

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.10.021

超高压直流输电线路对埋地油气管道的电磁影响仿真研究

王楠¹, 张龙¹, 时云洪¹, 来瑞¹, 黄河², 谢庆²

(1. 贵州电力设计研究院, 贵阳 550002; 2. 华北电力大学河北省输变电设备安全防护重点实验室, 河北保定 071003)

摘要: 中国电力与油气输送网络发展迅速, 为了研究超高压直流输电线路对埋地油气管道的电磁影响, 针对金中直流工程与中缅油气管道进行建模仿真。基于工程设备参数与走廊规划, 利用CDEGS软件建立了直流输电线路与埋地油气管道平行和交叉的仿真模型。针对直流线路正常运行、单极接地故障、雷击杆塔3种工况, 仿真研究了平行和交叉段管道金属电压及管道防腐层电压分布。结果表明, 所选超高压直流线路在各工况下对油气管道的电磁影响均符合限值要求。该研究结果对超高压直流输电工程和埋地油气管道共用走廊时的安全运行具有重要实际意义, 并可为相关工程设计提供一定参考。

关键词: 电磁影响; 直流输电线路; 油气管道; 共用走廊

Simulation Study of Electromagnetic Influence from UHVDC Transmission Line on Buried Oil/Gas Pipeline

WANG Nan¹, ZHANG Long¹, SHI Yunhong¹, LAI Rui¹, HUANG He², XIE Qing²

(1. Guizhou Electric Power Design & Research Institute, Guiyang 550002, China; 2. Hebei Provincial Key Laboratory of Power Transmission Equipment Security Defense, North China Electric Power University, Hebei Baoding 071003, China)

Abstract: To reveal the electromagnetic influence from UHVDC transmission line on buried oil/gas pipeline, modeling and simulations are conducted for the China-Myanmar oil/gas pipeline and the Yunnan-Guangxi HVDC transmission line. According to the engineering parameters and common corridor design, computational models of the transmission line and pipeline in respective cross arrangement and parallel arrangement are established using the software CDEGS. Then the voltage distributions on the pipeline and its coating induced by the transmission line are calculated for the two arrangements in the conditions of normal operation, single-pole grounding fault, and lightning strike accident of the transmission line. The results show that the electromagnetic influences on the oil/gas pipeline are all smaller than the limited values. This research may be helpful for safe operation of UHVDC transmission line and oil/gas pipeline in common corridor, and may provide a reference for design of relative engineering.

Key words: electromagnetic influence; DC transmission line; oil/gas pipeline; common corridor

0 引言

随着中国国民经济进步, 电力与油气输送网络发展迅速。金沙江中游电站送电广西高压直流输电工程(金中直流工程)是南方电网十二五期间重大西电东送项目, 该项目全长 1 139 km, 直流电压 ± 500 kV, 设计输送容量 320 万 kW, 对满足广西

用电负荷增长将发挥重要作用。中缅油气管道是中国西南部重要的能源进口通道, 包括原油管道和天然气管道。由于走廊资源有限, 并且输电线路与油气管道在建设路径的选择原则上较为相似, 二者会不可避免地出现长距离并行接近或交叉跨越的现象, 所以必须考虑由此引起的电磁影响问题^[1-3]。直流线路对油气管道的电磁影响可分为感性耦合、阻性耦合和容性耦合^[4]。由于油气管道一般埋于地下,

收稿日期: 2016-03-16; 修回日期: 2016-05-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(51307060); 河北省高等学校科学技术研究指导项目(Z2013086)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51307060), Colleges and Universities in Hebei Province Science and Technology Research Project(Z2013086).

