

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200327

# 考虑金属护层耦合的高压电缆单相接地故障定位方法

袁超<sup>1</sup>, 储海军<sup>1</sup>, 陈燕擎<sup>1</sup>, 梅睿<sup>1</sup>, 钱鹏<sup>1</sup>, 王冠华<sup>2</sup>, 郭振华<sup>2</sup>, 梁睿<sup>2</sup>

(1. 江苏方天电力技术有限公司, 江苏 南京 211100; 2. 中国矿业大学, 江苏 徐州 221116)

**摘要:** 针对电缆导芯和金属护层之间存在电磁耦合影响故障定位准确精度的问题, 提出一种考虑金属护层耦合的高压电缆故障定位方法。该方法通过双 $\tau$ 分布参数模型建立电缆导芯和金属护层耦合关系, 利用首末端的电气量, 进而确定电缆导芯分布电压的表达式。然后以首末端分别计算的故障点导芯电压瞬时值差值来构造定位判据, 同时对不良数据进行有效剔除, 采用混沌粒子群搜索法求解故障精确位置。利用PSCAD/EMTDC仿真模型所得数据进行计算, 结果表明在不同故障距离、故障电阻下所提故障定位算法都具有较高的精度。

**关键词:** 配电网; 单芯电缆; 分布参数; 金属护层; 故障定位

## Single phase ground fault location method for high voltage cables considering the metal sheath coupling

YUAN Chao<sup>1</sup>, CHU Haijun<sup>1</sup>, CHEN Yanqing<sup>1</sup>, MEI Rui<sup>1</sup>, QIAN Peng<sup>1</sup>, WANG Guanhua<sup>2</sup>, GUO Zhenhua<sup>2</sup>, LIANG Rui<sup>2</sup>

(1. Jiangsu Frontier Electric Technology Co., Ltd., Nanjing 211100, China;  
2. China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of electromagnetic coupling between the cable core and metal sheath, which has impact on the accuracy of fault location, a method for fault location of high-voltage cables considering the metal sheath coupling is proposed. This method establishes the coupling relationship between the cable core and metal sheath through a double  $\tau$  distribution parameter model, and uses the double-end electrical quantity of the cable to determine the expression of the cable core distributed voltage. Then the locating criterion is constructed by using the difference between the instantaneous value of the core voltage at the fault point. At the same time, the bad data is effectively eliminated, and the chaotic particle swarm search method is used to solve the exact fault location. The calculation results of the data obtained by establishing the PSCAD/EMTDC simulation model show that the proposed fault location algorithm has high accuracy under different fault distance and fault resistance.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China in 2017 (No. 2017YF C0804400) and the National Natural Science Foundation of China (No. 52077215).

**Key words:** distribution network; signal-core cable; distributed parameter; metal sheath; fault location

## 0 引言

与架空线路相比, 电力电缆具有占地面积小、供电可靠性高、运行维护简单等优势。在拓扑复杂线路繁多的配电网中, 电缆得到了广泛应用<sup>[1-2]</sup>。电缆一般包含金属屏蔽层和铠装层, 其物理模型较架空线复杂, 在发生故障时能够快速准确地确定电缆故障位置, 对减轻巡检压力及加快恢复供电具有重

要意义<sup>[3-4]</sup>。

现有针对电缆故障定位的方法, 可以分为两类: 行波法<sup>[5-9]</sup>和故障分析法<sup>[10-14]</sup>。行波法是利用故障发生后的暂态行波信息, 识别行波波头的到达时刻进行定位。但是行波法波头辨识难度较大, 且电缆中行波波速易受绝缘状态和导体电导率的影响, 具有不确定性。故障分析法是利用故障发生后的电气量以及线路参数, 列出与故障位置相关的方程或目标函数进行定位。故障分析法因其原理简单、可靠, 对采样精度要求不高的优点, 在电缆故障定位中得到较多应用。

文献<sup>[15]</sup>考虑多阶距离无穷小的分布参数模

基金项目: 2017年国家重点研发计划(2017YF C0804400); 国家自然科学基金项目资助(52077215); 江苏方天电力技术有限公司科技项目资助(KJ201914)

型,以零序电压瞬时值相等来构造定位算法。文献[16]建立了交叉互联电缆系统的护层电流等值电路模型,针对典型的护层故障电流进行了分析。文献[17-19]针对三相单芯电缆提出了考虑金属护层的多导体模型,利用了故障时非故障相导芯与护层的电气量实现故障定位。文献[20]对三芯电缆用零模等效电路列出定位方程,再针对金属护层的影响求取过渡电阻,但忽略了导芯和护层之间的互感和电容。

