

基于护层电流时域反演信号的高压电缆 短路故障定位方法

柴 鹏¹, 周 灏², 张 煜¹, 史筱川², 李 爽¹, 杨 潇¹, 周 苗¹

(1. 国网湖北省电力有限公司黄石供电分公司, 湖北 黄石 435000; 2. 武汉伏佳安达电气技术有限公司, 湖北 武汉 430000)

摘 要:为了在高压单芯电缆线路上实现有效的短路故障定位, 提出一种基于护层电流时域反演信号的故障定位方法。根据短路故障点能量最大的原理, 该方法在高压电缆的金属护层接地处提取护层电流, 并通过故障信号的传递函数计算出各猜测故障点位置的能量, 能量最大点即故障点位置。仿真分析典型高压电缆线路结构, 结果表明, 该方法能够有效地定位故障点位置, 定位精度随采样频率的增加而增加, 建议实际应用时的采样频率在 10 MHz 以上。

关 键 词:高压电缆; 故障监测; 护层电流; 故障定位; 时域反演

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.06.023 中图分类号: TM755 文章编号: 1673-9140(2021)06-0189-07

Fault location method for high-voltage cable short-circuit based on electromagnetic time reversal

CHAI Peng¹, ZHOU Hao², ZHANG Yu¹, SHI Xiaochuan²,
LI Shuang¹, YANG Xiao¹, ZHOU Miao¹

(1. Huangshi Power Supply Branch, State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Huangshi 435000, China;
2. Wuhan Intelligent Monitoring Technology Co., Ltd., Wuhan 430000, China)

Abstract: In order to effectively locate short-circuit faults in the high-voltage single-core cable, this paper presents a new method based on the electromagnetic time-reversal (EMTR) theory. As the fault location is the maximum energy point, this method monitors the sheath current at the grounding position of the high-voltage terminal and calculates the energy of each guessing fault location by the transfer function of the fault signal. A typical high-voltage cable structure is simulated and analyzed. The results show that the method can effectively locate the fault point, and the accuracy can be improved with the increase of the sampling rate. It is recommended of the above 10 MHz sampling rate in practical applications.

Key words: high-voltage cable; fault monitoring; sheath current; fault location; EMTR

电网发生故障情况时, 快速、准确地诊断故障对
加强电网供电可靠性和防止电网事故逐步恶化具有

重大意义^[1]。短路故障定位是电力系统中一项重要的
功能需求^[2-4]。它对电网的安全和供电可靠性有

收稿日期: 2019-05-14; 修回日期: 2020-12-21

基金项目: 国网湖北省电力有限公司科技项目(SGHBHS00YJJS1800964)

通信作者: 周 灏(1986-), 男, 工程师, 主要从事电力电缆在线监测与状态评估研究; E-mail: 37424136@qq.com

深远的影响。当前的故障定位模式主要有2种:利用距离保护装置的保护测距^[5-7]和利用电子传感器的行波法故障定位模式^[8-11]。

基于参数识别的距离保护采用故障后系统变化的参数构成保护判据,而高压电缆线路分布参数特性明显、包含多个完整的交叉互联段、线路通道环境复杂,这将显著影响距离保护算法的动作性能。由于测量阻抗与故障距离不再呈正比关系,传统距离保护算法的保护范围将缩小。在实际应用中,利用线路阻抗的距离保护还存在着线路阻抗计算不准确、线路长度信息不完整的情况^[12-14]。

行波法通过检测故障线路上的暂态行波在母线与故障点之间的传播时间进行故障测距,行波法定位受线路参数、系统运行方式、过渡电阻和故障类型的影响小,定位速度快、准确度高^[15-17]。但是由于暂态行波的传播速度接近光速,基于行波法的故障定位模式存在噪声消除和波头时刻提取的问题。另外,多个交叉互联段和复杂的线路通道环境造成长电缆线路的波速度不统一、波阻抗不连续,这类方法难以应用于实际的长电缆线路中^[18-20]。

该文利用高压单芯电缆护层电流提出一种信号电磁时域反演的方法进行短路故障定位。该方法根据高压单芯电缆线路结构和故障信号暂态过程传播规律,通过监测高压电缆的护层电流,提取护层电流信号的高频分量幅值和相位信息,判断护层电流的故障暂态信号特征的能量消耗特征,通过线路不同位置的能量消耗差异判断短路故障点位置。

