

220 kV 高压单芯电力电缆金属护套环流分析

王 波, 罗进圣, 黄宏新, 吕 峻, 周 焕

(杭州市电力局, 浙江 杭州 310009)

摘要: 根据单芯 XLPE 电力电缆金属护套环流计算模型, 编写 C++ 程序, 计算了交叉互联单元内三段电缆布置方式和段长不一致时的金属护套环流, 并将计算结果与现场测试结果进行比较分析。根据计算和现场测试结果, 一个交叉互联单元内三段电缆的段长和布置方式不一致对金属护套环流有影响, 当电缆采用直角三角形和水平布置方式时影响尤为严重。为减小金属护套环流, 高压单芯电缆应尽可能采用正三角形布置方式且保证三段电缆布置方式一致, 段长尽量相等。

关键词: 电力电缆; 护套环流; 交叉互联; 布置方式

中图分类号: TM247

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)05-0141-05

Analysis of Circulating Current in Sheaths of 220 kV XLPE Single-core Cables

WANG Bo, LUO Jin-sheng, HUANG Hong-xin, LU Jun, ZHOU Huan

(Hangzhou Electric Power Company, Hangzhou 310009, China)

Abstract: By using the calculation model of circulating current in the sheaths of single-core XLPE cables, a C++ program is coded, and the circulating current in a grounding unit, in which sheaths of cables are connected via cross-bonding, is calculated for three-cable connection with different arrangements and lengths. And the calculated results are compared with the data measured in site. According to the calculated results and measured data, different cable arrangement and length of the three-cable connection lead to different circulating current in the sheaths of single-core XLPE cables. To reduce the circulating current in the sheaths, the connected three cables in a grounding unit should take equilateral triangle arrangement with same cable length.

Key words: power cable; circulating current in sheath; cross-bonding connection; arrangement manner

0 引言

正常运行时, 高压单芯电缆线芯电流产生的交变磁场将在金属护套上产生感应电压, 为保证电缆安全稳定运行和维护人员的人身安全, 要求电缆金属护套至少有一端可靠接地。电缆金属护套交叉互联接地方式由于其具有结构紧凑, 正常运行时较长电缆线路金属护套上感应电压较低, 在发生单相短路故障时金属护套上感应电压仅为单端接地时的三分之一, 能有效保护交叉互联单元内护层保护器和外护套绝缘等优点^[1,2], 在工程实践中得到了广泛运用。

由于设计、施工等原因高压单芯电缆金属护套环流过大的情况时有发生, 最大可以达到线芯电流的 90% 以上^[3-5], 较大的环流不仅造成巨大的损耗, 还将影响电缆线路的输送能力和运行寿命。交叉互联接地方式下电缆金属护套环流的计算分析日渐引

起人们的关注。关于电缆负荷电流、间距、段长、换位接线错误、接地电阻等因素对交叉互联金属护套环流的影响目前已有较多研究^[3-8]。但电缆在使用排管和顶管敷设时容易出现的三段电缆布置方式和段长不一致对金属护套环流的影响, 目前尚未见相关报导。笔者利用单芯电缆金属护套环流计算模型, 结合电缆使用排管敷设时易出现的各种三段电缆布置方式和段长不一致的情况, 计算分析了三段电缆布置方式和段长不一致对金属护套环流的影响。提出高压单芯电缆采用排管和顶管敷设时应注意的问题, 供工程实践参考。

1 金属护套环流计算模型

1.1 电缆金属护套环流成分分析

单芯电缆线芯和金属护套构成一个中间介质为电缆绝缘层的圆柱电容器。为此在金属护套环流中, 除感应电流外, 还包括电容电流和泄漏电流, 两种电

收稿日期: 2009-06-25

作者简介: 王 波(1980), 男, 硕士, 从事高压电力电缆安装、维护工作。

流的大小主要与线芯和金属护套之间的电压和电缆结构参数有关,与电缆布置方式无关^[9-11]。杭州市电力局对大量护套环流测量结果表明,金属护套内电容电流和泄漏电流之和一般小于 6 A。

由于主要讨论交叉互联单元内三段电缆布置方式不一致和不同布置方式下段长对环流的影响,为方便计算,在环流计算中忽略了电容电流和泄漏电流分量,只计算由感应电压在金属护套上产生的感应电流分量。

