

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.04.020

交叉互联接地高压电缆金属护层回路电阻高精度求解方法

陈腾彪¹, 林清杰², 李栋², 赵伟利¹, 雷达¹, 胡力广¹, 唐志国²

(1. 深圳供电局有限公司, 广东 深圳 518000; 2. 华北电力大学高压与电磁兼容北京市重点实验室, 北京 102206)

摘要: 高压电力电缆是电能传输的重要设备,金属护层系统是保障高压电缆正常运行的重要组成部分。交叉互联接地高压电缆的三相金属护层之间存在电磁耦合,为护层接地回路电阻的高精度求解带来了困难。为此,文中针对交叉互联接地的高压电缆,提出了采用异频信号激励的金属护层回路电阻带电检测方法,研究了交叉互联接地方式下电缆金属护层接地回路的等效电路模型,分析了三相金属护层各部分回路间的电磁耦合关系;采用对称分量法建立了回路的去耦等效电路模型,消除了耦合电感对回路电阻求解带来的影响,保证了带电条件下检测电缆金属护层接地回路电阻的求解精度,并通过仿真验证了模型的正确性与有效性。

关键词: 高压电缆; 金属护层接地回路; 去耦等效; 交叉互联接地; 回路电阻

High Precision Calculation Method for Loop Resistance of Metallic Sheath in Cross-linked Grounding High-voltage Cables

CHEN Tengbiao¹, LIN Qingjie², LI Dong², ZHAO Weili¹, LEI Da¹, HU Liguang¹, TANG Zhiguo²

(1. Shenzhen Power Supply Bureau Co., Ltd., Guangdong Shenzhen 518000, China; 2. Beijing Key Laboratory of High Voltage and EMC, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: High voltage power cable is an important equipment for power transmission, and metal sheath system is an important part to ensure normal operation of high voltage power cables. The electromagnetic coupling is existed between the three-phase metal sheaths of high-voltage cable, which makes it difficult to solve the resistance of the grounding circuit with high precision. Therefore, for high-voltage cables with cross-linked grounding in this paper, a method to detect the resistance of metal sheath circuit with hetero frequency signal excitation is proposed, the equivalent circuit model of cable metal sheath grounding circuit under cross-linked grounding mode is studied and the electromagnetic coupling relationship between each part of the three-phase metal sheath circuit is analyzed. The symmetric component method is used to set up the decoupling equivalent circuit model of the loop, which eliminates the influence of the coupling inductance on the loop resistance solution, ensures the solving precision of the loop resistance of the metal sheath grounding circuit for live detection of power cable. Moreover, both correctness and effectiveness of the model are verified by simulation.

Key words: high voltage cable; loop circuit of the metal sheath; decoupled equivalent circuit; cross-linked grounding; loop resistance

0 引言

随着中国城市化进程的加快,高压电力电缆的

投运量不断增加。由于电缆运行环境复杂,面临着高温潮湿、蚊虫撕咬等威胁,加之安装施工不规范及外破等因素的存在,极易导致金属护套破损、铅

收稿日期:2025-09-15; 修回日期:2025-11-27

基金项目:南方电网公司科技项目(110 kV 及以上电压等级高压电力电缆接地回路故障带电检测与定位新技术)。

Project Supported by Science and Technology Project of Southern Power Grid of China(New Technology for Detecting and Locating Grounding Circuit Faults in High-voltage Power Cables of 110 kV and Above Voltage Class).

封开裂、进水锈蚀、多点接地等各种缺陷发生,造成绝缘老化和甚至发生绝缘击穿故障,近年来金属护层系统缺陷引发电缆故障的概率在不断增加^[1-4]。高压电缆金属护层的状态关系着设备的安全可靠性和使用寿命,影响着电力系统的安全稳定运行^[5-8]。

目前针对高压电缆接地回路检测的手段包括接地环流检测、超声波和涡流探伤等^[9]。其中,电缆接地环流检测是目前应用最广泛的针对护层接地回路运行状态的检测手段,能够发现护层电流异常工况,对于交叉互联接线错误、护层多点接地、护层保护器失效等缺陷具有一定的指示作用^[10]。由于护层环流成因复杂,是一个受温度、负荷多因素影响的电气量,目前主流的对环流数据的利用主要局限于数值比较,对于故障、异常、缺陷的判定指标较为模糊,无法通过环流检测直接判断电缆接地回路电气连接情况,具有一定局限性^[11]。红外测温技术能够直观快捷地发现护层接触不良^[12]、终端进水受潮等部分缺陷并指示发热点位置,但是难以发现较为隐蔽的发热缺陷,对于早期轻微缺陷并不敏感。涡流探伤技术能够无损探测电缆金属护层表面的一些缺陷,比如裂纹、孔洞等可能导致接触不良的缺陷,但是难以发现金属内部的开裂、砂眼等缺陷^[13],存在检测能力不足的缺点。因此,已有手段因上述各种原因,难以满足当前电缆运维的高可靠性要求。

为此,文中提出了基于异频激励的高压电缆金属护层接地回路电阻的带电检测方法,建立了交叉互联接地方式下电缆金属护层接地回路的等效电路模型;采用对称分量法构建了回路的去耦等效电路模型,消除了互感对回路电阻求解带来的影响,提出了电缆金属护层接地回路电阻高精度求解方法,并通过仿真对比的方式验证了模型的正确性与有效性。