目前的研究只将传输线方程<sup>[21-23]</sup>应用于架空线路且需要解耦后的电气量,不能直接在双导体的电缆模型中应用。因此,本文在传输线方程理论的基础上,针对单芯电缆双导体结构,提出了一种考虑金属护层耦合的高压电缆单相接地故障定位方法,建立电缆线路双 $\tau$ 型分布参数模型,利用电缆首末端边界条件,分别从首末端计算导芯电压表达式,以导芯电压在故障线路上的分布规律来构建定位判据,同时辨识并剔除实际测量的异常数据,最后通过混沌粒子群算法来确定故障位置。大量仿真实验验证了本文所提定位方法的准确性。

## 1 电缆传输线方程的建立

### 1.1 单芯电缆耦合关系

本文研究对象为单芯电缆,其结构一般由导芯、绝缘层、金属屏蔽层、铠装层和外护套等组成。电缆金属屏蔽层和铠装层统称为金属护层,将单芯电缆金属护层视为与相应电缆导芯平行的导体,为了准确表示电缆导芯、金属护层和大地之间的耦合关系,利用图1所示双 $\tau$ 模型进行分析,电缆导芯和金属护层之间存在互阻抗 $Z_{cs}$ 和互导纳 $Y_{cs}$ ,同时金属护层与大地之间存在互导纳 $Y_s$ , $Z_c$ 和 $Z_s$ 分别为电缆导芯和金属护层单位长度自阻抗。

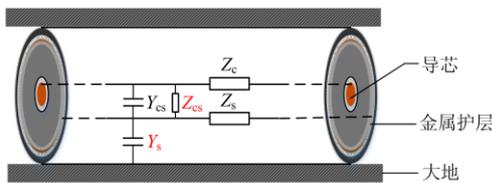


图1 电缆导芯-金属护层-大地耦合示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of cable core-metal sheath-earth coupling

### 1.2 电缆双 $\tau$ 模型的建立

依据传输线路的有损分布参数等值电路和沿线电流电压计算原理,将电缆分为无穷小段,每个无穷小段上的双 $\tau$ 型分布参数等值电路如图2所示。其中, $R_c$ 和 $L_c$ 分别为电缆导芯单位长度电阻、电感,

$R_s$ 、 $L_s$ 分别为金属护层单位长度电阻、电感, $C_s$ 、 $G_s$ 分别为金属护层和大地之间单位长度电容和电导, $R_{cs}$ 、 $L_{cs}$ 、 $C_{cs}$ 、 $G_{cs}$ 分别为导芯和金属护层之间的单位长度电阻、电感、电容和电导, $i_c(x,t)$ 、 $u_c(x,t)$ 分别为 $t$ 时刻电缆导芯上的电流和电压, $i_s(x,t)$ 、 $u_s(x,t)$ 分别为 $t$ 时刻电缆金属护层上的电流和电压,电压和电流是距离和时间的二元函数。

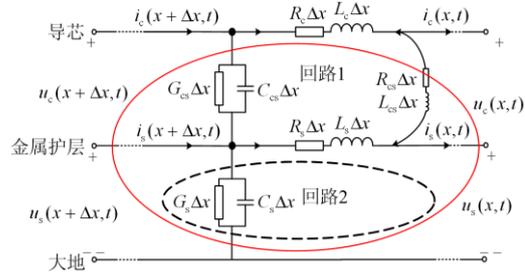


图2 电缆双 $\tau$ 模型

Fig. 2 Double  $\tau$  model of cable

根据回路1和节点①分别列写KVL和KCL为

$$\begin{cases} u_c(x+\Delta x,t) - u_c(x,t) = [R_c i_c(x,t) + L_c \frac{\partial i_c(x,t)}{\partial t}] \Delta x + \\ \quad [R_{cs} i_s(x,t) + L_{cs} \frac{\partial i_s(x,t)}{\partial t}] \Delta x \\ i_c(x+\Delta x,t) - i_c(x,t) = \\ \quad \left\{ G_{cs} [u_c(x+\Delta x,t) - u_s(x+\Delta x,t)] + \right. \\ \quad \left. C_{cs} \frac{\partial [u_c(x+\Delta x,t) - u_s(x+\Delta x,t)]}{\partial t} \right\} \Delta x \end{cases} \quad (1)$$

