

考虑预设偏移值的多分支配电网故障定位方法

谢李为^{1,2}, 李 勇¹, 罗隆福¹, 曾祥君², 喻 锐², 侯 亮³, 曹一家¹

(1. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 长沙理工大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410114;
3. 长园深瑞继保自动化有限公司, 广东 深圳 518057)

摘要:为减少线路参数不确定性对配电网线路故障定位结果的影响,提出一种考虑预设偏移值的多分支配电网故障定位方法。通过分析配电网线路中故障行波的传输特性,考虑预设故障点与真实故障点位置关系,定义线路端点的预设偏移值,建立了以预设故障点与行波波速为变量,总预设偏移值最小为目标的优化模型。利用灰狼优化算法下最小预设偏移值的求解原理,提出了预设故障位置与行波波速的选择方法,减少行波波速不确定性对配电网故障定位的影响,实现精确的故障定位。仿真结果表明,所提方法能够有效辨识故障支路和精确定位故障点,定位结果不易受线路参数不确定性的影响,有效提高了配电网故障定位的精度。

关键词:配电网;故障定位;行波法;预设偏移值;灰狼优化算法

中图分类号:TM77

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202211004

0 引言

配电网作为电力传输的关键环节,其线路故障位置的准确定位对实现故障线路快速修复、提高配电网供电可靠性具有重要意义^[1-2]。配电网常用的故障定位方法主要可以分为阻抗法^[3-6]、人工智能法^[7-9]和行波法^[10-13]。阻抗法利用线路参数与电压、电流之间的关系实现故障点的定位,但容易受故障点过渡电阻、中性点接地方式、分布电容等因素的影响^[14]。人工智能法的故障定位原理容错性较高,但训练样本的来源与质量制约了方法的效果,灵活性和实用性较差^[10]。行波法根据故障定位原理可分为单端法和双端法,相比于阻抗法和人工智能法,行波法具有更高的定位精度和可靠性,逐渐被广泛应用。

配电网线路一般呈辐射状,分支节点较多,故障行波采集装置通常被安装在各线路末端,而非分支节点处^[15]。文献[16]根据多个连续达到行波的时刻隶属度,提出了一种单分支节点线路的故障定位方法,但在多分支配电网线路的故障定位方面存在不足。文献[17]利用频域单端行波定位与时域单端行波定位方法的特征,提出了一种基于时域和频域分析的配电网故障定位方法,但存在特征频率混叠的现象和死区问题。文献[18]利用故障点折射行波和反射行波的传输特性,建立故障点反射行波的辨识方法,并根据线路各端到故障点的距离与分支线路长度

度之间的数值关系,提出了一种多分支线路的故障定位方法,但随着配电网分支线路的增加,故障点反射行波的辨识难度较大。文献[19]通过分析故障行波沿线传输的突变特性,利用主成分分析和支持向量机方法进行故障支路的辨识,然后根据时窗内故障行波突变点的极性进行故障定位。但该方法需要提前构建故障行波波波形样本库,实际操作难度较大。

文献[20]根据辐射状配电网中各线路末端的故障行波到达时间,建立了故障行波到达时间矩阵,利用故障前后时间矩阵的差值特征实现故障定位,但该方法在线路沿线多分支的配电网结构中具有一定的局限性^[21]。文献[21]根据配电网线路末端与线路节点间的故障行波传输特性,构建了故障前线路节点故障行波到达线路各端的时差矩阵,通过对比故障前、后的各端时差矩阵,实现配电网线路的故障定位,但该方法需要提前获得大量线路节点的时差矩阵数据,系统硬件处理要求较高。另外,上述方法在分析过程中都利用了准确的线路参数,未考虑线路参数不确定性对故障定位精度的影响。事实上,受运行环境和线路老化等因素的影响,配电网线路参数在运行过程中可能发生变化,导致利用原始线路参数计算的行波波速存在偏差,增加故障定位误差。

因此,为减少线路参数变化对配电网故障定位精度的影响,本文提出了一种考虑预设偏移值的多分支配电网故障定位方法:通过分析配电网中预设故障位置与真实故障位置的行波传输特性,建立了以端点总预设偏移值最小为目标函数的故障定位模型;利用灰狼优化算法求解总预设偏移值最小时的预设故障点位置与行波波速,将故障点的定位问题转化成总预设偏移值最小的优化问题,实现配电网线路故障点的精确定位。

收稿日期:2022-04-19;修回日期:2022-08-16

在线出版日期:2022-11-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52061130217);深圳市承接国家重大科技资助项目(CJGJZD20200617102405015)
Project supported by the National Natural Science Foundation of China(52061130217) and Shenzhen Science and Technology R&D Fund for Undertaking Major National Science and Technology Project of China(CJGJZD20200617102405015)

1 故障行波的传输路径分析

1.1 单分支线路故障行波路径

由故障行波的产生原理可知,当配电网中线路发生故障时,故障行波将从故障点向线路各端传输。为分析故障行波的传输路径,在线路中预设随机故障点 P_1 和 P_2 ,如图1所示。考虑真实故障点与预设故障点间的位置关系,当预设故障点与真实故障点处于同一支路的不同位置,即真实故障点为 F 、预设故障点为 P_1 时,由双端定位算法可知端点 M_1 与其他线路端点间的真实故障距离差值为:

$$\begin{cases} d_{M_1M_2} = L_{M_1T} - L_{FT} \\ d_{M_1M_3} = L_{M_1T} - L_{FT} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $d_{M_1M_2}$ 为端点 M_1 和 M_2 间的真实故障距离差值; $d_{M_1M_3}$ 为端点 M_1 和 M_3 间的真实故障距离差值; L_{M_1T} 为支路 M_1T 的长度; L_{FT} 为故障点 F 与分支节点 T 之间的距离。

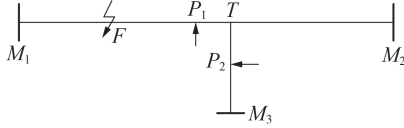


图1 单分支线路示意图

Fig.1 Schematic diagram of single branch line

端点 M_1 与其他端点间的预设故障距离差值为:

$$\begin{cases} \tilde{d}_{M_1M_2} = L_{M_1T} - L_{TP1} \\ \tilde{d}_{M_1M_3} = L_{M_1T} - L_{TP1} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\tilde{d}_{M_1M_2}$ 为端点 M_1 和 M_2 间的预设故障距离差值; $\tilde{d}_{M_1M_3}$ 为端点 M_1 和 M_3 间的预设故障距离差值; L_{TP1} 为预设故障点 P_1 与分支节点 T 之间的距离。