1 交叉互联接地高压电缆金属护层回路电阻带电检测方法

1.1 高压电缆交叉互联接地方式

高压电力电缆在运行时线芯导体中通过的电流将在电缆周围产生磁场并在缆芯周围的金属护层之间形成感应电动势^[14],此时如果形成回路则会产生感应电流,引起电阻性损耗进而导致电缆温升和载流量的下降,因此要求电缆金属护层与大地之间要保持可靠的电气连接,将作为零电位参考点的大地与金属护层相连,使金属护层电位降为零^[15]。

交叉互联接地主要应用于长度超1 km的电缆线路^[16]。一个完整的交叉互联段会将三相电缆尽可能均匀地分成3段,线芯经中间接头相连,然后对护层进行交叉换位,三相护层接地线通过同轴电缆在交叉互联接地箱分别按A₁-B₂-C₃、B₁-C₂-A₃、C₁-A₂-B₃方式连接,最终使得每个交叉互联段的回路总感应电动势矢量和趋于零^[17],接线较为复杂,分段长度均匀时对环流及感应电压的抑制效果较为理想^[18]。电缆交叉互联接地示意图见图1。图1中,R_{G1}-R_{G4}分别为电缆首端、中间接头护层保护器和末端接地电阻。

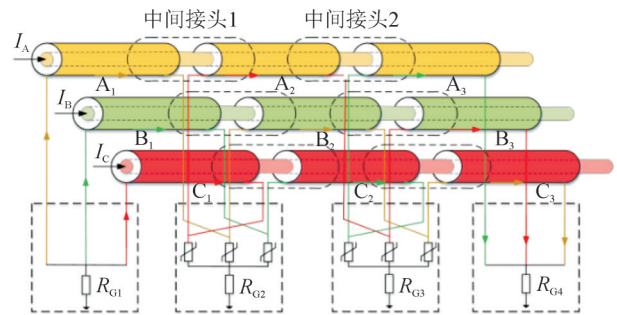


图1 电缆交叉互联接地示意图

Fig. 1 Cable cross-linked grounding diagram

1.2 高压电缆接地回路电阻异频注入带电检测法

高压电缆运行时其金属护层交叉互联接地回路中会流过工频环流,其主要成分为电磁感应环流分量^[19]。接地环流主要由线芯流过的负荷电流激励产生,与负荷电流的大小密切相关;同时还受到回路拓扑及参数的影响^[20]。为避开电缆运行过程中的接地回路工频感应电流的影响,文中提出了一种基于异频信号注入的高压电缆接地回路电阻带电检测方法。该方法通过开合铁心式线圈向电缆护层接地回路中注入异频激励信号,通过测量三相护层回路的异频电流响应,根据注入电压与相应电流信号的幅值和相位求解出回路电阻参数,进而判断全回路运行状态是否存在异常,实现电缆接地回路电阻的带电检测,其原理电路见图2。

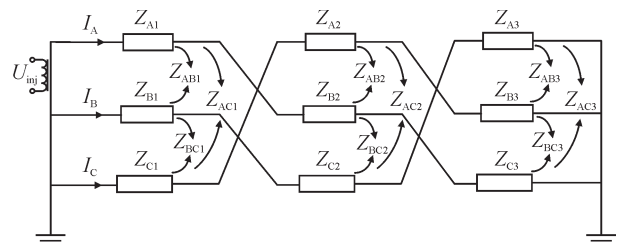


图2 高压电缆接地回路电阻异频注入检测法电路原理图

Fig. 2 Circuit diagram for the hetero-frequency injection method of high-voltage cable grounding circuit resistance

图2中: U_{inj} 为注入到开合式线圈的异频电压; Z_A 、 Z_B 、 Z_C 为电缆护层回路自阻抗 Z_L , 包含了护层电阻 R_s 及护层自感 L_s ; Z_{AB} 、 Z_{BC} 、 Z_{AC} 为护层回路互阻抗 Z_M , 由护层间互感 M 构成; I_{sa} 、 I_{sb} 、 I_{sc} 为电缆三相护层回路电流。电缆交叉互联接地方式下的护层接地回路接线复杂^[21]。

高压电缆金属导体截面示意图见图3, S_A 、 S_B 、 S_C 分别表示三相护层; γ_s 为护层半径; l_1 、 l_2 、 l_3 为三相导体之间的距离。

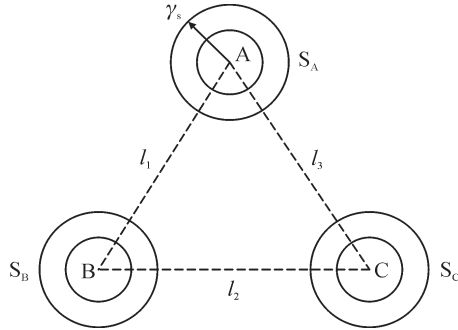


图3 电缆截面示意图

Fig. 3 Cable section diagram

单位长度三相电缆护层感应电势与护层回路电流之间的关系为

$$\begin{cases} U_{sa} = (R_{sa} + j\omega L)I_{sa} + j\omega M_{ab}I_{sb} + j\omega M_{ac}I_{sc} + I_g R_g \\ U_{sb} = (R_{sb} + j\omega L)I_{sb} + j\omega M_{ab}I_{sa} + j\omega M_{bc}I_{sc} + I_g R_g \\ U_{sc} = (R_{sc} + j\omega L)I_{sc} + j\omega M_{ac}I_{sa} + j\omega M_{bc}I_{sb} + I_g R_g \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: U_{sa} 、 U_{sb} 、 U_{sc} 为异频注入下单位长度的三相护层回路感应电势; R_{sa} 、 R_{sb} 、 R_{sc} 为三相护层电阻; R_g 为大地电阻; L 为三相护层自感; M_{ab} 、 M_{bc} 、 M_{ac} 为三相护层互感; I_{sa} 、 I_{sb} 、 I_{sc} 为三相护层电流; I_g 为三相护层入地电流。

