

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.01.013

电缆护套环流估算公式的拟合及排列方式的优化

王永志¹, 曹 炜¹, 梁海生², 李 帆²

(1. 上海电力学院, 上海 200090; 2. 国网上海市电力公司经济技术研究院, 上海 200002)

摘要: 护套交叉互联双端接地电缆中, 3 段电缆长度不均等, 或电缆排列方式不对称, 均会导致金属护套中产生环流。文中分析了排管敷设的单回路交叉互联电缆金属护套感应电压相量和, 采用 EMTP 模型仿真不同的电缆分段长度差下的金属护套环流, 得到 EMTP 仿真数据样本, 用来拟合金属护套环流估算公式, 最后将拟合的估算公式计算值与 EMTP 仿真数据进行对比, 检验了估算公式的适用性。此外, 还分析了不同排列方式感应电压相量, 提出并验证了在不等长分段电缆中, 采用恰当的混合排列方式可以降低金属护套环流。

关键词: 高压电缆; 护套环流; 估算公式; 排列方式

Fitting Formula of Sheath Current and the Arrangement Optimization of Cables

WANG Yongzhi¹, CAO Wei¹, LIANG Haisheng², LI Fan²

(1. Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. State Grid Shanghai Electric Power Economic & Technology Institute, Shanghai 200002, China)

Abstract: There will be circulating current in metal sheath of cross-bonding cables when the lengths or arrangements of three segments are different. In pipe layout the phasor sum of the induced sheath voltages in sheath cross bonding cables is firstly analyzed. Then the circulating current is calculated by EMTP with varied differences among three segment lengths to get the sample data, which are in turn used to fit out the empiric formula for evaluating the sheath circulating current in practical engineering application. Finally the principle of mixed arrangement is proposed to reduce sheath circulating current in sheath cross bonding cables when the lengths of cable segments are not equal.

Key words: high voltage cable; sheath current; empiric formula; arrangement

0 引言

随着城市化的发展, 高压电缆越来越多的运用到城市输电网络中, 一般要求电缆金属护套至少有一点接地, 在不采取安全措施时, 金属护套感应电压应小于 50 V, 采取安全措施后, 金属护套感应电压不能超过 300 V^[1]。在各种接地方式选择上, 交叉互联双端接地方式应用范围最广^[2-5], 但是由于现场条件的限制, 几乎很难保证三段电缆金属护套完全交叉换位, 因此金属护套中必然会产生环流, 环流过大将会增加线路损耗, 减小电缆传输容量和缩短电缆寿命^[6-8]。

目前, 金属护套环流计算主要有以下 3 种方法: ①通过 EMTP 等电磁暂态仿真软件计算, 使用仿真软件计算能够保证环流计算的精确性, 但是 EMTP 等电磁暂态仿真软件中电缆的建模, 以及参数的选取和设置过于复杂, 显然电力施工、设计人员掌握难度较大, 这种方法目前较多的应用于高校、科研单位的研究人员当中。②有部分学者采用集中参数等效电路的方法列写回路方程, 进而通过编制程序实现环流的计算^[9-11], 相对于 EMTP 中输入的分布参数, 集中参数计算不够精确。此外, 编制程序求解回路方程同样掌握难度过大, 对于在电缆设、施工人员中推广性不够强。③电力设计、施工人员在工作中, 一般根据施工经验预估电缆护套环

收稿日期: 2016-09-19; 修回日期: 2016-11-25

基金项目: 国家 863 项目(2011AA05A106); 上海绿色能源并网工程技术研究中心(13DZ2251900)。

Project Supported by National 863 Program(2011AA05A106), Shanghai Engineering Research Center of Green Energy Grid-connected Technology (13DZ2251900).