比较式(1)和式(2),获得预设故障点距离与真实故障点距离的偏移值为:

$$\begin{cases} \Delta D_{M_1M_2} = |\tilde{d}_{M_1M_2} - d_{M_1M_2}| = |L_{FT} - L_{TP1}| \\ \Delta D_{M_1M_3} = |\tilde{d}_{M_1M_3} - d_{M_1M_3}| = |L_{FT} - L_{TP1}| \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\Delta D_{M_1M_2}$ 为端点 M_1 和 M_2 间预设故障距离差值与真实故障距离的偏移值; $\Delta D_{M_1M_3}$ 为端点 M_1 和 M_3 间预设故障距离差值与真实故障距离的偏移值。

因此,端点 M_1 的预设偏移值 D_{M_1} 为:

$$D_{M_1} = \Delta D_{M_1M_2} + \Delta D_{M_1M_3} = 2|L_{FT} - L_{TP1}| \geq 0 \quad (4)$$

由式(4)可知,当且仅当预设故障点 P_1 与真实故障点 F 重合时,端点 M_1 的预设偏移值为0。

由图1可见,当预设故障点与真实故障点处于不同支路,即预设故障点为 P_2 、真实故障点为 F 时,利用双端定位算法可知端点 M_1 与其他线路端点间的预设故障点距离为:

$$\begin{cases} \tilde{d}_{M_1M_2} = L_{M_1T} \\ \tilde{d}_{M_1M_3} = L_{M_1T} + L_{TP2} \end{cases} \quad (5)$$

式中: L_{TP2} 为分支节点 T 和预设故障点 P_2 间的距离。

比较式(1)和(5),获得预设故障点距离与真实故障点距离的偏移值为:

$$\begin{cases} \Delta D_{M_1M_2} = |L_{FT}| \\ \Delta D_{M_1M_3} = |L_{FT} + L_{TP2}| \end{cases} \quad (6)$$

端点 M_1 的预设偏移值为:

$$D_{M_1} = |L_{FT}| + |L_{FT} + L_{TP2}| > 0 \quad (7)$$

同理可得,端点 M_2 、 M_3 的预设偏移值分别为:

$$D_{M_2} = \Delta D_{M_2M_1} + \Delta D_{M_2M_3} = |L_{FT}| + |L_{TP2}| > 0 \quad (8)$$

$$D_{M_3} = \Delta D_{M_3M_1} + \Delta D_{M_3M_2} = |L_{FT} + L_{TP2}| + |L_{TP2}| > 0 \quad (9)$$

式中: D_{M_2} 、 D_{M_3} 分别为端点 M_2 、 M_3 的预设偏移值。

由式(7)~(9)可知,当预设故障点与真实故障点在不同支路时, M_1 — M_3 的预设偏移值将大于0。当且仅当预设故障点与真实故障点重合时,线路端点的总预设偏移值等于0。因此,可以利用线路端点总预设偏移值的数值特征实现故障支路和故障点的辨识。

1.2 多分支线路故障行波路径

多分支配电网结构示意图如图2所示。对于1个含有 n 个分支末端的配电网,当线路发生故障后,以端点 M_1 为例,预设故障点距离与真实故障点距离间的偏移值为:

$$\begin{cases} \Delta D_{M_1M_2} = |2\tilde{d}_{M_1M_2} - L_{M_1M_2} - (t_1 - t_2)v| \\ \Delta D_{M_1M_3} = |2\tilde{d}_{M_1M_3} - L_{M_1M_3} - (t_1 - t_3)v| \\ \vdots \\ \Delta D_{M_1M_n} = |2\tilde{d}_{M_1M_n} - L_{M_1M_n} - (t_1 - t_n)v| \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\tilde{d}_{M_1M_i}$ ($i=2, 3, \dots, n$)为端点 M_1 与端点 M_i 间的预设故障点距离; $L_{M_1M_i}$ 为端点 M_1 与端点 M_i 间的线路长度; t_i ($i=1, 2, \dots, n$)为线路故障发生后,初始故障行波达到线路端点 M_i 的时间; v 为故障行波的传输速度。

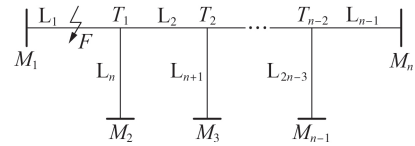


图2 多分支配电网结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of distribution network with multi-branch

端点 M_1 的预设偏移值为:

$$D_{M_1} = \sum_{i=2}^n \Delta D_{M_1M_i} \quad (11)$$

同理可得,端点 M_i ($i=2, 3, \dots, n$)的预设偏移值 D_{M_i} 为:

$$D_{M_i} = \sum_{j=1}^n \Delta D_{M_iM_j} \quad i=2, 3, \dots, n \text{ 且 } i \neq j \quad (12)$$

由前文可知,随着预设故障点位置的变化,端点 M_i 的预设偏移值 D_{M_i} 也将发生变化。当预设故障点

位置和真实故障点位置越近时,端点 M_i 的预设偏移值越小。另外,当且仅当预设故障点与真实故障点处于同一位置时,端点 M_i 的预设偏移值为最小值0。

因此,对于多分支线路的配电网而言,可以通过求解线路端点总预设偏移值最小时的预设故障点位置,获得真实故障点的位置。建立线路端点总预设偏移值最小的目标函数,即:

$$\min D_M = \sum_{i=1}^n D_{M_i} \quad (13)$$

在实现端点总预设偏移值最小目标的过程中,为方便获得故障支路和故障点位置,对系统中两节点间的线路进行编号处理。如图2所示,对于端点数量为 n 、分支节点数量为 $n-2$ 的配电网,以端点 M_1 和 M_n 之间的线路为主线路,对线路间的支路先进行编号,再对分支节点与端点间支路编号,即:线路 M_1T_1 记为 L_1 ,线路 T_1T_2 记为 L_2 ,线路 $T_{n-2}M_n$ 记为 L_{n-1} ,线路 M_2T_1 记为 L_n ,线路 $M_{n-1}T_{n-2}$ 记为 L_{2n-3} 。因此,预设故障点位置 d_i 的约束为:

$$0 \leq d_i \leq L_i \quad i=1, 2, \dots, 2n-3 \quad (14)$$

式中: L_i 为线路 L_i 的长度。

2 基于预设偏移值的定位方法

由上文可知,线路端点总预设偏移值的优化模型是一个非线性问题,通常难以直接获得最优解。因此,本文利用灰狼优化算法求解预设偏移值的优化模型,获得满足偏移值最小目标时的预设故障点位置,该预设故障点位置即为故障定位结果。灰狼优化算法^[22]的具体步骤和计算过程详见附录A。

