

考虑金属护层结构的电缆新型 故障测距方法研究

张俊, 夏能弘, 王节, 袁志鹏

(上海电力大学电气工程学院, 上海 200090)

摘要:单芯电力电缆的很多绝缘故障都和金属护层有关, 只研究电缆导芯的简化结构模型不能进行护层相关故障的测距。基于分布参数模型, 提出一种考虑电缆金属护层的新型故障测距方法。首先, 使用分布参数理论分析计及金属护层的故障电缆等效分布参数电路, 建立电压、电流方程; 然后, 通过边界条件求解电压、电流方程中的未知参数, 得到故障点前、后的电压、电流值; 最后, 通过构建测距方程迭代搜索得到故障距离。该方法将复杂的相网络转化为相互独立的序列网络, 使得该算法变得简单有效。大量仿真结果表明, 该算法能实现护层相关故障(护层对地故障、芯—护层故障和芯—护层对地故障)的精确测距, 测距误差基本不超过 1.5%, 且定位结果不受故障发生位置、故障类型以及过渡电阻的影响。

关键词:单芯电力电缆; 金属护层; 分布参数模型; 序列网络; 故障测距

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.05.014 中图分类号:TM77 文章编号:1673-9140(2022)05-0124-09

Research on a new fault location method for cable considering metal sheath structure

ZHANG Jun, XIA Nenghong, WANG Jie, YUAN Zhipeng

(College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: Many faults of single core cables are related to metal sheath. The simplified model that only considers the core cannot realize the sheath-related fault location. This paper proposes a novel fault location method considering the metal sheath of the cable basing on the distributed parameter model. First, based on the distribution parameter theory, the equivalent distribution parameter circuit of the fault cable of considering the metal sheath is analyzed, the voltage and current equations are established; then, the unknown parameters in the voltage and current equations are solved through boundary conditions, the voltage and the current value of both sides of the fault point are obtained; finally, the fault distance is obtained by iterative search of the ranging equation. The proposed method transforms the complex phase network into mutually independent sequence network, which makes the algorithm simple and effective. A large number of simulation results show that this algorithm can achieve the accurate distance measurement of sheath-related faults (sheath-to-ground faults, core-sheath faults, and core-sheath-to-ground faults), and the ranging error is within 1.5%. The results are not affected by the fault location, fault type and the transition resistance.

Key words: single core cable; metal sheath; distributed parameter model; sequence network; fault location

收稿日期:2020-09-06; 修回日期:2020-11-23

基金项目:国家自然科学基金青年基金(51607110)

通信作者:夏能弘(1982—),男,博士,副教授,主要从事配电网电力电缆故障检测与诊断研究;E-mail:xia_nh@shiep.edu.cn

相比于架空线路,地下电缆由于其占地面积小和对环境友好的特点,在配电网中所占的比例越来越大^[1]。然而,电缆大多埋于地下,各种类型的地下施工以及不规范的电缆敷设施工导致电缆故障的情况越来越多,多以单相故障出现,约占配电网电缆总故障次数的 80%^[2-4]。考虑到地下复杂的环境因素,单芯电缆会用一层金属绕在缆芯周围作为保护,所以电缆发生绝缘故障时与其金属护层密不可分,包括芯—护层故障,护层对地故障和芯—护层对地故障,因此,研究电力电缆护层相关的故障,对于提高系统运行的可靠性具有很大的现实意义。

现有在线定位的方法是利用采样得到的电压和电流来确定故障点。目前,提出了 2 种主要的在线方法:行波法和阻抗法^[5-10]。行波法是向待测电缆中注入脉冲信号,并根据暂态行波在发射端与故障点来回一次的时间进行故障测距的方法,但行波法也有一些难以解决的技术问题,比如高阻故障时行波信号微弱导致无法检测,对波速度依赖性强和易受干扰波形影响等不足^[11-12]。阻抗法因其受干扰影响小、可靠性高,受到了不少研究者的关注,此方法多以线路集中参数建立模型,但当线路较长时,故障电阻较大时就不再适用了,而用线路分布参数建立模型,能够很好地解决此问题^[13]。

就现有的故障电缆定位方法而言,大多数都只以电缆的缆芯结构进行建模。文献[14]基于行波法利用小波奇异性检测理论来估计多端老化的电缆系统的故障位置,并没有考虑电缆护层结构;文献[15]仅利用护层环流来进行电缆的故障检测。以上方法均不能进行金属护层相关故障的定位。然而,大量的电缆绝缘故障几乎都与金属护层有关,因此,研究者开始意识到金属护层的重要性,并将其考虑到故障电缆的建模中。文献[16]利用电磁感应理论推导出了电缆缆芯与护层之间互感的解析解,验证了电缆缆芯与其护层是相互影响的;文献[17]通过金属护层参数轨迹图,实现了故障电缆的在线检测;文献[18]通过在缆芯—护层和护层—地之间引入故障电阻,建立故障测距方程实现故障测距,但并没有分析相与相之间的相互作用,影响测距结果;文献[19]考虑了三相电缆的缆芯和金属护层之间的影响,但是需要对故障电阻进行建

模,易受过渡电阻的影响,从而影响测距精度,本文利用非故障相故障点处的电气量能很好地解决此问题;文献[20]虽然考虑了电缆的金属护层结构,但是以估计的方法获取始端的电气量,显然会影响定位精度;文献[21]对文献[20]进行了改进,直接使用测量获得的始端电气量进行定位计算,进一步提高了测距精度,但是由于三相电缆相与相之间存在相互作用,参数矩阵复杂,使其推导出来的电压、电流矩阵方程计算量很大。

