

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.06.030

特高压交流输电线路正常运行对埋地油气管道电磁影响及防护措施研究

杨丝琪¹, 陈 维², 郭天伟³, 苏高参⁴, 王贤军³

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 广州供电有限公司, 广州 510000; 3. 国网江西省电力公司九江供电公司, 江西 九江 332000; 4. 国网重庆市电力公司检修分公司, 重庆 400039)

摘要: 中国电力和油气输送网络发展迅速, 为了研究特高压交流输电线路正常运行时对埋地油气管道电磁影响, 针对皖电东送特高压输电线路和川气东输管道进行了建模仿真。结合走廊规划和实际工程参数, 采用CDEGS建立了1 000 kV交流输电线路与埋地油气管道交叉和平行的仿真模型。针对输电线路单回运行和双回运行, 仿真研究了平行交叉段管道干扰电压及交流电流密度分布, 并给出了应用固态去耦合器的裸铜带敷设的防护措施, 降低管道交流干扰电压。结果表明: 输电线路正常运行时, 油气管道会产生中度交流腐蚀影响; 管道应用固态去耦合器与裸铜带接地, 能够有效降低管道干扰电压, 并较小交流腐蚀的可能性。该研究成果对特高压输电工程和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。
关键词: 电磁影响; 埋地油气管道; 特高压; 固态去耦合器; 交流电流密度

Electromagnetic Effect of UHV AC Transmission Line on Oil/Gas Pipeline and Protective Measures

YANG Siqu¹, CHEN Wei², GUO Tianwei³, SU Gaocan⁴, WANG Xianjun³

(1. Electric and New Energy Faculty of China Three Gorges University, Hubei Yichang 443002, China; 2. Guangzhou Power Supply Bureau, Guangzhou 510000, China; 3. State Grid Jiangxi Electric Power Company Jiujiang Power Supply Company, Jiangxi Jiujiang 332000, China; 4. Maintenance Branch Company of State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 400039, China)

Abstract: To reveal the electromagnetic effect from UHV AC transmission line on buried oil/gas pipeline, modeling and simulations are conducted for the oil/gas pipeline of the natural gas transmission project from Sichuan Province to eastern region and the UHV transmission line of the power transfer project from Anhui Province to eastern region. According to the engineering parameters and common corridor design, computational models of the 1 000 kV transmission line and the buried oil/gas pipeline in respective cross arrangement and parallel arrangement are established using the software CDEGS. Then the interfering voltage and AC current density distributions on the pipeline are calculated in the conditions of single-circuit operation and double-circuit operation of the transmission line. And AC corrosion protection of the pipeline by applying solid-state decoupler with bare copper belt is given to reduce the interfering voltage on the pipeline. The results show that the pipeline will suffer moderate AC corrosion in normal operation of the transmission line, and the possibility of pipeline's AC corrosion and the interfering voltage can be effectively reduced by grounding pipeline via bare copper belt and solid-state decoupler. This research may be helpful for safe operation of UHV transmission line and oil/gas pipeline, and may provide a reference for design of relative engineering.

Key words: electromagnetic effect; buried oil/gas pipeline; UHV; solid-state decoupler; AC current density

收稿日期: 2019-01-09; 修回日期: 2019-03-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51477090); 三峡大学学位论文培优基金资助项目(2018SSPY074)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51477090), Research Fund for Excellent Dissertation of China Three Gorges University(2018SSPY074).

0 引言

随着中国经济的高速增长,对能源需求越来越大,由于中国西部地区石油、天然气资源丰富,而经济发达的东部沿海地区能源较匮乏,因此能源由西部向东部输送已成为中国经济发展的重要战略部署。超、特高压输电线路和输油输气管道的建设在迅速发展,如皖电东送特高压工程、陕京四线输气管道工程和西气东输三线天然气工程等。这些工程的建设,对于促进中国经济发展,优化能源结构,具有重大社会意义^[1]。由于输电线路架设和石油天然气管道铺设在选择路径的原则上极为相近,导致输电线路与输油输气管道长距离平行或交叉跨越的情况时有发生,输油输气管道的电磁影响问题日益突出^[2]。

