高压输电线缆增加敷设段长研究

高 飞[1]，黄 磊[2]，张 蕾[1]，张瑞永[2]，刘 静[3]，吴述关[2]

（1. 国网江苏省电力公司南京供电公司，江苏 南京 210019；2. 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；3. 东南大学电气工程学院，江苏 南京 210096）

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，增大单段长度可有效解决这一问题。对金属护套感应电压和护套环流进行计算研究，推算出最大可能的敷设段长。使用解析公式和仿真计算两种方法，对220 kV输电线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计算，给出了可行的最大敷设段长，并对两种计算方法所得结果进行了对比。分析了负载不平衡或段长不平衡对护套环流的影响，对段长增加后不平衡负载或段长时的护套环流进行了仿真计算，提出最大敷设段长的选取还应考虑不平衡状态下的护套环流是否超限。

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 Fei[1], HUANG Lei[2], ZHANG Lei[1], ZHANG Ruiyong[2], LIU Jing[3] ,WU Shuguan[2]

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

Abstract: The number of the connectors grows sharply because of the short segments in the traditional cable, which causes the cost of the project to rise 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. Simulation and formula two methods are used to calculated the inducted voltage in the metal sheath of the high-voltage single-core cable under the different grounding and arranging style, with the rated voltage 220 kV. Then the largest segment length is calculated and the results from the above two methods are compared. The imbalance of load or segment length affects the circulating current in the sheath, and it is counted in load or segment length imbalance or both imbalances with the biggest segment length. The result illuminates the sheath circulating current bigger than that of the smaller segment, and it may be beyond the limit. So the circulating current in imbalance staus should be considered as well.

Key words: high voltage cable; increase section length; sheath induced voltage; sheath circulating current; three-phase imbalance

0 引言

随着城市建设速度加快，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城市建设规划的配合方面。为解决这一矛盾，输电线路逐步由架空敷设转向地下电缆敷设，大容量、长距离和大截面电缆工程日益

国网江苏省电力公司科技项目（52100117001W）

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概率相应提高[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、1×2 500 mm^2、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、1×2 500 mm^{2}电缆，制造长度由以往的750 m提高至1 400 m，1×1 000 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。这些都表明增加敷设段长是输电电缆应用的必然趋势。

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，影响最大的是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取得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，即高压电缆的段长增加首先受护套感应电压大小的制约。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，并引起较大的护套环流[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

当高压电缆通以工频三相电流时，在空间产生交变的电磁场，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。图1为电缆金属护套感应电压计算的示意模型。图1中，P为单芯电缆的金属护套，看成是与三相线芯平行的导体[8]，设护套和线芯长度为单位长度，它们之间的距离为轴心距。基于电磁场理论可知，在导体P处的磁场为三相电流共同作用的结果。

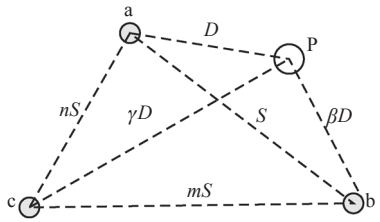


图1 金属护套感应电压计算模型

Fig. 1 Calculation of inducted voltage of sheat

假设P是a相的金属护套，则其与a同心，又因为三相电流对称，那么P与三相电流铰链的总磁通为

$$\Phi = 2\times10^{-4} I[-\frac{1}{2}\ln\frac{nS^2}{\mathrm{GMR_s}} - \mathrm{j}\frac{\sqrt{3}}{2}\ln n] \quad (1)$$

那么a相金属护套感应电动势的解析计算公式为

$$E_\mathrm{a} = -\mathrm{j}\omega\Phi = 2\omega I\times10^{-4}[\frac{\mathrm{j}}{2}\ln\frac{nS^2}{\mathrm{GMR_s^2}} + \frac{\sqrt{3}}{2}\ln n] \quad (2)$$

