

高压直流接地极对埋地管道的干扰及防护研究

赵雅蕾¹, 李自力¹, 房翔鹏², 杨超¹, 崔淦¹

(1. 中国石油大学(华东) 山东省油气储运安全省级重点实验室 青岛市环海油气储运技术重点实验室, 山东 青岛 266580;
2. 青岛新奥燃气有限公司, 山东 青岛 266580)

摘要: 高压直流输电线路与埋地管道路由选择的相似性导致管道不可避免地进入高压直流干扰影响区。为探究公共走廊内高压直接地极对埋地管道的干扰与防护规律,采用边界元软件计算了不同防腐层破损率、不同管道到接地极距离下的高压直流干扰强度,分析了分段绝缘措施和缓解锌带的防护效果。结果表明,防腐层均匀破损率越小,干扰电流越集中,局部腐蚀风险越高;绝缘法兰之间的管段受到的干扰得到缓解,而隔离区外管段受到的干扰加剧;缓解锌带的保护范围有限,与锌带长度相当。最后,提出了分段绝缘、阴极保护、缓解锌带相结合的综合防护措施。

关键词: 接地极; 管道; 直流干扰; 防护措施; 数值计算

中图分类号: TG174 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1006-396X.2017.06.014

Interference and Mitigation of HVDC Grounding Electrode on Buried Pipelines

Zhao Yalei¹, Li Zili¹, Fang Xiangpeng², Yang Chao¹, Cui Gan¹

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Oil & Gas Storage and Transportation Safety, Qingdao Key Laboratory of Circle Sea Oil & Gas Storage and Transportation Technology,
China University of Petroleum (East China), Qingdao Shandong 266580, China;
2. Qingdao Xinao Gas Co., Ltd., Qingdao Shandong 266580, China)

Abstract: Due to the similarity of the routing between HVDC transmission lines and buried pipelines, the local pipelines inevitably enter the HVDC transmission interference zone. In order to study the law of interference and mitigation of HVDC grounding electrode on buried pipeline, boundary element software was used to calculate the effectiveness of various mitigation methods including anti-corrosion coating, the distance between the pipeline and the grounding electrode, insulating joints and zinc ribbon. The results indicated that the smaller the coating breakdown factor was, the more concentrated the interference current was, and the higher the local corrosion risk was. After installing the insulating joints, the strongest interfered section of pipe was alleviated, while the interference of the other section of pipe was aggravated. The protection range of the zinc ribbon was equivalent to the length of the zinc ribbon. Finally, the paper put forward the comprehensive protection measures which included insulating joints, cathodic protection and zinc ribbon.

Keywords: Electrode; Pipeline; DC interference; Mitigation; Numerical simulation

相比高压交流输电技术,高压直流输电(HVDC)技术在长距离、大容量输电等方面占据优势,并以其低损耗、可实现不同电网互联等优点而受到重视^[1]。HVDC技术常采用双极对称输电模式,该模式下流经土壤的电流仅占额定电流的1%,但在HVDC系统投运初期或故障检修期间,接地极采用单极-大地模式运行,高达数千安的电流流入大地。瞬间大电流会加速管道腐蚀,击穿埋地管道防

腐层,烧毁附近的阴极保护设备,对操作人员造成人身伤害^[2-5]。因此,开展接地极对埋地管道干扰的相关研究对保障管道安全运行有重要意义。

针对HVDC干扰的严重性,P. Nicholson^[6]、李振军^[7]、R. Z. Qin等^[8]通过现场测试研究了直流接地极对埋地管道的影响规律与干扰程度。观测点的管道干扰电压高达上百伏,最大泄R. Z. Qin等^[8]测试发现,3 200 A的入地电流在KP4708漏电流密度