输电线路和埋地油气管道路径一般远离城镇地区,因而输电线路与管道在郊外等人烟稀少地区交叉跨越情况较为多见,使得工作人员对管道维护的难度增大。且埋地油气管道设施埋设于地下,一旦发生管道腐蚀情况则必须对管道进行开挖,造成极大经济损失。因此对管道进行有效地交流腐蚀防护,对油气管道安全运行具有重大意义^[3-4]。近年来国外对此问题已进行了大量研究^[5-6],国内对于管道交流干扰的研究起步较晚,近几年国内高校和科研单位陆续开展了输电系统对埋地油气管道的影响研究^[7-9],并取得了一定的进步。

目前对埋地油气管道交流腐蚀防护一般采用隔直排流或直接负电位排流的方式,但现有的隔直排流难以承受雷击,排流设施极易发生故障;管道与铜带直接连接的负电位排流,则存在难以检测阴极保护有效性的问题。采用固态去耦合器对持续干扰进行排流保护的新技术,即沿管道敷设裸铜带,管道与裸铜带通过导通交流、隔断直流的去耦合器相连,管道相当于通过小电阻接地^[10-12]。这种防护措施既体现了裸铜带良好的接地效果,又发挥了裸铜带的屏蔽效应,显著降低了管道对地电压。

文中结合实际工程,利用CDEGS软件对皖电东送特高压输电线路与川气东输埋地油气管道交叉段进行了仿真研究,并采用了裸铜线连接固态去耦合器排流技术对埋地油气管道进行了管道干扰防护^[13-15]。研究结果可为相关工程的设计和建设和提供参考。

1 计算原理

采用CDEGS软件进行仿真计算,该软件在分析

输电线路对埋地油气管道的电磁影响方面具有强大功能,被国际电网会议推荐使用,广泛应用于输电线路和油气管道的建设工程上,解决了大量工程问题^[16]。

软件分析计算中,将大地为参考导体,管道与大地之间会形成回路,管道—大地回路等值模型见图1。

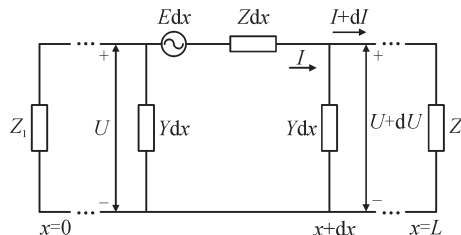


图1 管道—大地回路等值模型

Fig. 1 Equivalent circuit of the pipeline-earth loop

相应的频域电报方程为:

$$\frac{dU(x)}{dx} + ZI(x) - E(x) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{dV(x)}{dx} + YU(x) = 0 \quad (2)$$

式(1)、(2)中: Z 为单位长度串联阻抗; Y 为单位长度并联导纳; I 为管道沿线电流; U 为管道沿线电压; E 为单位长度管道感应电动势,联立式(1)和(2)有:

$$\frac{d^2U(x)}{dx^2} - ZYU(x) - \frac{dE(x)}{dx} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{d^2I(x)}{dx^2} - ZYI(x) + YE(x) = 0 \quad (4)$$

若 E 不随 x 轴变化,即为常数,在单回输电线路中有

$$E = IZ_m \quad (5)$$

式(5)中, I 为运行电流, Z_m 计算式为

$$Z_m = Z_{ma} + Z_{mb} e^{-j\frac{2}{3}\pi} + Z_{mc} e^{-j\frac{4}{3}\pi} \quad (6)$$

式(6)中, Z_{ma} 、 Z_{mb} 、 Z_{mc} 依次为线路A、B、C三相与管道的大地返回互阻抗。联立式(3)、(4)可得通解为:

$$U(x) = Ae^{\gamma x} + Be^{-\gamma x} \quad (7)$$

$$I(x) = \frac{E}{Z} - \frac{1}{Z_c} (Ae^{\gamma x} + Be^{-\gamma x}) \quad (8)$$