$$I_g = I_{sa} + I_{sb} + I_{sc} \quad (2)$$

式(2)表明护层回路自阻抗与本回路护层电流的乘积对应于护层回路自感电势, 护层回路互阻抗与其余两相护层电流乘积则对应于护层回路间的互感电势。

单位长度护层回路的自感阻抗 Z_L 及异相护层间的互感阻抗 Z_M 的表达式为

$$\begin{cases} Z_L = -\frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{De}{\gamma_s}\right) \\ Z_{ab} = -\frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{De}{l_1}\right) \\ Z_{bc} = -\frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{De}{l_2}\right) \\ Z_{ac} = -\frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{De}{l_3}\right) \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中: De 为大地回路等值深度, 与土壤电阻率及信号强度有关; μ_0 为真空磁导率, H/m; ω 为异频注入信号的角频率, rad/s。

2 护层回路去耦等效电路模型

2.1 交叉互联接地回路去耦等效原理

高压电缆护层回路间存在电磁, 各回路间的互阻抗参数需要根据电缆的敷设方式、相对位置及所处交叉互联段的不同进行整合计算, 才能得到较为准确的求解模型^[22]。由于含有回路耦合电感的护层等效电路模型求解参数众多、求解过程繁琐, 需要更多的已知参量才能实现未知参数的求解, 不利于提高求解速度与求解精度。因此需要在不改变回路电压电流关系的前提下, 调节电感参量在回路间的合理分布消除回路间的互感耦合, 最终得到去耦等效电路以实现回路电阻的高效高精度求解。

首先采用对称分量法^[23]可以将不对称的三相护层电流分解为正、负、零序电流分量, 电流分量流过对应的回路阻抗产生对应的正、负、零序阻抗电压。通过分别研究对称分量作用下的护层回路特征及非对称分量作用下的护层回路模型, 两者结合后即可确定电缆护层交叉互联接地回路的固有特性, 进而得到其去耦等效电路, 简化回路电阻参数的求解过程, 实现了地回路参数的同步求解, 提升了求解结果的完备性。

对 A 相护层电流进行对称分量法的变换后可以得到三序分量, 同时得到其他两相护层电缆的三序分量的特征为

$$\begin{cases} I_{b(1)} = I_{a(1)} e^{-j120^\circ} \\ I_{c(1)} = I_{a(1)} e^{j120^\circ} \\ I_{b(2)} = I_{a(2)} e^{j120^\circ} \\ I_{c(2)} = I_{a(2)} e^{-j120^\circ} \\ I_{a(0)} = I_{b(0)} = I_{c(0)} \end{cases} \quad (4)$$

式(4)式中: $I_{a(0)}$ 、 $I_{b(0)}$ 、 $I_{c(0)}$ 为三相电流的零序分量, A; $I_{a(1)}$ 、 $I_{b(1)}$ 、 $I_{c(1)}$ 为三相电流的正序分量, A, 其中 $I_{b(1)}$ 滞后 $I_{a(1)}$ 120° , $I_{c(1)}$ 超前 $I_{a(1)}$ 120° ; $I_{a(2)}$ 、 $I_{b(2)}$ 、 $I_{c(2)}$ 为三相电流的负序分量, A, 其中 $I_{b(2)}$ 超前 $I_{a(2)}$ 120° , $I_{c(2)}$ 超前 $I_{a(2)}$ 120° 。

正序电流分量与负序电流分量均具有三相对称的特性, 其电流相量和为零, 这意味着在护层接地回路中正序入地电流及负序入地电流均为零, 因此在分析时暂时去除地回路的操作并不会影响三相护层回路参数的求解, 据此可以得到简化等效电

路见图4。

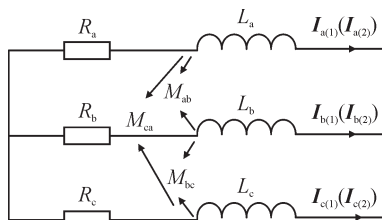


图4 解耦前去耦等效电路

Fig. 4 Decoupled before decoupled equivalent circuit

对回路进行两两解耦处理,方法为先对其中两相的电磁耦合进行解耦,得到的等效电路图见图5、6。

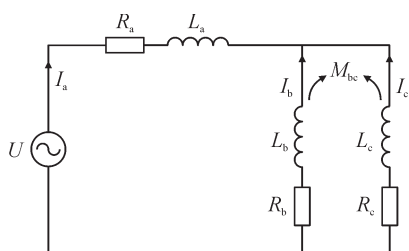


图5 两相去耦前等效电路

Fig. 5 Pre-decoupled equivalent circuit

图5、6的电压电流关系可表示为:

$$\begin{cases} U = (R_a + j\omega L_a)I_a - (R_b + j\omega L_b)I_b - j\omega M_{bc}I_c \\ U = (R_a + j\omega L_a)I_a - (R_c + j\omega L_c)I_c - j\omega M_{bc}I_b \\ I_a + I_b + I_c = 0 \end{cases} \quad (5)$$