2.1 故障定位的实现

在图2所示的多分支配电网中,在各线路末端安装行波采集装置。在系统线路故障发生前,建立端点间的线路固有长度矩阵 L_M 为:

$$L_M = \begin{bmatrix} M_1 & 0 & L_{M1M2} & L_{M1M3} & \cdots & L_{M1Mn} \\ M_2 & L_{M2M1} & 0 & L_{M2M3} & \cdots & L_{M2Mn} \\ M_3 & L_{M3M1} & L_{M3M2} & 0 & \cdots & L_{M3Mn} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ M_n & L_{MnM1} & L_{MnM2} & L_{MnM3} & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中: $L_{M_iM_j}(i, j=1, 2, \dots, n \text{ 且 } i \neq j)$ 为端点 M_i 、 M_j 间的线路长度。

当配电网中线路发生故障后,建立端点间的线路计算长度矩阵 W_M 为:

$$W_M = \begin{bmatrix} M_1 & 0 & W_{M1M2} & W_{M1M3} & \cdots & W_{M1Mn} \\ M_2 & W_{M2M1} & 0 & W_{M2M3} & \cdots & W_{M2Mn} \\ M_3 & W_{M3M1} & W_{M3M2} & 0 & \cdots & W_{M3Mn} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ M_n & W_{MnM1} & W_{MnM2} & W_{MnM3} & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$W_{M_iM_j} = 2\tilde{d}_{M_iM_j} - (t_i - t_j)v \quad i, j=1, 2, \dots, n \text{ 且 } i \neq j \quad (17)$$

式中: $W_{M_iM_j}$ 为端点 M_i 、 M_j 间的线路长度计算值; $\tilde{d}_{M_iM_j}$

为端点 M_i 、 M_j 间的预设故障点距离。

比较式(15)、(16),建立线路端点的预设偏移矩阵 ΔD_M 为:

$$\Delta D_M = W_M - L_M \quad (18)$$

灰狼优化算法中的适应度函数应与预设故障点位置相关,可以用来反映预设故障点位置和行波波速与真实值间的契合程度。因此,定义适应度函数 f 为:

$$f = \sum_{i=1}^n \sqrt{\sum_{j=1}^n (\Delta D_{M_iM_j})^2} \quad (19)$$

根据上述分析可知,适应度函数值越小,预设故障点位置越接近真实值。因此,在灰狼优化算法的寻优过程中,适应度函数可以用来检验预设故障点位置的准确性,反映预设故障点位置与真实故障点位置的偏差程度。

2.1.1 预设故障点的选择

在预设故障点的选择方面,根据灰狼优化算法的寻优原理,先设置狼群的数量,建立相应的初始预设故障位置。利用初始预设故障位置计算对应的适应度函数值,根据函数值的大小获得狼 α 、 β 和 δ 的初始预设故障点位置。然后,通过迭代更新适应度函数值的大小,获得不同等级狼的新预设故障位置,从而寻找满足最小适应度函数值时的预设故障点位置。具体如下。

考虑到故障行波只能沿着线路传输的特性,预设故障点位置的寻优范围不再是整个平面空间,而是沿着线路拓扑进行变化。且预设故障点的位置包含了线路编号和线路长度信息,在利用灰狼优化算法求解预设偏移值的最小值时,若灰狼位置的更新只考虑线路长度,则可能导致寻优结果偏离实际值,无法识别故障支路。因此,预设故障点的选择如下:

$$(i, d_i \in [0, L_i]) \quad (20)$$

当狼群数量为 m 时,将所有狼群个体中适应度函数最小值对应的预设故障点位置赋予狼 α 的当前位置,即:

$$X_\alpha(t) = \operatorname{argmin} f(d_i) \quad i=1, 2, \dots, m \quad (21)$$

式中: $\operatorname{argmin} f(\cdot)$ 表示求函数 $f(\cdot)$ 最小值对应的变量值。

当狼群数量为 m ,且所有狼群个体中适应度函数最小值对应的狼编号为 z 时,将所有狼群个体中适应度函数次小值对应的预设故障点位置赋予狼 β ,即:

$$\begin{cases} X_\beta(t) = \operatorname{argmin} f(d_i) \\ \text{s.t. } i \neq z; i, z \in \{1, 2, \dots, m\} \end{cases} \quad (22)$$

当狼群数量为 m ,且所有狼群个体中适应度函数最小值和次小值对应的狼编号分别为 z 和 g 时,将所有狼群个体中适应度函数第三小值对应的预设故

障点位置赋予狼 δ ,即:

$$\begin{cases} X_{\delta}(t) = \operatorname{argmin} f(d_i) \\ \text{s.t. } i \neq z, g; i, z, g \in \{1, 2, \dots, m\} \end{cases} \quad (23)$$

利用附录A式(A3)—(A5)计算狼 α 、 β 、 δ 的系数向量,不断移动狼群的位置,从而计算新的适应度函数值。根据狼群新的适应度函数值,赋予狼 α 、 β 和 δ 新的位置,实现预设故障点位置和适应度函数值的更新。通过算法的循环迭代,实现故障点的精确定位。

2.1.2 不受线路参数影响的波速选择方法

行波波速的计算与线路参数有关,当不考虑行波波速的频率相关特性时,故障行波的传输速度可以通过线路参数计算获得^[18],但实际运行过程中线路参数的不确定性导致真实的行波波速可能与计算值间存在偏差。因此,本文在设置预设故障点位置的过程中,同时设置行波波速。此时,灰狼优化算法的适应度函数将由预设故障点位置 d_i 及其对应的预设行波波速 v_i 组成,即:

$$f(d_i, v_i) = \sum_{i=1}^n \sqrt{\sum_{j=1}^n (\Delta D_{M_i M_j})^2} \quad (24)$$

预设行波波速的约束为:

$$v_{\min} \leq v_i \leq v_{\max} \quad (25)$$

式中: $v_{\min}$ 和 $v_{\max}$ 分别为 v_i 的最小值和最大值。

由式(24)可知,适应度函数值随预设故障点位置和预设行波波速的变化而发生改变,当预设故障点位置和真实故障点位置重合,且预设行波波速与真实故障行波波速相等时,适应度函数值为0。

因此,在灰狼优化算法的寻优过程中,狼群的位置信息中含有预设故障点位置和预设行波波速两部分。当狼群的位置发生改变时,预设故障点位置和行波波速都将发生变化。如:当狼群数量为 m 时,将所有狼群个体中适应度函数最小值对应的预设故障点位置和行波波速赋予狼 α 的当前位置,见式(26)。

$$X_{\alpha}(t) = \operatorname{argmin} f(d_i, v_i) \quad i \in \{1, 2, \dots, m\} \quad (26)$$

同理,利用式(A3)—(A5)不断更新预设行波波速,使得预设行波波速逐步逼近真实行波波速。因此,在预设故障点位置向真实故障点位置逼近的同时,预设行波波速也向真实行波波速逼近,从而减少行波波速不确定性和线路参数变化对故障定位结果的影响。