同理可得b、c两相金属护套感应电动势为

$$E_\mathrm{b} = 2\omega I\times10^{-4}[\frac{\sqrt{3}}{2}\ln\frac{mS}{\mathrm{GMR_s}} - \mathrm{j}\frac{1}{2}\ln\frac{S}{m\mathrm{GMR_s}}] \quad (3)$$

$$E_\mathrm{c} = 2\omega I\times10^{-4}[-\frac{\sqrt{3}}{2}\ln\frac{mS}{\mathrm{GMR_s}} - \mathrm{j}\frac{1}{2}\ln\frac{n^2S}{m\mathrm{GMR_s}}] \quad (4)$$

式中，$\mathrm{GMR_s}$为金属护套的几何平均半径；ω为电频率；I为线电流；S为ab两相的中心距；m、n分别为bc和ac相间距与ab相间距的比值；D为被求护套距离a相线缆的距离，β、γ为被求护套距离b相和c相的距离与D的比值。将护套P与abc不同相重合，就可以求出各自金属护套上的感应电压公式。根据不同的电缆排列方式，修改比值参数就可以得到相应的公式。

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、电缆负荷电流及其运行频率、电缆的敷设方式（影响电缆间的轴心距）及护套的平均几何半径等参数有关。

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]。虽然为减少护套感应电压，采用交叉互联接地，护套环流本应很小但由于段长较长，必然存在由于机械结构、垂度等形成的线缆三段长度不平衡，也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。

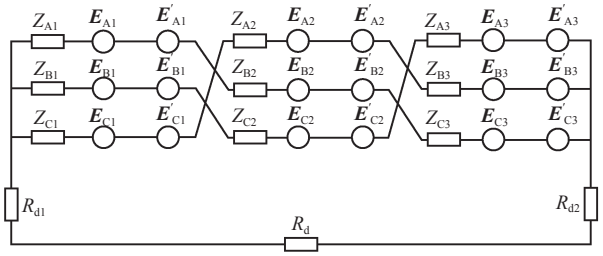


图2　护套感应电压和环流等值电路模型

Fig. 2 Equivalent circuit of induced voltage and circulation current of sheath

可得到计算方程如下，即

$$\begin{cases}(Z_{A1}+Z_{B2}+Z_{C3})\boldsymbol{I}_{At}+(R_{d1}+R_{d2}+R_{d3})\boldsymbol{I}_e=\\ \boldsymbol{E}_{A1}+\boldsymbol{E}_{B2}+\boldsymbol{E}_{C3}-\boldsymbol{E}'_{A1}-\boldsymbol{E}'_{B2}-\boldsymbol{E}'_{C3}\\ (Z_{B1}+Z_{C2}+Z_{A3})\boldsymbol{I}_{Bt}+(R_{d1}+R_{d2}+R_{d3})\boldsymbol{I}_e=\\ \boldsymbol{E}_{B1}+\boldsymbol{E}_{C2}+\boldsymbol{E}_{A3}-\boldsymbol{E}'_{B1}-\boldsymbol{E}'_{C2}-\boldsymbol{E}'_{A3}\\ (Z_{C1}+Z_{A2}+Z_{B3})\boldsymbol{I}_{Ct}+(R_{d1}+R_{d2}+R_{d3})\boldsymbol{I}_e=\\ \boldsymbol{E}_{C1}+\boldsymbol{E}_{A2}+\boldsymbol{E}_{B3}-\boldsymbol{E}'_{C1}-\boldsymbol{E}'_{A2}-\boldsymbol{E}'_{B3}\end{cases}\tag{5}$$

式中，下标1～3表示交叉互联的三小段；Z_A、Z_B和Z_C为每段护套自阻抗；$\boldsymbol{E}_A$、$\boldsymbol{E}_B$和$\boldsymbol{E}_C$为负荷电流在护套上的感应电压；$\boldsymbol{E}'_A$、$\boldsymbol{E}'_B$和$\boldsymbol{E}'_C$为护套环流在各护套上感应的电压；R_{d1}、R_{d2}为交叉互联接地电阻；R_{d3}为大地漏电阻；$\boldsymbol{I}_{At}$、$\boldsymbol{I}_{Bt}$和$\boldsymbol{I}_{Ct}$为各护套内的电流；$\boldsymbol{I}_e$为对地总电流。