收稿日期:2017-09-16 修回日期:2017-09-29

作者简介:赵雅蕾(1992-),女,硕士研究生,从事油气储运系统安全工程技术研究;E-mail:zhaoyaleix@163.com。

通信联系人:李自力(1963-),男,博士,教授,从事油气储运系统安全工程技术研究;E-mail:zilimenhuzu@163.com。

为 82 A/m^2 , 腐蚀速率高达 0.55 mm/d , 瞬间大电流造成引压管和绝缘卡套的打火放电及泄漏, 烧毁恒电位仪。1988 年, P. J. Lagace 等^[9]开展了相关理论计算, 基于拉普拉斯方程求解了 4 层土壤模型中圆环接地极周围土壤的地表电位, 建立了管道传输线型等值模型, 推导出接地极干扰下管内电流、泄漏电流密度、管道电位计算公式, 并使用 C. E. Caroli 等^[10]的现场测试结果进行验证。但上述理论推导未考虑管道极化特性。商善泽^[11]研究表明, 在未考虑管道极化效应的情况下, 接地极与管道安全距离的计算结果过于保守。李丹丹^[12]通过 ANSYS-CFX 模块建立接地极干扰模型, 研究入地电流、管道纵向电阻、土壤电阻率等因素对管道直流干扰电压、管内电流、地电位升与管道泄漏电流密度的影响。曹方圆等^[13]建立了防护措施的等效电路模型, 使用 CDEGS 软件计算了牺牲阳极、强制阴极排流、绝缘接头、局部接地设备等防护措施对管地电位的影响。随着输电线路电压等级的提高, 位于公共走廊内的管道所受的直流干扰问题越来越严重, 有必要对其进行深入研究, 从而采取合理的防护措施。

为此, 采用边界元软件计算了不同防腐层破损率、不同管道到接地极距离下的高压直流干扰强度, 分析了分段绝缘措施和缓解锌带的防护效果。并取 100 mV 为管地电位正向偏移的限值, 给出不同入地电流、土壤电阻率下的防护距离建议; 提出分段绝缘、阴极保护、缓解锌带相结合的综合防护措施, 研究结果可以为管道和电力专业人员提供参考。

1 HVDC 干扰计算模型

1.1 模型建立

HVDC 干扰计算模型如图 1 所示。

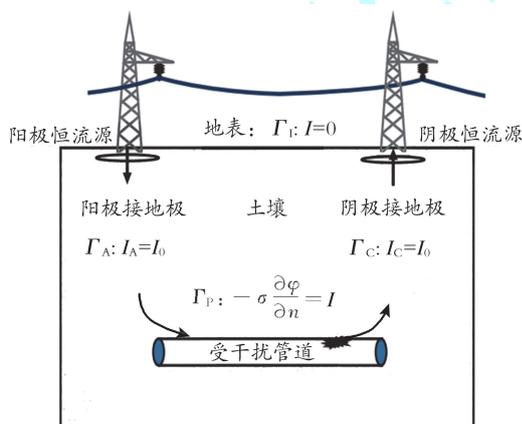


图 1 HVDC 干扰计算模型

Fig.1 Calculation model for HVDC interference

将高压直流接地极对埋地管道的干扰问题作如下简化: (1) HVDC 干扰处于稳定状态, 地电场为稳定静电场; (2) 管道极化特性不会瞬时改变; (3) 土壤中电流流动遵从欧姆定律; (4) 土壤介质外部的电气连接线路电阻大小可忽略。 (5) 计算土壤区域为半无限大区域, 假设无限远处土壤电位为自然电位。

当高压直流接地极单极运行处于稳态时, 接地极周围地电场处于稳态, 则管道上的电位分布也为稳定状态。求解的区域内部既没有电流的得失, 也不存在源点或汇点, 且系统状态不随时间发生变化, 因此可采用拉普拉斯方程来描述接地极入地电流稳定时接地极周围土壤中的电场分布, 并计算管地电位分布^[12,14]。

计算模型的边界条件为: (1) 土壤与空气接触界面电气绝缘, 法向电流密度为 0; (2) 无限远边界上电位已知, 假设无限远处土壤电位为 0; (3) 边界电流密度已知, 接地极圆环为恒定电流密度边界; (4) 边界上电位与电流密度关系已知, 管道边界条件为阴极极化曲线。

