

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2019.03.019

# 短时大电流入地时管道阻性耦合电压计算方法研究

梁玄鸿<sup>1</sup>, 余骏阳<sup>2</sup>, 李后英<sup>1</sup>

(1. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400044;  
2. 国网四川省电力公司检修公司, 四川 成都 610041)

**摘要:**交流架空输电线路与钢制埋地管道共用走廊资源的现象越发频繁,短时大电流入地时产生的阻性耦合电压将会严重加速管道腐蚀。为量化计算埋地管道阻性耦合电压,文中提出一种基于CDEGS仿真模型的计算方法。首先建立大电流入地仿真模型;其次给出工频电流接地时管道阻性耦合电压的计算方法,并分析电流幅值、土壤电阻率以及电流入地点离管道最近点的距离对管道阻性耦合电压的影响;最后给出雷电流入地时,计及频率的管道阻性耦合电压的计算方法以及基于时频转换的电压最大值计算方法,并分析雷电流幅值、雷电流入地点离管道最近点的距离、土壤电阻率以及雷电流经多杆塔入地对管道阻性耦合电压的影响。

**关键词:**交流架空输电线路;短时大电流;埋地钢制管道;阻性耦合电压

中图分类号:TM75

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2019)03-0127-07

## 0 引言

随着我国经济持续高速发展,基础设施的建设规模日益增长,走廊资源日渐紧张。由于交流架空输电线路与钢制埋地管道选择走廊的原则极其相似,两者长距离平行共用走廊的现象频繁发生<sup>[1]</sup>。

架空输电线路正常运行时,在线路与管道相邻处,线路的电磁场经磁耦合在管道上产生纵向感性耦合的交流电压<sup>[2]</sup>,会对管道的阴极保护系统产生干扰,在防腐层漏电处引起腐蚀<sup>[3]</sup>。而当线路发生单相接地短路故障时,经由杆塔接地体入地或输电线入地的线路故障电流在入地点附近通过土壤散流,一般认为此时管道上电压主要由阻性耦合引起<sup>[4]</sup>。输电线路杆塔遭遇雷击的情况与故障短路情况类似,高频率、大幅值的雷电流瞬间通过接地极向大地散流,通过感性耦合和阻性耦合共同作用于管道,电流注入点附近电位梯度急剧抬升,而管道防腐层的电阻率高,管道上的瞬时感应电压可达数千伏,可能导致管道失效<sup>[5]</sup>。

单相短路接地和雷电流入地都可认为是短时大电流入地,且主要在管道上引起阻性耦合电压。因此两者对周围埋地管道所产生的影响分析是类似的。与管道感性耦合电压的计算方法类似,可以基于传输线理论计算线路短路故障时管道阻性的耦合电压,或利用其他等效电路理论求得。文献[6]分析了雷击情况下平行接近时的管道防腐层电压因不同线路参数变化的规律,讨论了雷电流在输

电线路上的分布。文献[7]分析了单相接地故障时对管道的电磁影响和线路参数间的关系。文献[8]从耦合途径、敏感设备两个角度,研究了抑制直流接地极入地电流对埋地金属管道影响的措施。文献[9]使用CDEGS软件分析750 kV交流线路在正常工作时、单极短路故障时以及雷击时对埋地管道的影响,得到管道金属本体与防腐层电压最大值。文献[10]使用ATP-EMTP分析雷击输电线路对地上油气管道的影响。文献[11]从人身安全、管道安全、管道阴极保护设备以及直流干扰腐蚀4个方面对高压直流输电线路邻近埋地油气管道可能产生的电磁影响进行了分析,并给出了相应的电压限值。

总体而言,分析输电线路对附近设备影响的方法包含利用计算机辅助下电磁场的数值计算、通过简化的电路模型进行计算,或通过专用软件进行计算<sup>[12-14]</sup>。目前尚未有足够的工频电流和雷电流接地造成管道事故的案例,缺乏相关监测数据,相关研究大多停留在对耦合电压限值的分析上,少有定量的计算方法。为解决上述问题,文中使用CDEGS建立短时大电流入地时管道阻性耦合电压仿真模型;研究了工频电流入地时管道阻性耦合电压的计算方法并分析防腐层承受电压的影响因素;研究了雷电流入地时管道阻性耦合电压及其最大值的计算方法,并分析管道阻性耦合电压的影响因素。

## 1 短时大电流入地时管道阻性耦合电压仿真分析模型

文中使用CDEGS软件完成仿真计算,运用该软件计算在输电线路稳态或暂态条件下,土壤中和空

收稿日期:2018-12-11;修回日期:2019-01-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51637004);国家电网有限公司总部科技项目(5210EF18000Z)

