

文章编号: 1674—8247(2019)06—0041—04
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2019.06.008

三相电缆护层的感应电压影响因素分析

缪晓宇¹ 胡 豪² 杨 佳¹ 李瑞芳² 曹晓斌²

(1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031; 2. 西南交通大学, 成都 610031)

摘 要:铁路供电系统采用电缆输电时,线芯电流由于电磁感应会在金属护层产生感应电压,过大的感应电压对于电缆系统的运行会造成威胁。为了研究电缆护层感应电压的影响因素,本文运用 PSCAD 仿真软件对护层感应电压做出了分析。结果表明:(1)同等敷设间距下,水平敷设的护层感应电压 > 直角三角形敷设 > 正三角形敷设,且三相电缆应该减小电缆的敷设间距;(2)电缆交叉互联循环中不均匀分段对护层感应电压影响很小,但对护层环流影响较大;(3)不平衡相电缆的线芯电流对正常相电缆的护层感应电压的影响成线性关系,且两相不平衡的影响大于一相不平衡。

关键词:三相电缆;交叉互联;金属护层;感应电压

中图分类号:U223.6⁺3 **文献标志码:**A

Analysis on Influencing Factors of Induced Voltage of Three-phase Cable Sheath

MIAO Xiaoyu¹ HU Hao² YANG Jia¹ LI Ruifang² CAO Xiaobin²

(1. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China;

2. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: When the railway power supply system uses cable to transmit electricity, the core current will generate induced voltage in the metal sheath due to electromagnetic induction. Excessive induced voltage will pose a threat to the operation of the cable system. In order to study the influencing factors of the induced voltage in the cable sheath, this paper uses PSCAD simulation software to analyze the induced voltage in the sheath. The result show that: (1) under the same laying distance, the induction voltage in the sheath in horizontal laying > right-angled triangle laying > equilateral triangle laying, and the three-phase cable should reduce the laying distance of the cable; (2) the uneven segmentation in the cable cross-interconnection cycle has little effect on the induced voltage in the sheath, but has a greater influence on the circulation of the sheath; (3) the core current of the unbalanced phase cable has a linear relationship with the influence of the induced voltage in the sheath of the normal phase cable, and the influence of the two-phase imbalance is greater than the one-phase imbalance.

Key words: three-phase cable; cross interconnection; metal sheath; induced voltage

传统架空线影响城市美观且占地面积过大,因此
在新建铁路线中大量采用电缆供电方式^[1]。新建的

电缆线路不仅距离增加,电缆的电压等级也逐渐提高。
交联聚乙烯电缆由于质量轻、电气性能优良等优点应

收稿日期:2019-03-10

作者简介:缪晓宇(1986-),男,高级工程师。

引文格式:缪晓宇,胡豪,杨佳,等.三相电缆护层的感应电压影响因素分析[J].高速铁路技术,2019,10(6):41-44.

MIAO Xiaoyu, HU Hao, YANG Jia, et al. Analysis on Influencing Factors of Induced Voltage of Three-phase Cable Sheath [J]. High Speed Railway Technology, 2019, 10(6): 41-44.

用广泛,但是其金属护层由于电磁耦合会产生感应电压。过大的感应电压不仅危害运行维护人员安全,且会造成电缆线路故障,降低电缆的运行寿命。各大城市电网电缆线路的金属护套感应电压过大的情况均有发生^[2-3],因此对电缆护层感应电压影响因素的研究十分必要。

国内外学者对于电缆金属护层感应电压做了相关研究。在特殊工况方面:文献[4]仿真与分析了动车组车顶高压电缆金属护层感应电压;文献[5]研究了高速铁路 27.5 kV 电缆金属护层的雷击感应电压;文献[6]分析了隔离开关不完全合闸引起的电缆护层过电压。在正常工况方面:文献[7]仿真分析 AT 牵引供电对电力电缆护层的感应电压;文献[8]分析了电缆接地方式对护层感应电压的影响;文献[9]研究了高速铁路单芯馈线电缆合适的敷设方式和敷设间距。

尽管很多学者对电缆护层感应电压做了相关研究以及仿真分析,但是对护层感应电压的影响因素并未考虑全面,如电缆的不平衡电流的影响,而且若仅使用仿真模型,仿真的结果受模型选择、参数选取的影响很大。因此建立电缆护层感应电压数值计算模型十分必要。

电缆交叉互联模式^[10]在长距离电缆输电中是一种常用的接地方式,本文针对交叉互联接地的电缆建立了护层感应电压计算模型,并通过仿真研究电缆护层感应电压的影响因素。

