

基于护层环流特征的高压电缆外护套接地故障带电定位方法研究

黄俊松¹, 李亚美², 徐党国², 李 原³, 周 凯³, 陈 龙¹

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 国网冀北电力有限公司电力科学研究院, 北京 100054; 3. 四川大学电气工程学院, 成都 610065)

摘要: 为提升高压电缆外护套接地故障的检测效率与定位精度, 解决传统定位方法依赖停电操作、定位延迟及实施复杂度高问题, 提出一种基于护层环流特征的带电定位方法。以单端保护接地与交叉互联接地方式为例, 理论分析护层电流形成机理, 基于 PSCAD/EMTDC 搭建三相单芯电缆电磁暂态模型并验证其准确性; 通过模拟外护套接地故障动态过程, 分析护层电流随故障位置变化的分布特性; 采用多项式拟合法建立护层电流—故障位置特征方程, 结合直接接地端电流反演故障位置, 实现实时带电定位。工程案例验证了方法的可行性, 单端接地系统仅需单点电流测量即可定位, 交叉互联系统通过两端电流同步监测实现故障段判别及故障定位, 无须停电且操作复杂度低, 所提方法为高压电缆外护套接地故障的在线检测与快速定位提供了有效技术参考, 具有重要工程应用价值。

关键词: 高压电缆; 护层环流; 接地故障; 特征方程; 带电定位

Research on Live Positioning Method of High-voltage Cable Outer Sheath Grounding Fault Based on Sheath Circulating Current Characteristics

Huang Junsong¹, Li Yamei², Xu Dangguo², Li Yuan³, Zhou Kai³, Chen Long¹

(1. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Hubei Yichang 443002, China; 2. State Grid Jibei Electric Power Company Limited, Electric Power Research Institute, Beijing 100054, China; 3. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: To enhance the detection efficiency and positioning accuracy of high-voltage cable outer sheath grounding fault, and address the limitations of traditional positioning methods that rely on power outage operation, positioning delay and high implementation complexity, a live positioning method based on sheath circulating current characteristics is proposed. Taking single-ended protective grounding and cross-connected grounding as examples, the formation mechanism of sheath current is analyzed theoretically, and the electromagnetic transient model of three-phase single-core cable is built and validated based on PSCAD/EMTDC. By simulating the dynamic process of the outer sheath grounding fault, the distribution characteristics of the sheath current varying with the fault location are analyzed. A polynomial fitting method is employed to establish the sheath current-fault location characteristic equation, which, combined with current inversion at the direct grounding end, enables real-time online fault location. Engineering case studies have verified the feasibility of the proposed method. For single-end grounding systems, fault location can be achieved through single-point current measurement, while cross-connected systems require synchronous current monitoring at both ends to identify fault sections and determine precise locations, without power outage and low operation complexity. The proposed method provides an effective technical reference for on-line detection and rapid location of high-voltage cable outer sheath grounding fault, and has important engineering application value.

Key words: high-voltage cable; sheath circulation; grounding fault; characteristic equation; live positioning

0 引言

高压电缆作为现代电力传输系统的核心组件^[1], 以其输送容量大、占地空间小等优势广泛应用于城市电网和海上风电等领域^[2-3]。然而电缆外护套在长期运行中易受机械损伤、化学腐蚀等因素影响,

导致护层接地故障频发。此类故障不仅会引发护层环流异常增大, 加速绝缘层老化甚至击穿, 还可能诱发局部过热、缓冲层烧蚀等连锁反应, 严重威胁电网供电可靠性与设备安全^[4-6]。因此, 开发高效、精准的接地故障带电定位方法, 对提升电缆运维水

基金项目: 湖北省输电线路工程技术研究中心(三峡大学)开放基金项目(2024KXL08)。

Project Supported by Hubei Transmission Line Engineering Technology Research Center (China Three Gorges University) Open Fund Project(2024KXL08).

平、保障电力系统稳定运行具有重要工程意义^[7]。

近年来高压电缆护层环流研究深化,通过护层电流监测技术可有效识别电缆故障,为运维管理提供理论依据^[8-10]。文[11]提出基于金属护层环流的外护套绝缘电阻在线监测方法,通过建立环流计算模型并分析电压—电流关系,实现单端接地与交叉互联系统的绝缘状态评估。文[12]提出温升诊断法,通过电流变化引发的温升差异评估状态,三相温升及温差特征为多相电缆在线监测提供了支撑。文[13]基于高压电缆在线监测数据,将监测线路分为三组,选取护层电流有效值和护层—线芯电流比作为故障特征参数,结合特征量变化趋势进行故障判别。文[14]提出基于分布式电流传感网络的交叉互联电缆故障诊断方法,通过接地系统关键节点协同测量实现阻性电流分离,精准辨识主绝缘劣化、护层开路与接头击穿故障。可见,护层电流在电缆绝缘监测及故障诊断方面具有良好的研究,但基于其实现故障定位的研究较少。

在电缆故障的在线定位领域,目前提出的人工智能算法、行波法和阻抗法是三大主要的方法。人工智能算法^[15-16]通过测量数据结合优化算法完成定位,但其应用需依赖大规模数据集,导致实际工程部署存在局限性。行波法^[17-18]通过测量行波传播时间定位,理论上不受故障类型和过渡电阻影响,但实际存在波速衰减、波形畸变及首波头易受干扰等问题。阻抗法^[19-20]依据阻抗与长度比例原理,通过电压电流计算距离,但易受过渡电阻影响且依赖精确的线路参数。

针对高压电缆外护套破损导致的接地故障问题,文中提出一种基于护层环流特征的新式带电定位方法。首先,分别建立感应电流与泄漏电流数学模型,理论推导护层电流的形成机制;其次,基于PSCAD/EMTDC 仿真平台构建电缆电磁暂态模型,通过仿真结果对比验证模型准确性;最后,通过拟

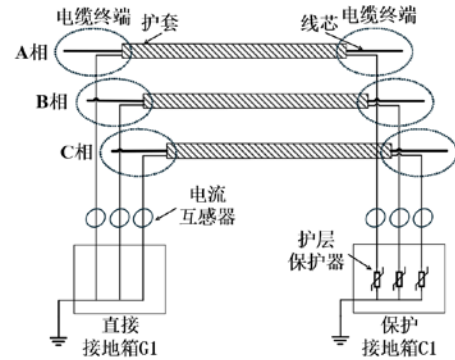
合护层电流与故障位置分布特征方程,结合直接接地端测量电流实现故障定位。与传统方法以及相较于现有护层电流研究多局限于故障诊断相比,本方法突破波形衰减与参数依赖的限制,建立护层电流空间分布特征与故障位置的量化模型,且该方法无须停电操作,操作简单,显著降低了设备成本与实施复杂度,案例分析验证了想法的可行性,为有效在线识别电缆故障提供了价值参考。

