

高压输电电缆增加敷设段长研究

高飞¹, 黄磊², 张蕾¹, 张瑞永³, 刘静², 吴述关³

(1. 国网江苏省电力公司南京供电公司, 江苏南京 210019; 2. 东南大学电气工程学院, 江苏南京 210096

3. 中国能源建设集团江苏省电力设计院有限公司, 江苏南京 210036)

摘要: 传统高压单芯电缆设计分段长度偏短, 导致电缆接头数量急剧增加, 造成接头价格昂贵, 工程投资随之上升, 电缆运行的故障概率也相应提高。针对这一问题, 开展高压输电电缆增加敷设段长对金属护套最大感应电压和护套环流的影响, 并计算最大段长。基于瞬态电力系统仿真软件, 对220 kV输电电缆在不同的接地方式、不同的排列方式下的金属护套感应电压进行仿真校验, 分析了段长增长后对护套感应电压和护套环流的影响, 获得了不同敷设方式下的电缆最大段长, 并与解析结果进行对比。针对段长增大后不平衡负载和段长情况下的护套电压和电流的影响进行了仿真分析, 为大段长高压电缆的分段提供了参考。

关键词: 高压电缆; 增加段长; 护套感应电压; 护套环流; 三相不平衡

Research on increasing the segmented length in the high-voltage cable

GAO Fei¹, HUANG Lei², ZHANG Lei¹, ZHANG Ruiyong³, LIU Jing², WU Shuguan³

(1. Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210019, China; 2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 3. Jiangsu Electric Power Design Institute, Nanjing 210036, China)

Abstract: The number of the connectors increase sharply because of the short segments in the traditional cable, which causes the cost of the project rising because of the high price of the connector. Meanwhile, the fault probability goes up when the cable working. For the problem, the research on increasing the segmented length in the high-voltage cable is carried out. Based on PSCAD software, the inducted voltage in the metal sheath of the high-voltage single-core cable and the circulating current are calculated under the different grounding and arranging style, with the nominal cross 2 500 mm² and the rated voltage 127/220 kV. The maximum segmented lengths and the circulating currents are obtained under the different laying conditions. The influence rules of the grounding and arranging styles to the inducted voltage and circulating current are illuminated as well. Considering the unbalance of load and segment length, the sheath current under different unbalance of load and segment length are analyzed. All the results offer reference for the high-voltage single-core cable segmented.

Key words: high-voltage cable; increasing the segmented length; the inducted voltage of the metal sheath; sheath current; unbalance of three phases

0 引言

由于城市建设速度加快, 城市建设与电力建设的矛盾也日益加剧, 尤其是在输电线路走廊与

江苏省电力公司科技项目资助 (J2018067)

城市建设规划的配合方面。为了解决这一矛盾, 输电线路逐步由架空敷设转向地下敷设, 大容量、长距离和大截面积电缆工程日益增多^[1]。由于传统电缆设计分段长度偏短, 导致电缆接头数量急剧增加, 一方面接头价格昂贵, 工程投资上

升；另一方面，由于接头数量的增加，导致电缆运行的故障率相应提高^[2-3]。针对这一问题，目前国内外专家学者对高压电缆增加段长技术展开研究。

日本中部电力公司所建275 kV、 $1 \times 2\,500\text{ mm}^2$ 和23 km长线路中，其交叉互联单元段长达4 940 m，各区间中最长1 700 m。在欧洲电缆分盘长度也有延长的趋势。如比瑞利（Pirelli）公司对其承担的工程400 kV、 $1 \times 2\,500\text{ mm}^2$ 电缆，制造长度由以往750 m提高至1 400 m， $1 \times 1\,000\text{ mm}^2$ 电缆则从1 000 m提高至3 500 m。英国电力部通过改造某电缆线路交叉互联单元区间的长度，使得长度增至2 955~3 099 m。高压电缆段长增加对设计、施工和运行检修环节都会产生重要影响。高压电缆段长增长后最大影响是高压电缆金属护套上感应电压以及环流^[4-5]。按照国标《电力工程电缆设计规范》的规定^[6]，交流单相电力电缆的金属护层必须接地，且在金属上任意非接地处的工频感应电压在未采取不能任意接触金属护层的安全措施时，不得大于50 V。除此以外，不得大于300 V。另外由于线缆长度增大，金属护套内将会产生更大的感应电压，并引起护套环流^[7]。段长增大后，出现三相不平衡长度的可能性增大，在出现不平衡负载的运行时，造成护套感应电压不平衡，从而增大护套环流。