气中导体相互之间形成的电磁环境及其电位、电流分布等<sup>[15]</sup>。

为分析大电流入地对管道阻性耦合电压的影响因素,建立了图1所示的仿真模型。其中管道长10 km,两端经绝缘法兰接地,且相对于大电流入地点对称。管道激励点被设定为在地表上,地下导体段长度为0.1 m以满足仿真要求。 $D$ 为电流入地点 $a$ 离管道最近点 $b$ 的距离; $L$ 为管道上某点 $c$ 和到管道点 $b$ 的距离。

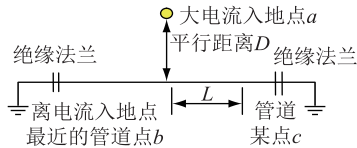


图1 大电流入地仿真模型

Fig.1 Simulation model for huge current going ground

模型中默认值设定如下:电流入地点与管道最近点距离100 m,土壤电阻率默认为 $10 \Omega \cdot \text{m}$ ,电流幅值默认为10 kA,管道为钢制,其中管道防腐层按照三层结构聚乙烯防腐层的常见值进行设定,管道尺寸参数参照华东地区某高压输气管道,具体参数下表所示,其中 $\mu_0$ 为真空磁导率。

表1 管道参数

Table 1 Parameters of pipeline

参数	数值
管道内径/m	0.85
管道外径/m	0.9
防腐层厚度/mm	3
绝缘法兰电阻/ $\Omega$	$10^9$
防腐层电阻率/( $\text{k}\Omega \cdot \text{m}^2$ )	100
金属相对电阻率/( $\Omega \cdot \text{m}$ )	$1.724 \times 10^{-7}$
金属相对磁导率	$300\mu_0$

经查阅文献与仿真计算发现,线路遭遇雷击、或者发生单相接地故障时会有很大的故障电流流入大地,引起地电位的升高从而对埋于地下的油气管道产生阻性耦合电压。与其他耦合方式相比,阻性耦合作用时间短,瞬时电压高,极易造成局部破坏,最终引发突发故障。因此文中管道所受感性耦合贡献量和阻性耦合相比可以忽略不计。

管道本体阻性耦合的冲击电压可能会击穿损坏管道的防腐层,应关注管道防腐层的承受电压情况,防腐层承受电压计算公式如下:

$$V_w = |\vec{V}_{\text{coat}} - \vec{V}_{\text{core}}| \quad (1)$$

式中: $V_w$ ,  $\vec{V}_{\text{coat}}$ ,  $\vec{V}_{\text{core}}$ 分别为管道防腐层承受的阻性耦合电压、管道本体阻性耦合的对地电压以及管道

防腐层阻性耦合的对地电压。

图2是模型在工频电流入地时,土壤电阻率、管道和入地电流点距离以及电流幅值均为默认值时,不同位置的 $\vec{V}_{\text{coat}}$ ,  $\vec{V}_{\text{core}}$ 以及 $V_w$ 。此时, $\vec{V}_{\text{coat}}$ 基本不变,保持一个不为零的恒值;而 $V_w$ 随管道位置不同剧烈变化;由于 $\vec{V}_{\text{coat}}$ 远小于 $\vec{V}_{\text{core}}$ ,因而可认为 $V_w$ 主要由 $\vec{V}_{\text{core}}$ 决定。

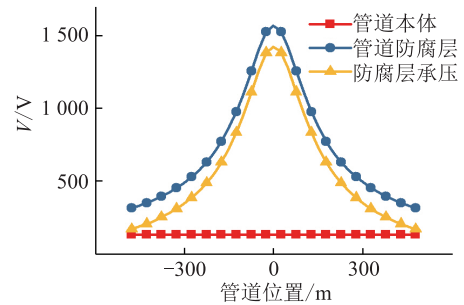


图2 工频入地时管道阻性耦合电压的典型分布

Fig.2 General pattern for the interference on the pipeline

## 2 工频电流入地时管道阻性耦合电压分析

### 2.1 管道阻性耦合电压计算方法

在评估工频大电流入地对管道的影响时,除特殊情况例如管道非接地型短路发生等,可直接以入地电流对 $V_w$ ,  $\vec{V}_{\text{coat}}$ 以及 $\vec{V}_{\text{core}}$ 等管道阻性耦合电压的计算值判断管道受冲击的影响。为评估管道风险,应核算管道本体可能遭受的最大阻性耦合对地电压( $V_{\text{coat\_max}}$ )以及防腐层可能承受的最大阻性耦合电压( $V_{w\_max}$ )。