在施工时会分段接地,因此可不考虑容性耦合的影响^[5]。管道上的对地电压是在感性耦合与阻性耦合的共同作用下产生的,如果该值超过了安全限值,势必会对人身和管道安全造成威胁。

针对此类问题,国外学者率先展开研究,建立了计算模型及分析方法^[6-7],并对计算方法进行了不断的丰富与完善^[8-9]。国内近年来也进行了相关研究工作,主要涉及输电线路正常运行^[10-11]、短路故障^[12-13]及遭遇雷击^[3,14]3种状态下对埋地管道的电磁影响,制定了限值标准^[15],并提出了一系列缓解措施^[16]。文[11-12,14]中还分别研究了管道参数、线路参数、土壤电阻率等参数对电磁影响的作用规律。目前研究大多集中在交流线路对油气管道的电磁影响方面,因此开展直流线路的电磁影响研究显得尤为必要,对高压直流输电线路和油气管道同走廊时的安全运行具有重要意义。

文中基于实际工程参数,使用CDEGS软件建立了金中直流工程与中缅油气管道平行和交叉模型,仿真得到了直流线路各运行状态下对油气管道的电磁影响数值,通过与相关限值的比较,评估了电磁影响程度。该研究结果对金中直流工程和中缅油气管道的安全运行和走廊规划具有重要的实际工程价值。

1 工程概况

1.1 直流输电线路与埋地管道相对位置

文中选取金中直流工程第4标段线路与中缅油气管道的平行和交叉区域进行仿真研究。其相对位置见图1,图1中数据单位均为m。其中油气管道长度约为30 km,交叉角为82°,跨越档杆塔与管道垂直距离分别为196 m和267 m。

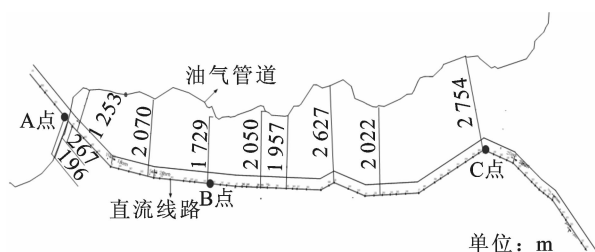


图1 直流线路与油气管道相对位置

Fig. 1 Relative positions of the DC transmission line and oil/gas pipeline

第4标段中油气管道的坐标见图2,即从起点开始管道的长度。

1.2 直流输电线路参数

金中直流输电工程所用的输电线路、输电线路

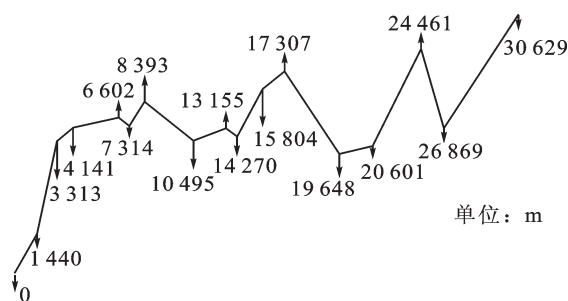


图2 油气管道坐标

Fig. 2 Coordinates of the oil/gas pipeline

地线结构参数以及杆塔相关参数见表1,其中文中研究所针对的标段属于20 mm冰区。

1.3 油气管道结构参数

中缅油气管道项目中所用的油气管道结构参数见表2。

2 仿真模型

2.1 建模方法

该研究采用CDEGS软件包进行仿真计算。该软件是以电磁理论为基础编写的,分析结果不受频率限制,在分析输电线路对输油输气管道的电磁影响方面具有强大功能,在实际应用中解决了大量此类工程问题^[17]。文中使用CDEGS软件中的HIFREQ模块进行直流输电线路正常运行和短路故障状态下对油气管道的电磁影响仿真研究。HIFREQ模块充分考虑了感应效应,可以根据系统参数计算各导体自感和互感,也可求出电容量的大小,据此建立等效电路模型,求解等效模型即可得到感兴趣部分的感应电压。并且,当考虑到单极大地运行方式下的大地回流、短路故障时的入地电流时,还可计算出此类状况产生的阻性耦合在管道上的感应电压。

