

利用数据融合技术提升输电线路 故障定位精度的新方法

焦在滨¹, 吴润东¹, 王钊¹, 刘团¹, 雷响¹, 郑永康², 宋国兵¹

- (1. 陕西省智能电网重点实验室(西安交通大学电气工程学院), 陕西省 西安市 710049;
2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川省 成都市 610072)

A Novel Method to Improve the Fault Location Accuracy in Transmission Line Based on Data Fusion Technology

JIAO Zaibin¹, WU Rundong¹, WANG Zhao¹, LIU Tuan¹, LEI Xiang¹, ZHENG Yongkang², SONG Guobing¹

- (1. Shaanxi Key Laboratory of Smart Grid (School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University), Xi'an 710049, Shaanxi Province, China; 2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610072, Sichuan Province, China)

ABSTRACT: Fast and accurate fault location in transmission lines is important for the security of power system. Nowadays, different fault location algorithms are widely used in substations of power system. As fault location results of these algorithms are inconsistent, operators cannot analyze the conflicting results quickly and precisely, which influences fast restoration of fault. In this paper, based on multi-sources data fusion technology, a novel method to improve the fault location accuracy was proposed by using the fault location results from distance relays installed in two ends of transmission line. The method derived the fault location results and electrical signals from distance relays and fault recorders. Data fusion of weighting coefficient was used to fuse the two fault location results via analytical derivation in order to get a higher accuracy result. The proposed method was verified through EMTDC simulation and field data. The results show that the method can improve the fault location accuracy based on available information in substations. The method does not require extra equipment investment and is not affected by data asynchronization, fault resistance, load current and fault inception angle. It is proved to be economical and practical.

KEY WORDS: transmission line; fault location; distance relays; data fusion; location accuracy; weighting coefficient; economical

摘要: 输电线路故障的快速准确定位对于电力系统的安全运行具有重要的意义。目前,不同的故障定位原理被广泛地应用于电力系统的变电站中,由于其在故障后所给出的故障位

置并不一致,运维检修人员对相互冲突的测距结果无所适从,影响了故障的快速恢复。该文利用输电线路两端变电站中距离继电器的测距结果,基于多源数据融合技术,提出一种提升输电线路故障定位精度的新方法,该方法利用线路两端距离继电器的测距结果和故障录波装置中的电气量数据,采用加权系数的数据融合方法,通过解析求解,对两端距离继电器的测距结果进行数据融合来获得一个精度更高的定位结果。电磁暂态仿真和现场录波数据验证了所提出方法的有效性,结果表明,该方法能够基于变电站现有信息提高故障定位精度,无需额外的设备投资,无需数据同步,不受过渡电阻、负荷电流和故障初始角度的影响,具有良好的经济性和实用性。

关键词: 输电线路;故障定位;距离继电器;数据融合;定位精度;加权系数;经济性

0 引言

长距离输电线路故障的快速准确定位对于减轻巡线负担,快速恢复故障,保障电力系统的安全运行具有重大意义^[1]。目前,在电力系统故障后,运维检修人员可得到继电保护装置、故障录波装置等来源于不同渠道的故障位置信息。但是由于这些故障定位结果缺乏一致性且往往相互冲突,非但不能提高巡线及故障恢复的速度,反而需要花费大量的时间和精力进行信息的分析与甄别。诸如行波测距装置等专门的故障定位设备,虽然精度较高,但一方面需要额外投资专门的一次传感器,另一方面行波测距结果往往依靠人工对数据进行分析和处理,效率并不能满足现代电网故障快速定位的要

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFB0900603)。

The National Key Research and Development Program of China (2016YFB0900603).

求。实际上，输电线路两端变电站距离继电器得到的测距结果之间存在冗余性，且往往具有冲突性，通过数据融合技术获得精度更高的输电线路故障定位结果，具有重要的研究意义和研究价值。

目前的故障测距算法按照原理可以分为故障分析法和行波法两大类。故障分析法包括阻抗法、解复数方程法、解微分方程法和电压法。阻抗法是利用故障后测得的电压电流计算距离阻抗及故障距离，该方法受过渡电阻影响较大^[2-3]；解复数方程法是建立电压电流的复数方程，通过迭代计算或解一元二次方程求解^[4-5]；解微分方程法是根据电压电流满足的微分方程，在时域内求解故障位置，通常会假设故障点电流和测量端电流故障分量同相位^[6-8]；电压法则是根据电压沿线路分布特征求出故障位置^[9]。行波法是通过测量观测点和故障点之间行波传播的时间来计算故障距离^[10-12]。同时，小波变换、人工神经网络、模糊理论等智能算法在故障测距中也有一定的研究^[13-15]，但依据智能算法的故障测距方法，在工程应用中的可靠性还有待进一步的研究检验。根据算法使用到的电气量，故障测距又分为单端测距法和双端测距法。单端测距法只使用单端电气量，可以避免数据同步的问题，但存在原理性误差^[16]；双端测距法可以消除原理性误差，但部分双端算法对同步性的要求较高^[17]。

本文提出一种利用数据融合技术提升输电线路故障定位精度的新方法。该方法首先建立两端距离继电器测距结果的加权系数融合模型，推导出融合系数的数学表达式，分析表明融合系数与故障支路电流有关。在此基础上，推导了集中参数模型和分布参数模型下故障支路电流的计算公式，并给出不同故障类型下故障支路电流和融合系数的数学表达式。最后，逐一计算线路全长所有位置的数据融合结果与当前计算位置的差值，发现真实故障位置处此差值最小，由此确定真实故障位置。电磁暂态仿真和现场录波数据验证了新方法的有效性，结果表明，该方法不受过渡电阻、负荷电流和故障初始角度的影响，不要求双端数据的同步，无需额外设备投资，具有良好的精度，能有效地提升输电线路故障恢复的效率，具有良好的应用前景。

