

不同接地方式下的电缆序阻抗参数计算与分析

叶昊亮, 杨 勇, 曹俊平, 李 特, 王少华, 姜凯华

(国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 杭州 310014)

摘 要: 电缆序阻抗参数与继电保护整定计算直接相关。电缆的序阻抗参数受其敷设方式影响, 正零序参数与护套、保护器、回流线的接地方式息息相关。为此以经典卡松回路方程(Carson)为基础, 提出了一种适用于不同接地方式下的多回电缆正零序参数计算方法。对电缆串联阻抗矩阵与序阻抗计算, 结合电磁暂态软件 PSCAD/EMTDC 建模仿真, 验证了算法的正确性与精确性。最后对电缆序阻抗参数的影响因素进行研究, 结果表明: 护套双端接地时正序电抗明显减小、接地方式不同导致零序参数差异显著, 护套单端接地时零序参数显著增大, 敷设回流线可适当减小零序参数; 当电缆“品”字排列时, 回流线敷设距离线芯距离与正序电阻呈负相关, 与零序阻抗呈正相关; 土壤电阻率变化不影响电缆正序参数, 仅对护套单端接地与回流线加保护器接地方式下的零序参数产生影响; 当两回电缆并联时, 护套单端接地方式下零序参数显著增大、护套双端接地与交叉互联接地方式下零序参数基本不变、回流线加保护器接地方式下零序阻抗增大程度与回流线敷设位置相关。

关键词: 电缆参数; 序阻抗; 接地方式; PSCAD; 金属护套; 回流线

Cable Sequence Parameters Calculation and Analysis Under Different Grounding Methods

YE Haoliang, YANG Yong, CAO Junping, LI Te, WANG Shaohua, JIANG Kaihua

(Electric Power Research Institute of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310014, China)

Abstract: The correctness of the cable sequence impedance parameters is directly related to the relay protection setting calculation. The sequence impedance parameter of the cable is affected by its laying method, and the positive zero sequence parameter is closely related to the grounding method of the sheath, protector, and return cable. Based on the classic Carson loop equation (Carson), this paper proposes a method for calculating the positive zero sequence parameters of multi-circuit cables suitable for different grounding methods. The full-dimensional impedance matrix and sequence impedance calculation of the cable, combined with the electromagnetic transient software PSCAD/EMTDC modeling and simulation, verified the correctness and accuracy of the algorithm. Finally, the influencing factors of the cable sequence impedance parameters were studied. The results show that the positive sequence reactance is significantly reduced when the sheath is grounded at both ends. Different grounding methods result in significant differences in the zero sequence parameters. When the sheath is grounded at one end, the zero sequence parameters are significant. As the value increases, laying the return cable can appropriately reduce the zero-sequence parameter; when the cables are arranged in pin-shape, the distance between the return cable laying and the core is negatively correlated with the positive sequence resistance and positively correlated with the zero-sequence impedance; the change in soil resistivity does not affect the positive sequence parameters of the cable but only affects the zero sequence parameters under the single-end grounding of the sheath and the grounding of the return cable plus protector; when the two cables are connected in parallel, the zero-sequence parameters increase significantly under the single-end grounding of the sheath, and the zero-sequence parameters are basically unchanged under the double-end grounding of the sheath and the cross-connection grounding method. The degree of increase in the zero-sequence impedance under the return cable plus protector grounding method is related to the laying position of the return cable.

Key words: cable parameters; sequence impedance; grounding method; PSCAD; metal sheath; return cable

0 引言

随着城市用电量不断增加, 对电网输电能力提

出了更高的要求, 多回电缆线路并联运行日渐广泛^[1-5]。为节约用地, 多回电缆敷设在同一电缆管廊内, 存在不同电压等级的多回电缆电路共用综合管廊通道的情况, 其相互之间有较强的电磁耦合联系, 使得传统的单回电缆线路参数计算方法不再适用。同时工程现场电缆线路参数受其敷设方式影响, 不

同敷设方式下的电缆参数差异显著, 零序参数尤为明显^[6-8]。而现场基建线路测试试验时^[9], 由于工期紧张, 存在回流缆未到位敷设入地、金属护套交叉互联接地等措施未完善的情况, 由此对于现场实测电缆参数须进行理论判断^[10-11]。电缆线路的工频序参数是电力系统设计、运行以及继电保护整定计算的重要基础^[12-13], 基建阶段电缆测试试验所得线路参数结果错误而导致的保护误动事件时有发生。因此, 研究适用于不同接地方式下的多回电缆参数计算方法具有重要意义。

目前, 单回电缆线路参数计算方法已较为成熟, 文献[8]考虑了金属护套两点接地与单点接地时平行 2 回电缆序参数计算; 文献[12]直接给出了电缆各序参数在护套单端接地、双端接地的计算式, 其准确性在工程实例中得到验证; 文献[14-17]对电缆金属护套交叉互联与并联运行时感应电压和护套环流进行了计算; 文献[18]对海底电缆护套、铠装接地方式下电缆参数进行研究, 考虑了谐波分析时电缆电气参数特性; 文献[19]比较了 Carson-Clem 公式、《电力系统建模及故障分析》、MATLAB 中 power_cableparam 功能计算的电缆电气参数, 表明 Carson-Clem 公式在准确性和通用性方面最优; 文献[20]比较了 330 kV 电缆回流缆优化布置对故障时电缆护套感应电压与稳态运行时环流具有抑制作用; 文献[21-22]采用 EMTP 程序, 对 500 kV 陆缆与 500 kV 海缆线路的工频相序参数进行计算分析, 发现陆缆线路两端的接地电阻对零序阻抗影响显著, 中间单元的接地电阻则影响较小, 单回和双回海底电缆线路可近似视为三相和六相平衡线路。然而, 上述文献在电缆参数计算方面仍存在 2 点不足: 一是在敷设回流缆对电缆线路的序参数影响方面未进行理论分析, 二是对于多回电缆在不同接地方式下的序参数计算尚未形成一种完善规范的计算方法。

本文基于 Carson-clem 公式, 提出了一种适用于多回电缆正零序阻抗参数计算的通用方法, 对电缆本体排列方式、金属护套是否交叉互联、回流缆敷设位置等均无特殊要求。同时利用业内广泛接受的电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 进行建模计算, 验证了算法的正确性与准确性。最后分析了不同接地方式、回流缆敷设位置、土壤电阻率大小、多回电缆本体不同排列方式对电缆序参数的影响, 为工程现场电缆参数测量提供了理论指导。

1 电缆参数计算

相关文献对电缆参数计算进行了讨论^[7-8, 21-22], 不同于架空线路, 电缆由于存在金属护套以及可能的铠装层, 电气特性参数计算更为复杂, 同时金属护套存在不同接地方式与对应的处理^[18-19]。本文将各种护套、保护器以及回流缆等组合的不同接地方式均归结为电缆接地系统。

1.1 电缆接地系统

工程中电缆金属护套有多种接地方式^[16-22]。当电缆线路短、传输容量小时, 多采用金属护套两端直接接地, 见图 1(a); 若电缆线路较短(500 m 以下), 金属护套可采用一端直接接地, 另一端经保护器接地方式, 见图 1(b); 当电缆线路很长(1 km 以上)时, 将电缆均匀分割成 $3k$ (k 为整数)段, 采用金属护套交叉互联的接地方式^[14], 见图 1(c); 在首末两端无法形成完整的 3 段回路时, 可通过方式 1 或 2 接地, 近年来工程中常见做法还存在配置回流电缆加上保护器接地方式, 见图 1(d)。

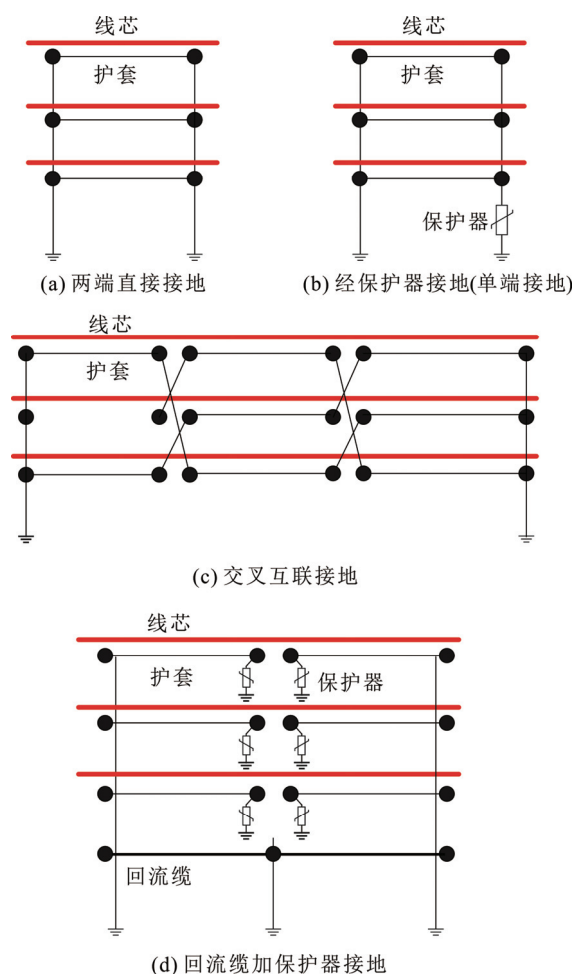


图 1 电缆不同接地系统

Fig.1 Different grounding systems of cable

1.2 串联阻抗矩阵

在电缆线路参数计算时,“导体-大地”回路的交流电路采用经典卡松(Carson)线路模拟,回路如图2所示。与架空线不同,电缆护套、回流电缆(若有)同样视为金属导体,和线芯处理一致,均与大地形成回路。