本文针对三相平衡的配网电缆系统,用分布参数理论来分析考虑金属护层的单相接地故障的电缆模型,该分析基于相互独立的序列网络(零序,正序,负序),并直接利用故障后首端电压、电流的测量值,通过迭代实现故障定位,仿真讨论了故障距离、过渡电阻以及不同故障类型对定位结果的影响,大量仿真结果验证了此方法的有效性。

1 电缆结构与建模

1.1 电缆结构

本文以三相单芯同轴交联聚乙烯电力电缆为研究对象,并且三相同轴电缆对称布置,其单相内导体和外导体分别由电缆芯和护套组成^[22],横截面及其排列结构如图 1 所示。当电缆发生故障时,由于缆芯或地与金属护层之间的绝缘被破坏,会导致其电压、电流发生较大的变化,因此可利用金属护层的电气量提高故障测距的准确度^[23]。

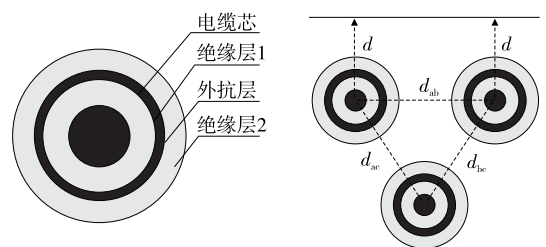


图 1 三相单芯电缆结构及布置

Figure 1 Three-phase single-core cable structure and arrangement

1.2 等效电路模型

等效电路模型如图 2 所示,把三相电缆的各相护层视作与之相对应的缆芯平行的导体。当电缆发生故障时,整个电缆的参数不再连续,故以故障

点为分界点,把整个电缆分为2个部分:A部分是从发送端到故障点;B部分是从故障点到接收端,电缆两端接有接地电阻。

本文通过考虑电缆的金属护层结构,构建了近似于实际的电缆模型,并且充分考虑了三相电缆缆芯之间的互感以及缆芯与护层之间互感的影响,使仿真环境近似于正常工作中的电缆,从而确保了建模的准确性。

图2中,上标代表a、b、c三相,下标c代表缆芯,s代表护层。

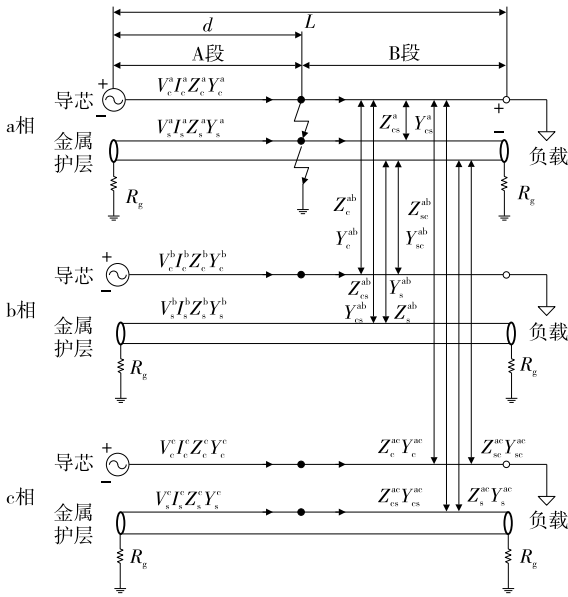


图2 电力电缆单相故障等效电路模型

Figure 2 Equivalent circuit model of power cable single-phase fault

由电缆的分布参数电路模型,可得三相电缆模型中缆芯和护层的任意一点电压和电流。首先,通过使用分布参数理论对A部分进行解析。A部分中的电压和电流可以用如下公式表示^[19]:

$$\begin{cases} -d\mathbf{V}_c^{abc}/dx = \mathbf{Z}_c^{abc} \mathbf{I}_c^{abc} + \mathbf{Z}_s^{abc} \mathbf{I}_s^{abc} \\ -d\mathbf{V}_s^{abc}/dx = \mathbf{Z}_{cs}^{abc} \mathbf{I}_c^{abc} + \mathbf{Z}_s^{abc} \mathbf{I}_s^{abc} \\ -d\mathbf{I}_c^{abc}/dx = \mathbf{Y}_c^{abc} \mathbf{V}_c^{abc} + \mathbf{Y}_{cs}^{abc} \mathbf{V}_s^{abc} \\ -d\mathbf{I}_s^{abc}/dx = \mathbf{Y}_{cs}^{abc} \mathbf{V}_c^{abc} + \mathbf{Y}_s^{abc} \mathbf{V}_s^{abc} \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{式中 } \mathbf{V}_c^{abc} = \begin{pmatrix} V_c^a \\ V_c^b \\ V_c^c \end{pmatrix}; \mathbf{Z}_c^{abc} = \begin{pmatrix} Z_c^a & Z_c^m & Z_c^m \\ Z_c^m & Z_c^b & Z_c^m \\ Z_c^m & Z_c^m & Z_c^c \end{pmatrix}; \mathbf{I}_c^{abc} =$$

$$\begin{pmatrix} I_c^a \\ I_c^b \\ I_c^c \end{pmatrix}; \mathbf{Z}_{cs}^{abc} = \begin{pmatrix} Z_{cs}^a & Z_{cs}^m & Z_{cs}^m \\ Z_{cs}^m & Z_{cs}^b & Z_{cs}^m \\ Z_{cs}^m & Z_{cs}^m & Z_{cs}^c \end{pmatrix}; \mathbf{I}_s^{abc} = \begin{pmatrix} I_s^a \\ I_s^b \\ I_s^c \end{pmatrix}。 \text{同理可}$$