1.2 计算参数设置

计算参数主要包括 3 部分: 接地极特性参数、管道特性参数、土壤参数。根据石油、电力行业标准以及相关文献选取具体参数^[15-17]。在图 1 模型中, 采用单圆环接地极, 半径为 250 m , 埋深为 3.5 m , 钢棒外部包覆焦炭填充截面为 $0.6 \text{ m} \times 0.6 \text{ m}$, 接地极单极运行时入地电流 5000 A , 管道设计外径为 1016 mm , 管中心埋深取 2 m , 接地极与管道距离 10 km , 新建管道防腐层破损率取 1% 。当没有杂散电流存在时, 管地电位为 -600 mV (相对于饱和氯化银参比), 土壤电阻率为 $50 \Omega \cdot \text{m}$ 。

1.3 模型验证

文献^[12]利用自动电位采集仪对管地电位进行连续检测, 本文选取干扰时间较长且管地电位稳定管段 (选择 462#、465# 测试桩第 1 833 h 的管地电位) 进行模型验证。模型计算的参数取值与文献^[12]一致, 模拟结果与实际测量数据见表 1、图 2。由表 1 和图 2 可知, 模拟结果与实际测量数据之间的误差低于 5% , 该模型可以用于后续研究。

表 1 模型验证结果

位置/km	$U_{模拟}/\text{V}$	$U_{测量}/\text{V}$	误差/%
2.7	1.734	1.68	3.11
4.9	2.648	2.53	4.45

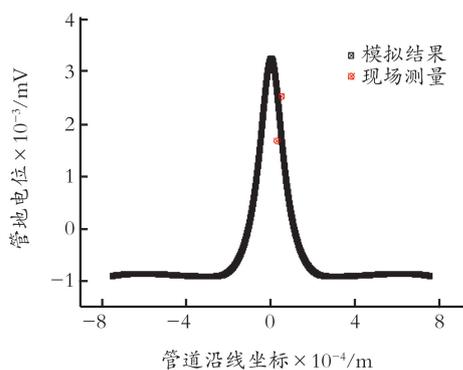


图 2 模型验证结果

Fig.2 Model validation results

2 模拟结果与分析

2.1 防腐层破损率对 HVDC 干扰的影响

2.1.1 防腐层均匀破损率对 HVDC 干扰的影响

在金属表面敷设防腐层是防止金属腐蚀的最普遍而重要的方法。一方面,防腐层可以隔离金属管道与周围土壤介质,阻止金属表层腐蚀微电池的作用;另一方面,防腐层可以防止金属管道的机械损伤以保证管道的完整性。管道防腐层破损不仅使防腐层面电阻减小,黏结力降低,阴极保护电流流失,也增大了管道发生局部腐蚀穿孔的风险。模型中其余参数不变,选取防腐层均匀破损率为 0.5%、1%、5%、10%、50%、100%,计算得到不同防腐层破损率下管地电位的分布和变化曲线见图 3。不同防腐层破损率下管地电位最大偏移量的变化曲线见图 4。

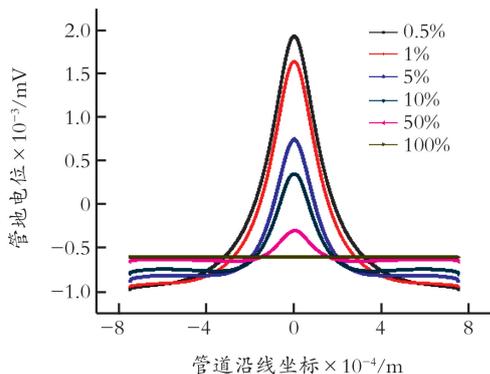


图 3 不同防腐层破损率下管地电位分布

Fig.3 The pipe-to-soil potential under different coating breakdown factors

由图 3 可知,防腐层破损率为 50% 的管道与裸管的管地电位偏移变化基本在 400 mV 以内,裸管管地电位的波动情况远远小于小破损率管道,并且破损率越小,管地电位绝对值越大,中间位置干扰越严重。这是因为直流杂散电流放电更趋向于集中在界面电阻小、易放电的局部位置,导致破坏性极强,在短时间内即可导致管线发生腐蚀穿孔。因此,对

于防腐层来说,杂散电流对小破损率的管道的腐蚀问题远远高于大破损率,这主要体现在管道腐蚀穿孔问题上,而当破损率达到 50% 时,从保护电位的角度上来说基本可认为防腐层已经失效。由图 4 可知,随着破损率的增大,管地电位的最大偏移先急剧减小,在破损率大于 10% 以后变化较为平稳。

