

DOI:10.12158/j.2096-3203.2019.03.020

考虑非线性极化的接地极对管道泄漏电流计算及验证

刘元庆¹, 曹方圆¹, 谭波¹, 李雄², 鞠勇¹, 张康伟³

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192; 2. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206; 3. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 直流接地极对邻近埋地油气管道的腐蚀影响和危险影响问题日益突出, 迫切需要更为准确的计算方法。文中在前续研究的基础上, 将管道和接地装置使用矩量法建立等效电路模型, 将管道表面破损处的极化效应考虑为非线性受控电压源, 由此给出了考虑金属表面非线性极化的直流接地极对埋地金属管道影响计算方法。并通过搭建高压直流接地极和油气管道的缩比试验模型进行实验研究, 得出了管道表面的断电电位和泄漏电流密度。基于实验结果对计算方法进行了有效性验证, 结果表明该计算方法与测试结果在工程应用范围内吻合较好, 可为工程应用提供估算参考。

关键词: 接地极; 埋地金属管道; 非线性极化; 模拟实验

中图分类号: TM835

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2019)03-0134-06

0 引言

近年来, 随着西电东送、西气东输工程的建设, 直流接地极与埋地油气管道邻近的情况已不可避免, 直流接地极对邻近埋地油气管道的腐蚀影响和危险影响问题日益突出, 局部地区已威胁到国家能源输送安全^[1-5]。近年来已有多个工程实例出现, 最终需要电网公司与管道公司共同协商解决存在的安全隐患。

经直流接地极入地的不平衡电流在大地中会形成电流场, 当埋地金属管道表面存在破损或缺陷时, 金属管道表面的泄漏电流在长期作用下会对管道金属形成腐蚀现象。

在地中杂散电流对埋地金属管道的干扰研究方面, 城市轨道交通等直流干扰和高压交流输电系统等交流干扰对管道腐蚀影响的检测评价方法和排流保护等均有报道^[6-8], 而在高压直流接地极电流对埋地油气管道的腐蚀影响方面, 由于以往多采取两者避让的形式选择接地极地址或管道路径^[9-10], 因此接地极入地电流对埋地油气管道的影响问题并不凸显, 相关研究工作较少。

直流接地极入地电流对埋地油气管道腐蚀影响的计算方法方面^[11-13], 以往大多采用与交流入地电流对埋地油气管道影响相同的计算方法^[14-15], 计算中基本不考虑管道防腐层破损点处金属与土壤交界面上的直流“极化效应”, 使得计算结果与实际

情况相差较大。根据实验测量分析^[16-18], 管道破损点处金属与土壤界面处的极化特性为一非线性曲线, 即管道表面处金属与土壤间的极化电位与管道表面的极化电流之间呈现非线性关系。考虑该效应后, 可使接地极对管道的腐蚀影响计算更为准确, 并可为后续的防护措施提供技术保障。文中主要采用建模计算和模拟实验研究该问题, 从而为工程应用提供估算参考。

1 考虑非线性极化的接地极对管道泄漏电流计算方法

在研究直流接地极对埋地油气管道泄漏电流时, 管道表面金属与土壤交界面处的极化特性是亟须解决的关键问题。

1.1 接地极和埋地裸管道的电路模型

使用矩量法对接地极和管道建立等效电路模型, 再将管道上的防护措施和管道表面的极化效应等效成合适的电路模型, 得到整个系统的场路耦合模型, 进而求解出相关电气参数。

土壤中所有埋地导体的泄漏电流会对土壤中的电场产生影响, 在计算管道表面的电场分布时, 需要先求出所有导体的漏电流分布情况。在不计及管道表面的非线性极化时的算法比较成熟, 为上下文方便在此仅简单描述^[19]。

将接地极和管道的导体部分进行分段, 对于每个小段均可由基尔霍夫电流定律列写方程。如图1所示为一简单网络的等效电路图。

图中 R_{1-1} , R_{2-2} , \dots , R_{k-k} , \dots , R_{q-q} 分别为第 1, 2, \dots , k , \dots , q 段导体起点到 midpoint 之间的电阻; V_1 ,