1 电缆接地方式

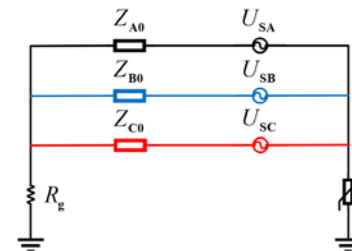
现行电缆较为普遍的接地方式主要包括单端保护接地方式和交叉互联接地方式^[21]。

1.1 单端保护接地方式

单端保护接地方式及等效电路见图 1,电缆一端金属护套经直接接地箱 G1 直接接地,另一端经保护接地箱 C1 由护层保护器接地,两端均安装电流互感器监测护层电流。



(a) 单端保护接地方式结构示意图



(b) 单端保护接地方式等效电路图

图 1 单端保护接地方式及其等效电路

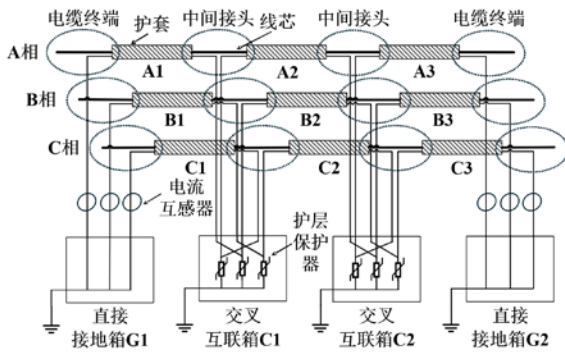
Fig. 1 Single-ended protection grounding mode and its equivalent circuit

正常工作状态下,工频感应电压主要由导体电

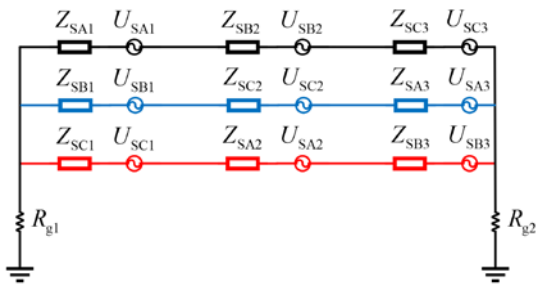
流交变磁场耦合到金属护层产生，因保护器高阻抗及泄漏电流微小，电流幅值较低。然而，当外护套发生接地故障时，故障点与 G1 端形成低阻抗通路，护层电流将急剧增大，威胁电缆安全。

1.2 交叉互联接地方式

交叉互联接地方式见图 2(a)，该接地方式将 A、B、C 三相电缆分为了 A1、A2、A3、B1、B2、B3、C1、C2、C3 共 9 个小段，通过将三相电缆金属护套按特定顺序交叉连接并分段接地，形成以 A1-B2-C3、B1-C2-A3 和 C1-A2-B3 为路径的护层回路，有效抑制护层感应电压，其等效电路见图 2(b)。理想情况下，各回路感应电压因相位差叠加后为 0，环流为 0。



(a) 交叉互联接地方式结构示意图



(b) 交叉互联接地方式等效电路图

图 2 交叉互联接地方式及其等效电路

Fig. 2 Cross-connected grounding mode and its equivalent circuit

但实际因敷设方式差异、负载电流不均，感应电势无法完全抵消，形成护层环流。外护套接地故障时，回路对称性破坏，护层电流同样会增大，威胁电缆运行。

2 理论模型与仿真分析

2.1 单芯电缆护层电流形成机制

单端保护接地方式 A 相护层接地故障时，根据图 3 所示故障等效电路，故障点至接地端护层电流受故障电阻 R_f 、左侧护层阻抗 Z_{S1} 及首端接地电阻 R_g 共同影响。

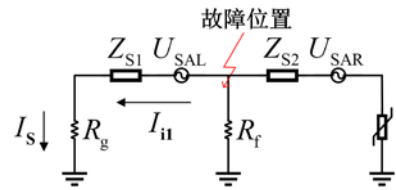


图 3 单端保护接地方式护层接地缺陷等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of grounding defect of single-ended protection grounding mode

故障点至直接接地侧电缆段的泄漏电流会发生分流，分别往直接接地侧和故障点流通，左右泄漏电流分量 I_{CA1} 和 I_{CA2} 为：

$$I_{CA1} = (Z_{S12} + R_f) I_C / (R_g + Z_{S1} + R_f) \quad (1)$$

$$I_{CA2} = (Z_{S11} + R_g) I_C / (R_g + Z_{S1} + R_f) \quad (2)$$

$$Z_{S1} = Z_{S11} + Z_{S12} \quad (3)$$

式(1)-(3)中： I_C 为总泄漏电流； Z_{S1} 为故障点左侧护层阻抗； Z_{S11} 和 Z_{S12} 分别为泄漏电流分流点左右护层阻抗。

故障回路感应电流 I_{i1} 为

$$I_{i1} = U_{SAL} / (R_g + Z_{S1} + R_f) \quad (4)$$

式(4)中， U_{SAL} 为故障点至电缆首端护层感应电压，包括线芯对护层感应电压和护层对护层的感应电压两部分。可由式(5)给出

$$U_{SAL} = -j\omega(I_A L_{AA} + (I_B + I_{i2}) M_{AB} + (I_C + I_{i3}) M_{AC}) l \quad (5)$$

式(5)中： I_A 、 I_B 和 I_C 为三相电缆的负载电流； I_{i2} 和 I_{i3} 为护层电流； L_{xx} 为单位长度的 x 相电缆线芯对该相金属护层的互感系数； M_{xy} 为单位长度的

x 相线芯(护层)对 y 相护层的互感系数; l 为电缆长度。

首端直接接地箱处测量的接地电流 I_S 应为:

$$I_S = I_{CA1} + I_{i1} = [(Z_{S1R} + R_f)I_C + U_{SAL}] / Z_{t0} \quad (6)$$

$$Z_{t0} = R_g + Z_{S1} + R_f \quad (7)$$

交叉互联接地方式护层接地故障下, 根据图 4 所示护层回路 A1-B2-C3 故障等效电路。A1 段流向左右两侧的泄漏电流 I_{CA11} 和 I_{CA12} :