1 基于数据融合技术测距算法的基本思想

输电线路故障后，两端变电站的距离保护会分别独立地给出测距结果，基于数据融合技术的基本思想，利用相互冲突的故障定位结果，能够有效地

提高定位精度。

首先，数据融合采用加权系数融合的方法，加权系数的数据融合是对多源信息进行融合最简单的方法，融合模型为^[18]

$$Y = \sum_{k=1}^n r_k x_k, \quad 0 \leq r_k \leq 1 \quad (1)$$

式中： x_k 表示各信息源的测量结果； r_k 表示各信息源的加权系数； Y 表示融合后的结果； x_1 、 x_2 分别表示线路 m 端和 n 端的测距结果； x^* 表示故障发生的真实位置； Δx_1 、 Δx_2 分别表示线路两端的测距误差项。其关系表示为

$$\begin{cases} x_1 = x^* + \Delta x_1 \\ x_2 = x^* + \Delta x_2 \end{cases} \quad (2)$$

定义融合系数 α 和 β ，测距融合公式为

$$x_{\text{fusion}} = \alpha x_1 + \beta x_2 \quad (3)$$

希望融合后的测距结果 x_{fusion} 等于真实故障位置 x^* ，即 $x^* = x_{\text{fusion}}$ ，代入式(2)、(3)，则融合系数 α 和 β 满足关系式为

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ \Delta x_1 & \Delta x_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

求解式(4)，得到融合系数 α 和 β 的表达式为

$$\begin{cases} \alpha = \frac{1}{1 - \Delta x_1 / \Delta x_2} \\ \beta = \frac{1}{1 - \Delta x_2 / \Delta x_1} \end{cases} \quad (5)$$

由于距离继电器在高压、超高压线路中广泛使用，所以选择距离继电器的测距结果作为两端数据融合的融合源。因而，本文基于距离继电器的测距结果来推导测距误差项 Δx_1 、 Δx_2 的计算公式。

图1表示集中参数模型下线路内部故障时的单相电路图，其中， \dot{E}_m 、 \dot{E}_n 表示线路两端的等效电源， Z_{ms} 、 Z_{ns} 表示线路两端的等效系统阻抗， \dot{U}_m 、 \dot{U}_n 表示线路两端的测量电压， \dot{I}_m 、 \dot{I}_n 表示线路两端的测量电流， \dot{I}_f 表示故障支路电流， R_f 表示故障支路的过渡电阻， z 表示线路单位长度阻抗， x 表示故障位置 F 点与 m 端的距离， L 表示线路全长。

以 m 端为例，测量阻抗表达式为

$$Z_m = \frac{\dot{U}_m}{\dot{I}_m} = zx + \frac{\dot{I}_f}{\dot{I}_m} R_f \quad (6)$$

等式两端同时取虚部，并除以单位长度电抗，即可得到测距表达式为

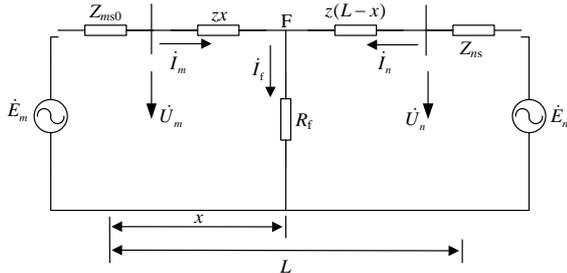


图 1 单相线路故障电路图

Fig. 1 Circuit diagram of fault in single-phase line

$$x_{meas} = \frac{\text{Im}(Z_m)}{\text{Im}(z)} = x + \frac{\text{Im}[(\dot{I}_f / \dot{I}_m)R_f]}{\text{Im}(z)} \quad (7)$$

则测距误差表达式为

$$\Delta x = \frac{\text{Im}[(\dot{I}_f / \dot{I}_m)R_f]}{\text{Im}(z)} \quad (8)$$

经过渡电阻接地故障， $R_f \neq 0$ ，并且故障支路电流 \dot{I}_f 与两端电流 $\dot{I}_i (i=m, n)$ 存在相角差，所以测距误差项不为零，且测距结果与真实故障位置之间呈非线性。由式(8)，分别得到两端距离继电器测距结果的误差表达式 Δx_1 、 Δx_2 ，代入式(5)得：

$$\begin{cases} \alpha = \frac{1}{1 - \frac{\text{Im}(\dot{I}_{fm} / \dot{I}_m)}{-\text{Im}(\dot{I}_{fn} / \dot{I}_n)}} \\ \beta = \frac{1}{1 - \frac{-\text{Im}(\dot{I}_{fn} / \dot{I}_n)}{\text{Im}(\dot{I}_{fm} / \dot{I}_m)}} \end{cases} \quad (9)$$

式中 \dot{I}_{fm} 、 \dot{I}_{fn} 分别表示从线路 m 端和 n 端计算得到的故障支路电流。由于过渡电阻 R_f 是纯电阻，数学表达上即为实数，因而可以在计算中消去实数 R_f ，从而在理论上消除过渡电阻对测距结果的影响。

同时，即使 m 端和 n 端电气量测量不同步，也不会对融合系数的计算造成影响。证明如下，令 φ 为两端电气量的不同步角度。

$$\alpha = \frac{1}{1 - \frac{\text{Im}(\dot{I}_{fm} / \dot{I}_m)}{\text{Im}[(\dot{I}_{fn} e^{i\varphi}) / (\dot{I}_n e^{i\varphi})]}} = \frac{1}{1 - \frac{\text{Im}(\dot{I}_{fm} / \dot{I}_m)}{\text{Im}(\dot{I}_{fn} / \dot{I}_n)}} \quad (10)$$

由于分别从两端计算各自的测距误差，没有涉及到两端电气量幅值或相角的直接比较和计算，因而不会受到两端数据测量不同步的影响。

2 利用数据融合技术提升故障定位精度的算法

分析式(9)对融合系数 α 和 β 的计算关键在于故障支路电流的计算。本节分别在集中参数模型和分布参数模型下计算故障支路电流，并给出不同故障

类型下统一的融合表达式及算法实现过程。

2.1 集中参数模型融合系数的计算

以 A 相接地故障为例，说明单相接地故障融合系数的计算过程。单相接地故障的零序电路如图 2 所示， z_0 、 z_1 分别表示线路单位长度零序阻抗和正序阻抗， Z_{ms0} 、 Z_{ns0} 分别表示两端零序系统阻抗， \dot{I}_{m0} 、 \dot{I}_{n0} 分别表示两端零序电流。故障支路零序电流 \dot{I}_{f0} 与 \dot{I}_{m0} 、 \dot{I}_{n0} 之间满足如下关系：

$$\dot{I}_{f0} = \frac{\dot{I}_{m0}}{C_{m0}} = \frac{\dot{I}_{n0}}{C_{n0}} \quad (11)$$