1 护套感应电压和护套环流计算模型

1.1 金属护套感应电压

当高压电缆通过工频三相电流时，产生交变的电磁场，进而在金属护套上产生感应电压，护套通过接地形成通路后产生护套电流。金属护套感应电压计算模型如图1所示。P表示单芯电缆的金属护套，看成是三相线芯a、b和c平行的导体^[8]，设为单位长度，它们之间的距离为轴心距。那么在导体P处的磁场为三相电流共同作用的结果。

假设P是a相的金属护套，则其与a同心，又

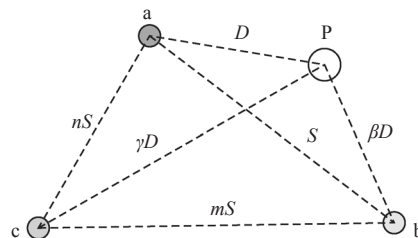


图1 金属护套感应电压计算模型

Fig. 1 Calculation model of induced voltage of metal sheath

因为三相电流对称，那么P与a、b和c三相电流链的总磁通为

$$\Phi_p = 2 \times 10^{-4} I \left[-\frac{1}{2} \ln \frac{nS^2}{\text{GMR}_s} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \ln n \right] \quad (1)$$

那么a相金属护套感应电动势的解析计算公式为

$$E_a = -j\omega\Phi_p = 2\omega I \times 10^{-4} \left[\frac{j}{2} \ln \frac{nS^2}{\text{GMR}_s^2} + \frac{\sqrt{3}}{2} \ln n \right] \quad (2)$$

同理可得b、c两相金属护套感应电动势为

$$E_b = 2\omega I \times 10^{-4} \left[-\frac{\sqrt{3}}{2} \ln \frac{mS}{\text{GMR}_s} - j \frac{1}{2} \ln \frac{S}{m \times \text{GMR}_s} \right] \quad (3)$$

$$E_c = 2\omega I \times 10^{-4} \left[-\frac{\sqrt{3}}{2} \ln \frac{mS}{\text{GMR}_s} - j \frac{1}{2} \ln \frac{n^2 S}{m \times \text{GMR}_s} \right] \quad (4)$$

式中， GMR_s 为金属护套的几何平均半径。

从以上计算公式可知：金属护套上的感应电压主要与电缆长度、电缆中电流的运行频率、电缆的敷设方式（每相电缆的轴心距）及护套的平均半径等参数有关。

1.2 护套环流

由于采用长距离分段线缆，线缆护套分段距离和接地点距离增大，造成护套感应电压和环流增大^[9]。为减少护套感应电压，采用交叉互联接地。由于段长较长，存在由于机械结构、垂度等形成的线缆三段长度不平衡，必然形成不平衡护套感应电压和护套环流。此时线芯电流和护套电流共同形成护套感应电压。等效电路如图2所示。

可得到计算方程如下

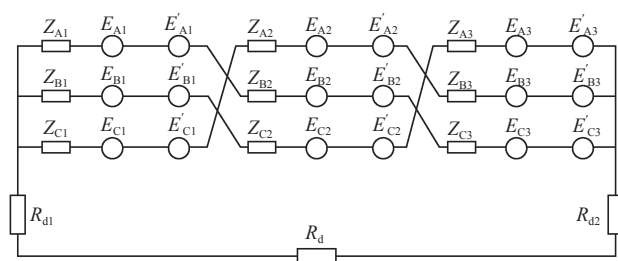


图2 护套感应电压和环流等效电路模型

Fig. 2 Equivalent circuit model of sheath induced voltage and circulating current

$$\begin{aligned}
 & (Z_{A1} + Z_{B2} + Z_{C3}) I_{A1} + (R_{d1} + R_{d2} + R_{d3}) I_e \\
 & = E_{A1} + E_{B2} + E_{C3} - E'_{A1} - E'_{B2} - E'_{C3} \\
 & (Z_{B1} + Z_{C2} + Z_{A3}) I_{B1} + (R_{d1} + R_{d2} + R_{d3}) I_e \\
 & = E_{B1} + E_{C2} + E_{A3} - E'_{B1} - E'_{C2} - E'_{A3} \\
 & (Z_{C1} + Z_{A2} + Z_{B3}) I_{C1} + (R_{d1} + R_{d2} + R_{d3}) I_e \\
 & = E_{C1} + E_{A2} + E_{B3} - E'_{C1} - E'_{A2} - E'_{B3}
 \end{aligned} \quad (5)$$

