

330 kV 同塔双回输电线路下平行运行的 380 V 线路感应电压电流仿真计算

郑云龙¹, 罗日成¹, 邹明², 李智琦¹, 侯佳³

(1. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南长沙 410114; 2. 国网湖南省电力公司检修公司, 湖南长沙 410018;
3. 湖南省送变电工程有限公司, 湖南长沙 410015)

摘要:在西北经济走廊地区,为了最大程度的节省占地面积,提高经济效益,高压输电线路下存在低穿且并列运行的低压配电线路。当低压线路进行停电检修时,由于同塔多回高压输电线路的静电与电磁耦合产生的感应电压,感应电流会危害到检修人员的安全。因此,以西北地区罗山—灵州 330 kV 输电线路正常运行时的情况为例,利用电磁仿真软件 ATP-EMTP 搭建模型,从线路长度、电流大小、呼称高度以及偏离杆塔中心的距离 4 个方面分析对比其平行运行的 380 V 线路上的感应电压、感应电流的变化情况,计算不同作业方式下流过人体电流的数值。研究结果表明:静电感应电压主要与偏离杆塔中心距离和呼称高度有关,静电感应电流主要受低穿并列运行线路长度和呼称高度影响;电磁感应电压电流与低穿并列运行线路的长度、运行电流的大小、杆塔偏离中心距离这 3 个因素都有关;在检修作业时,综合考虑各项人体生理效应推荐值,建议选取方式 2 进行安全作业。

关键词:同塔双回;电力线路;感应电压;感应电流;安全作业

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.01.025 中图分类号:TM751 文章编号:1673-9140(2021)01-0216-06

Induced voltage and current simulation of 380 V line parallel operating under 330 kV double-circuit transmission lines

ZHENG Yunlong¹, LUO Richeng¹, ZOU Ming², LI Zhiqi¹, HOU Jia³

(1. School of Electric and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China;
2. Maintenance Company of State Grid Hunan Electric Power Company, Changsha 410018, China;
3. Hunan Electric Power Transmission and Transformation Engineering Co., Ltd., Changsha 410015, China)

Abstract: In the Northwest Economic Corridor region, the distribution lines with the low voltage ride through is built and parallel operates under high voltage lines in order to save the land occupation and improve the economic benefit. However, during the outage maintenance process of the low voltage line, the induction voltage and current generated by electrostatic effect and electromagnetic coupling of the multi-circuit high-voltage transmission lines may threaten the safety of maintenance personnel. On this background, the normal operation of Luoshan-Lingzhou 330kV trans-

收稿日期:2018-11-28;修回日期:2019-01-25

基金项目:国家自然科学基金(50977003);湖南省教育厅科学研究项目(15C0031)

通信作者:罗日成(1969-),男,博士,副教授,主要从事电力系统过电压、电力设备绝缘在线监测与故障诊断、电力设备状态评价与风险评估等研究;E-mail:luorich@126.com

mission line in Northwest China is taken as an example and an ATP-EMTP simulation model is built in this paper. Then the variation of induction voltage and current on 380V line is compared and analyzed in the aspects of transmission line length, current magnitude, nominal height and the distance from the tower center. The magnitude of the current through human body is also calculated in different maintenance modes. The results show that the electrostatic induction voltage is mainly related to the nominal height of high voltage tower and the distance from the tower center. The electrostatic induction current is mainly affected by the nominal height of high voltage tower and the length of low voltage line. The electromagnetic induction voltage and current are influenced by the length of low voltage line, the magnitude of the operating current and the distance from the tower center. Comprehensively considered various recommended values of human physiological effects, the maintenance method of adding security grounding line is suggested to ensure the safety operation.