直流线路杆塔遭受雷击时的电磁影响计算,则将HIFREQ和快速傅里叶变换FFTSES模块结合使用。HIFREQ模块适用于分析大规模导体网络,包括频率在0到数百赫兹的带电接地系统。HIFREQ模块的高频计算能力,配合FFTSES模块频域与时域之间的数据分析,使HIFREQ可以有效地研究雷电流在管道上引起的暂态响应。

文中所建立的模型中主要包含:超高压直流输电线路、杆塔、地线、杆塔基础人工接地体等。采用均匀土壤模型,土壤电阻率取值 $1000 \Omega \cdot m$ 。所建立的模型见图3,基于该模型进行直流线路对埋地油气管道的电磁影响仿真研究。

2.2 仿真所取电流类型

参考《向家坝—上海、锦屏—苏南 ± 800 kV 特高

表 1 直流输电工程特性参数

Table 1 Parameters of DC transmission line

项目	10 mm 冰区	15 mm 冰区	20 mm 冰区	30 mm 冰区
导线型号	L/G2A900/75	L/G2A900/75	L/G2A900/75	JLHA1/G2A900/75
导线分裂数	4	4	3	4
分裂间距/mm	550	550	550	550
地线型号	JLB20A-100	JLB20A-100	JLB20A-120	JLB20A-240
极导线间距/m	直线塔	12.0	12.0	15.5
	耐张塔	17.5	17.5	17.5
地线间距/m	直线塔	19.34	21.10	21.80
	耐张塔	21.7	21.1	24.8
平均档距/m	500	480	330	300
极导线对地平均高度/m	33.0	32.0	20.0	17.5

表 2 中缅油气管道结构参数

Table 2 Parameters of China-Myanmar oil/gas pipeline

管道名称	管道外径/mm	壁厚/mm	管道埋深/m	防腐层类型	防腐层厚度/mm	防腐层电阻率/($\Omega \cdot m^2$)
中缅天然气管道	1 016.0	17.5	1.5	3LPE	3	10^5
云南成品油管道	406.4	7.1	1.5		3	10^5

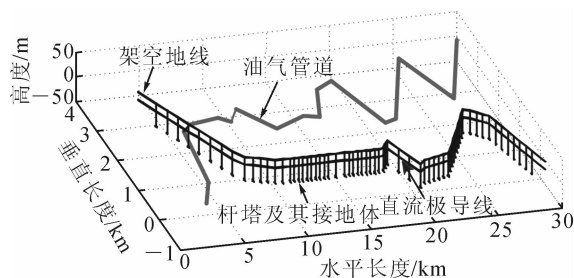


图 3 超高压直流输电线路对油气管道的电磁影响模型

Fig. 3 Model of electromagnetic effects on underground oil/gas pipeline due to UHVDC transmission line

压直流输电线路对输油输气管线电磁影响研究》的研究成果,直流输电系统单极金属回线运行方式下主要谐波频率为 100 Hz,大小约为 55 A。文中仿真计算中,谐波电流频率取 100 Hz,大小取 45 A。

金中直流工程双极大地回线额定功率运行情况下,测算在不同位置发生短路故障时的短路电流峰值,由第 4 标段交叉跨越区域的位置确定文中仿真所取的短路电流峰值在送端大小为 5.8 kA,在受端大小为 3.0 kA,短路电流的频率取 30 Hz。