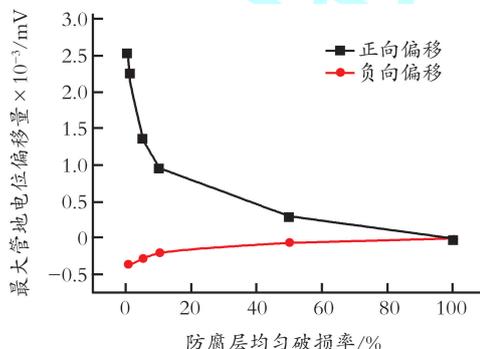
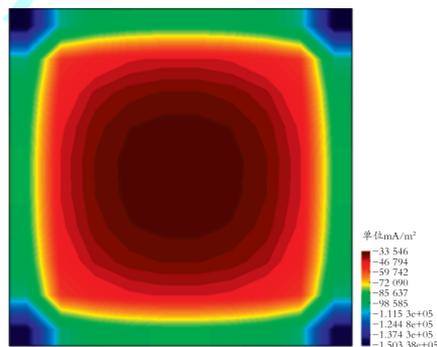


图 4 不同防腐层破损率下管地电位最大偏移

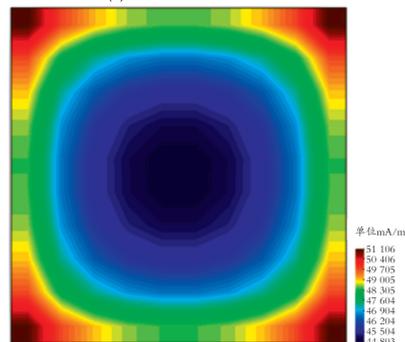
Fig.4 The maximal pipe-to-soil potential shift under different coating breakdown factors

2.1.2 防腐层局部破损

以管道距离接地极 860 m 为例,在距离接地极最近的管道处设置 1 cm² 的防腐层破损,计算了 1 cm² 破损处的泄漏电流密度,如图 5 所示。



(a) 接地极阳极工作



(b) 接地极阴极工作

图 5 破损点处泄漏电流密度

Fig.5 The current density of holidays

由图 5(a)可知,当接地极阳极放电时,靠近接地极的管道为阴极,电流经防腐层破损处流入管道,管道上流入的最大电流密度为 150.380 A/m²。由图 5(b)可知,当接地极阴极放电时,靠近接地极的

管道为阳极,电流经防腐层破损处流入土壤,此时流出的最大电流密度为 51.106 A/m^2 。根据法拉第电解定律, $1 \text{ A/m}^2 = 1.174 \text{ mm/a}$, 腐蚀速率高达 60.0 mm/a 。因此,应采用加强级防腐层,及时修复破损点,尽量保证防腐层的完整性以减小杂散电流流入、流出^[18]。

2.2 管道与接地极间距对 HVDC 干扰的影响

DL/T 5224—2014《高压直流输电大地返回运行系统设计技术规定》中指出:如果接地极与地下金属管道、地下电缆、非电气化铁路等地下金属构件的最小距离(d)小于 10 km ,或者地下金属管道、地下电缆、非电气化铁路等地下金属构件的长度大于 d ,应计算接地极地电流对这些设施产生的不良影响。因此,以入地电流 $5\,000 \text{ A}$ 为例,计算管道与接地极距离分别为 0.86 、 5 、 10 、 30 、 60 km 下的管地电位与管地电流密度,如图 6、7 所示。