流,认为三段电缆长度差值不超过 100 m,金属护套中的环流将会低于电缆线芯电流的 10%^[12],这种方法并没有能够计算电缆护套中的环流,只是从经验角度作为设计电缆分段的标准。

已有研究人员关注到分段不均匀会使护套环流增加,由于 EMTF 等仿真软件计算金属护套环流过于复杂,不便于工程应用,文中利用电磁暂态仿真软件 EMTF 仿真数据,采用曲线拟合法给出电缆排管敷设下金属护套环流估算公式,以便电缆设计人员简便评估环流大小。此外,通过分析不同排列方式感应电压相量,提出了在不等长分段电缆中,

采用混合排列方式能够降低金属护套环流。

1 金属护套感应电压分析

1.1 单段电缆金属护套感应电压

城市电缆越来越多的采用排管敷设,而排管又以 3×7 和 2×10 规格居多。一般设计中要求 110 kV 及以上等级高压电缆应布置在排管最外层,有利于散热。由于排管规格的限制,无法实现品字形排列,因此,110 kV 以上等级高压电缆在排管中的排列方式只可能是水平排列方式、竖直排列方式和直角三角形排列方式,见图 1。

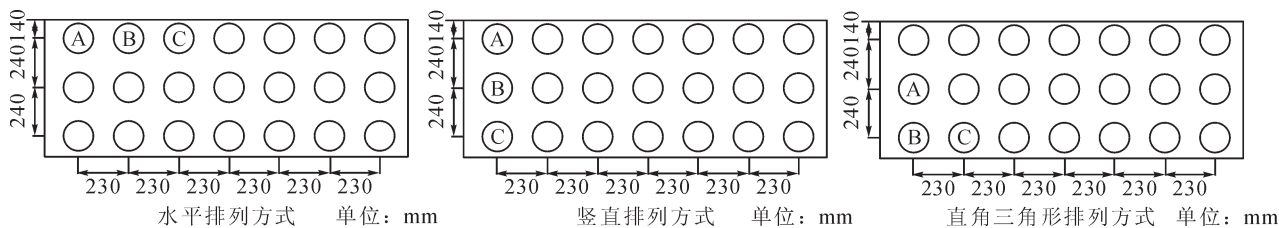


图 1 电缆排列方式

Fig. 1 Cable arrangements

单位长度电缆金属护套感应电压计算式^[13]为

$$\begin{cases} E_{SA}=2\omega I \times 10^{-4} \left[\frac{\sqrt{3}}{2} \ln n+j \frac{1}{2} \ln \frac{(nS)^2}{(GMR_s)^2} \right] \\ E_{SB}=2\omega I \times 10^{-4} \left[\frac{\sqrt{3}}{2} \ln \frac{mS}{GMR_s} -j \frac{1}{2} \ln \frac{S}{m \times GMR_s} \right] \\ E_{SC}=2\omega I \times 10^{-4} \left[-\frac{\sqrt{3}}{2} \ln \frac{mS}{GMR_s} -j \frac{1}{2} \ln \frac{n^2 S}{m \times GMR_s} \right] \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: I 为电缆芯电流,A; GMR_s 为金属护套的几何平均半径,mm; S 为A、B相电缆距离,mm; mS 为B、C相电缆距离,mm; nS 为A、C相电缆距离,mm。

110 kV 单芯皱纹铝护套交联电缆在上海地区 110 kV 电缆设计中的电缆线芯电流额定值为 698 A,用式(1)分别计算不同排列方式下单位公里长度电缆的金属护套感应电压相量值,见表 1(表 1 中相位是与 A 相线芯电流的相位差,用符号 $\angle$ 表示)。

表 1 不同排列方式下单段金属护套感应电压

Table 1 Induced voltage in metal sheath of single section

排列方式	感应电压/V		
	A相	B相	C相
水平排列	89.8 $\angle$ 72.9	70.8 $\angle$ -30.0	89.8 $\angle$ -135.9
竖直排列	91.6 $\angle$ 73.3	72.4 $\angle$ -30.0	91.6 $\angle$ -133.3
直角三角形排列	80.6 $\angle$ 81.2	71.6 $\angle$ -31.3	79.8 $\angle$ 133.3
品字形排列	70.6 $\angle$ 90.0	70.6 $\angle$ -30.0	70.6 $\angle$ -150.0

从表 1 可以看出,金属护套感应电压在竖直排列

方式下与水平排列方式下比较接近,每公里电缆护套感应电压差值小于 2 V。根据图 1 排管中电缆的排列方式可知,引起竖直与水平排列方式金属护套感应电压差异的原因是排管的垂直距离(240 mm)略大于水平距离(230 mm)。为了简化研究,可以将水平排列方式与竖直排列方式近似认为是同一种排列,即竖直排列方式环流估算公式也适用于水平排列方式。