2.1.3 混合线路的处理

配电网中存在大量电缆和架空线路相连的混合线路,而电缆和架空线路中的行波传输速度不同。因此,为了减少预设故障点位置构建的复杂性,本文对配电网中的电缆线路进行归一化处理^[10,21]。例如,对于长度为 L_{cable} 的电缆线路,当系统中电缆和架空线路的行波波速分别为 v_{cable} 和 v_{overhead} 时,利用归一

化处理后的电缆等效长度 L'_{cable} 为:

$$L'_{\text{cable}} = \frac{v_{\text{overhead}}}{v_{\text{cable}}} L_{\text{cable}} \quad (27)$$

同时,当故障定位结果与等效后的电缆线路有关时,故障定位结果需要将等效的部分进行换算处理,得到故障点的实际距离 d'_i ,即:

$$d'_i = (d_i - L_{\text{overhead}}) \frac{v_{\text{cable}}}{v_{\text{overhead}}} + L_{\text{overhead}} \quad (28)$$

式中: d_i 为归一化后的故障定位结果; L_{overhead} 为故障线路中的架空线路长度。

2.2 故障定位的流程

本文针对以预设故障点位置和行波波速为变量,线路端点总预设偏移值最小为目标的优化模型,利用灰狼优化算法求解端点总预设偏移值最小时的预设故障点位置和预设行波波速,实现故障点的精确定位,具体流程如下:

1)故障前,对配电网线路进行编号,对电缆线路进行归一化处理,同时,利用式(15)建立端点的线路固有长度矩阵;

2)发生故障后,采集初始故障行波达到线路各端的时间,设置预设故障点位置和预设故障行波波速的初始值;

3)利用式(24)计算优化模型的适应度值,选择当前适应度值相对较小的3匹狼的位置赋予编号 α 、 β 和 δ ;

4)利用附录A式(A3)—(A5)更新灰狼优化算法中狼 α 、 β 、 δ 的位置参数 A 和 B ;

5)判断算法是否达到迭代终止条件,如果达到终止条件,则结束搜索并将狼 α 作为最优解输出,否则返回步骤3)继续搜索。

3 仿真实验

建立如附录B图B1所示的10 kV配电网模型,在线路端点 M_1 — M_9 处安装行波采集装置。图中:蓝色虚线为电缆线路,黑色实线为架空线路,相同类型线路参数一致。电缆线路参数为: $Z=0.2142+j0.0703 \Omega/\text{km}$, $C=114.5 \text{ nF}/\text{km}$ 。架空线路参数为: $Z=0.09885+j0.2574 \Omega/\text{km}$, $C=13.92 \text{ nF}/\text{km}$ 。配电网中所有支路的编号和长度如图B1所示,采样频率为1 MHz。通过计算可得到 $v_{\text{cable}}=1.976 \times 10^5 \text{ km/s}$, $v_{\text{overhead}}=2.96 \times 10^5 \text{ km/s}$ 。因此,对电缆线路 L_6 和 L_{11} 进行归一化处理,其等效长度分别为1.798、2.996 km。狼群初始规模为50,最大迭代次数为300,预设故障行波波速的选择范围为 $[2.85 \times 10^5, 2.99 \times 10^5] \text{ km/s}$ 。

3.1 故障定位分析

当 M_1 与节点 T_1 间的支路 L_1 发生故障时,根据线路各端采集的故障行波达到时间,利用灰狼优化算

法求解故障模型。

根据狼群初始规模,随机设置50组预设故障位置 d_i 和故障行波波速 v_i ,计算每组对应的适应度函数值 f 。分别比较50组适应度函数值的大小,获得不同等级灰狼的故障位置和行波波速,利用式(A3)—(A5)不断更新灰狼的故障位置和行波波速,当适应度函数值最小时,狼 α 的预设故障位置为 L_1 ,距离端点 M_1 的距离为0.978 km,行波波速为 2.9542×10^5 km/s。因此,本文所提方法的故障定位结果为 L_1 ,故障支路判定准确,定位误差为22 m。同理,分别在线路 L_3 和 L_6 设置故障,故障定位结果如表1所示。表中: l_{af} 、 l_{mf} 分别为实际故障距离、本文方法所得故障距离。

表1 故障行波波速与故障定位结果

Table 1 Fault traveling wave velocity and location results

故障支路	参考端	l_{af}/km	行波波速 / ($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)	故障定位结果		误差 / m
				支路	l_{mf}/km	
L_1	M_1	1.0	2.9542×10^5	L_1	0.978	22
L_3	M_1	4.0	2.9744×10^5	L_3	4.045	45
L_6	M_1	2.5	2.9459×10^5	L_6	2.562	62

根据表1可知:本文所提方法能够有效辨识故障线路,获得故障行波的传输速度,具有较高的定位精度;由于受故障行波到达时间精度的影响,不同位置故障时所获得的行波传输速度可能存在差别。因此,相比于采用故障前计算获得的行波波速,本文所提方法在寻优过程中优化行波波速,减少实际波速与计算波速间误差的影响,提高故障定位精度。

3.1.1 支路故障

为进一步分析本文所提方法的可靠性,分别在线路的不同位置设置故障,同理可得故障定位结果如表2所示,表中 R_i 为过渡电阻。

表2 不同故障条件下的故障定位结果

Table 2 Fault location results for different fault conditions

故障支路	参考端	l_{af}/km	故障类型	R_i/Ω	故障定位结果		误差 / m
					支路	l_{mf}/km	
L_1	M_1	1.0	Ag	10	L_1	0.978	22
L_2	M_1	2.5	ABg	100	L_2	2.448	52
L_3	M_1	4.0	ACg	50	L_3	4.045	45
L_4	M_1	9.0	BC	100	L_4	9.031	31
L_5	M_1	10.9	BCg	100	L_5	10.971	71
L_6	M_1	2.5	Ag	200	L_6	2.562	62
L_7	M_1	3.5	Bg	400	L_7	3.473	27
L_8	M_1	5.7	BC	800	L_8	5.675	25
L_9	M_1	6.7	Cg	1000	L_9	6.635	65
L_{10}	M_1	8.0	Bg	1500	L_{10}	7.952	48
L_{11}	M_1	10.0	BCg	500	L_{11}	10.063	63
L_{12}	M_1	9.7	ABCg	100	L_{12}	9.718	18
L_{13}	M_1	11.2	AC	80	L_{13}	11.148	52
L_{14}	M_1	11.5	Cg	50	L_{14}	11.432	68
L_{15}	M_1	11.2	Bg	20	L_{15}	11.137	63

由表2可知,针对不同支路位置的不同类型故障,本文所提方法均能准确辨识故障位置。其中,最大定位误差为71 m,最小定位误差为18 m,平均定位误差为47.5 m,在误差允许的范围内,满足精确定位要求。因此,本文所提方法能够实现故障支路的有效判定和故障点的精确定位,并且故障定位结果对线路的故障类型和过渡电阻具有较好的鲁棒性。