1 电磁时域反演法的理论基础

信号时域反演的过程就是改变时间自变量的符号^[21],如

$$t \mapsto -t \quad (1)$$

由于电力传输线短路故障波过程即为电磁波传播的过程,则传统的传输线方程^[17]电压行波传播形式为

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} u(x, t) - L_0 C_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} u(x, t) = 0 \quad (2)$$

式中 $u(x, t)$ 为行波电压在位置 x 和时间 t 时刻的幅值; L_0 、 C_0 分别为传输线单位长度的电感和电容。

对式(2)进行时域信号反演,可得:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} u(x, -t) - L_0 C_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} u(x, -t) = 0 \quad (3)$$

由式(2)、(3)可知,若 $u(x, t)$ 是传输线方程的一个解,则 $u(x, -t)$ 也是传输线方程的解。这表明若传输线介质是无损介质,则行波向两侧传播的效果相同。

传输线方程等效电路如图1所示,其中,线路长度为 L ,故障点位置为 $x = x_f$ 处,定义线路首端 A_1 为 $x = 0$ 处,线路末端 A_2 为 $x = L$ 处, A_1 端的输入阻抗为 Z_1 , A_2 端的输入阻抗为 Z_2 ,传输线的波阻抗为 Z_c , A_1 端电压为 U_{A1} , A_2 端电压为 U_{A2} , U_f 为故障点等效电压。利用传输线理论求解方程(2),可得:

$$U_{A1}(\omega) = \frac{(1 + \rho_1) e^{-\gamma x_f}}{1 + \rho_1 e^{-2\gamma L}} U_f(\omega) \quad (4)$$

式中 ρ_1 为 A_1 端故障暂态信号反射系数; γ 为线路传播系数; $U_f(\omega)$ 为故障点一个内阻为0的等效电压源。

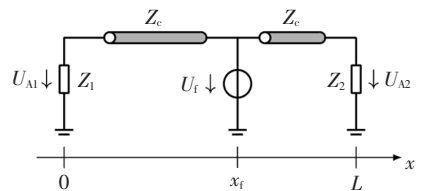


图1 传输线等效电路

Figure 1 The configuration of transmission line equivalent circuit

实际采样信号为时域信号 $s(x, t)$, 该信号只可能在一个有限的时间长度 T 内, 采样时间从 $t = 0$ 时刻开始到 $t = T$ 时刻结束。对应实际采样中的时域反演过程为

$$s(x, t) \mapsto s(x, T - t) \quad (5)$$

而对应频域的信号则为原信号频域型式 $S(\omega)$ 的共轭型式 $S^*(\omega)$, 即

$$S(\omega) \mapsto S^*(\omega) \quad (6)$$

2 电磁时域反演法在高压电缆故障定位中的应用

电磁时域反演法的应用主要分为3步:①在线路终端监测点测量原始的故障暂态信号;②采用等间距遍历的方法猜测一个故障点位置为提取能量损

耗最大点位置,利用线路的传输线方程模型计算在观测点反向注入的时域反演信号;③利用故障点能量损耗最大的原理确定故障点具体位置,其具体流程如图 2 所示。

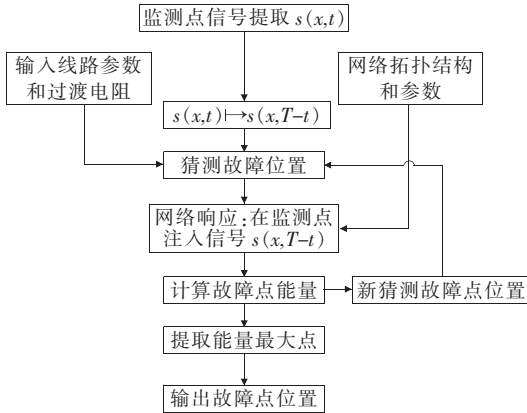


图 2 电磁时域反演法故障定位流程

Figure 2 The flow chart of electromagnetic time-reversal method for fault location

