

高压电缆接地电流的计算及其影响因素分析

潘伟, 王浩, 童斌, 刘霆, 王晗

(国网南京供电公司, 江苏 南京 210019)

摘要:单芯高压电缆金属护套接地电流过大会导致其护套上产生大量附加损耗,降低电缆载流量,缩短电缆使用寿命。为分析电缆线路金属护套中的接地电流,建立了单芯电缆交叉互联接地方式下接地电流的数学计算模型,并编制了相应的计算程序,通过与实测值比较,验证了该计算程序能准确得到实际电流值。在此基础上,分析了单芯高压电缆金属护套接地电流与其接地电阻、护套参数以及大地电阻率等影响因素的关系。结果表明,电缆接地电阻对接地电流的影响较大;在工程实际范围内,金属护套参数对接地电流值影响不大;只有当大地电阻率很低时,接地电流值才对大地电阻率比较敏感。研究结果为高压电缆运行维护提供了理论依据。

关键词:高压电缆;接地电流;计算模型;接地电阻

中图分类号:TM757.3

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2019)02-0147-05

0 引言

随着城市电网的发展,高压电缆线路日益增多,电缆负荷也日益增大。根据电力安全规程规定,单芯高压电缆金属护套必须进行接地处理^[1]。XLPE 高压电缆与普通低压电缆的主要不同之处在于前者内部采用单芯结构,电缆内部线芯电流会在其周围感应出交变的磁场,金属护套在交变磁场的作用下感应出电势。当金属护套接地且与大地形成完整的回路时,护套上会产生接地电流。而接地电流的大小能客观反映电缆线路外护套健康状况,接地电流值异常易造成电缆局部温度升高,加速电缆绝缘的热老化,影响电缆线路的载流量,增加线路运行损耗,严重的情况下可能导致高压电缆发生单相接地故障而停止供电^[2-6]。

电力电缆金属护套接地电流的计算常见报导^[7-10],但对接地电流的研究主要集中在敷设方式、负荷电流^[11-14]等,关于金属护套参数、接地电阻以及大地电阻率对接地电流的影响鲜有研究。文中以单芯电缆应用最广的交叉互联接地方式为例,建立接地电流的数学计算模型,并编制相应计算程序;通过与实测值比较,验证了该计算程序的准确性。针对金属护套参数、接地电阻及大地电阻率等研究较少的因素,详细分析其对接地电流的影响。

1 电缆金属护套交叉互联两端直接接地环流计算方法

如图 1 所示为金属护套交叉互联等效电路。 I_a, I_b, I_c 分别为 A、B、C 三相高压电缆金属护套上流

过的电流值; I_e 为经过大地回路的电流值; R_d 为大地回路的等效电阻, R_{d1}, R_{d2} 为电缆护套两端接地电阻; Z_{ai}, Z_{bi}, Z_{ci} ($i=1, 2, 3$) 分别为第 i 段 A、B、C 相电缆金属护套的自阻抗; U_{ai}, U_{bi}, U_{ci} ($i=1, 2, 3$) 分别为第 i 段 A、B、C 相电缆金属护套上由线芯电流引起的感应电压; $U'_{ai}, U'_{bi}, U'_{ci}$ ($i=1, 2, 3$) 分别为第 i 段 A、B、C 相电缆金属护套上由其他相电缆金属护套中的电流引起的感应电压。

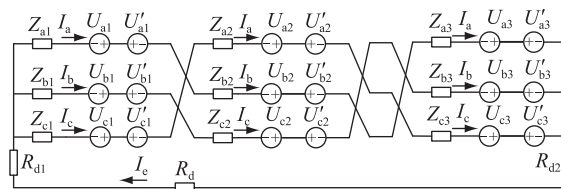


图 1 交叉互联等效电路

Fig.1 Equivalent circuit of cross-bonding grounding mode

由图 1,可得到护套环流方程如下^[15-17]:

$$I_i(Z_{i1}+Z_{j2}+Z_{k3})+I_e(R_{d1}+R_{d2}+R_d)+U'_{i1}+U'_{j2}+U'_{k3} = U_{i1}+U_{j2}+U_{k3} \quad (1)$$