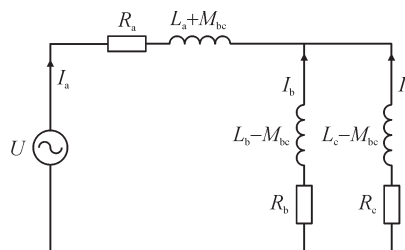


图6 两相去耦后等效电路

Fig. 6 Two phase decoupled equivalent circuit

$$\begin{cases} U = [R_a + j\omega(L_a + M_{bc})]I_a - [R_b + j\omega(L_b - M_{bc})]I_b \\ U = [R_a + j\omega(L_a + M_{bc})]I_a - [R_c + j\omega(L_c - M_{bc})]I_c \\ I_a + I_b + I_c = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式(5)、(6)分别为图5、6所对应的回路电压电流方程,根据上述变换过程,分别对 ac、ab 两相回路间存在的相间耦合进行解耦等效变换,最终完全消除三相回路间存在的电磁耦合关系^[24]。

上述等效变换原理应用于交叉互联接地护层回路等效电路的解耦中,将完整的交叉互联接地回路分为三个小段,每段均包含有三相护层支路,对每个小段分别进行去耦等效变换,根据各段之间的关系串联得到护层接地回路的去耦等效电路,完整电路见图7、8。

将上述正负序分量下的解耦变换应用于零序分量时的护层等效电路中,等效电路见图9、10。

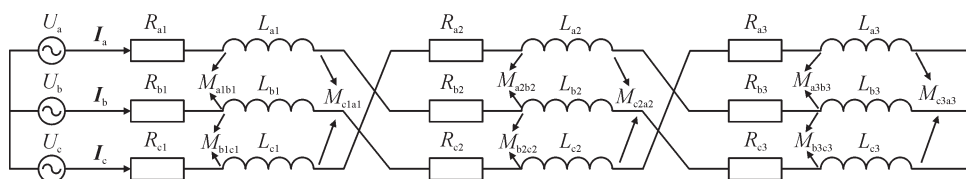


图7 正负序电流分量作用下交叉互联接地对应护层简化等效电路(解耦前)

Fig. 7 Simplified equivalent circuit of cross-connected grounding corresponding sheath under positive and negative sequence current components(before decoupling)

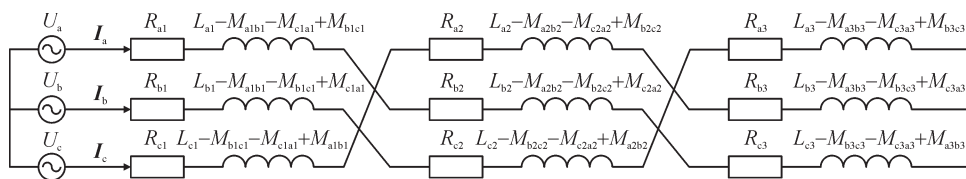


图8 正负序电流分量作用下交叉互联接地对应护层解耦等效电路(解耦后)

Fig. 8 Decoupled equivalent circuit corresponding to sheath for cross-connected grounding under positive and negative sequence current components(after decoupling)

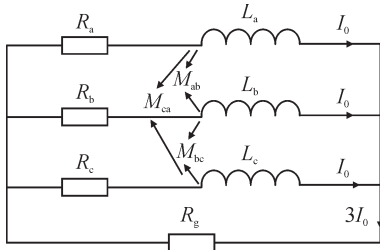


图9 零序电流分量作用下去耦前护层等效电路

Fig. 9 Decoupled front protector equivalent circuit under zero sequence current component

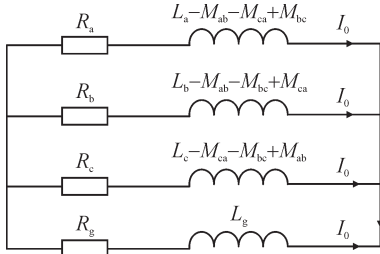


图10 零序电流分量作用下去耦后护层等效电路

Fig. 10 The decoupled rear protective layer equivalent circuit under zero sequence current component

对于零序分量而言,三相护层流过的零序电流相同,对应入地电流为三倍的单相零序电流^[25],零序电流流过对应护层阻抗产生零序压降,根据基尔霍夫定律列写回路电压电流方程可以得到:

$$\begin{cases} (R_a + j\omega L_a)I_0 + j\omega M_{ab}I_0 + j\omega M_{ca}I_0 - 3I_0R_g = 0 \\ (R_b + j\omega L_b)I_0 + j\omega M_{ab}I_0 + j\omega M_{bc}I_0 - 3I_0R_g = 0 \\ (R_c + j\omega L_c)I_0 + j\omega M_{ca}I_0 + j\omega M_{bc}I_0 - 3I_0R_g = 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} [R_a + (L_a - M_{ab} - M_{ca} + M_{bc})]I_0 - 3I_0(R_g + j\omega L_g) = 0 \\ [R_b + (L_b - M_{ab} - M_{bc} + M_{ca})]I_0 - 3I_0(R_g + j\omega L_g) = 0 \\ [R_c + (L_c - M_{ca} - M_{bc} + M_{ab})]I_0 - 3I_0(R_g + j\omega L_g) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