Key words: double-circuit transmission line on same tower; power transmission line; induction voltage; induction current; safety operation

中国疆域辽阔,化石能源分布不均衡,随着经济建设的发展,通过长距离架设输电线路来改善能源矛盾的问题愈发迫切。为了节约土地资源,减少输电线路廊道面积,合理有效地控制电网输变电工程的单位造价,架设同杆同塔多回线路是改善输电线路走廊紧缺问题、提高单位输电容量和降低电力建设成本的主要有效手段之一^[1]。在中国西北走廊用地极度紧缺的地区,同塔多回线路穿越的区域有与其平行运行的低压线路的情况也实际存在^[2]。由于多回线路之间的静电耦合与电磁感应,同塔多回线路之间自然就会产生感应电压和感应电流^[3-4]。文献[5-6]针对不同线路长度、输送潮流和相序排列方式下的感应电压和电流进行了研究分析;文献[7-8]分析了同塔双回线路在一回停电一回检修的情况下,检修电路和地线的感应电压和电流的状况分析;文献[9-11]考虑了不同电压等级在同杆多回线路上的停运检修的感应电压电流情况;文献[12]则考虑了在同塔多回输电线路的情况下,保证作业人员进行安全作业。

该文针对西北地区罗山—灵州 330 kV 输电线路正常运行时的实际情况,对其平行运行的 380 V 低压线路停运检修时,对检修人员可能面临的感应电压和感应电流的放电危害进行分析是十分必要的^[13-16]。假设同塔双回线路运行条件稳定且未遭受人为的操作过电压影响的情况下,利用 ATP-EMTP 软件对低压线路的感应电压电流进行计算;同时再考虑检修作业的情况:停电检修时,计算对比 2 种不同作业方式下,对人体的危害程度,为线路的

检修作业提供一定的指导建议^[17-18]。

1 模型建立

1.1 理论分析

在同塔多回架空输电线路中,当进行停电检修时,根据检修回路的刀闸状态可分为 3 种情况:①线路停电检修,两端刀闸不接地;②线路停电检修,刀闸一端接地另外一端不接地;③线路停电检修,两端刀闸同时接地^[19]。相关计算参数如图 1 所示。其中 A、B、C 代表正常运行的三相线路,a、b、c 代表停电检修的三相线路。 C_{Aa} 、 C_{Ba} 、 C_{Ca} 表示运行线路对检修线路 a 相单位长度的相间电容, M_{Aa} 、 M_{Ba} 、 M_{Ca} 为运行线路的每一相对检修线路 a 的单位长度的互感。 L 为检修线路 a 相单位长度对地的电感, C_0 为检修线路 a 相对地单位长度的电容, l 为线路长度, \dot{U}_A 、 \dot{U}_B 、 \dot{U}_C 、 \dot{U}_a 、 \dot{U}_b 、 \dot{U}_c 、 \dot{I}_A 、 \dot{I}_B 、 \dot{I}_C 、 \dot{I}_a 、 \dot{I}_b 、 \dot{I}_c 分别为线路各相的电压与电流的值。

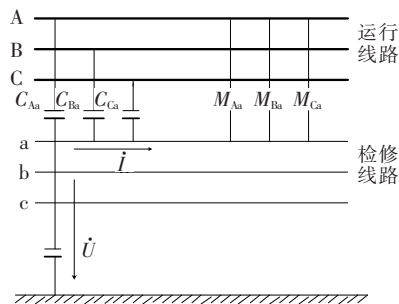


图 1 感应电压电流原理

Figure 1 Induced voltage and current schematic diagram

1)一回线路正常运行,另一回线路停电检修且刀闸两端不接地时,其等效图如图2所示。

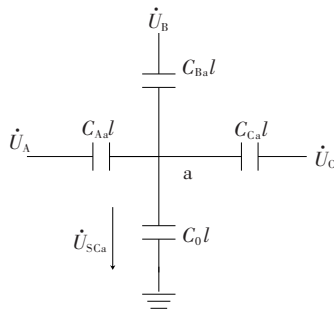


图2 容性感应电压计算等值电路

Figure 2 Equivalent calculation circuit of capacitive inductive voltage

由于没有电流回路,所以等效电流为零;a相容性感应电压为

$$\dot{U}_{SCa} = \frac{C_{Aa}\dot{U}_A + C_{Ba}\dot{U}_B + C_{Ca}\dot{U}_C}{C_{Aa} + C_{Ba} + C_{Ca} + C_0} \quad (1)$$