根据回路2和节点②分别列写KVL和KCL为

$$\begin{cases} u_s(x+\Delta x,t) - u_s(x,t) = [R_s i_s(x,t) + L_s \frac{\partial i_s(x,t)}{\partial t}] \Delta x + \\ \quad [R_{cs} i_c(x,t) + L_{cs} \frac{\partial i_c(x,t)}{\partial t}] \Delta x \\ i_s(x+\Delta x,t) - i_s(x,t) - [G_s u_s(x,t) + C_s \frac{\partial u_s(x,t)}{\partial t}] \Delta x = \\ \quad - \left\{ G_{cs} [u_c(x+\Delta x,t) - u_s(x+\Delta x,t)] + \right. \\ \quad \left. C_{cs} \frac{\partial [u_c(x+\Delta x,t) - u_s(x+\Delta x,t)]}{\partial t} \right\} \Delta x \end{cases} \quad (2)$$

对于式(1)和式(2),从微分的角度,忽略高阶无穷小量,并消除时间因子,得到电缆导芯电压电流和金属护层电压电流的传输线方程的表达式,对所得表达式再微分,消去电流方程,得到只含导芯电压和金属护层电压的二阶微分方程,联立求解出电缆导芯电压数学表达式,同理可以求得电缆导芯电

流、金属护层电压电流表达式, 如式(3)所示。

$$\begin{cases} U_c(x) = C_1 \cos(\beta_1 x) + C_2 \sin(\beta_1 x) + \\ C_3 \cos(\beta_2 x) + C_4 \sin(\beta_2 x) \\ U_s(x) = K_1 C_1 \cos(\beta_1 x) + K_1 C_2 \sin(\beta_1 x) + \\ K_2 C_3 \cos(\beta_2 x) + K_2 C_4 \sin(\beta_2 x) \\ I_c(x) = P_1 C_1 \sin(\beta_1 x) - P_1 C_2 \cos(\beta_1 x) + \\ P_2 C_3 \sin(\beta_2 x) - P_2 C_4 \cos(\beta_2 x) \\ I_s(x) = Q_1 C_1 \sin(\beta_1 x) - Q_1 C_2 \cos(\beta_1 x) + \\ Q_2 C_3 \sin(\beta_2 x) - Q_2 C_4 \cos(\beta_2 x) \end{cases} \quad (3)$$

其中:  $K_1 = (\beta_1^2 - A)/B$ ,  $K_2 = (\beta_2^2 - A)/B$ ;  
 $P_1 = Y_{cs}(B - \beta_1^2 + A)/(B\beta_1)$ ,  $P_2 = Y_{cs}(B - \beta_2^2 + A)/(B\beta_2)$ ;  
 $Q_1 = [(Y_{cs} + Y_s)(\beta_1^2 - A) - (BY_{cs})]/(B\beta_1)$ ,  
 $Q_2 = [(Y_{cs} + Y_s)(\beta_2^2 - A) - (BY_{cs})]/(B\beta_2)$ ;  
 $A = (Z_{cs} - Z_c)Y_{cs}$ ,  $B = (Z_c - Z_{cs})Y_{cs} - Z_{cs}Y_s$ ;  $\beta_1$  和  $\beta_2$   
 是联立所得微分方程对应的特征方程的解; 由式(3)  
 和边界条件可确定待定系数  $C_i (i=1,2,3,4)$ 。

在已知线路 M、N 两端导芯和金属护层电压电  
 流的条件下, 可以从 M、N 端分别求得线路上任一  
 点  $x$  处的导芯电压表达式  $U_{cM}(x)$  和  $U_{cN}(x)$ 。

$$\begin{cases} U_{cM}(x) = C_{1M} \cos \beta_1 x + C_{2M} \sin \beta_1 x + \\ C_{3M} \cos \beta_2 x + C_{4M} \sin \beta_2 x \\ U_{cN}(x) = C_{1N} \cos \beta_1 x + C_{2N} \sin \beta_1 x + \\ C_{3N} \cos \beta_2 x + C_{4N} \sin \beta_2 x \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $C_{iM}$  和  $C_{iN} (i=1,2,3,4)$  分别代表利用 M 端和 N  
 端的边界条件求得的系数。