$$I_{CA11} = (Z_{SA12} + R_f)I_C / Z_{t1} \quad (8)$$

$$I_{CA12} = (Z_{SA11} + R_{g1})I_C / Z_{t1} \quad (9)$$

$$Z_{t1} = R_{g1} + Z_{SA11} + Z_{SA12} + R_f \quad (10)$$

式(8)-(10)中: Z_{SA11} 和 Z_{SA12} 分别为 A1 段泄漏电流分流点左右护层阻抗; R_{g1} 为首端接地电阻。

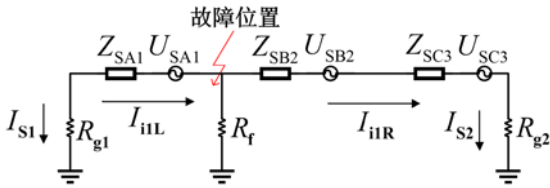


图 4 交叉互联接地方式护层接地缺陷等效电路

Fig. 4 Equivalent circuit of grounding defect in cross-connected grounding mode

根据等效电路模型图 4, 回路的护层感应电流可分解为以下两部分:

$$I_{i1L} = U_{SA1} / (R_{g1} + Z_{SA1} + R_f) \quad (11)$$

$$I_{i1R} = (U_{SB2} + U_{SC3}) / Z_{t2} \quad (12)$$

$$Z_{t2} = R_{g2} + Z_{SB2} + Z_{SC3} + R_f \quad (13)$$

式(11)-(13)中: I_{i1L} 和 I_{i1R} 分别为故障点左右护层回路感应电流; Z_{SA1} 、 Z_{SB2} 和 Z_{SC3} 分别为 A1、B2 和 C3 段护层阻抗; U_{SA1} 、 U_{SB2} 和 U_{SC3} 分别为 A1、B2 和 C3 段护层感应电压, 同式(5)计算可得。

接地故障导致首末端接地箱电流 I_{S1} 和 I_{S2} 呈现非对称分布:

$$I_{S1} = I_{CA11} - I_{i1L} \quad (14)$$

$$I_{S2} = I_{i1R} + I_{CB22} + I_{CC32} - I_{CB21} - I_{CC31} \quad (15)$$

通过对单端接地和交叉互联接地护层环流的理论分析, 即通过式(6)、(14)、(15)可知, 接地电流主要由泄漏电流和感应电流构成, 其中感应电流又包含线芯对护层感应电流和护层对护层感应电流两部分。当电缆长度恒定, 负载电流的变化主要对感应电流产生影响, 而当电缆长度发生变化时, 泄漏电流和感应电流都将随着长度的变化而变化。进而后文需分析不同负载电流、不同接地故障位置下护层环流的变化规律。进而探明某一时刻, 即负载电流确定情况下, 故障位置与护层环流的相对关系。

2.2 PSCAD 仿真分析

2.2.1 仿真模型

仿真以 220 kV 型号为 ZC-YJLW03-Z-1×1600 的高压电缆为研究对象, 基于 PSCAD/EMTDC 搭建单端保护接地方式和交叉互联接地方式外护套接地故障分析模型。电缆敷设方式为品字形敷设, 相间距 0.3 m, 见图 5, 单端保护接地方式电缆总长度为 500 m, 交叉互联接地方式电缆总长度为 1 500 m, 其交叉互联每小段电缆的长度为 500 m; 电缆的关键参数见表 1; 电缆模型为频率相关(相位)模型。

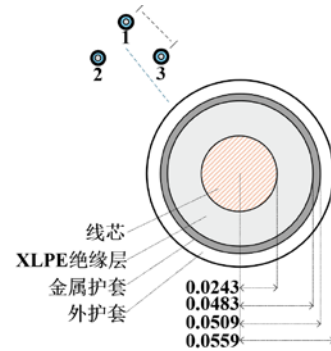


图 5 电缆排列方式及结构示意图

Fig. 5 Cable arrangement and structure diagram

表 1 220 kV 电缆主要参数

Table 1 Main parameters of 220 kV cable

电缆参数	数值
线芯直径/mm	48.6
主绝缘标称厚度/mm	24.0
金属护层标称厚度/mm	2.6
外护套标称厚度/mm	5.0

线芯电阻率/($\Omega \cdot \text{m}$)	1.724×10^{-8}
金属护层电阻率/($\Omega \cdot \text{m}$)	2.826×10^{-8}
主绝缘相对介电常数	2.5
系统频率/Hz	50.0

仿真模型见图 6，单端保护接地系统首端直接接地，末端经护层保护器接地；交叉互联接地系统

三段交叉连接，互联点经护层保护器接地。故障点模拟为金属护套与地之间的低阻抗通路，沿电缆长度以 0.05 km 为步长设置，负载采用阻性负载。仿真模型包含电源模块、接地、电缆本体、护层保护器、故障开关模块及测量单元。