式中:(i, j, k) 分别取值为 (a, b, c), (b, c, a) 和 (c, a, b)。

1.1 线芯电流在金属护套上产生的感应电势

设三相线芯电流平衡,且 $I_a = I$,则由线芯电流引起的 A、B、C 相金属护套上单位长度的感应电势 U_a, U_b, U_c 见参考文献[18]。线芯电流在金属护套上产生的感应电压分别为:

$$U_m = U_{i1}+U_{j2}+U_{k3} = U_i L_1+U_j L_2+U_k L_3 \quad (2)$$

式中:(m, i, j, k) 分别取值为 (A, a, b, c), (B, b, c, a) 和 (C, c, a, b); L_1, L_2, L_3 为电缆交叉互联各分段长度。

1.2 其他相金属护套中的电流在金属护套上产生的感应电势

单位长度金属护套之间的互感抗^[19]计算如式(3)所示,其中 S 为A、B相电缆中心间距, X_{ac} 与 X_{bc} 同理可以得到。

$$X_{ab} = X_{ba} = 2\omega \times 10^{-7} \ln(D_e/S) \quad (3)$$

单位长度金属护套的自感抗计算如下:

$$X_{aa} = X_{bb} = X_{cc} = 2\omega \times 10^{-7} \ln(D_e/D_s) \quad (4)$$

式中: D_e 为环流以大地为回路时地中电流的等值深度; D_s 为线路金属护套几何半径。

$$D_e = \sqrt{e^{12.981} \times (\rho/f)} = 93.18\sqrt{\rho} \quad (5)$$

式中: ρ 为大地电阻率,文中取值 $49.3 \Omega \cdot m$ ^[18]。

其他相金属护套中的电流在金属护套上产生的感应电压分别为:

$$U'_m = U'_{i1} + U'_{j2} + U'_{k3} = jL_1(I_j X_{ij} + I_k X_{ik}) + jL_2(I_i X_{ji} + I_k X_{jk}) + jL_3(I_i X_{ki} + I_j X_{kj}) \quad (6)$$

式中:(m, i, j, k)分别取值为(A, a, b, c), (B, b, c, a)和(C, c, a, b)。

1.3 金属护套自阻抗

不同温度时单位长度金属护套的电阻可由下式确定:

$$R_s(t) = R_{20} [1 + \alpha_{20}(t - 20)] \quad (7)$$

式中: R_{20} 为 $20^\circ C$ 时金属护套的直流电阻, Ω/m ; α_{20} 为 $20^\circ C$ 时铝的电阻温度系数,可取 $0.00403 (1/^\circ C)$; t 为金属护套的工作温度, $^\circ C$ 。金属护套自阻抗^[20]为:

$$Z_{a1} = Z_{b1} = Z_{c1} = (R_s + jX_{aa})L_1 = Z_s L_1 \quad (8)$$

第二段与第三段金属护套自阻抗同理可以得到,不再赘述。

1.4 护套环流的矩阵方程

$$I_i Z_s (L_1 + L_2 + L_3) + I_e (R_{d1} + R_{d2} + R_d) + U'_m = U_m \quad (9)$$

$$I_e = I_a + I_b + I_c \quad (10)$$

式中:(i, m)分别取值为(a, A), (b, B)和(c, C)。

i 取a, m 取A,代入相关数据,整理可得到:

$$I_a [(R_s + jX_{aa})(L_1 + L_2 + L_3) + (R_{d1} + R_{d2} + R_d) + jL_2 X_{ba} + jL_3 X_{ca}] + I_b [(R_{d1} + R_{d2} + R_d) + jL_1 X_{ab} + jL_3 X_{cb}] + I_c [(R_{d1} + R_{d2} + R_d) + jL_1 X_{ac} + jL_2 X_{bc}] = U_a L_1 + U_b L_2 + U_c L_3 \quad (11)$$

可以看出,该式是以 I_a, I_b, I_c (复数)作为变量的线性方程组,因此式(9)可以整理成如下形式:

$$AI_i = U_i L_i + U_j L_j + U_k L_k \quad (12)$$

式中:(i, j, k)分别取值为(a, b, c), (b, c, a)和(c, a, b); A 为线性方程组(9)经整理后的系数矩阵。

编制MATLAB程序求解线性方程组即可得到

各相金属护套接地环流。事实上,由于是通过电压计算接地电流值的,所以编制的程序还可以求解金属护套上感应电压,用于核算不同接地方式感应电压值是否符合规范。

1.5 方法验证

甲乙线9号、10号、11号、12号接头为一个交叉互联段,该线路金属护套几何半径 D_s 为 71.4 mm ,护套厚度为 2 mm ,负荷电流 I 为 850 A ,三相电流平衡,交叉互联段接地电阻与大地回路等效电阻之和 $R_{d1} + R_{d2} + R_d = 0.1 \Omega$,其他参数如表1所示。