收稿日期: 2019-01-17; 修回日期: 2019-03-04

基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目“高压直流接地极系统对金属管道的影响与防护研究”

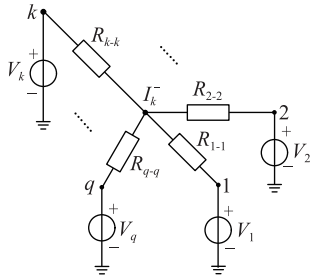


图1 接地网络的等效电路

Fig.1 Equivalent circuit of earth network

$V_2, \dots, V_k, \dots, V_q$ 为所有导体的漏电流在第 1, 2, \dots , k, \dots, q 段导体中点处产生的电位和, 可以认为是两端分别连接导体中点和无穷远之间的电压源。

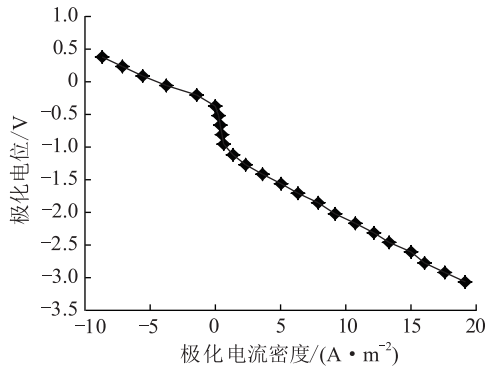
$$V_e = \sum_{i=1}^m R_{ei} I_i^l \quad (1)$$

式中: m 为分段后的导体总段数; I_i^l 是第 i 段导体的漏电流; R_{ei} 是第 i 段导体的单位漏电流在第 e 段导体中点上产生的电位。

1.2 考虑管道表面非线性极化效应的电路模型

当金属管道埋于土壤中时, 金属表面存在非线性极化过程^[20-22], 该过程决定了模拟计算的边界条件。现有的所有接地计算软件(包括 CDEGS), 都无法直接计算考虑管道极化效应的直流输电工程接地极对埋地金属管道影响。因此, 必须通过管道在给定条件下的极化曲线来建立考虑极化过程的非线性计算模型, 才能正确求解接地极注入电流对埋地金属管道的影响。

极化电位是极化电流密度的函数, X80 管线钢在 $30 \Omega \cdot \text{m}$ 土壤中的极化曲线如图2所示。

图2 X80 管线钢在 $30 \Omega \cdot \text{m}$ 土壤中的极化曲线Fig.2 Polarization curve of X80 steel in $30 \Omega \cdot \text{m}$ soil

可以看出, 极化电流密度在 $-10 \sim 20 \text{ A/m}^2$ 范围内变化时, 极化电位大致在 $-3.5 \sim 0.5 \text{ V}$ 范围内变化。如果关注管道的长期腐蚀结果, 在管道对地电位要求保持在 $-0.85 \sim -1.2 \text{ V}$ 之间以达到保护目的的前提下, 极化效应对管道泄漏电流影响很大。

文中重点关注通过接地极进入大地的电流对管道破损处的泄漏电流影响, 为使计算更加准确, 所建立的场路耦合模型必然需要考虑管道的极化效应。极化电位相当于是于在管道和大地之间加了一个非线性受控电压源, 该电压源的电压大小是极化电流的非线性函数, 在把管道分成多个小段进行计算时, 每一段管道的极化电位都为自身管道漏电流的非线性函数, 受控电压源的电压可用符号 V'' 表示, 其等效电路模型如图3所示。其中 $R_{k\text{-coat}}$ 为第 k 段管道的防腐层等效电阻, V_k^c 为管道漏电流在第 k 段管道中点防腐层外表面产生的电位。

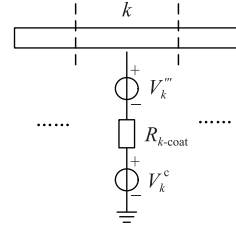


图3 管道表面极化过程的等效电路

Fig.3 Equivalent circuit of polarization process on pipeline surface

1.3 非线性极化电路模型的求解

整个电路模型的每个分段根据节点电流连续方程, 最终可形成式(2)。

$$\sum_{p=1}^n a_{kp} I_p^l + c_k + d_k = -I_k^s \quad (2)$$

式中: n 为所有导体(包括接地极、管道等)分段总数; a_{kp} 为导体的转移电阻、导体自电阻等的常数项; c_k 为导体自电阻、固态去耦器导通电压等的常数项; d_k 为包含导体漏电流的常数项; I_k^s 为第 k 段导体注入电流。

