DOI: 10.13382/j.jemi.B2002995

高压直流接地极对管道电磁阀的干扰影响研究*

杨 桢 葛 非 李 鑫
(辽宁工程技术大学 电气与控制工程学院 葫芦岛 125105)

摘 要:针对高压直流输电(HVDC)接地极处于单极大地回路运行工况下,很大的入地杂散电流可能产生电磁阀发生误动作的风险,影响管道正常运行。建立了传导干扰对电磁阀线圈影响的数学模型,研究了直流杂散电流引起电磁阀误动作的机制。采用数值模拟的方法,建立国内某 1 100 kV 特高压直流输电工程接地极对附近管道干扰的仿真模型,并设计了管地电位实时数据采集系统。仿真及现场测试结果表明,干扰电压以接地极距离管道最近位置为中心,依次向上下游递减;冬季电磁阀受到的直流干扰是夏季的 3.43 倍;仿真结果和实测结果基本吻合,误差在 10%以内;沿管线增设 4 个和 6 个绝缘接头后使得管地电位差降低 62.1%、71.4%。为可靠预防电磁阀异常工作,在冬季应该加强阀室巡检,并沿管道上下游适当位置安装绝缘接头。

关键词: 接地极;金属管道;电磁阀;电位采集
中图分类号: TM862 **文献标识码**:A **国家标准学科分类代码**: 470.40

Study on interference effect of HVDC grounding electrode on electromagnetic valve in pipeline

Yang Zhen Ge Fei Li Xin
(Liaoning Technical University, Faculty of Electrical and Control Engineering, Huludao 125105, China)

Abstract: As the grounding electrode of HVDC is in single electrode blocking condition, the large stray current into the ground may cause the electromagnetic valve misoperation risk, affecting the normal operation of the pipeline. The mathematical model of the influence of conducting interference on the solenoid valve coil is established, the mechanism of misoperation of electromagnetic valve caused by dc stray current is studied. By means of numerical simulation, a simulation model of grounding electrode interference to nearby pipelines in a 1 100 kV UHVDC transmission project in China was established, and a real-time data acquisition system of ground potential was designed. Simulation and field test results show that the dc interference of the electromagnetic valve in winter is 3.43 times that in summer. The simulation results are basically consistent with the measured results, and the error is within 10%. After adding 4 and 6 insulated joints along the pipeline, the ground potential difference of the pipeline is reduced by 62.1% and 71.4%. In order to reliably prevent abnormal operation of electromagnetic valve, inspection of valve chamber should be strengthened in winter, and insulation joint should be installed along the pipeline upstream and downstream.

Keywords: grounding electrode; metal pipeline; electromagnetic valve; potential acquisition

0 引 言

随着我国国民经济的快速发展,我国高压、特高压直流输电工程和石油天然气管道工程都进入了快速发展阶段。高压直流输电(HVDC)技术缺点之一就是对附近埋地金属管道的直流干扰现象严重,直流干扰主要造成管道腐蚀和管道设备异常两方面影响[1]。国外对 HVDC 干扰问题研究起步较早,研究对象多为低强度的干扰问题[2-3]。国内对 HVDC 干扰问题研究起步较晚,且研究多针对 HVDC 接地极入地电流对管道腐蚀的影响[4-10]。文献[4]针对管道腐蚀和防护措施,通过矩量法和电路相结合建立了直流接地极对埋地金属管道影响的电路模型和计算方法。文献[5]提出了一种采用二阶有限差分技

收稿日期: 2020-03-05 Received Date: 2020-03-05
*基金项目:辽宁省教育厅科学研究经费项目(LJ2019JL013)资助

术求解管道中的感应电流和对地电压的新计算方案。文献[6]研究了增大绝缘防腐层电阻率、增设绝缘接头两种措施对抑制直流影响的效果和规律。文献[7-8]对工程上常用的几种减小直流接地极直流干扰的防护措施进行了总结分析。文献[9]基于提出的评估方法对天然气管道腐蚀速率进行了计算。文献[10-11]从接地极与管道距离、分段隔离和阴极保护三方面研究了埋地管道的防护措施。