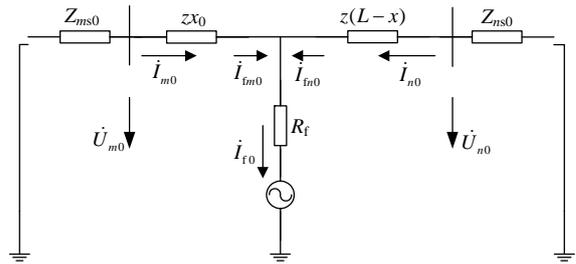


图 2 线路零序电路图

Fig. 2 Circuit diagram of zero sequence in three-phase line

式中 C_{m0} 、 C_{n0} 分别表示两端零序电流分配系数。

$$\begin{cases} C_{m0} = \frac{Z_{ns0} + z_0(L-x)}{Z_{ms0} + Z_{ns0} + z_0L} \\ C_{n0} = \frac{Z_{ms0} + z_0x}{Z_{ms0} + Z_{ns0} + z_0L} \end{cases} \quad (12)$$

结合单相接地故障的边界条件： $\dot{I}_{fA} = 3\dot{I}_{f0}$ ，故障支路相电流表达式如下：

$$\begin{cases} \dot{I}_{fm} = 3\dot{I}_{m0} / C_{m0} \\ \dot{I}_{fn} = 3\dot{I}_{n0} / C_{n0} \end{cases} \quad (13)$$

式(13)代入到式(9)，即可得到集中参数模型下的融合系数，计算数据融合结果。负序电路融合系数的计算与零序电路相同，这里不再赘述。

2.2 分布参数模型融合系数的计算

同样以 A 相接地故障为例，说明分布参数模型下融合系数的计算过程。图 2 的分布参数方程表示成式(14)， \dot{U}_{f0} 表示故障位置处零序电压， \dot{I}_{fm0} 、 \dot{I}_{fn0} 分别表示两端流入故障支路的零序电流， \dot{U}_{m0} 、 \dot{I}_{m0} 分别表示 m 端零序电压电流。

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{f0} \\ \dot{I}_{fm0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_0 x) & -z_{c0} \sinh(\gamma_0 x) \\ -\frac{\sinh(\gamma_0 x)}{z_{c0}} & \cosh(\gamma_0 x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_{m0} \\ \dot{I}_{m0} \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中，零序传播系数 $\gamma_0 = \sqrt{z_0 y_0}$ ，零序波阻抗 $z_{c0} = \sqrt{z_0 / y_0}$ ，对背侧系统阻抗有关系式：

$$\dot{U}_{m0} = -\dot{I}_{m0}Z_{ms0} \quad (15)$$

由式(14)、(15)，推出故障点电压和 m 端流入故障支路电流之间的关系：

$$\frac{\dot{U}_{f0}}{\dot{I}_{fm0}} = \frac{-\cosh(\gamma_0 x)Z_{ms0} - \sinh(\gamma_0 x)z_{c0}}{\frac{\sinh(\gamma_0 x)}{z_{c0}}Z_{ms0} + \cosh(\gamma_0 x)} = A_{m0} \quad (16)$$

同理，可以得到故障点电压和 n 端流入故障支路电流之间的关系：

$$\frac{\dot{U}_{f0}}{\dot{I}_{fn0}} = \frac{-\cosh[\gamma_0(L-x)]Z_{ns0} - \sinh[\gamma_0(L-x)]z_{c0}}{\frac{\sinh[\gamma_0(L-x)]}{z_{c0}}Z_{ns0} + \cosh[\gamma_0(L-x)]} = A_{n0} \quad (17)$$

故障支路电流由两端流入电流组成， $\dot{I}_{f0} = \dot{I}_{fm0} + \dot{I}_{fn0}$ ，联立此式与式(16)、(17)。故障支路电流和两侧流入故障支路电流之间的表达式用两侧系统阻抗、线路参数和故障位置表示如下：

$$\frac{\dot{I}_{f0}}{\dot{I}_{fm0}} = \frac{A_{m0} + A_{n0}}{A_{n0}} \quad (18)$$

由式(14)和式(18)，分别用测量端零序电压、零序电流表示出故障支路零序电流。

$$\dot{I}_{f0-m} = \left[-\frac{\sinh(\gamma_0 x)}{z_{c0}} \dot{U}_{m0} + \cosh(\gamma_0 x) \dot{I}_{m0} \right] \cdot \frac{A_{m0} + A_{n0}}{A_{n0}} = f_m(\dot{U}_{m0}, \dot{I}_{m0}, x) \quad (19)$$

$$\dot{I}_{f0-n} = \left\{ -\frac{\sinh[\gamma_0(L-x)]}{z_{c0}} \dot{U}_{n0} + \cosh[\gamma_0(L-x)] \dot{I}_{n0} \right\} \frac{A_{m0} + A_{n0}}{A_{m0}} = f_n(\dot{U}_{n0}, \dot{I}_{n0}, x) \quad (20)$$

结合边界条件，得到故障支路相电流：

$$\begin{cases} \dot{I}_{fm} = 3\dot{I}_{f0-m} \\ \dot{I}_{fn} = 3\dot{I}_{f0-n} \end{cases} \quad (21)$$

式(21)代入式(9)，得到分布参数模型下的融合系数，计算数据融合结果。负序电路融合系数的计算与零序电路相同，这里不再赘述。

2.3 不同故障类型下的融合系数

利用对称分量法和不同故障类型下的边界条件，分别给出不同故障类型下的故障支路电流和融合系数，并写成统一的表达式。

对称分量法中，变换因子 $\alpha = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$ ，
 $\alpha^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$ ，相序变换公式为

$$\begin{bmatrix} \dot{F}_a \\ \dot{F}_b \\ \dot{F}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \alpha^2 & \alpha & 1 \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{F}_{a(1)} \\ \dot{F}_{a(2)} \\ \dot{F}_{a(0)} \end{bmatrix} \quad (22)$$