1.2 环流计算模型

任意排列的单回路三相电缆金属护套见图 1,其中 mS 、 nS 、 S 为各个护套之间的中心距离。

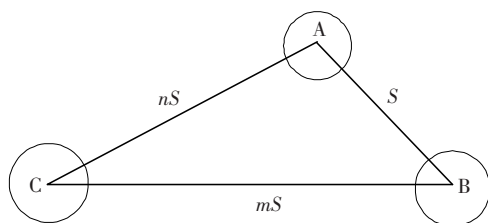


图 1 任意排列的三相电缆护套图

设三相电流平衡且

$$\begin{cases} I_A = I \\ I_B = \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)I \\ I_C = \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)I \end{cases} \quad (1)$$

则根据电磁理论,各相电缆金属护套上的感应电压为^[1]

$$\begin{cases} U_{SA} = 2 \times 10^{-7} \omega L \left[\frac{\sqrt{3}}{2} \ln n + \frac{1}{2} j \ln(nS^2/GMR_s^2) \right] \\ U_{SB} = 2 \times 10^{-7} \omega L \left[\frac{\sqrt{3}}{2} \ln(mS/GMR_s) - \frac{1}{2} j \ln(S/m \times GMR_s) \right] \\ U_{SC} = 2 \times 10^{-7} \omega L \left[-\frac{\sqrt{3}}{2} \ln(mS/GMR_s) - \frac{1}{2} j \ln(n^2S/m \times GMR_s) \right] \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中, ω 为角频率; L 为电缆段长; m ; I 为电流; A ; GMR_s 为金属护套平均几何半径。

交叉互联接地方式下金属护套的电气接线图和环流计算等值电路见图 2、3^[3-8]。

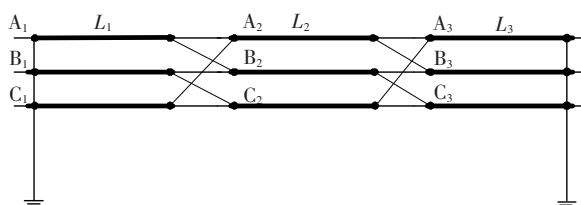


图 2 交叉互联换位接地图

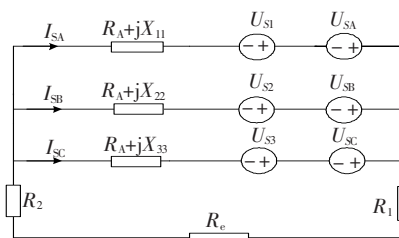


图 3 环流计算等值电路

由图 3 可得

$$\begin{cases} I_{SA}(R_A + jX_{11}) + I_{SB}(R_A + jX_{12}) + I_{SC}(R_A + jX_{13}) = U_{SA} \\ I_{SB}(R_A + jX_{22}) + I_{SA}(R_A + jX_{21}) + I_{SC}(R_A + jX_{23}) = U_{SB} \\ I_{SC}(R_A + jX_{33}) + I_{SA}(R_A + jX_{31}) + I_{SB}(R_A + jX_{32}) = U_{SC} \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中, $U_{S1} = jI_{SB}X_{12} + jI_{SC}X_{13}$ 为 B、C 相环流在 A 相金属护套上产生的感应电压; I_{SA} 、 I_{SB} 、 I_{SC} 为金属护套环流; X_{11} 、 X_{22} 、 X_{33} 为金属护套自感抗; X_{12} 为 A 相与 B 金属护套之间的互感抗; $R = R_1 + R_2 + R_e$, $R_A = R + R_s$,其中 R_e 、 R_s 为大地等值电阻和护套电阻; R_1 、 R_2 为两端接地电阻。

$$X_{11} = 2 \times 10^{-7} \omega L \ln \frac{D_e}{GMR_s} \quad (4)$$

$$X_{12} = 2 \times 10^{-7} \omega L \ln \frac{D_e}{S} \quad (5)$$

式(4)、(5)中, D_e 为大地等值回路深度, S 为两相金属护套之间的距离。根据复数方程两端实部和虚部分别相等原理,将式(3)中包含向量的一个方程分解为两个方程得

$$\begin{bmatrix} R_A & R & R & -X_{11} & -X_{12} & -X_{13} \\ R & R_A & R & -X_{21} & -X_{22} & -X_{23} \\ R & R & R_A & -X_{31} & -X_{32} & -X_{33} \\ X_{11} & X_{12} & X_{13} & R_A & R & R \\ X_{21} & X_{22} & X_{23} & R & R_A & R \\ X_{31} & X_{32} & X_{33} & R & R & R_A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{SA} \\ I_{SB} \\ I_{SC} \\ I_{SAf} \\ I_{SBf} \\ I_{SCf} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{SA} \\ U_{SB} \\ U_{SC} \\ U_{SAf} \\ U_{SBf} \\ U_{SCf} \end{bmatrix} \quad (6)$$