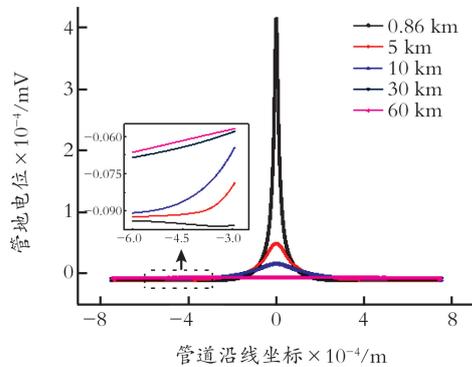


图 6 不同管道与接地极距离下管地电位分布

Fig.6 The influence on averaged potential of electrode-to-pipe distance

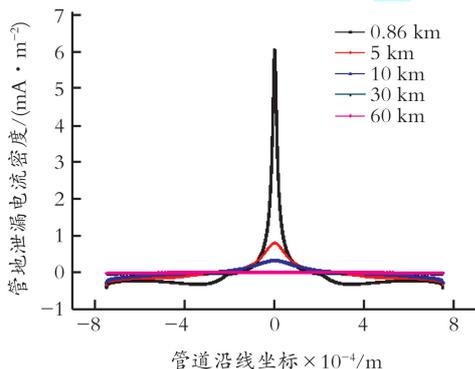


图 7 不同管道与接地极距离下管地电流密度分布

Fig.7 The influence on averaged current density of electrode-to-pipe distance

图 6、7 给出了管地电位和管地电流密度随距离的变化曲线,在 $0 \sim 30 \text{ km}$ 时,随着距离的增大,管地电位和管地电流密度急剧减小,当距离大于 30 km 时减小程度明显减弱;通过距离为 30 、 60 km 的变化曲线可以看出,随着距离的增大,管地电位和管地电流密度基本不变。因此,在实际工程中,应使高

压直流接地极与管道的最小距离至少为 30 km ,并且至少应评估接地极对周围 60 km 范围内埋地管道的干扰影响。

石油标准规定^[19]:对于未施加阴极保护的管道,当其任意点上管地电位较自然电位正向偏移大于或等于 100 mV 时,管道干扰程度为不可接受,应及时采取干扰防护措施。一般模型计算过程中都不考虑阴极保护系统,以管道上的正向偏移电压是否大于 100 mV 作为临界条件判定接地极入地电流是否造成管道腐蚀,是否需要防护措施^[20]。土壤电阻率与土壤腐蚀性显著相关,是影响埋地管道腐蚀、进行阴极保护设计时需要考虑的重要参数^[21-22],也是计算管道 HVDC 干扰时需要考虑的重要参数^[11,16]。因此,以 100 mV 为管地电位正向偏移的限值,计算不同入地电流、不同土壤电阻率下的防护距离。图 8 为不同入地电流下防护距离土壤电阻率变化曲线。

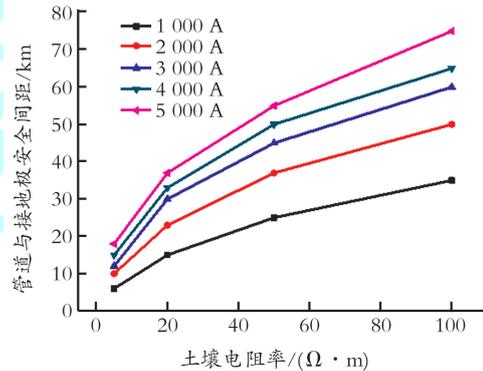


图 8 不同入地电流下防护距离随土壤电阻率变化

Fig.8 The influence of soil resistance and current on safety distance

由图 8 可知,防护距离随着土壤电阻率增大呈现对数形式增长,不同入地电流下防护距离变化趋势相同。当入地电流为 $5\,000 \text{ A}$,土壤电阻率为 $100 \text{ Ohm} \cdot \text{m}$ 时,防护距离高达 75 km ,但目前土地资源日益紧张,所以不能单纯依靠增大管道与接地极距离来减小干扰。

2.3 分段绝缘对 HVDC 干扰的影响

分段绝缘可以缩短管道在直流干扰区域的连续暴露长度,是抑制直流接地极对埋地金属管道影响的有效措施。其原理是将管道分成电位基本接近的等势体,从而减小进出管道的电流。模型中其余参数不变,入地电流 $5\,000 \text{ A}$,分别在距离管道零坐标 15 、 30 km 处设置绝缘法兰,增加绝缘法兰前后管地电位的对比曲线,结果如图 9 所示。