电磁耦合感性感应电压为

$$\dot{U}_{SLa} = (j\omega M_{Aa}\dot{I}_A + j\omega M_{Ba}\dot{I}_B + j\omega M_{Ca}\dot{I}_C) \cdot l \quad (2)$$

2)一回线路正常运行,另一回线路停电检修且刀闸一端接地时,其等效图如图3所示。

不接地侧等效电流为零,等效电压则与式(2)相同;接地侧等效电压为零,容性感应电流^[13-15]:

$$\dot{I}_{SCa} = j\omega l (C_{Aa}\dot{U}_A + C_{Ba}\dot{U}_B + C_{Ca}\dot{U}_C) \quad (3)$$

3)一回线路正常运行,另一回线路停电检修且两端刀闸接地时,其等效图如图4所示。

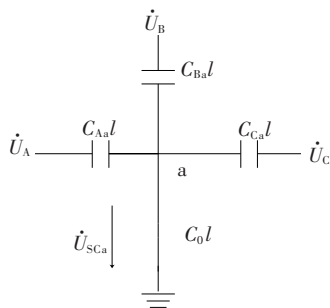


图3 容性感应电流等值电路

Figure 3 Equivalent circuit of capacitive induced current

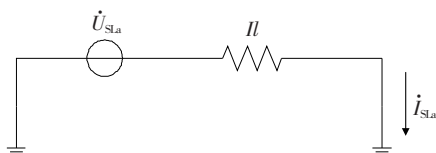


图4 感性感应电流等值电路

Figure 4 Equivalent circuit of inductive induced current

由于两端接地,等效电压为零;其容性感应电流与式(3)相同,感性感应电流:

$$\dot{I}_{SLa} = \frac{(j\omega M_{Aa}\dot{I}_A + j\omega M_{Ba}\dot{I}_B + j\omega M_{Ca}\dot{I}_C)}{j\omega L} \quad (4)$$

1.2 线路参数

结合罗山—灵州 330 kV 同塔双回输电线路的线路实际,线路模型中土壤电阻率取 $200 \Omega \cdot m$,导线弧垂为 8.24 m,避雷线以及地线弧垂为 6.15 m,绝缘子串长为 8 m;380 V 线路采用铝导线,导线截面为 70 mm^2 ,导线对地高度为 7 m。330 kV 线路的导线详细参数如表 1 所示。

表1 导线参数

Table 1 Conductor parameters

导线型号	外径/ cm	直流电阻/ (Ω/km)	分裂间 距/mm	分裂导线 根数
6 XJL/G1A/40	2.394	0.096 140	375	4
OPGW-17-150-3	1.660	0.330 000	0	0
JLB 40	1.575	0.295 000	0	0

1.3 线路杆塔参数

为了计算电磁场感应电压电流,需要搭建杆塔导线模型。结合实际线路,罗山—灵州 330 kV 的线路采用的是同塔双回线路,采用 4 分裂导线且外接 2 根避雷线;低压平行运行的 380 V 的线路采用的是三相单回线路。2 种电压等级的杆塔均采用直线型杆塔,各条线路的位置分布如图 5 所示,各编号大小如表 2 所示。其中, A_1 、 B_1 、 C_1 为同塔 I 回线路, A_2 、 B_2 、 C_2 为同塔 II 回线路。 d 为 330 kV 线路输电导线到杆塔中线的距离, L 为 380 V 低压线路 A 相到杆塔中线的距离, s 为各段位置的高度。