集中参数模型下，故障支路相电流表示为

$$\begin{cases} \dot{I}_{fm} = a\dot{I}_{m2}/C_{m2} + b\dot{I}_{m0}/C_{m0} \\ \dot{I}_{fn} = a\dot{I}_{n2}/C_{n2} + b\dot{I}_{n0}/C_{n0} \end{cases} \quad (23)$$

分布参数模型下， \dot{I}_{f2-m} 、 \dot{I}_{f2-n} 表示从两端推出的故障支路负序电流， \dot{I}_{f0-m} 、 \dot{I}_{f0-n} 表示从两端推出的故障支路零序电流，故障支路相电流表示为

$$\begin{cases} \dot{I}_{fm} = a\dot{I}_{f2-m} + b\dot{I}_{f0-m} \\ \dot{I}_{fn} = a\dot{I}_{f2-n} + b\dot{I}_{f0-n} \end{cases} \quad (24)$$

融合系数为

$$\begin{cases} \alpha = \frac{1}{1 - \frac{\text{Im}(\dot{I}_{fm}/\dot{I}_m)}{-\text{Im}(\dot{I}_{fn}/\dot{I}_n)}} \\ \beta = \frac{1}{1 - \frac{-\text{Im}(\dot{I}_{fn}/\dot{I}_n)}{\text{Im}(\dot{I}_{fm}/\dot{I}_m)}} \end{cases} \quad (25)$$

式中参数 a 、 b 、 \dot{I}_m 、 \dot{I}_n 整理成表 1 所示。 k 表示零序电流补偿系数，定义为 $k = (z_0 - z_1) / 3z_1$ 。

表 1 数据融合公式参数

| 故障类型 | a | b | \dot{I}_m | \dot{I}_n |
|------|------------------------|-----------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Ag | 0 | 3 | $\dot{I}_{mA} + k3\dot{I}_{m0}$ | $\dot{I}_{nA} + k3\dot{I}_{n0}$ |
| Bg | 0 | 3 | $\dot{I}_{mB} + k3\dot{I}_{m0}$ | $\dot{I}_{nB} + k3\dot{I}_{n0}$ |
| Cg | 0 | 3 | $\dot{I}_{mC} + k3\dot{I}_{m0}$ | $\dot{I}_{nC} + k3\dot{I}_{n0}$ |
| BC | $2(\alpha - \alpha^2)$ | 0 | \dot{I}_{mBC} | \dot{I}_{nBC} |
| CA | $2(\alpha^2 - 1)$ | 0 | \dot{I}_{mCA} | \dot{I}_{nCA} |
| AB | $2(1 - \alpha)$ | 0 | \dot{I}_{mAB} | \dot{I}_{nAB} |
| BCg | $2(\alpha - \alpha^2)$ | $(\alpha - \alpha^2)$ | \dot{I}_{mBC} | \dot{I}_{nBC} |
| CAG | $2(\alpha^2 - 1)$ | $(\alpha - \alpha^2)$ | \dot{I}_{mCA} | \dot{I}_{nCA} |
| ABg | $2(1 - \alpha)$ | $(\alpha - \alpha^2)$ | \dot{I}_{mAB} | \dot{I}_{nAB} |

三相故障的融合过程，需采用故障分量网络的电气量来计算故障支路电流，与负序、零序电路下的计算过程相似，这里不再赘述。

2.4 全线搜索法确定故障位置

根据第 1 节和第 2 节的分析，融合系数 α 、 β 是与故障位置 x 有关的变量，但是故障位置 x 是未知的，所以本文采用全线搜索的方法来确定真实故障位置。测距算法的融合公式和融合误差分别表示成式(26)、(27)：

$$x_{\text{fusion}}(x) = \alpha(x)x_1 + \beta(x)x_2 \quad (26)$$

$$E(x) = |x_{\text{fusion}}(x) - x| \quad (27)$$

对线路全长所有位置计算融合结果以及融合误差 $E(x)$ ，在真实故障位置处融合误差近似等于零，并且真实故障位置是融合误差的唯一极小值点，如图 3 所示。图 3 中，3 条曲线分别表示 3 种故障场景下的融合误差曲线，红色虚线对应 A 相接地，故障位置 0.1，绿色实线对应 BC 两相短路，故障位置 0.5，蓝色点划线对应三相短路接地，故障位置 0.9。因此，全线搜索法确定融合结果的判据是：满足 $E(x) < \varepsilon$ 的 $E(x)$ 极小值点 x_f 即为真实故障位置， ε 是个无穷小量，搜索步长根据需要满足的误差精度来确定。算法的流程图如图 4 所示。

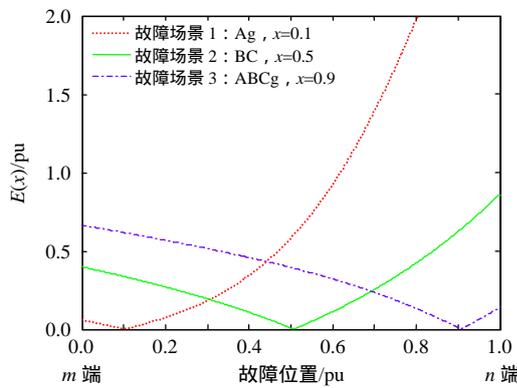


图 3 $E(x)$ 曲线 ($R_f=200\Omega$)

Fig. 3 Figure of $E(x)$ ($R_f=200\Omega$)