式(7)描述的是图9零序电流分量作用下去耦前护层等效电路中电压电流的关系,式(8)描述的是图10零序电流分量作用下去耦后护层等效电路中电压电流的关系。

等效变换利用对称分量法将电流分解为三序分量,然后分析不同分量下对应的去耦等效电路。首先通过变换得到对称分量下的护层解耦等效电路,以其为基准希望能通过相似的变换得到与对称分量下形式一致的零序分量下的去耦等效电路。

2.2 去耦等效电路求解仿真验证

对前述电缆护层回路的去耦等效电路进行仿真验证,首先搭建两端直接接地的PSCAD仿真模型,设置电缆长度400 m,水平敷设,埋地深度及水平间距均为1 m,电缆铜线芯直径43 mm,电阻率 $1.68 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$;电缆铝护层内径96.5 mm,外径

101.7 mm,电阻率 $2.83 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$;绝缘材质为交联聚乙烯,相对介电常数2.3,厚度26.75 mm,土壤电阻率为 $100 \Omega \cdot m$ 。两端直接接地处入地电阻均为 0.5Ω 。

采用耦合电感注入的方式向护层接地回路中注入异频信号,耦合电感参数设置为自感37 mH,互感1.85 mH。选择注入信号频率为100 Hz,通过逆变电路生成异频信号向回路中注入。通过傅里叶变换测量出异频激励电压与回路响应电流的幅值与相位,得到回路电压电流相量,代入方程求解得到数据见表1。

表1 两端直接接地回路仿真去耦等效求解数据

Table 1 Simulation data of decoupling equivalent solution of direct grounding loop at both ends

测量参数	相量	求解参量	数值
I_a/A	4.746 8∠-87.586 7°	A相护层电阻/mΩ	14.0
I_b/A	2.840 0∠89.785 7°	A相回路电感/μH	369.9
I_c/A	1.755 9∠85.030 9°	B相护层电阻/mΩ	18.2
U/V	1.507 1∠-2.787 9°	B相回路电感/μH	224.6
I_{sa}/A	1.752 2∠84.887 5°	C相护层电阻/mΩ	10.4
I_{sb}/A	2.832 5∠89.683 2°	C相回路电感/μH	365.7
I_{sc}/A	4.735 2∠-87.700 9°	大地回路电阻/mΩ	1 005.4
U_{sl}/V	1.494 2∠-2.544 1°	大地回路电感/μH	411.9

根据仿真设置的护层金属电阻率、电缆长度及护层尺寸初步计算可知400 m电缆金属护层电阻值为14.0 mΩ。据表1可知,A、B、C相护层回路电阻的求解结果分别为14.0、18.2、10.4 mΩ,绝对误差最大为4.2 mΩ。大地回路电阻则同时包括了入地电阻及大地电阻,入地电阻为固定值1 Ω,大地电阻则为频变参数,每公里大地电阻值为 $\pi^2 f \times 10^{-4} \Omega$,计算得400 m大地电阻为39.5 mΩ。两者之和为1 039.5 mΩ,表1计算得到的大地回路电阻值为1 005.4 mΩ,绝对误差为34.1 mΩ,相对误差为3.3%。

进行去耦等效处理后求解得到的各相护层回路电感及大地回路电感不再具有实际的物理含义,不代表真实回路的自感或互感参数,而是代表虚拟的去耦等效电路中各个电流支路的电感参数。即在不改变回路电压电流的前提下,通过对回路间电感参数的调整消除回路间存在的电磁耦合,此刻求得的电感参数为回路自感与各个回路间互感的组合。

采用两端直接接地仿真模型中的电缆参数,建立交叉互联接地模型。其中整个交叉互联段长度设为1 200 m,将其均分为3段电缆,每段长度为400 m,首末两端入地电阻仍取0.5 Ω。电阻求解数

据见表2。

表2 交叉互联接地回路仿真去耦等效求解数据

Table 2 Cross-connected grounding loop simulation decoupling equivalent solution data

测量参数	相量	求解参量	数值
I_{a1}/A	$1.735\ 6\angle-87.129\ 9^\circ$	A ₁ -B ₂ -C ₃ 回路电阻/mΩ	41.2
I_{a2}/A	$0.770\ 7\angle86.766\ 2^\circ$	A ₁ -B ₂ -C ₃ 回路电感/μH	844.5
I_{a3}/A	$0.772\ 2\angle86.834\ 0^\circ$	B ₁ -C ₂ -A ₃ 回路电阻/mΩ	39.2
U_{a1}/V	$1.325\ 9\angle-3.382\ 1^\circ$	B ₁ -C ₂ -A ₃ 回路电感/μH	831.6
I_{a2}/A	$0.767\ 2\angle86.947\ 9^\circ$	C ₁ -A ₂ -B ₃ 回路电阻/mΩ	39.7
I_{a3}/A	$0.774\ 2\angle86.995\ 2^\circ$	C ₁ -A ₂ -B ₃ 回路电感/μH	829.8
I_{sc1}/A	$1.732\ 8\angle-87.045\ 2^\circ$	大地回路电阻/mΩ	1 183.8
U_{a1}/V	$1.312\ 9\angle-3.293\ 1^\circ$	大地回路电感/μH	1 613.0