表1 甲乙线某一段的参数
Table 1 Parameters of line AB

交叉互联段	排列方式	长度/m	AB相距离/m	BC相距离/m	AC相距离/m
第一段	三角	374	0.39	0.32	0.44
第二段	三角	380	0.39	0.32	0.44
第三段	直线	374	0.41	0.52	0.92

利用编制的程序计算可得三相的接地电流值分别为 24.45 A , 18.19 A , 11.25 A 。9号、12号直接接地箱各相的接地电流可以直接测得,10号、11号接头连接的交叉互联箱需打开箱体测量其接地电流,实测出来的电流数值如表2所示,括号里的数值为计算值与实测值间的误差。可以看出,计算值与实测值比较接近,多数数据的误差在 10% 以下,鉴于隧道里蛇形敷设、多回路敷设等因素的影响,这种误差是在可控范围内的,因此该计算方法可行。

表2 实测接地电流值
Table 2 Measured value of grounding current A

相位	9号	10号	11号	12号
A	21.8(12.2%)			17.2(5.8%)
B	18.1(0.5%)			12.0(-6.3%)
C	11.6(-5.3%)			25.5(-4.1%)
A-B		23.2(5.4%)	10.9(3.2%)	
B-C		15.7(15.9%)	24.0(1.9%)	
C-A		11.9(-5.5%)	16.3(11.6%)	

2 接地环流影响因素分析

2.1 护套焊接点和螺栓连接点电阻及接地电阻的影响

以甲乙线为例。为了模拟护套焊接点、螺栓连接点的电阻增大,令 Z_{a1} (即第一段A相的金属护套阻抗)的电阻部分增大从 0 增大到 5Ω ,计算结果如图2所示。

丙丁线金属护套几何半径 D_s 为 71.4 mm ,护套厚度为 2 mm ,负荷电流 I 为 800 A ,三相电流平衡。A、B相电缆中心之间的距离 S 为 0.5 m ,采用水平



图2 甲乙线接地电流值

Fig.2 Grounding current of line AB

排列,分段长度分别为 390 m,400 m,410 m, $R_{d1}+R_{d2}+R_d=1 \Omega$ 。令 Z_{a1} 的电阻部分增大从 0 增大到 5 Ω , 计算结果如图 3 所示。

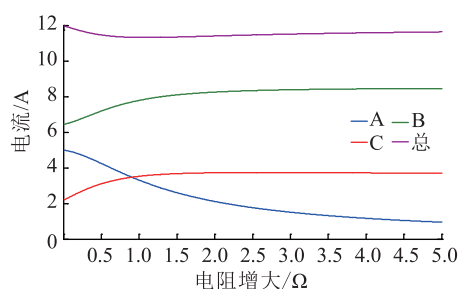


图3 丙丁线接地电流值

Fig.3 Grounding current of line CD

由图 2 和图 3 可以看出,如果某一回路存在焊接不好或者接触不良的位置导致该处电阻增大时,该相的接地电流会显著变小,但另外两相的接地电流并不一定随之减小。在甲乙线中,随着 A 相电阻的增大,B、C 相接地电流随之减小;而在丙丁线中,B、C 相的接地电流先升后降。因此,如果在进行接地电流检测时发现某一相接地电流明显小于正常值而另外两相环流略微小于正常值甚至大于正常值,则该相可能存在护套焊接点、螺栓连接点等位置处接触不良导致电阻增大的现象。值得注意的是,随着电阻的增大,总接地电流也并不一定随之减小。因为总接地电流是三相接地电流矢量和,某一相接地电阻的增大可能会使得三相电流更加不平衡,导致总接地电流不降反升。