得 $\mathbf{V}_s^{abc}, \mathbf{Z}_s^{abc}, \mathbf{Y}_c^{abc}, \mathbf{Y}_{cs}^{abc}, \mathbf{Y}_s^{abc}$ 。其中, Z_c^a, Z_c^b, Z_c^c 分别为 a、b、c 相缆芯的自阻抗, $Z_{cs}^a, Z_{cs}^b, Z_{cs}^c$ 分别为 a、b、c 相缆芯和护层的互阻抗, Z_s^m 为 a、b、c 三相之间缆芯和护层的互阻抗, Z_s^a, Z_s^b, Z_s^c 分别为 a、b、c 相护层的自阻抗; Y_c^a, Y_c^b, Y_c^c 分别为 a、b、c 相缆芯的自导纳; $Y_{cs}^a, Y_{cs}^b, Y_{cs}^c$ 分别为 a、b、c 相缆芯和护层的互导纳; Y_s^m 为 a、b、c 三相之间缆芯和护层的互导纳; Y_s^a, Y_s^b, Y_s^c 分别为 a、b、c 相护层的自导纳; V_c^a, V_c^b, V_c^c 分别为 a、b、c 相缆芯电压; V_s^a, V_s^b, V_s^c 分别为 a、b、c 相护层电压; I_c^a, I_c^b, I_c^c 分别为 a、b、c 相缆芯电流; I_s^a, I_s^b, I_s^c 分别为 a、b、c 相护层电流。

将式(1)化为如下矩阵形式:

$$-\begin{pmatrix} d\mathbf{V}^{abc}/dx \\ d\mathbf{I}^{abc}/dx \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & \mathbf{Z}^{abc} \\ \mathbf{Y}^{abc} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{V}^{abc} \\ \mathbf{I}^{abc} \end{pmatrix} \quad (2)$$

其中, $\mathbf{V}^{abc} = \begin{pmatrix} V_c^a \\ V_c^b \\ V_c^c \end{pmatrix}, \mathbf{I}^{abc} = \begin{pmatrix} I_c^a \\ I_c^b \\ I_c^c \end{pmatrix}, \mathbf{Z}^{abc} = \begin{pmatrix} Z_c^{abc} & Z_{cs}^{abc} \\ Z_{cs}^{abc} & Z_s^{abc} \end{pmatrix},$
 $\mathbf{Y}^{abc} = \begin{pmatrix} Y_c^{abc} & Y_{cs}^{abc} \\ Y_{cs}^{abc} & Y_s^{abc} \end{pmatrix}。$

将式(2)应用对称分量矩阵 \mathbf{T} 进行对称变换后^[24]得到

$$-\begin{pmatrix} d\mathbf{V}^{012}/dx \\ d\mathbf{I}^{012}/dx \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & \mathbf{Z}^{012} \\ \mathbf{Y}^{012} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{V}^{012} \\ \mathbf{I}^{012} \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中 $\mathbf{V}^{012} = \begin{pmatrix} V_c^0 \\ V_c^1 \\ V_c^2 \end{pmatrix}; \mathbf{I}^{012} = \begin{pmatrix} I_c^0 \\ I_c^1 \\ I_c^2 \end{pmatrix}; \mathbf{Z}^{012} =$
 $\begin{pmatrix} Z_c^{012} & Z_{cs}^{012} \\ Z_{cs}^{012} & Z_s^{012} \end{pmatrix}; \mathbf{Y}^{012} = \begin{pmatrix} Y_c^{012} & Y_{cs}^{012} \\ Y_{cs}^{012} & Y_s^{012} \end{pmatrix}。$

其中,序列网络中各电气量的上标用0,1,2表示,其中0代表零序,1代表正序,2代表负序。

对于三相电路来说,相与相之间存在耦合关系,解决 12×12 的高维矩阵实际上非常困难,为了解决计算量大的问题,可以对式(2)进行解耦,将其转化为序网络,如式(3)所示。因为地下三相电缆的等边对称排列,使得三相之间的阻抗和导纳矩阵的非对角线元素接近于零,这就构成了三序列网络之间的完全独立性,处理起来更加容易^[25]。式(3)中的 \mathbf{Z}_c^{012} 可以使用 \mathbf{Z}_c^{abc} 经过对称分量矩阵 \mathbf{T} 转换得到,即

$$\mathbf{Z}_c^{012} = \mathbf{T}^{-1} \mathbf{Z}_c^{abc} \mathbf{T} = \begin{pmatrix} z_c^0 & 0 & 0 \\ 0 & z_c^1 & 0 \\ 0 & 0 & z_c^2 \end{pmatrix} \quad (4)$$