计算出参数矩阵中各值和感应电压后,编制 C++ 程序,利用列主元高斯消去法^[12]求解矩阵即可得出三相金属护套内感应电流值。

2 环流计算分析

当三相电流平衡、段长相等、电缆对称布置时,三段电缆感应电压幅值相等,相角差 120° ,见图 4(a)。图 2 中 $A_1B_2C_3$ 、 $B_1C_2A_3$ 和 $C_1A_2B_3$ 三段电缆金属护套两端电压为零,回路中感应电流为零。

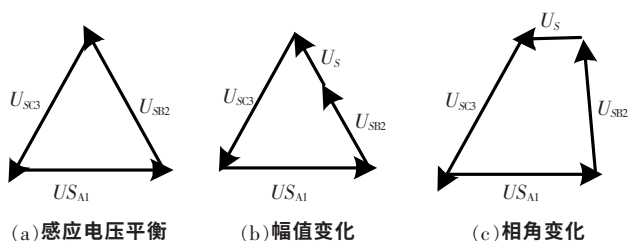


图 4 交叉互联感应电压相量图

由式(2)可知,当电缆段长、布置方式发生改变时,将导致三段电缆金属护套上感应电压幅值或相角变化,合成感应电压不再为零(见图4中(b)、(c)),在金属护套中产生感应电流。为直观了解布置方式和段长不一致对护套环流的影响,以YJLW03-127/220-1×2500型电缆为计算对象(电缆金属护套内径128.2 mm,厚度3.2 mm,无铜丝屏蔽),取整个回路电阻 $R_A=1.5\ \Omega$,对不同布置方式下金属护套环流进行了计算。

2.1 布置方式不一致对环流的影响

2.1.1 相位排列方式不一致的影响

电缆采用排管敷设时,在经过转弯工井、非开挖顶管时,常会导致在一个交叉互联单元内三段电缆的相位排列次序不一致的情况,见图5。电缆不换位,金属护套交叉互联后两端接地,互连接线见图2,设电缆段长 $L_1=L_2=L_3=500\text{ m}$,A、B相之间距离 $S=350\text{ mm}$,在不同负荷电流下,图5所示两种布置方式下三相电缆金属护套感应电流计算值见表1、2。

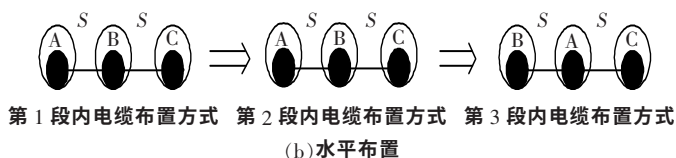
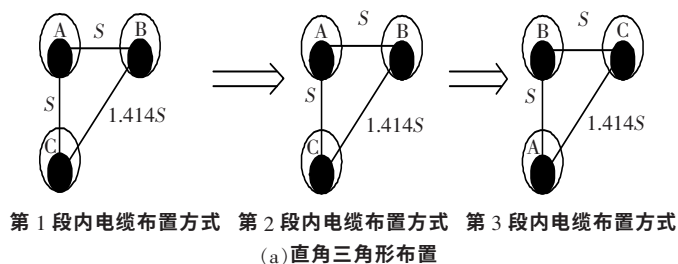


图5 相同布置方式下相位变化图

表1 直角三角形布置时环流计算值 A

I_{load}	I_{SA}	I_{SB}	I_{SC}
150	9.6	9.4	10.4
300	19.2	18.8	20.8
450	28.8	28.2	31.2
600	38.4	37.6	41.6

表2 水平布置时环流计算值 A

I_{load}	I_{SA}	I_{SB}	I_{SC}
150	10.8	11.0	21.1
300	21.6	22.0	42.2
450	32.4	33.0	63.3
600	43.2	44.0	84.2

由计算结果可知,在直角三角形和水平布置方式下,相位排列不一致对金属护套环流有明显影响,在水平方式下影响尤为严重。这是由于在直角三角形和水平布置方式下,三根电缆空间上并不是处于

完全对称的位置,一段中的相位排列变化使得不对称程度加强,合成感应电压增大,环流增大。对于正三角形布置方式,由于三相电缆在空间上完全对称,三段电缆相位排列不一致对环流没影响。