目前研究多是围绕 HVDC 接地极入地电流对埋地管道的腐蚀影响,对直流干扰引起管道电磁阀误动作方面研究较少。本文研究了接地极入地电流引起电磁阀工作异常的机制,并利用接地系统及电磁环境分析软件 CDEGS 建立了某±1 100 kV 特高压直流输电工程接地极对附近新气管道电磁影响的仿真模型。计算了接地极附近管段管地电位差,评估了直流干扰对管道电磁阀的影响程度,并进行现场测试验证,最后结合仿真结果,研究了增设绝缘接头防护措施的优化设计方案。

1 直流接地极对管道电磁阀的干扰机制研究

电磁阀是 Shafer 气液联动阀中 Lineguard 电子控制箱中的执行部件,当外部电源接通时,电磁阀线圈通电产生电磁力吸引阀芯,阀门打开,断电时阀门关闭[12]。电磁阀误动作是典型的受传导干扰问题,干扰源为接地极入地杂散电流。当 HVDC 一极出现停运或发生故障时,接地极以单极大地回路方式运行,此时入地电流达到数千安培。电流在连续土壤介质中传导遵循欧姆定律,电流入地点和远方大地间会产生电位差。当有管道靠近接地极时,靠近接地极的管段和远处管段地电位不同,而管道电位沿管线变化较小,因此电流会从管道防腐层破损点流入或流出管道,产生阻性耦合杂散电流。杂散电流对电磁阀的干扰如图 1 所示。

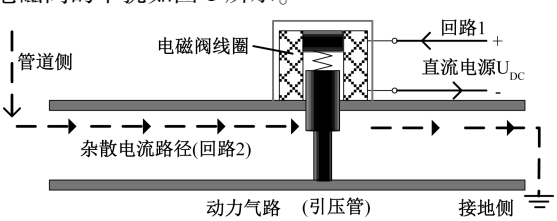


图 1 电磁阀干扰示意图

Fig. 1 Diagrammatic sketch of electromagnetic valve interference

图 1 中回路 1 为正常回路,直流电源 U_{DC} 给电磁阀线圈供电产生电磁力吸引关闭件,阀门正常动作。Lineguard 电子控制箱通过引压管与埋地管道相连,并具有保护接地[13]。直流干扰作用下,沿管体流动的杂散电流通过管道侧引压管流经控制箱中的电磁阀,然后通过接地侧引压管流入大地,从而构成了杂散电流回路(图 1 中回路 2)。回路 2 和回路 1 之间的公共线路阻抗构成耦合干扰,公共线路阻抗包括土壤电阻、管道绝缘层漏点处接触电阻以及管体电阻。杂散电流的任意变化都会影响电磁阀线圈电压,引起电磁阀动作特性改变,传导干扰下电磁阀线圈电路方程式如下:

$$\begin{cases} \dfrac{d_\psi}{d_t} = u - iR \\ u = u_c + u_i \end{cases} \tag{1}$$

式中:ψ 为电磁线圈磁链; u 为电磁线圈激励电压; i 为线圈电流; u_c 为正常工作下线圈电压; u_i 为传导干扰作用在电磁线圈上产生的电压。

传导干扰作用下电磁阀激励电压改变,引起线圈电流发生变化,对于一定的线圈电流,电磁线圈对阀门关闭件的电磁力为:

$$F = \frac{\mu S}{2K_f^2\delta^2}(Ni)^2 \tag{2}$$

式中:μ 为真空磁导率,$4\pi\times10^{-7}$; S 为磁路截面积; K_f 为漏磁系数,电磁阀一般为 1.2~5.0;δ 为气隙长度; N 为线圈匝数。

根据以上分析,杂散电流通过公共线路阻抗耦合至电磁阀回路,使得电磁阀动作特性改变而误动作,杂散电流与管道和附近大地电位之间的差值成正比,因此可通过检测管地电位差来评估电磁阀误动作的风险。文献[14-16]通过对埋地金属管道和绝缘涂层等值电路计算了管道沿线管地电位差,如下所示:

$$\varphi(x) = \frac{r}{2}\int_0^{+\infty} V(\mu)\left[e^{-r|x-\mu|} + e^{-r|x+\mu|}\right] d\mu \tag{3}$$