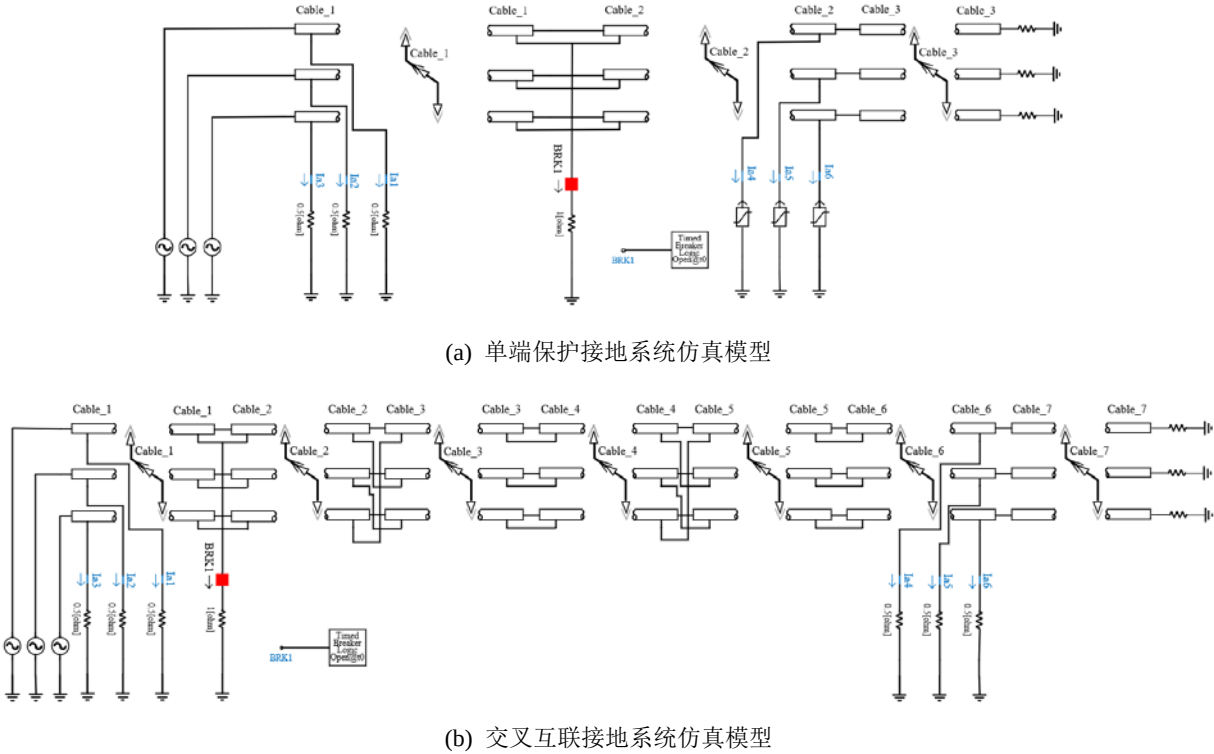


图 6 接地系统仿真模型

2.2.2 仿真结果与理论计算对比

以单端保护接地系统进行分析，理论感应电压 U_s 由式(5)计算给出。仿真值在 PSCAD 模型中直接提取护层电压值 U_{s0} ， $l=500$ m 时理论计算与仿真计算的结果对比见表 2，最大相对误差为 3.79%，在电力工程允许的误差范围内。

表 2 感应电压理论值与仿真值对比

Table 2 Comparison of theoretical value and simulation value of induced voltage

负载电流/A	U_s /V	U_{s0} /V	相对误差/%
500	29.31	28.20	3.79
600	35.17	33.87	3.70
700	41.04	39.51	3.73
800	46.88	45.17	3.65
900	52.74	50.81	3.66

单端保护接地系统接地电流理论值 I_s 由式(6)、(7)计算，仿真结果通过测量直接接地端 G1 电流 I_{s0} 获取，负载电流为 600 A 时不同故障位置接地电流的对比结果见表 3，理论值同仿真值吻合度较好，最大相对误差 4.95%。理论计算与仿真数据的一致性验证表明，该模型在感应电压和故障电流分布方面具有较高的可靠性，为不同运行负载电流情况下护层电流—故障位置特征曲线的拟合提供了可靠的数据基础。

表 3 护层电流理论值与仿真值对比

Table 3 Comparison of theoretical value and simulation value of sheath current

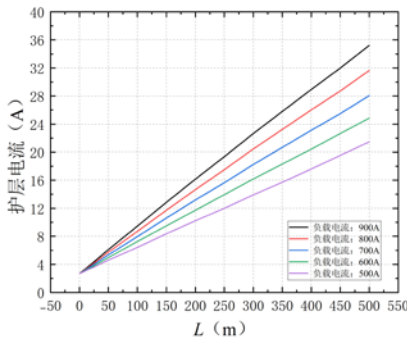
故障位置/m	I_s /A	I_{s0} /A	相对误差/%
50	5.055	4.985	1.38

100	7.399	7.260	1.88
150	9.743	9.512	2.37
200	12.088	11.729	2.97
250	14.432	13.946	3.37
300	16.777	16.179	3.56
350	19.121	18.305	4.27
400	21.465	20.443	4.76
450	23.810	22.653	4.86
500	26.154	24.858	4.95

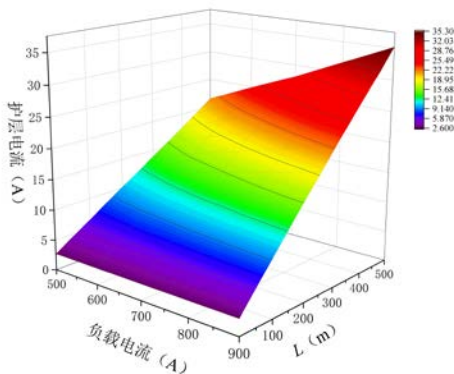
3 故障定位算法与数学模型

3.1 护层电流—故障位置特征关系

由图 6 搭建的单端保护接地和交叉互联接地仿真模型在负载电流为 500、600、700、800、900 A 时进行仿真。通过仿真结果可以获得分布特性关系图见图 7、8，其中 $L=0$ m 位置为电缆首端，故障位置为故障点距离首端的长度。由于电缆采用品字型敷设且三相对称，图 7、8 示仅展示代表性 A 相和 A1-B2-C3 回路的特性。



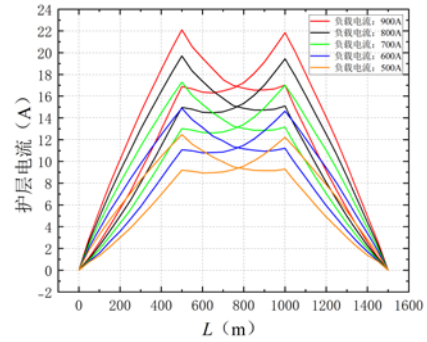
(a) 单端保护接地护层电流—故障位置特征曲线



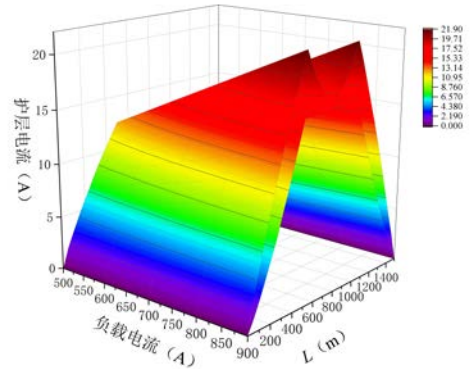
(b) 单端保护接地护层电流—故障位置特征曲面

图 7 单端保护接地方式护层接地故障

Fig. 7 Single-ended protection grounding mode sheath grounding fault



(a) 交叉互联接地护层电流—故障位置特征曲线



(b) 交叉互联接地护层电流—故障位置特征曲面

图 8 交叉互联接地方式护层接地故障

Fig. 8 Grounding fault of cross-connected grounding mode

针对单端保护接地系统，通过图 7(a)所示分布特性关系图可以看出，不同负载电流情况下护层电流幅值与故障位置均呈现显著的近似线性单调递增规律。当故障点由直接接地端向远端移动时，护层电流幅值不断上升。值得注意的是，由图 7(b)可以看出，无论负载电流在何值时，每一故障位置对应唯一的护层电流幅值，其映射关系具备严格的单射特性。

该现象的理论本质在于单端接地系统中故障回路的简化结构，如图 3 所示。当外护套在距离首端接地位置 L 处发生接地故障时，故障点与首端接地 $G1$ 形成低阻抗回路。此时，流经 $G1$ 的接地电流 I_S 主要由故障点左侧感应电压 U_{SAL} 和泄漏电流 I_{CA1}