解析计算方法为了简化计算作了一些理想化的假设，实际中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通过强大的数据处理功能，考虑到电缆每一部分更加准确的结构、参数，并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 最大段长的计算

本节基于PSCAD软件的电缆线路仿真模块[10]，建立了高压电力电缆线路动态仿真模型，仿真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可敷设的最大段长。对三种不同类型和负荷的电缆分别进行仿真和解析计算，并将两种计算方法的结果进行对比，为工程应用提供依据。

2.1 电缆结构及参数

采用标称截面积为2 500 mm^2，额定电压为127/220 kV的单芯电缆作为仿真对象[11]，具体参数如表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，从而确定不同情况下的电缆最大可能段长。并对双端和交叉互联两种接地方式进行环流计算。

表1　220 kV XLPE 单芯电缆尺寸参数

Tab. 1 Dimension parameters of 220 kV single-core cable

（单位：mm）

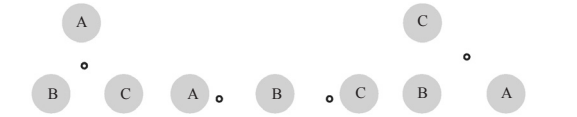
导体	厚度	外径
金属导体	—	61.5±1.0
导体屏蔽	2.28	66.5±1.0
绝 缘	24.0	114.5±1.5
绝缘屏蔽	1.5	117.5±1.5
半导电阻水缓冲带	4×2.0	129.5±2.0
皱纹铝护套	2.8	146.0±3.0
防腐沥青	0.5	146.0±3.0
外 护 套	5.0	156.0±3.0
挤制导电层	0.2	156.0±3.0

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，且连续负荷载流量取1 024 A。

2.2 电缆的排列方式

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

对比，电缆每段长度取1 km。不同的排列方式会影响空间磁场分布，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，如图3所示。



（a）正三角形　（b）水平　（c）直角等腰三角形

图3　电缆排列方式

Fig. 3 Arrangement of cables

2.3　电缆金属护套的接地方式

电缆金属护套的接地方式主要有两端接地、一端接地和交叉互联接地，由于两端接地本身存在护套环流通路，仅适合于电缆线路较短、传输功率较小的情况，在研究增大敷设段长时只讨论单端接地和交叉互联两种接地方式。

（1）单端接地

1 km的线路金属护套终端接地，另一端经护层保护器接地，此种接地方式下金属护套没有构成电流通路，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。

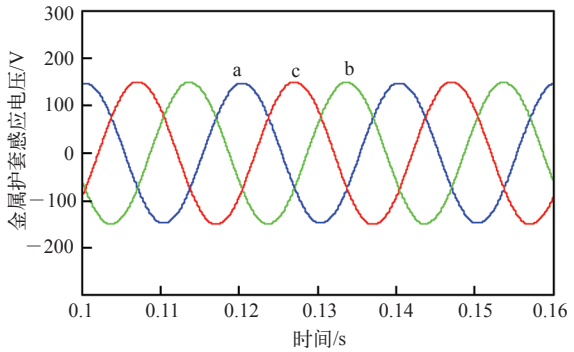
（2）交叉互联接地

当线缆总线路较长时，单段段长无法满足要求，单端端接地和中性点接地都可能使得金属护套感应电压过高，此时可将总线路分段，并采用交叉互联的接地方式。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[12-13]。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，并且电缆线路上的最高电压为每一小段长度上的感应电压[14-15]。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。