1 电缆交叉互联模型及参数

1.1 电缆交叉互联模型

三相电缆交叉互联模型,1个循环内由9段等长的电缆组成,在绝缘接头处将各相的3段电缆的护套相互绝缘,然后将不同相位的各小段护套相互交叉连接。35 kV 以上高压电缆常用的交叉互联接地方式,如图1所示。

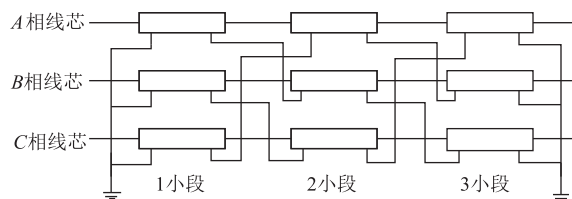


图1 电缆交叉互联接地示意图

利用1个循环内3小段电缆电压相位依次相差 120° ,第1小段感应电压 $U_A \angle 0^\circ$,第2小段感应电压 $U_B \angle 120^\circ$,第3小段感应电压 $U_C \angle -120^\circ$,三段护层互联后,理论上一个完整的循环首尾处护层感应电压合成为0。三相电缆交叉互联循环内护层感应电压的

沿线分布,如图2所示。

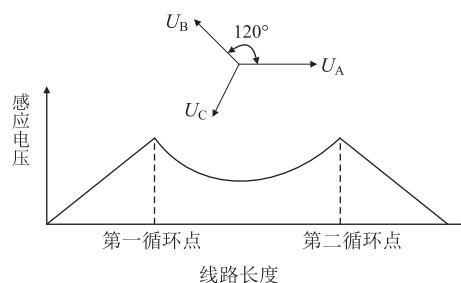


图2 电缆交叉互联护层感应电压

在各段循环连接处,护层感应电压达到最大值。在仿真中,通过测量互连点的感应电压,便可以分析模型参数对护层感应电流的影响。

1.2 仿真参数设定

本文采用 PSCAD 仿真软件分析护层感应电压的影响因素。PSCAD 中的电缆模型有贝杰龙模型 (Bergeron model) 和频率相关模型 (Frequency dependent model) 2 种。选取适合于电缆护层换位的频率相关模型。

仿真中,根据实际 110 kV 电缆,仿真电缆参数设置以 YJLW02-Z 型交联聚乙烯绝缘电缆为准,仿真电源电压设置为 110 kV;电缆基本分段长度设置为 500 m;护层接地电阻根据文献[11]规定,电缆变电所侧接地电阻不大于 0.5Ω ,故本文仿真实接地电阻设置为 0.5Ω 。仿真中通过调节负载电阻大小改变线芯电流的数值。

2 护层感应电压影响因素分析

根据 GB 50217 - 2018《电力工程电缆设计规范》^[12]中的规定,金属护层上任意非直接接地点上的感应电压,未采取防护措施时不能大于 50 V,有相应的防护措施时不能大于 300 V。

随着电缆电压等级的提高,护层上的感应电压很容易超过限制值。电缆护层感应电压的影响因素除了运行电压等级外,电缆的敷设间距,分段长度以及三相不平衡电流也是重要影响因素。

电缆常用的敷设方式中,水平排列、直角三角形排列和正三角形排列各有优势。相比于品字形敷设,水平排列的施工量小,但是占用电缆空间较大,在实际中由于现场沟槽空间的限制,某些狭窄空间无法完成敷设。直角三角形敷设方式使用较少,一般作为辅助敷设方式。

2.1 敷设间距

按图1的模式搭建电缆交叉互联仿真模型,仿真参数如下:64/110 kV 交联聚乙烯,电缆埋深 1 m,每

小段长度 500 m,线芯电流 400 A,频率 50 Hz。通过改变敷设间距,得到 3 种敷设方式下的护层感应电压,如图 3 所示。

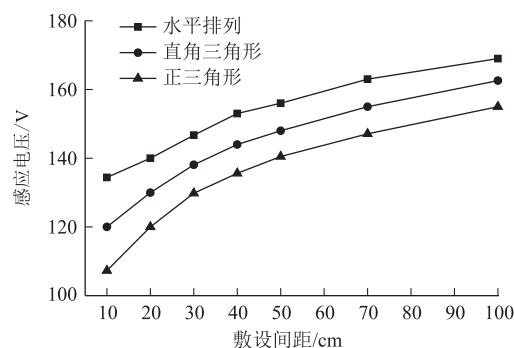


图3 不同敷设间距下的感应电压

由图 3 可知,仿真结果和第一节中的数学推导结果一致,相同电缆间距时,水平排列敷设的护层感应电压 > 直角三角形 > 正三角形。随着敷设间距的增大,护层感应电压逐渐增大,因此为减小护层感应电压,应减小三相电缆的敷设间距,以 10 ~ 30 cm 的敷设间距为主。