式中: $r = \sqrt{ZG}$, Z 为管道单位长度电阻, G 为管道单位长度对地电导,由管道涂层电导和涂层对地电导串联组成; $V(\mu)$ 为激励源。

以管地电位差作为高压直流输电接地极对埋地管道电磁阀干扰影响程度的指标,基于此思路,以国内某 1 100 kV 特高压直流输电工程接地极对附近埋地管道的干扰为研究对象,计算了不同管段处管地电位差的分布,并研制了管地电位数据采集系统,通过现场采集数据对仿真结果进行实测验证,最后提出了直流干扰的抑制措施。

2 高压直流输电接地极对管道电磁阀的干扰影响计算

2.1 计算模型

利用大地电磁场专用分析软件 CDEGS 建立某

1 100 kV 特高压直流输电工程对附近埋地管道干扰的仿真模型。本文采用 CDEGS 软件的 MALZ 模块进行计算，根据接地极与管道的地理位置进行三维矢量建模，管道走向与接地极相对位置关系如图 2 所示。

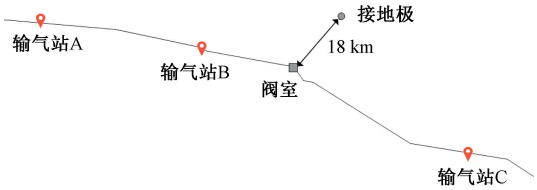


图 2　接地极与管道等效模型

Fig. 2　The equivalent model of DC grounding electrode and the pipeline

评估模型中接地极与埋地金属管道最短距离为 18 km，计算过程中接地极在单极大地回路运行方式下额定入地电流为 5 455 A，该接地极为双圆环结构，采用 Φ55 mm 的高硅烙铁，内环半径 200 m，外环半径 400 m，埋深 3 m。埋地金属管道采用 X80 管线钢，内半径 0.598 5 m，外半径 0.609 5 m。涂层为 3PE 防腐层，层厚 3 mm，涂层电阻率 3×10^5 Ωm^2。接地极附近冬夏两季土壤电阻率如表 1 所示。

表 1　土壤电阻率数据

Table 1　Earth resistivity data

层序	冬季		夏季	
	层厚/m	电阻率/(Ω·m^{-1})	层厚/m	电阻率/(Ω·m^{-1})
1	2	303	2	40
2	3	122	8	100
3	50	80	20	56
4	200	25	600	41
5	200	128	350	78
6	200	389	200	246
7	200	370	230	366
8	250	544	400	422

2.2　管地电位差的分布

数值模拟过程中考虑接地极以阳极方式运行，既向大地注入单极额定电流。根据夏季六月份和冬季一月份的多水平分层土壤电阻率数据，计算冬夏两季管地电位差的分布，图 3 所示为夏季管地电位差分布，图 4 所示为冬季管地电位差分布。

从冬夏两季管地电位差的分布规律可以得出如下结论。

1）最高的管地电位差出现在距离接地极最近的管段，夏季最高管地电位差为 6.82 V，冬季为 23.4 V，管段不同位置处冬季管地电位差普遍高于夏季，可见管道电磁阀在冬季受到的直流干扰更大。

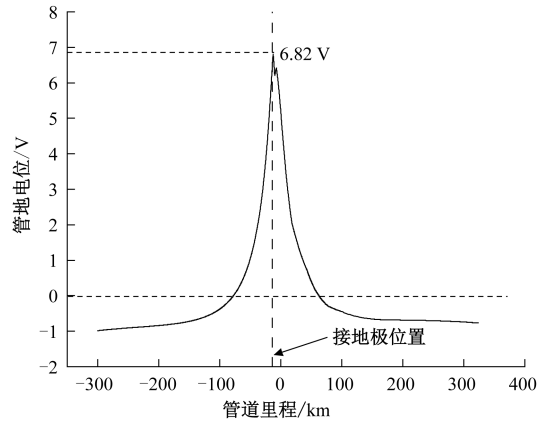


图 3　夏季管地电位差分布

Fig. 3　Distribution of the voltage between the pipeline and the near earth in summer