文中仿真所选雷电流的波前时间、半峰值时间为 2.6/50 μs ,雷电流幅值为 100 kA,其波形见图 4。

3 仿真计算

3.1 线路正常运行对油气管道的电磁影响

3.1.1 仿真结果

研究表明,直流线路在单极大地回路运行时,管道上的感应电压最大,双极大地回线运行时最

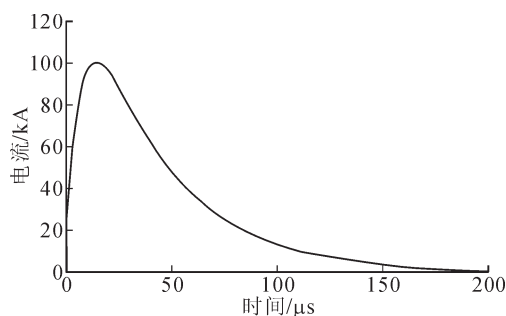


图 4 雷电流波形

Fig. 4 Lightning current waveform

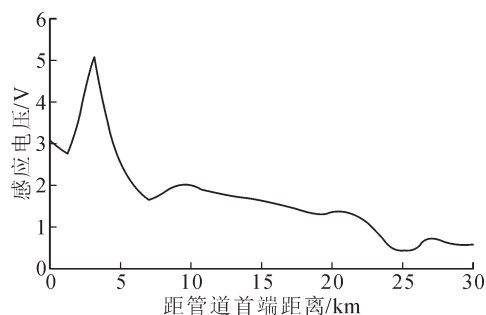
小^[18]。因此,文中重点研究了直流线路单极大地回路运行时,谐波电流对油气管道的电磁影响,即由一极导线和大地组成回路,另一极不参与运行,也没有此谐波电流通过。

仿真得到直流线路正常运行时,管道上的金属电压分布和管道防腐层电压分布见图 5。

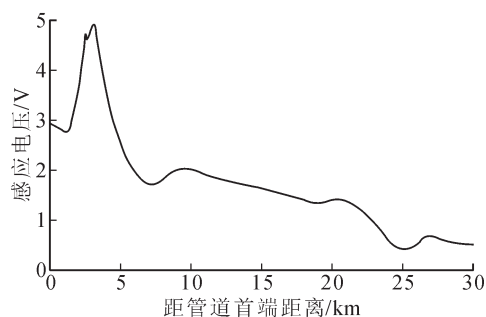
3.1.2 结果分析

直流线路正常运行时极导线谐波电流的主要频率为 100 Hz,根据 GB/T 3805—1993 中规定,频率为 15~100 Hz 的人体稳态安全电压限值相同,同时考虑到该安全限值的职业针对性,取输电线路正常运行时管道对地电压容许值为 60 V。

通过仿真计算可知,极导线中的谐波电流产生的管道金属电压最大值高于管道防腐层电压,感应电压最大值为 5.1 V,远低于 60 V 的限值要求。感应电压随距离整体呈下降趋势,但在管道与直流线路交叉处附近出现激增并达到最大值。



(a)管道金属电压沿线分布图



(b)管道防腐层电压沿线分布图

图5 正常运行时油气管道感应电压沿线分布图

Fig. 5 The distribution of voltage along the oil/gas pipeline in normal operation

3.2 线路短路对油气管道的电磁影响

3.2.1 仿真结果

超高压直流输电线路具有很高的可靠性,对于短路故障时的电磁影响,可仅考虑靠近埋地油气管道的直流线路发生单极接地故障时的情况。

考虑到直流线路第4标段与油气管道的平行距离较长,在直流线路前、中、后3段分别选择了距离管道最近的A、B、C3个点(见图1),仿真这3个点处极导线发生短路故障时油气管道上的干扰电压分布。结果显示A点短路时管道上的感应电压最大,电压分布见图6。

3.2.2 结果分析

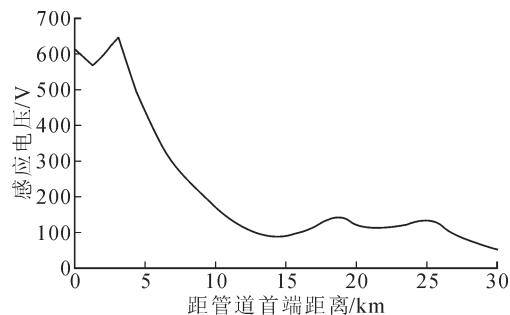
文中采用DL/T 5340—2006《直流输电线路对电信线路危险影响防护设计技术规定》推荐限值3 000 V(峰值)作为输电线路短路故障时的人身安全电压,对应的有效值为2 121 V。