可以得到以各小导体段上的泄漏电流为未知数的非线性方程组:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1^l \\ I_2^l \\ \vdots \\ I_n^l \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1^s \\ I_2^s \\ \vdots \\ I_n^s \end{bmatrix} \quad (3)$$

求解式(3)即可求出各段导体的漏电流, 进而求出各段导体上的管道电位、管地电位、管道漏电流等电气参数。文中需要解决的非线性问题, 类似于图2中极化曲线所代表的管道表面极化问题。实验测得的极化曲线经拟合后是连续的, 可使用迭代法进行求解。采用牛顿-拉夫逊法对该问题进行求解, 求解过程如图4所示。

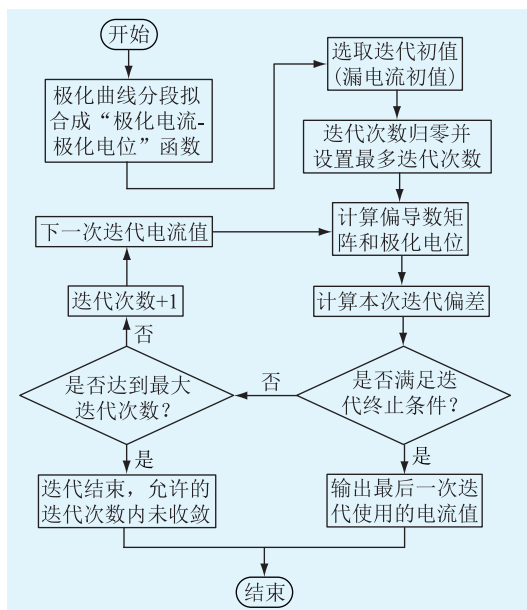


图4 非线性迭代流程

Fig.4 Nonlinear iterative flow chart

2 水槽模拟试验

通过模拟试验,可以验证高压直流接地极入地电流对埋地油气管道泄漏电流的计算方法有效性。

2.1 试验内容

在矩形水池槽中,搭建高压直流接地极和油气管道的缩比试验模型。在模拟接地极中注入一定的直流电流,通过5个uDL2数据记录仪实时测量模拟管道上5个点位的断电电位和电流密度,与仿真计算结果对比分析,从而验证计算方法的有效性。

2.2 试验过程

试验在一个 $30\text{ m}\times 27\text{ m}\times 2.5\text{ m}$ 的矩形模拟槽中开展。试验中的不锈钢裸管道长 1.5 m ,外径 25 mm ;试片与管道材质相同,大小为 $1\text{ cm}\times 3\text{ cm}$;直流试验电源为 $800\text{ V}/30\text{ A}$ 。试验回路接线如图5所示,具体试验过程如下。

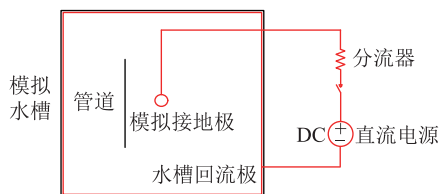


图5 试验回路接线

Fig.5 Wiring diagram of test circuit

(1) 在水池底部搭建3个门型木架用于在水池中支撑图5所示的试验管道,木架高 1.9 m ,每2个木架间距 3 m ,木架可使管道在与模拟接地极水平距离 $5\sim 7\text{ m}$ 的区间内自由移动,如图6所示。

(2) 将直径为 1 m 的不锈钢圆环,用绝缘支撑

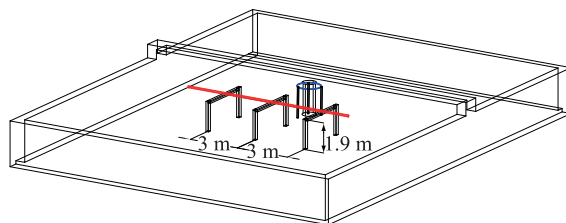


图6 水槽底部门型支撑木架示意

Fig.6 Sectional support timber frame at bottom of flume
杆固定在模拟槽中心,距离水槽底部 1.9 m ,用于模拟圆环形接地极,如图7所示。