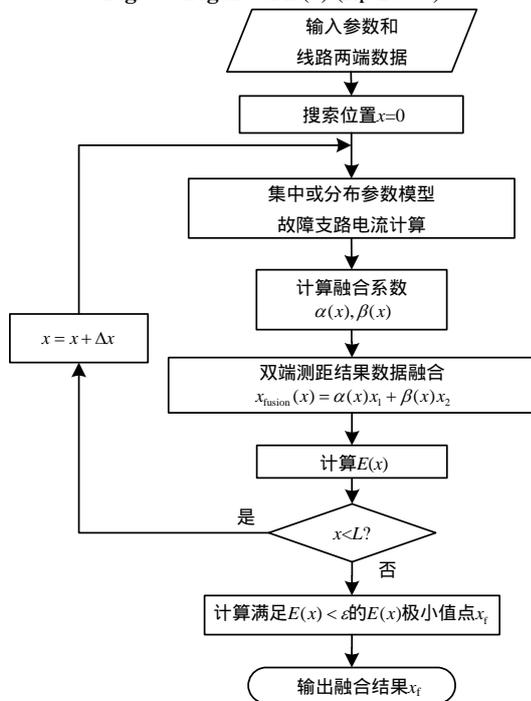


图 4 算法流程图

Fig. 4 Flow chart of algorithm

3 仿真验证

针对本文提出的利用数据融合技术提升故障

定位精度的新方法，采用 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真软件进行验证。仿真案例中，分别给出距离继电器和数据融合方法的测距结果和误差，故障类型设为 A 相接地故障、BC 相间短路、BC 相间短路接地和三相短路接地故障。采用 Matlab 软件进行数据处理，采样频率为 2kHz，利用全周傅氏算法提取工频相量，各单端距离继电器的测距结果采用文中式(7)所述算法计算，电压电流取全量进行计算。故障位置和测距结果用故障距离占线路全长的比例表示，测距误差定义为

$$\text{测距误差}(\%) = \left| \frac{\text{测距位置} - \text{真实位置}}{\text{线路长度}} \right| \times 100\% \quad (28)$$

在 500kV 电压等级的输电线路上进行仿真验证^[19]。线路长度 $L=100\text{km}$ ， m 端电源： $\dot{E}_m = 1.05 \angle 0^\circ$ ， n 端电源： $\dot{E}_n = 1.0 \angle (-30^\circ)$ 。

线路正序参数为 $R_1=0.021\Omega/\text{km}$ ， $L_1=0.898\text{mH}/\text{km}$ ， $C_1=0.0129\mu\text{F}/\text{km}$ ；线路零序参数为 $R_0=0.115\Omega/\text{km}$ ， $L_0=2.288\text{mH}/\text{km}$ ， $C_0=0.0052\mu\text{F}/\text{km}$ ； m 端系统参数为 $R_{ms1}=1.0515\Omega$ ， $L_{ms1}=137.43\text{mH}$ ， $R_{ms0}=0.6\Omega$ ， $L_{ms0}=92.6\text{mH}$ ； n 端系统参数为 $R_{ns1}=26\Omega$ ， $L_{ns1}=142.98\text{mH}$ ， $R_{ns0}=20\Omega$ ， $L_{ns0}=119.27\text{mH}$ ；故障过渡电阻最大设为 $R_f=200\Omega$ 。

表 2 为不同故障类型、不同过渡电阻、不同故障位置下的距离继电器和数据融合测距结果。表 3 为分布参数模型数据融合的测距误差比较。

由表 2 可见，当存在过渡电阻时，各单端距离继电器测距结果的误差普遍偏大，并且在高阻故障下，测距结果完全不准确，甚至偏离线路全长，无法实现故障的准确定位。基于数据融合技术的方法，相比于各单端距离继电器的测距结果，测距精度显著提升。根据仿真结果统计，所有故障类型下，单端距离继电器测距结果的平均误差为 33.4636%，集中参数模型数据融合算法的平均误差为 0.8008%，分布参数模型数据融合算法的平均误差为 0.2181%，均明显提升了距离继电器的测距结果。仿真结果表明，新方法不受故障类型与过渡电阻的影响，具有良好的性能。

表 4 是集中参数和分布参数模型数据融合结果的比较。在线路两端即近区故障下，分布参数和集中参数模型测距误差比较接近，在线路中间位置故障，分布参数模型测距误差更小。说明在线路近区故障或线路长度较短时，集中参数模型的数据融合算法具有较好的适用性，线路较长时分布参数模型

表2 数据融合仿真结果

Tab. 2 Simulation results of data fusion

| 故障类型 | 故障位置 | 过渡电阻/ Ω | 距离继电器 | | 数据融合 | |
|------|------|----------------|--------|---------|--------|--------|
| | | | m 端结果 | n 端结果 | 集中参数 | 分布参数 |
| Ag | 0.3 | 10 | 0.305 | 0.231 | 0.3002 | 0.3000 |
| | | 200 | 0.036 | -9.123 | 0.3032 | 0.3010 |
| | 0.5 | 10 | 0.505 | 0.452 | 0.5006 | 0.5003 |
| | | 200 | 0.141 | -23.417 | 0.5039 | 0.5002 |
| | 0.7 | 10 | 0.710 | 0.667 | 0.7012 | 0.7009 |
| | | 200 | 0.236 | -45.206 | 0.7041 | 0.6996 |
| BC | 0.3 | 10 | 0.261 | 0.195 | 0.3048 | 0.3011 |
| | | 200 | -0.303 | -3.170 | 0.3068 | 0.3027 |
| | 0.5 | 10 | 0.459 | 0.425 | 0.5080 | 0.5015 |
| | | 200 | -0.200 | -4.413 | 0.5077 | 0.5006 |
| | 0.7 | 10 | 0.660 | 0.649 | 0.7210 | 0.7047 |
| | | 200 | -0.100 | -6.120 | 0.7082 | 0.6990 |
| BCg | 0.3 | 10 | 0.261 | 0.195 | 0.3039 | 0.3010 |
| | | 200 | -0.303 | -3.172 | 0.3092 | 0.3047 |
| | 0.5 | 10 | 0.459 | 0.425 | 0.5065 | 0.5015 |
| | | 200 | -0.199 | -4.415 | 0.5085 | 0.5008 |
| | 0.7 | 10 | 0.660 | 0.649 | 0.7167 | 0.7045 |
| | | 200 | -0.100 | -6.124 | 0.7080 | 0.6986 |
| ABCg | 0.3 | 10 | 0.261 | 0.195 | 0.3048 | 0.3011 |
| | | 200 | -0.303 | -3.172 | 0.3067 | 0.3026 |
| | 0.5 | 10 | 0.459 | 0.425 | 0.5080 | 0.5015 |
| | | 200 | -0.199 | -4.415 | 0.5075 | 0.5005 |
| | 0.7 | 10 | 0.660 | 0.649 | 0.7211 | 0.7047 |
| | | 200 | -0.100 | -6.124 | 0.7080 | 0.6988 |