对于实际高压电缆线路,线路两端的护层电流为便于监测的电气量。高压单芯电缆横截面如图 3 所示,由于金属护层两端直接接地,其电场分布和磁场部分情况见图 3,能量在主绝缘层沿坡印廷矢量方向传播,因此,为监测线路短路故障情况下的能量变化特性,监测线芯电流或护层电流的效果相同。在短路故障情况下,“故障行波”的传播过程其实就是能量传播的过程,在沿线传播中,行波的能量会被正常损耗,当线路发生故障时,故障点位置的能量损耗最大。

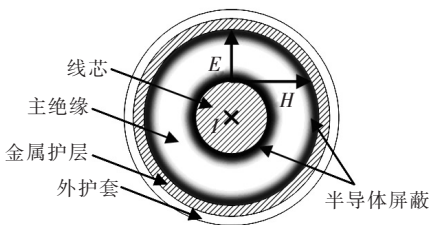


图 3 高压单芯电缆横截面

Figure 3 The cross-section of a high voltage single-core cable

2.1 短路故障信号频域表达式

设有一段如图 1 所示的电缆线路, A_1 和 A_2 两端的故障暂态信号反射系数^[22]为

$$\rho_i = \frac{Z_i - Z_c}{Z_i + Z_c}, i = 1, 2 \quad (7)$$

其中, $i=1$ 表示 A_1 端, $i=2$ 表示 A_2 端。为了简化分析,这里假设故障为一个 0 内阻的理想电压源 $U_f(\omega)$, 则故障点处的反射系数 $r_i = -1$; 另外, 设 γ 为线路传播系数, 其表达式为

$$\gamma(\omega) = \sqrt{(R_0 + j\omega L_0)(G_0 + j\omega C_0)} \quad (8)$$

式中 ω 为角频率; R_0 为传输线单位长度电阻; L_0 为传输线单位长度电感; G_0 为传输线单位长度电导; C_0 为传输线单位长度电容。

对于高压单芯电缆线路, 单位长度电容和电感表达式分别为

$$C_0 = \frac{2\pi\epsilon}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (9)$$

$$L_0 = \frac{\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (10)$$

式中 ϵ 为主绝缘的介电常数; μ 为磁导率; r_1 为线芯外半径; r_2 为主绝缘外半径。

线路终端 A_1 处的电压表达式如式(4), 线路终端 A_2 处的电压表达式为

$$U_{A_2}(\omega) = \frac{(1 + \rho_2) e^{-\gamma(L-x_f)}}{1 + \rho_2 e^{-2\gamma(L-x_f)}} U_f(\omega) \quad (11)$$

由式(4)、(11)可知, 线路两端的电压表达式均可写成与故障电压有关的表达式形式。因此, 对故障定位而言, 可以利用单端或双端故障信号进行定位。

2.2 基于双端电磁时域反演信号的故障定位应用

在理想情况下, 高压电缆金属护层的任意位置都可作为故障暂态信号的监测位置, 只需任意一个位置监测到了故障暂态信号即可进行故障定位。为不失完整性, 这里以双端信号监测为例。式(4)、(11)示出了线路终端监测信号的电压频域表达式。根据诺顿等效原理, 该电压信号可等效成反向注入的电流源信号, 等效电路如图 4 所示。

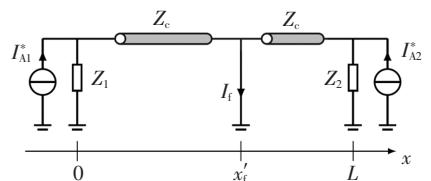


图 4 监测点信号注入等效电路

Figure 4 The schematic diagram of the equivalent injection signal at the monitoring point

图 4 中 U_{A1}^* 表示 U_{A1} 的共轭复数,即 U_{A1} 的时域反演信号, I_{A1}^* 表示在 A_1 端等效注入的电流信号;同理, U_{A2}^* 表示 U_{A2} 的共轭复数, I_{A2}^* 表示在 A_2 端等效注入的电流信号。

$$I_{A1}^* = \frac{U_{A1}^*(\omega)}{Z_1} \quad (12)$$

$$I_{A2}^* = \frac{U_{A2}^*(\omega)}{Z_2} \quad (13)$$

由于故障点不可预知,用 x'_f 表示猜测的故障点位置,则故障点电流与注入电流信号的关系为

$$I_{f1}(x'_f, \omega) = \frac{(1 + \rho_1) e^{-\gamma x'_f}}{1 + \rho_1 e^{-2\gamma x'_f}} I_{A1}^*(\omega) \quad (14)$$

$$I_{f2}(x'_f, \omega) = \frac{(1 + \rho_2) e^{-\gamma(L-x'_f)}}{1 + \rho_2 e^{-2\gamma(L-x'_f)}} I_{A2}^*(\omega) \quad (15)$$