其中:

$$\gamma = \sqrt{ZY} = |\gamma| \angle \theta = \alpha + j\beta \quad (9)$$

$$Z_c = \sqrt{Z/Y} \quad (10)$$

式(9)–(10)中: α 为衰减常数; β 为相位常数; γ 为传播常数; Z_c 为特性阻抗。式(7)、(8)中待定系数需满足传输线端部约束条件 $U(0) = -Z_1 I(0)$ 和 $U(L) = Z_2 I(L)$,其中: Z_1 为首端阻抗; Z_2 为末端阻抗,代入整理后可得

$$A = \frac{E[(1+\rho_1)\rho_2 - (1+\rho_2)e^{\gamma L}]}{2\gamma(\rho_1\rho_2 - e^{2\gamma L})} \quad (11)$$

$$B = \frac{E[(1+\rho_1)e^{2\gamma L} - \rho_1(1+\rho_2)e^{\gamma L}]}{2\gamma(\rho_1\rho_2 - e^{2\gamma L})} \quad (12)$$

式(11)、(12)中: $\rho_1 = \frac{Z_1 - Z_c}{Z_1 + Z_c}$; $\rho_2 = \frac{Z_2 - Z_c}{Z_2 + Z_c}$ 。

埋地油气管道邻近输电线路时,管道平行段连接情况一般可以归纳为6种情况:

- 1)管道两端接地, $Z_1=Z_2=0$;
- 2)管道一端接地,另一端终止不接地, $Z_1=0, Z_2=\infty$;
- 3)管道一端接地,另一端向无限远延伸, $Z_1=0, Z_2=Z_c$;
- 4)管道两端都不接地, $Z_1=Z_2=\infty$;
- 5)管道一段不接地,另一端向无限远延伸, $Z_1=\infty, Z_2=Z_c$;
- 6)管道两端都向无限远延伸, $Z_1=Z_2=Z_c$ 。

一般情况下管道两端都是向无限远延伸,即 $Z_1=Z_2=Z_c$ 。代入可得:

$$\begin{cases} A = \frac{Ee^{\gamma L}}{2\gamma} \\ B = -\frac{E}{2\gamma} \\ U(x) = \frac{E}{2\gamma} [e^{\gamma(x-L)} - e^{-\gamma x}] \\ I(x) = \frac{E}{2Z} [2 - e^{\gamma(x-L)} - e^{-\gamma x}] \end{cases} \quad (13)$$

工程分析中输电线路对管道腐蚀影响取决于管道防腐层电压。管道防腐层最大电压为

$$U_{p-\max} = \left| \frac{Y_2}{Y_1 + Y_2} U(L)_{\max} \right| \quad (14)$$

式(14)中: $U(L)_{\max}$ 为管道最大干扰电压; Y_1 为管道涂层单位长导纳; Y_2 为大地返回导纳。 $Y = Y_2 Y_2 / (Y_1 + Y_2)$ 表示为管道单位长并联导纳。线路与管道正常运行情况下管道防腐层阻抗较大, $Y_1 \approx 0$, 因此 $U_{p-\max} \approx U(L)_{\max}$ 。

2 电磁影响限值分析

2.1 人身安全影响限值

由于输电线路正常运行时,对附近埋地油气管道产生电磁影响为交流干扰,管道上产生的交流干扰电压可能会威胁到人员的安全,以及对管道和附属设施造成交流腐蚀。因此,需要确定在管道受到交流干扰影响下人身安全电压和交流腐蚀影响^[17],在管道工程设计和建设时,将干扰电压降低至安全

范围内。

人体长时间安全电压标准及限值见表1^[18-19]。由表1可知,对人体长时间安全电压限值,国内外标准限值大致可分为15、33、60 V 3个等级。其中,美国 NACE RP 0177—95 标准规定的15V更多是考虑不使人有明显身体不适的感觉;GB 3805—2008中规定为33 V,适用于普通大众;GB 6830—1986中规定为60 V,适用于职业人员,这类人员在作业时佩戴防护用品且懂得用电知识。文中研究的埋地油气管道,只有管道工作人员才能接触到管道金属部分,通常取人体长时间安全电压限值为60 V。