1 200 m 的交叉互联接地回路中电缆金属护层电阻值为 42.0 mΩ。据表 2 可知, A₁-B₂-C₃、B₁-C₂-A₃、C₁-A₂-B₃ 护层回路电阻的求解结果分别为 41.2、39.2、39.7 mΩ, 绝对误差分别为 0.8、2.8、2.3 mΩ, 相对误差分别为 1.9%、6.7%、5.5%。大地回路电阻值为 1 118.2 mΩ, 表 2 计算得到的大地回路电阻值为 1 183.8 mΩ, 绝对偏差为 65.6 mΩ, 相对偏差为 5.9%。

3 电阻求解算法

根据第 2 章中对交叉互联接地方式下的高压电缆护层回路去耦等效求解电路的研究, 可以利用测量所得各回路异频电压电流数据结合基尔霍夫定律列写相应的回路阻抗方程最终实现各回路电阻的高效求解。通过分析各个回路间的电压电流关系, 并考虑方程间的独立性, 确定了一套电缆交叉互联接地回路测试方案及对应电阻参数求解算法, 具体流程可简要描述为: ①两相耦合信号; ②测量三相响应参量; ③数据代入阻抗方程; ④软件自动求解电阻; ⑤选择最佳求解结果。

三相护层及大地回路中的阻抗参数为待求解参量。经过第二章中的去耦等效变换方法处理后回路间的互感耦合得到消除, 同时各交叉互联段的阻抗参数得到合并, 待求解参量仅剩 Z_a 、 Z_b 、 Z_c 、 Z_g , 分别代表 a、b、c 三相护层阻抗参数及大地阻抗参数。首先是三相回路阻抗的求解, 求解时需要至少 3 个相互独立的线性阻抗方程, 这要求至少在两相不同回路上施加异频激励从而得到 6 组电压电流数据, 从中选取线性无关的测量数据即可列写 6 个回路阻抗方程。根据求解需要设计相应的回路电阻检测流程, 具体检测步骤为, 分别在 a 相护层

回路, c 相护层回路进行激励, 首先将激励线圈套在 a 相回路上, 施加异频激励信号, 测量 3 组数据如下:

1) 同时测量激励电压幅值 U_{a1} 及 a 相响应电流幅值 I_a , 以电压相量为基准, 测量并计算两者间相位差 θ_a ;

2) 同时测量激励电压幅值 U_{a2} 及 b 相响应电流幅值 I_b , 以电压相量为基准, 测量并计算两者间相位差 θ_b ;

3) 同时测量激励电压幅值 U_{a3} 及 c 相响应电流幅值 I_c , 以电压相量为基准, 测量并计算两者间相位差 θ_c 。

然后将激励线圈套在 c 相回路上, 施加异频激励信号, 同样测量类似的 3 组数据并进行记录, 分别为:

① U_{c1} 、 I_{a1} 、 θ_{a1} ; ② U_{c2} 、 I_{a2} 、 θ_{a2} ; ③ U_{c3} 、 I_{a3} 、 θ_{a3} 。

由于检测装置输出具有电压负反馈控制通道, 每次测量间电压幅值偏差较小, 取 3 次测量结果的平均值作为异频注入电压计算值, 有 $U_a = (U_{a1} + U_{a2} + U_{a3})/3$ 及 $U_c = (U_{c1} + U_{c2} + U_{c3})/3$ 。根据测量所得异频电压电流的幅值与相位可以写出相应的电压电流相量表达式, 从而能够使用相量法对等效电路进行求解。根据上述测量数据列写回路阻抗方程, 可得 6 组矩阵方程组为:

$$\begin{bmatrix} I_{sa}\angle\theta_a & -I_{sb}\angle\theta_b & 0 \\ I_{sa}\angle\theta_a & 0 & -I_{sc}\angle\theta_c \\ -I_{sa1}\angle\theta_{a1} & 0 & I_{sc1}\angle\theta_{c1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_a \\ Z_b \\ Z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_a \\ U_a \\ U_c \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} I_{sa}\angle\theta_a & -I_{sb}\angle\theta_b & 0 \\ I_{sa}\angle\theta_a & 0 & -I_{sc}\angle\theta_c \\ 0 & -I_{sb1}\angle\theta_{b1} & I_{sc1}\angle\theta_{c1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_a \\ Z_b \\ Z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_a \\ U_a \\ U_c \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} I_{sa}\angle\theta_a & -I_{sb}\angle\theta_b & 0 \\ I_{sa}\angle\theta_a & 0 & -I_{sc}\angle\theta_c \\ I_{sa1}\angle\theta_{a1} & -I_{sb1}\angle\theta_{b1} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_a \\ Z_b \\ Z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_a \\ U_a \\ 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} -I_{sa1}\angle\theta_{a1} & 0 & I_{sc1}\angle\theta_{c1} \\ 0 & -I_{sb1}\angle\theta_{b1} & I_{sc1}\angle\theta_{c1} \\ I_{sa}\angle\theta_a & -I_{sb}\angle\theta_b & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_a \\ Z_b \\ Z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_c \\ U_c \\ U_a \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} -I_{sa1}\angle\theta_{a1} & 0 & I_{sc1}\angle\theta_{c1} \\ 0 & -I_{sb1}\angle\theta_{b1} & I_{sc1}\angle\theta_{c1} \\ I_{sa}\angle\theta_a & 0 & -I_{sc}\angle\theta_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_a \\ Z_b \\ Z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_c \\ U_c \\ U_a \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} -I_{sa1}\angle\theta_{a1} & 0 & I_{sc1}\angle\theta_{c1} \\ 0 & -I_{sb1}\angle\theta_{b1} & I_{sc1}\angle\theta_{c1} \\ 0 & I_{sb}\angle\theta_b & -I_{sc}\angle\theta_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_a \\ Z_b \\ Z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_c \\ U_c \\ U_a \end{bmatrix} \quad (14)$$