将式(4)、(12)代入式(14),可得:

$$I_f(x'_f, \omega) = \frac{(1 + \rho_1)^2 e^{-\gamma(x'_f - x'_f)}}{Z_1(1 + \rho_1 e^{-2\gamma x'_f})(1 + \rho_1 e^{+2\gamma x'_f})} U_f^*(\omega) \quad (16)$$

将式(11)、(13)代入式(15),可得:

$$I_f(x'_f, \omega) = \frac{(1 + \rho_2)^2 e^{-\gamma(x'_f - x'_f)}}{Z_1(1 + \rho_2 e^{-2\gamma(L-x'_f)})(1 + \rho_2 e^{+2\gamma(L-x'_f)})} U_f^*(\omega) \quad (17)$$

因此,完整的故障信号 I_f 可以写为

$$I_f(x'_f, \omega) = I_{f1}(x'_f, \omega) + I_{f2}(x'_f, \omega) \quad (18)$$

实际情况中可能遇到监测点有限且对于多路信号定位会有同步精度的问题。因此,对于基于时域反演信号的故障定位方法实现单端故障定位具有实际意义。在等效电路图 4 中,假设只有 1 个监测点 ($x=0$ 或 $x=L$ 处),则监测点电流信号表达式为式(16)或(17),能量损耗的最大位置为短路故障发生的位置,即 $x=x_f$ 或 $x=L-x_f$ 处。在参考方向一致的情况下,能量损耗最大点一致,因此,用于故障定位时在任意一点监测故障信号即可。

2.3 短路故障信号的时域反演算法

时域反演法故障定位流程见图 2,该方法需要电缆线路的结构参数和网络拓扑参数,以用于传输线方程参数的计算,在线路终端合适的位置布置好高频电流传感器,当故障发生后,采集故障时域暂态信号 $s(t)$,由式(16)可知,在故障点位置,行波传输的能量消耗最大。根据式(10)可预设先验故障点位置 $x_{f,m}$, $m = 1, 2, \dots, K$,对不同先验故障位置点,

可计算出不同的故障电流能量。实际的故障监测信号为时域信号,设实际的故障记录时间为 T ,则时域反演信号为 $s(T-t)$,对于不同的先验故障位置,对应的故障电流能量^[23]为

$$\Gamma(x_{f,m}) = \sum_{j=1}^N i_{x_{f,m}}^2(j)^2, T = N\Delta t \quad (19)$$

式中 N 为实际采样点数; Δt 为采样时间间隔。

式(19)中计算得到的最大能量位置即为故障点,即

$$x_{f,\text{real}} = \arg \{ x_{f,m} \max \{ [\Gamma(x_{f,m})] \} \} \quad (20)$$

3 仿真分析

在如图 5 所示的高压电缆线路结构中,线路全长 500 m,结构参数如表 1 所示,设置故障点距离线路 A_1 端 300 m。

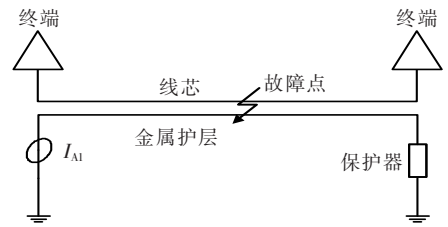


图 5 电缆线路结构

Figure 5 The schematic of a cable line topology

表 1 一种典型高压电缆线路的结构参数

Table 1 The structural parameters of a typical high voltage cable line

序号	结构	外半径/mm
1	导体线芯(铜)	17.0
2	导体屏蔽(半导电尼龙带)	18.4
3	主绝缘(超净化交联聚乙烯材料)	34.4
4	绝缘屏蔽(超光滑半导电屏蔽料)	39.4
5	金属护层(波纹铝)	43.9
6	外护套(聚乙烯)	48.6