表1 人体安全电压标准及限值

Table 1 Some standards and limit values about human safety voltage

标准类别	标准名称	电压限值/V
无行业针对性的 国标和IEC 标准	GB 3805—2008	33
	GB 50054—1995	50
	IEC 61204	33
国外防蚀标准	美国 NACE RP 0177—95	15
	德国 Afn 第3号标准	65
	其他行业类似 标准	60
	GB 6830—1986	60
	CCITT	60

2.2 管道交流腐蚀影响限值

欧洲 CEN/TS 15280—2006 规定^[20],为了减少交流腐蚀的可能性,用管道交流干扰电压作为评价,则有:①土壤电阻率小于 $25 \Omega \cdot m$ 时,管道交流干扰电压不得高于4V;②土壤电阻率大于 $25 \Omega \cdot m$ 时,管道交流干扰电压不得高于10 V。中国一般按 GB/T 50698—2011《埋地钢制管道交流干扰防护技术标准》对埋地管道交流腐蚀进行评估^[21]:当埋地管道上的交流干扰电压的有效值小于4 V时,可不采取交流干扰防护措施。当埋地管道上的交流干扰电压有效值大于4 V时,需采用交流泄露电流密度对埋地管道进行评估,交流电流密度 J 公式为

$$J = \frac{8U_{ac}}{\rho \pi d} \quad (15)$$

式(15)中: J 为管道破损点处交流泄露电流密度, A/m^2 ; U_{ac} 为管道交流干扰电压, V; ρ 为土壤电阻率, Ω/m ; d 为防腐层破损点等效直径。

在工程计算评估中,实际管道破损点面积是难以得出的,一般按最严重考虑。根据欧洲标准 CEN/TS15280—2006 和 ISO 15589-1—2003 都给出了管道裸露面积为 100 mm^2 (等效直径 0.011 3) 是最有可

能发生的交流腐蚀,因此式中 d 一般按0.011 3 m取值。当 $J < 30 \text{ A/m}^2$ 时管道交流腐蚀影响判定为“弱”,可不采取交流防护措施;当 $30 \text{ A/m}^2 < J < 100 \text{ A/m}^2$ 时判定为“中”,建议采取交流防护措施; $J > 100 \text{ A/m}^2$ 时判定为“强”,需要采取交流防护措施。

3 交流线路对埋地管道电磁影响分析

3.1 计算模型

中国皖电东送特高压输电线路在浙北—沪西19标段与川气东输油气管道交叉跨越,相对位置见图2,线路与管道接近段土壤电阻率为 $50 \Omega \cdot \text{m}$ 。皖电东送1 000 kV输电线路导、地线参数见表2。皖电东送1 000 kV输电线路的输送功率按 $2 \times 4\,500 \text{ MW}$ 考虑,单相导线线电流为2.59 kA。与输电线路邻近埋地油气管道的内径为485 mm,外径为505 mm,埋深1.5 m。管道防腐层采用聚乙烯3层结构防腐层(3LPE),厚度3 mm,电阻率约 $10^5 \Omega \cdot \text{m}^2$,钢制管道电阻率为 $1.66 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$,磁导率为 $300 \mu_0$ (μ_0 为真空磁导率, $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$)。1 000 kV交流输电线路导地线断面图见图3。

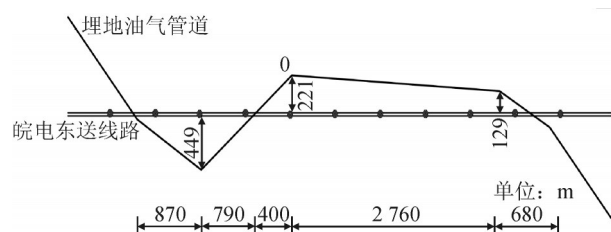


图2 埋地管道与输电线路相对位置

Fig. 2 Relative positions of the transmission line and buried Pipeline

表2 导、地线参数

Table 2 Parameter for wire

导线型号	直径/mm	直流电阻/ ($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	分裂间距/cm	分裂导线根数
8×JL/G1A-630/45	33.8	0.045 9	40.0	8
OPGW-240	20.3	0.366 0	0.0	0
JLB20A-240	20.0	0.360 1	0.0	0