表3 融合测距误差比较

Tab. 3 Contrast of fusion location error

| 故障位置 | 过渡电阻/ Ω | Ag/% | BC/% | BCg/% | ABCg/% |
|------|----------------|--------|--------|--------|--------|
| 0.3 | 10 | 0.0000 | 0.1058 | 0.1034 | 0.1054 |
| | 200 | 0.1006 | 0.2749 | 0.4693 | 0.2648 |
| 0.5 | 10 | 0.0337 | 0.1506 | 0.1455 | 0.1501 |
| | 200 | 0.0225 | 0.0614 | 0.0782 | 0.0489 |
| 0.7 | 10 | 0.0870 | 0.4674 | 0.4454 | 0.4659 |
| | 200 | 0.0412 | 0.1045 | 0.1381 | 0.1175 |

表4 数据融合结果比较(故障类型: Ag)

Tab. 4 Contrast of data fusion results (fault type: Ag)

| 故障位置 | 过渡电阻/ Ω | 集中参数模型 | | 分布参数模型 | |
|------|----------------|--------|--------|--------|--------|
| | | 融合结果 | 测距误差/% | 融合结果 | 测距误差/% |
| 0.1 | 10 | 0.0999 | 0.0079 | 0.0998 | 0.0171 |
| | 200 | 0.1024 | 0.2386 | 0.1020 | 0.1982 |
| 0.5 | 10 | 0.5006 | 0.0613 | 0.5003 | 0.0337 |
| | 200 | 0.5039 | 0.3921 | 0.5002 | 0.0225 |
| 0.9 | 10 | 0.9014 | 0.1381 | 0.9012 | 0.1245 |
| | 200 | 0.9035 | 0.3493 | 0.8993 | 0.0743 |

的数据融合算法精度更高。表5为分布参数模型考虑两端数据不同步情况下的部分仿真结果,仿真中假设两端电气量不同步角度为 $\varphi=90^\circ$ 。

表5 数据不同步的融合结果(故障类型: Ag)

Tab. 5 Results of unsynchronized data (fault type: Ag)

| 故障位置 | 过渡电阻/ Ω | 数据同步 | | 数据不同步 | |
|------|----------------|--------|----------|--------|----------|
| | | 融合结果 | 测距误差/% | 融合结果 | 测距误差/% |
| 0.2 | 10 | 0.1999 | 0.009759 | 0.1999 | 0.009756 |
| | 200 | 0.2014 | 0.143075 | 0.2014 | 0.143090 |
| 0.5 | 10 | 0.5003 | 0.033667 | 0.5003 | 0.033665 |
| | 200 | 0.5002 | 0.022490 | 0.5002 | 0.022486 |
| 0.8 | 10 | 0.8011 | 0.112502 | 0.8011 | 0.112486 |
| | 200 | 0.7994 | 0.062615 | 0.7994 | 0.062606 |

表6为分布参数模型考虑不同负荷大小下的部分仿真结果,仿真中假设两端系统电源的相角差 δ 依次为 -10° 、 -20° 、 -30° 。

表6 不同电源相角差的融合结果(故障类型: Ag)

Tab. 6 Results of various source angle difference (fault type: Ag)

| 故障位置 | 过渡电阻/ Ω | $\delta=-10^\circ$ | $\delta=-20^\circ$ | $\delta=-30^\circ$ |
|------|----------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | | 融合结果 | 融合结果 | 融合结果 |
| 0.2 | 10 | 0.2023 | 0.1988 | 0.1999 |
| | 200 | 0.1996 | 0.2003 | 0.2014 |
| 0.5 | 10 | 0.4976 | 0.4998 | 0.5003 |
| | 200 | 0.4999 | 0.5000 | 0.5002 |
| 0.8 | 10 | 0.7991 | 0.8000 | 0.8011 |
| | 200 | 0.8008 | 0.8000 | 0.7994 |

表7是分布参数模型考虑故障初始角度的部分仿真结果,仿真中分别对不同故障初始角度Inc进行验证,Inc依次为 0° 、 36° 、 72° 、 108° 、 144° 和 180° 。

表5到表7的仿真结果可以验证,在两端数据不同步、不同负荷大小以及不同故障初始角度下,基于数据融合技术的测距新方法都具有良好的定位精度,测距结果不受多个因素的影响。

表7 不同故障初始角度的融合结果

Tab. 7 Results of various fault inception angle

| 故障位置 | 故障类型 | 过渡电阻/ Ω | 融合结果 | | |
|------|------|----------------|-----------------|------------------|------------------|
| | | | Inc= 36° | Inc= 108° | Inc= 180° |
| 0.15 | Ag | 73 | 0.1501 | 0.1501 | 0.1501 |
| | BCg | 42 | 0.1509 | 0.1509 | 0.1509 |
| 0.55 | Ag | 73 | 0.5503 | 0.5503 | 0.5503 |
| | BCg | 42 | 0.5506 | 0.5506 | 0.5506 |
| 0.85 | Ag | 73 | 0.8508 | 0.8508 | 0.8508 |
| | BCg | 42 | 0.8512 | 0.8512 | 0.8512 |

以下采用现场录波数据对所提出的测距新方法进行仿真验证。数据来源于2015年7月27日某220kV电压等级的输电线路C相永久性接地故障的录波文件。该线路长度为34.2km，结合故障录波数据对测距结果进行数据融合，结果如表8所示，所有测距结果均为距 m 侧变电站的距离。

表8 某220kV输电线路测距结果

Tab. 8 Location results of a 220kV transmission line

| 故障位置 | 算法 | 测距结果/km | 测距误差/% |
|-------|----------|---------|--------|
| 8.4km | m 侧变电站 | 8.300 | 0.29 |
| | n 侧变电站 | 8.766 | 1.07 |
| | 融合结果 | 8.413 | 0.0386 |

m 侧变电站距离继电器的测距结果为8.3 km， n 侧变电站距离继电器的测距结果为25.434 km(距 m 侧变电站距离为8.766km)，两端变电站得到的测距结果之和不为线路全长，测距结果之间相互冲突。融合后获得的结果定位精度相比于各单端测距结果有所提高，运维检修人员可以不再为多个测距结果的选择而无所适从，通过数据融合获得一个精度更高的定位结果来确定真实故障位置，降低了巡线难度，缩短了故障恢复时间。