式中, Z_A 、 Z_B 和 Z_C 为每段护套自阻抗; E_A 、 E_B 和 E_C 为负荷电流在护套上的感应电压; E'_A 、 E'_B 和 E'_C 为护套环流在各护套上感应的电压; R_{d1} 和 R_{d2} 为交叉互联接地电阻; R_{d3} 为大地漏电阻; I_{A1} 、 I_{B1} 和 I_{C1} 为各个护套内电流。

解析计算方法为了简化计算作了一些理想化的假设, 实际情况比解析计算公式所表达的还要复杂得多。实际工程中也证明了解析计算结果与实际情况存在一定差距。在计算机技术高度发展的今天, 一些电力系统暂态仿真软件考虑到电缆每一部分更加准确的结构、参数, 将暂态过程中的相互影响纳入计算, 可以实现更加精确的计算。仿真计算与解析计算相结合在工程实际中可以更好地指导设计及工程应用。

2 三相平衡的段长增加影响

本文基于计算模型和PSCAD软件的电缆线路模型^[10], 建立了高压电力电缆线路动态仿真模型, 可准确地快速地计算出电缆在不同工况或敷设方式下的电缆护套感应电压及环流。

2.1 电缆结构及参数

本文采用标称截面积为2 500 mm²、额定电压为127 kV/220 kV的单芯XLPE电缆作为仿真对象^[11], 其尺寸参数如表1所示。建立不同的接地方式和敷设方式下的仿真模型, 分别计算金属护套感应电压, 从而确定电缆最大可能单段长度, 并在双端和交叉互联接地方式下进行环流计算。

表1 220 kV XLPE 单芯电缆尺寸参数

Tab. 1 Size parameters of single core cable

(单位: mm)

导体	厚度	外径
金属导体	—	61.5±1.0
导体屏蔽	2.28	66.5±1.0
绝缘	24.0	114.5±1.5
绝缘屏蔽	1.5	117.5±1.5
半导体阻水缓冲带	4×2.0	129.5±2.0
皱纹铝护套	2.8	146.0±3.0
防腐沥青	0.5	146.0±3.0
外护套	5.0	156.0±3.0
挤制导电层	0.2	156.0±3.0

根据电缆出厂参数, 在直埋、地下管道或空气中不同的敷设环境下, 电缆的连续负荷载流量是不同的, 金属护套感应电压和环流的计算结果也会不同。为便于分析, 本文统一采用直埋的敷设方式, 且连续负荷载流量为1.246 kA。

2.2 不同排列方式和接地方式

根据金属护套感应电压的理论计算公式, 感应电压值与电缆单段长度成正比。为了便于分析比较不同敷设方式下的最大允许段长, 电缆每段长度为1 km。不同的排列方式影响空间磁场分布。本文对三相电缆常见的正三角形、水平和直角等腰三角形方式进行分析, 其中相邻两相的中心距为30 cm。电缆排列方式如图3所示。

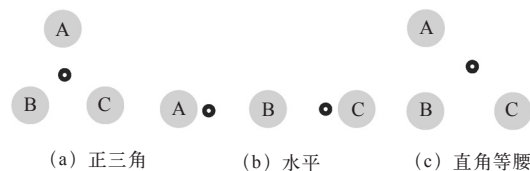


图3 电缆排列方式

Fig. 3 Cable arrangement

(1) 单端接地模型

1 km的线路金属护套终端接地, 另一端经护套保护器接地, 此种接地方式下金属护套没有构成电流回路, 护套中基本没有环流, 可以提高电缆的输送容量。但是需要加设一条回流线, 以使接地短路电流通过回流线回到系统中性点, 从而降低短路故障时金属护套的工频感应电压, 以避免金属护套的感应电压超过护套绝缘耐受强度或护套电压限制器的工频耐压而发生击穿, 同时也可避免干扰二次回路或通信线路的正常运行。