与阻抗类似,其同样适用于从相网络到序列网络的导纳矩阵的转换;三相网络与序列网络之间的电压、电流关系也可由对称分量矩阵转化得到,即 $V^{abc} = TV^{012}$ 和 $I^{abc} = TI^{012}$ 。

$$\begin{cases} V_{cA}^k(x) = A^k \cosh(\delta^k x) + B^k \sinh(\delta^k x) + C^k \cosh(\gamma^k x) + D^k \sinh(\gamma^k x) \\ V_{sA}^k(x) = A^k T_1^k \cosh(\delta^k x) + B^k T_1^k \sinh(\delta^k x) + C^k T_2^k \cosh(\gamma^k x) + D^k T_2^k \sinh(\gamma^k x) \\ I_{cA}^k(x) = A^k T_3^k \sinh(\delta^k x) + B^k T_3^k \cosh(\delta^k x) + C^k T_4^k \sinh(\gamma^k x) + D^k T_4^k \cosh(\gamma^k x) \\ I_{sA}^k(x) = A^k T_5^k \sinh(\delta^k x) + B^k T_5^k \cosh(\delta^k x) + C^k T_6^k \sinh(\gamma^k x) + D^k T_6^k \cosh(\gamma^k x) \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} V_{cB}^k(y) = E^k \cosh(\delta^k y) + F^k \sinh(\delta^k y) + G^k \cosh(\gamma^k y) + H^k \sinh(\gamma^k y) \\ V_{sB}^k(y) = E^k T_1^k \cosh(\delta^k y) + F^k T_1^k \sinh(\delta^k y) + G^k T_2^k \cosh(\gamma^k y) + H^k T_2^k \sinh(\gamma^k y) \\ I_{cB}^k(y) = E^k T_3^k \sinh(\delta^k y) + F^k T_3^k \cosh(\delta^k y) + G^k T_4^k \sinh(\gamma^k y) + H^k T_4^k \cosh(\gamma^k y) \\ I_{sB}^k(y) = E^k T_5^k \sinh(\delta^k y) + F^k T_5^k \cosh(\delta^k y) + G^k T_6^k \sinh(\gamma^k y) + H^k T_6^k \cosh(\gamma^k y) \end{cases} \quad (6)$$

式(5)、(6)中 T_1^k 、 T_2^k 、 T_3^k 、 T_4^k 、 T_5^k 、 T_6^k 反应了积分常数之间的关系,即

$$\begin{cases} T_1^k = \frac{(\delta^k)^2 - z_c^k y_c^k - z_{cs}^k y_{cs}^k}{z_c^k y_{cs}^k + z_{cs}^k y_c^k} \\ T_2^k = \frac{(\gamma^k)^2 - z_c^k y_c^k - z_{cs}^k y_{cs}^k}{z_c^k y_{cs}^k + z_{cs}^k y_c^k} \\ T_3^k = -\frac{y_c^k + y_{cs}^k T_1^k}{\delta^k} \\ T_4^k = -\frac{y_c^k + y_{cs}^k T_2^k}{\gamma^k} \\ T_5^k = -\frac{y_{cs}^k + y_s^k T_1^k}{\delta^k} \\ T_6^k = -\frac{y_{cs}^k + y_s^k T_2^k}{\gamma^k} \end{cases} \quad (7)$$

其中, δ^k 、 γ^k 由序列方程中的特征矩阵求出, A^k 、 B^k 、 C^k 、 D^k 、 E^k 、 F^k 、 G^k 、 H^k 均为未知电路参数,可以由边界条件求得,其中 $k=0,1,2$ 。正常情况下,每个序列方程由 4 个未知电路参数组成,而 3 个序列方程有 12 个未知参数,需要 12 个边界条件。但是,当发生故障时电缆将以故障点为界分为 A、B 两部分,导致每个序列方程的未知参数翻倍至 8 个,因此,对于 3 序列情况需要 24 个边界条件才能求出 24 个未知参数。

1.3 边界条件

假设在图 2 所示的故障距离处, a 相发生了单相接地故障。从序列网络中可得如下边界条件。

在始端满足以下条件。

- 1) 缆芯电压等于缆芯始端电压的测量值。
- 2) 缆芯电流等于缆芯始端电流的测量值。
- 3) 零序护层电压等于接地电阻乘以零序护层

若将零序电路的特征根定义为 δ^0 、 γ^0 , 正序电路的特征根定义为 δ^1 、 γ^1 , 负序电路的特征根定义为 δ^2 、 γ^2 , 则 A、B 部分的电压、电流方程最终可以用双曲函数分别表示为

电流, 正序和负序护层电压等于零。

- 4) 零序护层电流等于首端零序护层电流的测量值。

$$\begin{cases} V_{cA}^{012}(0) = V_{c_{send}}^{012}(0) \\ I_{cA}^{012}(0) = I_{c_{send}}^{012}(0) \\ V_{sA}^0(0) = -R_{gA}^0 I_{sA}^0(0) \\ V_{sA}^{12}(0) = 0 \\ I_{sA}^0(0) = I_{s_{send}}^0(0) \end{cases} \quad (8)$$

在故障点处满足以下条件。

- 5) A 段缆芯电压等于 B 段缆芯电压。

$$V_{cA}^{012}(d) = V_{cB}^{012}(0) \quad (9)$$

在终端满足以下条件。

- 6) 零序护层电压等于接地电阻乘以零序护层电流, 正序和负序护层电压为零。

$$\begin{cases} V_{sB}^0(L-d) = R_{gB}^0 I_{sB}^0(L-d) \\ V_{sB}^{12}(L-d) = 0 \end{cases} \quad (10)$$

在故障点相网络满足以下条件。

- 7) 故障相 a 相在 A 段和 B 段的护层电压为零。
- 8) 在非故障相 b、c 相中, A 段和 B 段的护层电压相等。
- 9) 在非故障相 b、c 相中, A 段和 B 段的缆芯电流相等。
- 10) 在非故障相 b、c 相中, A 段和 B 段的护层电流相等。

$$\begin{cases} V_{sA}^a(d) = 0 \\ V_{sB}^a(0) = 0 \\ V_{sA}^{bc}(d) = V_{sB}^{bc}(0) \\ I_{cA}^{bc}(d) = I_{cB}^{bc}(0) \\ I_{sA}^{bc}(d) = I_{sB}^{bc}(0) \end{cases} \quad (11)$$