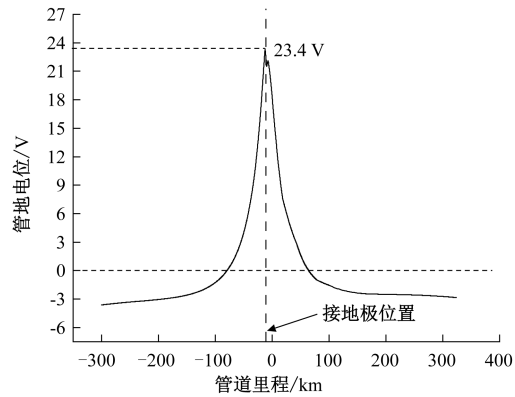


图 4　冬季管地电位差分布

Fig. 4　Distribution of the voltage between the pipeline and the near earth in winter

2）以距离接地极最近的管道位置为中心，该处上下游管地电位差基本呈现对称分布。管地电位差依次向上下游递减，随着与接地极距离的增加，管地电位差下降速度逐渐变小。

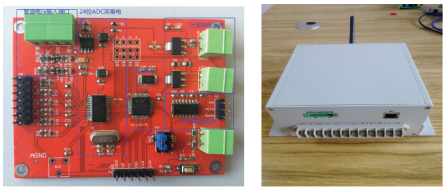
3）在管道距离接地极最近位置上游大约 67 km 和下游大约 76 km 处，冬季干扰电压出现极性反转，电流由靠近接地极处的流入管道转换为流出管道，夏季干扰电压极性反转点出现在上游 65 km 和下游 74 km 处，极性反转点基本一致。

对冬夏两季管地电位差的分布规律进行对比分析可知，冬季最高干扰电压为夏季的 3.43 倍，冬季高压直流输电接地极对管道电磁阀的直流干扰影响更大。土壤电阻率随季节变化较大，相比于冬季，夏季土壤含水量大，温度较高，导电性能更好，土壤电阻率较低。电阻率越小接地极附近管道处土壤单位和管道单位长度对地电导越小，因此管道受到的直流干扰越小。

3 管地电位差现场测试验证

3.1 管地电位差数据采集系统研制

为了测量管地电位差,对电磁阀工作异常的风险进行评估,自主设计了基于 STM32 微控制器的管道干扰电位实时数据采集系统,能够实现对电位数据的采集并在计算机上显示。该系统工作电压 12 V,电压采集范围为 −30~+310 V。电位数据采集模块实物图如图 5 所示,室内实验测试平台如图 6 所示。



(a) 采集主板 (b) 采集系统
(a) Acqui sition main board (b) Acquisition system

图 5 实时数据采集系统

Fig. 5 Real-time data acquisition System

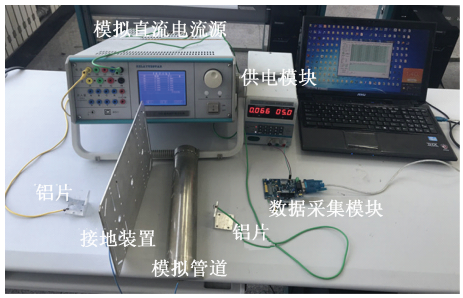


图 6 电位采集系统实验平台

Fig. 6 Experimental platform of potential acquisition system

该系统包括电源模块、电位采集系统、模数转换模块、基准源以及通信传输模块[17-18]。电源模块用于给信号转换模块、控制模块和通信传输模块提供 5 及 3.3 V 的稳定电压,并给模数转换模块提供高精度、高稳定性的基准电压;电位采集模块检测参比电极与测试桩之间电极电势差,并对采集的电位信号进行分压,使得采集的电位信号小于 5 V;模数转换模块用于将采集到的电压进行模数转换,将金属埋地管道的电位信号转换为离散的数字信号;通过 STM32 基于改进阈值函数的小波变换方法对管道电位的离散数字信号进行去燥和分频处理[19-20],得到不同频率下的电位幅值和不同时间点的电位信号幅值。

进行实验室模拟实验来验证电位采集系统的精确度,采用局部换土方法,将液体、金属屑和盐等掺拌在部分土壤中。利用安捷伦公司生产的 5 位半数字万用表 34450A 来测定标准值,该万用表精度高,可作为参考标准。改变局部土壤电阻率,通过采集模块接地端接触不同测试点的土壤来实现多电位数据的采集,结果如表 2 所示。从表 2 可以看出,自动电位采集系统精度在 5 mV 以内,满足对电位采集的精度要求。