3.2 线路对管道电磁影响分析

特高压交流同塔双回线路在正常运行时相序排列为逆相序排列,但是在线路建设前期系统调试或者一回故障时,也会存在单回运行的情况。通过模拟输电线路单回运行和双回正常运行工况,计算得出了管道感应电压。为线路双回运行和单回运行下埋地油气管道感应电压分布图分别见图4、5。图2中O点坐标轴原点。

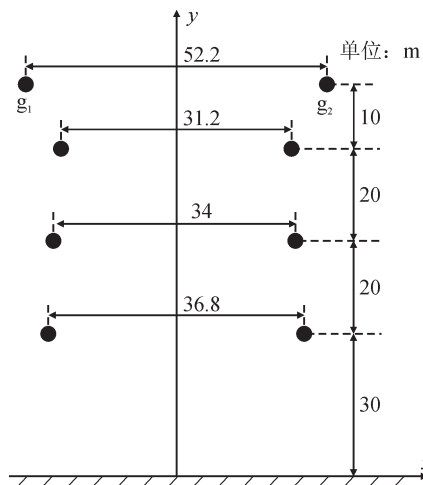


图3 1 000 kV同塔双回交流输电线路的导、地线断面图

Fig. 3 Section diagram of conductor and ground wire of 1 000 kV double-circuit transmission lines

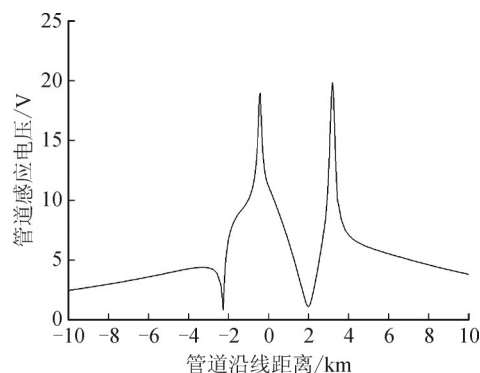


图4 输电线路双回运行管道感应电压分布

Fig. 4 Distribution of induced voltage in double circuit operation of transmission lines

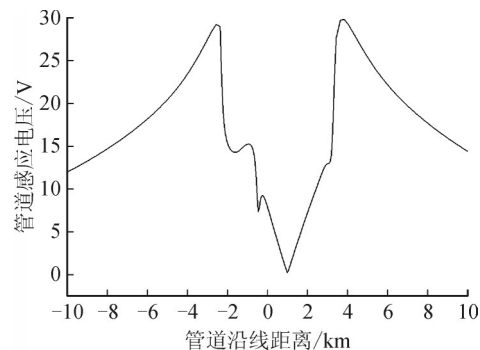


图5 输电线路单回运行管道感应电压分布

Fig. 5 Distribution of induced voltage in single circuit operation of transmission lines

通过计算分析,输电线路正常运行时埋地管道最大感应电压为19.8 V,线路单回运行时管道最大感应电压为29.7 V,小于60 V的人体安全电压限值,对人体并无安全影响。线路单回运行情况极少,一般只可能会对管道工作人员人身安全产生影响,因此只考虑管道在线路双回逆相序运行情况下管道腐蚀情况。输电线路双回运行情况下,邻近区

域埋地油气管道对地电压超过 4 V 范围较大, 因此需要计算交流电流密度来确定管道交流腐蚀影响。管道沿线交流电流密度见图 6。在埋地管道邻近输电线路区域, 输电线路正常运行时管道交流电流密度大于 30 A/m^2 长度为 4.4 km, 交流电流密度最大值为 89.2 A/m^2 , 交流腐蚀影响判定为中, 需要采取交流防护措施。