为此,当电缆采用直角三角形和水平布置方式时,如出现三段电缆相位排列方式不一致的情况,为减小金属护套环流,建议将电缆金属护套交叉互联接地方式改为单端接地方式。

2.1.2 布置方式不一致的影响

当电缆经过非开挖顶管时,由于顶管入土点的管孔排列方式与出土点的排列方式发生变化,经常容易导致三段电缆布置方式不一致的情况,见图6。设电缆段长 $L_1=L_2=L_3=500\text{ m}$,A、B相之间距离 $S=350\text{ mm}$,在不同负荷电流下,金属护套环流计算值见表3。

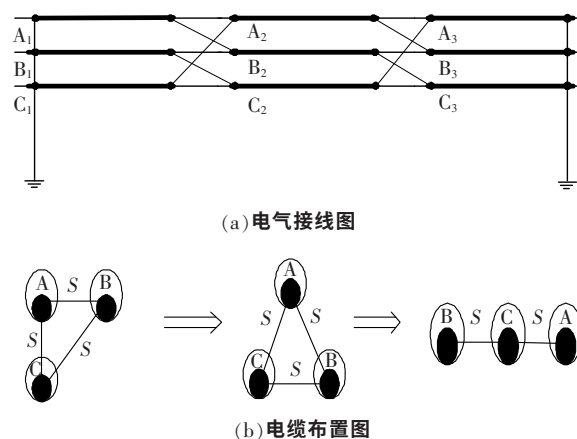


图6 电气接线和三段电缆布置图

表3 布置方式不一致时环流计算值 A

I_{load}	I_{SA}	I_{SB}	I_{SC}
150	24.6	10.1	17.1
300	49.2	20.2	34.2
450	73.9	30.1	51.3
600	98.5	40.1	68.4

由表3可知,不同的负荷电流下,金属护套环流最大值超过了线芯电流的10%,三段电缆布置方式不一致对金属护套环流有明显影响。

上述计算结果表明,除布置方式不一致对环流有明显影响外,金属护套环流还与线芯电流成正比。为此,随着输送容量和电压等级的提高,为减小护套环流,对三段电缆布置方式一致程度提出了更高要求。

2.2 不同布置方式下段长的影响

在实际工程中,交叉互联单元内三段电缆段长相差很多的情况较少,往往是由于在土建施工中某段电缆路径变化而导致这一段段长与其他两段段长产生较大差异,为此笔者只讨论两段段长相等,而一段不等的情况。假设 $L_1=L_3=500\text{ m}$,电缆在图7所示不同布置方式下,电缆线芯电流为300 A, L_2 变化时

金属护套环流计算值见表 4~6。

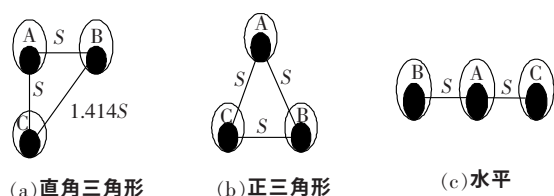


图 7 电缆排列布置图

表 4 直角三角形布置方式下环流计算值

L_2/m	I_{SA}/A	I_{SB}/A	I_{SC}/A
430	15.6	15.1	13.5
460	9.3	8.7	7.5
490	2.6	2.1	1.5
520	3.8	4.0	4.2

表 5 正三角形布置方式下环流计算值

L_2/m	I_{SA}/A	I_{SB}/A	I_{SC}/A
430	11.2	11.3	11.3
460	6.5	6.8	6.5
490	1.8	1.8	1.7
520	3.8	3.7	3.8

表 6 水平布置方式下环流计算值

L_2/m	I_{SA}/A	I_{SB}/A	I_{SC}/A
430	14.4	13.0	8.0
460	9.7	8.4	4.8
490	3.4	2.5	0.7
520	4.1	5.3	4.7

由计算结果可知,不同的布置方式下,段长对金属护套环流有明显影响,其中直角三角形和水平布置方式下,段长变化对环流影响较正三角形布置时略明显。当线芯电流较大时,为使电缆金属护套环流较小,应严格控制交叉互联单元内三段电缆长度的差值。

根据以上的计算结果,作者认为,由于线芯电流较大,220 kV 单芯电缆应尽量采用正三角形布置方式并保证三段电缆布置方式一致,段长相等或相近。如受管孔限制等原因采用水平和直角三角形布置方式时,应保证三段电缆布置方式一致、段长尽量相等。如遇特殊原因使三段电缆布置方式不一致或电缆段长相差较大时,建议更改金属护套接地方式。