对不含回流缆的单回电缆而言,有三相线芯与三相护套共6个“单导线-大地”回路,如图3所示。其回路电压降方程^[7]为:

$$\begin{bmatrix} U_{cA} \\ U_{cB} \\ U_{cC} \\ U_{sA} \\ U_{sB} \\ U_{sC} \end{bmatrix} = \mathbf{Z} \begin{bmatrix} I_{cA} \\ I_{cB} \\ I_{cC} \\ I_{sA} \\ I_{sB} \\ I_{sC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{cAcA} & Z_{cAcB} & Z_{cAcC} & Z_{cAsA} & Z_{cAsB} & Z_{cAsC} \\ Z_{cBcA} & Z_{cBcB} & Z_{cBcC} & Z_{cBsA} & Z_{cBsB} & Z_{cBsC} \\ Z_{cCcA} & Z_{cCcB} & Z_{cCcC} & Z_{cCsA} & Z_{cCsB} & Z_{cCsC} \\ Z_{sAcA} & Z_{sAcB} & Z_{sAcC} & Z_{sAsA} & Z_{sAsB} & Z_{sAsC} \\ Z_{sBcA} & Z_{sBcB} & Z_{sBcC} & Z_{sBsA} & Z_{sBsB} & Z_{sBsC} \\ Z_{sCcA} & Z_{sCcB} & Z_{sCcC} & Z_{sCsA} & Z_{sCsB} & Z_{sCsC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{cA} \\ I_{cB} \\ I_{cC} \\ I_{sA} \\ I_{sB} \\ I_{sC} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:下标c代表线芯;s代表护套;A、B、C代表各相; $\mathbf{Z}$ 为6×6矩阵,称为电缆全维串联阻抗矩阵,其元素分别为“芯线-大地”回路自阻抗 Z_{cIcI} ($I=A,B,C$)、“护套-大地”回路自阻抗 Z_{sIsI} 和“芯线-大地”回路与“护套-大地”回路之间的互阻抗 Z_{cIsJ} 、 Z_{sIcJ} ($J=A,B,C$); U_{cI} 、 U_{sI} 分别为电缆线芯、护套上的电压降; I_{cI} 、 I_{sI} 分别为流经电缆线芯、护套的电流。

在计算全维串联阻抗矩阵的元素时,首先进行计算金属导体层本身的交流电阻。金属导体层交流电阻的计算过程^[23]如下所述。

1) 计算给定温度下的直流电阻 R_{dc} 。

$$R_{dc} = \frac{1000\rho}{A}(1 + \alpha_{20}(t - t_0)) \quad (2)$$

式中: ρ 为导体电阻率; A 为导体标称截面面积; t 为导体温度; α_{20} 为电阻温度系数; $t_0=20\text{ }^\circ\text{C}$ 。

电阻温度系数 α_{20} 的典型值和 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 下导体的电阻率见表1^[23]。

2) 金属导体的交流电阻 R_{ac} 由直流电阻 R_{dc} 计算得出。

$$R_{ac} = R_{dc}(1 + k_s + k_p) \quad (3)$$

式中: k_s 为趋肤效应系数; k_p 为邻近效应系数。 k_s 和 k_p 计算式分别见式(5)和式(6)^[23]。先定义中间变量 z 为:

$$z = \sqrt{\frac{8\pi f a_z}{10^4 R_{dc}}} \quad (4)$$

式中: f 为频率; a_z 为表征不同类型导体趋肤效应的常量,当导体为铜芯绞合/扇形导体时 $a_z=1$,当导体为弓形/分割型导体时 $a_z=0.43$ ^[23]。由 z 计算趋肤效应系数 k_s 为:

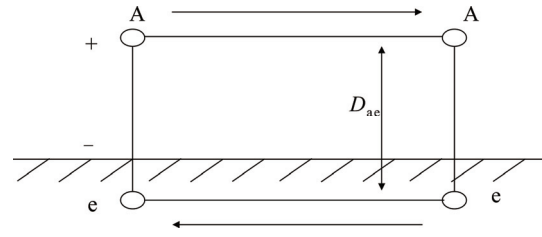


图2 “单导线-大地”卡松回路

Fig.2 “Single conductor-earth” Carson loop

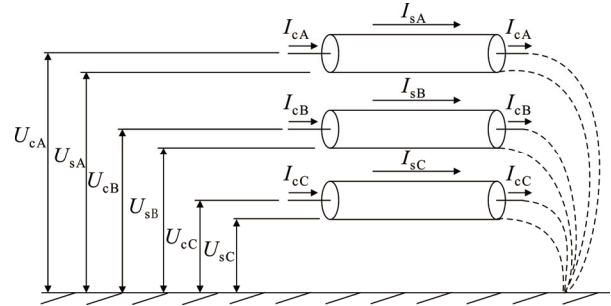


图3 单回电缆系统示意图

Fig.3 Schematic diagram of single-circuit cable system loop

表1 α_{20} 的典型值和 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 下导体的电阻率

Table 1 Values of α_{20} and conductor resistivities at $20\text{ }^\circ\text{C}$

材料	电阻温度系数 $\alpha_{20}/(^\circ\text{C}^{-1})$	电阻率 $\rho/(\Omega\cdot\text{m}^{-1})$
铜	3.93×10^{-3}	$1.724\ 1\times 10^{-8}$
铝	4.03×10^{-3}	$2.826\ 4\times 10^{-8}$
铅	4×10^{-3}	21.4×10^{-8}
青铜	3×10^{-3}	3.5×10^{-8}
铁	4.5×10^{-3}	13.8×10^{-8}
不锈钢	0	70×10^{-8}

$$k_s = \begin{cases} z^4/(192 + 0.8z^4), & 2.8 \geq z \geq 0 \\ 0.056\ 3z^2 - 0.017\ 7z - 0.013\ 6, & 3.8 \geq z > 2.8 \\ 0.354z - 0.733, & z > 3.8 \end{cases} \quad (5)$$

对于单芯电缆,邻近效应系数 $k_p=0$;对于三芯电缆,邻近效应系数为:

$$k_p = F(p) \left(\frac{d_c}{S_{ij}} \right)^2 \left(0.312 \left(\frac{d_c}{S_{ij}} \right)^2 + \frac{1.18}{F(p) + 0.27} \right) \quad (6)$$

式中: $F(p) = \frac{p^4}{192 + 0.8p^4}$; $p = \sqrt{\frac{8\pi f a_p}{10^4 R_{dc}}}$; a_p 为表

征不同类型导体邻近效应的常量,对于绞合铜芯/铝芯导体 $a_p=0.8$,对于分割型导体 $a_p=0.37$; d_c 为导体层对应的直径; S_{ij} 为电缆金属导体层 i 与 j 之间的轴间距离。

然后计算全维串联阻抗矩阵 $\mathbf{Z}$ 各元素^[23]。其中,“线芯-大地”的回路自阻抗 Z_{cc} (单位为 Ω/km)为:

$$Z_{cc} = r_c + r_e + j4\pi 10^{-4} f \left(\frac{1}{4} f(r_{oc}, r_{ic}) + \ln \left(\frac{D_e}{r_{oc}} \right) \right) \quad (7)$$

“护套-大地”的回路自阻抗 Z_{ss} (单位为 Ω/km) 为:

$$Z_{ss} = r_s + r_e + j4\pi 10^{-4} f \left(\frac{1}{4} f(r_{os}, r_{is}) + \ln \left(\frac{D_e}{r_{os}} \right) \right) \quad (8)$$

线芯与护套同相时“线芯-大地”回路与“护套-大地”回路之间的互阻抗 Z_{cs} (单位为 Ω/km) 为:

$$Z_{cs} = r_e + j4\pi 10^{-4} f \ln \left(\frac{D_e}{(r_{oc} + r_{os})/2} \right) \quad (9)$$

线芯与护套不同相时“线芯-大地”回路与“护套-大地”回路之间的互阻抗 Z_{cs} (单位为 Ω/km) 为:

$$Z_{cs} = r_e + j4\pi 10^{-4} f \ln \frac{D_e}{D} \quad (10)$$

不同相的“线芯-大地”回路互阻抗和不同相的“护套-大地”回路互阻抗均表示为:

$$f(r_{oc}, r_{ic}) = 1 - \frac{2r_{ic}^2}{r_{oc}^2 - r_{ic}^2} + \frac{4r_{ic}^4}{(r_{oc}^2 - r_{ic}^2)^2} \ln \left(\frac{r_{oc}}{r_{ic}} \right) \quad (11)$$

$$f(r_{os}, r_{is}) = 1 - \frac{2r_{is}^2}{r_{os}^2 - r_{is}^2} + \frac{4r_{is}^4}{(r_{os}^2 - r_{is}^2)^2} \ln \left(\frac{r_{os}}{r_{is}} \right) \quad (12)$$

式中: $f(r_{oc}, r_{ic})$ 为单长线芯自几何系数; $f(r_{os}, r_{is})$ 为单长护套自几何系数; r_c 为单长线芯交流电阻; r_s 为单长护套交流电阻; r_e 为单长大地等值电阻, $r_e = \pi^2 f 10^{-4}$; D_e 为以大地为回路时虚拟导线的等值深度^[24], $D_e = 660\sqrt{\rho_e/f}$ ^[25], ρ_e 为大地电阻率; r_{ic} 、 r_{oc} 分别为线芯的内、外半径; r_{is} 、 r_{os} 分别为护套的内、外半径; D 为各相导线间距。

上述讨论了不含回流缆的单回电缆串联阻抗矩阵计算。当存在回流电缆时, 除三相线芯与三相护套外, 回流缆与大地同样构成“单导线-大地”回路。此时, 式(1)的回路电压降方程中电压、电流变量分别增加回流缆两端电压降 U_h 与流经电流 I_h , 串联阻抗矩阵 $\mathbf{Z}$ 为 7×7 矩阵。 $\mathbf{Z}$ 矩阵行列中与回流缆相关的元素“回流缆-大地”自阻抗 Z_{hh} 的计算与前述“芯线-大地”回路自阻抗 Z_{cc} 相类似、“回流缆-大地”与“芯线-大地”/“护套-大地”回路之间的互阻抗 Z_{hc}/Z_{hs} 的计算与前述互阻抗 Z_{cs} 相类似, 不再赘述。

1.3 序阻抗计算

电缆序阻抗计算与护套接地方式、回流缆敷设情况相关^[26], 单回电缆在不同接地系统下的序阻抗计算方法如下。

1.3.1 直接接地

金属护套两端直接接地时, 忽略两端接地电阻, 有 $U_{sA} = U_{sB} = U_{sC} = 0$, 对式(1)中阻抗矩阵分块, 即:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{U}_c \\ \vdots \\ \mathbf{U}_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{cc} & \cdots & \mathbf{Z}_{cs} \\ \vdots & & \vdots \\ \mathbf{Z}_{cs}^T & \cdots & \mathbf{Z}_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_c \\ \vdots \\ \mathbf{I}_s \end{bmatrix} \quad (13)$$