该文利用 PSCAD 对 1 条 110 kV 电缆线路进行仿真,如图 6 所示,三相线路水平直埋敷设于地下;故障后在 A_1 端测到的故障暂态信号如图 7 所示;应用电磁时域反演法计算得到的线路各点故障能量损耗的归一化结果如图 8 所示,归一化能量最大点为距 A_1 端 278 m 处,与实际故障位置 300 m 偏差 7.3%;为进一步分析误差,使用同样的方法仿真分析 1 条 800 m 长的高压电缆线段,采样频率设

置为 100 MHz,故障电流归一化能量与猜测故障点位置 x_f 的关系如图 9 所示。

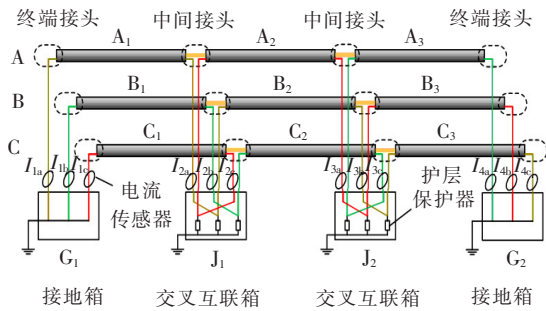


图 6 高压电缆交叉互联系统

Figure 6 The configuration of a cross-bonded HV cable system

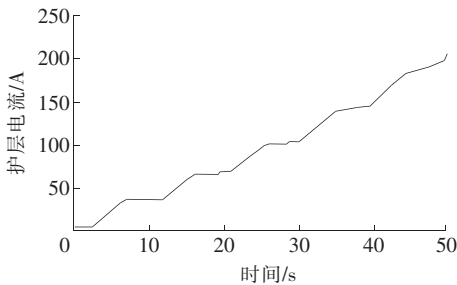


图 7 A_1 端测到的故障电流信号

Figure 7 The sheath current of I_{A1}

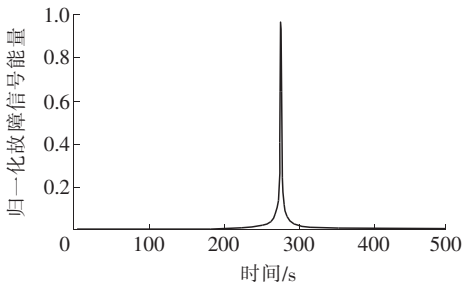


图 8 归一化故障电流能量与故障点位置 x_f 关系

Figure 8 Normalized energy of the sheath current signal as a function of x_f

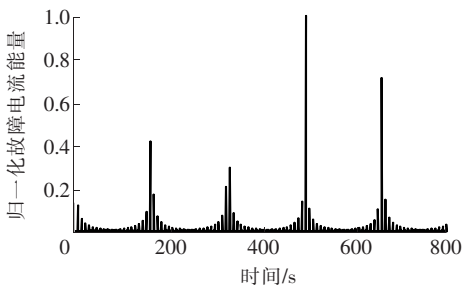


图 9 1 条 800 m 电缆上归一化故障电流能量与故障点位置 x_f 关系

Figure 9 Normalized energy of the sheath current signal as a function of x_f on a 800 m cable segment

在图 9 的仿真中,故障点位置设置在 $x_f = 500$ m 处,而归一化故障能量最大点在 497 m 处。由此可见,其定位精度优于图 7 中的定位精度。从理论上分析,虽然线路最大能量集中的位置就是故障点位置,但是故障定位的精度取决于能量在线路上传播的传递函数(式(14))。采样误差可能会导致不准确的快速傅里叶分析,并最终导致传递函数分析不准确。不同采样频率下的传递函数形式如图 10 所示,可以看出,传递函数 $f(x_f, \omega)$ 的表现形式随采样频率的变化差异很大,并且传递函数的形状并不平滑,呈草丛状形式。随着采样频率的增加,“草丛”更加密集。因此,出于故障定位精度和设备成本的综合考虑,建议实际应用中的采样频率在 10 MHz 及以上。