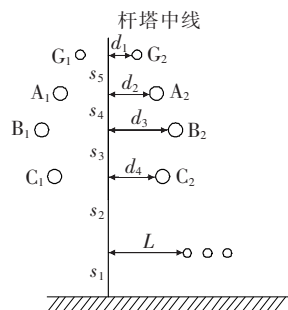


图5 线路位置分布

Figure 5 Line location distribution diagram

表 2 各符号数值

Table 2 Values of line distribution parameters		m	
编号	长度	编号	高度
d_1	5.3	s_1	8.2
d_2	9.0	s_2	15.8
d_3	10.8	s_3	6.2
d_4	9.4	s_4	9.3
L	11.6	s_5	4.3

1.4 模型

借助电磁暂态仿真软件 ATP-EMTP,将相关控制变量如输电线路架空导线的参数、铁塔杆塔、土壤电阻率以及线路相序等进行等效转换,调用架空线路 LCC 模块,构建了 π 型输电线路计算模型^[19]。模型如图 6 所示。

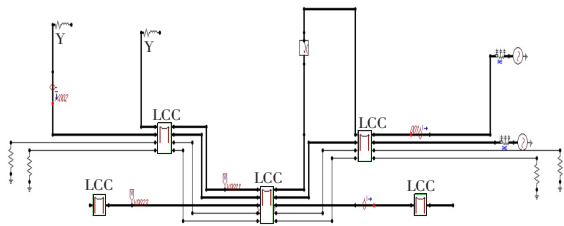


图 6 计算模型

Figure 6 Calculating model

2 感应电压电流仿真计算

该文针对西北走廊地区罗山—灵州实际线路运行中,考虑 330 kV 高压线路在不同工况下运行,包括平行线路长度、运行电流大小、呼称高度以及偏离杆塔中心线距离等条件,分析低穿且并列运行的 380 V 低压线路上的感应电压、电流的特性。

2.1 平行线路长度的影响

保持 330 kV 同塔双回输电线路运行电流为 2 000 A,偏离杆塔的中心线距离为 10 m 的情况下,分别取线路长度为 2、4、6、8、10 km,计算低压线路上的感应电压和感应电流。如图 7 所示,静电感应电压不因低穿平行线路长度的变化而改变,静电感应电流与低穿平行线路长度的增加呈现上升趋势,但电流值小于 2 A。而电磁感应电压与电流随着线路长度的改变有明显的变化,且都与线路长度成正相关。

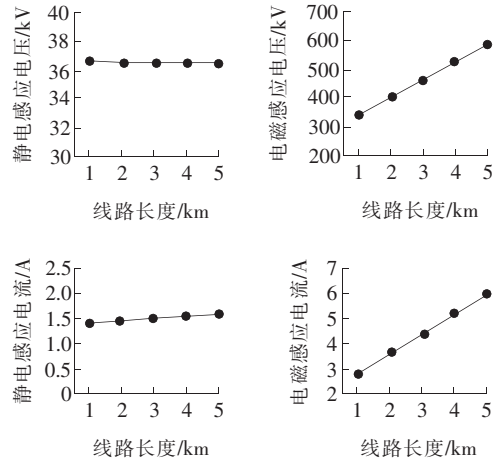


图 7 线路长度的影响

Figure 7 Effect of line length

2.2 运行电流大小的影响

330 kV 同塔双回输电线路在正常运行情况下,保持平行线路长度为 1 km,偏离杆塔中心距离为 10 m,分别计算运行电流为 500、1 000、1 500、2 000、2 500 A 时,低压平行线路上的感应电压电流。如图 8 所示,输电导线运行电流大小与静电感应电压电流无必然关联,且静电感应电压基本稳定在 36 kV。而电磁感应电压与电磁感应电流受线路运行电流变化的影响较大,并且随着运行电流的增大而增大。