3.1.2 分支节点故障

考虑线路分支节点故障对本文所提方法的影响,在配电网的不同分支节点处模拟不同类型的故障,故障定位结果如表3所示。

表3 不同分支节点故障定位结果

Table 3 Fault location results for different branch buses

故障节点	参考端	l_{af}/km	故障类型	R_i/Ω	故障定位结果		误差 / m
					支路	l_{mf}/km	
T_1	M_1	2.0	Ag	10	L_2	2.020	20
T_2	M_1	3.0	AB	50	L_2	3.000	0
T_3	M_1	6.0	ACg	500	L_4	6.000	0
T_4	M_1	10.2	Cg	1000	L_5	10.212	12
T_5	M_1	5.2	BC	100	L_7	5.200	0
T_6	M_1	8.5	ABCg	200	L_{11}	8.507	7
T_7	M_1	10.7	Bg	400	L_{14}	10.718	18

根据表3可知:当分支节点 T_1 处发生故障时,本文所提方法的故障定位结果为支路 L_2 ,计算获得的故障点与参考端 M_1 的距离为2.020 km,事实上,分支节点 T_1 属于支路 L_2 ,因此,故障点定位误差为20 m;当分支节点 T_2 处发生故障时,本文所提方法的故障定位结果为支路 L_2 ,计算获得的故障点与参考端 M_1 的距离为3.000 km,与 T_2 的位置一致,定位误差为0。

本文所提方法在预设故障点位置的选择过程中,通过支路编号进行搜寻,故障定位结果表现为故障点所在支路。由表3可知,本文所提方法能够有效定位分支节点所在支路,但在辨识分支节点方面存在一定的误差。因此,在实际运行过程中,当故障定位结果与分支节点距离较近时,工作人员可以沿故障定位结果向分支节点扩大故障点的寻找范围,以防故障点出现在分支节点处。

3.2 时间同步误差的影响

考虑行波采集终端间时间同步误差对本文所提方法的影响,分别模拟不同终端间的不同时间同步误差,对应的故障定位结果如附录B表B1所示。由表可知,当行波采集装置间存在时间同步误差时,本文所提方法能够准确定位故障线路,但故障定位精度下降。当端点 M_1 的行波采集装置时间同步误差为 $0.5 \mu\text{s}$ 时,本文所提方法的故障定位误差为48 m;当端点 M_1 、 M_2 的行波采集装置时间同步误差分别为 0.5 、 $-0.5 \mu\text{s}$ 时,本文所提方法的故障定位误差为105 m;当端点 M_1 的行波采集装置时间同步误差为 $1 \mu\text{s}$ 时,本文所提方法的故障定位误差为121 m。可

见,随着行波采集装置间时间同步误差的增大,故障定位误差增加。但目前行波采集装置通常配有全球定位系统同步授时装置,同步授时误差一般小于 $1\ \mu\text{s}$ ^[23]。因此,本文所提方法在一定的同步误差范围内,仍能够实现故障点的精确定位。

3.3 行波采集装置减少的影响

配电网分支线路较多,行波采集装置数量的减少可以提高经济性。因此,考虑行波采集装置减少对本文所提方法的影响。根据表2中故障点的位置和类型,在减少终端行波采集装置的情况下设置相同的故障,对应的故障定位结果如附录B表B2所示。由表可知,当行波采集装置减少时,本文所提方法将存在误判的情况。在支路末端 M_2 处的行波采集装置减少的情形下,当支路 L_1 和 L_4 发生故障时,本文所提方法仍能够实现故障点的精确定位,故障定位误差分别为 80、31 m;但当支路 L_6 发生故障时,本文所提方法将故障点位置误判在支路 L_2 处,故障定位误差为 646 m。

通过分析可知,当末端缺少有效行波采集装置的支路发生故障时,本文所提方法将出现误判,但当故障点出现在其他支路时,本文所提方法仍能准确定位故障点位置。因此,当故障点位于任意2个有效量测装置间的行波传输路径时,本文所提方法仍可以有效辨识故障位置。但为实现配电网所有故障线路的准确定位,本文所提方法至少需要在配电网各线路分支末端安装有效动作的行波采集装置。

3.4 不同故障定位方法的比较

为进一步分析本文方法的可靠性,将本文方法与文献[11]方法进行比较。根据表2中的故障位置与类型设置相同的故障,文献[11]的故障定位结果如附录B表B3所示。由表可知:在不同故障距离和不同故障类型的条件下,文献[11]所提方法能够准确判定故障支路和故障点的位置,最大、最小的故障定位误差分别为 164、35 m,平均故障定位误差为 93.1 m;而本文所提方法的平均故障定位误差为 47.5 m。因此相比于文献[11]所提方法,本文所提方法的误差更小、故障定位精度更高,能够进一步提高故障定位的准确度,缩短故障点的寻找时间。

3.5 线路参数不确定性的影响

故障行波的传输速度与线路参数相关,当不考虑行波波速的频率相关特性时,故障行波的传输速度可以由 $v=1/\sqrt{LC}$ 获得^[18]。其中, L 和 C 分别为线路的单位电感和单位电容。考虑到配电网运行过程中气象、环境等因素对线路的影响,线路电感、电容参数通常会发生变化,导致故障行波传输速度的计算值与实际值间存在偏差。另外,由于配电网线路的修建繁杂,一些老旧线路也可能存在参数不确定的现象。因此,本文通过利用行波波速的变化反映

线路电感、电容参数的不确定性。

为分析线路参数不确定性对不同故障定位方法的影响,基于图B1改变架空线路和电缆线路的参数值。此时,通过计算获得的架空线路行波传输速度 $v_{\text{overhead}}=2.98\times 10^5\ \text{km/s}$,电缆行波传输速度 $v_{\text{cable}}=1.81\times 10^5\ \text{km/s}$ 。但在故障定位的计算过程中仍采用线路参数变更前数据,不改变原模型中电缆线路 L_6 和 L_{11} 的归一化等效长度,其仍分别为 1.798、2.996 km。同理,根据表2中的故障位置与类型,在线路不同位置处设置对应的类型故障,故障定位结果见附录B表B4。由表可知,当线路参数具有一定的不确定性时,本文所提方法仍能准确辨识故障支路,定位故障点的位置。当支路 L_6 处发生故障时,故障定位误差为 96 m。当支路 L_3 处发生故障时,故障定位误差为 24 m。针对不同位置的不同类型故障,本文所提方法的平均故障定位误差为 53.7 m。相比于不考虑线路参数变化时的平均故障定位误差 47.5 m,在误差允许的范围内,故障定位精度变化不大。因此,本文所提方法在线路参数实际值与计算应用值存在一定误差时,仍能够实现故障线路的准确定位。