根据式(4)从 M、N 两端分别计算出电缆线路上  
 同一点的导芯电压瞬时值, 以在 M、N 两端计算出  
 的故障点导芯电压瞬时值的差值绝对值为判据, 构  
 建定位函数  $f(x)$ , 如式(5)所示。

$$f(x) = |U_{cM}(x) - U_{cN}(x)| \quad (5)$$

## 2 故障定位算法

### 2.1 不良数据的辨识与剔除

在实际的数据测量中, 故障后测量到的电压电  
 流数据可能会不稳定, 从而影响定位精度。因此本  
 文通过计算采样点测量值的变化率进行不良数据的  
 辨识与剔除。

从故障后第二个工频周期开始采样分析, 时间  
 窗选取半个周期。如图 3 所示, 选取 1 400~1 500  
 共 100 个采样点进行数据处理。以首端电缆导芯电  
 压  $U_{cM}$  为例, 定义采样点测量值的变化率如式(6)  
 所示。

$$P(n) = \frac{U_{cM}(t+n+1) - U_{cM}(t+n)}{U_{cM}(t+n)} \quad (6)$$

式中:  $t$  为故障时间;  $n$  为采样点。

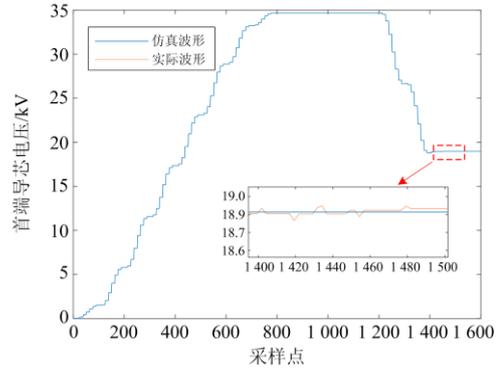


图 3 故障数据选取

Fig. 3 Fault data selection

不良数据辨识方法为: 设置一个变化率阈值为  
 0.01%, 计算每个采样点的测量值与相邻两个采样  
 点测量值的变化率, 若为不良数据, 则至少存在一  
 个变化率大于阈值, 将其剔除, 继续求解剩余数据  
 的测量值变化率, 直到测量值变化率均低于阈值。  
 最后将正常的测量值进行平均, 得到最终的测量值。

计算得首端导芯电压测量值的变化率如图 4 所  
 示, 100 个采样点中, 有 6 个采样点的电压值超过  
 变化率阈值, 将其剔除。求解剩余 94 个采样点的电  
 压平均值, 以相同方法计算首末端导芯和金属护层  
 电气量。

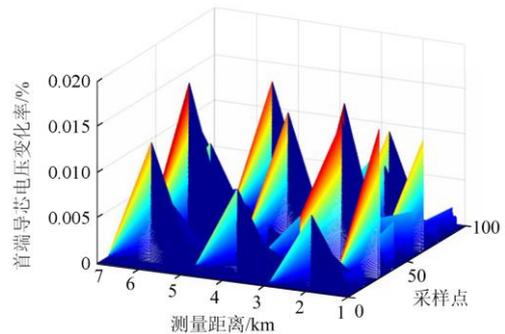


图 4 首端导芯电压测量值变化率

Fig. 4 Rate of change of leading core voltage measurement

### 2.2 混沌粒子群算法

本文采用混沌粒子群搜索法<sup>[24-25]</sup>来寻找使得式  
 (5)中  $f(x)$  值最小的  $x$ ,  $x$  对应距离即为故障距离。混  
 沌粒子群算法的具体步骤如下。

步骤 1 参数初始化: 主要参数包括学习因子  $c_1$   
 和  $c_2$ , 最大迭代次数  $gen_{max}$ , 粒子数目  $K$ , 粒子最  
 大飞行速度  $v_{max}$  和最小飞行速度  $v_{min}$ , 变量上下限  
 $[x_{min} x_{max}]$ , 适应度方差临界值 $[\sigma^2]$ , 混沌搜索调节参