式(13)中各变量含义对照式(1)自明。代入 $\mathbf{U}_s = \mathbf{0}$, 得:

$$\mathbf{U}_c = \mathbf{Z}_{cc} \mathbf{I}_c + \mathbf{Z}_{cs} \mathbf{I}_s \quad (14)$$

$$\mathbf{0} = \mathbf{Z}_{cc}^T \mathbf{I}_c + \mathbf{Z}_{ss} \mathbf{I}_s \quad (15)$$

消去 $\mathbf{I}_s$ 后得:

$$\mathbf{U}_c = (\mathbf{Z}_{cc} - \mathbf{Z}_{cs} \mathbf{Z}_{ss}^{-1} \mathbf{Z}_{cs}^T) \mathbf{I}_c \quad (16)$$

其阻抗矩阵为:

$$\mathbf{Z}_{cABC} = \mathbf{Z}_{cc} - \mathbf{Z}_{cs} \mathbf{Z}_{ss}^{-1} \mathbf{Z}_{cs}^T \quad (17)$$

由对称分量法得电缆的序阻抗矩阵为:

$$(\mathbf{Z}_c)_{120} = \mathbf{H}^{-1} \mathbf{Z}_{cABC} \mathbf{H} \quad (18)$$

式中: $\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix}$, $a = e^{j120^\circ}$; $(\mathbf{Z}_c)_{120}$ 为序阻抗矩阵, 计及了其他各回导体(护套、回流缆(若有))对该回导体的互感影响^[8], 能准确反映出本回电缆的电压电流之间关系, 更加符合工程应用要求。

1.3.2 经保护器接地

金属护套经保护器接地时, 所有“护套-大地”回路不构成电流回路, 护套上流过电流为 0, 此时 $I_{sA} = I_{sB} = I_{sC} = 0$, 代入式(13)得:

$$\mathbf{U}_c = \mathbf{Z}_{cc} \mathbf{I}_c \quad (19)$$

$$\mathbf{U}_s = \mathbf{Z}_{cc}^T \mathbf{I}_c \quad (20)$$

此时阻抗矩阵为:

$$\mathbf{Z}_{cABC} = \mathbf{Z}_{cc} \quad (21)$$

将式(21)按式(18)同样处理即得序阻抗矩阵。

1.3.3 交叉互联接地

对图 1(c)中护套交叉互联接地, 不失一般性, 如图 4 所示。

护套交叉互联段长度分别记为 L_1 、 L_2 、 L_3 , 设 $\beta_1 = L_1/L$, $\beta_2 = L_2/L$, $\beta_3 = L_3/L$ (L 为电缆线路长度)。对一个交叉互联段而言, 记 L_1 、 L_2 、 L_3 段上的电压降分别为 U_1 、 U_2 、 U_3 , L_1 、 L_2 、 L_3 电缆段的阻抗为 Z_{L1} 、 Z_{L2} 、 Z_{L3} , 则对 L_1 、 L_2 、 L_3 段电缆有类似式(3)的电压降表达式:

$$U_1 = \beta_1 Z_{L1} I \quad (22)$$

$$U_2 = \beta_2 Z_{L2} I \quad (23)$$

$$U_3 = \beta_3 Z_{L3} I \quad (24)$$

式中: L_2 、 L_3 段仅与 L_1 段的各相护套位置关系不同, 求得 Z_{L1} 后, 通过交换其中与护套相关的行列即可得到 Z_{L2} 、 Z_{L3} 。此时 L_1 、 L_2 、 L_3 段的总电压降为:

$$U = U_1 + U_2 + U_3 = (\beta_1 Z_{L1} + \beta_2 Z_{L2} + \beta_3 Z_{L3}) I = ZI \quad (25)$$

得全维串联阻抗矩阵 Z 后, 后续求解序阻抗处理与护套两端直接接地方式一致, 见式(14)一式(18), 不再赘述。

1.3.4 回流缆加保护器接地

回流缆加保护器方式接地时, 护套经保护器接地, 不构成电流回路, 与前述接地方式比较, 多了“回流缆-大地”回路, 电缆的电压降方程为:

$$\begin{bmatrix} U_{cA} \\ U_{cB} \\ U_{cC} \\ U_h \end{bmatrix} = Z \begin{bmatrix} I_{cA} \\ I_{cB} \\ I_{cC} \\ I_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{cAcA} & Z_{cAcB} & Z_{cAcC} & Z_{cAh} \\ Z_{cBcA} & Z_{cBcB} & Z_{cBcC} & Z_{cBh} \\ Z_{cCcA} & Z_{cCcB} & Z_{cCcC} & Z_{cCh} \\ Z_{hcA} & Z_{hcB} & Z_{hcC} & Z_{hh} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{cA} \\ I_{cB} \\ I_{cC} \\ I_h \end{bmatrix} \quad (26)$$

式中: 下标 h 代表回流缆; 串联阻抗矩阵 Z 为 4×4 矩阵, 其元素分别为“芯线-大地”回路自阻抗 Z_{cIcI} ($I=A,B,C$)、 “回流缆-大地”回路自阻抗 Z_{hh} 和“芯线-大地”回路与“回流缆-大地”回路之间的互阻抗 Z_{cIh} 、 Z_{hcI} ; U_h 为回流缆上的电压降; I_h 为流经回流缆的电流。

回流缆两端直接接地, 忽略两端接地电阻, 有 $U_h=0$, 代入式(26)得:

$$U_c = Z_{cc} I_c + Z_{ch} I_h \quad (27)$$

$$0 = Z_{hc}^T I_c + Z_{hh} I_h \quad (28)$$

式(27)、(28)中各变量含义对照式(26)自明。消去 I_h 后得:

$$U_c = (Z_{cc} - Z_{ch} Z_{hh}^{-1} Z_{hc}^T) I_c \quad (29)$$

其阻抗矩阵为:

$$Z_{cABC} = Z_{cc} - Z_{ch} Z_{hh}^{-1} Z_{hc}^T \quad (30)$$

将式(30)按式(18)进行处理即可得回流缆加保护器的电缆序阻抗矩阵。

值得说明, 上述通过单回电缆串联阻抗矩阵推导至序阻抗矩阵的方法同样可推广至多回电缆并联计算场合, 不再赘述。

2 算例验证

为验证上述所提计算方法的正确性, 本文按照上述方法计算典型单回电缆的阻抗参数, 并将结果与业内广泛使用的电磁暂态仿真软件 PSCAD/

EMTDC 建模所得结果进行比对。

2.1 PSCAD 参数计算

PSCAD 软件中没有直接支持电缆电气参数计算模块, 但从输出的中间结果中查看电缆全维阻抗矩阵数据, 而软件中的电缆序参数可采用如下方法计算^[21]。

1) 正序参数计算

在线路末端三相短路, 始端加三相工频电源, 测量三相线电流、三相线电压和三相总功率, 测量接线见图 5。测得三相电压、电流, 取其算术平均值, 按下式计算线路每相公里正序阻抗^[27]为:

$$Z_1 = \frac{U_{av}}{I_{av}} \cdot \frac{1}{L} \quad (31)$$

$$R_1 = \frac{P}{I_{av}^2} \cdot \frac{1}{L} \quad (32)$$

$$X_1 = \sqrt{Z_1^2 - R_1^2} \quad (33)$$

式中: U_{av} 、 I_{av} 为三相线电压和电流平均值; P 为三相总功率; L 为电缆线路长度; Z_1 、 R_1 、 X_1 分别表示线路的正序阻抗、正序电阻和正序电抗。

2) 零序参数计算

在线路末端三相短路接地, 始端三相短路并加单相交流电源, 测量接线见图 6。根据测得电压、电流及功率, 计算线路每相公里零序阻抗^[27]为:

$$Z_0 = \frac{U}{I} \cdot \frac{1}{L} \quad (34)$$

$$R_0 = \frac{3P}{I^2} \cdot \frac{1}{L} \quad (35)$$

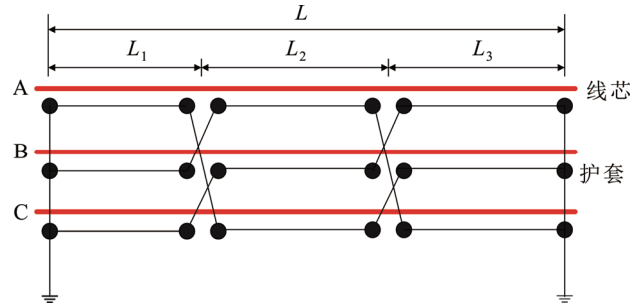


图4 不等长段的金属护套交叉互联接地

Fig.4 Cross-bonding and grounding of unequal-length metal sheaths

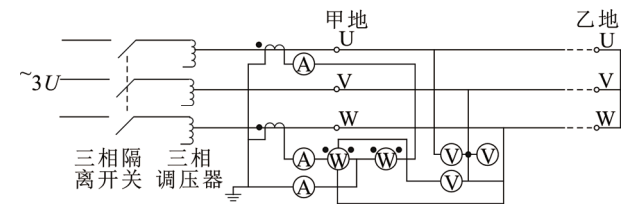


图5 正序阻抗参数测量接线

Fig.5 Positive sequence impedance measurement wiring

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} \quad (36)$$

式中: U 、 I 为试验电压和电流; P 为测得功率; Z_0 、 R_0 、 X_0 分别表示线路的零序阻抗、零序电阻和零序电抗。

2.2 全维阻抗矩阵对比

选取一种工程常用 220 kV 典型单芯电缆, 型号为 YJLW-127/220 kV-1×2 500 mm², 电缆结构见图 7(a), 其对应的回流缆型号为 YJV-6.0/10 kV-1×400 mm², 结构见图 7(b)。所涉及单芯电缆及回流缆主要参数见表 2。

在环境温度 $t=20$ °C、大地电阻率取典型值 100 Ω·m、频率 $f=50$ Hz 的条件下, 利用 MATLAB 软件编程以及 PSCAD 软件建模, 分别计算单回电缆的全维阻抗矩阵, 进行对比以验证算法的正确性。计算结果如式(37)~式(42)所示。