由仿真结果可知,直流线路发生单极接地故障时,油气管道上产生的管道金属电压最大值低于管道防腐层电压。干扰电压最大值为695 V,低于峰值3 000 V的限值要求。感应电压随距离整体呈下降趋势,但在管道与直流线路交叉处附近出现激增并达到最大值。

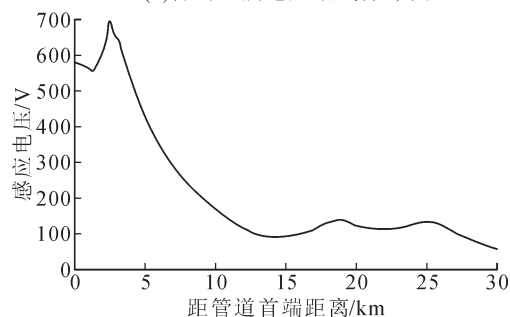
3.3 雷击输电线路对油气管道的电磁影响

3.3.1 仿真结果

由于雷电流频率很高,雷击杆塔后避雷线电流



(a)管道金属电压沿线分布图



(b)管道防腐层电压沿线分布图

图6 A点短路时油气管道电压沿线分布图

Fig. 6 The distribution of voltage along the oil/gas pipeline while ground fault

和杆塔入地电流逐级衰减很快,大约经过5个档距后可以忽略不计。在雷击点附近,雷电流大部分经过雷击处杆塔泄放入地,仅有少量沿着避雷线向远处传播。因此在计算直流线路杆塔遭受雷击对管道的电磁影响时,只需考虑距离管道最近处的杆塔遭受雷击的情况。

对A、B、C3点处的杆塔遭受雷击时油气管道上的干扰电压进行计算,结果显示,雷击A点时产生的感应电压最大,电压分布见图7。

3.3.2 结果分析

根据石油管道部门提供的数据,3层PE防腐层的雷电冲击耐压为109 kV。由于雷雨天气下一般不开展管道作业,只需考虑管道防腐层的安全,因此取109 kV作为输电线路杆塔遭受雷击时的管道安全电压。

通过计算可知,直流输电线路杆塔遭受雷击时,不同雷击点条件下,管道防腐层电压最大值为67.5 kV,小于3层PE防腐层的雷电冲击耐压109 kV的限值要求。感应电压在管道与直流线路交叉处附近出现激增并达到最大值,在两端迅速衰减到较低的水平。

4 结语

文中对超高压金中直流工程对中缅油气管道电磁影响进行仿真研究,根据金中直流工程与中缅

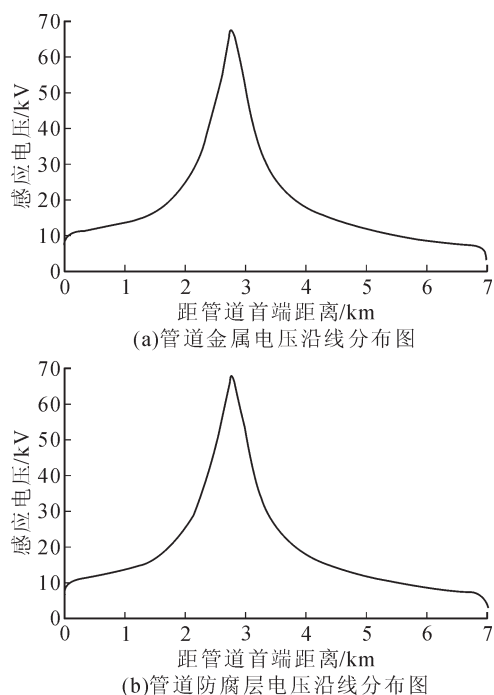


图7 雷击A点时油气管道电压沿线分布图

Fig. 7 The distribution of voltage along the oil/gas pipeline while lightning strike