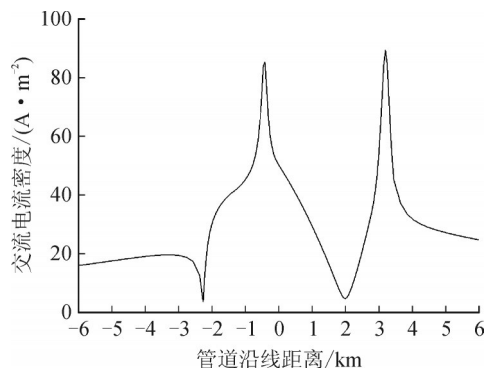


图 6 输电线路双回运行管道交流电流密度分布

Fig. 6 Distribution of AC current density in double circuit operation of transmission lines

3.3 管道交流干扰防护

国家标准 GB/T 50689—2011《埋地钢质管道交流干扰防护技术标准》明确规定, 管道交流干扰防护效果应达到如下要求: 在土壤电阻率 $< 25 \Omega \cdot \text{m}$ 的地方, 管道交流干扰电压低于 4 V; 在土壤电阻率 $> 25 \Omega \cdot \text{m}$ 的地方, 交流泄漏电流密度小于 60 A/m^2 。

文中采用《减轻交流电和雷电对金属构架物和腐蚀控制系统的影响措施》(NACE SP 0177—2007) 推荐固态去耦合器对持续干扰进行排流保护的新技术, 即沿管道敷设裸铜带, 管道与裸铜带通过去耦合器相连, 管道相当于通过小电阻接地。固态去耦合器是一种通交流、隔直流的设备, 具有浪涌保护、交流去耦、钳位式排流等功能, 应用固态去耦合器排流见图 7。该设备设置了一个导通阈值, 当管道直流电压低于设定阈值时, 设备默认为通交隔直状态, 允许交流电流通过而不允许直流电流通过; 当管道直流电压高与设定阈值时, 设备自动切换到短路状态, 泄放电流, 起到了直流过压的保护。

参考晋东南—南阳—荆门 1 000 kV 特高压输电工程对埋地油气管道防护措施的实施情况, 给出皖电东送工程对埋地油气管道的防护措施: 依次在管道防腐层电压最大的位置, 沿管道一侧敷设 500 m 长的裸铜带, 裸铜带到管道边缘距离为 0.5 m, 埋深 1.5 m, 截面面积为 35 mm^2 , 管道与裸铜带之间通过去耦合器连接, 根据实施防护措施的仿真计算结果, 进一步确定管道防护措施具体位置, 通过反复