PSCAD 计算结果为:

$$R_{\text{PSCAD}} = \begin{bmatrix} R_{cAcA} & R_{cAcB} & R_{cAcC} & R_{cAsA} & R_{cAsB} & R_{cAsC} \\ R_{cBcA} & R_{cBcB} & R_{cBcC} & R_{cBsA} & R_{cBsB} & R_{cBsC} \\ R_{cCcA} & R_{cCcB} & R_{cCcC} & R_{cCsA} & R_{cCsB} & R_{cCsC} \\ R_{sAcA} & R_{sAcB} & R_{sAcC} & R_{sAsA} & R_{sAsB} & R_{sAsC} \\ R_{sBcA} & R_{sBcB} & R_{sBcC} & R_{sBsA} & R_{sBsB} & R_{sBsC} \\ R_{sCcA} & R_{sCcB} & R_{sCcC} & R_{sCsA} & R_{sCsB} & R_{sCsC} \end{bmatrix} = \quad (37)$$

$$\begin{bmatrix} 0.6472 & 0.4926 & 0.4926 & 0.5114 & 0.4926 & 0.4926 \\ 0.4926 & 0.6472 & 0.4926 & 0.4926 & 0.5114 & 0.4926 \\ 0.4926 & 0.4926 & 0.6472 & 0.4926 & 0.4926 & 0.5114 \\ 0.5114 & 0.4926 & 0.4926 & 0.5435 & 0.4926 & 0.4926 \\ 0.4926 & 0.5114 & 0.4926 & 0.4926 & 0.5435 & 0.4926 \\ 0.4926 & 0.4926 & 0.5114 & 0.4926 & 0.4926 & 0.5435 \end{bmatrix} \times 0.1 \Omega / \text{km}$$

$$X_{\text{PSCAD}} = \begin{bmatrix} X_{cAcA} & X_{cAcB} & X_{cAcC} & X_{cAsA} & X_{cAsB} & X_{cAsC} \\ X_{cBcA} & X_{cBcB} & X_{cBcC} & X_{cBsA} & X_{cBsB} & X_{cBsC} \\ X_{cCcA} & X_{cCcB} & X_{cCcC} & X_{cCsA} & X_{cCsB} & X_{cCsC} \\ X_{sAcA} & X_{sAcB} & X_{sAcC} & X_{sAsA} & X_{sAsB} & X_{sAsC} \\ X_{sBcA} & X_{sBcB} & X_{sBcC} & X_{sBsA} & X_{sBsB} & X_{sBsC} \\ X_{sCcA} & X_{sCcB} & X_{sCcC} & X_{sCsA} & X_{sCsB} & X_{sCsC} \end{bmatrix} = \quad (38)$$

$$\begin{bmatrix} 0.6614 & 0.4781 & 0.4345 & 0.6050 & 0.4781 & 0.4345 \\ 0.4781 & 0.6614 & 0.4781 & 0.4345 & 0.6050 & 0.4781 \\ 0.4345 & 0.4781 & 0.6614 & 0.4781 & 0.4345 & 0.6050 \\ 0.6050 & 0.4345 & 0.4781 & 0.6029 & 0.4781 & 0.4345 \\ 0.4781 & 0.6050 & 0.4345 & 0.4781 & 0.6029 & 0.4781 \\ 0.4345 & 0.4781 & 0.6050 & 0.4345 & 0.4781 & 0.6029 \end{bmatrix} \Omega / \text{km}$$

MATLAB 计算结果为:

$$R_{\text{MATLAB}} = \begin{bmatrix} R_{cAcA} & R_{cAcB} & R_{cAcC} & R_{cAsA} & R_{cAsB} & R_{cAsC} \\ R_{cBcA} & R_{cBcB} & R_{cBcC} & R_{cBsA} & R_{cBsB} & R_{cBsC} \\ R_{cCcA} & R_{cCcB} & R_{cCcC} & R_{cCsA} & R_{cCsB} & R_{cCsC} \\ R_{sAcA} & R_{sAcB} & R_{sAcC} & R_{sAsA} & R_{sAsB} & R_{sAsC} \\ R_{sBcA} & R_{sBcB} & R_{sBcC} & R_{sBsA} & R_{sBsB} & R_{sBsC} \\ R_{sCcA} & R_{sCcB} & R_{sCcC} & R_{sCsA} & R_{sCsB} & R_{sCsC} \end{bmatrix} = \quad (39)$$

$$\begin{bmatrix} 0.6502 & 0.4935 & 0.4935 & 0.5105 & 0.4935 & 0.4935 \\ 0.4935 & 0.6502 & 0.4935 & 0.4935 & 0.5105 & 0.4935 \\ 0.4935 & 0.4935 & 0.6502 & 0.4935 & 0.4935 & 0.5105 \\ 0.5105 & 0.4935 & 0.4935 & 0.5478 & 0.4935 & 0.4935 \\ 0.4935 & 0.5105 & 0.4935 & 0.4935 & 0.5478 & 0.4935 \\ 0.4935 & 0.4935 & 0.5105 & 0.4935 & 0.4935 & 0.5478 \end{bmatrix} \times 0.1 \Omega / \text{km}$$

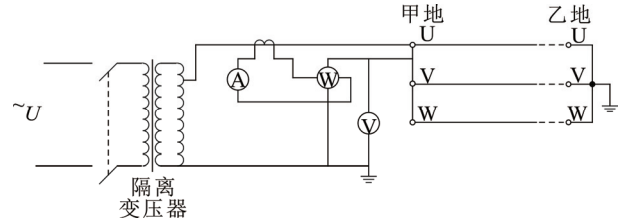


图6 零序阻抗参数测量接线

Fig.6 Zero sequence impedance measurement wiring

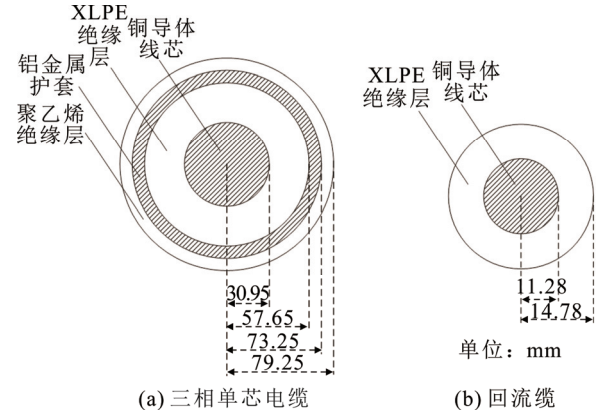


图7 电缆结构尺寸

Fig.7 Cable structure size

表2 电缆主要参数

Table 2 Main parameters of cable

电缆类型	层编号	层名称	主要参数	外径/mm
三相单芯电缆	1	导体(铜)	90 °C 下电阻率为 $2.1 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$	61.9
	2	主绝缘(XLPE)	相对介电常数为 2.3, 厚 24 mm	115.3
	3	铅套(金属护套)	70 °C 下电阻率为 $2.5 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$, 厚 2.8 mm	146.5
	4	外护套(沥青+PE 护套)	相对介电常数为 2.3, 厚 3.0 mm	158.5
回流缆	1	导体(铜)	90 °C 下电阻率为 $1.8 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$	22.56
	2	主绝缘(XLPE)	相对介电常数为 2.3, 厚 3.5 mm	29.56

$$X_{\text{MATLAB}} = \begin{bmatrix} X_{cAcA} & X_{cAcB} & X_{cAcC} & X_{cAsA} & X_{cAsB} & X_{cAsC} \\ X_{cBcA} & X_{cBcB} & X_{cBcC} & X_{cBsA} & X_{cBsB} & X_{cBsC} \\ X_{cCcA} & X_{cCcB} & X_{cCcC} & X_{cCsA} & X_{cCsB} & X_{cCsC} \\ X_{sAcA} & X_{sAcB} & X_{sAcC} & X_{sAsA} & X_{sAsB} & X_{sAsC} \\ X_{sBcA} & X_{sBcB} & X_{sBcC} & X_{sBsA} & X_{sBsB} & X_{sBsC} \\ X_{sCcA} & X_{sCcB} & X_{sCcC} & X_{sCsA} & X_{sCsB} & X_{sCsC} \end{bmatrix} = \quad (40)$$

以 PSCAD 输出结果为基准, 计算 MATLAB 计算结果的相对误差如下所述。

$$R = \left| \frac{R_{\text{MATLAB}} - R_{\text{PSCAD}}}{R_{\text{PSCAD}}} \right| \times 100\% =$$

$$\begin{bmatrix} 0.46 & 0.18 & 0.18 & 0.19 & 0.18 & 0.18 \\ 0.18 & 0.46 & 0.18 & 0.18 & 0.19 & 0.18 \\ 0.18 & 0.18 & 0.46 & 0.18 & 0.18 & 0.19 \\ 0.19 & 0.18 & 0.18 & 0.78 & 0.18 & 0.18 \\ 0.18 & 0.19 & 0.18 & 0.18 & 0.78 & 0.18 \\ 0.18 & 0.18 & 0.19 & 0.18 & 0.18 & 0.78 \end{bmatrix} \% \quad (41)$$

$$X = \left| \frac{X_{\text{MATLAB}} - X_{\text{PSCAD}}}{X_{\text{PSCAD}}} \right| \times 100\% =$$

$$\begin{bmatrix} 0.29 & 1.01 & 1.11 & 0.07 & 1.01 & 1.11 \\ 1.01 & 0.29 & 1.01 & 1.11 & 0.07 & 1.01 \\ 1.11 & 1.01 & 0.29 & 1.01 & 1.11 & 0.07 \\ 0.07 & 1.11 & 1.01 & 0.75 & 1.01 & 1.11 \\ 1.01 & 0.07 & 1.11 & 1.01 & 0.75 & 1.01 \\ 1.11 & 1.01 & 0.07 & 1.11 & 1.01 & 0.75 \end{bmatrix} \% \quad (42)$$

由式(41)、(42)可知, MATLAB 计算得到电缆串联阻抗中各元素与 PSCAD 建模输出的阻抗元素相差无几, 单长电阻相对误差最大为 0.78%, 单长电抗相对误差最大为 1.11%, 误差在可控允许范围内, 说明了此计算方法的正确性与准确性。