驱动，其值由式(6)、(7)。

对于均匀电缆，单位长度护层阻抗 z 恒定，故 $Z_{t0} = l \times z + R_g + R_f$ 。同时由式(5)可知感应电压 U_{SAL} 与长度 l 成正比。代入可得：

$$I_{t1} = U_{SAL} / Z_{t0} = U_s / [z + (R_g + R_f) / l] \quad (16)$$

式(16)中， U_s 为单位长度感应电动势。

电缆正常运行，某一时刻电流的大小是确定的， U_s 的大小可知，又由于 z 、 R_g 和 R_f 恒定，则随着电缆长度 l 的增加 I_{t1} 呈非线性增加。而对于电缆泄漏电流计算方式可由式(17)给出：

$$I_c = j\omega C U l \quad (17)$$

$$C = 2\pi\epsilon_0\epsilon / \ln[(D_c + 2\Delta) / D_c] \quad (18)$$

式(17)、(18)中： U 为运行电压； D_c 是电缆导线的直径； Δ 是电缆的绝缘体厚度； ϵ 为电缆绝缘材料的相对介电常数； ϵ_0 为真空介电常数。

从图 7 可见，泄漏电流 I_c 随 l 线性增加。再由于随着长度的增加流向首端的泄漏电流分流也会增大，导致总的接地电流随着长度的增加呈现出近似线性的增长趋势。此变化趋势使得单端电流测量即可实现对故障距离的确定性反演，且无须额外引入其他参数。

交叉互联接地系统的护层电流分布则受三相电磁耦合与分段交叉结构的综合影响，分布特性与单端接地方式存在明显差别。

当故障发生于 A1-B2-C3 回路时，首末两端接地电流由式(14)、(15)给出，式(14)、(15)中感应电流占主导分量，其中感应电流分量计算方式为：

$$I_i = U_{\Sigma l} / Z_{\Sigma l} \quad (19)$$

$$U_{\Sigma l} = U_{SA1} \angle 0^\circ + U_{SB2} \angle -120^\circ + U_{SC3} \angle 120^\circ \quad (20)$$

$$Z_{\Sigma l} = Z_{A1} + Z_{B2} + Z_{C3} \quad (21)$$

各段感应电压及阻抗满足：

$$\begin{cases} U_{SA1} = k_v I_k \cdot \min(l, l_A) \\ U_{SB2} = k_v I_k \cdot \max(0, \min(l - l_A, l_B)) \\ U_{SC3} = k_v I_k \cdot \max(0, l - l_A - l_B) \end{cases} \quad (22)$$

$$Z_{SA1} = z \cdot \min(l, l_A) \quad (23)$$

$$Z_{SB2} = z \cdot \max(0, \min(l - l_A, l_B)) \quad (24)$$

$$Z_{SC3} = z \cdot \max(0, l - l_A - l_B) \quad (25)$$

相位差导致合成电压 $U_{\Sigma l}$ 幅值随 l 呈分段非线性变化。由于系统对称性，首末两端接地电流呈现对称分布的特点。

分段非线性变化和系统对称性导致定位结果存在理论多解性。然而，通过同步监测两端电流幅值的相对关系，可有效辨识故障点所处的电缆段及故障点。当故障点靠近某一接地端时，由图 8(a)可以看出该端电流幅值显著高于对侧，其差值随故障距离的增大呈规律性变化，为故障段的快速判别提供了辅助依据。此外，由图 8(b)可知在不同负载电流情况下，护层电流与故障位置也均满足同样的规律。

分析上述护层电流—故障位置特征曲线，可以发现单端接地方式护层电流与故障位置存在明显的近似线性映射关系，交叉互联接地方式护层电流与故障位置则存在明显的分段非线性映射关系，利用此相互关系均可建立高精度的定位模型。

3.2 故障定位算法实现

由负载电流为 600 A 时仿真得出的数据采用最小二乘多项式拟合法进行方程拟合。该方法的原理是寻找一个多项式函数，使其在给定故障位置点集上的函数值与仿真数据值之间的误差平方和最小。设故障位置点为 $x_i (i=1, 2, \dots, N)$ ，对应的仿真护层电流值为 y_i ，拟合的多项式函数为 $f(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_m x^m$ 。最小二乘法的目标即确定系数 $a_0, a_1, \dots, a_m$ ，使得目标函数 $S = \sum_{i=1}^N [y_i - f(x_i)]^2$ 达到最小值。通过求解由目标

函数对各系数求偏导并令其为零得到的正规方程组，即可获得最优拟合系数。

对于单端保护接地系统，护层电流与故障位置的分布特性近似线性单调递增，通过拟合得到方程式(26)

$$I_{Si} = \alpha + \beta L \quad 0 < L \leq 500 \quad (26)$$

式(26)中：\$L\$ 为故障距离；\$i = a, b, c\$；\$\alpha = 0.26814\$；\$\beta = 0.06101\$。

如图 9 所示，拟合曲线与仿真数据高度重合，最大相对误差低于 0.1%，证明拟合方程逼近分布特性曲线，能反映护层电流与故障位置的分布特性。基于此，在故障定位过程中仅需测量直接接地端 G1 的护层电流值，将其代入相应特征方程即可直接反演故障位置 \$L\$，无须额外参数或复杂计算。

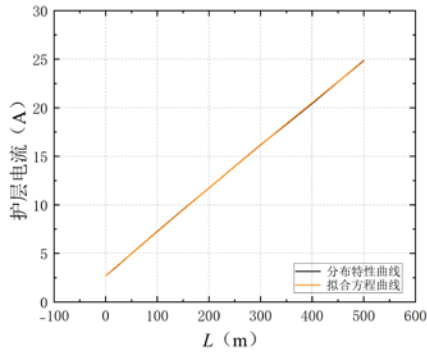


图 9 单端保护接地方式拟合效果对比

Fig. 9 Comparison of fitting effect of single-ended protection grounding mode

交叉互联接地系统的护层电流分布受三相耦合与分段结构影响，其特性更为复杂。不同电缆段的护层电流随故障位置变化呈现分段特征。因此采用分段最小二乘多项式拟合策略，分别建立两端的分布特征方程：

$$I_{Si1} = \begin{cases} \alpha_1 + \beta_1 L_1 + \gamma_1 L_1^2 & 0 \leq L_1 < 500 \\ \alpha_2 + \beta_2 L_1 + \gamma_2 L_1^2 & 500 \leq L_1 < 1000 \\ \alpha_3 + \beta_3 L_1 + \gamma_3 L_1^2 & 1000 \leq L_1 \leq 1500 \end{cases} \quad (27)$$

$$I_{Si2} = \begin{cases} \alpha_4 + \beta_4 L_2 + \gamma_4 L_2^2 & 0 \leq L_2 < 500 \\ \alpha_5 + \beta_5 L_2 + \gamma_5 L_2^2 & 500 \leq L_2 < 1000 \\ \alpha_6 + \beta_6 L_2 + \gamma_6 L_2^2 & 1000 \leq L_2 \leq 1500 \end{cases} \quad (28)$$