油气管道的相对位置关系及设备参数,使用 CDEGS 软件建立了金中直流工程第4标段与中缅油气管道平行和交叉的仿真模型,计算得到了直流线路正常运行、单极接地故障、雷击线路时交叉处管道金属电压及管道防腐层电压分布。仿真结果表明,所选超高压直流线路在各工况下对油气管道的电磁影响均符合限值要求,并且文中在建模时考虑的是电磁影响较严重的运行状况,因此计算结果留有一定的裕度。分析仿真所得电压分布图可知,直流线路各工况下,管道上的感应电压都在交叉处附近达到最大值,在此薄弱环节处应格外做好防护工作。该研究成果对金中直流输电工程和中缅油气管道的安全运行具有重要的实际工程价值,并可为相关工程设计提供一定参考。

参考文献:

- [1] 中国电力科学研究院. 1 000 kV 特高压交流同塔双回路线路对金属管线影响及防护研究[R]. 北京:中国电力科学研究院,2009.
China Electric Power Research Institute. Influence and mitigation of 1 000 kV UHV AC double-circuit transmission line on metallic pipeline[R]. Beijing: China Electric Power Research Institute,2009.
- [2] COTTON I, KOPSIDAS K, ZHANG Yang. Comparison of transient and power frequency-induced voltages on a pipeline parallel to an overhead transmission line[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2007,22(3):1706-1714.
- [3] 安宁,彭毅,艾宪仓,等. 雷击超高压交流输电线路对埋地输油输气管道的电磁影响[J]. 高电压技术,2012,38(11):2881-2888.
AN Ning, PENG Yi, AI Xiancang, et al. Electromagnetic effects on underground oil/gas pipeline of the lightning strike on EHV AC transmission line[J]. High Voltage Engineering,2012,38(11):2881-2888.
- [4] KOPSIDAS K, COTTON I. Induced voltages on long aerial and buried pipelines due to transmission line transients[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2008,23(3):1535-1543.
- [5] QI Lei, YUAN Hui, LI Lin, et al. Calculation of interference voltage on the nearby underground metal pipeline due to the grounding fault on overhead transmission lines[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility,2013,55(5):965-974.
- [6] DAWALBI F P, SOUTHEY R D. Analysis of electrical interference from power lines to gas pipelines Part I: Computation methods[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1989,4(3):1840-1846.
- [7] DAWALBI F P, SOUTHEY R D. Analysis of electrical interference from power lines to gas pipelines Part II: Parametric analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1990,5(1):415-421.
- [8] AL-BADI A H, GHANIA S M, ELSAADANY E F. Prediction of metallic conductor voltage owing to electromagnetic coupling using neuron fuzzy modeling[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2009,24(1):319-327.
- [9] MICU D D, CZUMBIL L, CHRISTOFORIDIS G C, et al. Evaluation of induced AC voltages in underground metallic pipeline[J]. COMPEL-the International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering,2012,31(4):1133-1143.
- [10] 齐磊,崔翔,郭剑,等. 特高压交流输电线路正常运行时对输油输气管道的感性耦合计算模型[J]. 中国电机工程学报,2010,30(21):121-126.
QI Lei, CUI Xiang, GUO Jian, et al. Inductive coupling modeling of normally operating UHV AC transmission line to adjacent oil/gas pipeline[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(21):121-126.
- [11] 谢辉春,宋晓兵. 交流输电线路对埋地金属管道稳态干扰的影响规律[J]. 电网与清洁能源,2010,26(5):22-26.
XIE Huichun, SONG Xiaobing. Influence of steady interference on buried metallic pipelines due to AC transmission lines[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering,2010,26(5):22-26.
- [12] 蒋俊,郭剑,陆家榆. 交流输电线路单相接地故障对输油输气管道的电磁影响与线路参数的关系[J]. 电网技术,2010,34(6):10-13.