表 2 实验测试数据

Table 2 Experimental test data

测试点	数据采集装置/V	万用表/V	绝对误差/V
1	0.424	0.427	0.003
2	0.419	0.420	0.001
3	0.415	0.417	0.002
4	0.411	0.414	0.003
5	0.407	0.412	0.005
6	0.403	0.406	0.003
7	0.401	0.404	0.003
8	0.395	0.398	0.003
9	0.390	0.393	0.003
10	0.388	0.389	0.001

3.2 管地电位差现场测试

利用自主设计的管地电位自动数据采集系统对接地极附近天然气管道进行电位数据测试,现场测试如图 7 所示。电位采集仪安装在埋地管道测试桩中,采集仪拥有两个探针,其中一个探针接触点与埋地管道测试桩连接,另一个探针与参比电极相连,检测管体与参比电极之间的电势差。参比电极的安装位置距离管道 300 mm 左右,深度距离地面 1 m 以上,保证参比电极长期处于湿润的环境中。

(a) 电位采集系统安装
(a) Installation of potential acquisition system

(a) 埋设参比电极
(a) The reference electrode is embedded

图 7 现场测试

Fig. 7 Field test

测试期间接地极处于阳极运行状态,向大地注入电流 5 545 A,持续时间为 1 h。接地极入地电流在土壤中呈半球状扩散,距离接地极最近处管道上下游的管段受到直流干扰基本呈对称分布,因此只对管道下游管地电位数据进行测试。测试范围为接地极最近处阀室至输气站 C 之间,测试桩之间相隔 10 km。夏季 6 月份和冬季 1 月份管道下游管地电位差测试结果与数值模拟结果对比如图 8 和 9 所示。

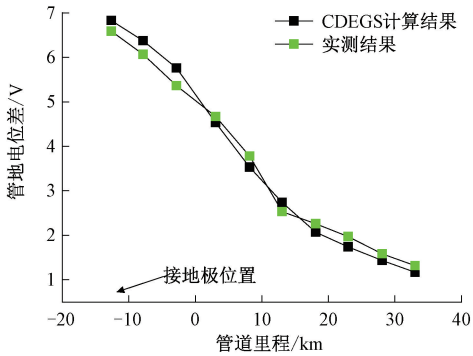


图 8　夏季管地电位差实测结果

Fig. 8　Measurement results of the voltage between the pipeline and the near earth in summer

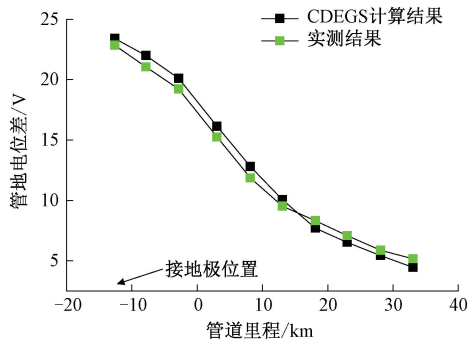


图 9　冬季管地电位差实测结果

Fig. 9　Measurement results of the voltage between the pipeline and the near earth in summer

从图 8、9 可以看出,管地电位差实测数据与数值模拟计算的结果基本吻合,随着与接地极距离的增加,管地电位差呈降低趋势,各个测试点处冬季管地电位差关于夏季。冬季管地电位差最大为 23.41 V,实测值为 22.15 V,误差为 5.7%;夏季接管地电位差最大为 6.82 V,实测值为 6.51 V,误差为 4.8%,在接地极附近实际测量结果与仿真计算结果误差较小。在距离接地极较远处,相对误差较高,达到了 10%。这是因为数值模拟计算所选用的土壤电阻率参数参考的是接地极附近土壤,而接地极近处和远处土壤电阻率由于土壤导电离子浓度、湿度、温度和土壤结构分层的不同而变化,因此会出现一定误差。