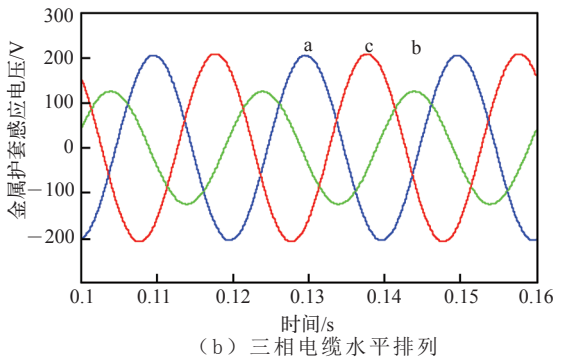
2.4　金属护套感应电压仿真分析

（1）单端接地方式

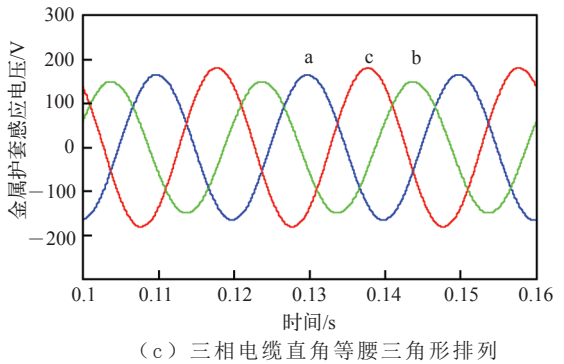
图4为单端接地时，单段1 km长电缆分别采用正三角形、水平和直角等腰三角形排列时的金属护套感应电压波形。



（a）三相电缆正三角形排列



（b）三相电缆水平排列



（c）三相电缆直角等腰三角形排列

图4　单端接地金属护套感应电压

Fig. 4 Induced voltage of sheath single-ended grounding

采用正三角排列时，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时，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。水平排列时，两侧相金属护套感应电压相同，中心处由于两侧相空间磁场的抵消作用，中心相金属护套感应电压较低。同理，直角等腰三角形排列时直角顶点相的护套感应电压较低，与理论解析计算一致。

以国标300 V（有效值）为限，不同的排列方式下的最大敷设段长如表2所示。

表2　采用单端接地时最大敷设段长

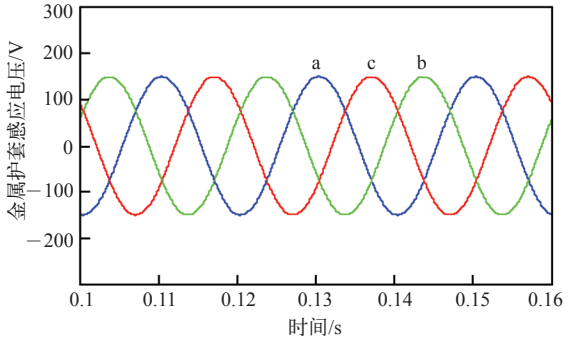
Tab. 2 Max segment length under different grounding models