同理,在表B4的故障条件下,通过利用线路行波波速经验值和原始计算值反映线路参数不确定性导致行波波速计算值与实际值间的偏差,分析文献[11]所提方法在线路参数不确定时的故障定位结果。一般而言,架空线路行波波速的范围为光速 c 的 97%~99%^[24]。因此分别选取经验波速 $0.97c$ 、 $0.99c$ 以及原始计算波速,比较文献[11]与本文所提方法的故障定位效果,如图3所示。图中:情形1为文献[11]考虑线路参数变化时,故障行波波速为 $0.97c$ 的故障定位结果;情形2为文献[11]考虑线路参数变化时,故障行波波速为 $0.99c$ 的故障定位结果;情形3为文献[11]考虑线路参数变化时,故障行波波速为原始计算值的故障定位结果;情形4为本文所提方法考虑线路参数变化时的故障定位结果。

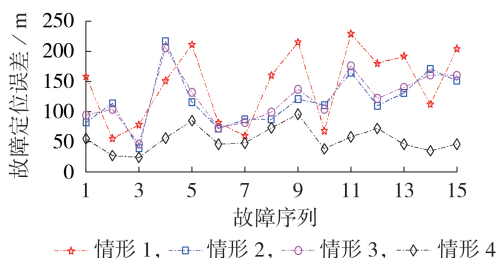


图3 不同情形下2种方法的故障定位误差

Fig.3 Fault location errors of two methods under different conditions

由图3可知:文献[11]所提方法在线路参数不确定性导致行波波速计算值与实际值存在偏差时虽仍可以准确辨识故障支路和故障点位置,但在不同的行波波速下,该方法的故障定位误差不同。其中,

计算波速、 $0.99c$ 、 $0.97c$ 下的平故障均定位误差分别为122.5、118.3、143.6 m。相比于不考虑线路参数变化时的平均故障定位误差93.1 m,随着行波波速计算值与真实值间的偏差变大,文献[11]所提方法的故障定位误差逐渐增加。

在不同位置的不同类型故障下,本文所提方法的故障定位误差均未超过文献[11]所提方法。因此,相比文献[11]所提方法,本文所提方法对线路参数变化和行波波速不确定性具有更好的鲁棒性,故障定位误差更小。

4 结论

为减少配电网线路参数变化对行波定位方法的影响,本文提出了一种考虑预设偏移值的故障定位方法,所得主要结论如下。

1)本文通过分析预设故障点与真实故障点的行波传输路径特性,建立线路端点的预设偏移值表征预设故障点与真实故障点间的位置关系;提出了以预设故障点位置与行波波速为变量,端点总预设偏移值最小为目标的优化模型,将配电网线路的故障定位转化为求解总预设偏移值最小的优化问题。

2)本文利用灰狼优化算法求解故障定位模型,提出了预设故障位置和行波波速的选择方法,可以减少行波波速不确定性对配电网故障定位的影响,实现故障点的精确定位。

3)仿真分析表明,本文所提方法能够有效辨识故障支路,实现故障点的精确定位;故障定位结果不易受线路参数变化、故障类型和位置的影响,并且在一定的时间同步误差内仍能实现故障点的准确定位;与已有方法相比,本文所提方法具有更好的故障定位效果。

为实现配电网所有故障线路的精确定位,本文所提方法需要在各线路末端安装行波采集装置。因此,在保证配电网线路全部可观的情况下,如何减少行波采集装置数量和提高线路高阻故障时定位方法的适用性将是未来继续研究的方向。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 杨睿,高红均,刘俊勇.基于有限PMU配置的配电网故障定位[J].电力自动化设备,2022,42(4):138-145.
YANG Rui,GAO Hongjun,LIU Junyong. Distribution network fault location based on limited PMU configuration[J]. Electric Power Automation Equipment,2022,42(4):138-145.
- [2] 高锋阳,李昭君,袁成,等.含特殊负荷的配电网故障定位与识别[J].电力自动化设备,2020,40(8):96-108.
GAO Fengyang,LI Zhaojun,YUAN Cheng,et al. Fault location and identification for distribution network with special loads[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(8):96-108.
- [3] 郑涛,潘玉美,郭昆亚,等.基于节点阻抗矩阵的配电网故障测距算法[J].电网技术,2013,37(11):3233-3240.
ZHENG Tao,PAN Yumei,GUO Kunya,et al. A nodal impedance matrix based fault location algorithm for distribution network[J]. Power System Technology,2013,37(11):3233-3240.
- [4] 戴志辉,王旭.基于改进阻抗法的有源配电网故障测距算法[J].电网技术,2017,41(6):2027-2034.
DAI Zhihui,WANG Xu. Impedance method based fault location algorithm for active distribution system[J]. Power System Technology,2017,41(6):2027-2034.
- [5] 王鹏伟,徐丙垠,陈恒,等.基于波形比较的架空配电线路故障离线定位自动计算方法[J].电力自动化设备,2021,41(6):73-97.
WANG Pengwei,XU Bingyin,CHEN Heng,et al. Automatic calculation method for off-line fault location of overhead distribution line based on waveform comparison[J]. Electric Power Automation Equipment,2021,41(6):73-97.
- [6] DASHTI R,SADEH J. Fault section estimation in power distribution network using impedance-based fault distance calculation and frequency spectrum analysis[J]. IET Generation, Transmission & Distribution,2014,8(8):1406-1417.
- [7] 张颖,周初,钟凯.改进蚁群算法在复杂配电网故障区段定位中的应用[J].电网技术,2011,35(1):224-228.
ZHANG Ying,ZHOU Ren,ZHONG Kai. Application of improved ant colony algorithm in fault-section location of complex distribution network[J]. Power System Technology,2011,35(1):224-228.
- [8] MAJIDI M,ETEZADI-AMOIL M,FADALI M S. A novel method for single and simultaneous fault location in distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2015,30(6):3368-3376.
- [9] JAMALI S,BAHMANYAR A,RANJBAR S. Hybrid classifier for fault location in active distribution networks[J]. Protection and Control of Modern Power Systems,2020,5(2):84-92.
- [10] 谢李为,李勇,罗隆福,等.基于距离矩阵与分支系数的配电网故障定位方法[J].中国电机工程学报,2020,40(7):2180-2191,2397.
XIE Liwei,LI Yong,LUO Longfu,et al. Fault location method for distribution networks based on distance matrix and branch coefficient[J]. Proceedings of the CSEE,2020,40(07):2180-2191,2397.
- [11] 邓丰,李欣然,曾祥君,等.基于多端故障行波时差的含分布式电源配电网故障定位新方法[J].中国电机工程学报,2018,38(15):4399-4409,4640.
DENG Feng,LI Xinran,ZENG Xiangjun,et al. A novel multi-terminal fault location method based on traveling wave time difference for radial distribution systems with distributed generators[J]. Proceedings of the CSEE,2018,38(15):4399-4409,4640.
- [12] SALEHI M,NAMDARI F. Fault location on branched networks using mathematical morphology[J]. IET Generation, Transmission & Distribution,2018,12(1):207-216.
- [13] 夏翔翔,李泽文,雷柳,等.基于动态虚拟故障的行波网络定位新方法[J].中国电机工程学报,2021,41(14):4868-4878.
XIA Yixiang,LI Zewen,LEI Liu,et al. A new method of traveling wave network location based on dynamic virtual fault[J]. Proceedings of the CSEE,2021,41(14):4868-4878.
- [14] 张健磊,高湛军,王志远,等.基于有限 μ PMU的主动配电网故障定位方法[J].电网技术,2020,44(7):2722-2731.
ZHANG Jianlei,GAO Zhanjun,WANG Zhiyuan,et al. Fault location method for active distribution based on finite μ PMU[J]. Power System Technology,2020,44(7):2722-2731.