4　直流干扰抑制方法研究

数值模拟结果与现场实测结果基本一致,基于 CDEGS 软件的数值模拟方法能够准确评估接地极对管道的干扰程度,本文将利用该方法对接地极对电磁阀的直流干扰影响开展抑制方法研究。为了减小管道电磁阀误动作的风险,需要降低直流干扰电压幅值,减小传导干扰在电磁阀线圈上产生的电压。在管道上增设绝缘接头是显著降低干扰电压幅值最有效的方法之一。管体电阻很小,整段金属管道接近于等电位,管道各处管地电位差在该处地电位最大值和最小值之间波动,通过绝缘接头将整段等电位的管道合理分成电气绝缘的几段,使得每段管道的管地电位在范围更小的地电位之间波动,达到降低管道干扰电压的目的。增设绝缘接头还能阻断管道轴向电流,若电磁阀附近管段绝缘层良好,电磁阀线圈只受管道轴向电流的影响,则增设绝缘接头能够彻底消除直流干扰下电磁阀误动作的风险。

绝缘接头的安装位置对干扰抑制效果的影响很大,安装不合理可能可能导致绝缘接头两端电压过高,影响管道安全运行。图 10 所示为增设的 4 个和 6 个绝缘接头在管道阀室上下游的具体相对位置。图 11、12 所示为增设 4、6 个绝缘接头与无缓解情况下的管地电位分布。

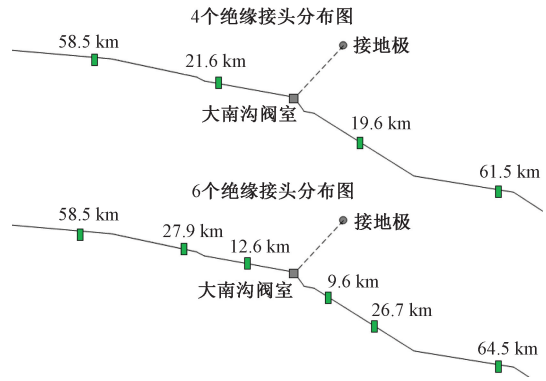


图 10　绝缘接头位置图

Fig. 10　Insulation joint distribution

管道中干扰电流在整条管段上下游对称分布,距离接地极最近的管道处轴向干扰电流为 0,该位置等效于安装了一个绝缘接头。增设 4 个绝缘接头相当于把整条管道分割成 6 段,根据图 9 可以看出,管道最大干扰电压约为 8.9 V,对比无绝缘接头情况下最大干扰电压降低了 62.1%;增设 6 个绝缘接头相当于把整条管道分割成 8 段,根据图 10 可以看出,管道最大干扰电压约为 6.7 V,对比无绝缘接头情况下最大干扰电压降低了 71.4%。绝缘接头位置处电压波动较大,增设 4 个绝缘接头情况下

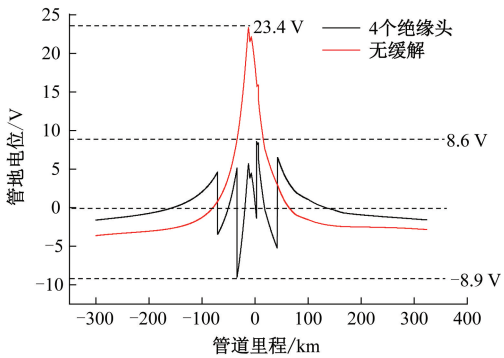


图 11 增设 4 个绝缘头前后管道干扰电压分布

Fig. 11 Distribution of the voltage between the pipeline and the near earth (four insulated joints)

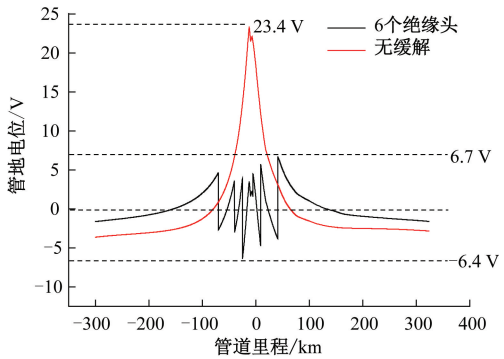


图 12 增设 6 个绝缘头前后管道干扰电压分布

Fig. 12 Distribution of the voltage between the pipeline and the near earth (six insulated joints)