排列方式	护套最大感应电压/(V/km)	最大段长/km
正三角形	106.1	2.82
水平	148.5	2.02
直角等腰三角形	127.3	2.35

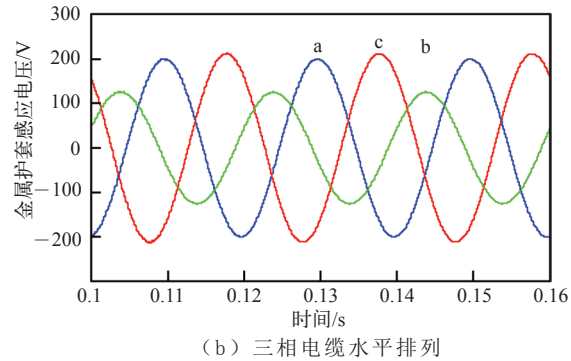
（2）交叉互联接地方式

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计算，得到电缆不同排列方式下的电压波形如图5所示。

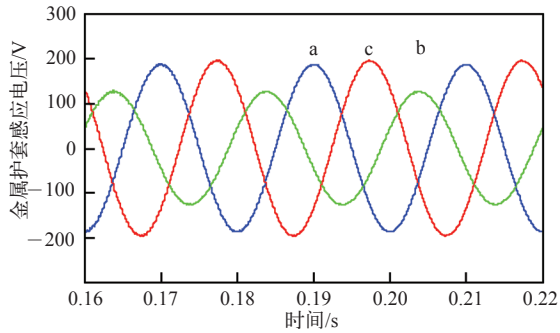
采用正三角形排列的对称性良好，金属护套感应电压最小，与单端接地1 km的护套感应电压基本相等。水平和直角等腰三角形排列由于三相在空间位置上的不对称性，与单段



（a）三相电缆正三角形排列



（b）三相电缆水平排列



（c）三相电缆直角等腰三角形排列

图5　交叉互联接地金属护套感应电压

Fig. 5 Induced voltage of sheath with cross interconnection

单端接地时相比，金属护套感应电压都有所升高，并且排列方式上空间不对称性越差，电压变化越大，即直角等腰三角形变化较显著。可敷设的最大段长也会相应减小。

3.5　最大段长仿真和解析计算对比

对三种不同规格的电缆的护套感应电压分别进行仿真和解析计算，依据国标计算出的最大段长如表3～5所示。

表3　127/220 kV，800 mm²，*S*=35 cm，1 276 A

Tab. 3 127/220 kV，800 mm²，*S*=35 cm，1 276 A

最大段长	仿真计算	解析计算	误差占比(%)
正三角形	1.84	2.086	13.4
水平	1.52	1.683	10.7
直角等腰三角形	1.68	1.88	11.9

表4　127/220 kV，1 600 mm²，*S*=35 cm，1 863 A

Tab. 4 127/220 kV，1 600 mm²，*S*=35 cm，1 863 A

最大段长	仿真计算	解析计算	误差占比(%)
正三角形	1.38	1.517	9.9
水平	1.11	1.207	8.7
直角等腰三角形	1.24	1.358	9.5

表5　127/220 kV，2 500 mm²，*S*=35 cm，2 332 A

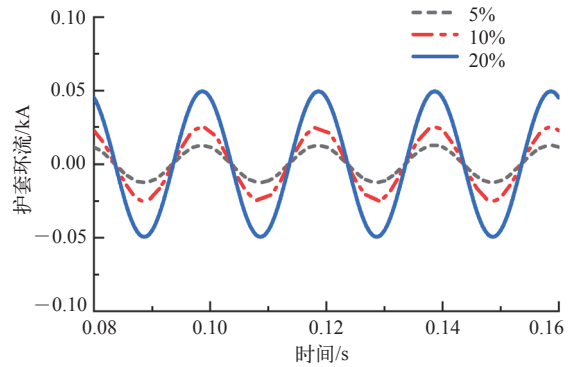
Tab. 5 127/220 kV，2 500 mm²，*S*=35 cm，2 332 A

最大段长	仿真计算	解析计算	误差占比(%)
正三角形	1.19	1.288	8.4
水平	0.93	1.006	8.1
直角等腰三角形	1.06	1.145	8.5

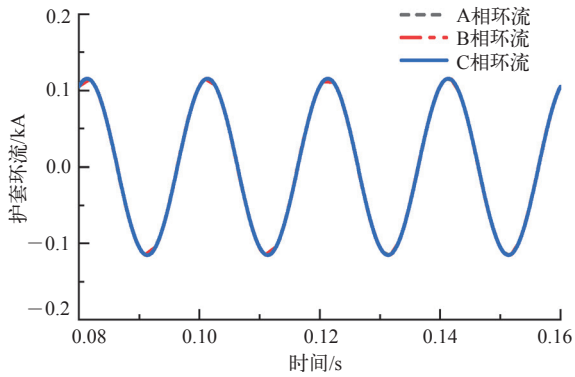
从表中可知，仿真计算与解析公式计算的结果有一定误差。同一系列电缆，线芯尺寸越大，仿真结果与计算结果越接近，主要原因是解析公式为了获得更加实用的公式，进行了多种近似和简化，而仿真软件的模型更复杂，也更准确。