将上述测量数据代入式(9)-(14)的矩阵方程中即可实现回路阻抗的求解, 而对应地回路阻抗参数则可以根据式(15)进行求解

$$\begin{cases} Z_G = \frac{U_a - I_{sa} Z_A}{I_{sa} + I_{sb} + I_{sc}} = \frac{-I_{sb} Z_B}{I_{sa} + I_{sb} + I_{sc}} = \frac{-I_{sc} Z_C}{I_{sa} + I_{sb} + I_{sc}} \\ Z_G = \frac{U_c - I_{sc} Z_C}{I_{sa} + I_{sb} + I_{sc}} = \frac{-I_{sa} Z_A}{I_{sa} + I_{sb} + I_{sc}} = \frac{-I_{sb} Z_B}{I_{sa} + I_{sb} + I_{sc}} \end{cases} \quad (15)$$

4 结论

文中对交叉互联接地方式下高压电缆的护层等效电路进行等效求解,得到简化后的去耦等效电路模型,并通过仿真验证了模型的正确性与有效性,研究了电缆护层接地电阻的求解方程。结论如下:

1)分析了不同接地方式下护层感应电压和阻抗参量,研究了电缆护层系统的等效电路模型。

2)针对电路中各回路间存在的电感耦合关系进行分析,根据去耦等效原理结合对称分量法得到了电缆护层回路的去耦等效电路模型,简化了求解过程,通过搭建不同护层接地方式下的电缆仿真模型验证了去耦等效电路在护层回路检测求解方面的正确性和有效性。

3)对交叉互联接地方式下的高压电缆护层回路去耦等效求解电路的研究,通过分析各个回路间的电压电流关系,并考虑方程间的独立性,确定了一套电缆交叉互联接地回路测试方案及对应电阻参数求解算法。

参考文献:

- [1] 张泽晋,陈彦伊,廖雁群,等.高压电缆外护套特征阻抗建模及破损检测方法[J].浙江电力,2024,43(9):78-87.
ZHANG Zejin, CHEN Yanyi, LIAO Yanqun, et al.Characteristic impedance modeling and damage detection method for high-voltage cable sheath[J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(9):78-87.
- [2] 汪洪亮,刘昕,徐浩焜,等.基于频域阻抗谱与MLP的高压电缆缓冲层烧蚀故障识别研究[J].电网与清洁能源,2025,41(6):99-105.
WANG Hongliang, LIU Xin, XU Haokun, et al.Research on the identification of ablation faults in high-voltage cable buffer layers based on frequency - domain impedance spectrum and MLP[J]. Power System and Clean Energy, 2025, 41(6):99-105.
- [3] 孙铭,张周胜,谢书凝,等.高压单芯电缆工频运行下金属护套雷电冲击电压的仿真研究[J].电瓷避雷器,2024(2):27-35.
SUN Ming, ZHANG Zhousheng, XIE Shuning, et al. Simulation of study lightning impulse voltage of metal sheath of high voltage single core cable considering power frequency operation[J]. Insulators and Surge Arresters, 2024(2):27-35.
- [4] 刘博,郭卫,及洪泉,等.高压电缆外护套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.
- [5] 高建,张浩然,张可,等.高压电缆缓冲层烧蚀缺陷超声检测实验[J].电力工程技术,2024,43(1):174-180.
GAO Jian, ZHANG Haoran, ZHANG Ke, et al. Experiments on the ultrasonic detection of buffer layer ablation defects in high-voltage cables[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(1):174-180.
- [6] 李岩,甄冠成,宋浩源,等.绝缘层温度对XLPE局部放电的影响特性[J].电力科学与技术学报,2024,39(6):260-268.
LI Yan, ZHEN Guancheng, SONG Haoyuan, et al. Influence characteristics of insulation layer temperature on partial discharge of XLPE[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(6):260-268.
- [7] 闵伟蕊,张文海,王杨,等.基于RKELM的中压电缆早期故障识别与定位方法研究[J].供用电,2024,41(10):3-11.
MIN Weisong, ZHANG Wenhai, WANG Yang, et al. Research on incipient fault identification and localization method for medium voltage cables based on RKELM[J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(10):3-11.
- [8] 伍国兴,张成巍,陈潇,等.国产与进口XLPE绝缘高压交流电缆短时与长时击穿特性[J].南方电网技术,2024,18(2):124-132.
WU Guoxing, ZHANG Chengwei, CHEN Xiao, et al.Short-term and long - term breakdown characteristics of XLPE insulation high - voltage AC cable at home and abroad[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(2):124-132.
- [9] 杨朝锋,王敏,赵胜男,等.基于深度学习融合的高压电缆局部放电诊断算法研究[J].高压电器,2023,59(11):65-73.
YANG Chaofeng, WANG Min, ZHAO Shengnan, et al.Research on partial discharge diagnosis algorithm for high voltage cable based on deep learning fusion method[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(11):65-73.
- [10] 严亚兵,江志文,肖俊先,等.基于高频电流信号的电缆局部放电故障特征分析研究[J].供用电,2024,41(3):96-102.
YAN Yabing, JIANG Zhiwen, XIAO Junxian, et al. Fault characteristics analysis of cable partial discharge based on the high frequency current signal[J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(3):96-102.
- [11] 夏君山,夏向阳,赵威,等.基于差值电流分析的高压电缆在线监测研究[J].高压电器,2019,55(7):165-172.
XIA Junshan, XIA Xiangyang, ZHAO Wei, et al. Research on online monitoring for HV cable based on differential current analysis[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(7):165-172.
- [12] 齐明泽. XLPE电缆金属护套接地电流特性与抑制措施研究[D].长春:东北电力大学,2022.
QI Mingze. Research on circulation characteristics and suppression measures of metal sheath of XLPE cable[D]. Changchun: Northeast Dianli University, 2022.
- [13] 高飞,黄磊,张蕾,等.高压长距离分段电缆随公共交通隧道敷设电磁影响分析[J].高压电器,2021,57(12):156-161.
GAO Fei, HUANG Lei, ZHANG Lei, et al. Electromagnetic influence analysis of high voltage long distance segment cable laying in public transportation tunnel[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(12):156-161.