在阀室上游 21.6 km 绝缘接头处电压波动最大约为 14 V,可能会引起电磁阀误动作。

根据以上分析可知,增设绝缘接头能够明显减小直流干扰电压幅值,减小电磁阀误动作的风险。增设绝缘接头的数量越多,干扰电压幅值越低。绝缘接头位置处干扰电压波动较大,因此分段绝缘防护措施应该与其他保护措施共同作用,例如恒电位控制的强制电流阴极保护系统或牺牲阳极保护等。加设绝缘接头的数量越多,相应的投资也会变大,应该综合考虑管道被干扰情况、缓解效果和经济性等因素来考虑安装绝缘接头的数量。

5 结 论

本文构建了电磁阀受传导干扰影响的数学模型,研究了接地极入地电流产生的电磁传导干扰引起电磁阀误动作的机理。提出通过检测管地电位差的大小来对电磁阀误动作的风险进行评估。通过数值模拟的方法,对国内某±1 100 kV 特高压直流输电工程接地极对附近埋地管道的直流干扰影响进行计算。设计了管地电位数据采集系统,对现场管道电位数据进行实测验证,仿真与实测结果基本吻合。计算和实测结果表明,冬季接地极对附近管道的干扰影响是夏季的 3.43 倍,冬季电磁阀误动作风险更大。在管道上增设绝缘接头可以显著降低管地电位差,可通过沿管道上下游增设绝缘接头来降低电磁阀误动作的风险。

参考文献

[1] 刘昌, 孟晓波, 樊灵孟, 等. 直流工程接地极入地电流对埋地金属管道的影响[J]. 南方电网技术, 2015, 9(3): 15-20.
LIU CH, MENG X B, FAN L M, et al. Influence of ground return current from HVDC earthing electrode on buried metal pipe-line [J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(3): 15-20.

[2] PAN Z, LI W, LIU C, et al. Earth surface potential induced by ground-return current of HVDC links part I: Measurement and estimation of the earth resistivity[C]. IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application. IEEE, 2016: 1-4.

[3] GHANBARI E, LILLARD S, IANNUZZI M, et al. Corrosion behavior of buried pipeline in presence of AC stray current in controlled environment [C]. NACE International Corrosion, 2015: 11-17.

[4] 曹方圆, 孟晓波, 廖永力, 等. 直流接地极对埋地金属管道影响的电路模型及应用[J]. 电网技术, 2016, 40(10):3258-3264.
CAO F Y, MENG X B, LIAO Y L, et al. Circuit model and application for influence of DC ground electrode on buried metal pipelines[J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 3258-3264.

[5] 李本良, 葛小宁, 李燕雷, 等. 计算±1 100 kV 特高压直流输电线路对埋地油气管线磁感应影响的快速二阶差分方法[J]. 电网技术,2019,43(9):3305-3310.
LI B L, GE X N, LI Y L, et al. A fast second-order difference method for calculating the magnetic inductive influence of ±1 100 kV HVDC transmission line on the buried oil and gas pipeline[J]. Power System Technology: 2019,43(9):3305-3310.

[6] 孟晓波, 曹方圆, 廖永力, 等. 抑制直流接地极影响的管道绝缘防护措施分析[J]. 高电压技术, 2017, 43(12): 3900-3906.
MENG X B, CAO F Y, LIAO Y L, et al. Analysis of insulation methods to reduce influences of DC grounding electrode on pipeline [J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(12): 3900-3906.

[7] 孟晓波, 廖永力, 李锐海, 等. 金属管道受入地电流

影响的抑制措施研究[J]. 南方电网技术, 2015, 9(2): 62-67.
MENG X B, LIAO Y L, LI R H, et al. Research on repressive measures of the influence of the ground return current on the metallic pipeline[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(2): 62-67.

[8] 商善泽. 直流接地极入地电流对埋地金属管道腐蚀影响的研究[D]. 北京:华北电力大学,2016.
SHANG SH Z. Research on the corrosion influence of ground current from DC earth electrode on the buried metal pipeline[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.

[9] 种芝艺, 宋胜利, 谭波, 等. 特高压直流工程接地极对附近油气管线的影响研究[J]. 电网技术, 2019, 43(3): 1099-1104.
ZHONG ZH Y, SONG SH L, TAN B, et al. Study on influence of converter grounding electrode of UHVDC project on nearby oil and gas pipelines[J]. Power System Technology, 2019, 43(3): 1099-1104.