3 工程实例分析

实例 1:220 kV 天庆 2P06 线由 220 kV 天湖变至 220 kV 庆丰变,线路路径长度 7 690 m,电缆型号为 YJLW03-127/220-1×1200,电缆金属护套内径 109.8 mm,厚度 2.8 mm,无铜丝屏蔽。线路投运后对金属护套环流测量发现,段长相近的两个交叉互联单元金属护套环流相差较大。两个交叉互联单元段长见

表 7,其中 6~8 段电缆金属护套为一个交叉互联单元,9~11 段电缆金属护套为一个交叉互联单元。

表 7 交叉互联单元内电缆段长分布

段号	A 相/m	B 相/m	C 相/m
6	520	520	520
7	495	495	495
8	530	530	530
9	518	518	518
10	502	502	502
11	522	522	522

现场测试表明,各段电缆外护套绝缘良好,都大于 1 000 MΩ,各个交叉互联箱内的交叉互联换位接线也正确,因此可以排除段长不等、外护套破损、换位接线错误等原因造成两者环流相差较大的可能性。

核对敷设记录发现,在 6~8 段电缆路径上有一段 80 m 顶管,在顶管入土点和出土点电缆管位排列发生变化,且第 8 段电缆经过转弯工井时电缆相位排列也发生了变化,该交叉互联单元三段电缆布置方式和相位排列见图 8。

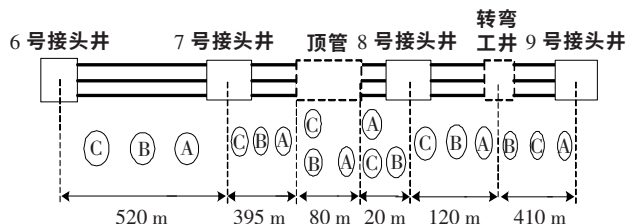


图 8 电缆布置图

在 9~11 段电缆路径上也有一段的顶管,但顶管入土点和出土点的管孔布置方式一致,整个单元内电缆布置方式和相位排列次序见图 9。

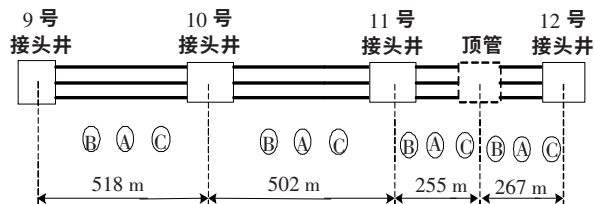


图 9 电缆布置图

6、9、12 号接头井接地电阻实测值分别为 2.10、0.80、0.14 Ω,电缆间距 $S=350$ mm,当线芯电流为 175 A 时,根据实测接地电阻对两个交叉互联单元在图 8、9 所示布置方式下金属护套环流计算值和实测值见表 8。

由表 8 可知,计算值与实测值有一定的差别,这主要是由于计算忽略了电容电流和电缆经过转弯工井和接头工井时电缆间距和布置方式发生小范围变化的缘故。

表 8 环流实测值与计算值

环流	6~9 段单元		9~11 段单元	
	计算值	实测值	计算值	实测值
I_{SA}/A	14.4	17.0	2.8	6.0
I_{SB}/A	8.0	12.0	2.0	6.4
I_{SC}/A	8.6	16.0	0.9	6.0

研究表明^[3],金属护套的环流随接地电阻的增大而明显减小。本例中 6~8 段电缆交叉互联单元的总接地电阻为 $2.9\ \Omega$,为 9~11 段电缆交叉互联单元总接地电阻的 3 倍左右,在不考虑布置方式不一致的条件下,由于两个单元段长相近,9~11 段交叉互联单元金属护套环流应明显大于 6~8 段交叉互联单元护套环流,但是无论是计算值还是实测值,6~8 段交叉互联单元金属护套环流均为 9~11 段交叉互联单元环流的 2~3 倍,这说明三段电缆布置方式不一致对金属护套环流影响是明显的。