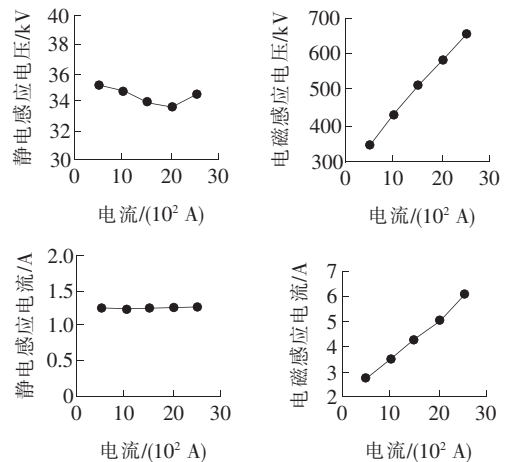


图 8 运行电流的影响

Figure 8 Effect of operating current

2.3 低压线路感应电压随其偏离杆塔中心线距离的影响

330 kV 同塔双回输电线路正常运行的情况下,保持运行电流为 2 000 A,平行运行长度为 1 km,分别取偏离杆塔距离为 5、10、20、30、40、50 m 时,计算低压线路上的感应电压和感应电流。计算结果如

图 9 所示,静电感应电压随着偏离杆塔的距离增大而减小,而静电感应电流几乎不受偏离杆塔距离的影响,且基本保持在 1.2 A 左右,影响可以忽略不计。电磁感应电压和电磁感应电流则随着偏离杆塔距离的增大而逐渐减小。

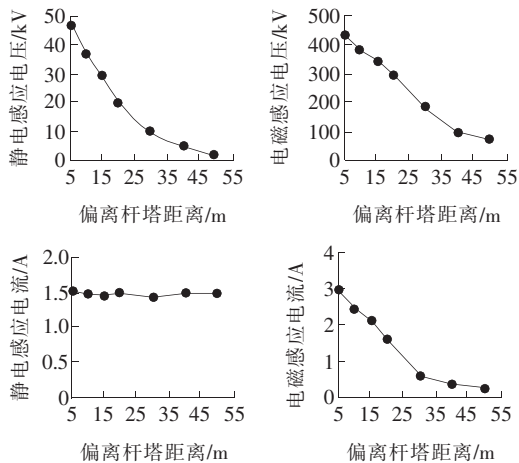


图 9 偏移距离的影响

Figure 9 Influence of the distance from tower center

2.4 呼称高对感应电压,感应电流的影响

330 kV 同塔双回输电线路正常运行情况下,保持运行电流为 2 000 A,平行运行长度为 1 km,呼称高由 46 m 减小到 40 m 时,计算低压线路上感应电压和感应电流。计算结果如图 10 所示,随着呼称高的减小,静电感应电压在增大,且当呼称高由 46 m 减小到 40 m 时,静电感应电压增大了 10%左右,呼称高对静电感应电压影响较大。而对于静电感应电流,电磁感应电压以及电磁感应电流,则随着呼称高的变化几乎不受影响。

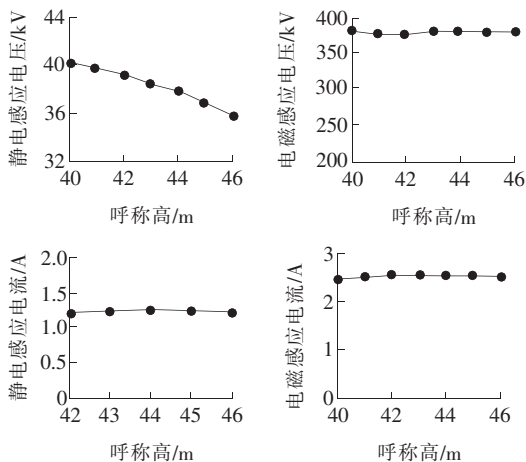


图 10 呼称高的影响

Figure 10 Influence of nominal height

3 带电作业人员人体电流分析

对于同塔多回输电线路进行停电检修时,为了保证作业人员的安全,通常需要将检修的线路停运,同时线路的两端采取接地开关接地的方式,而且还需要在作业位置悬挂临时接地线^[19-21](方式 1);对于安全要求比较高的情况下,采取作业两端悬挂临时接地线,当无法保障相关人员作业安全时,可使作业人员与悬挂着的安保线形成并联结构,在作业检修位置通过并联分流降低流过人体的作业电流,保障作业人员的生命安全^[22-24](方式 2),计算中假设人体的电阻分布均匀且大小为 1 000 Ω。