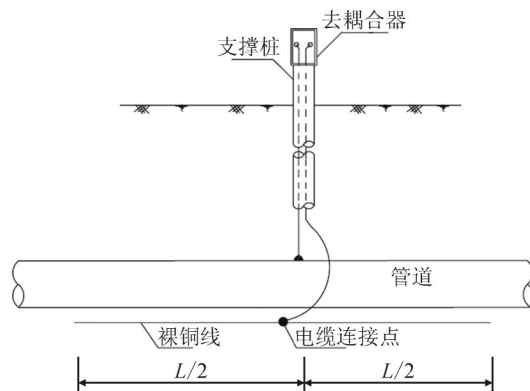


图 7 应用固态去耦合器排流

Fig. 7 Mitigation using solid-state decoupler

校验, 将管道防腐层干扰电压和交流电流密度降低至限值范围内, 用去耦合器的裸铜带敷设位置示意图见图 8。

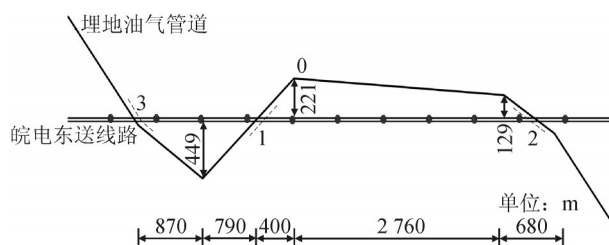


图 8 应用去耦合器的裸铜带敷设位置示意图

Fig. 8 Laying sketch map of bare copper belt applying solid-state decoupler

采用 2 个去耦合器与裸铜带连接接地(图 8 中编号 1、2)时管道感应电压见图 9, 管道最大交流电流密度由 89.2 A/m^2 降低至 59.3 A/m^2 , 满足了国家标准 GB/T 50689—2011 的要求。但由于采取防护措施后交流电流密度与标准限值过于接近, 为保证足够的安全裕度, 考虑在管道交流电流密度较高处增加去耦合器个数, 见图 10。在应用 3 个去耦合器与裸铜带连接接地(图 7 中编号 1、2、3)时, 管道最大交流电流密度降低至 43.2 A/m^2 , 充分满足国标 GB/T 50689—2011 的要求, 其管道参数见表 3。

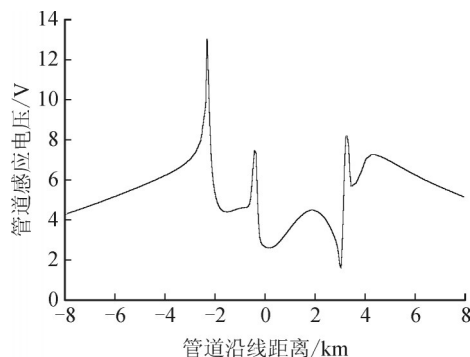


图 9 采用 2 个去耦合器时管道感应电压分布

Fig. 9 Distribution of induced voltage using two solid-state decouplers

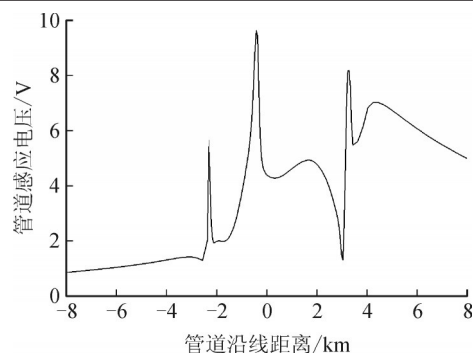


图10 采用3个去耦合器时管道感应电压分布

Fig. 10 Distribution of induced voltage using three solid-state decouplers

表3 敷设裸铜带后管道参数表

Table 3 Pipeline parameter list after laying bare copper belt

去耦合器数	裸铜带总长度/km	管道最大感应电压/V	最大交流电流密度/(A·m ⁻²)
0	0.0	19.8	89.2
2	1.0	13.1	59.3
3	1.5	9.6	43.2

4 结语

文中对皖电东送特高压输电线路对川气东输埋地油气管道电磁影响进行了仿真研究,根据皖电东送和川气东输设备参数以及相对位置关系,采用CDEGS软件建立了浙北—沪西19标段与川气东输油气管道交叉跨越的仿真模型,计算得到了线路双回和单回运行时管道防腐层电压分布。仿真结果表明,浙北—沪西19标段输电线路在两种运行工况下对油气管道电磁影响不符合标准限值要求,因此给出皖电东送工程对埋地油气管道的防护措施——在管道防腐层电压最大的位置,沿管道一侧裸铜带,并将管道与裸铜带通过去耦合器连接。计算得出应用3个去耦合器与裸铜带接地时,管道干扰电压从19.8 V降低至9.6 V,管道最大交流电流密度从89.2 A/m²降低至43.2 A/m²,充分满足标准限值要求,并留有一定安全裕度。该研究成果对特高压输电工程和埋地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] 刘振亚. 特高压电网[M]. 北京: 中国经济出版社, 2005: 14-35.
LIU Zhenya. Ultra-high voltage grid[M]. Beijing: China Economic Press, 2005.
- [2] 中国电力科学研究院. 1 000 kV 特高压交流同塔双回线

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.