1.4 故障测距判据

故障期间,整个电缆电路可由式(5)~(10)表示,本文中的电缆电气参数利用仿真软件得到(也可由电缆厂家提供的电缆参数说明书得到),可通过查阅变电站的数据来获得故障后的缆芯首端电压、电流以及护层电流,电缆的总长度已知。

故障点前、后的故障电流与故障距离 d 有关,且不同的故障距离 d 对应一组不同的前、后故障电流值,当非故障相故障点前后故障电流相等时,对应的 d 即为实际故障距离;否则, d 不为实际故障距离,故可用非故障相故障点前、后故障电流相等进行故障位置的判定。本文以非故障相 b 相为例,分别对其在故障点处的前、后护层电流以及缆芯电流进行求差取绝对值,最后进行求和,并取其和的最小值,以此作为判据,如下式所示:

$$e = \min\{[|I_{cA}^b(d) - I_{cB}^b(0)| + |I_{sA}^b(d) - I_{sB}^b(0)|]/2\} \quad (12)$$

其中

$$\begin{cases} I_{cA}^b(d) = I_{cA}^{b0}(d) + I_{cA}^{b1}(d) + I_{cA}^{b2}(d) \\ I_{cB}^b(0) = I_{cB}^{b0}(0) + I_{cB}^{b1}(0) + I_{cB}^{b2}(0) \\ I_{sA}^b(d) = I_{sA}^{b0}(d) + I_{sA}^{b1}(d) + I_{sA}^{b2}(d) \\ I_{sB}^b(0) = I_{sB}^{b0}(0) + I_{sB}^{b1}(0) + I_{sB}^{b2}(0) \end{cases}$$

实际故障距离的确定是在对故障距离 d 的迭代过程中实现的,其中 $d \in (0, L)$,每取一个故障距离 d ,将其代入到式(5)、(6)中算得相应的正常相故障点前、后电流值,并将其带入到式(12)中进行计算,当式(12)取得最小值时,取得的 d 即为故障距离。由于设置的初始故障距离 d 是在全线范围内进行迭代搜索,只有当故障距离 d 的取值满足文中故障判据才为实际故障距离,故只有所设的故障距离 d 在故障点前,才会满足上述故障判据,从而保证了故障定位算法的有效性。

1.5 故障定位算法流程

本文应用分布参数模型对考虑金属护层结构的电缆进行建模,提出的电缆护层相关故障测距方法如下:

- 1) 计算电缆参数,获得故障后电缆始端电气量;
- 2) 设置初始故障距离 d , d 为计算步长,把边界条件带入到式(5)、(6)中,求出电路未知参数 A^k 、 B^k 、 C^k 、 D^k 、 E^k 、 F^k 、 G^k 和 H^k ;
- 3) 根据式(5)、(6),利用求得的电路未知参数

求出正常相对应故障点处前、后电流值;

4) 再令故障距离为 $d = d + \Delta d$ 。继续步骤 3),当 d 的取值大于总长 L 时,继续下一步骤;

5) 把故障距离 d 带入到式(12)的故障判据中,若 e 取得最小值,那么,实际故障距离即为最小值 e 所对应的故障距离 d 。

故障测距流程如图 3 所示。

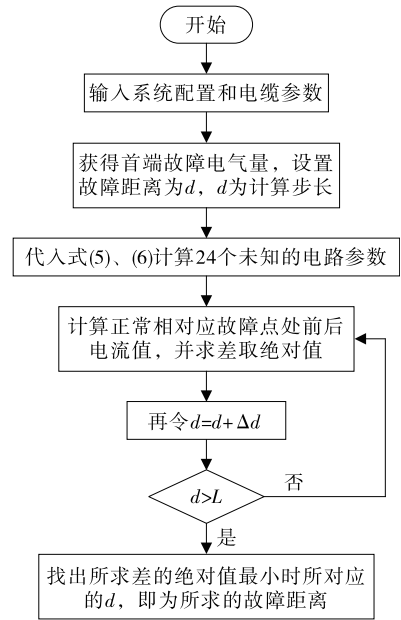


图 3 故障定位流程

Figure 3 Process of the fault location

2 仿真实验

2.1 仿真模型

为了验证所提方法对护层相关的三种故障测距的可行性与准确性,本文在 PSCAD/EMTDC 仿真软件中搭建系统模型。电缆的参数配置如表 1 所示。

表 1 三相电缆导芯与护层的参数配置

Table 1 Parameters configuration table of three-phase cable core and sheath

缆芯半 径/m	主绝缘层 半径/m	铜金属护 层半径/m	外绝缘层 半径/m	相间距 离/m	相与地面 距离/m
0.028	0.042	0.045	0.049	0.6	3

为了表示所提算法得出的故障距离相对于实际故障距离的误差度,提出相对误差值,即

$$x = \frac{D-d}{L} \times 100\% \quad (12)$$

其中, D 为所测故障距离, d 为实际故障距离, L 为电缆总长度。根据相对误差值的大小来确定所提算法对测距的精确性。

2.2 算例分析

本文以 a 相为故障相, 发生芯—护层对地故障, 电缆总长度为 4 km, 故障电阻为 $20\ \Omega$ 为例, 实现本文算法。并通过对比考虑金属护层与只考虑缆芯这 2 种不同的电缆结构的测距方法来验证本文所提出的考虑金属护层结构算法的优越性。设故障发生在距离始端 2 km 处。