2.3 序阻抗对比

得到全维串联阻抗矩阵后, 按前文所述, 分别计算护套两端接地与经保护器接地(单端接地)方式下, MATLAB 程序输出与 PSCAD 建模计算的电缆序阻抗结果对比见表 3。

由表 3 结果可知:

1) 在护套两端接地与单端接地方式下, 电缆正零序参数的计算结果与仿真结果均较相符, 参数最大误差为 2.32%, 误差在可控允许范围内, 证明了算法的正确性与精确性。

2) 当护套单端接地时, 零序参数远大于正序参数。此时正序电流通路为电缆线芯, 而零序电流通路为线芯-大地回路。大地等值回路与线芯距离远, 零序回流的去磁能力微弱, 零序电阻电抗明显

增大; 当护套两端接地时, 正零序参数差别不大。此时正序电流通路为电缆线芯, 零序电流通路为线芯-金属护套回路。零序电流几乎全部通过距离线芯很近的同相金属护套回流, 对线芯产生强去磁作用, 使得零序阻抗显著降低。

3) 对比护套单端接地时的正序参数, 当护套两端接地时, 正序电阻略微增大, 正序电抗显著减小。因为在金属护套两端接地时, 护套中会感应出与芯线电流方向相反的电流, 产生护套损耗。而护套的损耗增加了芯线的正序电阻, 护套中反向电流的去磁作用则使得线芯的正序电抗明显减小。

3 序阻抗影响因素

在第 2 章中, 已经验证了所述计算方法的准确性, 因此采用 MATLAB 编程对实际工程中不同工况下的电缆序参数进行计算, 包括不同接地方式、回流缆敷设位置、土壤电阻率大小、电缆本体排列方式对电缆序参数的影响。

3.1 不同接地方式

电缆敷设按照 ABC 三相“一”字水平排列, 间隔 0.5 m; 考虑工程实际^[20,28], 回流缆敷设在距离 C 相(远离 B 相) 0.15 m 处。对前述 4 种接地方式下的正零序阻抗进行计算见表 4。

由表 4 结果可知:

1) 对比 4 种接地方式下的正序参数, 护套双端接地的正序阻抗明显减小。此时 4 种方式下的电缆正序通路均为电缆线芯。

当护套单端接地时, 金属护套中无电流流过; 当护套双端接地时, 金属护套感应出与线芯流过的等大反相电流, 产生护套损耗。护套的损耗增加了线芯的正序电阻, 而反向电流的去磁作用则使得线芯的正序电抗显著减小, 对外起到良好电磁屏蔽效果; 当护套交叉互联接地时, 三相护套的感应电压相互抵消至 0, 因此完全换位下的护套感应电流几

表 3 序阻抗相对误差

Table 3 Relative error of sequence impedance

电缆序参数	护套两端接地				护套单端接地			
	R_1	X_1	R_0	X_0	R_1	X_1	R_0	X_0
仿真值/(Ω·km ⁻¹)	0.018 1	0.047 6	0.017 8	0.048 0	0.015 8	0.198 1	0.162 2	1.603 1
计算值/(Ω·km ⁻¹)	0.018 1	0.046 7	0.017 7	0.046 9	0.015 7	0.200 7	0.163 7	1.576 9
相对误差/%	-0.01	1.92	0.21	2.32	0.56	-1.31	-0.91	1.63

表 4 不同接地方式下序阻抗参数

接地方式	$R_1/(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	$X_1/(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	$R_0/(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	$X_0/(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$
护套双端接地	0.018 1	0.046 7	0.017 7	0.046 9
护套单端接地	0.015 7	0.200 7	0.163 7	1.576 9
交叉互联接地	0.015 7	0.200 7	0.017 7	0.046 9
回流缆加保护器接地	0.016 8	0.194 9	0.149 8	0.651 4

乎为 0, 交叉互联接地的正序参数与护套单端接地保持一致; 当回流缆加保护器接地时, 护套断开, 护套上无电流流过, 回流缆上感应出反向电流, 产生电阻损耗, 增大了线芯正序电阻, 而回流缆布置于电缆外部, 反向电流的去磁作用可忽略不计, 电缆正序电抗基本不变。

2) 对比 4 种接地方式下的零序参数, 护套双端接地与护套交叉互联接地零序参数保持一致为最小, 护套单端接地时的零序参数最大, 回流缆加保护器接地的零序参数处于中间。

当护套两端接地与交叉互联接地时, 电缆零序通路为线芯-护套回路; 护套单端接地时, 电缆零序通路为线芯-大地回路。相较于单端接地方式, 护套双端接地与交叉互联接地时, 由于护套的电磁屏蔽效果, 零序电阻电抗显著减小。当采用回流缆加保护器方式接地时, 零序电流通路为线芯-回流缆, 此时零序电流经回流缆流回, 零序电阻与零序电抗大于护套双端接地方式下、小于护套单端接地方式下所对应的零序参数。值得注意, 由于水平布置的三相线芯与回流缆距离并不相等, 三相线芯与回流缆间的互阻抗与距离负相关, 线芯中流过电流与距离正相关, 此时有 $I_{cC} > I_{cB} > I_{cA}$ 。零序参数大小与回流缆布置的空间位置相关, 在下文进行讨论。

3.2 回流缆位置

对单回电缆“一”字水平、“品”字 2 种排列情况, 采用回流缆加保护器接地方式进行讨论。其坐标轴的建立如图 8 所示。

3.2.1 “一”字排列

对于“一”字排列, 由于 ABC 三相水平对称, 选取 B 相电缆线芯为横坐标原点, ABC 三相电缆线芯距离地面高度 1 m。结合工程中常见隧道情况^[24], 回流缆 x 坐标在 0~2 m 内, 电缆正零序参数见图 9。

由图 9 可知, 对“一”字排列电缆而言, 其特征点 $x=0.5$ m 处为 C 相电缆线芯。在 0~0.5 m 间, 正零序电阻先减后增, 正零序电抗与阻抗先增后减; 在 0.5~2.0 m 间, 正零序电阻递减, 正零序电抗与

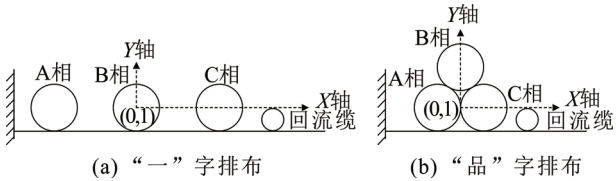


图 8 单回电缆排列方式

Fig.8 Single-circuit cable arrangement

阻抗递增。考虑电缆与回流缆实际空间尺寸, 当回流缆紧挨 C 相电缆时($x=0.6$ m)时, 正序电阻为 $0.017\ 25\ \Omega/\text{km}$, 零序阻抗为 $0.627\ 2\ \Omega/\text{km}$ 。已有学者研究表明, 当敷设回流缆时, 为消除正常运行下的回流缆感应电压、平衡三相电缆电流, 回流缆敷设遵循“三七”分布原则^[28-29], 当取“三七”分布点($x=0.35$ m)时, 正序电阻为 $0.016\ 43\ \Omega/\text{km}$, 零序阻抗为 $0.596\ 4\ \Omega/\text{km}$ 。

分析可知, 在有限空间管廊, 对于“一”字排列电缆, 回流缆“三七”分布布置时, 正序电阻较理论最小值仅增大 2.30%, 零序阻抗较理论最大值仅减小 1.00%, “一”字排列电缆的回流缆分布对其正零序参数变化影响小, 考虑三相平衡性时回流缆“三七”分布点具有优势。当管廊内电缆支架空间宽敞时, 因回流缆“三七”分布曲线呈双曲线特性, 同时结合图 9 可知, 当回流缆远离电缆线芯时, 正序电阻减小, 零序阻抗增大, 利于电缆正常运行时的传输损耗减小与系统发生短路故障时的过电压抑制^[29], 因此对回流缆布置的理论优势点为距离电缆线芯达空间最远的“三七”分布双曲线上的点。

3.2.2 “品”字排列

对“品”字排列, 同样有水平对称性, 选取 A、C 相电缆线芯中点为横坐标原点, A、C 相电缆线芯距离地面高度 1 m。结合实际情况^[24], 回流缆 x 坐标在 0~0.3 m 内, 电缆正零序参数见图 10。

由图 10 可知, 对于电缆“品”字排列而言, 其特征点 $x=0.08$ m 处为 C 相电缆线芯, 受电缆实际空间尺寸约束, 回流缆 $x \geq 0.1$ m。此时, 电缆正序电阻与回流缆至 C 相线芯距离呈负相关, 零序阻抗与回流缆至 C 相线芯距离呈正相关, 回流缆布置与 C 相线芯距离越大越好。当回流缆紧挨 C 相电缆时($x=0.1$ m), 正序电阻为 $0.017\ 26\ \Omega/\text{km}$, 零序阻抗为 $0.406\ 3\ \Omega/\text{km}$; 当回流缆远离 C 相电缆时($x=0.3$ m), 正序电阻为 $0.015\ 75\ \Omega/\text{km}$, 零序阻抗为 $0.725\ \Omega/\text{km}$ 。此时为消除回流缆感应电压且平衡三相负荷电流^[29], 回流缆敷设于三相电缆几何中心($x=0$ m, $y=0.046\ 2$ m,

y 轴零点见图 8(b))时, 正序电阻为 $0.015\ 67\ \Omega/\text{km}$, 零序阻抗为 $1.001\ \Omega/\text{km}$ 。