由电磁暂态仿真和录波数据验证的结果均证明，本文提出的利用数据融合技术提升输电线路故障定位精度的新方法，显著提升了线路故障定位的精度，测距结果不受过渡电阻、负荷电流和故障初始角度的影响，且无需两端数据的同步。有效解决了现场对多个冲突的测距结果无所适从的问题。

4 结论

本文针对不同变电站获得的故障定位结果相互冲突，运维检修人员对距离继电器的多个测距结果无法抉择的问题，提出一种利用数据融合技术提升输电线路故障定位精度的新方法。该方法对两端距离继电器的测距结果，进行加权系数融合，得到一个精度更高的结果。理论分析和仿真实验表明，利用数据融合技术的测距新方法具有以下特点：

- 1) 新方法利用两端电气量，对两端距离继电器的测距结果进行数据融合，得到一个精度更高的定位结果，方便运维检修人员对故障位置的确定；
- 2) 与单端距离继电器的测距结果相比，新方法不受过渡电阻大小、负荷电流和故障初始角度的影响，可以显著提升高阻接地故障下的定位精度；
- 3) 相比于部分双端测距算法，新方法不需要两端数据的严格同步，且对采样精度要求低；

4) 相比于行波测距，新方法无需再装设额外设备，硬件投资小，具有更好的经济性和实用性。

参考文献

- [1] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2007: 256-335.
Ge Yaoshong. New types of protective relaying and fault location their theory and techniques[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2007: 256-335(in Chinese).
- [2] 王宾, 董新洲, 薄志谦, 等. 特高压长线路单端阻抗法单相接地故障测距[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(14): 25-29.
Wang Bin, Dong Xinzhou, Bo Zhiqian, et al. An impedance fault location algorithm for UHV long transmission lines with single-line-to-ground faults [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(14): 25-29(in Chinese).
- [3] 李斌, 李永丽, 贺家李, 等. 特高压长线路电容电流对距离保护的影响[J]. 天津大学学报, 2006, 39(增刊): 83-87.
Li Bin, Li Yongli, He Jiali, et al. Influence of capacitive current on distance protection of UHV long transmission line[J]. Journal of Tianjin University, 2006, 39(S): 83-87(in Chinese).
- [4] 杨铨, 索南加乐, 李亚利. 基于R-L模型的单相重合闸线路故障测距方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(10): 71-75.
Yang Cheng, SuonanJiale, Li Yali. Study on the fault location algorithm based on r-l model for transmission lines with single-pole reclosure[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(10): 71-75(in Chinese).
- [5] JanIzykowski, Eugeniusz R, Przemyslaw B, et al. Accurate noniterative fault-location algorithm utilizing two-end unsynchronized measurements[J]. IEEE Trans .on Power Delivery, 2011, 26(2): 547-555.
- [6] 索南加乐, 齐军, 陈福锋, 等. 基于R-L模型参数辨识的输电线路准确故障测距算法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 119-125.
Suonan Jiale, Qi Jun, Chen Fufeng, et al. An accurate fault location algorithm for transmission lines based on R-L model parameter identification[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12): 119-125(in Chinese).
- [7] 宋国兵, 穆国强, 崔琪, 等. 基于RL模型的双回线单端时域法故障定位[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(20): 34-38, 42.
Song Guobing, Mu Guoqiang, Cui Qi, et al. Time domain fault location of parallel transmission lines based on RL model[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(20): 34-38, 42(in Chinese).
- [8] 索南加乐, 王增超, 康小宁, 等. 基于线性微分方程参

- 数识别的单端准确故障测距算法[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(12): 9-14, 20.
- Suonan Jiale, Wang Zengchao, Kang Xiaoning, et al. Accurate fault location algorithm based on parameter identification of linear differential equation with single end data[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(12): 9-14, 20(in Chinese).
- [9] 林富洪, 曾惠敏. 基于分布参数模型的高压输电线路单相接地故障单端测距方法[J]. 电网技术, 2011, 35(4): 201-205.
- Lin Fuhong, Zeng Huimin. One-terminal fault location of single-phase to earth fault based on distributed parameter model of HV transmission line[J]. Power System Technology, 2011, 35(4): 201-205(in Chinese).
- [10] 林圣, 何正友, 陈鉴, 等. 基于行波时频特征的单端故障测距方法[J]. 电网技术, 2012, 36(1): 258-264.
- Lin Sheng, He Zhengyou, Chen Jian, et al. A single terminal fault location method based on time-frequency characteristic of travelling wave[J]. Power System Technology, 2012, 36(1): 258-264(in Chinese).
- [11] 张峰, 梁军, 李建超, 等. 基于初始反极性行波检测的单端故障测距算法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(4): 108-113.
- Zhang Feng, Liang Jun, Li Jianchao, et al. Single ended fault location algorithm based on detection of initial reverse polarity traveling wave[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(4): 108-113(in Chinese).
- [12] Lopes F V, Silva K M, Costa F B, et al. Real-time travelling-wave-based fault location using two-terminal unsynchronized data[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2015, 30(3): 1067-1076.
- [13] 周鑫, 吕飞鹏, 吴飞, 等. 基于小波变换的 T 型线路故障测距新算法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(2): 8-11, 33.
- Zhou Xin, Lü Feipeng, Wu Fei, et al. A new fault method for T-connection transmission lines based on wavelet transform[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(2): 8-11, 33 (in Chinese).
- [14] 束洪春, 邬乾晋, 张广斌, 等. 基于神经网络的单端行波故障测距方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(4): 85-92.
- Shu Hongchun, Wu Qianjin, Zhang Guangbin, et al. Single terminal traveling wave fault location method based on ANN[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(4): 85-92 (in Chinese).
- [15] 鲁文, 徐晨亮, 丁孝华, 等. 一种考虑分布电容的模糊故障测距算法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(8): 57-60.
- Lu Wen, Xu Chenliang, Ding Xiaohua, et al. Fuzzy algorithm for fault location with the distributed capacitor taken into account[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(8): 57-60 (in Chinese).
- [16] Mohammad F, Javad S. Accurate single-phase fault-location method for transmission lines based on K-nearest neighbor algorithm using one-end voltage[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(4): 2360-2367.
- [17] 索南加乐, 许文宣, 何世恩, 等. 基于双端电气量的串补输电线路故障测距算法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 157-164.
- Suonan Jiale, Xu Wenxuan, He Shien, et al. A fault location algorithm for series compensated lines based on two-end information[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(19): 157-164(in Chinese).
- [18] 曾祥君, Li K K, Chan W L, 等. 信息融合技术在电力系统故障检测中的应用探讨[J]. 中国电力, 2003, 36(4): 8-12.
- Zeng Xiangjun, Li K K, Chan W L, et al. Discussion on application of information fusion techniques in electric power system fault detection[J]. Electric Power, 2003, 36(4): 8-12(in Chinese).
- [19] 索南加乐, 王增超, 张健康, 等. 基于参数识别的高阻接地距离保护算法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(31): 173-178.
- SuonanJiale, Wang Zengchao, Zhang Jiankang, et al. A novel distance protection algorithm for high resistance grounding faults based on parameter identification [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(31): 173-178(in Chinese).