- [15] 王成斌, 负志皓, 张恒旭, 等. 基于微型PMU的配电网多分支架空线路参数无关故障定位算法[J]. 电网技术, 2019, 43(9): 3202-3211.
WANG Chengbin, YUN Zhihao, ZHANG Hengxu, et al. Parameter-free fault location algorithm for multi-terminal overhead transmission line of distribution network based on μ MPMU[J]. Power System Technology, 2019, 43(9): 3202-3211.
- [16] 张永健, 胥杰, 孙嘉. 基于静态小波变换的T型输电线路行波测距方法[J]. 电网技术, 2012, 36(6): 84-88.
ZHANG Yongjian, XU Jie, SUN Jia. Travelling wave fault location for three-terminal transmission line based on static wavelet transform[J]. Power System Technology, 2012, 36(6): 84-88.
- [17] 梁睿, 靳征, 王崇林, 等. 行波时频复合分析的配电网故障定位研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(28): 130-136, 20.
LIANG Rui, JIN Zheng, WANG Chonglin, et al. Research of fault location in distribution networks based on integration of travelling wave time and frequency analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(28): 130-136, 20.
- [18] 谢李为, 李勇, 罗隆福, 等. 基于极点对称分解的多分支线路故障定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(21): 7326-7339.
XIE Liwei, LI Yong, LUO Longfu, et al. Fault location method for multi-branch lines based on extreme-point symmetric mode decomposition[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(21): 7326-7339.
- [19] 束洪春, 刘佳露, 田鑫萃. 基于故障行波沿线突变和模型匹配的辐射状配电网故障定位[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(9): 158-163.
SHU Hongchun, LIU Jialu, TIAN Xincui. Fault location of radial distribution network based on sudden changes of fault traveling wave along line and model matching[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(9): 158-163.
- [20] 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.
- [21] 刘晓琴, 王大志, 江雪晨, 等. 利用行波到达时差关系的配电网故障定位算法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(14): 4109-4115, 4290.
LIU Xiaoqin, WANG Dazhi, JIANG Xuechen, et al. Fault location algorithm for distribution power network based on relationship in time difference of arrival of traveling wave[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(14): 4109-4115, 4290.
- [22] MIRJALILI S, MIRJALILI S M, LEWIS A. Grey wolf optimizer[J]. Advances in Engineering Software, 2014, 69(3): 46-61.
- [23] 徐丙垠, 李京, 陈平, 等. 现代行波测距技术及其应用[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(23): 62-65.
XU Bingyin, LI Jing, CHEN Ping, et al. Modern fault location techniques based on fault generated traveling waves and their applications[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(23): 62-65.
- [24] COSTA F B, LOPES F V, SILVA K M, et al. Mathematical development of the sampling frequency effects for improving the two-terminal traveling wave-based fault location[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 115: 105502.

作者简介:



谢李为

谢李为(1993—),男,博士研究生,主要研究方向为电力系统保护与控制(E-mail: fengxlv@qq.com);

李勇(1982—),男,教授,博士生导师,通信作者,主要研究方向为智能配电网控制与保护、电力系统优化与控制(E-mail: yongli@hnu.edu.cn)。

(编辑 任思思)

Fault location method considering preset offset value for distribution network with multi-branch

XIE Liwei^{1,2}, LI Yong¹, LUO Longfu¹, ZENG Xiangjun², YU Kun², HOU Liang³, CAO Yijia¹

(1. School of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology,

Changsha 410114, China; 3. CYG SUNRI Co., Ltd., Shenzhen 518057, China)

Abstract: To reduce the impact of line parameters changes on fault location of distribution network, a fault location method based on preset offset value is proposed. By analyzing the propagation characteristics of fault traveling wave in distribution network, the preset offset value of the line terminal is defined via considering the relationship between the preset fault position and the real fault position. Then an optimization model with the minimum preset offset value as its object is established, where the preset fault position and traveling wave velocity are variables. Further, according to the gray wolf optimization algorithm, the principle of solving the minimum preset fault location is analyzed. The selection method of the preset fault position and the preset traveling wave velocity are proposed to reduce the influence of uncertainty of traveling wave velocity on fault location of distribution network and achieve the accurate fault location. Simulative results show that the proposed method can effectively identify the fault branches and accurately locate faults. The location results are not easily affected by the uncertainty of line parameters, thus effectively improving the accuracy of fault location in distribution network.

Key words: distribution network; fault location; traveling wave method; preset offset value; gray wolf optimization algorithm

附录 A

灰狼优化算法是一种通过模拟灰狼群体捕食过程而建立的启发式算法^[22]，通过利用灰狼群体中不同等级灰狼在面对猎物时的寻猎、围猎和捕猎特性，将灰狼群体分为 α 、 β 、 δ 和 γ 4 种具有不同等级的狼。其中， α 狼表示狼群中等级最高的狼，负责整个狼群的领导； β 狼表示狼群中等级次高的狼，协助 α 狼的行动； δ 狼表示狼群中等级低于 β 狼的狼，主要负责侦查、放哨等任务； γ 狼表示狼群中等级最低的狼，它的行动服从前面三层等级狼的安排，通过不断迭代 α 、 β 、 δ 狼的位置更新 γ 狼的位置。四种不同等级的狼分别对应优化求解过程中的最优解、次优解、第三优解和候选解。在寻优过程中，灰狼群体的位置更新过程如下：

$$P = |AX_c(t) - X(t)| \quad (A1)$$

$$X(t+1) = X_c(t) - BP \quad (A2)$$

式中： P 为灰狼与猎物之间的距离； $X_c(t)$ 为猎物的当前位置； $X(t)$ 为灰狼的位置； A 和 B 为位置变化系数，分别用于调整灰狼群体的大小和猎物的位置。

$$A = 2r_1 \quad (A3)$$

$$B = 2a(r_1 - 1) \quad (A4)$$

$$a = 2(1 - \frac{t}{t_{\max}}) \quad (A5)$$

式中： r_1 和 r_2 为随机调整变量，其取值范围为[0, 1]； a 为线性缩减因子，其取值范围为[0, 2]； t 为当前迭代次数； $t_{\max}$ 为最大迭代次数。