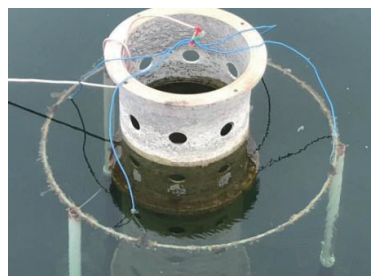


图7 不锈钢圆环电极布置

Fig.7 Arrangement of stainless steel ring electrodes

(3) 将5根 1.5 m 长的不锈钢管道通过金属接头连成一根 7.5 m 的管道,并对每个接头处进行密封处理,防止浸泡于水池中时水渗入管道中。在每根管道中点处引出5根连接线,连接处用密封胶进行密封,并从首端至末端依次编号1号—5号。

(4) 将准备好的5个 $1\text{ cm}\times 3\text{ cm}$ 试片分别与绝缘铜导线相连,并将连接处以及试片背面用密封胶进行密封,仅露出面积为 $1\text{ cm}\times 3\text{ cm}$ 的金属面,将金属表面打磨光亮,然后将试片用扎带绑扎于每根管道中点引线处附近。

(5) 用水泵往模拟水槽中注入自来水至淹没模拟接地极和木架顶端约 10 cm ,然后通过电动自行车将 7.5 m 裸管道放入水中置于搭好的木架上,置于距离模拟接地极中心 5 m 的位置,并在管道正上方横拉3根绳索分别用于悬挂管道上和试片上的引线,参比电极、uDL2管道阴保断电电位记录仪,参比电极底部正对 $1\text{ cm}\times 3\text{ cm}$ 试片金属面,保持 $1\sim 2\text{ cm}$ 距离,具体布置细节如图8所示。

(6) 为了让裸管道与试片状态保持一致,并且在水池中充分极化,将管道引线和试片引线相连,静置于水池中 24 h 后,将5个已完成时间同步和数据清理的uDL2分别连接到管道上的5个测点处,连接后即开始测量管道自然电位。

(7) 为模拟直流接地极阴极运行的情况,将直流试验电源($800\text{ V}/30\text{ A}$)的负极与模拟接地极相连,电源正极连接模拟槽的回流网连接头。

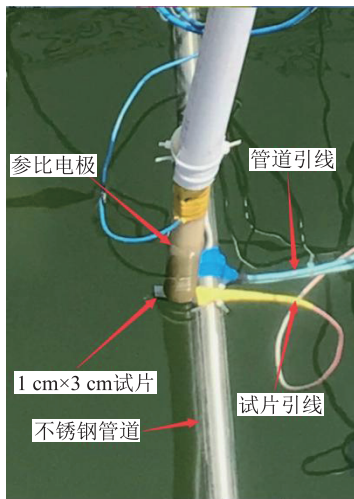


图8 管道及测量回路布置

Fig.8 Pipeline and measurement circuit layout

(8) 检测接线无误 30 min 后,合并直流试验电源开关,分别向回流网从小到大分别注入 5 A, 10 A, 20 A, 30 A 的直流电流,为了防止管道发生锈蚀,每种大小的电流通电时间均保持在 10 min 左右,并记录下每次改变电流大小时的北京时间,便于处理 uDL2 仪器的数据。

(9) 5 A, 10 A, 20 A, 30 A 的直流电流分别通电完毕后,断开直流电源,取下 5 个测点的 uDL2 记录仪,将数据导入电脑,人工读取并处理数据。

2.3 试验结果

测量中采用的是 3 cm² 的试片,因此 uDL2 记录仪得到的是 3 cm² 试片的泄漏电流,要得到该点处的泄漏电流密度需经人工转换处理。图 9 和图 10 分别为接地极上加 5 A, 10 A, 20 A, 30 A 电流时管道上 5 个测点处的断电电位和泄漏电流值,模拟接地极均为阴极运行,管道距接地极中心 5 m。