利用图 3 所示的算法流程进行考虑金属护层结构的电缆故障测距, 本文所提算法测距结果如图 4 所示, 测距结果为 2 020 m。不考虑护层只考虑缆芯的测距方法的测距结果如图 5 所示, 测距结果为 2 250 m。显然, 本文所提算法的故障测距精度更高, 故不应只考虑缆芯而忽略金属护层结构的存在。

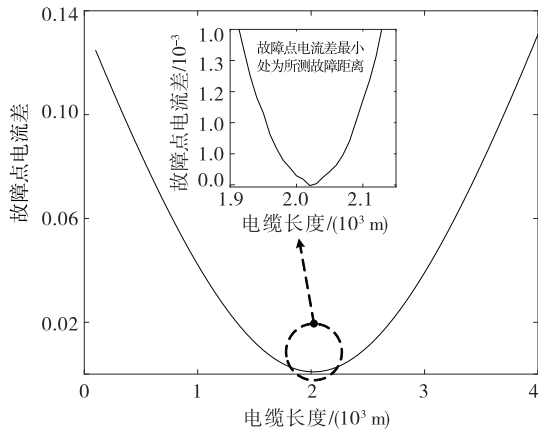


图 4 考虑金属护层结构的电缆故障测距方法

Figure 4 Result of the fault location considering the metal sheath

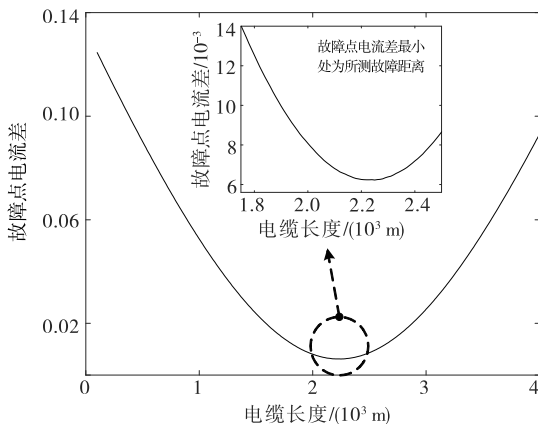


图 5 只考虑电缆导芯的电缆故障测距方法

Figure 5 Result of the fault location with the model only considering the core

2.3 适应性分析

1) 不同故障距离对定位算法影响的仿真分析。

为了验证本文算法对不同故障发生距离的有效性, 分别对发生在不同故障位置的 3 种护层相关故障进行故障测距, 故障电阻为 $50\ \Omega$, 测距结果如图 6 所示。

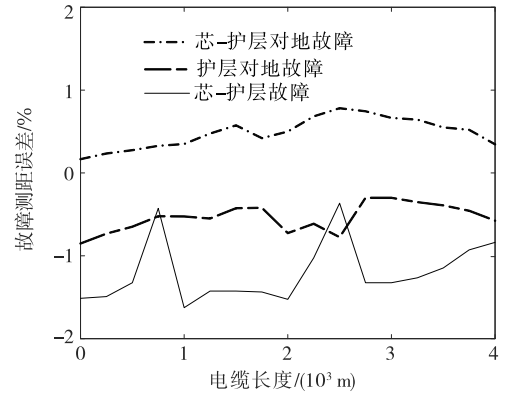


图 6 不同故障距离处的测距结果误差

Figure 6 Distance measuring error of different fault position results

由图 6 可知, 3 种护层相关故障发生在不同位置时, 均能得到较高的定位精度, 故障测距误差基本不超过 1.5%, 因此本文测距方法不受故障发生位置的影响, 并且测距精度较高, 满足测距工程对测距误差的要求。

2) 不同过渡电阻对定位算法影响的仿真分析。

传统的阻抗法测距易受过渡电阻的影响^[26], 对过渡电阻非常敏感, 为了研究过渡电阻是否会对本文方法精度产生影响, 通过调整过渡电阻的阻值, 分别设置为 0.1 、 30 、 60 、 $100\ \Omega$, 并用本文方法计算不同过渡电阻下的测距误差, 从而验证该方法对定位精度的理论预期。故障类型为芯—护层故障, 测距结果如表 2 所示。

从表 2 中的结果可知, 本文的测距算法对于不同的过渡电阻, 测距精度并没有发生较大变化, 且过渡电阻在 $0\sim 60\ \Omega$ 范围内变化时, 本文方法的测距误差不超过 1%, 即使过渡电阻达到 $100\ \Omega$, 测距误差也不超过 1.5%, 由于本文所提算法仅使用非故障相的电气量进行测距, 不需要对故障进行建模, 从而减小了过渡电阻对测距精度的影响。

表 2 不同过渡电阻时的测距结果

Table 2 Ranging results for different transition resistance

故障距离/km	过渡电阻/ Ω	测量距离/m	误差/%
1.0	0.1	1 008	0.20
	30.0	1 014	0.35
	60.0	1 029	0.72
	100.0	1 052	1.30
1.5	0.1	1 510	0.25
	30.0	1 517	0.42
	60.0	1 535	0.87
	100.0	1 553	1.33
2.0	0.1	2 013	0.32
	30.0	2 022	0.55
	60.0	2 036	0.90
	100.0	2 054	1.35
2.5	0.1	2 506	0.15
	30.0	2 512	0.30
	60.0	2 531	0.78
	100.0	2 550	1.25
3.0	0.1	3 013	0.32
	30.0	3 021	0.52
	60.0	3 032	0.82
	100.0	3 058	1.45