以 30 cm 的敷设间距为例,水平排列、直角三角形、正三角形三种方式下的金属护层感应电压分别为 146.7 V, 138.1 V, 129.8 V。水平排列相比于正三角形敷设,护层感应电压增大了 13%; 水平排列相比于直角三角形敷设,护层感应电压增大了 6.2%。随着电压等级增高,水平敷设的护层感应电压将会增加更多,所以在电压等级较高时,在敷设场地允许的条件下,应采用正三角形敷设方式为主,直角三角形敷设方式为辅;而在护层感应电压能达到要求值时,采用水平排列敷设能大大减小工程施工量以及施工难度。

2.2 分段长度

2.2.1 分段不均对护层感应电压的影响

电缆工程设计以及敷设时,其分段长度往往受到敷设沟槽环境以及互联接地箱位置的限制,在一个互联循环中往往不一致。交叉互联分段长度理论上需要 3 个小段等长,使得 3 个小段的感应电压幅值一样,利用相位依次差 120° 来抵消护层感应电压。

仿真以 500 m 长度的分段长度为基准,线芯电流设为 400 A,分别改变 3 个小段中的每一段,得到不同段长下的护层感应电压,如图 4、图 5 所示。其中图 4 是护层感应电压较大的水平敷设方式,图 5 是护层感应电压较小的品字形敷设方式。

由图 4 可知,分段不均匀对护层感应电压的影响较小,即使某段达到 700 m 长度时,相对于分段均匀的 500 m 长度,其电压改变为 1% 左右,所以分段不均匀

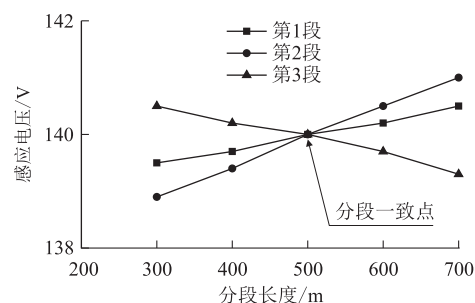


图4 水平排列时不同段长对护层感应电压的影响

对于护层感应电压的影响不大。

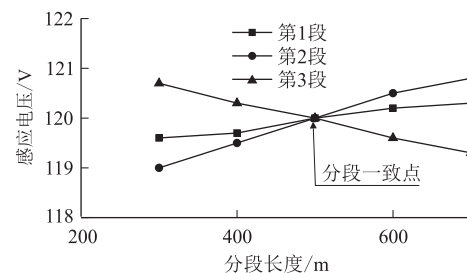


图5 品字形排列不同段长对护层感应电压的影响

由图 5 可知,某段长度达到 700 m 时,正三角形敷设的感应电压最大变化约为 0.6%。结合图 4 和图 5 可知,分段长度不一致对于金属护层感应电压的影响较小。

2.2.2 分段不均对护层环流的影响

以水平排列间距 20 cm, 400 A 的负荷电流为基准,每段长度 500 m 为平衡点,在 3 段均等长的情况下,护层环流为 4 A。分别改变每一段的长度,测试护层环流变化情况,如图 6 所示。

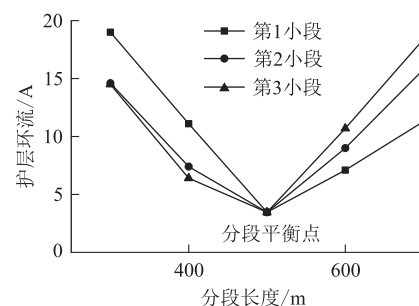


图6 分段不均对护层环流的影响

由图 6 可知,当电缆交叉互联分段不均匀时,各段长度不一致对护层环流的影响十分严重。

综合图 4 ~ 图 6 可知,分段长度不一致对于金属护层感应电压的影响较小,但是对于护层环流的影响较大。因此在电缆敷设时,应尽量保持交叉互联分段长度一致。如果敷设条件限制,即使分段长度不一致,其分段偏差应保持在 50 m 以内。

