 km，绝对误差为0.63 m，可见这个算例中，得出的最终结果基本无误差。

表1 IEEE-30系统DFR安装结果

最少安装数目	13												
	1	3	5	8	11	13	14	16	18	21	26	29	30
最优安装位置	1	3	5	8	11	13	14	16	19	21	26	29	30
	1	3	5	8	11	13	14	17	18	21	26	29	30
	1	3	5	8	11	13	14	17	19	21	26	29	30
	1	3	7	8	11	13	14	16	18	21	26	29	30
	1	3	7	8	11	13	14	16	19	21	26	29	30
	1	3	7	8	11	13	14	17	18	21	26	29	30
	1	3	7	8	11	13	14	17	19	21	26	29	30
	2	3	5	8	11	13	14	16	18	21	26	29	30
	2	3	5	8	11	13	14	16	19	21	26	29	30
	2	3	5	8	11	13	14	17	18	21	26	29	30
	2	3	5	8	11	13	14	17	19	21	26	29	30
	2	3	7	8	11	13	14	16	18	21	26	29	30
	2	3	7	8	11	13	14	16	19	21	26	29	30
	2	3	7	8	11	13	14	17	18	21	26	29	30

表2 各DFR检测初始行波到达时间

DFR编号	2	3	5	8	11	13	14	16	18	21	26	29	30
时间 t	20.014	20.352	20.973	21.013	21.143	20.238	20.936	20.505	21.202	21.578	22.577	22.194	21.939

表3 DFR测距组合得到测距结果

DFR编号	2	3	5	8	11	13	14	16	18	21	26	29	30
曼哈顿距离 H	1.179 84	1.178 96	0.006 09	0.005 97	0.007 08	4.324 53	2.799 57	2.799 79	2.798 15	0.005 95	0.007 39	0.010 47	0.005 93
故障线路 R	[4, 12]	[4, 12]	[4, 6]	[4, 6]	[4, 6]	[13, 13]	[12, 14]	[12, 16]	[12, 15]	[4, 6]	[4, 6]	[4, 6]	[4, 6]
故障距离 S_f	0.070 2	0.051 6	25.062 4	25.079 4	25.134 6	0	0.096 6	0.063 5	0.309 7	25.069 5	25.144 1	24.931 3	25.072 9
故障时间 t	20.084 5	20.084 4	20.000 5	20.000 4	20.000 2	20.238	20.174 2	20.174 3	20.173 5	20.000 4	20.000 2	20.000 9	20.000 4

表4 各DFR测得的故障距离 S_{fact} （距离4母线）

DFR编号	2	3	5	8	11	13	14	16	18	21	26	29	30
故障距离/km	25.213 3	25.176	25.051 8	25.085 8	25.196 3	25.072 9	24.879 6	24.946	24.453 5	25.066 1	25.215 2	24.789 7	25.072 9
绝对误差/m	213.325	176.025	51.825	85.825	196.325	72.925	-120.375	-54.025	-546.475	66.075	215.225	-210.325	72.925
相对误差(%)	0.85	0.7	0.21	0.34	0.79	0.29	0.48	0.22	2.19	0.26	0.86	0.84	0.29

表5 经修正后的各DFR测得的故障距离 S_{fact} （距离4母线）

DFR编号	2	3	8	11	13	14	18	21	29	30
故障距离/km	25.213 3	25.176 0	25.085 8	25.196 3	25.072 9	24.879 6	24.453 5	25.066 1	24.789 7	25.072 9
绝对误差/m	213.325	176.025	85.825	196.325	72.925	-120.375	-546.475	66.075	-210.325	72.925
相对误差(%)	0.85	0.70	0.34	0.79	0.29	0.48	2.19	0.26	0.84	0.29

4 结束语

本文提出的广域新型算法是基于指定DFR配置的,这种配置基础是达到系统最大可观性,使得任意线路发生故障时,都能够从所配置的组合中选择一组DFR进行双端测距。仿真结果表明,相比于以往的其他配置算法,本文提出的广域新型监测算法更简单迅速,测距准确度高,并具有一定的容错能力,能适用于任意类型的配电网系统。

参考文献

- [1] 鞠平,代飞,等.电力系统广域测量技术[M].北京:机械工业出版社,2008:1-5.
- [2] 徐丙垠,薛永瑞,李天友,等.智能电网广域测控系统及其保护控制应用技术[J].电力系统自动化,2012,36(18):2-9.
- [3] 吴浩,李群湛,南晓强,等.基于行波信息的广域后备保护故障判别新原理[J].电力系统及其自动化学报,2012,4(6):83-89.
- [4] 李泽文,郑盾,曾祥君,等.基于极性比较原理的广域行波保护方案[J].电力系统自动化,2011,35(3):49-53.
- [5] 葛耀中.新型继电保护和故障测距的原理与技术[M].西安:西安交通大学出版社,2007:303-304.
- [6] 陈羽.广域行波测距算法及其形式化验证[D].上海:上海交通大学,2013.
- [7] 王阳,曾祥君,黎锐烽,等.基于图论的配电网故障行波定位新算法[J].电力系统自动化,2012,36(18):143-147.
- [8] 周会峰,曾祥君,邓丰,等.输电线路故障行波网络定位新方法[J].电力系统自动化,2013,37(19):93-99.
- [9] Mert Korkali, Hanoch Lev-Ari, Ali Abur. Traveling-Wave-Based Fault-Location technique for transmission grids via wide-area synchronized voltage measurements [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(2): 1003-1011.
- [10] Elhaffar A. An optimized fault location system based on traveling waves for transmission networks [C]. Electrotechnical Conference, 2012.
- [11] Mohammad Abdul Baseer. Traveling waves for finding the fault location in transmission lines [J]. Journal Electrical and Electronic Engineering, 2013, 1(1): 1-19.
- [12] 彭疆南,孙元章,王海风.考虑系统完全可观测性的PMU最优配置方法[J].电力系统自动化,2003,27(4):10-16.
- [13] Mohammadi-Ivatloo B. Optimal placement of PMUs for power system observability using topology based formulated algorithms [J]. Journal of Applied Sciences, 2009, 9(13): 2463-2468.
- [14] 邓丰,陈楠,曾祥君,等.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.
- [15] 李泽文,姚建刚,曾祥君,等.电网行波故障定位装置的优化配置[J].电力系统自动化,2009,33(3):64-68.

(收稿日期:2015-03-13) **EA**

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告