- [14] 兰雪珂. 高压电缆金属护层及载流回路缺陷状态识别研究[D]. 重庆:重庆大学,2021.
LAN Xueke. Research on identification of defect states in high-voltage cable metal sheath and current-carrying loop[D]. Chongqing: Chongqing University, 2021.
- [15] 刘凤莲, 夏荣, 李文杰, 等. 高压交联电缆缓冲层烧蚀缺陷检测方法研究[J]. 高压电器, 2022, 58(8): 259-266.
LIU Fenglian, XIA Rong, LI Wenjie, et al. Research on detection method of buffer layer ablation defect in high voltage XLPE cable [J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(08): 259-266.
- [16] 陈家辉. 单芯电力电缆护层多点接地在线检测技术研究[D]. 济南:山东大学,2022.
CHEN Jiahui. Research on multi-point grounding online detection-technology of single-core power cable sheath[D]. Jinan: Shandong University, 2022.
- [17] 陈根, 唐焱, 王新桥. 基于ATP的高压电缆金属护套多点接地故障仿真[J]. 高压电器, 2014, 50(04): 49-53.
CHEN Gen, TANG Yan, WANG Xinqiao. Simulation of multi-point grounding fault of metal sheath of high voltage cable based on ATP [J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(04): 49-53.
- [18] CHEN Yun, HUI Baojun, CHENG Yanting, et al. Effects of connection conditions between insulation screen and Al sheath on the buffer layer failures of high-voltage XLPE cables[J]. Engineering failure analysis, 2021(122): 105263.
- [19] 姜艺楠, 洪晓东, 王成珠, 等. 高压电缆接地回路电阻带电检测及消缺应用[J]. 电线电缆, 2024, 67(3): 76-80.
JIANG Yinan, HONG Xiaodong, WANG Chengzhu, et al. Application of resistance detection and loss elimination in ground circuit of high voltage cable[J]. Electric Wire & Cable, 2024, 67(3): 76-80.
- [20] 段庆权, 高晨煜, 赵传放. 高压电缆接地回路带电检测技术及案例分析[C]//2024年岭南电力论坛论文集. 广州:广东省电机工程学会, 2024: 102-105.
DUAN Qingquan, GAO Chenyu, ZHAO Chuanfang. High voltage cable grounding circuit live detection technology and case analysis [C]//Proceedings of Lingnan Power Forum. Guangzhou: Guangdong Electrical Engineering Society, 2024: 102-105.
- [21] 黄鹤鸣. 高压单芯电力电缆接地电流分析与监测系统研究[D]. 北京:华北电力大学,2009.
HUANG Heming. Analyse about ground current along single-core high voltage power cable sheaths and monitor system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2009.
- [22] XIA Rong, LUO Junhua, LI Wenjie, et al. Study on on-line detection and suppression of induced voltage and current in metal sheath of large cross section and long distance 35 kV single core crosslinked cable[C]//Proceedings of the 2011 International Conference on Software Engineering and Multimedia Communication (SEMC 2011 V4). China: [s.n.], 2011: 415-419.
- [23] 邵伍周. XLPE 电力电缆接地感应环流分析及在线监测方案设计[D]. 长沙:长沙理工大学,2007.
SHAO Wuzhou. XLPE power cable grounding induced circulation analysis and on-line monitoring scheme design[D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2007.
- [24] 周欣, 夏向阳, 夏君山, 等. 基于护层电流构建新型判据的高压输电电缆在线监测[J]. 中国电力, 2021, 54(9): 45-54.
ZHOU Xin, XIA Xiangyang, XIA Junshan, et al. On-line monitoring of HV transmission cables based on a new criterion established with sheath current[J]. Electric Power, 2021, 54(9): 45-54.
- [25] 王炼兵. 深圳高压电缆护套环流超标原因分析及解决措施研究[D]. 广州:华南理工大学,2016.
WANG Lianbing. Analysis and solution of excessive circular current in the metallic sheath of high-voltage cable in Shenzhen [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.
- 陈腾彪(1966—),男,本科,高级工程师,主要从事输电电缆线路的运维管理工作(E-mail: 13714153288@139.com)。
李栋(1999—),男,硕士研究生,研究方向为高电压与绝缘技术(通信作者)(E-mail: lidong20210821@163.com)。