根据大电流入地的仿真模型,应考虑 $D$ 、土壤电阻率 $\rho$ 以及入地电流可能的最大幅值 $I_g$ 。为得到具体的计算表达式,计算了各参数在不同赋值时的管道本体和防腐层承受电压值,参数值的选择见表2。

表2 工频入地管道阻性耦合电压分析参数

Table 2 Parameters for bearing voltage of pipeline coating calculation

参数名称	参数范围
$I_g/\text{kA}$	5~20
$\rho/(\Omega \cdot \text{m})$	10~1 000
$D/\text{m}$	10~2 000

利用上述不同参数值的计算结果分析管道阻性耦合电压与各参数的独立性:3种参数相互独立, $\rho, I_g$ 与阻性耦合电压呈线性关系, $D$ 和管道阻性耦合电压是非线性关系。

(1)  $\vec{V}_{\text{coat}}$ 最大值的计算公式。基于上述分析,

只有  $D$  和  $\vec{V}_{\text{coat}}$  呈非线性关系,需寻找近似拟合的表达式,对  $\vec{V}_{\text{coat}}$  最大值  $V_{\text{coat\_max}}$  进行计算:

$$V_{\text{coat\_max}} = \frac{I_g}{10} \times \frac{\rho}{100} f_d(D) \quad (2)$$

式中:  $f_d(D)$  为使用 Matlab 中的 BP 神经网络拟合得到的函数,可以按下式进行确定:

$$f_d(D) = 1.576D^{-0.02232} - 1.278 \quad (3)$$

(2)  $V_w$  最大值的计算公式。与  $V_{\text{coat\_max}}$  的计算同理,  $V_w$  最大值  $V_{w\_max}$  计算公式如下:

$$V_{w\_max} = \frac{I_g}{10} \times \frac{\rho}{100} \times f_{dp}(D) \quad (4)$$

式中:  $f_{dp}(D)$  为使用 Matlab 中的 BP 神经网络拟合得到的函数。由于管道距离大电流入地点一定距离后阻性耦合电压不足以对管道造成冲击,在确定计算公式时,仅考虑  $D < 1000$  m 时的情况。此时,  $f_{dp}(D)$  可以按如下形式函数进行计算:

$$f_{dp}(D) = \frac{-0.06351D + 146.8}{D - 1.925} \quad (5)$$

## 2.2 管道阻性耦合电压的影响因素分析

(1) 电流幅值。管道防腐层阻性耦合的对地电压与管道附近的入地电流幅值呈线性增长趋势。这与其他输电线路接地对管道影响的研究结论一致<sup>[16-18]</sup>。

(2) 土壤电阻率。随土壤电阻率的增长,管道本体、防腐层阻性耦合对地电压线性增长。但电阻率在实际的取值范围内,影响比电流幅值更大。

(3) 电流入地点离管道最近点的距离。管道本体阻性耦合对地电压、防腐层承受的耦合电压与电流入地点离管道最近点的距离有较大关系。利用上述计算结果对距离因素进行了分析,结果如图 3 所示。随着距离的上升,管道本体和管道防腐层阻性耦合对地电压均有所下降,防腐层承受的阻性耦合电压也随之下降,下降速率与管道上的具体位置有关。其中在管道更靠近入地电流中心处,防腐层阻性耦合对地电压下降更快。管道本体阻性耦合对地电压的变化程度与管道位置无关,总体随距离增长慢速下降。

## 3 雷电流入地时管道阻性耦合电压分析

### 3.1 计及电流频率的阻性耦合电压计算方法

与工频大电流不同,当雷击杆塔或导线时,雷电波中有效高频分量远大于工频分量,同时雷电流将通过杆塔接地系统入地,当雷击避雷线时,多个杆塔将会有雷电流入地。

分析雷击入地电流对管道的影响时,在上述大

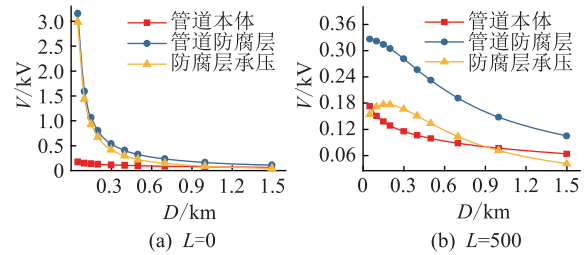


图3 电流入地点离管道最近点的距离和管道阻性耦合电压值的关系

Fig.3 The relationship between the the distance from the nearest point of the pipe to where the electricity enters and interference