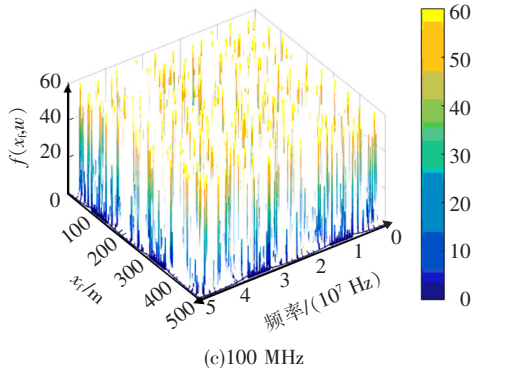
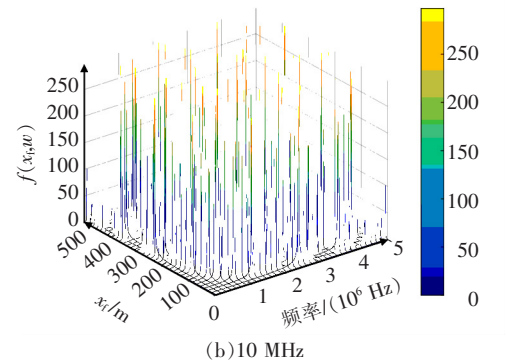
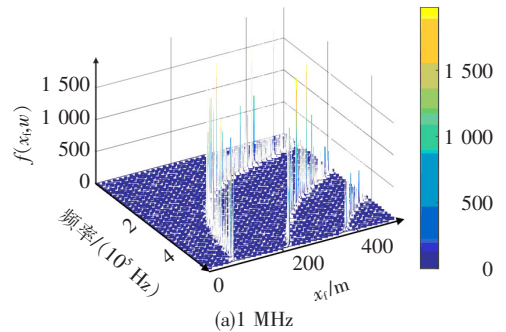


图 10 不同采样频率下传递函数表现形式

Figure 10 The electromagnetic transients transfer function $f(x_f, \omega)$ under different sampling rates

4 结语

该文提出了一种护层电流时域反演信号的高压电缆线路短路故障定位方法,该方法根据短路故障点能量最大的原理,在高压电缆的金属护层接地处提取护层电流并通过故障信号的传递函数计算出各猜测故障点位置的能量,能量最大点即故障点位置。

仿真结果表明:该方法能够有效地定位故障点位置,定位精度随采样频率的增加而增加,出于故障定位精度和设备成本的综合考虑,建议实际应用时的采样频率在 10 MHz 以上。

参考文献:

- [1] 刘金凯,梁永亮,郭宏,等. 脐带缆电缆故障电压行波相模分量特征分析及测距方法研究[J]. 供用电, 2021, 38(2): 19-25.
LIU Jinkai, LIANG Yongliang, GUO Hong, et al. Characteristic analysis of traveling wave phase mode component of umbilical cable fault voltage and research on fault location method[J]. Distribution & Utilization, 2021, 38(2): 19-25.
- [2] LI Mingzhen, ZHOU Wenjun, WANG Chunlin, et al. A novel fault localization method based on monitoring of sheath current in a cross-bonded HV cable system[C]// IEEE Electrical Insulation Conference, Baltimore, MD, USA, 2017.
- [3] 周承科,李明贞,王航,等. 电力电缆资产的状态评估与运维决策综述[J]. 高电压技术, 2016, 42(8): 2353-2362.
ZHOU Chengke, LI Mingzhen, WANG Hang, et al. Review of condition assessment and maintenance strategy of power cable assets[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(8): 2353-2362.
- [4] 蒋原,李擎,冯茜,等. 基于 BP 神经网络的直流电网故障定位与保护方法[J]. 高压电器, 2020, 56(8): 23-28.
JIANG Yuan, LI Qing, FENG Qian, et al. Fault location and protection method for DC power grid based on BP neural network[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(8): 23-28.
- [5] 李福志,郑卫宾,张文海,等. 基于回路直流电阻测量的输电线路单相接地故障离线故障定位[J]. 中国电力, 2021, 54(2): 140-146.
LI Fuzhi, ZHENG Weibin, ZHANG Wenhai, et al. Fault path direct-current resistance based off-line single-phase-to-ground fault location [J]. Electric Power, 2021, 54(2): 140-146.
- [6] 赵尊慧,郑柒拾,孙廷玺,等. 基于光纤脉冲传输的海缆故障测距系统及方法[J]. 电测与仪表, 2020, 57(10): 24-29.
ZHAO Zunhui, ZHENG Qishi, SUN Tingxi, et al. Submarine cable fault location system and method based on optical fiber pulse transmission[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(10): 24-29.
- [7] Eissa M. Ground distance relay compensation based on fault re-sistance calculation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 29(4): 1830-1835.
- [8] 刘洋,曹云东,侯春光. 基于经验模态分解及维格纳威尔分布的电缆双端故障定位算法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(16): 4086-4093.
LIU Yang, CAO Yundong, HOU Chunguang. The cable two-terminal fault location algorithm based on EMD and WVD[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(16): 4086-4093.
- [9] 张安安,周志通,庄景泰,等. 基于行波瞬时振幅的高压直流输电线路故障测距方法研究[J]. 智慧电力, 2020, 48(2): 78-84.
ZHANG Anan, ZHOU Zhitong, ZHUANG Jingtai, et al. Fault location method of HVDC transmission line based on traveling wave instantaneous amplitude[J]. Smart Power, 2020, 48(2): 78-84.
- [10] 孙广,王阳,薛枫,等. 特高压直流输电线路改进双端行波故障定位方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(14): 113-120.
SUN Guang, WANG Yang, XUE Feng, et al. Research on an improved double-terminal traveling wave fault location method for UHVDC project[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(14): 113-120.
- [11] 张怿宁,孟令军,王越杨,等. 基于非接触式行波采集的分布式高压直流故障测距方法[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(4): 55-59.
ZHANG Yining, MENG Lingjun, WANG Yueyang, et al. A fault location method for distributed HVDC high