数  $\varepsilon$ , 惯性权重调节参数  $w$ 。

步骤 2 将混沌变量按式(7)线性映射到优化变量取值区间 $[x_{\min} x_{\max}]$ 。

$$x^k = x_{\min} + (x_{\max} - x_{\min}) \times r^k \quad (7)$$

步骤 3 按式(8)对最优解的每一维变量进行混沌搜索。

$$x^k = x_f + 2\varepsilon(0.5 - x^k) \quad (8)$$

式中:  $\varepsilon$  为混沌搜索调节参数;  $x_f$  为当前最优解。

步骤 4: 在粒子群每一次迭代完成后, 若适应度值方差大于参考值, 则运行混沌搜索, 进一步寻优, 完成后更新全局最优粒子; 若适应度值方差小于参考值, 则输出当前的全局最优粒子, 从而确定故障位置。

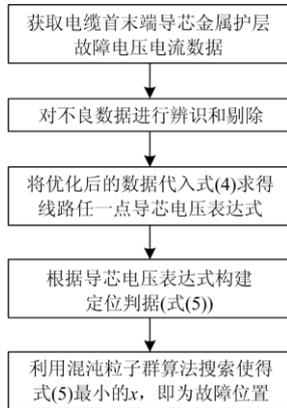


图 5 故障定位算法流程图

Fig. 5 Flow chart of fault location algorithm

### 3 仿真分析

#### 3.1 仿真设计

为验证本文算法的正确性与有效性, 利用 PSCAD/EMTDC 仿真软件建立 35 kV 配网电缆仿真模型, 其系统图如图 6 所示, 共有 4 条馈线, 长度分别为 9 km、10 km、8 km 和 11 km。变压器变比为 220 kV/35 kV, Y/Δ连接。在每条电缆馈线的首末端设置测量点, 电缆具体参数见表 1。

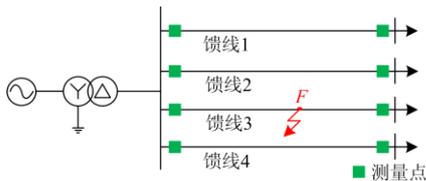


图 6 配网电缆单相接地故障系统图

Fig. 6 Single phase ground fault system diagram of distribution network cable

仿真故障设置为馈线 3 的导芯和金属护层接地短路, 仿真时间 0.16 s, 故障发生在 0.12 s。电缆金

属护层采用单端直接接地的接地方式。采样频率为 10 kHz。此外, 使用定位误差率  $e$  来研究本文所提出方法对故障定位的准确性。即

$$e = |x_f^* - x_f| / L \quad (9)$$

式中:  $x_f^*$  为实际故障位置;  $x_f$  为计算得到的故障位置;  $L$  为电缆长度。

表 1 电缆参数

Table 1 Cable parameters

阻抗	参数	导纳	参数
$Z_c/(\Omega/m)$	$0.14 \times 10^{-4} + j0.75 \times 10^{-3}$	$Y_c/(S/m)$	$j0.5 \times 10^{-6}$
$Z_s/(\Omega/m)$	$0.12 \times 10^{-4} + j0.68 \times 10^{-3}$	$Y_{cs}/(S/m)$	$-j0.19 \times 10^{-3}$
$Z_{cs}/(\Omega/m)$	$0.49 \times 10^{-4} + j0.68 \times 10^{-3}$		

#### 3.2 结果分析

研究不同故障位置 and 不同过渡电阻对本文方法的影响。

如表 2 所示, 本文算法在不同故障距离和过渡电阻的情况下, 定位误差率均在 5% 以内, 精度较高。在高阻接地故障的情况下, 定位误差率会略微增大, 但满足工程误差要求。

表 2 不同故障位置和过渡电阻的定位结果

Table 2 Fault location results of different fault positions and transition resistances

故障距离/km	故障电阻/ $\Omega$	定位结果/m	$e/\%$
1	1	963	0.46
	10	989	0.14
	50	1107	1.34
3	1	2 886	1.43
	10	2 896	1.30
	50	2 930	0.87
5	1	4 816	2.30
	10	4 802	2.48
	50	4 754	3.10
7	1	6 911	1.11
	10	6 716	3.55
	50	6 616	4.80

以故障距离为 3 km, 故障电阻为 10  $\Omega$  为例, 电缆双端测量数据使用 2.1 节的数据优化方法之前, 定位结果为 2 796 m; 将不良数据进行拟合处理后, 定位结果恢复变为 2 896 m, 误差减小了 1.25%。