电流接地模型基础上加入了杆塔接地结构。接地参数参照了相关设计文献和规范<sup>[19-20]</sup>。

文献[21]指出,入地电流的不同频率将影响在土壤扩散以及对管道的阻性耦合特性,当高频电流入侵时,土壤中高电位差区域基本不变,但这些区域的电位差数值明显升高。一般认为,接地材料在高频作用下电感效应和集肤效应显著,会导致接地系统阻抗增加引起电位升高。

为探究不同频率对管道各部分阻性耦合对地电压的区别,在 30 kA 的电流幅值和  $100 \Omega \cdot \text{m}$  的土壤电阻率条件下,对管道和电流入地点 2 种水平最近距离下不同频率的计算进行分析。图 4(a)、(b) 分别是  $D$  为 100 m 和 500 m 时电流频率和管道本体、防腐层阻性耦合对地电压以及对应的防腐层承受电压图。

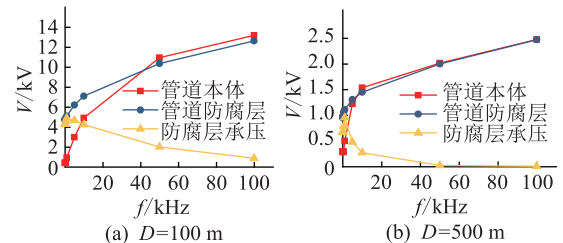


图4 电流频率和管道阻性耦合电压的关系

Fig.4 The relationship between the frequency and the bearing voltage

管道本体阻性耦合对地电压随频率增加而增长,增速开始稍快而后减慢;防腐层阻性耦合对地电压的增加速度明显慢于管道本体的增加速度,在高频段两者增加速度趋近一致。防腐层承受的阻性耦合电压呈先上升后下降的情形。水平距离为 500 m 时,管道本体和防腐层对地电压随频率变化的规律基本一致,但由于管道防腐层在低频率时起始对地电压较低且管道本体对地电压开始上升速度较快,防腐层承受电压在上升后随着频率的增加更快下降。

经计算,电流频率在低频段内( $f < 1$  kHz)的改变基本不影响管道上的阻性耦合电压,即:

$$V_{it}(f) = V_{ac} \quad (6)$$

式中: $V_{it}(f)$  为某频率下管道各部分的最大阻性耦合电压; $V_{ac}$  是工频电流下管道各部分最大阻性耦合电压。

频率较高( $f > 1$  kHz)的雷电流入地时,管道本体对地电压随频率增加快速增加,在特定频率下管道本体阻性耦合电压的大小可以表示为:

$$V_{core} = Ia(e^{bf} - e^{cf}) \quad (7)$$

式中: $I$  为雷电流幅值,单位 kA; $a, b, c$  分别为计算参数; $e$  为自然常数。仿真计算表明,在管道和线路距离小于 500 m 时,土壤电阻率小于  $1500 \Omega \cdot m$  时,式(7)中的参数可以按如下确定:

$$\begin{cases} a = 417.3 - 4.76D + 2.2\rho + 0.097D^2 \\ b = (2.23 \times 10^{-6}D - 0.0016D^2 + 0.438) \times 10^{-6} \\ c = (6.12 - 0.234 \times D + 0.0376\rho) \times 10^{-5} \end{cases} \quad (8)$$

在高频段时,管道本体阻性耦合的对地电压不能忽略,不能通过计算防腐层的对地电压来近似代替防腐层承受的阻性耦合电压。经仿真计算,在土壤电阻率和距离同样限定为上述条件时可将防腐层承受电压近似表示为:

$$V_{coat} = af^{b/100} + c \quad f > 1 \text{ kHz} \quad (9)$$

其中  $a, b, c$  按以下公式确定:

$$\begin{cases} a = 496000 - 85.5D + 0.01939D^2 + 0.09D\rho \\ b = 9.22 - 0.0327D - 0.0265D^2 - \\ \quad 3.42 \times 10^{-5}\rho - 2.29 \times 10^{-5}\rho^2 \\ c = 80.3 - 0.271D + 108.3\rho \end{cases} \quad (10)$$

### 3.2 阻性耦合电压最大值的计算方法

由于雷电流冲击时间很短,为准确分析阻性耦合电压最大值,需要先求得管道本体阻性耦合对地电压和防腐层承受的阻性耦合电压的时域波形,再从时域波形中找到防腐层在雷电流冲击中承受电压最大值。

以  $1.2/50 \mu s$  雷电波为典型雷电流,仿真模型有关参数设定为:雷电流幅值  $I_m$  为 50 kA,  $D$  为 100 m,  $\rho$  为  $100 \Omega \cdot m$ 。采用双指数函数模型表达  $1.2/50 \mu s$  雷电波,其解析表达式为<sup>[22]</sup>:

$$i(t) = I_m \times 1.043(e^{-1.473 \times 10^4 t} - e^{-2.080 \times 10^6 t}) \quad (11)$$