2.3 线芯电流的影响

线芯电流直接影响护层感应电压,而线芯电流大小和负荷的大小直接相关,电缆系统的负荷往往是波动的,所以分析线芯电流对护层感应电压的影响是有必要的。

2.3.1 平衡负载

设定三相电缆之间的间距为 20 cm,通过调节负荷大小,改变线芯电流,得到不同敷设方式下的护层感应电压随线芯电流的变化曲线,如图 7 所示。

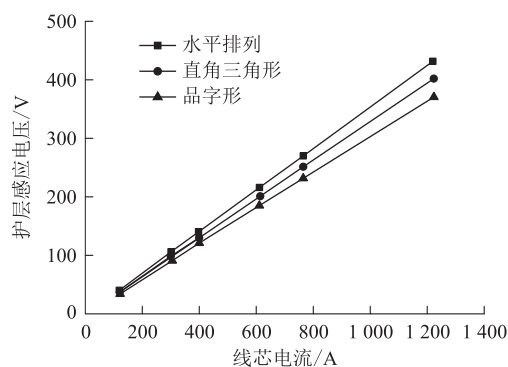


图7 护层感应电压与线芯电流的关系

由图 7 可知,护层感应电压与线芯电流成正比,而且随着线芯电流的增大,3 种敷设方式的护层感应电压差值变大;相同线芯电流的情况下,水平排列的护层感应电压 > 直角三角形敷设 > 品字形敷设。

2.3.2 不平衡负载

电缆运行中,理论上三相负载应该平衡,但是实际运行中存在波动或者故障情况下,三相线芯电流往往不平衡。保持 A 相电缆线芯电流不变,通过改变 B 相电缆线芯电流和同时改变 BC 相电缆线芯电流,得到护层感应电压与一相、两相不平衡电流的关系,如图 8 所示。

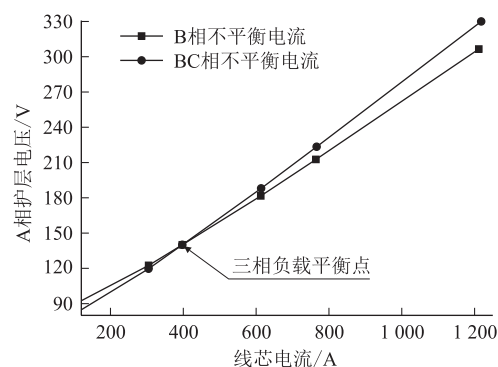


图8 不平衡线芯电流对护层感应电压的影响

由图 8 可知,三相电流平衡情况下,护层感应电压为 140 V。对 A 相护层感应电压的影响,两相不平衡线芯电流比单相不平衡线芯电流影响大。当不平衡电

流达到 1 200 A 时, A 相护层的感应电压分别为 306.5 V (B 相不平衡) 和 330 V (BC 相不平衡), 其感应电压比平衡情况下分别增加了 119%、136%, 两相不平衡比一相不平衡对护层感应电压的影响增加了 7%, 所以电缆在运行中应尽量保持三相负载平衡。

3 结论

通过电缆交叉互联仿真模型以及对护层感应电压影响因素的分析,主要得到以下结论:

(1) 相同敷设间距下,水平敷设的护层感应电压 > 直角三角形敷设 > 正三角形。三相电缆敷设应该减小电缆之间的敷设间距,可选取 10 ~ 30 cm 的敷设间距,且以正三角形方式敷设可减小护层感应电压。

(2) 电缆交叉互联分段不均匀对护层感应电压影响较小,但是对护层感应电流影响较大。一个交叉互联循环中,三小段长度相差应保持在 50 m 以内。

(3) 平衡负载下,电缆护层感应电压波动较小,负载不平衡对护层感应电压影响较大。两相不平衡负载比单相不平衡负载对护层感应电压的影响大,电缆在运行中应尽量保持三相负载平衡。

参考文献:

- [1] 周婷,谢绍峰. 电气化铁路新型电缆供电方案[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(7): 189-195.
ZHOU Ting, XIE Shaofeng. New-type Cable Traction Power Supply Scheme of Electric Railroad [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(7): 189-195.
- [2] 唐进,张姝,林圣,等. 计及金属护层结构的电缆单端故障测距方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(6): 1748-1756.
TANG Jin, ZHANG Shu, LIN Sheng, et al. Single-terminal Fault Locating Method of Cables Considering the Metal Sheath Structure [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(6): 1748-1756.
- [3] 崔贺平,王安平,芦玉铎,等. 一起 220 kV 电缆护层事故的分析和研究[J]. 华北电力技术, 2015, 45(11): 18-23.
CUI Heping, WANG Anping, LU Yuduo, et al. Analysis and Research on a Fault of 220 kV Cable Sheath [J]. North China Electric Power, 2015, 45(11): 18-23.
- [4] 宋勇葆,曹保江,郑玥,等. 动车组车顶高压电缆金属护层感应电压仿真与分析[J]. 高压电器, 2018, 54(12): 137-142.
SONG Yongbao, CAO Baojiang, ZHENG Yue, et al. Simulation and Analysis on Induction Voltage of Metal Sheath for High Voltage Cable of EMU Roof [J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(12): 137-142.
- [5] 周利军,高强,黄军玲,等. 高速铁路 27.5kV 电缆金属护层的雷击感应电压[J]. 中国铁道科学, 2015, 36(4): 87-92.
ZHOU Lijun, GAO Qiang, HUANG Junling, et al. Lightning Induced Voltage in the Metal Sheath of 27.5kV Cable for High Speed Railway [J]. China Railway Science, 2015, 36(4): 87-92.