式(27)、(28)中：\$I_{1i}\$ 和 \$I_{2i}\$ 分别表示电缆首端和尾端直接接地处的接地电流；\$i = a, b, c\$；\$\alpha_1 = 0.17554\$，\$\beta_1 = 0.03665\$，\$\gamma_1 = -1.46894 \times 10^{-5}\$；\$\alpha_2 = 31.35733\$，\$\beta_2 = -0.04598\$，\$\gamma_2 = 2.58745 \times 10^{-5}\$；\$\alpha_3 = 53.77077\$，\$\beta_3 = -0.05587\$，\$\gamma_3 = 1.33510 \times 10^{-5}\$；\$\alpha_4 = -0.02611\$，\$\beta_4 = 0.01548\$，\$\gamma_4 = 1.38487 \times 10^{-5}\$；\$\alpha_5 = 21.78758\$，\$\beta_5 = -0.03521\$，\$\gamma_5 = 2.80337 \times 10^{-5}\$；\$\alpha_6 = 28.44607\$，\$\beta_6 = -0.00360\$，\$\gamma_6 = -1.02193 \times 10^{-5}\$。

拟合曲线与仿真数据的对比结果见图 10，从图 10 可见曲线形态高度一致，且残差分布均匀，拟合效果良好。

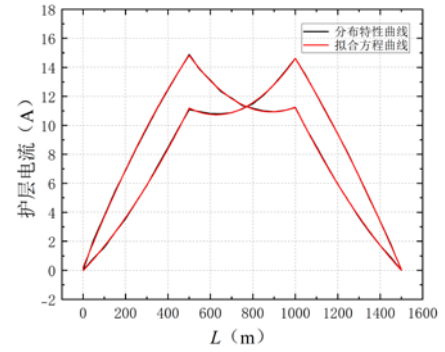


图 10 交叉互联接地方式拟合效果对比

Fig. 10 Comparison of fitting effects of cross-connected grounding modes

在此系统下，故障定位需同步测量两端接地箱的护层电流，通过对测量电流的比对分析确定电缆段，然后将电流值分别代入对应的拟合方程，进而求解故障距离。

上文对护层电流-故障位置特征关系的分析旨在探明两接地系统护层电流与故障位置的分布关系，提出的基于护层环流特征的带电定位方法重点在于通过探明的关系拟合出护层电流与故障位置的特征方程，然后将测量电流带入特征方程求解实现故障位置的确定。式中参数 \$\alpha\$、\$\beta\$ 和 \$\gamma\$ 会随着负载电流、电缆长度和接地方式等主要影响因素而变化。但实际电缆长度和接地方式可以确定，通过搭建与实际电缆相对应的仿真模型，由仿真数据拟合

不同负载电流情况下的分布特征方程，参数将得到确定。

4 工程案例

4.1 案例概况

运维检修人员在开展对某 220 kV 变电站例行巡检作业期间，对电力电缆外护层接地系统进行了专项检测。检测数据显示负载电流运行在 224.11 A 时，三相接地回路电流存在显著差异：A 相与 B 相分别测得 6.81 A 和 6.73 A，均处于正常波动范围，而 C 相测量值却高达 19.10 A，呈现明显异常特征，数据见表 4。根据《电力设备预防性试验规程》^[22]关于电缆护层电流的技术标准，结合三相电流的严重不平衡现象，技术人员推断 C 相电缆外护套极可能存在绝缘性能下降或破损情况。

表 4 护层电流运检数据

Table 4 Sheath current inspection data

电压等级 /kV	负载电流 /A	护层电流/A		
		A 相	B 相	C 相
220	224.11	6.81	6.73	19.10

本段 220 kV 高压电缆线路全长 780 m，作为区域电网核心联络通道，承担着两座 220 kV 变电站间的电能传输任务。线路起始端位于站内电缆终端架构，末端延伸至站外 1 号终端塔。该电缆选用 ZC-YJLW03-Z-1×1600 型交联聚乙烯绝缘结构，于 2010 年 4 月正式投入运行，全线配置 1 组中间连接接头。敷设方案综合采用直埋敷设与电缆沟槽相结合的方式，在中间接头位置实施金属护层直接接地，两端终端则配置护层保护器进行接地保护，具体情况见图 11。

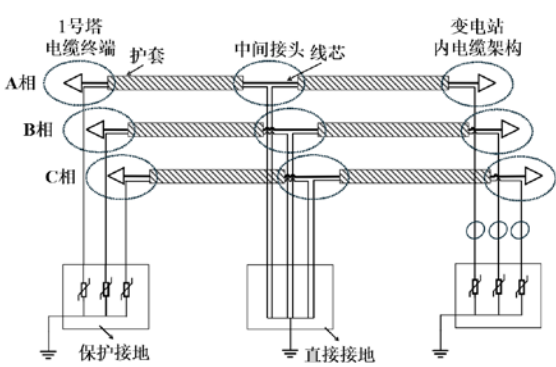


图 11 电缆线路的具体情况

Fig. 11 The specific circumstances of the cable line

停电后，通过清理电缆沟槽段和直埋敷设段覆土，采用传统定位方法对故障进行检测，发现 A 相电缆在中间接头两侧距离相近位置分别存在 1 处外护套接地故障，由于两故障点距中间接头距离近似相等且故障点接地电阻近似相等，故障点分布在同一相电缆上，故障电流向量叠加近似为零，相比正常运行时接地点测量电流变化不明显。而 C 相电缆检测后发现距离塔侧 36 m 处存在 1 处外护套接地故障，如图 12 所示，外护套破损导致金属护套与大地形成了低阻抗接地，进而护层电流明显异常。



图 12 C 相电缆外护套故障

Fig. 12 C phase cable outer sheath fault

4.2 案例验证

结合该段电缆实际参数、接地及敷设方式，在 PSCAD 中搭建该电缆运行仿真模型，接地故障通过时控开关模块进行模拟。电缆正常运行时，测量三相电缆中间直接接地点回路电流值分别为 A 相 6.65 A、B 相 6.63 A、C 相 6.64 A，见表 5，A 相和 B 相电流同运检过程中测量的实际值相近，说明仿真模型较好地模拟出实际电缆。