2.4 模型对比

为了验证考虑金属护层在故障测距精度上的优越性,以芯—护层对地故障为例,分别采用考虑金属护层与不考虑金属护层两种不同电缆模型,并对其定位结果进行对比,过渡电阻为 20Ω , 2 种电缆模型在不同故障距离处的定位效果如表 3 所示。

表 3 2 种不同电缆模型的测距结果

Table 3 Ranging results of two different cable models

故障距离/km	考虑金属护层的测量距离/m	误差/%	仅考虑电缆导芯的测量距离/m	误差/%
1.00	1 012	0.30	968	0.80
1.25	1 260	0.25	1 202	1.20
1.50	1 515	0.38	1 584	2.10
1.75	1 768	0.45	1 853	2.17
2.00	2 020	0.50	2 250	6.25
2.25	2 273	0.57	2 677	10.67
2.50	2 509	0.22	3 125	15.62
2.75	2 762	0.13	3 627	21.92
3.00	3 021	0.52	4 103	27.58

由表 3 可知,本文提出的考虑电缆护层的测距方法,在电缆全线范围内均能实现准确定位,而忽略电缆金属护层的定位方法只有对距离始端较近的故障点定位较准确,随着故障距离的增加,定位误差逐渐增加且当故障发生在 3 km 处时,定位结果超出测试范围。

3 结语

本文针对配网电缆的单相故障定位问题,并根据护层结构将单相故障分类为 3 种护层相关的故障,基于考虑电缆金属护层结构的分布参数模型,提出金属护层相关故障的测距算法,该算法简单有效且实施成本较低。

1)为解决由于电路之间的耦合性能所导致的计算量大的问题,本文充分考虑电缆的布置结构,采用相互独立的序列网络对电路模型进行分析,极大的简化了算法的复杂度。

2)为了减小过渡电阻对测距结果的影响,本文利用故障时故障点非故障相前、后电流相等为测距判据,当过渡电阻在 $0 \sim 100 \Omega$ 范围内变化时,其测距误差在全线范围内最大为 1.45%,最小仅为 0.2%,改善了传统阻抗法对过渡电阻敏感的缺点。

3)本文通过大量仿真对不同故障距离以及不同电缆结构模型的测距结果进行对比,结果表明考虑金属护层的测距误差最大为 0.57%,而简化模型的测距误差最大为 27.58%,最小也达到了 0.8%,故本文所提算法不仅定位精度较高而且适应性较强。

参考文献:

- [1] 张亮,夏君山,杜荣林,等.基于修剪均值滤波算法的电缆局部放电定位方法[J].电力科学与技术学报,2017,32(3):86-91.
ZHANG Liang, XIA Junshan, DU Ronglin, et al. Cable partial discharge location method based on trimmed mean filter algorithm[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017, 32(3): 86-91.
- [2] 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,2007:17-22.

- [3] 尹丽菊,于毅,咸日常,等.基于无监督学习的交叉互联电缆行波测距方法[J].智慧电力,2021,49(4):89-94.
YIN Liju, YU Yi, YAN Daily, et al. Traveling wave ranging method of cross-interconnected cable based on unsupervised learning[J]. Smart Power, 2021, 49(4): 89-94.
- [4] 周正雄,夏向阳,朱鹏,等.高压电缆早期间歇性电弧接地故障识别方法[J].中国电力,2020,53(12):167-176.
ZHOU Zhengxiong, XIA Xiangyang, ZHU Peng, et al. Identification method for incipient intermittent arc ground fault of high-voltage cables[J]. Electric Power, 2020, 53(12): 167-176.
- [5] 李泽文,颜勋奇,肖仁平,等.基于暂态电流波形斜率的中压柔性直流配电线路故障定位方法[J].电力自动化设备,2020,40(8):88-96.
LI Zewen, YAN Xunqi, XIAO Renping, et al. Fault location method based on slope of transient current waveform for flexible mid-voltage DC distribution line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(8): 88-96.
- [6] 李舟,乔文,谈震,等.基于行波特征频率的配电网混合线路故障定位方法[J].电网与清洁能源,2021,37(5):33-42+51.
LI Zhou, QIAO Wen, TAN Zhen, et al. Fault location method for hybrid lines based on traveling wave characteristic frequency in distribution network[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(5): 33-42+51.
- [7] 梁栋,徐丙垠,刘洋,等.基于差分方向行波的脉冲电流电缆故障测距方法[J].电测与仪表,2021,58(7):150-156.
LIANG Dong, XU Bingyin, LIU Yang, et al. Impulse current cable fault location method based on differential directional traveling waves[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(7): 150-156.
- [8] 杨斌,张翠娟,江聪,等.加窗小波包变换及其在故障测距中的应用[J].高压电器,2020,56(11):245-250.
YANG Bin, ZHANG Cuijuan, JIANG Cong, et al. Windowed wavelet transform method and its application to fault location[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(11): 245-250.
- [9] 张晨浩,宋国兵,董新洲.一种应对高阻故障的单端自适应行波保护方法[J].中国电机工程学报,2020,40(11):3548-3557.
ZHANG Chenhao, SONG Guobing, DONG Xingzhou. A non-unit adaptive traveling wave protection method for high impedance faults[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(11): 3548-3557.
- [10] 李泽文,曾祥君,夏翊翔,等.高压交流输电线路故障行波定位技术综述[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2022,19(3):104-121.
LI Zewen, ZENG Xiangjun, XIA Yixiang, et al. Review of traveling wave fault location technology for high voltage AC transmission lines[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology(Natural Science), 2022, 19(3): 104-121.
- [11] 郭卫,周松霖,王立,等.电力电缆状态在线监测系统的设计及应用[J].高电压技术,2019,45(11):3459-3466.
GUO Wei, ZHOU Songlin, WANG Li, et al. Design and application of online monitoring system for electrical cable states[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(11): 3459-3466.
- [12] 高淑萍,索南加乐,宋国兵,等.基于分布参数模型的直流输电线路故障测距方法[J].中国电机工程学报,2010,30(13):75-80.
GAO Shuping, SUONAN Jiale, SONG Guobing, et al. Fault location method for HVDC transmission lines on the basis of the distributed parameter model[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(13): 75-80.
- [13] 索南加乐,吴亚萍,宋国兵,等.基于分布参数的同杆双回线单线故障准确测距原理[J].中国电机工程学报,2003,25(5):40-44.
SUONAN Jiale, WU Yaping, SONG Guobing, et al. New accurate fault location algorithm for parallel lines on the same tower based on distribute parameter[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 25(5): 40-44.
- [14] GILANY M, IBRAHIM D K, ELDIN E S T. Traveling-wave-based fault-location scheme for multiend-aged underground cable system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(1): 82-89.
- [15] DONG X, YUAN Y L, GAO Z Q, et al. Analysis of cable failure modes and cable joint failure detection via sheath circulating current[C]//2014 IEEE Electrical Insulation Conference(EIC), Philadelphia, USA: IEEE, 2014.
- [16] 王航,周文俊,陈杰,等.波纹金属护套高压单芯电缆芯芯护层互感的解析解[J].电工技术学报,2020,35(16):3369-3376.