从表 1 同样可看出,在电缆芯电流相同时,单位长度电缆护套感应电压,在水平排列时大于直角三角形排列方式下的感应电压。

1.2 交叉互联电缆金属护套感应电压相量和分析

分段应用式(1),再求和,可推算护套交叉互联电缆在一大段内的护套感应电压沿线分布情况和大段感应电压相量和。

从表 1 还可知,在所有的排列方式中只有假想的品字形(等边三角形)排列方式下,三相护套感应电压才大小相等、相位互差 120°。由此可推知,即使每小段分段长度都相等,且每小段都取相同排列方式,也只有假想的品字形排列方式下,护套交叉互联电缆在一大段内的护套感应电压相量和才为零,见图 2;三小段长度不等时,大段内沿线感应电压分布情况见图 3。因此,电缆的非理想排列、电缆的三小段不同排列方式和长度不等,都会导致交叉互联电缆相量和不为零,金属护套中因此产生环流,其大小将与护套感应电压相量和密切相关。

通过 EMTF 仿真分析,同样可得出表 1、图 2、3

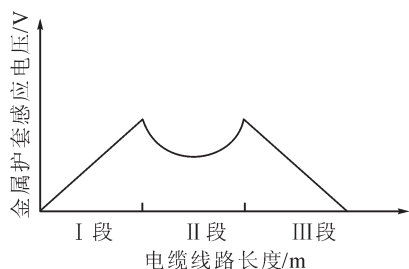


图2 3段等长电缆均品字形排列感应电压分布图

Fig. 2 Induced voltage profile of three equal length segments in equilateral triangle arrangement

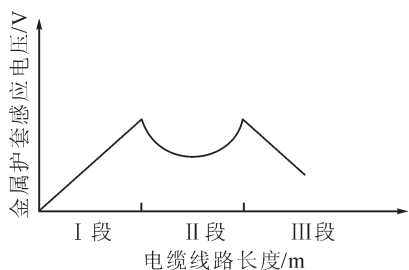


图3 3段不等长电缆品字形排列感应电压分布图

Fig. 3 Induced voltage profile of three unequal length segments in equilateral triangle arrangement

的结果。

2 同一排列方式下交叉互联金属护套环流分析

根据电缆金属护套环流理论^[14-19], 电缆金属护套环流与金属护套两端感应电压差成正比, 结合以上分析可知, 金属护套环流与3段电缆长度差可近似成线性关系。因此文中通过EMTP仿真形成金属护套环流与电缆长度差 ΔL 的样本数据集, 然后采用曲线拟合法拟合护套环流估算公式。

2.1 曲线拟合法

对于给定数据点 $(x_i, y_i) (i=1, 2, \dots, N)$, 求作一次式 $y=a+bx$, 使得总误差 $Q=\sum_{i=1}^N [y_i-(a+bx_i)]^2$ 为最小。

使 Q 达到极值的参数 a, b 满足: $\partial Q/\partial a=0, \partial Q/\partial b=0$, 得到方程组

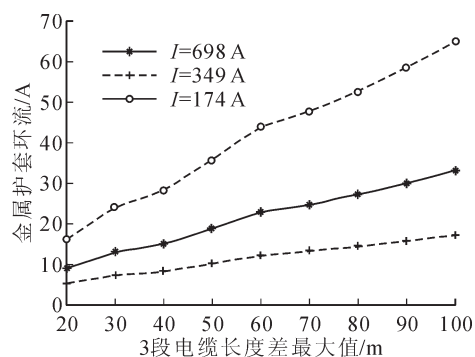
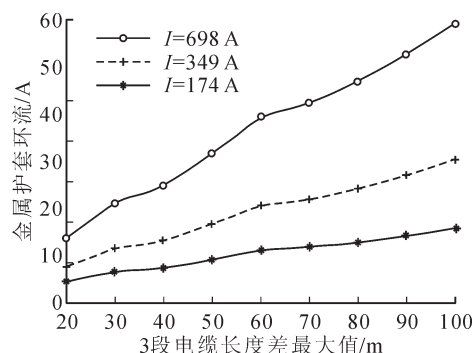
$$\begin{cases} aN+b\sum_{i=1}^N x_i=\sum_{i=1}^N y_i \\ a\sum_{i=1}^N x_i+b\sum_{i=1}^N x_i^2=\sum_{i=1}^N x_i y_i \end{cases}$$