在丙丁线的参数条件下,改变 $R_{d1}+R_{d2}+R_d$ 值(金属护套回路两端接地电阻与大地回路电阻之和),得到图 4 所示结果。从图中可以看出,随着接地电阻与大地回路电阻之和的增加,各相接地环流都在减小。本例中,在 0~1.5 Ω 范围内,C 相接地电流迅速减小,1.5 Ω 之后其电流值甚至微微上升;0~4 Ω 范围内,A、B 相以及总接地电流都在减小,尤其是总电流迅速减小,4 Ω 之后电流值趋于平稳。接地电阻与大地回路电阻之和对总接地电流的影响

非常大:电阻为 0.1 Ω 的电流值(24 A)是电阻 4 Ω 时的电流值(4 A)的 6 倍。但接地电阻过大,会导致接地处接触不良,引起发热和损耗。通过本例还可以看出,分段长度稍有不等,就会引起三相接地电流的显著不平衡,生产实际中很多交叉互联段分段长度不尽相等,导致接地电流三相大小不一。

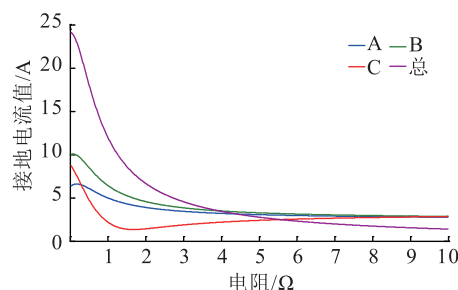


图4 接地电阻不同时金属护套环流值

Fig.4 Grounding current of different earth resistance

2.2 金属护套半径、厚度影响

采用水平排列,分段长度分别为 390 m,400 m,410 m,电缆间距 S 为 0.5 m,改变金属护套几何平均半径,得到接地电流值如表 3 所示。由表可以看出,金属护套半径对接地电流影响不大。

表3 金属护套平均几何半径不同时接地环流值

Table 3 Grounding current of different geometric mean radius of metal sheath

相位	半径/mm				
	20	40	60	71.4	80
A	5.021 7	5.066 3	5.017 9	4.987 9	4.966 4
B	7.317 5	6.884 0	6.573 1	6.429 6	6.332 7
C	2.852 2	2.391 1	2.233 5	2.195 6	2.181 2
总	11.530 8	11.811 8	11.928 2	11.838 5	11.970 9

金属护套厚度对接地电流的影响见表 4。由表 4 可以看出,在工程实际范围内,护套厚度对接地电流影响不大。

表4 金属护套厚度不同时接地环流值

Table 4 Grounding current of different thickness of metal sheath

相位	厚度/mm				
	0.1	0.5	1	2	5
A	2.814 5	4.539 6	4.841 6	4.987 9	5.073 1
B	4.826 5	6.289 9	6.394 8	6.429 6	6.444 4
C	3.432 4	2.628 9	2.346 2	2.195 6	2.104 3
总	9.989 2	11.618 1	11.851 5	11.970 9	12.043 3

2.3 大地电阻率影响

如图 5、图 6 所示,当大地因潮湿等原因导致电阻率很低时,接地电流值对大地电阻率比较敏感,可能增大也可能减小,这与接地系统的参数有关,

需要具体问题针对分析。随着大地电阻率的增大,各相接地电流值趋于稳定,大地电阻率对电缆金属护套接地电流的影响基本可以忽略不计。

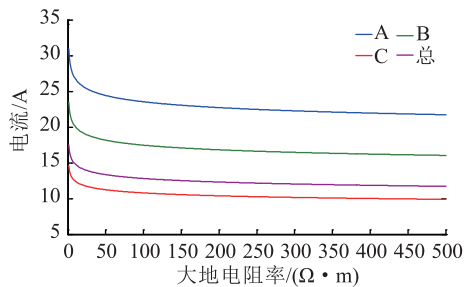


图5 甲乙线接地电流值与大地电阻率关系

Fig.5 Diagram of the relationship between the grounding current and earth resistivity of line AB

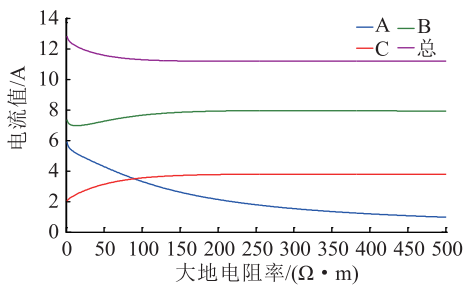


图6 丙丁线接地电流值与大地电阻率关系

Fig.6 Diagram of the relationship between the grounding current and earth resistivity of line CD