焦在滨

收稿日期: 2016-09-19。

作者简介:

焦在滨(1976), 男, 工学博士, 副教授, 研究方向为电力系统继电保护、故障测距、新能源等, jiaozai bin@mail.xjtu.edu.cn;

吴润东(1991), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统故障测距、继电保护、智能变电站等, xjtu wrd@stu.xjtu.edu.cn。

(编辑 李蕊)

A Novel Method to Improve the Fault Location Accuracy in Transmission Line Based on Data Fusion Technology

JIAO Zaibin¹, WU Rundong¹, WANG Zhao¹, LIU Tuan¹, LEI Xiang¹, ZHENG Yongkang², SONG Guobing¹

(1. Xi'an Jiaotong University; 2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute)

KEY WORDS: transmission line; fault location; distance relays; data fusion; location accuracy; weighting coefficient; economical

Accurate fault location is significant for the security of power system. After fault occurs in transmission line, operators can get fault location results and information from multi sources. However, operators have to spend lots of time and energy to analyze the information due to the conflict of the fault location results, which influences the location accuracy and quick restoration of fault.

In order to address the problem, a novel method was proposed to improve the fault location accuracy in transmission line based on data fusion technology. The data fusion model was firstly established using fault location results from two ends of line. Then the fault current formula was developed based on the lumped and distributed parameter model. The final fusion result was obtained through the search method of the whole line.

The weighting coefficient data fusion technology was used to establish the data fusion model as formula (1). The variables of x_1 and x_2 were the fault location results. The coefficients of α and β were used to fuse the results. Based on analytical derivation, the coefficients were expressed by current phasors in formula (2).

$$x_{\text{fusion}} = \alpha x_1 + \beta x_2 \tag{1}$$

$$\begin{cases} \alpha = \frac{1}{1 - \frac{\text{Im}(\dot{I}_{fm} / \dot{I}_m)}{-\text{Im}(\dot{I}_{fn} / \dot{I}_n)}} \\ \beta = \frac{1}{1 - \frac{-\text{Im}(\dot{I}_{fn} / \dot{I}_n)}{\text{Im}(\dot{I}_{fm} / \dot{I}_m)}} \end{cases} \tag{2}$$

The key to obtain the coefficients was to calculate the current phasors. The current phasors of \dot{I}_m and \dot{I}_n were known. The fault current phasors of \dot{I}_{fm} and \dot{I}_{fn} were developed according to circuit relations in the lumped and distributed parameter model respectively.

Finally, the search method of the whole line was utilized to determine the fusion location result. The fusion error was defined as formula (3).

$$E(x) = |x_{\text{fusion}}(x) - x| \tag{3}$$

The true fault location corresponded to the minimum value of fusion error $E(x)$. The curves in Fig. 1

were the fusion error figures of three fault scenarios respectively. The method was verified by EMTDC simulation and field data. The results were shown in Tab. 1 and Tab. 2.

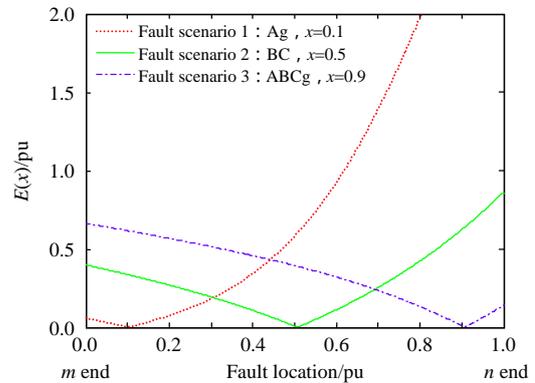


Fig. 1 Figure of $E(x)$ ($R_f=200\Omega$)

Tab. 1 Simulation results of data fusion

| Fault type | Fault location | Fault resistance/ Ω | Distance relays | | Data fusion | |
|------------|----------------|----------------------------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------------|
| | | | m end results | n end results | Lumped parameter | Distributed parameter |
| Ag | 0.5 | 200 | 0.141 | -23.417 | 0.5039 | 0.5002 |
| BC | 0.3 | 10 | 0.261 | 0.195 | 0.3048 | 0.3011 |
| BCg | 0.7 | 200 | -0.100 | -6.124 | 0.7080 | 0.6986 |
| ABCg | 0.3 | 10 | 0.261 | 0.195 | 0.3048 | 0.3011 |

Tab. 2 Results of field data from a 220 kV transmission line

| Items | True fault location | m end substation | n end substation | Data fusion |
|------------------|---------------------|--------------------|--------------------|-------------|
| | Location results/km | 8.4 | 8.300 | 8.766 |
| Location error/% | 0 | 0.29 | 1.07 | 0.0386 |

The simulation results show that, compared to the original results from two ends, the accuracy of fusion results is improved by data fusion technology. Abundant simulations verify the new method is not affected by fault resistances, fault types, load current, fault inception angles and data asynchronization. The results of field data prove the validity of the new method further in reality.

In conclusion, as fault location results from multi sources are conflicting, a novel method is proposed to improve the location accuracy based on data fusion. It helps operators to determine the true fault location fast, which promotes the efficiency of fault restoration.