求解二元一次方程, 取定拟合直线的参数 a, b 。这样便可通过给定的数据点, 得到描述该数据点曲线关系的公式。

2.2 单一排列方式下, 金属护套环流估算公式的归纳

根据2.1节所述曲线拟合法, 将文中交叉互联

电缆分段长度差 ΔL 代入 x , 将金属护套环流 I_s 代入 y 。通过设置不同的 ΔL 值, 使用EMTP软件在额定电流下仿真, 测量交叉互联双端接地电缆的金属护套环流, 形成采样点 $(I_{si}, \Delta L_i)$, 并在MATLAB中绘制金属护套环流与3段电缆长度差 ΔL 的关系曲线, 见图4、5。通过图4、5可以看出, 金属护套环流与 ΔL 近似成线性关系, 然后按照2.1节方法拟合护套环流公式。

图4 竖直排列方式下 I_s 与 ΔL 曲线Fig. 4 The curve between I_s and ΔL under vertical arrangement图5 直角三角形排列方式下 I_s 与 ΔL 曲线Fig. 5 The curve between I_s and ΔL under right triangle arrangement

根据图4数据, 通过曲线拟合法可以得出, 电缆芯电流为698 A时, 3段电缆长度均在200~600 m范围内, 竖直(水平)排列方式下金属护套环流 I_s 与三段电缆长度差最大值 ΔL 的关系公式

$$I_s=5.491+0.596\times\Delta L. \quad (2)$$

又由于排列方式固定以及电缆分段长度确定的情况下, 金属护套环流与电缆芯电流成正比。因此, 根据式(2)可推导出适用于竖直(水平)排列方式下任意电缆芯电流的金属护套环流与电缆分段长度差的关系公式

$$I_s=\frac{I_c}{698}(5.49+0.60\times\Delta L). \quad (3)$$

同样, 根据图5数据, 可以拟合直角三角形排列方式下金属护套环流公式

$$I_s = \frac{I_c}{698} (3.60 + 0.55 \times \Delta L) \quad (4)$$

式(3)、(4)中: I_s 为金属护套环流, A; I_c 为电缆芯

的负载电流, A; ΔL 为三段电缆长度差最大值, m。

用估算公式(3)、(4)计算不同值时的金属护套感应电流, 并与 EMTP 仿真数据进行对比, 见表 2、3。

表 2 竖直排列方式下 EMTP 仿真与公式计算对比

Table 2 Comparison between EMTP simulation and formula calculation under vertical arrangement

3段 电缆 长度 差/m	电缆芯电流为 698.1 A 时金属护套环流				电缆芯电流为 349.2 A 时金属护套环流				电缆芯电流为 174.6 A 时金属护套环流			
	EMTP仿 真值/A	公式计 算值/A	绝对误 差/A	相对误 差/%	EMTP仿 真值/A	公式计 算值/A	绝对误 差/A	相对误 差/%	EMTP仿 真值/A	公式计 算值/A	绝对误 差/A	相对误 差/%
0	4.900	5.49	0.59	12.00	3.339	2.75	0.59	17.80	2.534	1.37	1.16	45.90
20	16.140	17.41	1.27	7.90	8.854	8.75	0.15	1.68	5.223	4.35	0.87	16.70
30	24.150	23.37	0.78	3.20	12.940	11.69	1.25	9.70	7.332	5.85	1.48	20.20
40	28.210	29.33	1.12	4.00	14.860	14.67	0.19	1.30	8.189	7.34	0.85	10.40
50	35.690	35.29	0.40	1.12	18.680	17.65	1.03	5.50	10.170	8.82	1.35	13.30
60	43.820	41.25	2.57	5.90	22.800	20.63	2.17	9.50	12.280	10.32	1.96	15.96
70	47.600	47.21	0.39	0.80	24.620	23.60	1.02	4.10	13.120	11.80	1.32	10.06
80	52.550	53.17	0.62	1.18	27.020	26.59	0.43	1.60	14.260	13.30	0.96	6.70
90	58.350	59.13	0.78	1.30	29.850	29.57	0.28	0.90	15.600	14.79	0.81	5.20
100	64.740	65.09	0.35	0.54	32.980	32.55	0.43	1.30	17.110	16.28	0.83	4.85
110	70.480	71.05	0.57	0.80	35.950	35.53	0.42	1.20	18.680	17.77	0.91	4.87
120	76.710	77.01	0.30	0.30	39.010	38.51	0.50	1.30	20.160	19.26	0.90	4.46
130	82.590	82.97	0.38	0.40	42.020	41.49	0.53	1.30	21.730	20.75	0.98	4.50
140	88.690	88.93	0.24	0.27	45.020	44.47	0.55	1.20	23.190	22.24	0.95	4.10
150	95.100	94.89	0.21	0.22	48.190	47.45	0.74	1.50	24.720	23.73	0.99	4.00