- resistance fault based on non-contact traveling wave collecting[J]. *Power System and Clean Energy*, 2020, 36(4):55-59.
- [12] De Aguiar R A, Dalcastagnê A L, Zürn H H, et al. Impedance-based fault location methods: Sensitivity analysis and performance improvement[J]. *Electric Power Systems Research*, 2018, 155:236-245.
- [13] Dashti R, Daisy M, Shaker H R, et al. Impedance-based fault location method for four-wire power distribution networks[J]. *IEEE Access* 2018, 6:1342-1349.
- [14] Gabr M A, Ibrahim D K, Ahmed E S, et al. A new impedance-based fault location scheme for overhead unbalanced radial distribution networks[J]. *Electrical Power Systems Research*, 2017, 142:153-162.
- [15] 曾祥君, 邓丰, 李泽文, 等. 基本信息融合的故障行波定位网络算法[J]. *电力科学与技术学报*, 2009, 24(1): 38-43.
ZENG Xiangjun, DENG Feng, LI Zewen. Fault traveling wave location network algorithms based on basic information fusion[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2009, 24(1):38-43.
- [16] 张健, 王奕, 曾祥君, 等. 基于多端行波到达时差的配电网故障选线方法[J]. *电力科学与技术学报*, 2016, 31(4):51-57.
ZHANG Jian, WANG Yi, ZENG Xiangjun. Distribution network fault line selection method based on multi-terminal traveling wave arrival time difference [J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2016, 31(4):51-57.
- [17] Chen R, Lin T, Bi R, et al. Novel strategy for accurate locating of voltage sag sources in smart distribution networks with inverter-interfaced distributed generators[J]. *Energies*, 2017, 10:1885.
- [18] Fink M. Time reversal of ultrasonic fields. I. Basic principles[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control*, 1992, 39(5): 555-566.
- [19] Daisy M, Dashti R. Single phase fault location in electrical distribution feeder using hybrid method[J]. *Energy*, 2016, 103:356-368.
- [20] Deng X, Yuana R, Xiaob Z, et al. Fault location in loop distribution network using SVM technology[J]. *Electrical Power Energy Systems*, 2015, 65:254-261.
- [21] Wedepohl L M, Nguyen H V, Irwin G D. Frequency-dependent transformation matrices for untransposed transmission lines using Newton-Raphson method[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1996, 11(3): 1538-1546.
- [22] 邱关源. 电路[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 279-300.
- [23] LI Mingzhen, ZHOU Chengke, ZHOU Wenjun, et al. A novel fault location method for a cross-bonded HV cable system based on sheath current monitoring[J]. *Sensors*, 2018, 18(10):3356.