(2) 单端接地

单端接地电缆不同排列方式下的金属护套感应电压波形如图4所示。

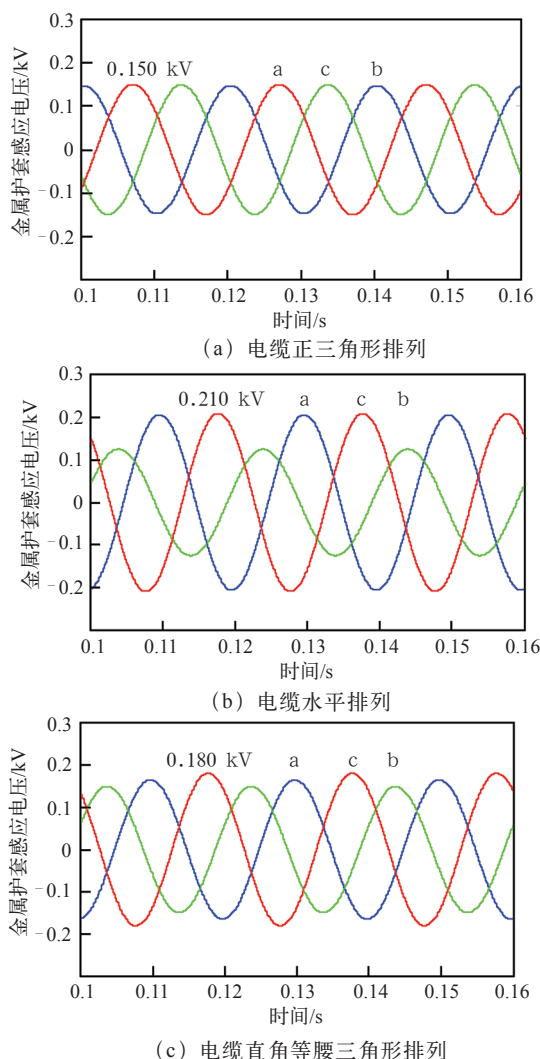


图4 单端接地金属护套感应电压

Fig. 4 Induced voltage of single ended grounded metal sheath

采用单端接地方式和正三角排列时, 金属护套感应电压最小, 为150 V/km。采用水平和直角等腰三角形排列, 由于三相电缆在空间位置上的非对称性, 金属护套感应电压都高于正三角排列, 并且三相不对称。因此若在水平和直角等腰三角形排列方式采用双端接地必然导致环流, 三种方式护套仿真结果如图5所示。

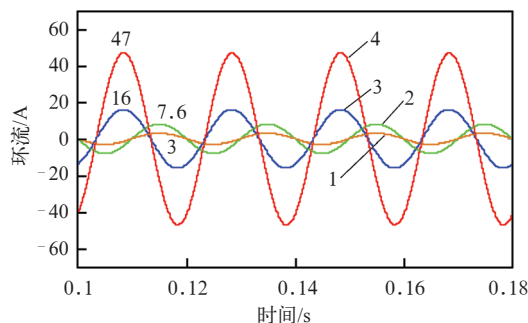


图5 不同排列方式下的护套环流

Fig. 5 Sheath circulating current under different arrangement

双端接地方式下, 电缆不同排列方式及回流线不同位置时的环流曲线1~4对应的敷设方式分别为: 电缆三角形排列—回流线三角形中心敷设; 电缆直角等腰三角形排列—回流线斜边中心敷设; 电缆水平排列—回流线3/7敷设且1/2处换位; 电缆水平排列—回流线靠近两个边相敷设且1/2处换位。从图5中可以看出, 在正常工作状态下, 正三角排列时回流线中的环流幅值最小, 直角等腰三角形排列幅值约为7.6 A, 水平排列幅值最大。当回流线采用常用的3/7敷设方法时回流幅值为47 A; 当将回流线远离中间相、靠近两边相敷设时, 回流变小幅值约为16 A。总之, 回流线敷设在合理的位置, 可以弱化不对称性减小环流。

(3) 交叉互联接地

当高压电缆线路更长时, 单端接地和中性点接地都可能使得金属护套感应电压过高, 此时可采用金属护套交叉互联接地。交叉互联接地模型的基本单元为三段, 两端直接互联接地, 每段之间装设绝缘接头, 绝缘接头处金属护套三相之间用同轴引线经接线盒进行换位连接^[12]。正常工作时, 由于三段金属护套电缆相位相差 120° , 且幅值相等, 使得金属护套上几乎无环流, 并且电