#### 3.3 与不考虑金属护层影响的对比

在不考虑金属护层影响下, 将电缆视为单导体结构, 已知线路 M、N 两端导芯电压、电流数据的条件下, 可以从 M、N 两端分别计算任一点  $x$  的导芯电压的表达式  $U'_{cM}(x)$  和  $U'_{cN}(x)$ 。

$$\begin{cases} U'_{cM}(x) = U_{M0} \cosh(\gamma x) - Z_C I_{M0} \sinh(\gamma x) \\ U'_{cN}(x) = U_{N0} \cosh(\gamma x) + Z_C I_{N0} \sinh(\gamma x) \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $U_{M0}$ 、 $U_{N0}$ 、 $I_{M0}$ 、 $I_{N0}$  分别为 M、N 端的电压、电流值;  $Z_C$  为特征阻抗;  $\gamma$  为传播系数。

以式(10)为导芯电压计算公式, 构建式(5)所示判据, 重复图 5 所示故障定位算法流程, 在故障电阻为  $10 \Omega$  的情况下, 不同故障距离的定位结果如表 3 所示。结果表明将双曲函数线路分布参数模型直接应用于电缆故障定位中, 无法求解故障距离, 主要问题是电缆为双导体结构, 导芯和金属护层之间的耦合不能忽略。

表 3 故障定位方法对比

Table 3 Comparison of fault location results

故障距离/km	本文方法定位结果/m	不考虑金属护层定位结果/m
1	989	1
3	2 896	1
5	4 802	1
7	6 716	1

## 4 结论

本文提出了一种考虑金属护层耦合的高压电缆单相接地故障定位方法, 考虑了导芯、金属护层和大地之间的耦合, 针对电缆双导体结构, 推导出了单芯电缆的传输线方程, 在求解过程中, 通过计算测量值变化率辨识并剔除不良数据, 最后应用混沌粒子群搜索法进行迭代求解。PSCAD/EMTDC 仿真结果验证了所提方法的有效性, 可以快速而准确地获得故障点位置, 为解决电缆单相接地故障提供了一种较为实用的方法。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] LUO L, PAGANI, GIULIANO A, et al. Spatial and performance optimality in power distribution networks[J]. IEEE Systems Journal, 2018, 12(3): 2557-2565.
- [3] GURURAJAPATHY S S, MOKHLIS H, ILLIAS H A. Fault location and detection techniques in power distribution systems with distributed generation: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 74: 949-958.
- [4] 彭浩, 沈兴来, 陈奎. 电缆单端故障测距的阻抗-行波组合法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(23): 110-114.  
PENG Hao, SHEN Xinglai, CHEN Kui. Impedance-traveling wave assembled method of cable single-terminal fault location[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(23): 110-114.
- [5] 杨晓丽, 舒勤. 基于单-双端行波测距原理的配网多端故障定位[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(4): 91-96.  
YANG Xiaoli, SHU Qin. Distribution network fault location based on single-and double-end traveling wave distance measurement principle[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(4): 91-96.
- [6] 薛永端, 徐丙垠, 李天友, 等. 配网自动化系统小电流接地故障暂态定位技术[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(12): 27-32.  
XUE Yongduan, XU Bingyin, LI Tianyou, et al. Small-current grounding fault location based on transient signals of distribution automation system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(12): 27-32.
- [7] 张雪松, 徐琛, 马啸, 等. 不依赖时间同步的多支配网故障精确定位方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(2): 56-63.  
ZHANG Xuesong, XU Chen, MA Xiao, et al. Research on the precise fault location scheme for distribution network with multiple branches independent of time synchronization[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(2): 56-63.
- [8] 张翠玲, 江雪晨, 宁一. 树型配电网单相接地故障行波测距的组合方法[J]. 高压电器, 2017, 53(8): 166-172.  
ZHANG Cuiling, JIANG Xuechen, NING Yi. Combined method for traveling wave location of single phase grounding fault in tree type distribution network[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(8): 166-172.
- [9] 唐昆明, 唐辰旭, 罗建, 等. 基于 RLC 模型参数辨识的配网电缆单相接地故障的单端时域测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(4): 54-60.  
TANG Kunming, TANG Chenxu, LUO Jian, et al. A single-ended time domain fault location method for distribution network cable single-phase earth fault based on RLC model parameter identification[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(4): 54-60.
- [10] DENG F, ZENG X, PAN L. Research on multi-terminal traveling wave fault location method in complicated networks based on cloud computing platform[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 199-210. DOI: 10.1186/s41601-017-0042-4.
- [11] 韩策, 袁振海, 俞强. 基于零序直流原理的电缆测距方法的研究[J]. 电测与仪表, 2013, 50(4): 27-32.  
HAN Ce, YUAN Zhenhai, YU Qiang. Study on method of location of grounded fault cable based on zero sequence DC[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2013, 50(4): 27-32.
- [12] 杨军, 伍咏红, 江文波, 等. 基于双端故障信息的高压