3 结论

文中介绍了高压电缆金属护层接地电流的计算方法,并应用该算法分析了接地电流与接地电阻、金属护套参数、大地电阻率的关系,得到如下结论:

(1) 某一回路存在焊接不好或者接触不良的位置导致该处电阻增大时,该回路接地电流值会显著变小,另外两相与总接地电流变化情况与系统参数相关,可能增大也可能变小。

(2) 随着接地电阻与大地回路电阻之和的增加,各相接地环流都在减小,尤其是总接地电流。

(3) 在工程实际范围内,金属护套参数对接地电流值影响不大。

(4) 分段长度稍有不等,会导致三相接地电流显著不平衡。

(5) 当大地因潮湿等原因导致电阻率很低时,接地电流值对大地电阻率比较敏感。大地电阻率较大时,其对接地电流值的影响可以忽略不计。

参考文献:

[1] 城市电力电缆线路设计技术规定:DL/T 5221—2005 [S].

Technical rule for design of urban power cables;DL/T 5221—

2005 [S].

- [2] KONG X P, WANG Y X, ZHANG Z, et al. Calculation of induced voltage in metal shield of single-core cable operated in parallel[C]//International Conference on Power System Technology, IEEE, 2010;1-8.
- [3] 樊友兵, 赵健康, 钱康, 等. 单芯电力电缆同相多根并联运行方式分析与优化[J]. 高电压技术, 2010, 36(10):2607-2612. FAN Youbing, ZHAO Jiankang, QIAN Kang, et al. Analysis and optimization for operation of the single-core power cables in parallel [J]. High Voltage Engineering, 2010, 36 (10): 2607-2612.
- [4] 成健, 胡力广, 罗智奕, 等. 高压单芯电缆同相双回输电方式与运维分析[J]. 广东电力, 2017, 30(3):116-121. CHENG Jian, HU Liguang, LUO Zhiyi, et al. Same-phase and double-circuit transmission mode of high-voltage single-core cables and its operation and maintenance[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(3):116-121.
- [5] 郑志豪, 张煌, 李茂, 等. 输电电缆外护层绝缘电阻偏低相关因素分析及建议[J]. 广东电力, 2017, 30(11):109-113. ZHENG Zhihao, ZHANG Huang, LI Mao, et al. Analysis on relevant factors for low insulating resistance of outer sheath of transmission cable and corresponding suggestions[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(11):109-113.
- [6] 叶冠豪, 郭湘奇, 王一磊, 等. XLPE 电缆交叉互联系统接地直流电流在线监测[J]. 电力工程技术, 2016, 35(3):39-41. YE Guanhao, GUO Xiangqi, WANG Yilei, et al. On-line monitoring of ground DC current for cross-linking XLPE cable system [J]. Electric Power Engineering Technology, 2016, 35(3):39-41.
- [7] 徐欣, 陈彦. 单芯高压电力电缆金属护套感应电流的研究之一——感应电流的计算和预控[J]. 电线电缆, 2010(5):42-46. XU Xin, CHEN Yan. Investigation of the induced current in the metallic sheath of single core HV power cables, part I[J]. Electric Wire&Cable, 2010(5):42-46.
- [8] 陈小林, 成永红, 王贤清, 等. XLPE 电缆地线电流分析与接地改造措施一例[J]. 高电压技术, 2006, 32(2):87-88. CHEN Xiaolin, CHENG Yonghong, WANG Xianqing, et al. Analysis of current flowing in the ground wire of XLPE cable and modification of grounding mode[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(2):87-88.
- [9] XING H Y, FU Dabing, HE Runhua. Research on eliminating of ground current in power cable fault location[J]. International Electronic Elements, 2008.
- [10] CHEN J T. Calculation method of grounding capacitive current for MV cable system [J]. Electric Power Survey & Design, 2015.
- [11] 肖少非, 顾在峰. 浅谈高压交联电缆的选型[J]. 江苏电机工程, 2009, 28(2):50-52. XIAO Shaofei, GU Zaifeng. Discussion on the selection of high voltage XLPE cables[J]. Jiangsu Electric Engineering, 2009, 28(2):50-52.