从图 9 可知,管道进行分段绝缘后,两个绝缘法兰之间的管段管地电位下降,直流干扰得到一定程度缓解;而绝缘法兰外侧管段的管地电位反而小幅

度上升,干扰加剧。原因是电流具有选择低阻通道的特性,远端管段吸收的电流倾向于从管道坐标零点处流出,在安装绝缘法兰后,从远端经零点处流出的电流减少,干扰减小。图10为不同缓解长度对管地电位的分布的影响。由图10看出,15 km处绝缘法兰两端电位差为1.21 V,30 km处绝缘法兰两端电位差为1.04 V,绝缘法兰距离接地极越远,法兰两端的电位差越小。当入地电流足够大、管道距离接地极足够近时,绝缘法兰两端的电位差不仅会击穿绝缘法兰,还会加速绝缘法兰附近管道的内腐蚀,甚至会造成人体触电,因此需要采用绝缘法兰跨接来减小法兰两端管地电位差。图9、10计算结果可以看出,对于直流干扰区的管道来说,可以通过分段隔离措施将干扰区域限定在一定的管段范围内进行防护,而对于隔离区域外管段干扰情况会增强。

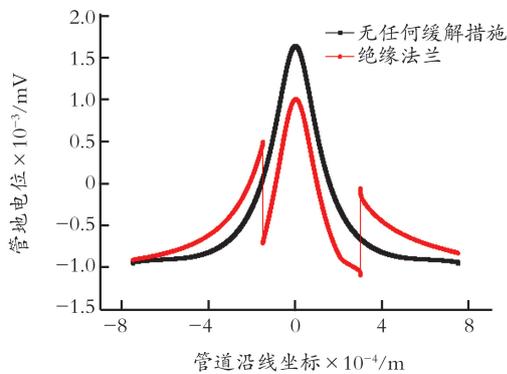


图9 分段绝缘对 HVDC 干扰的影响

Fig.9 The influence on averaged potential of insulating flange

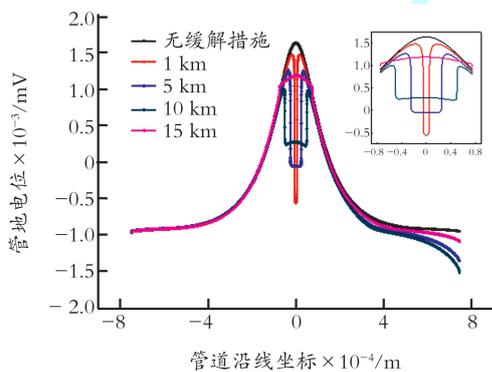


图10 不同缓解长度对管地电位分布的影响

Fig.10 The influence on averaged potential of different zinc ribbon length

2.4 缓解锌带对 HVDC 干扰的影响

模型中其余参数不变,以距离接地极最近处的管道坐标为零点,在零点对称敷设1、5、10、15 km长的缓解锌带,结果如图10所示。

由图10可知,与未敷设缓解锌带的管道相比,敷设锌带处管段的直流干扰得到缓解,未敷设锌带处管段的管地电位几乎不变。随着锌带长度增大,

坐标零点处的缓解效果下降,这是因为随着长度增大,缓解锌带的接地电阻减小,锌带与管道并联导致系统整体电阻减小,会引入更多的直流杂散电流。随着锌带长度增大,缓解范围不断扩大,当锌带长度为1、5、10、15 km时,管地电位大幅度下降的范围接近1、5、10、15 km,因此缓解范围与缓解锌带长度相当。由此可见,缓解锌带保护范围有限,未敷设锌带的管段得不到有效缓解。

2.5 分段绝缘+阴极保护+锌带对 HVDC 干扰的影响

基于分段绝缘与缓解锌带单独防护的研究基础上,在坐标零点两侧20 km处安装绝缘法兰来降低隔离区内管段的管地电位,为进一步减小隔离区内管地电位正向偏移,在管段附近敷设锌带。对于隔离区域外管段施加阴极保护措施,通电点设置在绝缘法兰内侧管地电位较高点,阴极保护电流密度为 $114 \mu\text{A}/\text{m}^2$,结果如图11所示。