当高压 330 kV 输电线路正常运行,低压 380 V 配电线路停电检修时,各种情况下流过人体的电流值见图 11。

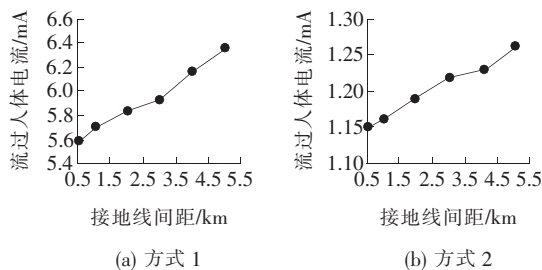


图 11 流过人体电流值

Figure 11 Current value through human body

通过计算分析,对比图 11 和表 3 的数值可知,方式 1 流过人体的电流最小值为 5.62 mA,超过了部分人体生理效应推荐值,不能完全保证带电安全作业;方式 2 流过人体的电流最大值为 1.25 μA,远远小于人体生理效应的推荐值,可以有效地保障作业人员的安全。

表 3 人体生理效应推荐表

人体生理效应值	15~100 Hz 交流电流 / mA
感知电流阈值	0.5
摆脱电流阈值	10
持续时间 3 s	40
心室纤颤电流值	持续时间 2 s 50
持续时间 0.1 s	400~500

4 结语

1) 输电线路中运行电流大小恒定时, 静电感应电压不受线路长度影响, 静电感应电流随着线路长度的增加而略微增大且电流最大值小于 2 A。而电磁感应电压与电流和线路长度成正相关关系。

2) 当输电线路的平行总长度保持不变时, 运行电流大小变化对静电感应电压和静电感应电流几乎没有影响。而电磁感应电压与电磁感应电流随着运行电流的增大而增大。

3) 当输电线路平行总长度和运行电流的大小保持不变时, 静电感应电压随着偏离杆塔的距离增大而减小, 静电感应电流与偏离杆塔的距离无关。而电磁感应电压和电磁感应电流则随着偏离杆塔距离的增大而逐渐减小。

4) 随着呼称高的减小, 静电感应电压在增大, 且当呼称高由 46 m 减小到 40 m 时, 静电感应电压增大了 10% 左右, 呼称高对静电感应电压影响较大。而对于静电感应电流、电磁感应电压以及电磁感应电流, 则随着呼称高的变化几乎不受影响。

5) 在检修工程中, 作业方式 2 的安全性远远高于方式 1, 建议采取方式 2 作为多回线路停电检修时常用的操作方式。

参考文献:

- [1] 马爱清, 徐东捷. 500 kV 同塔双回输电线路下平行运行 0.38 kV 线路时的感应电压和感应电荷[J]. 高电压技术, 2015, 41(1): 306-312.
MA Aiqing, XU Dongjie. Induced voltage and induced charge of 0.38 kV lines operated parallel under 500 kV AC double-circuit transmission lines on same tower[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(1): 306-312.
- [2] 伍弘, 张利花, 何宁辉, 等. 架空线路交差穿越对超高压线下感应电压的影响研究[J]. 智慧电力, 2019, 47(7): 104-110.
WU Hong, ZHANG Lihua, HE Ninghui. Influence of overhead line crossing on induced voltage under UHV transmission line[J]. Smart Power, 2019, 47(7): 104-110.
- [3] 郭天伟, 罗日成, 杨雅倩. 750 kV/330 kV 混压同塔四回输电线路电磁环境研究[J]. 高压电器, 2019, 55(1): 157-164.
GUO Tianwei, LUO Richeng, YANG Yaqian. Research

on electromagnetic environment of the 750 kV/330 kV mixed voltage quadruple-circuit transmission line on the same tower[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(1): 157-164.