对于  $1.2/50 \mu s$  雷电波,频率越高,雷电流能量的有效分量越小,100 kHz 以下的雷电流占据了雷电流总能量的 80% 以上<sup>[21,23]</sup>。

入地的雷电流波形、距离雷电流入地处最近的

管道本体、防腐层阻性耦合对地电压的时域波形如图 5 所示,两者随雷电流在波前上升而上升,但两者在雷电流到达峰值之前已经到达峰值并开始下降,两者出现峰值的时间和峰值大小基本相同。但由于两者的下降速度不一致,导致防腐层承受的阻性耦合电压在之后存在最大值。

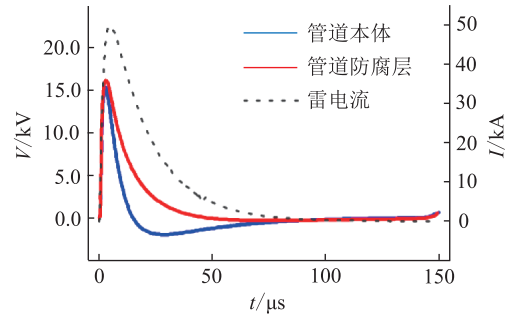


图 5 管道本体和防腐层阻性耦合对地电压与雷电流的时域波形

Fig.5 Resistive coupling voltage to earth on metallic core and coating of pipeline in the time domain

图 6 为防腐层承受的阻性耦合电压的时域波形,电压出现最高值的时间并不在防腐层阻性耦合的对地电压或雷电流出现最大值时,而是在管道本体阻性耦合对地电压下降阶段电位为负值时达到。

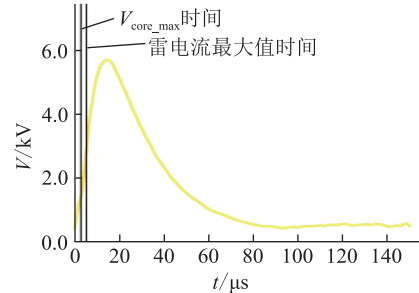


图 6 管道防腐层承受的阻性耦合电压的时域波形

Fig.6 Bearing resistive Coupling voltage of pipeline coating in the time domain

### 3.3 雷电流入地时阻性耦合电压的影响因素分析

雷电流幅值大小与线路明显呈线性关系,因而需要重点分析雷电流入地点距离以及土壤电阻率对管道受雷电流侵入时域波形的影响。通过时频转换,对标准  $1.2/50 \mu s$  雷电流波形下雷电流幅值大小、入地点距离、土壤电阻率对管道阻性耦合电压波形的影响进行分析。

#### 3.3.1 雷电流幅值

雷电流表达式中幅值增加,会引起所有频率分量上管道阻性耦合电压相应成比例增加,从而总的管道阻性耦合电压也按比例增加。参考 IEEE 推荐的雷电流幅值概率分布及文献<sup>[24]</sup>,将 100 kA 作为最大雷电流幅值来评估最大管道阻性耦合电压。

### 3.3.2 雷电流入地点离管道最近点的距离

通过观察管道本体阻性耦合对地电压和防腐层最大承受阻性耦合电压的时域波形,分析改变雷电流入地点距离时,雷电流入地点距离对管道本体和防腐层的影响。

图 7(a)是管道本体阻性耦合对地电压的时域图像,电压幅值随距离增加而降低,出现最高值的时间随着距离增加略微增加;在电压下降段,随距离增加下降速率降低,且不会出现先下探再回升的现象,最低点随管道距离增加而后移。图 7(b)是防腐层承受的阻性耦合电压的时域图像,电压最大值出现的时间随距离增加而增加;承受阻性耦合电压的最大值随距离增加明显降低。

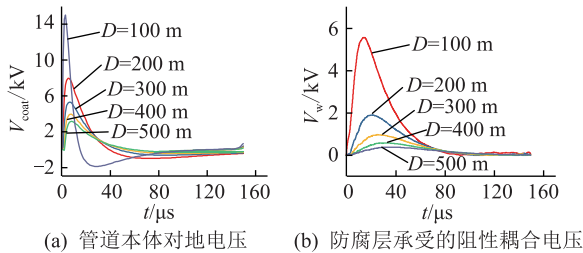


图 7 不同入地点距离对管道本体和防腐层承受电压的时域影响

Fig.7 The voltage of pipeline core and coating when location of lightning changed

