

## 交流架空线对平行埋地钢制管道感性耦合的计算研究

李后英<sup>1</sup>, 余骏阳<sup>2</sup>, 梁玄鸿<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:**随着城市发展和能源需求的持续增大,交流架空输电线路对埋地钢制管道的电磁影响问题愈加突出。而传统方法主要利用电磁场仿真或大地回路等效模型实现耦合电压的计算,其方法复杂且耗时长。针对上述问题,提出了一种针对交流架空输电线路正常运行时对平行埋地钢制管道耦合电压的计算方法。文中首先建立计及多因素影响的单位长度管道耦合电压计算模型,其次通过分析绝缘连接和管道破损等因素对感性耦合电压最低点位置的偏移作用,给出了最低点位置的计算方法以确定管道耦合电压分布形式,最后提出了基于单位长度管道感性耦合电压增量和耦合电压分布形式的管道耦合电压计算方法。实例分析表明,相比于仿真值和实测值,其误差低于10%,能对管道耦合电压进行合理计算。

**关键词:**交流架空输电线路;埋地钢制管道;耦合电压;电压分布

**中图分类号:**TM75

**文献标志码:**A

**文章编号:**2096-3203(2019)02-0135-07

## 0 引言

近年来能源和电力工业飞速发展,架空输电线路与埋地管道路线规划均遵循路权优先原则<sup>[1-2]</sup>,导致“公共走廊”现象攀升。与输电线路邻近时,管道上会耦合感性电压,长期作用下将导致管道失效甚至形成爆炸等严重事故<sup>[3]</sup>。目前国内外学者对管道耦合电压的来源、耦合机理及影响因素分析等方面进行了深入研究,并取得一定进展<sup>[4-6]</sup>,但针对耦合电压的定量计算研究较少。

七十年代初,管道受附近输电线路影响的研究不断深入,管道-大地回路传输线模型被提出并作为经典方法不断发展<sup>[7]</sup>。学者们随后提出了解析法或有限元等进行计算,如文献[8]依据时域差分法,求解交流线路对临近平行管道瞬态电磁干扰,文献[9]将改进的有限元方法用于输电线路对埋地管道的稳态电磁干扰计算中,文献[10]提出在无限长管道假设下管道受输电线路电磁影响的分析方法。

总而言之,正常运行时线路对管道的感性耦合电压计算可以分为两类:第一类是在经典等值模型基础上探究如何更好得到模型中的阻抗参数,以符合基于电磁场感应的计算结论或现场实际值;第二类是基于电磁场基本方程对管道在特定磁场下感应电压进行计算,并通过有限元、矩量法等完成管

道感应耦合电压的计算<sup>[11-14]</sup>。第一类方法涉及到等效参数的精确确定问题,第二类方法需要专业人员针对每个情景建模分析,均难以对大量管线邻近案例进行大致评估和快速计算。同时限于人力物力,无法大量开展现场管道感应电压的测试。因此,亟需研究一种兼顾准确性和便利性的新方法,用于工程上评估管道受邻近线路耦合影响并帮助划定需要现场测试的高风险区域,加快管道现场测试效率,进而快速采取有效保护措施。

文中在大量仿真数据基础上,建立单位长度管道感性耦合电压计算模型,再通过定量研究管道和线路等参数对最低点的偏移贡献,最后实现耦合电压最低点位置及各处电压的计算。实例中通过对比仿真值与实测值,验证了所提方法的有效性。

## 1 单位长度管道感性耦合电压计算模型

## 1.1 单位长度管道段感性耦合电压

管道受输电线路正常运行下的感性耦合,通常会在管道上产生如图1所示的耦合电压。由图1得平行架空线路管道段的耦合电压在管道某一位置达到最低,并沿两侧上升。当忽略最低点处的较低电压值,以最低点位置为电压参考点时,便可通过管道最低点的位置以及管道各处的单位耦合电压,计算管道耦合电压的分布。

定义单位长度管道段感性耦合电压 $V_{ss}$ 为每单位长度管道段的电位差,即单位长度管道段电压增量。通过CDEGS仿真得到管道各段电压 $V_i$ ,则可由下式计算 $V_{ss}$ 的仿真计算值。

收稿日期:2018-10-27;修回日期:2018-12-29

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)

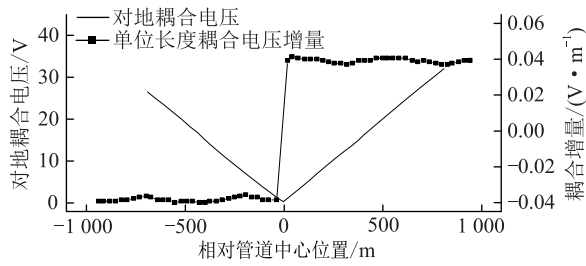


图1 单位长度感性耦合电压

Fig.1 The inductive coupling voltage of per unit length

$$V_{ss} = (V_{i+1} - V_i) / n \quad (1)$$

式中： $V_{i+1}$ 、 $V_i$  为相邻的两个管道段耦合电压； $n$  为每段的长度。为保证精度和计算速度的平衡，文中  $n$  设置为 10 m。

### 1.2 计算模型参数选取及独立性分析

相关研究表明<sup>[2]</sup>，管道耦合电压不仅受管道埋深和土壤电阻率影响，还应考虑输电线路的电流、线路高度、相间距离等。文中建立的单位长度管道耦合电压计算模型如式(2)所示。

$$V_{ss} = f(P_d, \rho, I, T_h, T_s, D) \quad (2)$$

式中： $P_d$  为管道埋深距离； $\rho$  为管道附近土壤电阻率； $I$  为三相电流的有效值； $T_h$  为杆塔高度； $T_s$  为塔头相间距离； $D$  为管道和线路水平距离。