表 5 正常运行时护层电流数据

Table 5 Data of sheath current in normal operation

电压等级/kV	负载电流/A	护层电流/A		
		A 相	B 相	C 相
220	224.11	6.65	6.63	6.64

以恒定步长控制故障模块从塔侧至中间接地点

进行故障模拟，保持负载电流为实际测量值 224.11 A 的条件下，记录每个模拟故障位置对应的中间接地点 C 相护层环流仿真值。利用这些数据点，应用最小二乘多项式拟合法，拟合出该特定电缆段的特征方程，拟合方程如(29)式所示，拟合所得特征曲线见图 13。

$$I_{SC} = \alpha + \beta L \quad 0 < L \leq 400 \quad (29)$$

式(29)中： $\alpha=24.722\ 33$ ； $\beta=-0.055\ 59$ 。

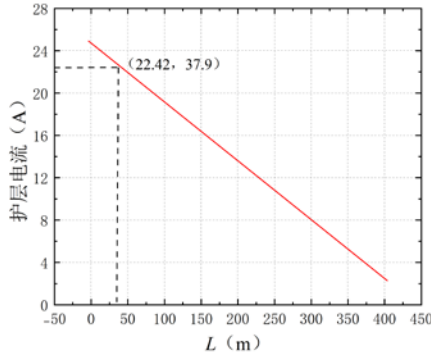


图 13 塔侧至中间接地点特征曲线及故障定位
Fig. 13 Tower side to middle indirect location characteristic curve and fault location

经测量及仿真可知站内侧至中间接地点的泄漏电流为 $I_{C站} = 3.32\text{ A}$ ，由于站内侧至中间接地点正常运行时流向接地点的电流只有泄漏电流，且两侧护层位于电缆同一相，产生的电流同相位，可直接进行幅值计算，等效电路见图 14，根据等效电路及下式计算出故障点流向接地点的回路电流 $I_{护}$ 为 22.42 A。

$$I_{总} = I_{C塔2}'' + I_{C站} + I_{i塔} \quad (30)$$

$$I_{护} = I_{C塔2}'' + I_{i塔} \quad (31)$$

式(30)、(31)中： $I_{总}$ 为实际测量时中间接地点

的电流值 19.10 A； $I_{C塔2}''$ 为故障点与中间接地点段电缆流向中间接地点的泄漏电流； $I_{i塔}$ 为故障点流向中间接地点的感应电流； $I_{护}$ 为故障点流向中间接地点的护层回路电流。

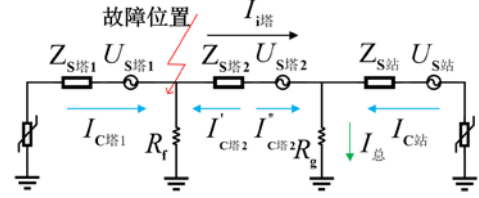


图 14 C 相电缆故障等效电路

Fig. 14 C phase cable fault equivalent circuit

将计算得到的回路电流值带入拟合方程求得故障距离 $L = 37.90\text{ m}$ ，其在塔侧至中间接地点分布特性曲线上的映射结果见图 13。

由特征方程反演计算出的故障位置同实际情况吻合较好，相对误差 5.01%，考虑到电缆敷设环境的复杂性、土壤参数的不均匀性、邻近效应、测量误差以及模型的必要简化，此误差处于工程可接受的精度范围内。

通过该工程案例的完整验证流程，从仿真模型构建到故障参数反演，再到定位结果与实际故障的比对，充分证明了基于护层环流特征的带电定位方法能够有效应用于实际电缆线路的外护套接地故障检测，为工程实践提供了可操作的技术路径。

5 结论

针对高压电缆外护套接地故障定位难题，文中提出了一种基于护层环流特征的带电定位方法，通过理论分析、仿真建模与实验验证，揭示了护层环流与故障位置的定量关联规律，通过建立的数学模型实现了高精度、低成本的实时故障定位。主要研究创新点与结论如下：

1)提出利用护层电流与故障位置关联关系的带电检测方法，根据接地箱测量电流及建立的数学模型实现电缆运行状态的实时判断与故障位置的检测。

2)揭示了单端保护接地与交叉互联接地方式下护层电流的分布规律：单端接地系统中护层电流与故障距离呈近似线性递增关系，交叉互联系统因三相电磁耦合与分段结构呈现分段非线性特性。

3)实现了高压电缆外护套接地故障的免停电实时定位，单端系统仅需单点电流测量即可直接反演故障位置，交叉互联系统通过两端电流幅值及差异锁定故障位置，工程案例验证表明其复杂度低、设备成本低，为电缆护层接地故障的检测提供了经济高效的技术手段。