电缆线路上的最高电压为每一小段长度上的感应电压^[13-14]。当发生单相接地短路故障时,金属护套相当于回流线,故不需要再另外装设回流线。

三段交叉互联可有效消除排列位置形成的不对称性,对交叉互联的1 km小段非接地端电压进行仿真,得到电缆不同排列方式下的金属护套感应电压波形,如图6所示。

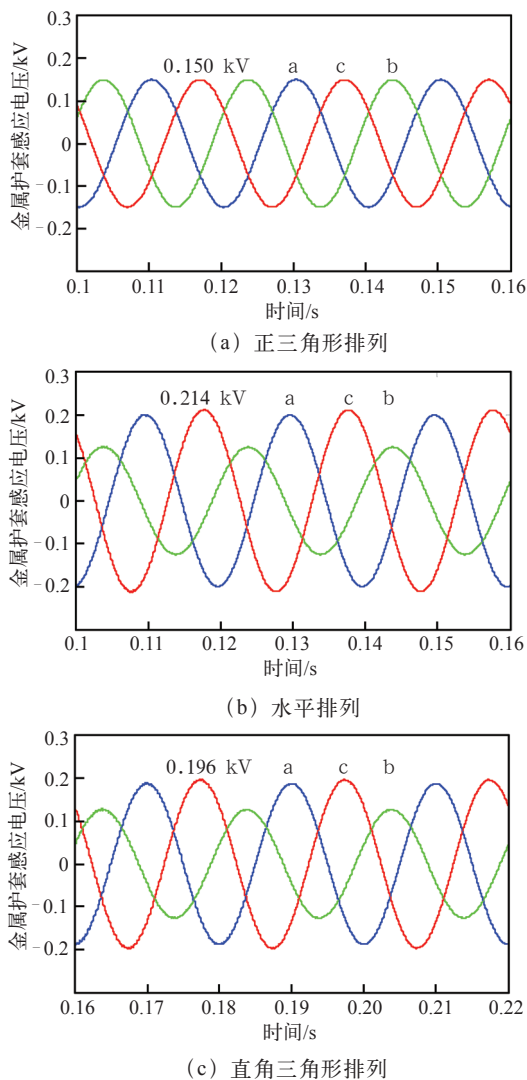


图6 交叉互联接地金属护套感应电压

Fig. 6 Induced voltage of metal sheath for cross interconnection grounding

采用正三角形排列的对称性良好,金属护套感应电压最小,与单端接地1 km的护套感应电压几乎相等。水平和直角等腰三角形排列在空间位置上的不对称性,使得三段交叉互联下比单端接地的连接方式下,金属护套感应电压都有所升高,

但三段交叉互联大大降低了环流。

因此,该电缆线路电流为1 246 A的情况下,假设最大金属护套电压为国标300 V(有效值),三相电缆不同排列方式下的最大段长如表2所示。

表2 不同接地方式下的最大段长

Tab. 2 Maximum section length under different grounding modes

敷设方式	(单位: km)		
	正三角	水平	直三角
单端接地	2.83	2.03	2.36
中性点接地	2.83	2.03	2.36
交叉互联接地	2.83	1.99	2.17

2.3 不同线芯尺寸

不同的线芯尺寸同样影响敷设段长。在某220 kV电缆不同线芯尺寸和负荷下进行仿真和计算,得到不同敷设方式下的最大段长数据,如表3~表5所示。

表3 线芯标称截面积800 mm²时的最大段长数据

Tab. 3 Maximum section length data with nominal cross-sectional area of 800 mm²

敷设方式	仿真计算最大段长/km	解析公式计算最大段长/km	误差占比(%)
正三角	1.84	2.086	13.4
直三角	1.68	1.88	11.9
水平	1.52	1.683	10.7
垂直	1.52	1.683	10.7

注:线路电流为1 276 A。

表4 线芯标称截面积1 600 mm²时的最大段长数据

Tab. 4 Maximum section length data with nominal cross-sectional area of 1 600 mm²

敷设方式	仿真计算最大段长/km	解析公式计算最大段长/km	误差占比(%)
正三角	1.38	1.517	9.9
直角	1.24	1.358	9.5
水平	1.11	1.207	8.7
垂直	1.11	1.207	8.7

注:线路电流为1 863 A。

表5 线芯标称截面积2 500 mm²时的最大段长数据

Tab. 5 Maximum section length data with nominal cross-sectional area of 2 500 mm²

敷设方式	仿真计算最大段长/km	解析公式计算最大段长/km	误差占比(%)
正三角	1.19	1.288	8.4
直角	1.06	1.145	8.5
水平	0.93	1.006	8.1
垂直	0.93	1.006	8.1