3 不平衡性对护套环流的影响

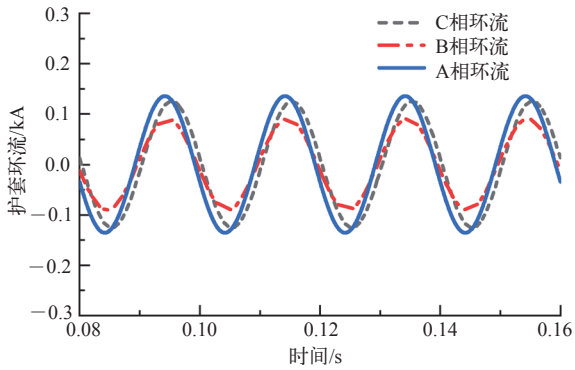
采用三段交叉互联连接时，当三相负载均衡和分段完全相等时，三相护套感应电压完全抵消，不存在护套环流。但是一旦各段出现不平衡段长或三相出现不平衡负载时，不可避免地会产生护套环流[16-17]。单段段长采用大段长2 km，电流采用1 024 A，以三相空间上对称性较好的正三角形排列方式为例，对段长不平衡或负载不平衡下的护套环流情况进行仿真计算，如图6所示。



(a) 第三段段长分别增加5%、10%和20%时的任一相护套环流



(b) A相负载高于其他相20%时的护套环流



(c) A相负载增加20%第三段段长增加10%的护套环流

图6 三相不平衡段长和负载下护套环流

Fig. 6 Sheath current under unbalance segment length and load current

当仅仅是段长不平衡时，三相护套电流分别相差120°，不存在入地电流，随着不平衡度的增加护套电流变大，如图6a所示。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，如图6b所示。当同时存在负载和段长不平衡时，护套环流较大，如图6c所示，同时存在入地电流。当一相负载20%不平衡和段长10%不平衡同时发生时，护套最大环流超过了线芯额定电流10%的限制。

由于篇幅，段长为1 km时不平衡性对护套环流的影响不再给出，但是需要说明的是，随着段长的增加，不平衡性对护套环流的影响加剧。因此，大长段线缆的敷设最大长度的确定，必须还要考虑可能的段长不平衡度和负载不平衡度所造成的护套环流不能超过线芯电流10%的限制。

4 结束语

长距离敷设的高压电缆，单段传输距离的长短主要决定于金属护套感应电压的大小。本文通过软件仿真和公式解析计算两种方法，对三相单芯电缆在不同的排列和接地方式下的金属护套感应电压进行了计算，给出了电缆最大敷设长度数据，并对两种计算方法所得结果进行了对比，二者具有近似性和差异性。段长增加后，对负载不平衡或段长不平衡状态产生的护套环流进行了计算，结果表明段长增加后，不平衡状态下的护套环流显著增大，可能超过线芯电流10%的限制，在增大电缆段长时应该予以考虑。

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．220kV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] 高压电缆选图导则：DL/T 401—2002[S].
[13] 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.
[14] 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.
[15] 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.
[16] 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.
[17] 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：ANSI /IEEE Std575—1988[S].

作者简介

高 飞

高飞（1975－），男，工程师，主要研究方向为高压线缆工程建设与管理。

(收稿日期：2019－06－15)EA

公示

根据国家新闻出版署《新闻记者证管理办法》，我单位《电气应用》编辑部对申领新闻记者证的人员进行严格的资格审核，现将拟申领新闻记者证人员名单进行公示。

申领新闻记者证人员：《电气应用》编辑部宗颖。编辑部举报电话：010-88379714，新闻出版管理部门监督举报电话：010-83138953，公开接受社会监督。

公示期：2020年7月15日至2020年8月15日。