- [12] YANG J, YI Z, PAN Y, et al. Research on the sheath grounding current in High-speed railway feeder cable [C]//Lightning Protection, IEEE, 2014:655-658.
- [13] 蔡成良. 浅谈湖北电网高压电缆金属护套环流问题[J]. 湖北电力, 2010, 34(4):21-22.
CAI Chengliang. Discussion on circulating current in sheath of high voltage power cable in Hubei Grid [J]. Hubei Electric Power, 2010, 34(4):21-22.
- [14] 张畅生, 刘龙春, 陈隽. 110 kV 海底电缆接地方式对载流量和环流的影响[J]. 广东电力, 2017, 30(8):122-127.
ZHANG Changsheng, LIU Longchun, CHEN Juan. Influence of grounding mode of 110 kV submarine cable on carrying capacity and circulation [J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(8):122-127.
- [15] 牛海清, 王晓兵, 蚁泽沛, 等. 110 kV 单芯电缆金属护套环流计算与试验研究[J]. 高电压技术, 2005, 31(8):15-17.
NIU Haiqing, WANG Xiaobing, YI Zepei, et al. Study on circulating current of 110 kV single-core cable [J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(8):15-17.
- [16] 杜伯学, 李忠磊, 张镔, 等. 220 kV 交联聚乙烯电力电缆接地电流的计算与应用[J]. 高电压技术, 2013, 39(5):1034-1039.
DU Boxue, LI Zhonglei, ZHANG Kai, et al. Calculation and application of 220 kV crosslinked polyethylene power cable grounding current [J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(5):1034-1039.
- [17] ZHENG Jiankang, SU Xiaoting, ZHENG Linzi, et al. Research and analysis of multi-loop high-voltage cable metallic sheath current circulation calculation [J]. Power Electronics, 2017.
- [18] 刘英, 王磊, 曹晓珑. 双回路电缆护套环流计算及影响因素分析[J]. 高电压技术, 2007, 33(4):143-146.
LIU Ying, WANG Lei, CAO Xiaolong. Calculation of circulating current in sheaths of two-circuit arranged cables and analyses of influencing factors [J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(4):143-146.
- [19] 贾欣, 喻明, 王瑛, 等. 三回路单芯电缆护套感应电势的计算[J]. 高电压技术, 2000, 26(5):61-62.
JIA Xin, YU Ming, WANG Yin, et al. Calculation of induced voltage on single-core power cable metal sheath in tri-circuits [J]. High Voltage Engineering, 2000, 26(5):61-62.
- [20] 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(4):49-53.
CHEN Gen, TANG Yan, WANG Xinqiao. Simulation of multi-point grounding faults in metal sheath of high-voltage cable based on ATP [J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(4):49-53.

作者简介:



潘伟

潘伟(1990),男,硕士,助理工程师,从事电力电缆运维检修工作(E-mail:707465619@qq.com);

王浩(1980),男,学士,工程师,从事电力电缆运维检修及管理工作;

童斌(1985),男,硕士,工程师,从事电力电缆运维检修工作。

Calculation and analysis of grounding current and its influence factors of high-voltage power cables

PAN Wei, WANG Hao, TONG Bin, LIU Ting, WANG Han

(State Grid Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210019, China)

Abstract: Excessive grounding current on metal sheath of single-core high-voltage cable will bring massive additional loss to the cable, which reduces the cable's current-carrying capacity and safe operation lifetime. In order to analyze the grounding current in metal sheath, a mathematical model of grounding current calculation and relevant program are established aiming at single-core high-voltage cables in cross-bonding grounding mode. The calculation results prove that the program is competent to reflect actual grounding current. Furthermore, the relationship between grounding current and its influencing factors such as grounding resistance, sheath parameters and earth resistivity is analyzed. The results of analysis indicate that the grounding resistance has a great influence on the grounding current, while in actual engineering the parameters of metal sheath do not. Grounding current is sensitive to earth resistivity only when the value of earth resistivity is low. The research conclusions provide a theoretical basis for the operation and maintenance of high-voltage cables.

Keywords: high-voltage power cable; grounding current; calculation mode; earth resistance

(编辑 方晶)