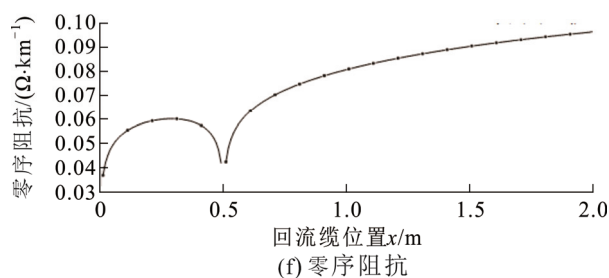
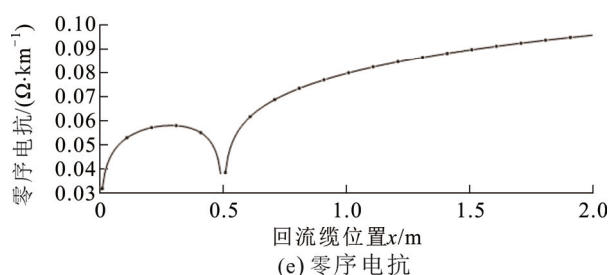
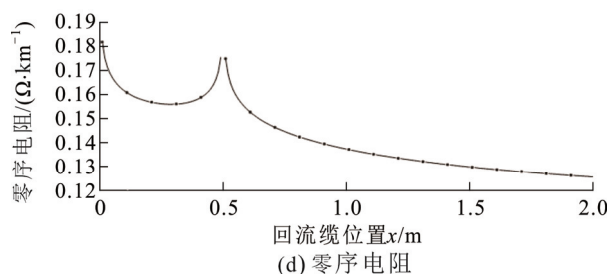
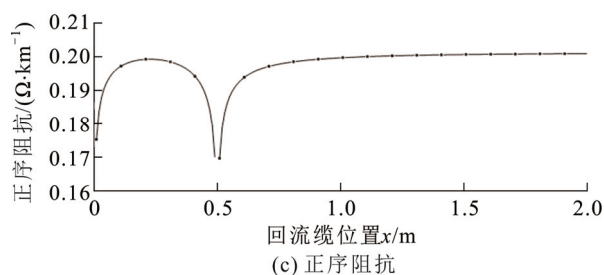
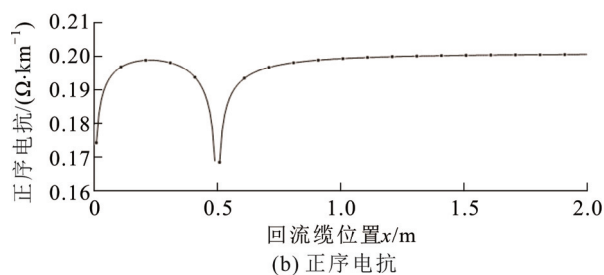
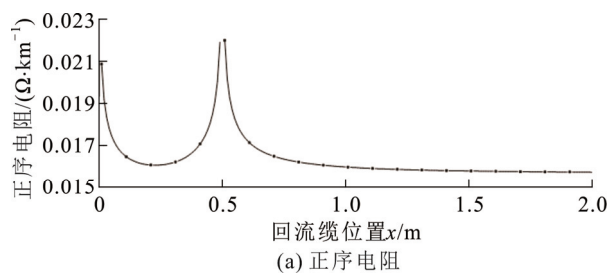


图9 “一”字排列电缆正零序参数

Fig.9 Horizontally arranges cable parameters

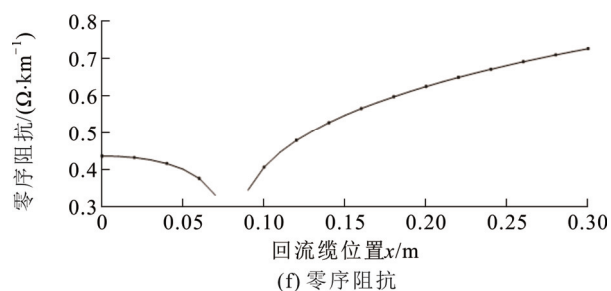
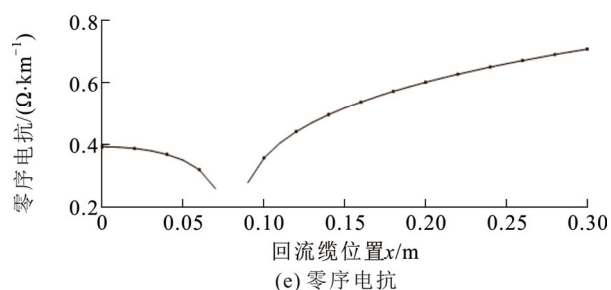
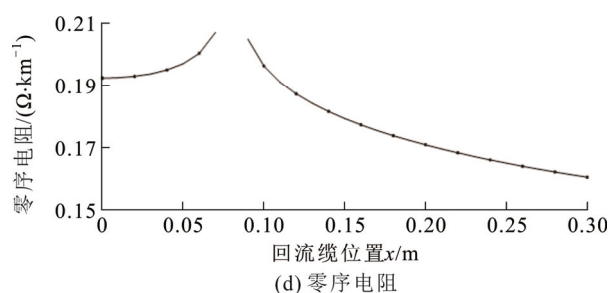
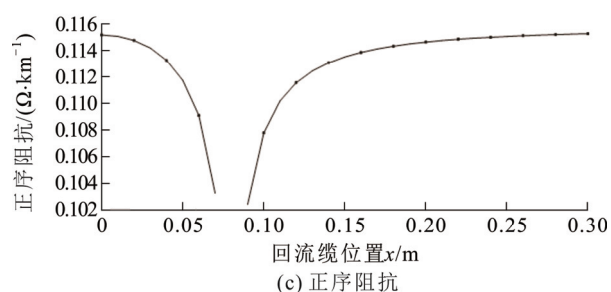
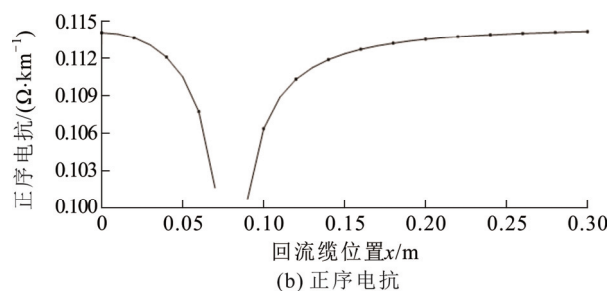
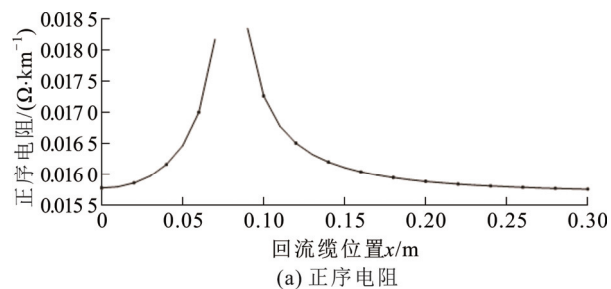


图10 “品”字电缆正零序参数

Fig.10 Pin-shape arranges cable parameters

分析可知, 在有限空间管廊, 对于“品”字排列电缆, 回流缆布置的理论优势点为三相电缆几何中心。而实际敷设时受电缆空间尺寸约束, 现场布置往往直接将回流缆敷设于 C 相电缆边; 当空间宽敞时, 推荐回流缆布置可远离 C 相电缆, 使得正序电阻减小、零序阻抗增大, 利于系统正常运行时功率传输损耗降低与短路故障时的过电压抑制^[29]。

3.3 土壤电阻率大小

电缆排列考虑“一”字水平与“品”字排列(“一”字间距 0.5 m, 回流缆距离 C 相电缆 0.15 m; “品”字排列, 回流缆距离 C 相电缆 0.1 m) 2 种方式。现场环境存在雨雪、潮湿天气等因素影响, 不同段电缆所处大地电阻率不尽相同。常见土壤电阻率为 0.50~100 $\Omega\cdot\text{m}$ 间, 取 $\rho=0.5、1、10、20、50、100 \Omega\cdot\text{m}$, 对 2 种排列方式下电缆参数计算见附录 A。由附录 A 结果可知:

1) 在 4 种接地方式下, 正序电流通路均为电缆线芯, 因此大地电阻率变化时, 正序电阻与正序电抗保持不变。

2) 在护套双端接地与交叉互联接地时, 零序电流通路为线芯-护套回路, 因此零序参数不随电阻率变化而变化, 保持恒定。

3) 在护套单端接地时, 零序电流通路为线芯-大地回路。此时, 土壤电阻率的变化在零序参数上的影响反映在零序电抗上, 而零序电阻值不变。随着电阻率从 100 $\Omega\cdot\text{m}$ 减小至 0.5 $\Omega\cdot\text{m}$ 时, “一”字排列方式下零序电抗从 1.576 9 Ω/km 减小到 1.077 6 Ω/km , 减小 31.66%; “品”字排列方式下零序电抗从 1.749 1 Ω/km 减小到 1.249 8 Ω/km , 减小 28.55%。

4) 在回流缆加保护器接地方式下, 零序电流通路为线芯-回流缆。由计算结果可知, 当土壤电阻率为高值时, 零序电流经回流缆流回, 随着土壤电阻率降低, 大地等值阻抗减小, 部分零序电流被大地回路分流, 零序电阻与零序电抗随之减小。随着电阻率从 100 Ω/km 减小至 0.5 Ω/km 时, “一”字排列方式下零序电阻减小 14.42%, 零序电抗减小 12.40%; “品”字排列方式下零序电阻减小 13.39%, 零序电抗减小 8.18%。

3.4 排列方式

对实际工程中输电通路而言, 多回电缆并联输电通道存在多种排列方式^[17]。平行 2 回电缆的典型敷设方式有“一”字水平、“一”字垂直、“品”字水平和“品”字垂直排列等^[8-11], 如图 11 所示。

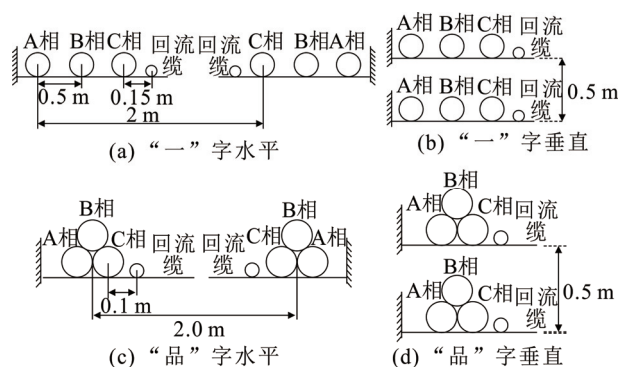


图 11 双回电缆不同排列方式

Fig.11 Different arrangements of double-circuit cables

单回电缆“一”字水平、“品”字排列方式下正零序参数见附录 B 表 B1, 双回电缆 4 种排列方式下正零序参数见表附录 B 表 B2, 以单回电缆参数为基准算出双回电缆并联时的正零序阻抗参数相对误差见表附录 B 表 B3。由附录 B 结果可知:

1) 在护套单端接地时, 电缆并列运行对零序参数影响较大, 此时每回电缆流过同向的零序电流, 任一相线芯所交链的磁通除本回路其他 2 相零流产生的互感磁通外, 还有其他回路的三相零流所产生的互感磁通, 相互助增, 因此多回电缆并联运行会使得电缆的零序阻抗大为增加。

2) 在护套双端接地与交叉互联接地时, 可以看到各种排列方式下, 电缆并列运行对零序参数并无明显影响, 零序电阻与零序电抗误差最高达 2.13%与 0.53%。此时零序电流通路为线芯-护套回路, 护套中感应电流与线芯电流等大反向, 各相电缆之间无电磁耦合, 不同的排列方式并不影响零序参数。

3) 在回流缆加保护器接地时, 此时零序通路为线芯-回流缆。对单回电缆而言, 回流缆中流与本回三相线芯电流之和等大反向的电流, 因此对任一相线芯而言, 其交链的磁通为本回路其他 2 相零流外加其他回路的 3 相零流所产生的互感助增磁通与本回路回流缆零流外加其他回路回流缆零流所产生的互感削弱磁通之和。不难得出, 此接地方式下的零序参数小于同一排列方式下护套单端接地的零序参数, 大于护套双端接地方式下的零序参数。此时, 随着并联回路数的增多, 电缆零序参数递增, 增大程度取决于各回电缆排列的空间位置。

4) 对正序参数而言, 电缆不同排列方式与不同接地方式下, 正序电流通路均为三相线芯, 接地

方式不同对参数的影响不大。当电缆按照“品”字排列且不计及回流缆影响时,各回电缆间ABC三相距离差异较小,不同电缆回路间互阻抗相近,单回电缆的正序电流对另一回线的三相互感电势矢量和近似为0。在护套双端接地、单端接地、交叉互联接地时,不同排列方式下的正序电阻与正序电抗最大误差仅为0.42%与0.89%;当采用回流缆加保护器方式敷设时,“品”字垂直排列的正序电阻相对误差达到17.15%,而“品”字水平排列的正序电阻相对误差仅为1.24%。

4 结论

1) 本文所提算法充分考虑了金属护套、回流缆、各回电缆电流的耦合影响,对电缆接地方式、本体排列方式均无特殊要求,适用于各类工程实践中的电缆序阻抗参数计算,计算结果与PSCAD仿真结果比对,相对误差最大为2.32%,符合度高。

2) 相较于其他3种接地方式,护套双端接地时电缆正序电抗明显减小,仅为护套单端接地时20%~30%。接地方式不同导致零序参数差异显著,护套单端接地时电缆零序参数显著增大,敷设回流缆可减小零序参数。

3) 敷设回流缆时:对于“一”字排列电缆,“三七”分布布置所对应序参数相较于理论极值点的相对偏差最高达2.30%,无明显影响。对于有限空间管廊,回流缆敷设选择“三七”分布^[29];当空间宽敞时,回流缆敷设应尽可能远离电缆线芯且满足在“三七”分布曲线上。对于“品”字排列电缆,回流缆敷设在三相电缆几何中心^[29];受电缆实际空间尺寸约束时,回流缆敷设于下方电缆边就近摆放;当空间宽敞时,回流缆敷设位置可远离电缆线芯。

4) 当多回电缆并联时:护套单端接地方式下单回电缆受到其他回电缆的助增磁通影响,不同排列方式下零序参数显著增大70%~90%;在护套双端接地与交叉互联接地时,各回电缆之间无电磁耦合,可不考虑各回电缆间零序互感影响;在回流缆加保护器接地时,零序阻抗增大程度则取决于各回电缆及其回流缆敷设空间位置。

附录见本刊网络版(<http://hve.epri.sgcc.com.cn>)。

参考文献 References

- [1] 于志鹏,许永鹏,钱庆林,等.潮湿环境下中压电缆接头早期故障的演变规律及特性[J].高电压技术,2024,50(3):1311-1321.
- YU Zhipeng, XU Yongpeng, QIAN Qinglin, et al. Evolution law and

- characteristics of early faults of medium voltage cable joints in humid environment[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(3): 1311-1321.
- [2] 伊德伦,郑莹莹,蒋浩月,等.计及硅橡胶应力松弛的电缆接头界面压力演变仿真研究[J].高电压技术,2024,50(3):1043-1052.
- YI Delun, ZHENG Yingying, JIANG Haoyue, et al. Simulation study of interfacial pressure evolution of cable joints considering stress relaxation of silicone rubber[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(3): 1043-1052.
- [3] 赵书静,龚梁涛,詹博博,等.电缆局部缺陷的步进频连续波定位方法[J].高电压技术,2023,49(5):2121-2130.
- ZHAO Shujing, GONG Liangtao, ZHAN Bobo, et al. Location method for local defects of cable based on stepped frequency continuous wave technology[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(5): 2121-2130.
- [4] HU X, YANG S C, DU Q, et al. Radio-frequency detection of partial discharge in power cable joints[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2024, 39(1): 317-324.
- [5] POMPODAKIS E E, CHRYSOCHOS A I, AHMED A, et al. Implementation of unbalanced thermoelectric equivalent circuit for power flow and thermal rating of underground LV and MV cables[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(6): 4989-5002.
- [6] 余盛灿,余涛,陈鑫沛,等.基于图表示学习与知识蒸馏的电缆故障快速识别方法[J].电力信息与通信技术,2024,22(4):11-20.
- YU Shengcan, YU Tao, CHEN Xinpei, et al. A fast cable fault identification method based on graph representation learning and knowledge distillation[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2024, 22(4): 11-20.
- [7] 林桂辉,朱鹏宇,王灿,等.基于Carson理论和EMTP的220kV多回电缆线路电气参数及不平衡度分析[J].电力系统保护与控制,2019,47(20):142-148.
- LIN Guihui, ZHU Pengyu, WANG Can, et al. Analysis of electrical parameters and unbalance factors of 220 kV multi-circuit transmission cable based on Carson theory and EMTP simulation[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(20): 142-148.
- [8] 饶显杰,徐忠林,龙林,等.基于频域反射法的电缆缺陷时域诊断特征波形[J].电网技术,2023,47(8):3483-3493.
- RAO Xianjie, XU Zhonglin, LONG Lin, et al. Cable defect time domain diagnostic characteristic waveform based on frequency domain reflection[J]. Power System Technology, 2023, 47(8): 3483-3493.
- [9] 田金虎,刘渝根,赵俊光,等.多回同相多根并联高压电力电缆电流分布及金属护套环流计算[J].高电压技术,2014,40(1):153-159.
- TIAN Jinhu, LIU Yugen, ZHAO Junguang, et al. Circulating current in sheaths and current distribution on same-phase parallel multi-cable of multi-circuit power cable lines[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(1): 153-159.
- [10] 林晓宇.电缆线路参数现场测量与分析[J].供用电,2007,24(6):69-71.
- LIN Xiaoyu. On-site measurement and analysis of cable line parameters[J]. Distribution & Utilization, 2007, 24(6): 69-71.
- [11] 王雄伟,张哲,尹项根,等.多回单芯电力电缆并联运行护套感应电压的计算与分析[J].电力系统保护与控制,2015,43(22):77-84.
- WANG Xiongwei, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Calculation and analysis of sheath induced voltage for multi-circuit single-core power cable lines in parallel[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 77-84.
- [12] 梁志瑞,杨子强,李鹏,等.电网输电线路工频参数测量系统的研究[J].电网技术,2001,25(3):34-37.
- LIANG Zhirui, YANG Ziqiang, LI Peng, et al. Study on measuring system for power frequency parameters of power transmission line[J].