注:线路电流为2 332 A。

通过对比仿真和计算可知,仿真计算结果与解析公式计算结果有一定误差。这是为了计算简便,解析公式在推导的过程进行了假设:首先假设电缆长度远远大于电缆之间距离,故认为金属护套上的感应电压是均匀分布的;其次因为金属护套的厚度较薄,因此把金属护套的自感视为0,式中电抗值要小于实际情况。而PSCAD采用等效电路模型,每一根电缆都会等效为计及自感、互感、电阻和电容等电路参数的模型,更加准确,也更加接近实际。同一系列电缆,线芯尺寸越大,仿真结果与计算结果越接近。这是因为线芯越大,金属护套几何半径也越大,公式推导时的简化越合理,与实际偏差越小。

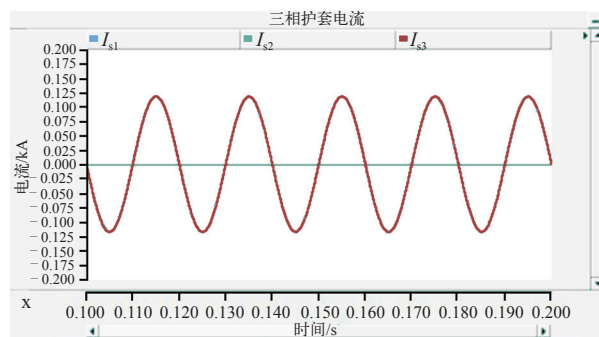
3 不平衡段长的影响分析

当采用交叉互联,三相负载均衡和分段完全相等时,三相护套感应电压完全抵消,不存在护套环流。但是一旦交叉互联段出现不平衡段长,三相出现负载不平衡时,不可避免会产生环流^[15]。针对线路电流为1 276 A进行了仿真分析。分段长度为2 km。段长不等和负载不平衡下的护套环流情况如图7所示。

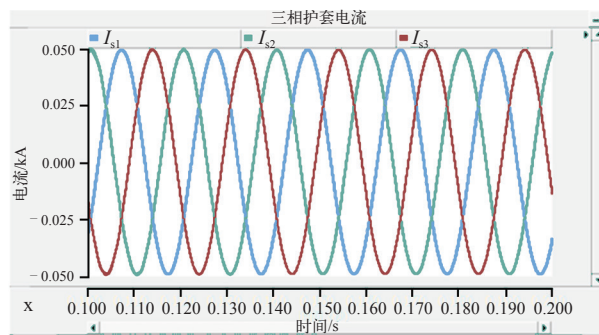
从图7中可以看出,当仅仅是段长不平衡时,三相护套电流对称,不存在入地电流;当出现单相负载不平衡时,三相护套电流相位一致,入地电流为3倍护套电流。当同时存在负载和段长不平衡时,护套环流较大,同时存在入地电流。当单相负载20%不平衡、段长10%不平衡时,护套环流超过了线芯额定电流的10%的限制。

分段长度为1 km,段长和负载不平衡下的护套环流情况如图8所示。

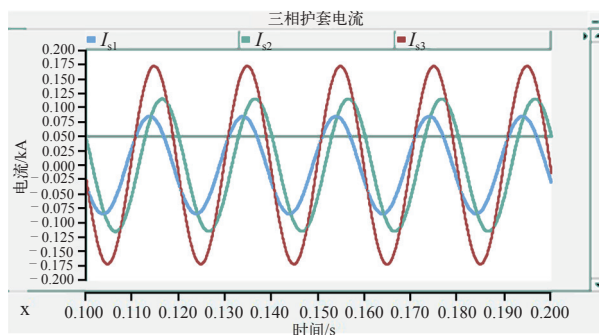
由图8可知,段长增大后,不平衡段长和负载下护套电流也略微增加。线缆长度不平衡和负载不对称时,造成护套环流,并且随不平衡度增加而增加。段长增大,势必造成不平衡度和护套环流增大。三相负载对称的情况下,2 km段长最大不平衡应不超过基本段长的40% (800 m)。