[10] 杨超, 李兆玲, 杨任继, 等. 高压直流接地极对埋地管道的干扰及防护[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2017, 41(6): 166-170.
YANG CH, LI ZH L, YANG R J, et al. Interference and protection of buried pipelines due to HVDC grounding electrode[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2017, 41(6): 166-170.

[11] 李丹丹,毕武喜,祁惠爽, 等. 交叉并行管道阴极保护干扰数值模拟[J]. 油气储运,2014,33(3):287-291.
LI D D, BI W X, QI H SH, et al. Numerical simulation of cathodic protection interference in cross/parallel pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2014, 33(3): 287-291.

[12] 汪世军. Shafer 气液联动阀执行机构功能与维护[J]. 油气储运,2010,29(4):296-298,237.
WANG SH J. Function of Shafer gas hydraulic valve actuator and care [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2010,29(4):296-298,237.

[13] 曹国飞,丁疆强,祝令卿, 等. 高压直流接地极放电对输气阀室仪表影响研究[J]. 天然气与石油,2019, 37(3):94-98.
CAO G F, DING J Q, ZHU L Q, et al. The influence of HVDC grounding electrode discharge on the instrument of line valve chamber[J]. Natural Gas and Oil, 2019, 37(3):94-98.

[14] 任志超. 直流系统接地极电流场的分布特性及其对交流电网影响的研究[D]. 成都:西南交通大学, 2012.
REN ZH CH. Distribution characteristics of DC system grounding electrode current field and its effect on Ac power grid [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.

[15] 李景丽, 张宇, 郭丽莹, 等. 复杂土壤结构对水电站接地装置散流机理影响分析[J]. 电工技术学报, 2017, 32(23): 167-175.
LI J L, ZHANG Y, GUO L Y, et al. Analysis the effect of complex soil structure on the dispersion mechanism of the grounding device in the hydropower station [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(23): 167-175.

[16] 钱成. 直流接地极入地电流对埋地金属管道的电磁影响分析[D]. 吉林:东北电力大学,2018.
QIAN CH. Research on the electromagnetic Influence of ground current from dc Earth electrode on the buried metal Pipeline [D]. Jilin: Northeast Electric Power University, 2018.

[17] 杨理践,耿浩,高松巍. 长输油气管道漏磁内检测技术[J]. 仪器仪表学报,2016,37(8):1736-1746.
YANG L J, GENG H, GAO S W. Magnetic flux leakage internal detection technology of the long distance oil pipeline[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(8): 1736-1746.

[18] 梁耀球,陈尚财,管锡昭, 等. 智能电位采集系统在航油管道上的应用[J]. 全面腐蚀控制,2017,31(7):41-44,75.
LIANG Y Q, CHEN SH C, GUAN X ZH, et al. Application of intelligent potential acquisition system in aviation oil pipeline[J]. Total Corrosion Control, 2017, 31(7): 41-44,75.

[19] 阎妍,行鸿彦. 基于小波包多阈值处理的海杂波去噪方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(8): 172-178.
YAN Y, XING H Y. Sea clutter de-noising based on wavelet packet multi-threshold method[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(8): 172-178.

[20] 周金,高云鹏,吴聪,等. 基于改进小波阈值函数和 CEEMD 电能质量扰动检测[J]. 电子测量与仪器学报,2019,33(1):141-148.
ZHOU J, GAO Y P, WU C, et al. Detection of power quality disturbances based on improved wavelet threshold function and CEEMD [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(1): 141-148.

作者简介

杨桢,2002 年于辽宁工程技术大学获得学士学位,2006 年于辽宁工程技术大学获得硕士学位,2016 年于辽宁工程技术大学获得博士学位,现为辽宁工程技术大学副教授、博士生导师,主要研究方向为智能电网理论与技术。

E-mail:yangzhen1980219@ 163. com

Yang Zhen received his B. Sc. degree from Liaoning Technical University in 2003, M. Sc. degree from Liaoning Technical University in 2006, Ph. D., degree from Liaoning Technical University in 2016. Now he is an associate professor and Ph. D. supervisor at Liaoning Technical University. His main research interests include the smart grid theory and technology.