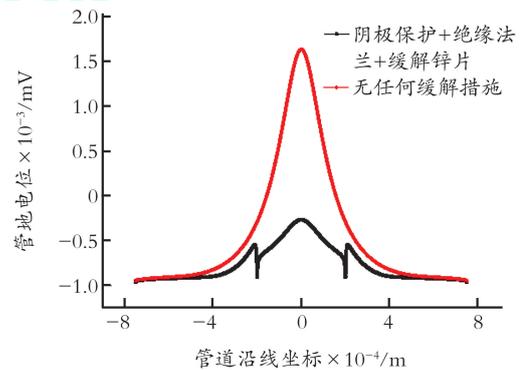


图11 不同防护措施对管地电位的影响

Fig.11 The influence on averaged potential of different protective measure

图11给出了未加防护措施和综合防护措施下的管地电位的变化曲线。从图11中可知,此时隔离区域管段管地电位下降,干扰得到有效缓解,隔离区域外管段管地电位与无防护措施时相比也有所下降,整体缓解效果较好。分段绝缘与敷设锌带可以减小恒电位仪输出电流,施加阴极保护系统可减小隔离区域外管段干扰,减小法兰两侧电位差。因此,对于高压直流干扰区域内的管道,在保证接地极与管道最大距离的情况下,可采取分段隔离+阴极保护+敷设缓解锌带的综合防护措施缓解 HVDC 干扰。

3 结论

(1)防腐层均匀破损率越小,电流越集中,局部腐蚀风险越高;当破损率达到50%时,从保护电位的角度可认为防腐层已经失效;防腐层存在 1 cm^2

局部破损时,流出防腐层的电流密度为 51.106 A/m^2 ,腐蚀速率高达 60.0 mm/a 。

(2)在 $0 \sim 30 \text{ km}$ 时,随着距离的增大,管地电位和管地电流密度急剧减小。当距离大于 30 km 时,减小程度明显减弱,应尽量增大接地极与埋地管道之间的距离;防护距离随着入地电流、土壤电阻率增大而增大;给出不同入地电流、土壤电阻率下的防护距离值,可供管道和电力专业人员参考。

(3)分段绝缘缓解了隔离区域内管段的干扰,但隔离区域外的管道受到的干扰反而加剧。

(4)缓解锌带的保护范围与缓解锌带长度相当,未敷设锌带的管段得不到有效缓解。

(5)应尽量增大接地极与管道的距离,并采取分段隔离+阴极保护+敷设缓解锌带的综合防护措施来缓解 HVDC 干扰。

参 考 文 献

- [1] Gong Y, Xue C, Yuan Z, et al. Advanced analysis of HVDC electrodes interference on neighboring pipelines[J]. Journal of Power and Energy Engineering, 2015, 3(4): 332-341.
- [2] 应斌. 高压直流输电系统接地极对长输管道安全运行的影响[J]. 油气田地面工程, 2014, 33(7): 23-24.
Ying Bin. Effect of HVDC grounding on the safety of pipeline[J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2014, 33(7): 23-24.
- [3] 李兆玲. 高压直接地极对埋地管道的干扰与防护[J]. 管道技术与设备, 2017(3): 39-42.
Li Zhaoling. Interference and protection on buried pipeline of high voltage direct current grounding electrode[J]. Pipeline Technique and Equipment, 2017(3): 39-42.
- [4] 查鑫堂, 张建文, 陈胜利. 杂散电流干扰和阴极保护作用下碳钢腐蚀规律研究[J]. 表面技术, 2015, 44(12): 12-18.
Zha Xintang, Zhang Jianwen, Chen Shengli. Corrosion behavior of carbon steel in interference of stray current and cathodic protection[J]. Surface Technology, 2015, 44(12): 12-18.
- [5] 程明, 张平. 鱼龙岭接地极入地电流对西气东输二线埋地钢质管道的影响分析[J]. 天然气与石油, 2010, 28(5): 22-26.
Cheng Ming, Zhang Ping. Effect of Yulongling grounding current on buried steel pipeline of west-east gas pipeline 2[J]. Natural Gas and Oil, 2010, 28(5): 22-26.
- [6] Nicholson P. High voltage direct current interference with underground or underwater pipelines[C] // Corrosion 2010. NACE International, 2010: 10102.
- [7] 李振军. 高压/特高压直流输电系统对埋地钢质管道干扰的现场测试与分析[J]. 腐蚀与防护, 2017, 38(2): 142-146.
Li Zhenjun. Field test and analysis of interference of high or ultra high voltage direct current transmission system to underground steel pipeline[J]. Corrosion & Protection, 2017, 38(2): 142-146.
- [8] Qin R Z, Du Y X, Guo P, et al. High voltage direct current interference on buried pipelines: Case study and mitigation design[C]// Corrosion 2017. Houston: NACE International, 2017.
- [9] Lagace P J, Houle J L, Gervaris Y, et al. Evaluation of the voltage distribution around toroidal HVDC ground electrodes in n-layer soils[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1988, 3(4): 1573-1579.
- [10] Caroli C E, Santos N, Kovarsky D. Soil surface potentials induced by Itaipu HVDC ground return current. II. measurements[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1988, 3(3): 1211-1216.
- [11] 商善泽. 直流感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.
- [12] 李丹丹. 高压直流输电线路对某埋地金属管道的干扰规律研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2014.
- [13] 曹方圆, 孟晓波, 廖永力, 等. 直流感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 Fangyuan, Meng Xiaobo, Liao Yongli, 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.
- [14] 白杨, 齐建涛, 李焰. 埋地管道杂散电流腐蚀及其数值模拟研究进展[J]. 油气储运, 2013, 32(4): 349-354.
Bai Yang, Qi Jiantao, Li Yan. Research progress in stray current corrosion and its numerical simulation for buried pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2013, 32(4): 349-354.
- [15] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. DL/T 5224—2014 高压直流输电大地返回运行系统设计技术规定[S]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- [16] 李德明. 高压直流输电系统对埋地管道干扰规律及防护措施研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2014.