实例 2:220 kV 司白 4414 线和景洋 2P05 线两回电缆同沟敷设,电缆间距 $S=350\text{ mm}$,电缆型号为 YJLW03-127/220-1×2500,护套内径 128.2 mm,厚度 3.2 mm,无铜丝屏蔽。电缆投运后对 4~6 段电缆的交叉互联单元环流进行测量,当线芯电流为 267.9 A 时,司白 4414 线 A、B、C 三相环流值分别为 28.2、36.8、39.7 A,各相电缆金属护套环流均超过线芯电流的 10%。测试表明,两回电缆外护套绝缘良好,所有交叉互联换位接线正确。三段电缆长度为 478、461、466 m,段长相近。4 号接头井接地电阻实测值为 $0.45\ \Omega$,7 号接头井接地电阻实测值为 0.98 Ω ,总接地电阻较大。为此,与上例相同该条电缆线路金属护套环流过大的原因也应该是由电缆布置方式和相位排列的不一致造成的。

4~6 段电缆路径中顶管数量较多,且在顶管出土管位排列方式发生变化,整个交叉互联单元内电缆布置方式和相位排列见图 10。

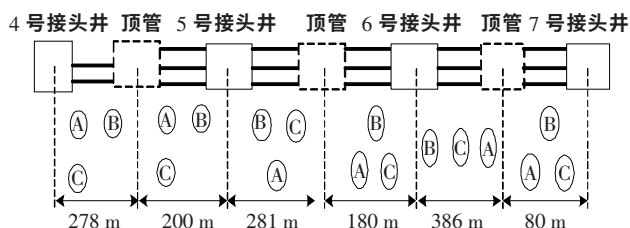


图 10 电缆布置图

根据图中电缆布置方式和实测接地电阻,对电缆金属护套环流计算结果为 $I_{SA}=20.3\text{ A}$ 、 $I_{SB}=18.1\text{ A}$ 、 $I_{SC}=28.4\text{ A}$,从计算结果来看,计算与实测值的差值平均为 10 A 左右,大于上例的差值。这主要是由于该例中电缆采用两回线路同沟敷设的缘故。两回电缆同沟敷设时金属护套环流大于单回路时的环流^[3]。且两回电缆同沟敷设时电缆在中间接头井和过渡工井

中布置方式发生小范围变化,也会增大金属护套环流。虽然计算环流时未考虑双回路和接头工井及过渡工井内布置方式小范围的变化影响,但计算值已达到实测值的 2/3 左右,这说明三段电缆布置方式不一致仍是该交叉互联单元环流过大的主要原因。

4 结论

(1)一个交叉互联单元内三段电缆布置方式不一致对金属护套环流有明显影响,当电缆采用直角三角形和水平布置方式时影响尤为严重。当电缆采用直角三角形或水平布置方式时,如电缆敷设过程中出现三段电缆布置方式和相位排列不一致的情况,建议将金属护套交叉互联接地方式改为单端接地方式。

(2)不同布置方式下,一个交叉互联单元内三段电缆段长不等对金属护套环流有影响,其中对水平和直角三角形布置方式下电缆金属护套环流影响较正三角形布置时大。

(3)对于输送容量较大的 220 kV 电缆线路,为减小交叉互联单元内金属护套环流,对三段电缆段长、布置方式的一致程度提出了更高的要求。在较大的线芯电流下,当电缆布置方式小范围内变化、段长相差较小时也会产生较大的环流,为此建议 220 kV 电缆使用排管敷设时应尽量使用正三角形布置方式,保证三段电缆布置方式一致,并严格控制三段电缆长度的差值。

参考文献:

- [1] 郑肇骥,王琨明.高压电缆线路[M].北京:水利电力出版社,1981.
- [2] 刘子玉,王惠明.电力电缆结构设计原理[M].西安:西安交通大学出版社,1995.
- [3] 刘英,王磊,曹晓琰.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.
- [4] 陈小林,成永红.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.
- [5] 罗进圣.一起 110 kV 电缆安装缺陷的分析和处理[J].浙江电力,2002(4):37-39.
- [6] 王敏.10 kV 单相电力电缆屏蔽层的感应电压和环流[J].高电压技术,2002,28(5):30-32.
- [7] 贾欣,曹晓琰,喻明.单芯电缆计及护套环流时载流量的计算[J].高电压技术,2001,27(1):25-26,38.
- [8] 牛海清,王晓兵,蚁泽沛.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.
- [9] 杨保初,刘晓波.高电压技术[M].重庆:重庆大学出版社,2001.
- [10] 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.
- [11] 陈创庭,张国胜,周志成,等.环流法监测 XLPE 电缆金属护套多点接地[J].高电压技术,2002,28(7):28-29,40.
- [12] 陈明达.计算方法教程[M].西安:西安交通大学出版社,1992.