(下转第 86 页)

- Application of Improvement Technology of Shallow Ultra-soft Soil Formed by Hydraulic Reclamation in Tianjin Binhai New Area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(5): 1073 – 1080.
- [6] 张在保. 软土地基处理沉降计算中相关参数的试验研究[J]. 路基工程, 2011, 29(2): 96 – 98.
- ZHANG Zaibao. Experimental Study on Related Parameters in Settlement Calculation of Soft Soil Foundation [J]. Subgrade Engineering, 2011, 29(2): 96 – 98.
- [7] 肖长生, 王守林, 金亮星. 经验分析方法在软基沉降预测中的应用[J]. 铁道科学与工程学报, 2012, 9(3): 72 – 76.
- XIAO Changsheng, WANG Shoulin, JIN Liangxing. Application of Experience Analysis Method in the Prediction of Soft Ground Settlement[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2012, 9(3): 72 – 76.
- [8] 金亮星, 王守林, 陈明. 排水板堆载预压加固软基的固结沉降数值模拟[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(S2): 1930 – 1934.
- JIN Liangxing, WANG Shoulin, CHEN Ming. Numerical Simulation of Consolidation Settlement of Reinforced Soft Foundation by Preloading Method with Plastic Drainage Plate[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(S2): 1930 – 1934.
- [9] 中铁第四勘察设计院集团有限公司. 福州江阴港铁路支线项目可行性研究报告[R]. 福州: 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 2008.
- China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd. The Feasibility Study Report on Jiangyin Port Railway Spur Line Project in Fuzhou[R]. Fuzhou: China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., 2008.
- (编辑: 苏玲梅 张红英)

(上接第44页)

- [6] 张春霞, 张伟忠, 屠幼萍, 等. 隔离开关不完全合闸引起的电缆护层过电压分析[J]. 高电压技术, 2011, 37(10): 2498 – 2505.
- ZHANG Chunxia, ZHANG Weizhong, TU Youping, et al. Analysis of Cable Sheath Overvoltage Due to Not Completely Closing of GIS Disconnecter [J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(10): 2498 – 2505.
- [7] 彭涛, 陈剑云. AT牵引供电对电力电缆感应电压仿真分析[J]. 华东交通大学学报, 2017, 34(5): 113 – 114.
- PENG Tao, CHEN Jianyun. Simulation of AT Traction Power Supply System for Power Cable Induced Voltage[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2017, 34(5): 113 – 114.
- [8] 易志兴, 曹晓斌, 吴广宁. 高速铁路电缆接地方式对护层感应电压的影响[J]. 铁道科学与工程学报, 2014, 11(6): 109 – 115.
- YI Zhixing, CAO Xiaobin, WU Guangning. Influence of High-speed Railway Cable Grounding Mode on the Induced Voltage of the Cable Sheath[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2014, 11(6): 109 – 115.
- [9] 曹晓斌, 易志兴, 陈奎. 高速铁路单芯馈线电缆的敷设方式和敷设间距[J]. 中国铁道科学, 2015, 36(6): 85 – 90.
- CAO Xiaobin, YI Zhixing, CHEN Kui. Laying Mode and Laying Spacing for Single-Core Feeder Cable of High Speed Railway[J]. China Railway Science, 2015, 36(6): 85 – 90.
- [10] 田金虎, 刘渝根, 赵俊光, 等. 多回同相多根并联高压电力电缆电流分布及金属护套环流计算[J]. 高电压技术, 2014, 40(1): 153 – 159.
- TIAN Jinhu, LIU Yugen, ZHAO Junguang, et al. Circulating Current in Sheaths and Current Distribution on Same-phase Parallel Multi-cable of Multi-circuit Power Cable Lines[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(1): 153 – 159.
- [11] 冯慈璋, 马西奎. 工程电磁场导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- FENG Cizhang, MA Xikui. Engineering Electromagnetics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [12] GB 50217 – 2018 电力工程电缆设计规范[S].
- GB 50217 – 2018 Power Engineering Cable Design Specification[S].
- (编辑: 车晓娟 白雪)