(下转第 96 页)

- face seal under non-isothermal conditions[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(7): 605-610.
- [13] 宋鹏云.螺旋槽干气密封端面气膜压力计算方法讨论[J]. 润滑与密封, 2009, 34(7):7-9.
Song Pengyun. Discussion about the calculation methods of the gas film pressure of the spiral groove dry gas seals[J]. Lubrication Engineering, 2009, 34(7):7-9.
- [14] 孙杰, 金珊. 电容式位移传感器在气阀测试中的应用[J]. 石油化工高等学校学报, 2005, 18(1):55-57.
Sunjie, Jin Shan. Application of capacity-type shift transducer at gas valve testing [J]. Journal of Petrochemical Universities, 2005, 18(1):55-57.

(编辑 王亚新)

(上接第78页)

- [17] 程明, 唐强, 魏德军, 等. 高压直接地极干扰区埋地钢质油气管道的综合防护[J]. 天然气工业, 2015, 35(9):105-111.
Cheng Ming, Tang Qiang, Wei Dejun, et al. Comprehensive protection of buried steel pipelines at HVDC earthed electrode interference area[J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(9):105-111.
- [18] 郭庆茹, 何悟忠, 冷旭耀, 等. 对管道直流杂散电流干扰腐蚀的防治方法[J]. 油气储运, 2003, 22(4): 46-48.
Guo Qingru, He Wuzhong, Leng Xuyao, et al. Countermeasures against pipeline corrosion induced by DC stray electrical current[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2003, 22(4): 46-48.
- [19] SY/T - T0017-2006 埋地钢质管道直流排流保护技术标准[S]. 北京: 石油工业出版社, 2006.
- [20] 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 Chang, Meng Xiaobo, Fan Lingmeng, et al. Influence of ground return current from earthing electrode on buried metal pipeline[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(3): 15-20.
- [21] 王玉福, 李岩, 马文鑫, 等. 热油管道阴极保护效果评价[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2012, 32(1): 62-65.
Wang Yufu, Li Yan, Ma Wenxin, et al. Evaluation of cathode protection effect on hot pipelines[J]. Journal of Liaoning Shihua University, 2012, 32(1): 62-65.
- [22] 杜艳霞, 张国忠. 土壤电阻率对罐底外侧阴极保护电位分布的影响[J]. 石油化工高等学校学报, 2007, 20(1): 81-84.
Du Yanxia, Zhang Guozhong. The effect of soil resistivity on cathodic protection potential distribution outside of tank bottom [J]. Journal of Petrochemical Universities, 2007, 20(1):81-84.

(编辑 王戩丽)