- 电缆-架空线混合线路故障测距方法[J]. 电网技术, 2010, 34(1): 208-213.
- YANG Jun, WU Yonghong, JIANG Wenbo, et al. A fault location algorithm for hybrid transmission line composed by high voltage cable and overhead line based on two-terminal information[J]. Power System Technology, 2010, 34(1): 208-213.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 姜杰, 王鹏, 黄正炫, 等. 基于改进线路参数模型的配电网电缆单相接地测距方法[J]. 电网技术, 2012, 36(5): 185-189.
- JIANG Jie, WANG Peng, HUANG Zhengxuan, et al. Fault location of single-phase earth for power cable in distribution network based on improved cable line parameter model[J]. Power System Technology, 2012, 36(5): 185-189.
- [16] 杨静, 朱晓岭, 董翔, 等. 基于护层电流的高压电缆故障在线监测和诊断[J]. 高电压技术, 2016, 42(11): 3616-3625.
- YANG Jing, ZHU Xiaoling, DONG Xiang, et al. On-line monitoring and diagnosis of HV cable faults based on sheath currents[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(11): 3616-3625.
- [17] 张姝, 林圣, 唐进, 等. 基于双层阻抗模型的三相单芯电缆自恢复故障定位[J]. 电工技术学报, 2016, 31(17): 1-10.
- ZHANG Shu, LIN Sheng, TANG Jin, et al. Fault location of self-clearing fault in three phase single core cables based on double impedance model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(17): 1-10.
- [18] 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.
- [19] XU Zhihan, SIDHU T S. Fault location method based on single-end measurements for underground cables[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(4): 2845-2854.
- [20] 赵铁军, 王秀斌, 虞跃. 基于金属护层模型参数辨识的电缆单相故障单端测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(21): 83-91.
- ZHAO Tiejun, WANG Xiubin, YU Yue. A single terminal fault location method for single phase fault of cable based on parameter identification of metal sheath model[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(21): 83-91.
- [21] 李博通, 李永丽, 胡宇, 等. 基于故障区域识别的超高压混联线路故障测距算法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(5): 93-98.
- LI Botong, LI Yongli, HU Yu, et al. A new fault location algorithm for extra-high voltage mixed lines based on fault zone identification[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(5): 93-98.
- [22] 唐晓骏, 付红军, 胡扬宇, 等. 基于无损传输线理论的特高压线路稳态过电压装置需求判别[J]. 电网技术, 2011, 35(2): 1-6.
- TANG Xiaojun, FU Hongjun, HU Yangyu, et al. A method to judge demand of UHV transmission lines on steady-state over-voltage device based on lossless transmission line theory[J]. Power System Technology, 2011, 35(2): 1-6.
- [23] 孙孝峰, 谷岭, 李志超, 等. 新型配电系统背景谐波抑制策略的研究[J]. 太阳能学报, 2016, 37(6): 1359-1366.
- SUN Xiaofeng, GU Ling, LI Zhichao, et al. Damping strategy research of background harmonic in novel power distribution system[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2016, 37(6): 1359-1366.
- [24] 彭虹桥, 顾洁, 胡玉, 等. 基于混沌粒子群—高斯过程回归的饱和负荷概率预测模型[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(21): 25-32, 155.
- PENG Hongqiao, GU Jie, HU Yu, et al. Forecasting model of saturated load based on chaotic particle swarm and optimization-Gaussian process regression[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(21): 25-32, 155.
- [25] 马卫, 周林, 王艺环, 等. 基于混沌粒子群算法的光伏电站站内无功优化[J]. 太阳能学报, 2019, 40(1): 103-111.
- MA Wei, ZHOU Lin, WANG Yihuan, et al. Reactive power optimization of PV power plant station based on chaos-particle swarm optimization[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2019, 40(1): 103-111.

收稿日期: 2020-03-29; 修回日期: 2020-04-28

作者简介:

袁超(1987—), 男, 硕士, 研究方向为高电压检测技术及电缆故障定位。E-mail: 1345876155@qq.com

(编辑 张爱琴)