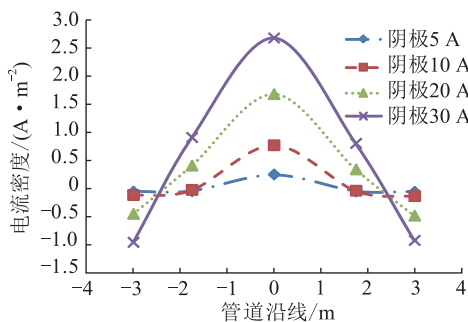


图9 管道沿线电流密度(接地极阴极运行)

Fig.9 Current density along pipeline (ground electrode cathode operation)

3 计算结果与试验结果对比

根据试验装置情况建立尺寸大小相等的计算

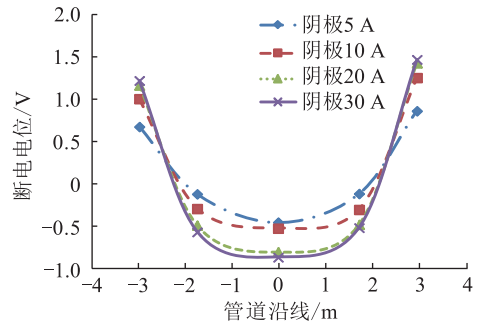


图10 管道沿线断电电位(接地极阴极运行)

Fig.10 Power-off potential along pipeline (operation of grounding cathode)

模型,各接地极电流下程序计算结果如表 1 所示,试验测试结果与计算结果对比如图 11,图 12 所示。

表 1 各接地极电流下试片电流密度

Table 1 Current density of specimens under earth electrode current A·m⁻²

测点	阴极 5 A	阴极 10 A	阴极 20 A	阴极 30 A	阳极 30 A
1	-0.094	-0.184	-0.364	-0.591	0.704
2	-0.002	-0.004	-0.004	0.000	-0.056
3	0.206	0.413	0.873	1.359	-1.886
4	-0.002	-0.004	-0.004	0.001	-0.058
5	-0.094	-0.184	-0.364	-0.591	0.703

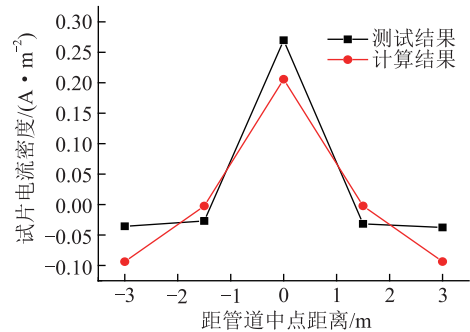


图11 接地极电流 5 A(阴极运行)时测试和计算对比

Fig.11 Test and computation of earth electrode current 5 A (cathode operation)

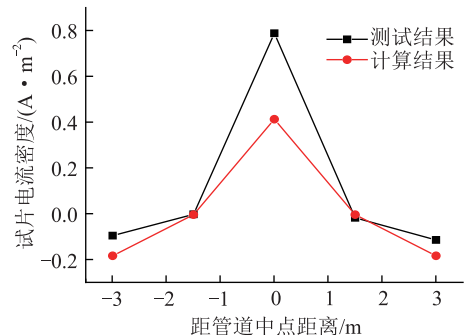


图12 接地极电流 10 A(阴极运行)时测试和计算对比

Fig.12 Test and computation of earth electrode current 10 A (cathode operation)

如图 11 和图 12 所示,测试结果与计算结果中各测点的平均相对误差为 16%~20%。接地极电流较小时,管道各测点泄漏电流的计算值与测试值相差很小;接地极电流较大时,管道中间点泄漏电流的计算值与测试值相差略大,其他地方相差很小。造成计算结果与测试结果间误差的可能原因是:(1)测试时所用的试片是通过绝缘导线和管道相连的,试片实际摆放的位置受绝缘导线位置的影响,导致测试结果会有变化;(2)裸管道长时间放在水中,和接地极通电时管道表面都会有一定的腐蚀,会改变管道表面的状态,导致测试结果变化。