- [4] 方书博, 冯智慧, 张广洲, 等. 特高压交直流并行输电线路混合电场分布[J]. 中国电力, 2020, 53(3): 84-90.
FANG Shubo, FENG Zhihui, ZHANG Guangzhou, et al. Mixed electric field distribution of UHV AC/DC parallel transmission lines[J]. Electric Power, 2020, 53(3): 84-90.
- [5] 刘凯, 吴姜. 500 kV 同塔双回线路感应电流及感应电压规律研究[J]. 电力勘测设计, 2017(2): 56-61.
LIU Kai, WU Jiang. Research on induced current and induced voltage of 500 kV double circuit line on the same tower[J]. Electric Power Survey & Design, 2017(2): 56-61.
- [6] 李振强, 刘传铨, 戴敏. 交流 1 000 kV 与 500 kV/220 kV 同塔 4 回线路的感应电压和电流[J]. 高电压技术, 2013, 39(12): 3022-3028.
LI Zhenqiang, LIU Chuanquan, DAI Min. Induced voltage and induced current on AC same-tower four-circuit lines comprised of double-circuit 1 000 kV lines and double-circuit 500 kV or 220 kV lines[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(12): 3022-3028.
- [7] 司马文霞, 周原, 李涛, 等. 特高压直流与双回超高压交流同塔架设输电线路导线布置方式及换位方式分析(英文)[J]. 高电压技术, 2012, 38(12): 3133-3139.
SI MA Wenxia, ZHOU Yuan, YUAN Tao, et al. Analysis of wire arrangement and replacement of UHVDC and double-circuit UHV AC transmission lines on the same tower[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(12): 3133-3139.
- [8] 朱军, 吴广宁, 曹晓斌, 等. 非全线并行架设的交、直流共用输电走廊线路间电磁耦合计算分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(6): 1724-1731.
ZHU Jun, WU Guangning, CAO Xiaobin, et al. Electromagnetic coupling calculation and analysis of lines non-parallelly erected entirely in one common AC/DC transmission corridor[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(6): 1724-1731.
- [9] 史志强, 邹德华, 罗日成, 等. 750 kV 同塔双回输电线路感应电压和电流的研究[J]. 高压电器, 2018, 54(8): 120-126+132.
SHI Zhiqiang, ZOU Dehua, LUO Richeng, et al. Research on induced voltage and current of 750 kV double circuit transmission line on the same tower[J]. High