表 3 直角三角形排列方式下 EMTP 测量值与公式计算值对比

Table 3 Comparison between EMTP simulation and formula calculation under right triangle arrangement

三段 电缆 长度 差/m	电缆芯电流为 698.1 A 时金属护套环流				电缆芯电流为 349.2 A 时金属护套环流				电缆芯电流为 174.6 A 时金属护套环流			
	EMTP仿 真值/A	公式计 算值/A	绝对误 差/A	相对误 差/%	EMTP仿 真值/A	公式计 算值/A	绝对误 差/A	相对误 差/%	EMTP仿 真值/A	公式计 算值/A	绝对误 差/A	相对误 差/%
0	3.266	3.60	0.33	10.20	2.471	1.800	0.67	27.20	2.08	0.90	1.18	56.60
20	13.580	14.65	1.07	7.80	7.556	7.325	0.23	3.10	4.56	3.66	0.90	19.70
30	21.180	20.17	1.01	4.80	11.450	10.090	1.37	11.90	6.58	5.04	1.54	23.40
40	24.600	25.70	1.10	4.50	13.040	12.850	0.19	1.40	7.27	6.43	0.84	11.60
50	31.460	31.20	0.26	0.80	16.570	15.600	0.97	5.90	9.12	7.80	1.32	14.50
60	39.320	36.75	2.57	6.50	20.540	18.380	2.17	10.50	11.15	9.19	1.96	17.60
70	42.170	42.78	0.61	1.40	21.900	21.390	0.51	2.30	11.77	10.70	1.07	9.00
80	46.720	47.80	1.08	2.30	24.100	23.900	0.20	0.80	12.80	11.95	0.85	6.60
90	52.530	53.33	0.80	1.50	26.930	26.670	0.26	0.90	14.13	13.34	0.79	5.60
100	59.200	58.85	0.35	0.20	30.190	29.430	0.76	2.50	15.69	14.72	0.97	6.20
110	63.550	64.38	0.83	1.30	32.480	32.190	0.29	0.89	16.94	16.10	0.84	5.00
120	70.020	69.90	0.12	0.17	35.650	34.950	0.70	1.96	18.46	17.48	0.98	5.30
130	74.550	75.43	0.88	1.18	37.990	37.720	0.27	0.71	19.72	18.86	1.14	4.36
140	80.870	80.95	0.08	0.09	41.100	40.480	0.62	1.50	21.21	20.24	0.97	4.57
150	87.670	86.48	1.19	1.36	44.450	43.240	1.21	2.70	22.84	21.62	1.22	5.34

通过表 2、3 可以看出, 绝大多数测量点曲线拟合公式计算值与 EMTP 仿真数据间相对误差小

于 8%; 个别测量点相对误差较大, 是由于护套环流基数小, 即使 1~2 A 的误差也会导致相对误差较大

(见表 2、3 中的第 1 行数据)。尽管如此, 2 个表中所有数据仿真值与公式估算值两者之间绝对误差均小于 2 A, 占电缆芯电流(698 A)的 0.3%, 此数值远小于相关标准规定^[12](金属护套环流应不超过电缆芯电流 10%), 所以, 认为公式在 110 kV 电缆工程应用中具有一般适用性。

3 混合排列方式对金属护套环流的影响

在电缆排管敷设的工程实践中, 大量存在护套交叉互联的各段具有不同长度和不同排列方式的情况。由 1.1 节可知, 相同线芯电流下单位长度电缆水平(竖直)排列方式下金属护套感应电压大于直角三角形排列方式下护套感应电压。因

此在不等长分段电缆中, 较长的电缆采用感应电压小的三角形排列方式, 较短的电缆采用感应电压大的水平(竖直)排列方式, 有利用降低大段护套感应电压, 即可通过适当选取各小段排列方式来平衡电缆长度差带来的感应电压差, 以降低护套环流。