综合考虑上述实验中可能出现的问题,测试结果与计算结果的平均相对误差为 16%~20%,可满足工程中对埋地金属管道的泄漏电流进行估算分析的需求。

4 结语

直流接地极对邻近埋地油气管道的腐蚀影响问题日益突出,文中研究埋地金属管道表面非线性极化影响的计算模型,给出了直流接地极对埋地管道泄漏电流的计算方法,并开展了模拟水池实验进行计算方法的验证,得出如下结论。

(1) 建立考虑管道表面非线性极化效应、可用来计算直流接地极对埋地金属管道泄漏电流的场路耦合等效电路模型。

(2) 通过实验研究,对文中提出的计算方法进行了有效性验证,结果表明该计算方法与测试结果的平均相对误差为 16%~20%,可满足工程中对埋地金属管道的泄漏电流进行估算分析的需求。

(3) 研究成果为解决直流输电工程接地极建设及其对邻近埋地油气管道安全运行所涉及到的计算方法等关键技术难题提供了技术参考,对于保证能源输送安全,控制工程投资,促进电力行业与油气管道行业的工程建设协调发展具有重要意义。

参考文献:

- [1] 胡毅. 直流接地极电流对输电线路接地构件的腐蚀影响研究[J]. 中国电力, 2000, 33(1): 58-61.
HU Yi. Corrosive effect of DC ground current on grounding electrodes[J]. Electric Power, 2000, 33(1): 58-61.
- [2] 魏德军. 直流接地极对地下金属设施的电腐蚀影响[J]. 电网技术, 2008, 32(2): 75-77.
WEI Dejun. Electro-corrosion impacts of DC grounding electrode on underground metallic facilities[J]. Power System Technology, 2008, 32(2): 75-77.
- [3] 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 HVDC earthing electrode on buried metal pipeline[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(3): 15-20.

- [4] 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. Influence of grounding pole of HVDC system on safe operation of long-distance pipeline[J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2014, 33(7): 23-24.
- [5] 邹强, 马云龙, 杨建明, 等. 串联多端直流输电系统接地极拓扑研究[J]. 电力工程技术, 2018, 37(5): 132-136.
ZOU Qiang, MA Yunlong, YANG Jianming, et al. Electrode Topology Research in Series Multi-terminal HVDC Transmission System [J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(5): 132-136.
- [6] 曹阿林. 埋地金属管线的杂散电流腐蚀防护研究[D]. 重庆:重庆大学, 2010.
CAO Alin. Protection against stray current corrosion of buried metals pipeline[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.
- [7] NICHOLSON P. Study details HVDC stray-current effects on pipelines[J]. Oil & Gas Journal, 2010, 108(20): 74-78.
- [8] 李勋, 黄荣辉, 伍国兴, 等. 输电杆塔雷击接地模型对附近管道运行安全影响研究[J]. 智慧电力, 2017, 45(10): 25-30.
LI Xun, HUANG Ronghui, WU Guoxing, et al. Research of lightning grounding model of transmission tower and its influence on safety operation of nearby pipeline[J]. Smart Power, 2017, 45(10): 25-30.
- [9] 朱轸, 吴驰, 扬威. 直流接地极对附近输电线路杆塔的腐蚀影响及防护措施的研究[J]. 高压电器, 2011, 47(10): 41-47.
ZHU Ke, WU Chi, YANG Wei. Research on the corrosion influence of the HVDC earth electrode on the nearby transmission line towers and the towers' protective measures [J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(10): 41-47.
- [10] 迟兴和, 张玉军. 直流接地极与大地中金属管道的防护距离[J]. 电网技术, 2008, 32(2): 71-74.
CHI Xinghe, ZHANG Yujun. Protective distance between HVDC electrode and underground metal pipeline[J]. Power System Technology, 2008, 32(2): 71-74.
- [11] 张波, 何金良, 曾嵘. 电力系统接地技术现状及展望[J]. 高电压技术, 2015, 41(8): 2569-2582.
ZHANG Bo, HE Jinliang, ZENG Rong. State of art and prospect of grounding technology in power system [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 2569-2582.
- [12] 陈庆涛, 田宇, 丁国成, 等. 基于灵敏度分析的直流输电接地极优化选址方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(21): 125-130.
CHEN Qingtao, TIAN Yu, DING Guocheng, et al. Optimization method of grounding pole location for HVDC transmission system based on sensitivity analysis[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(21): 125-130.
- [13] 陈水明, 施广德. 圆环形直流输电接地极电流场分析[J]. 高电压技术, 1994, 20(1): 3-7.