(a)单相负载20%不平衡下的护套电流



(b)一段段长10%不平衡下的护套电流



(c)单相负载20%不平衡、段长10%不平衡下的护套电流

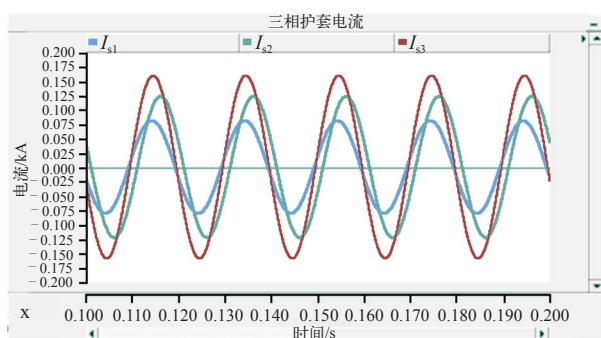
图7 三相不平衡段长和负载下护套环流

Fig. 7 Three phase unbalanced section length and sheath circulating current under load

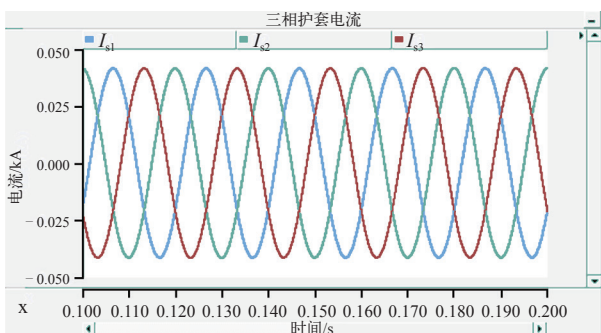
如果段长不平衡为10%,负载的不平衡不应超过20%。因此,大长段线缆的敷设长度必须综合考虑段长不平衡度和负载不平衡度。

4 结束语

对于段长增大的高压电缆,由于传输容量更大,单段传输距离更长,金属护套感应电压更大,在不同的敷设方式下对金属护套感应电压进行准确的校验尤其重要。本文针对直埋的三相电缆,在不同的敷设方式和接地方式下分别对护套



(a) 单相负载20%不平衡、段长10%不平衡下的护套电流



(b) 一段段长10%不平衡下的护套电流

图8 1 km分段三相不平衡段长和负载下护套环流

Fig. 8 Sheath circulating current under 1 km three phase unbalanced section length and load

感应电压和环流进行了解析和仿真计算校验, 得出了排列方式的单段电缆长度, 并对比分析了仿真计算和解析公式计算的结果, 研究和分析了不平衡段长和负载对增加段长的影响。研究结果可供工程实践参考。

参考文献

- [1] 苏银玉, 张雪艳. 大截面交联聚乙烯绝缘铜丝疏绕屏蔽电力电缆的研制[J]. 电线电缆, 2017(3): 18-20.
- [2] 张晓东, 陈永进. 高压交联聚乙烯电缆线路设计计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- [3] 刘凤莲, 薛志航, 邓元实, 等. 220 kV高压预制式电缆中间接头故障分析与处理[J]. 四川电力技术, 2018, 41(1): 44-48.
- [4] 张磊, 郑新龙, 高震, 等. 电力电缆极限传输长度研究[J]. 中国电力, 2016, 49(8): 45-49.
- [5] 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. Wuhan, China: IEEE, 2010: 1-8.

- [6] 电力工程电缆设计规范: GB/50217—2018[S].
- [7] 高俊国, 于平澜, 李紫云, 等. 基于有限元法的电缆金属护套感应电压仿真分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(3): 714-720.
- [8] 梁型淦, 王昱力, 张磊. 220 kV电缆护套单相接地故障过电压特性[J]. 武汉大学学报(工学版), 2013, 46(6): 747-751, 758.
- [9] 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.
- [10] 陈锦胜. 配电线路使用PSCAD电缆模型建模[J]. 广东电力, 2015, 28(3): 82-85.
- [11] 杨杰, 周承启, 王磊. 单芯电缆金属护套接地方式比较分析[J]. 陕西电力, 2011, 39(2): 48-51.
- [12] 梁海生, 李帆, 王永志, 等. 混合排列方式在交叉互联电缆中的应用[J]. 电线电缆, 2015(6): 41-44.
- [13] 鲁晓一, 徐伟. 多回路电缆护套交叉互联方式下的环流计算方法[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(6): 71-76.
- [14] 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.
- [15] 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.

作者简介



高飞

高飞(1975—), 男, 工程师, 主要研究方向为高压线缆运行、维护与管理。

(收稿日期: 2019-06-15)EA