- Voltage Apparatus, 2018, 54(8):120-126+132.
- [10] 胡毅, 聂定珍, 王力农. 500 kV 紧凑型双回线路的安全作业方式研究[J]. 高电压技术, 2001, 27(6):1-3.
HU Yi, NIE Dingzhen, WANG Linong. Calculation of the induced voltage and safety working condition on 500 kv compact double circuit transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(6):1-3.
- [11] 胡毅, 聂定珍, 刘凯. 500 kV 同塔双回线路感应电压的计算及安全作业方式[J]. 中国电力, 2000, (6):45-47+77.
HU Yi, NIE Dingzhen, LIU Kai. Calculation of induced voltage and safety working condition on 500 kV double circuit transmission lines [J]. Electric Power, 2000, (6):45-47+77.
- [12] 罗日成. 500/220 kV 同塔四回输电线路带电作业电场仿真分析[J]. 高压电器, 2015, 51(8):164-170.
LUO Richeng. Simulation analysis on electric field intensity of 500/220 kV four-circuit-on-one-tower transmission line for live working[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(8):164-170.
- [13] 欧小波, 彭发东, 庞小峰, 等. 同塔双回输电线路中感应电压和感应电流的仿真及试验研究[J]. 广东电力, 2013, 26(1):53-58.
OU Xiaobo, PENG Fadong, PANG Xiaofeng, et al. Simulation and test research on induced voltage and current of double-circuit transmission line[J]. Guangdong Electric Power, 2013, 26(1):53-58.
- [14] 师宝安, 李倩. 500 kV 同塔四回输电线路的感应电压和感应电流[J]. 电力建设, 2012, 33(9):31-34.
SHI Baoan, LI Qian. Induced voltage and current of transmission line of 500 kV quadruple-circuit in one tower[J]. Electric Power Construction, 2012, 33(9):31-34.
- [15] 曾昭华, 林集明. 电力系统暂态分析仪和电磁暂态计算程序在电力系统研究中的应用[J]. 电网技术, 1985, (1):55-60+39.
ZENG Shaohua, LIN Jiming. Research application of power system transient analysis and electromagnetic transient computing program in power system research [J]. Power Grid Technology, 1985, (1):55-60+39.
- [16] 胡毅, 刘凯, 刘庭, 等. 超/特高压交直流输电线路带电作业[J]. 高电压技术, 2012, 38(8):1809-1820.
HU Yi, LIU Kai, LIU Tin. Living working on EHV/UHV transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(8):1809-1820.
- [17] 胡毅, 刘凯, 彭勇, 等. 带电作业关键技术研究进展与趋势[J]. 高电压技术, 2014, 40(7):1921-1931.
HU Yi, LIU Kai, PENG Yong, et al. Research status and development trend of live working key technology [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(7):1921-1931.
- [18] 石凯, 徐文洋, 雷东云, 等. ± 800 kV 特高压直流输电线路带电作业方式[J]. 电瓷避雷器, 2016, 2(4):6-11.
SHI Kai, XU Wenyang, LEI Dongyun, et al. Live working ways for ± 800 kV UHVDC transmission line[J]. Insulator and Surge Arresters, 2016, 2(4):6-11.
- [19] 潘俊文, 李辉, 邹德华, 等. 500 kV 紧凑型同塔双回输电线路感应电压电流的仿真计算[J]. 电力科学与技术学报, 2015, 30(3):84-90.
PAN Junwen, LI Hui, ZOU Dehua, et al. Simulation and calculation for induced voltage and current of 500 kV compact double-circuit transmission line on same tower[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2015, 30(3):84-90.
- [20] 肖勇, 樊灵孟. 云广 ± 800 kV 特高压直流线路带电作业分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(9):2206-2211.
XIAO Yong, FANG Lingmeng. Analysis of live working on Yun-Guang ± 800 kV DC transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(9):2206-2211.
- [21] 麻敏华, 汪晶毅. 500 kV/220 kV 混压同塔四回路感应电压, 感应电流的研究[J]. 广东电力, 2012, 25(4):30-35+52.
MA Mihua, WANG Jingyi. Research on induced voltage and current for 500/220 kV mixed-voltage parallel-four-circuit transmission lines on the same tower[J]. Guangdong Electric Power, 2012, 25(4):30-35+52.
- [22] 韩彦华, 黄晓民, 杜秦生, 等. 同杆双回线路感应电压和感应电流测量与计算[J]. 高电压技术, 2007, 33(1):140-142+159.
HAN Yahua, HUANG Xiaomin, DU Qinsheng, et al. Induced voltage and current on double circuits with same tower [J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1):140-142+159.
- [23] 张兆云, 林璞, 王星华. 交直流混合配电网继电保护研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(5):179-187.
ZHANG Zhaoyun, LIN Pu, WANG Xinghua. Review on relay protection of AC/DC hybrid distribution grids [J]. Smart Power, 2019, 47(5):179-187.
- [24] 李智琦, 罗日成, 吴东. 500 kV 变电站绝缘子串均压环结构优化分析[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(1):171-176.
LI Zhiqi, LUO Richeng, WU Dong, et al. Optimization analysis of grading ring structure for insulator string in a 500 kV substation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(1):171-176.