- [3] 焦保利, 谢辉春, 张广洲, 等. 特高压交流架空线路与油气管道的防护间距[J]. 高电压技术, 2009, 35(8): 1807-1811.
JIAO Baoli, XIE Huichun, ZHANG Guangzhou, et al. Protection clearance between UHV AC overhead line and oil or gas pipe-lines [J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(8): 1807-1811.
- [4] 王新华, 杨国勇, 黄 海, 等. 埋地钢质管道交流杂散电流腐蚀规律研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2013(4): 293-297.
WANG Xinhua, YANG Guoyong, HUANG Hai, et al. AC stray current corrosion law of buried steel pipeline[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2013(4): 293-297.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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 modeling 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.
- [8] 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.
- [9] 董铁柱, 白 锋, 李海鹏, 等. 新疆750 kV二通道交流输电线路对邻近输油输气管道电磁影响的仿真研究[J]. 电力建设, 2013(8): 40-46.
DONG Tiezhu, BAI Feng, LI Haipeng, et al. Simulation study on electromagnetic influence of 750 kV Double circuit transmission lines in Xinjiang on nearby petroleum & gas pipelines[J]. Electric Power Construction, 2013(8): 40-46.

- [10] 刘 国. 固态去耦合器在管道交流干扰防护中的应用[J]. 油气储运, 2016(4):449-456.
LIU Guo. Application of solid - stated ecoupler in AC interference mitigation of pipelines[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2016(4):449-456.
- [11] 韩 非. 固态去耦合器与钳位式排流器的排流效果对比[J]. 腐蚀与防护, 2015(12):1186-1189.
HAN Fei. Comparison of effectiveness of AC interference mitigation between solid state decoupler and clamping diode[J]. Corrosion & Protection, 2015(12):1186-1189.
- [12] 滕延平. 杂散电流干扰段管道检测与减缓实践研究[D]. 天津:天津大学, 2012.
TENG Yanping. Research on the inspection and mitigation practices of stray current in pipelines[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [13] 张 勇, 郎需军, 杨 博. 1 000 kV 特高压输电线路导线排列方式和换位对地线能耗的影响[J]. 电网技术, 2011, 35(4):21-24.
ZHANG Yong, LANG Xujun, YANG Bo. Influences of conductor arrangement and line transposition adopted in 1 000 kV transmission project on power loss in ground wire [J]. Power System Technology, 2011, 35(4):21-24.
- [14] 蒋 俊. 交流线路正常运行时对平行敷设油气管道的电磁影响[J]. 电网技术, 2008, 32(2):78-80.
JIANG Jun. Electromagnetic influence of normally operating AC power transmission line on gas/oil pipeline parallel to transmission line[J]. Power System Technology, 2008, 32(2):78-80.
- [15] 郭 剑, 曹玉杰, 胡士信, 等. 交流输电线路对输油输气管道电磁影响的限值[J]. 电网技术, 2008, 32(2):17-20.
GUO Jian, CAO Yujie, HU Shixin, et al. Limit values of electromagnetic influence of adjacent AC transmission lines on oil/gas pipelines[J]. Power System Technology, 2008, 32(2):17-20.
- [16] 牛晓民. 电力系统接地分析软件CDEGS简介[J]. 华北电力技术, 2004(12):29-31.
NIU Xiaomin. Introduction of CDEGS[J]. North China Electric Power, 2004(12):29-31.
- [17] 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.
- [18] COMMITTEE P N T. AC corrosion state of the art corrosion rate, mechanism, and mitigation requirements[R]. Houston: NACE International, 2008.
- [19] 国标埋地钢制管道交流干扰防护技术标准: GB/T 50698—2011[S]. 2011.
Standard for AC interference mitigation of buried steel pipelines: GB/T 50698—2011[S]. 2011.
- [20] Evaluation of AC corrosion likelihood of buried pipelines application to cathodically protected pipelines: CEN/TS 15280:2006[S]. 2006.
- [21] 1 000 kV 架空输电线路设计规范: GB 50665—2011[S]. 2011.
Code for design of 1 000 kV overhead transmission line: GB 50665—2011[S]. 2011.

杨丝琪(1994—),女,硕士研究生,主要研究方向为输电线路电磁环境分析、电力系统运行与控制。