各个距离下的防腐层承受的阻性耦合电压最大值如表 3 所示,随着距离的增加,管道防腐层承受的阻性耦合电压值迅速下降,而后趋缓。以雷电流大小为 100 kA 估计,在距离入地点 100 m 外的管道耐压将不超过 10 kV。

表 3 雷电流入地距离对管道防腐层承受电压影响  
Table 3 Bearing voltage of pipeline coating when location of lightning changed

D/m	V <sub>w,max</sub> /kV	D/m	V <sub>w,max</sub> /kV
100	5.58	400	0.58
200	1.91	500	0.39
300	0.98		

### 3.3.3 土壤电阻率

通过改变土壤电阻率大小,分析了土壤电阻率对管道本体阻性耦合对地电压和管道防腐层承受的阻性耦合电压在雷电冲击下变化的影响。

管道本体阻性耦合对地电压和防腐层承受电压如图 8 所示,从图(a)可知,土壤电阻率的增加提高了管道本体的对地电压,且让电压最低点时间向后移动;从图(b)可知,防腐层承受电压最大值的出现时间点,随着土壤电阻率的增加略向后移动。

防腐层承受的阻性耦合电压最大值如表 4 所

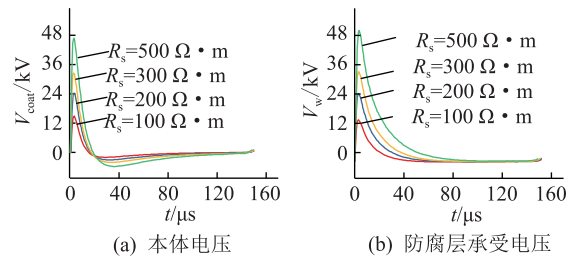


图 8 不同土壤电阻率下的管道阻性耦合电压时域波形  
Fig.8 The bearing voltage of pipeline coating and core voltage when various soil resistivity applied

示,土壤电阻率增加会引起管道本体和防腐层阻性耦合对地电压的增加,但其对两者的阻性耦合电压的影响不是线性的,其阻性耦合电压的增长速度随土壤电阻率升高逐渐降低。

表 4 不同土壤电阻率下防腐层承受电压  
Table 4 Bearing voltage of pipeline coating when various soil resistivity apply

$\rho/(\Omega \cdot m)$	V <sub>w,max</sub> /kV	$\rho/(\Omega \cdot m)$	V <sub>w,max</sub> /kV
100	5.58	300	12.30
200	9.21	500	18.66

### 3.3.4 雷电流经多杆塔入地

雷电流击中杆塔时,电流将从多个杆塔的接地结构入地。可考虑雷电流击中杆塔以及前后两个杆塔,按 10% 取前后杆塔雷电流的值,而原杆塔电流为原电流的 80% [25]。设置雷电流幅值为 30 kA,埋地管道和杆塔距离为 100 m,杆塔档距设为 200 m、400 m、600 m,在 0.01 kHz 到 100 kHz 的频率下,分析管道防腐层承受的阻性耦合电压与雷电流沿单个杆塔入地时承受电压的差异。

在不同杆塔档距下距离雷击杆塔最近的管道防腐层承受的阻性耦合电压仿真数值相对于无前后杆塔的变化率见表 5。各频率下管道防腐层承受电压均低于单杆塔电流接地。频率分量越高,前后杆塔对埋地管道最接近雷击杆塔的影响就越小,频率分量越低则反之,而管道本体对地电压则变化不大。改变管道和线路的距离,仍能得到类似结果。

表 5 不同频率经多杆塔入地时防腐层承受电压差值  
Table 5 Datasheet for induced voltage of pipeline coating when mutli tower model used

频率/kHz	距离 200 m	变化率 /%	距离 400 m	变化率 /%	距离 600 m	变化率 /%
0.01	524.676 3	12.16	719.314 9	16.67	793.601 1	18.39
0.1	524.853 3	12.09	720.754 1	16.60	795.864 3	18.33
1	537.911 6	10.89	754.562	15.28	847.851 3	17.17
10	777.596 9	18.17	1276.695	29.84	1 260.246	29.45
100	176.778 5	19.33	185.2924	20.26	185.007 1	20.23

## 4 结论

文中提出了一种短时大电流入地时管道阻性耦合电压计算方法,分别针对工频电流入地与雷电入地建立相应计算模型,并对影响因素进行分析,相关结论如下:

(1) 对于工频电流入地的情况,管道阻性耦合电压随电流幅值、土壤电阻率线性增长,土壤电阻率比电流幅值影响更大;随着电流入地点离管道最近点距离的上升,管道本体和管道防腐层对地电压均有所下降,防腐层承受电压也随而下降,下降速率与管道上的具体位置有关。

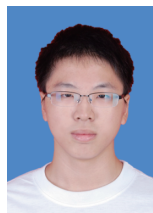
(2) 对于雷击输电线路的情况,随着电流入地点离管道最近点距离的增加,管道防腐层承受电压迅速下降,而后趋缓;土壤电阻率增加会引起管道本体和防腐层阻性耦合对地电压的增加,但其增长速度随土壤电阻率升高逐渐降低;雷电流经多杆塔入地时,防腐层承受电压均低于单杆塔电流接地。

### 参考文献:

- [1] 王爱玲. 750 kV 高压交流输电线路对埋地管道的干扰规律研究[D]. 青岛:中国石油大学(华东), 2013.  
WANG Ailing. 750 kV high-voltage AC transmission lines on buried pipelines disturbance study[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2013.
- [2] LATTARULO F. Electromagnetic compatibility in power systems [M]. Amsterdam: Elsevier, 2007.
- [3] 王强, 曲文晶, 苗金明. 管道腐蚀与防护技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.  
WANG Qiang, QU Wenjing, MIAO Jinming. Pipeline corrosion and protection technology [M]. Beijing: China machine press, 2017.
- [4] 安宁, 彭毅, 胡来林, 等. 输电线路遭受雷击时对输油输气管道的电磁影响[C]//贵州:2011年中国电机工程学会年会, 2011.  
AN Ning, PENG Yi, HU Lailin, et al. Electromagnetic influence on adjacent oil/gas pipeline due to the lightning strike on transmission line[C]//Guizhou: Annual meeting of chinese society for electrical engineering in 2011, 2011.
- [5] VENTURINO P, BOOMAN J N, GONZALEZ M O, et al. Pipeline failures due to lightning[J]. Engineering Failure Analysis, 2016, 64:1-12.
- [6] 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(11): 2881-2888.  
AN Ning, PENG Yi, AI Xianchang, et al. Electromagnetic effects on underground oil/gas pipeline of the lightning strike on EHV AC transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2012(11): 2881-2888.
- [7] 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(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(6):10-13.
- [8] 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 Xiaobo, LIAO Yongli, LI Ruihai, 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.
- [9] 董根生, 蒋剑, 相生荣, 等. 750 kV 交流线路对多条输气管道的电磁影响研究[J]. 中国电业(技术版), 2015(10): 16-22.  
DONG Gensheng, JIANG Jian, XIANG Shengrong, et al. Study on electromagnetic influence of 750 kV AC power transmission lines on gas/oil pipelines[J]. China Electric Power(Technology Edition), 2015(10): 16-22.
- [10] 陈登义, 谢林峰. 雷击输电线路对地上输气管道干扰影响[J]. 电瓷避雷器, 2017(2):85-89.  
CHEN Dengyi, XIE Linfeng. Disturbance and influence of transmission line struck by lightning on above-ground oil and gas pipeline[J]. Insulators and Surge Arresters, 2017(2): 85-89.
- [11] 李国庆, 黄金龙, 杜巍, 等. 高压直流输电线路对埋地管道的电磁影响限值分析[J]. 吉林电力, 2018, 46(2): 5-8.  
LI Guoqing, HUANG Jinlong, DU Wei, et al. Analysis of the electromagnetic effect limit of HVDC transmission line to buried pipeline[J]. Jilin Electric Power, 2018, 46(2): 5-8.
- [12] 曹方圆, 时卫东, 康鹏, 等. 接地材料对杆塔接地装置冲击接地阻抗的影响[J]. 中国电力, 2016, 49(10): 67-73.  
CAO Fangyuan, SHI Weidong, KANG Peng, et al. Influence of ground material on the impulse ground impedance of tower's grounding devices[J]. Electric Power, 2016, 49(10): 67-73.
- [13] 詹清华, 陈铸成, 李洪涛, 等. 杆塔入地雷电流对周边鱼塘的影响及防护方法[J]. 广东电力, 2018, 31(3):128-134.  
ZHAN Qinghua, CHEN Zhucheng, LI Hongtao, et al. Influence of tower grounding lightning currents on surrounding fish ponds and protective measures[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(3):128-134.
- [14] 黄欢, 郭洁, 何可夫, 等. 雷电冲击下杆塔接地阻抗特性研究[J]. 电瓷避雷器, 2017(3): 117-122.  
HUANG Huan, GUO Jie, HE Kefu, et al. Research on grounding impedance characteristic under lightning impulse [J]. Insulators and Surge Arresters, 2017(3): 117-122.
- [15] 王小凤. CDEGS 软件在电力系统中的应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.  
WANG Xiaofeng. Application of CDEGS software in power system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.
- [16] 关添升. 交流输电线路短路故障时对输油输气管道的电磁影响研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2012.