在算法迭代过程中，通过更新狼 α 、 β 、 δ 的位置调整其与狼 γ 之间的相对距离，逐渐向最优解逼近，不同等级灰狼的位置更新过程如下：

$$\begin{cases} P_\alpha = |A_\alpha X_\alpha(t) - X(t)| \\ P_\beta = |A_\beta X_\beta(t) - X(t)| \\ P_\delta = |A_\delta X_\delta(t) - X(t)| \end{cases} \quad (A6)$$

$$\begin{cases} X_\alpha = X_\alpha(t) - B_\alpha P_\alpha \\ X_\beta = X_\beta(t) - B_\beta P_\beta \\ X_\delta = X_\delta(t) - B_\delta P_\delta \end{cases} \quad (A7)$$

$$X(t+1) = (X_\alpha + X_\beta + X_\delta) / 3 \quad (A8)$$

式中： $X_\alpha(t)$ 、 $X_\beta(t)$ 、 $X_\delta(t)$ 分别为在第 t 次迭代时狼 α 、 β 、 δ 的位置； $X(t)$ 为在第 t 次迭代时 γ 狼的位置； A_α 、 B_α 、 A_β 、 B_β 、 A_δ 、 B_δ 分别为狼 α 、 β 、 δ 的系数向量，由式 (A3) — 式 (A5) 计算获得； X_α 、 X_β 、 X_δ 分别为在第 t 次迭代后 α 、 β 、 δ 狼的位置， $X(t+1)$ 表示在第 $t+1$ 次迭代时 γ 狼的位置。通过算法的不断迭代，得到满足目标函数时的故障位置。

附录 B

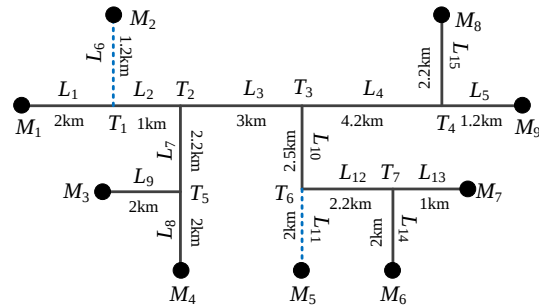


图 B1 10kV 多支配电网

Fig.B1 10 kV distribution network with multi-branch

表 B1 不同时间同步误差下的故障定位结果

Table B1 Location results with different time synchronization errors

支路	误差终端	同步误差/ μs	定位结果	故障距离/km	误差/m
L ₁	M ₁	0.5	L ₁	1.048	48
L ₁	M ₁ /M ₂	0.5/-0.5	L ₁	1.105	105
L ₁	M ₁	1	L ₁	1.121	121
L ₁	M ₁ /M ₂	1/1	L ₁	1.059	59
L ₁	M ₁ /M ₈	1/-1	L ₁	1.108	108
L ₁	M ₂ /M ₇ /M ₉	1/1/1	L ₁	0.883	117
L ₃	M ₂	2	L ₃	4.141	141
L ₇	M ₁ /M ₅ /M ₉	2/2/2	L ₇	3.604	104

表 B2 行波采集装置减少情况下的故障定位结果

Table B2 Fault location results with fewer traveling wave recorders

支路	参考端	装置减少终端	定位结果	故障距离/km	误差/m
L ₁	M ₁	M ₂	L ₁	0.920	80
L ₄	M ₁	M ₂	L ₄	9.031	31
L ₆	M ₁	M ₂	L ₂	2.146	646
L ₃	M ₁	M ₂ /M ₆	L ₃	4.019	19
L ₁₀	M ₁	M ₂ /M ₆	L ₁₀	7.915	85
L ₁₄	M ₁	M ₂ /M ₆	L ₁₂	9.882	1618

表 B3 文献[11]的故障定位结果

Table B3 Fault location results of Reference [11]

支路	参考端	故障位置/km	故障类型	过渡电阻/ Ω	定位结果	故障距离/km	误差/m
L ₁	M ₁	1	Ag	10	L ₁	0.965	35
L ₂	M ₁	2.5	ABg	100	L ₂	2.417	83
L ₃	M ₁	4	ACg	50	L ₃	4.105	105
L ₄	M ₁	9	BCg	100	L ₄	9.058	58
L ₅	M ₁	10.9	BCg	100	L ₅	11.064	164
L ₆	M ₁	2.5	ABCg	200	L ₆	2.624	124
L ₇	M ₁	3.5	Bg	400	L ₇	3.434	66
L ₈	M ₁	5.7	BC	800	L ₈	5.638	62
L ₉	M ₁	6.7	Cg	1000	L ₉	6.582	118
L ₁₀	M ₁	8	Bg	1500	L ₁₀	7.857	143
L ₁₁	M ₁	10	BCg	500	L ₁₁	9.923	77
L ₁₂	M ₁	9.7	ABCg	100	L ₁₂	9.652	48
L ₁₃	M ₁	11.2	AC	80	L ₁₃	11.133	67
L ₁₄	M ₁	11.5	Cg	50	L ₁₄	11.661	161
L ₁₅	M ₁	11.2	Bg	20	L ₁₅	11.114	86

表 B4 不同支路故障定位结果
Table B4 Location results for different faults

支路	参考端	故障位置/km	故障类型	R_t/Ω	定位结果	故障距离/km	误差/m
L ₁	M ₁	1	Ag	10	L ₁	1.055	55
L ₂	M ₁	2.5	ABg	100	L ₂	2.473	27
L ₃	M ₁	4	ACg	50	L ₃	3.976	24
L ₄	M ₁	9	BC	100	L ₄	9.056	56
L ₅	M ₁	10.9	BCg	100	L ₅	10.815	85
L ₆	M ₁	2.5	Ag	200	L ₆	2.454	46
L ₇	M ₁	3.5	Bg	400	L ₇	3.548	48
L ₈	M ₁	5.7	BC	800	L ₈	5.627	73
L ₉	M ₁	6.7	Cg	1000	L ₉	6.604	96
L ₁₀	M ₁	8	Bg	1500	L ₁₀	7.962	38
L ₁₁	M ₁	10	BCg	500	L ₁₁	9.942	58
L ₁₂	M ₁	9.7	ABCg	100	L ₁₂	9.628	72
L ₁₃	M ₁	11.2	AC	80	L ₁₃	11.154	46
L ₁₄	M ₁	11.5	Cg	50	L ₁₄	11.465	35
L ₁₅	M ₁	11.2	Bg	20	L ₁₅	11.154	46