- WANG Hang, ZHOU Wenjun, CHEN Jie, et al. Analytical solution of the mutual inductance of a HV single conductor cable with corrugated metallic sheath[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(16):3369-3376.
- [17] 刘炎,夏向阳,李明德,等.高压电力电缆轨迹法在线监测方法[J].电力科学与技术学报,2019,34(3):202-210.
- LIU Yan, XIA Xiangyang, LI Mingde, et al. Research on online monitoring system based on locus method of HV power cable[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(3):202-210.
- [18] ALOUI T, AMAR F B, ABDALLAH H H. Fault pre-localization of underground single-phase cables: Modeling and simulation[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2013, 44(1):514-519.
- [19] YANG X, CHOI M S, LEE S J, et al. Fault location for underground power cable using distributed parameter approach[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(4):1809-1816.
- [20] XU Z H, SIDHU T S. IEEE fault location method based on single-end measurements for underground cables[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(4):2845-2854.
- [21] 唐进,张姝,林圣,等.计及金属护层结构的电缆单端故障测距方法[J].中国电机工程学报,2016,36(6):1748-1756.
- TANG Jin, ZHANG Shu, LIN Sheng, et al. Single-terminal fault locating method of cables considering the metal sheath structure[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(6):1748-1756.
- [22] 宋国兵,蔡新雷,高淑萍,等.VSC-HVDC 频变参数电缆线路电流差动保护新原理[J].中国电机工程学报,2011,31(22):105-111.
- SONG Guobing, CAI Xinlei, GAO Shuping, et al. Novel current differential protection principle of VSC-HVDC considering frequency-dependent characteristic of cable line[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(22):105-111.
- [23] JENSEN C F. Online location of faults on AC cables in underground transmission systems[D]. Aalborg: Aalborg University, 2014.
- [24] KERSTING W H. Distribution system modeling and analysis[M]. Boca Raton: CRC Press, 2001:72-79.
- [25] 李光琦.电力系统暂态分析[M].北京:中国电力出版社,2007:58-62.
- [26] 王玮,蔡伟,张元芳,等.基于阻抗法的电力电缆高阻故障定位理论及试验[J].电网技术,2001,25(11):38-41.
- WANG Wei, CAI Wei, ZHANG Yuanfang, et al. Theory and experiment of a cable fault location method based on impedance and using frequency-variable source[J]. Power System Technology, 2001, 25(11):38-41.

(上接第 108 页 Continued from page 108)

- [15] 尤肖虎,潘志文,高西奇,等.5G 移动通信发展趋势与若干关键技术[J].中国科学:信息科学,2014,44(5):551-563.
- YOU Xiaohu, PAN Zhiwen, GAO Xiqi, et al. 5G mobile communication development trend and several key technologies[J]. Science in China: Information Science, 2014, 44(5):551-563.
- [16] 马云龙,李秀广,周秀,等.基于高压真空快速断路器的变压器励磁涌流抑制技术研究[J].高压电器,2022,58(10):136-142.
- MA Yunlong, LI Xiuguang, ZHOU Xiu, et al. Research on excitation inrush current suppression technology of transformer based on high voltage vacuum fast circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(10):136-142.
- [17] 张保会,尹项根.电力系统继电保护(第二版)[M].北京:中国电力出版社,2010:56-57.
- [18] SHAFI M, MOLISCH A F, SMITH P J, et al. 5G: a tutorial overview of standards, trials, challenges, deployment, and practice[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35(6):1201-1221.
- [19] 徐江涛,姜海波,刘洋,等.电力物联网 D2D 通信中模式预选的多播重传技术[J].电力科学与技术学报,2021,36(4):196-202.
- XU Jiangtao, JIANG Haibo, LIU Yang, et al. A multi-cast retransmission scheme based on the pre-selected mode for D2D communications of electric internet of things networks[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(4):196-202.