110 kV 不均匀分段交叉互联双端接地电缆在线芯电流为 698 A 时, 各种不同的排列方式组合后对护套环流的影响见表 4。混合排列方式 1 是推荐的排列组合, 即最长段采用感应电压较小的三角形排列方式, 其余 2 个较短段采用感应电压较大的竖直排列方式; 混合排列方式 2 是应该避免的最不利的组合方式。

表 4 不同排列方式对不均匀分段电缆环流的影响

Table 4 Influence of different arrangements on circulating current when three segments are not equal

电缆 3 小段长度 值/m	竖直排列(3 段均采用 采用竖直排列方 式)公式估算环 流/A	直角三角形排列 (3 段均采用直角 三角形排列)公式 估算环流/A	竖直排列(3 段均 采用竖直排列方 式)EMTP 仿真环 流/A	直角三角形排列 (3 段均采用直角 三角形排列)EMTP 仿真环流/A	混合排列方式 1 (竖直—直角三角 形—竖直)EMTP 仿真环流/A	混合排列方式 2 (直角三角形—竖 直—水平)EMTP 仿真环流/A
0~350			64.74	56.19	17.15	98.25
350~800	65.49	58.60	52.61	47.42	43.08	37.89
800~1 200			44.31	49.40	56.58	79.16

由表 4 可知, 不利的混合排列方式 2 护套环流, 增加到近 2 倍; 而推荐的混合排列方式 1 其护套环流未超过任意 1 种单一的排列方式(水平、三角形), 并且某些回路的环流比单一排列方式有明显减少, 因此, 当受到施工条件限制, 或者当电缆改造后造成三段电缆分段不均匀时, 可以使长度较长的电缆采用直角三角形排列, 长度较短的电缆采用竖直(水平)排列来降低金属护套的环流。

从表 4 中同样可以看出, 推荐的混合排列方式 1 护套环流仿真值低于直角三角形排列估算公式计算值, 因此在推荐的混合排列方式下, 文中在单一排列方式下得出的环流估算式(4)仍可用于估算环流可能出现的最严重数值。

4 电缆分段长度差的确定

按照金属护套环流不应超过电缆芯电流 10% 的规定^[13], 结合 2.2 节中式(3)、(4)以及表 2、3 中数据, 可确定额定运行条件下(电缆芯电流为 698 A), 电缆分段长度差的极限值见表 5。

根据 3 节中对混合排列方式下金属护套环流的分析可知, 推荐的混合排列方式 1 下电缆分段长度差会大于单一排列方式(直角三角形排列)下分段长度差, 因此, 对于有利的混合排列方式 1, 电缆分

表 5 不同排列方式下电缆分段长度差极限

Table 5 The limitation on length difference of three segments in different arrangements m

竖直排列(水平排列)	直角三角形排列
107	120

段长度差极限值可按照直角三角形排列方式下分段长度差极限值(120 m)确定。

5 结论

在工程设计中, 设计人员对电缆分段长度常根据工程实际情况和经验确定, 认为电缆长度差值在 100 m 以内, 护套中环流可满足运行要求。但实际上各段电缆长度差和排列方式都会影响护套环流。文中通过研究交叉互联电缆的分段长度及排列方式得出:

1) 给出了便于工程应用的金属护套环流估算公式。

2) 结合工程中普遍存在的电缆分段长度不等特点, 推荐较长段电缆采用竖直(水平)排列, 较短段电缆采用直角三角形排列, 这样金属护套环流不会超过根据本文环流公式估算出的值。

3) 确定了不同排列方式下, 电缆分段长度差极限值, 便于电缆设计人员查阅参考。

参考文献:

- [1] GB 50217—2007 电力工程电缆设计规范[S].2007.
GB 50217—2007 Code for design of cables of electric engineering[S].2007.
- [2] ANSI/IEEE Std575—1988 An american national standard IEEE guide for the application of sheath-bonding methods for single-conductor cables and the calculation of induced voltages and currents in cable sheaths[S].1988.
- [3] 杜伯学,李忠磊,张 锴,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 grounding current of 220 kV XLPE cables[J]. High Voltage Engineering,2013,39(5):1034-1039.
- [4] 王健生. 单芯电力电缆金属护层互联方式[J]. 华东电力,1993(10):49-52.
WANG Jiansheng.Metal sheath connection mode of single-core cables[J]. East China Electric Power,1993(10):49-52.
- [5] 周文定. 基于工程实际的高压电缆系统接地方式简析[J]. 电力与电工,2012,32(1):38-40.
ZHOU Wending.Analysis of grounding mode of high voltage cable system based on engineering project[J]. Electric Power and Electrical,2012,32(1):38-40.
- [6] 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.
- [7] 徐 欣,陈 彦. 220 kV 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):42-56.
XU Xin, CHEN Yan. Investigation of the induced current in the metallic sheath of single core HV power cables,part 1[J]. Electric Wire & Cable, 2010(5): 42-46.
- [8] 王 波,罗进圣,黄宏新,等. 220 kV 高压单芯电力电缆金属护套环流分析[J]. 高压电器,2009,45(5):141-145.
WANG Bo,LUO Jinsheng,HUANG Hongxin,et al. Analysis of circulating current in sheaths of 220 kV XLPE single-core cables[J]. High Voltage Apparatus,2009,45(5):141-145.
- [9] 冯 超,王鹏飞,马丽山,等. 多回路单芯 XLPE 电力电缆金属护套环流计算分析[J]. 青海电力,2015,34(1):31-35.
FENG Chao,WANG Pengfei, MA Lishan, et al. Analysis on the circulation of metal sheath in the multi loop single core XLPE power cable[J]. Qinghai Electric Power,2015,34(1):31-35.
- [10] 罗致远,詹威鹏,邬 韬,等. 多回路电缆金属护套环流计算软件的开发与应用[J]. 电线电缆,2014(2):36-40.
LUO Zhiyuan,ZHAN Weipeng,WU tao,et al. Development and application of the software for the calculation of the metal sheath circulation in the multi loop cable[J]. Electric Wire & Cable, 2014(2): 36-40.
- [11] 张 锴. 高压交联聚乙烯电缆接地电流机理与故障分析[D]. 天津:天津大学,2011.
ZHANG Kai. Mechanism and failure analysis of high voltage cross linked polyethylene cable grounding current [D].Tianjin:Tianjin University, 2011.
- [12] Q/CSG 114002—2011 电力设备预防性试验规程[S].2011.
Q/CSG 114002—2011 Electrical equipment preventive test procedures[S].2011.
- [13] 郑肇骥,王焜明. 高压电缆[M]. 北京:水利电力出版社,1983.
ZHENG Zhaoji,WANG Kunming.High voltage cable [M]. Beijing: Water Power Press,1983.
- [14] 邱 昊,郑志源. 高压单芯电缆交叉互联接地方式优化研究[J]. 电线电缆,2014(3):33-37.
QIU Hao, ZHENG Zhiyuan. Study on the optimization of high voltage single core cable cross connection[J]. Electric Wire & Cable, 2014(3): 33-37.
- [15] 赵昌鹏,戴 斌,李贵山,等. 高压单芯电力电缆金属护套环流抑制措施[J]. 吉林电力,2014,42(1):45-48.
ZHAO Changpeng,DAI Bin,LI Guishan,et al. Suppression measures of metal sheath circulation in high voltage single core power cable[J]. Jilin Electric Power,2014,42(1):45-48.
- [16] 马宏忠,倪欣荣,黎腊红,等. 高压电力电缆护层感应电压的补偿研究[J]. 高电压技术,2007,33(3):148-151.
MA Hongzhong, NI Xinrong, LI Lahong, et al. Research on compensation of induced voltage in the metal shield of the high-voltage powercable[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(3): 148-151.
- [17] 李国征. 电力电缆线路设计施工手册[M]. 北京:中国电力出版社,2007.
LI Guozheng.Power cable line design and construction manual[M]. Beijing:China Electric Power Press,2007.
- [18] GB/T2 952.1—2008 电缆外护套第1部分:总则[S].2007.
GB/T2 952.1—2008 Cable outer sheath part 1:General rules[S].2007.
- [19] 于平澜. 电缆金属护套感应电压及保护接地的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2013.
YU Pinglan.Study on induction voltage of cable metal sheath and protective grounding[D]. Harbin:Harbin University of Science and Technology,2013.

王永志(1985—),男,硕士研究生,研究方向为电力系统运行与仿真等。

曹 炜(1963—),女,副教授,研究方向为电力系统稳定与控制等。