- Power System Technology, 2001, 25(3): 34-37.
- [13] 刘遵义, 卢 明, 吕中宾, 等. 特高压交流输电线路工频参数测量技术及应用[J]. 电网技术, 2009, 33(10): 59-62.
LIU Zunyi, LU Ming, LÜ Zhongbin, et al. Power frequency parameter measurement technology for UHV transmission lines and its application[J]. Power System Technology, 2009, 33(10): 59-62.
- [14] 张全胜, 王和亮, 周作春. 110 kV XLPE 电缆金属护套交叉互联接地探讨[J]. 高电压技术, 2005, 31(11): 71-73.
ZHANG Quansheng, WANG Heliang, ZHOU Zuochun. Study on cross connection grounding of metallic sheath of 110 kV XLPE power cable[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(11): 71-73.
- [15] 王雅芳. XLPE 电力电缆接地系统与感应环流分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
WANG Yafang. Analysis of grounding induced circulating current of XLPE power cable[D]. Hangzhou, China: Zhejiang University, 2012.
- [16] 陆家楠, 袁建生, 马信山. 地下隧道中电力电缆的线路阻抗矩阵相序阻抗矩阵和参数的分析[J]. 电网技术, 1998, 22(9): 5-8.
LU Jiayu, YUAN Jiansheng, MA Xinshan. Analysis of matrix line impedance, matrix phase sequence impedance and parameters of power cables in underground tunnels[J]. Power System Technology, 1998, 22(9): 5-8.
- [17] 王雄伟. 同相并联电缆布置方式优化与继电保护研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
WANG Xiongwei. The research on optimal layout and relay protection of same-phase parallel cables[D]. Wuhan, China: Huazhong University of Science and Technology, 2016.
- [18] 徐 政, 李斯迅, 金砚秋. 海底电缆谐波频段电气参数计算[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(21): 76-84.
XU Zheng, LI Sixun, JIN Yanqiu. Calculation of electrical parameters of submarine cable in harmonic frequency range[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(21): 76-84.
- [19] 徐 政, 钱 洁. 电缆电气参数不同计算方法及其比较[J]. 高电压技术, 2013, 39(3): 689-697.
XU Zheng, QIAN Jie. Comparison of different methods for calculating electrical parameters of power cables[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(3): 689-697.
- [20] 张军强, 董卓元, 盛 飞, 等. 长距离 330 kV 电缆护套交叉互联接地方式研究及回流线优化布置方法[J]. 高压电器, 2020, 56(2): 189-196.
ZHANG Junqiang, DONG Zhuoyuan, SHENG Fei, et al. Research on cross-connection grounding modes of long-distance 330 kV cable sheath and layout optimization of return cable[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(2): 189-196.
- [21] 王晓彤, 项祖涛, 班连庚, 等. 500 kV 电缆线路工频参数的计算与分析[J]. 电网技术, 2013, 37(8): 2310-2315.
WANG Xiaotong, XIANG Zutao, BAN Liangeng, et al. Calculation and analysis on power-frequency parameters for 500 kV cable lines[J]. Power System Technology, 2013, 37(8): 2310-2315.
- [22] 王晓彤, 项祖涛, 陈珍珍, 等. 500 kV XLPE 海底电缆线路的电气参数及其不平衡度分析[J]. 电网技术, 2018, 42(11): 3812-3819.
WANG Xiaotong, XIANG Zutao, CHEN Zhenzhen, et al. Analysis on electrical parameters and its unbalance factors for 500 kV XLPE submarine cable lines[J]. Power System Technology, 2018, 42(11): 3812-3819.
- [23] TLEIS N D. Power systems modelling and fault analysis[M]. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 2008.
- [24] BENATO R, PAOLUCCI A. 超高压交流地下电力系统的性能和规划[M]. 徐 政, 译. 北京: 机械工业出版社, 2012.
BENATO R, PAOLUCCI A. EHV AC undergrounding electrical power: performance and planning[M]. XU Zheng, translated. Beijing, China: China Machine Press, 2012.
- [25] CARSON J R. Wave propagation in overhead wires with ground return[J]. The Bell System Technical Journal, 1926, 5(4): 539-554.
- [26] LIN Y, XU Z. Cable sheath loss reduction strategy research based on the coupled line model[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(5): 2303-2311.
- [27] 国家电网有限公司. 电气试验化验(上、下册)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2020.
State Grid Co., Ltd. Electrical testing (Volume 1 and 2)[M]. Beijing, China: China Electric Power Press, 2020.
- [28] 李乃一, 曹俊平, 王少华, 等. 一起海陆缆混合线路接地电流异常原因分析[J]. 电瓷避雷器, 2021(2): 206-211.
LI Naiyi, CAO Junping, WANG Shaohua, et al. Abnormal grounding current analysis of land and submarine cable hybrid line[J]. Insulators and Surge Arresters, 2021(2): 206-211.
- [29] 杭裕保, 陈晓鸣, 陈晓凌, 等. 关于高压电缆系统回流线“三·七”开布置的探讨[C]//2013 年电气学术交流会议论文集. 深圳: 中国水力发电工程学会电气专业委员会, 水利水电气信息网, 2013.
HANG Yubao, CHEN Xiaoming, CHEN Xiaoling, et al. Discussion on the “three-seven” layout of return lines of high-voltage cable systems[C]//Proceedings of the 2013 Electrical Academic Exchange Conference. Shenzhen, China: Electrical Professional Committee of China Hydropower Engineering Society, Water Resources, Hydropower, Electrical Information Network, 2013.



YE Haoliang
Corresponding author

叶昊亮(通信作者)
1997—, 男, 硕士, 工程师
主要从事高压与绝缘技术、输变电设备运维与
状态评估方面的研究工作
E-mail: 6171203@qq.com

收稿日期 2024-04-29 修回日期 2025-07-28 编辑 曾文君

附录 A

表 A1 土壤电阻率变化电缆“一”字排列参数

Table A1 Soil resistivity change cable “one” arrangement parameters

土壤电阻率	Ω/km															
	护套双端接地				护套单端接地				交叉互联接地				回流缆加保护器接地			
	R_1	X_1	R_0	X_0	R_1	X_1	R_0	X_0	R_1	X_1	R_0	X_0	R_1	X_1	R_0	X_0
0.5	0.018 1	0.046 7	0.017 8	0.046 9	0.015 7	0.200 7	0.163 7	1.077 6	0.015 7	0.200 5	0.017 8	0.046 9	0.017 5	0.193 4	0.128 2	0.570 6
1.0	0.018 1	0.046 7	0.017 7	0.046 9	0.015 7	0.200 7	0.163 7	1.142 9	0.015 7	0.200 5	0.017 7	0.046 9	0.017 4	0.193 7	0.131 0	0.583 8
10	0.018 1	0.046 7	0.017 7	0.046 9	0.015 7	0.200 7	0.163 7	1.359 9	0.015 7	0.200 6	0.017 7	0.046 9	0.017 0	0.194 4	0.140 6	0.621 4
20	0.018 1	0.046 7	0.017 7	0.046 9	0.015 7	0.200 7	0.163 7	1.425 2	0.015 7	0.200 6	0.017 7	0.046 9	0.017 0	0.194 6	0.143 4	0.631 1
50	0.018 1	0.046 7	0.017 7	0.046 9	0.015 7	0.200 7	0.163 7	1.511 6	0.015 7	0.200 6	0.017 7	0.046 9	0.016 9	0.194 8	0.147 1	0.643 0
100	0.018 1	0.046 7	0.017 7	0.046 9	0.015 7	0.200 7	0.163 7	1.576 9	0.015 7	0.200 6	0.017 7	0.046 9	0.016 8	0.194 9	0.149 8	0.651 4

表 A2 土壤电阻率变化电缆“品”字排列参数

Table A2 Soil resistivity change cable "pin" arrangement parameters

土壤电阻率	Ω/km															
	护套双端接地				护套单端接地				交叉互联接地				回流缆加保护器接地			
	R_1	X_1	R_0	X_0	R_1	X_1	R_0	X_0	R_1	X_1	R_0	X_0	R_1	X_1	R_0	X_0
0.5	0.018 7	0.046 4	0.017 7	0.046 9	0.015 7	0.114 6	0.163 7	1.249 8	0.015 7	0.114 6	0.017 7	0.046 9	0.016 1	0.112 9	0.150 0	0.529 7
1.0	0.018 7	0.046 4	0.017 7	0.046 9	0.015 7	0.114 6	0.163 7	1.315 1	0.015 7	0.114 6	0.017 7	0.046 9	0.016 1	0.113 0	0.153 4	0.537 5
10	0.018 7	0.046 4	0.017 7	0.046 9	0.015 7	0.114 6	0.163 7	1.532 1	0.015 7	0.114 6	0.017 7	0.046 9	0.016 0	0.113 2	0.163 9	0.559 5
20	0.018 7	0.046 4	0.017 7	0.046 9	0.015 7	0.114 6	0.163 7	1.597 4	0.015 7	0.114 6	0.017 7	0.046 9	0.016 0	0.113 2	0.166 8	0.565 3
50	0.018 7	0.046 4	0.017 7	0.046 9	0.015 7	0.114 6	0.163 7	1.683 8	0.015 7	0.114 6	0.017 7	0.046 9	0.015 9	0.113 3	0.170 5	0.572 1
100	0.018 7	0.046 4	0.017 7	0.046 9	0.015 7	0.114 6	0.163 7	1.749 1	0.015 7	0.114 6	0.017 7	0.046 9	0.015 9	0.113 3	0.173 2	0.576 9

附录 B

表 B1 不同排列方式下单回电缆参数

Table B1 Parameters of single -circuit cables in different arrangements

排列方式	Ω/km															
	护套双端接地				护套单端接地				交叉互联接地				回流缆加保护器接地			
	R_1	X_1	R_0	X_0	R_1	X_1	R_0	X_0	R_1	X_1	R_0	X_0	R_1	X_1	R_0	X_0
“一”字	0.018 1	0.046 7	0.017 7	0.046 9	0.015 7	0.200 7	0.163 7	1.576 9	0.015 7	0.200 6	0.017 7	0.046 9	0.016 8	0.194 9	0.149 8	0.651 4
“品”字	0.018 7	0.046 4	0.017 7	0.046 9	0.015 7	0.114 6	0.163 7	1.749 1	0.015 7	0.114 6	0.017 7	0.046 9	0.015 9	0.113 3	0.173 2	0.576 9

表 B2 不同排列方式下双回电缆参数

Table B2 Parameters of double-circuit cables in different arrangements

排列方式	Ω/km															
	护套双端接地				护套单端接地				交叉互联接地				回流缆加保护器接地			
	R_1	X_1	R_0	X_0	R_1	X_1	R_0	X_0	R_1	X_1	R_0	X_0	R_1	X_1	R_0	X_0
“一”字水平	0.018 1	0.046 7	0.018 1	0.046 7	0.017 4	0.192 3	0.311 7	2.689 4	0.018 6	0.193 8	0.017 7	0.046 9	0.016 5	0.195 6	0.198 8	0.740 7
“一”字垂直	0.018 0	0.046 7	0.017 7	0.046 9	0.015 7	0.232 1	0.311 8	2.933 9	0.015 7	0.231 9	0.017 7	0.046 9	0.016 8	0.225 1	0.192 4	0.832 1
“品”字水平	0.018 7	0.046 4	0.017 7	0.046 9	0.015 7	0.114 5	0.311 9	2.905 6	0.015 7	0.114 6	0.017 7	0.046 9	0.016 1	0.113 6	0.211 8	0.619 6
“品”字垂直	0.018 8	0.046 4	0.017 7	0.046 9	0.015 7	0.113 0	0.316 6	3.111 0	0.015 7	0.113 6	0.017 7	0.046 9	0.018 7	0.113 8	0.220 1	0.671 5

表 B3 双回电缆参数相对误差

Table B3 Relative error of double-circuit cable parameters

排列方式	Ω/km															
	护套双端接地				护套单端接地				交叉互联接地				回流缆加保护器接地			
	R_1	X_1	R_0	X_0	R_1	X_1	R_0	X_0	R_1	X_1	R_0	X_0	R_1	X_1	R_0	X_0
“一”字水平	0.11	0.00	2.13	-0.53	11.35	-4.17	90.41	70.55	18.73	-3.38	-0.09	0.02	-1.68	0.34	32.72	13.71
“一”字垂直	-0.34	0.08	-0.10	0.02	0.00	15.63	90.43	86.05	0.05	15.61	-0.10	0.02	-0.03	15.45	28.44	27.75
“品”字水平	0.00	0.00	-0.07	0.02	0.14	-0.06	90.51	66.12	0.13	-0.03	-0.07	0.02	1.24	0.25	22.34	7.39
“品”字垂直	0.15	-0.02	-0.08	0.02	0.42	-1.39	93.40	77.86	0.17	-0.89	-0.08	0.02	17.15	0.44	27.10	16.40