- GUAN Tiansheng. Electromagnetic influence of the AC transmission lines of grounding fault to the buried metal pipeline [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2012.
- [17] CHRISTOFORIDIS G C, LABRIDIS D P, DOKOPOULOS P S. Inductive interference calculation on imperfect coated pipelines due to nearby faulted parallel transmission lines[J]. Electric Power Systems Research, 2003,66(2):139-148.
- [18] 周国雨. 新建交流输电线路对埋地金属管道电磁影响研究[D]. 北京:华北电力大学, 2017.  
ZHOU Guoyu. Research on electromagnetic effect of new-built AC transmission lines on petroleum&gas pipelines[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [19] 中国电力企业联合会. 110 kV~750 kV 架空输电线路设计规范[M]. 北京:中国计划出版社, 2010.  
Department of China Electric Power Enterprise Association. Design specification for 110 kV~750 kV overhead transmission lines [M]. Beijing:China Planning Press, 2010.
- [20] 李景禄, 吴维宁, 胡毅, 等. 110 kV 平宝线杆塔接地改造及防雷效果分析[J]. 高电压技术, 2004(1): 53-58.  
LI Jinglu, WU Weining, HU Yi, et al. Analysis on grounding alternation and lightning protection [J]. High Voltage Engineering, 2004(1): 53-58.
- [21] 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, 49.  
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, 49.
- [22] 陈绍东, 王孝波, 李斌, 等. 标准雷电波形的频谱分析及其应用[J]. 气象, 2006, 32(10): 11-19.
- CHEN Shaodong, WANG Xiaobo, LI Bin, et al. Frequency spectrum of standard lightning currents and its application[J]. Meteorological Monthly, 2006, 32(10): 11-19.
- [23] 程锐, 李梅, 张新燕. 雷电电流的频谱和能量分析[J]. 四川电力技术, 2012, 35(3): 4-7.  
CHENG Rui, LI Mei, ZHANG Xinyan. Spectrum and energy analysis of lightning current[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2012, 35(3): 4-7.
- [24] 陈家宏, 童雪芳, 谷山强, 等. 关于雷电流幅值分布的探讨[C]//深圳:中国电机工程学会高电压专委会学术年会, 2007.  
CHEN Jiahong, TONG Xuefang, GU Shanqiang, et al. Discussion on amplitude distribution of lightning current[C]//Shenzhen: Annual meeting of high voltage specialized committee of Chinese society for electrical engineering, 2007.
- [25] 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.

作者简介:



梁玄鸿

梁玄鸿(1994),男,博士在读,研究方向为输变电设备状态评估与故障诊断(E-mail:liangxh1@126.com);

余骏阳(1990),男,硕士,助理工程师,从事状态检修工作(E-mail:yujy@cqu.edu.cn);

李后英(1996),女,硕士在读,研究方向为电气设备状态评估与故障诊断。

## Calculation method of resistive coupling voltage of buried steel pipelines in short-term high current

LIANG Xuanhong<sup>1</sup>, YU Junyang<sup>2</sup>, LI Houying<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology(Chongqing University),Chongqing 400044,China; 2. State Grid Sichuan Electric Power Company Maintenance Company,Chengdu 610041,China)

**Abstract:** The phenomenon of sharing corridor resources between AC overhead transmission lines and buried steel pipelines is becoming more and more frequent, and the resistance coupling voltage generated by short-term high current of lines will seriously accelerate the corrosion of pipelines. In order to quantitatively calculate the resistive coupling voltage of buried pipeline, a calculation method based on CDEGS simulation model is proposed in this paper. Firstly, the simulation model of large current entering the ground is established. Secondly, the calculation method of resistive coupling voltage of pipeline when power frequency current grounding is given, and the influence of current amplitude, soil resistivity and the distance between the nearest point of current entering and the pipeline on the resistance coupling voltage is analyzed. Finally, the calculation method of resistive coupling voltage taking into account frequency and time-frequency conversion are given when lightning flows into the ground. The calculation method of maximum exchange voltage is given, and the influence of lightning current amplitude, distance from the nearest point of the pipeline, soil resistivity and of lightning flow into ground through multiple towers on the resistance coupling voltage is analyzed.

**Keywords:** AC overhead transmission line; short-term high current; buried steel pipeline; resistive coupling voltage

(编辑 方晶)