- CHEN Shuiming, SHI Guangde. Analysis of current fields near ring-type HVDC ground electrode[J]. High Voltage Engineering, 1994, 20(1): 3-7.
- [14] 曾嵘, 张波, 赵杰, 等. HVDC 地中直流对交流系统的影响及规律分析[J]. 高电压技术, 2009 (3): 678-682.
ZENG Rong, ZHANG Bo, ZHAO Jie, et al. Influence and characteristics analysis of effect of the HVDC ground return current on AC system [J]. High Voltage Engineering, 2009 (3): 678-682.
- [15] 王明新, 张强. 直流输电系统接地极电流对交流电网的影响分析[J]. 电网技术, 2005, 29(3): 9-14.
WANG Mingxin, ZHANG Qiang. Analysis on influence of ground electrode current in HVDC on AC power network[J]. Power System Technology, 2005, 29(3): 9-14.
- [16] 房媛媛, 卢剑. 直流接地极的地电流对埋地金属管道腐蚀影响分析[J]. 南方电网技术, 2013, 7(6): 71-75.
FANG Yuanyuan, LU Jian. Analysis on the influence of HVDC grounding electrode's ground current on the corrosion of buried metal pipelines [J]. Southern Power System Technology, 2013, 7(6): 71-75.
- [17] 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.
LI Dandan. Research on the disturbance law of HVDC transmission line to a buried metal pipeline [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2014.
- [18] 秦润之, 杜艳霞, 姜子涛, 等. 高压直流输电系统对埋地金属管道的干扰研究现状[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2016, 28(3): 263-268.
QIN Runzhi, DU Yanxia, JIANG Zitao, et al. Research status of interference of HVDC transmission system on buried metal pipelines[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2016, 28(3): 263-268.
- [19] 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.
- [20] 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 Xiaobo, CAO Fangyuan, LIAO Yongli, et al. Analysis of insulation methods to reduce influences of DC grounding electrode on pipeline[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(12): 3900-3906.
- [21] 詹宏昌. 天然气管道外腐蚀与防护[J]. 广州化工, 2011, 39(11): 127-129.
ZHAN Hongchang. External corrosion and protection for natural gas pipelines [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2011, 39(11): 127-129.
- [22] 曹楚南. 腐蚀电化学原理(第三版)[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
CAO Chunan. Principle of corrosion electrochemistry (3rd) [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008.

作者简介:



刘元庆

刘元庆(1980),男,博士,教授级高级工程师,从事高压输变电工程电磁环境相关工作(E-mail:yqliu02@163.com);

曹方圆(1993),男,硕士,研究方向为电力系统对管道的影响和防护;

谭波(1985),男,硕士,工程师,从事接地技术相关工作。

Calculation and verification of pipeline leakage current considering the influence of DC earth electrode on the non-linear polarization

LIU Yuanqing¹, CAO Fangyuan¹, TAN Bo¹, LI Xiong², JU Yong¹, ZHANG Kangwei³

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 2. School of Electrical and Electronics Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 3. School of Electrical and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: The corrosion and hazard effects of DC earth electrode on adjacent buried oil and gas pipelines are becoming increasingly prominent, and more accurate calculation methods are urgently needed. On the basis of previous research, the equivalent circuit model of pipeline and grounding device is established by moment method, and the polarization effect at the damaged surface of pipeline is considered as a non-linear controlled voltage source. A calculation method considering the non-linear polarization effect of DC earth electrode on the surface of buried metal pipeline is proposed. In the rectangular tank of grounding Laboratory of UHV AC test base, the scaling test model of HVDC earth electrode and oil and gas pipeline is built to carry out experimental research. The validity of the calculation method proposed in this paper is verified. The results show that the calculation method is in good agreement with the test results, and it can provide an estimation reference for engineering application.

Keywords: earth electrode; buried metal pipeline; nonlinear polarization; simulated experiment

(编辑 方晶)