参考文献：

- [1] 吴春芳, 陈云, 黄韬, 等. 电力电缆状态感知与检测技术研究综述[J]. 高压电器, 2024, 60(10): 86-103.
Wu Chunfang, Chen Yun, Huang Tao, et al. Overview of condition sensing and detection technology for power cables[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(10): 86-103.
- [2] 马国明, 秦炜淇, 王思涵, 等. 海底电缆状态分布式光纤监测技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(1): 370-387.
Ma Guoming, Qin Weiqi, Wang Sihan, et al. Review of submarine cable condition monitoring based on distributed optical fiber sensing[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(1): 370-387.
- [3] 孙瑞娟, 梁军, 王克文, 等. 海上风电集电系统研究综述[J]. 电力建设, 2021, 42(6): 105-115.
Sun Ruijuan, Liang Jun, Wang Kewen, et al. Overview of offshore wind power collection system[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(6): 105-115.
- [4] 迟鹏, 梁睿. 基于知识蒸馏与注意力机制的电缆故障可扩展化诊断研究[J]. 高电压技术, 2025, 51(11): 5460-5471.
Chi Peng, Liang Rui. Research on scalable diagnosis of cable faults based on knowledge distillation and attention mechanism[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(11): 5460-5471.
- [5] 刘福源, 王航, 夏湛然, 等. 交叉互联高压电缆护层保护器故障对同回路两端护层电流相量差的影响[J]. 高电压技术, 2023, 49(3): 1244-1253.
Liu Fuyuan, Wang Hang, Xia Zhanran, et al. Influence of the sheath voltage limiter fault on the sheath current phasor difference between the two ends in the same sheath loop in cross-bonded HV cables[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(3): 1244-1253.
- [6] Xin Yue, Jiang Lei, Zhao Xiyuan, et al. Cause analysis of aging ablation on sheath of 110 kV single core high voltage cable[C]//2019 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), 2019: 162-165.
- [7] 王晓卫, 魏春燕, 王毅钊, 等. 基于护层接地线电流和分段 TKEO 的电缆早期故障检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(13): 47-58.
Wang Xiaowei, Wei Chunyan, Wang Yizhao, et al. Early fault detection method for cables based on sheath grounding current and segmented TKEO[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(13): 47-58.
- [8] Yu Jianli, Gu Shanmao, Xu Guosheng, et al. Calculation of metal sheath circulating currents in multi-circuit power cables laid in tunnels[J]. Ain Shams Engineering Journal, 2025, 16(7): 103408.
- [9] 刘博, 郭卫, 及洪泉, 等. 高压电缆外护层破损演进与护层环流相关性研究[J]. 电网与清洁能源, 2025, 41(5): 22-29.
Liu Bo, Guo Wei, Ji Hongquan, et al. A study on the correlation between damage evolution of outer protective layer and sheath circulation of high voltage cables[J]. Power System and Clean Energy, 2025, 41(5): 22-29.
- [10] 张程华, 王丰润, 刘博, 等. 同隧道并行电缆交叉互联护层错位分段对金属护层电流的影响[J/OL]. 高压电器, 1-11[2026-06-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1127.tm.20250312.1012.002.html>.
Zhang Chenghua, Wang Fengrun, Liu Bo, et al. Influence of cross-bonded parallel cable joints in the same tunnel on the current of metal sheath[J/OL]. High Voltage Apparatus, 1-11[2026-06-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1127.tm.20250312.1012.002.html>.
- [11] 王春坡, 周凯, 孟鹏飞, 等. 基于金属护层环流的高压电缆外护套绝缘电阻在线监测方法[J]. 绝缘材料, 2024, 57(7): 112-120.
Wang Chunpo, Zhou Kai, Meng Pengfei, et al. Online monitoring method for insulation resistance of high-voltage cable outer sheath based on metal sheath circulation current[J]. Insulating Materials, 2024, 57(7): 112-120.
- [12] 潘文霞, 谢晨, 赵坤, 等. 计及护层环流的电缆温升分析与故障定位方法研究[J]. 电机与控制学报, 2021,

- 25(1): 38-45.
- Pan Wenxia, Xie Chen, Zhao Kun, et al. Cable temperature rise analysis and fault location considering sheath circulation[J]. Electric Machines and Control, 2021, 25(1): 38-45.
- [13] Li Z, Du B, Li W. Evaluation of high-voltage AC cable grounding systems based on the real-time monitoring and theoretical calculation of grounding currents[J]. High voltage, 2018, 3(1): 38-43.
- [14] 朱 博, 于晓洋, 田立刚, 等. 基于阻性电流和护层电流的交叉互联电缆绝缘监测及诊断[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(2): 79-88.
- Zhu Bo, Yu Xiaoyang, Tian Ligang, et al. Insulation monitoring and diagnosis for cross-bonded cables based on resistive and sheath current[J]. Electric Machines and Control, 2023, 27(2): 79-88.
- [15] 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.
- [16] 何 潜, 李渠佳, 邓 炎, 等. 有源配电网异名相两点接地故障测距算法[J/OL]. 电力自动化设备, 1-13[2026-06-10]. [https : //doi.org/10.16081/j.epae.202503001](https://doi.org/10.16081/j.epae.202503001).
- He Qian, Li Qujia, Deng Yan et al. A fault location algorithm for two-point grounding fault of non-identical phase in active distribution network[J/OL]. Electric Power Automation Equipment, 1-13[2026-06-10]. [https : //doi.org/10.16081/j.epae.202503001](https://doi.org/10.16081/j.epae.202503001).
- [17] 刘鹏辉, 马梦磊, 戴瑜兴, 等. 基于行波时序特征的双端直流输电线路故障测距[J/OL]. 电网技术, 1-9[2026-06-10]. [https : //link.cnki.net/urlid/11.2410.TM.20250802.1912.004](https://link.cnki.net/urlid/11.2410.TM.20250802.1912.004).
- Liu Penghui, Ma Menglei, Dai Yuxing et al. Fault location of dual-terminal dc transmission lines based on time series characteristics of traveling waves[J/OL]. Power System Technology, 1-9[2026-06-10]. [https : //link.cnki.net/urlid/11.2410.TM.20250802.1912.004](https://link.cnki.net/urlid/11.2410.TM.20250802.1912.004).
- [18] Chen Haohao, Li Jing, Chen Ping. Design of fault location algorithm based on online distributed travelling wave for HV power cable[J]. PLoS One, 2024, 19(1): e0296513.
- [19] 齐 郑, 黄朝晖, 陈艳波. 基于零序分量的阻抗法配电网故障定位技术[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(6): 54-62.
- Qi Zheng, Huang Chaohui, Chen Yanbo. Impedance fault location technology for a distribution network based on a zero-sequence component[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 54-62.
- [20] 斯 捷, 陈 植, 赵 建, 等. 基于阻抗谱的电力电缆绝缘缺陷诊断函数故障定位与状态评估方法研究[J]. 电测与仪表, 2025, 62(7): 217-224.
- Si Jie, Chen Zhi, Zhao Jian, et al. Research on fault location and state evaluation method of diagnostic function for power cable insulation defects based on the impedance spectrum[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(7): 217-224.
- [21] GB 50217—2018 电力工程电缆设计标准[S].
- GB 50217—2018 Standard for design of cables of electric power engineering[S].
- [22] DL/T 596—1996 电力设备预防性试验规程[S].
- DL/T 596—1996 Rules of preventive tests for electric power equipment[S].
- 黄俊松(2001—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为高压电缆试验检测及故障诊断分析(E-mail: hjs108725@163.com)。
- 李亚美(1989—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事方向为高压开关、电缆类设备的试验检测、缺陷诊断及状态评价工作(通信作者)(E-mail: liyamei1228@163.com)。
- 徐党国(1974—), 男, 硕士研究生, 正高级工程师, 主要从事方向为高压开关、电力电缆类设备试验检测及科学研究(E-mail: xu_dangguo@163.com)。
- 李 原(1991—), 男, 博士研究生, 副教授, 主要研究方向为固液复合绝缘放电理论、油浸式电力设备绝缘状态诊断评估等(E-mail: hvliyuan@scu.edu.cn)。
- 周 凯(1975—), 男, 博士研究生, 教授, 主要研究方向为高电压绝缘材料、电气设备检测与故障诊断(E-mail: zhoukai_scu@163.com)。
- 陈 龙(1989—), 男, 博士研究生, 副教授, 主要研究方向为变压器剩磁模拟、无线电能传输技术、电工磁材料磁性测量与模拟(E-mail: chenlong@ctgu.edu.cn)。