- JIANG Jun, GUO Jian, LU Jiayu. Relation between transmission line parameters and electromagnetic impact on petroleum/gas pipelines due to single-phase earth fault in AC transmission line[J]. Power System Technology, 2010, 34(6):10-13.
- [13] 齐磊, 原辉, 李琳, 等. 架空电力线路故障状况下对埋地金属管道感性耦合的传输线计算模型[J]. 电工技术学报, 2013, 28(6):264-270.
- QI Lei, YUAN Hui, LI Lin, et al. Transmission line modelling of inductive coupling of overhead power lines subjected to grounding fault to underground metal pipeline[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(6): 264-270.
- [14] 万保权, 谢辉春, 张小武, 等. 雷击特高压交流同塔双回杆塔对油气管道的影响[J]. 高电压技术, 2009, 35(8): 1812-1817.
- WAN Baoquan, XIE Huichun, ZHANG Xiaowu, et al. Influence of lightning strike to UHV AC double-circuit Tower on oil or gas pipelines[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(8):1812-1817.
- [15] 赵晋云, 潘红丽, 高 强, 等. 油气管道与高压输电线路距离的相关标准[J]. 油气储运, 2013, 32(1):82-84.
- ZHAO Jinyun, PAN Hongli, GAO Qiang, et al. Relevant standards for distance from oil and gas pipeline to high-voltage power line[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2013, 32(1):82-84.
- [16] 吴广春, 杜艳霞, 路民旭, 等. 埋地管道交流干扰缓解技术研究现状[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2014, 26(5):464-468.
- WU Guangchun, DU Yanxia, LU Minxu, et al. Research status of mitigation techniques of AC interference on buried pipeline[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2014, 26(5):464-468.
- [17] CZUMBIL L, STET D, MICU D D, et al. Induced voltage and current computation for different HVPL operating conditions[C]//International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Rome, Italy: IEEE, 2012:1-6.
- [18] 白 锋, 郭 剑, 尹浩柳. 特高压直流输电线路对油气管道的电磁影响仿真计算[C]//中国电机工程学会电磁干扰专业委员会第十二届学术会议. 武汉: 中国电机工程学会, 2012:177-183.
- BAI Feng, GUO Jian, YIN Haoliu. The simulation study of electromagnetic effect on petroleum & gas pipeline due to UHVDC transmission line [C]//12EMI. Wuhan: Chinese Society for Electrical Engineering, 2012:177-183.
- 王楠(1983—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事输电线路设计方面的研究工作。
- 张龙(1979—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事输电线路设计方面的研究工作。
- 时云洪(1980—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事输电线路设计方面的研究工作。
- 来 瑞(1984—), 男, 本科, 助理工程师, 主要从事输电线路设计方面的研究工作。
- 黄河(1991—), 男, 硕士, 主要从事高电压与绝缘技术方面的研究工作。
- 谢 庆(1979—), 男, 博士后, 副教授, 主要从事电气设备在线监测与故障诊断研究工作(通讯作者)。

(上接第 123 页)

- [16] 金立军, 郭 裕, 薛义飞, 等. 高压绝缘套管电场分析及结构优化[J]. 高压电器, 2015, 51(4):7-12.
- JIN Lijun, GUO Yu, XUE Yifei, et al. Electric field analysis and structure optimization for high voltage insulation bushing[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(4):7-12.
- [17] MORSHUIS P F. Degradation of solid dielectrics due to internal partial discharge some thoughts on progress made and where to go now[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(5):905-913.
- [18] LORENZO M D, SCHIFANI R, HOLBOLL J T. Partial discharge tests using CIGRE method II[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2000, 7(2): 133-140.
- [19] KATRIN T. Evaluation of surface changes in flat cavities due to ageing by means of phase-angle resolved partial discharge measurement[J]. Journal of Physics D-Applied Physics, 2000(33):603-608.
- 程焰林(1982—), 男, 硕士研究生, 副研究员, 研究方向为高电压绝缘。