为确定计算模型的具体数学表达形式，需要进行各影响因素对耦合电压影响的独立性分析，文中建立了图 2 所示的平行管段仿真模型。管道参数按某高压输气管道进行参照设计，如表 1。线路参数以 500 kV 高压输电线路规范进行设置<sup>[15]</sup>。

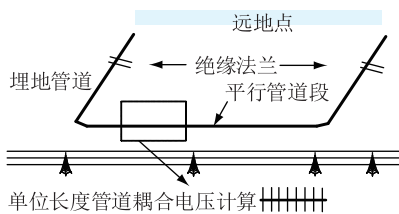


图2 平行单位长度管道耦合电压仿真模型

Fig.2 Analysis model for coupled voltage unit pipeline

表1 管道参数

Table 1 Parameters of pipeline

参数	数值
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	$300 \mu_0$
绝缘法兰电阻/ $\Omega$	$10^9$
管道内径/m	0.85
管道外径/m	0.9
防腐层厚度/mm	3

由系列仿真分析可得，各影响因素对耦合电压影响的独立性结果如表 2 所示。

表2 各参数对耦合电压影响的独立性分析  
Table 2 Analysis of independent of each parameter on coupled voltage

参数	独立性	参数	独立性
$I/\text{kA}$	独立	$T_h/\text{m}$	非独立
$T_s/\text{m}$	非独立	$P_d/\text{m}$	非独立
$\rho/(\Omega \cdot \text{m})$	非独立	$D/\text{m}$	非独立

### 1.3 管道感性耦合电压计算模型的建立

根据各参数相对于耦合电压的独立性关系，分别考虑线路电流以及其他参数对耦合电压的影响。则单位长度管道耦合电压的数学表达式写为：

$$V_{ss} = I f_{\text{com}} \quad (3)$$

式中： $I$  为独立参数对电压的线性影响<sup>[1]</sup>， $f_{\text{com}}$  为其余非独立参数对电压的综合影响。

对于非独立参数，均和耦合电压呈非线性关系，难以直接拟合。故采用前馈神经网络<sup>[16-17]</sup>表达多参数的影响，其表达形式如式(4)所示。

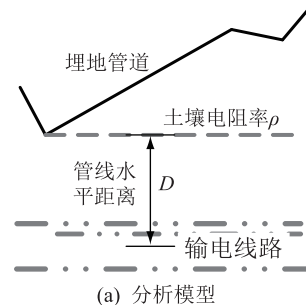
$$f_{\text{com}} = f_{\text{nn}}(T_s, T_h, P_d, D, \rho) \quad (4)$$

式中： $T_s, T_h, P_d, D$  和  $\rho$  为神经网络的输入参数。

## 2 各参数对管道耦合电压最低点影响分析

### 2.1 管道和线路参数的影响

为分析管道整体和输电线路距离改变时，土壤电阻率改变是否会对耦合电压最低点造成影响，建立图 3(a)模型，管道长约 4 km，电流大小 1 500 A，其他参数与第 1 节模型默认参数一致。计算不同整体管道和线路水平距离，以及不同土壤电阻率时管道上电压分布，计算结果如图 3(b)所示。由图 3(b)分布曲线可得，不同水平距离与不同土壤电阻率下耦合电压最低点仅有一个，故两者对最低点个数不造成影响。同时不同因素下电压最低点位置相差甚小，即对最低点位置的影响轻微。同理进一步仿真分析可得电流大小、线路高度以及相间距离等参数，也不影响管道最低点的位置和个数，可不纳入最低点位置计算分析中。



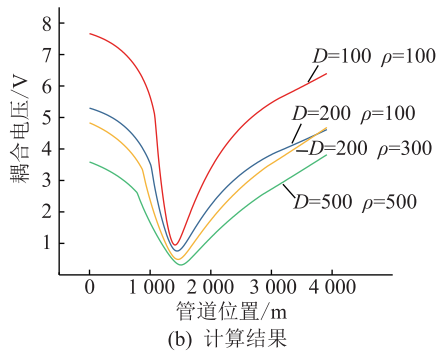


图3 管道和线路参数对耦合电压最低点的分析  
Fig.3 Influence analysis on voltage lowest point when parameters of pipelines and lines changed

### 2.2 绝缘连接的影响

当管道在线路邻近区域内存在绝缘连接件,如绝缘法兰或非金属管道段,应考虑其对耦合电压分布的影响。以绝缘法兰为例,建立图4的模型。

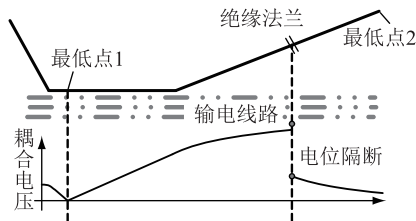


图4 绝缘法兰对电位分布的影响  
Fig.4 Effect of insulation flange on potential distribution

由图4可得,绝缘连接处出现了耦合电压相对极大值,同时绝缘法兰左右电位不一致,出现电位隔断,管道段两侧上分别形成两个新的耦合电压最低点。类似仿真证明,绝缘法兰对管道耦合电压分布的隔断不随其他因素改变,分析结论具有普遍性。故绝缘连接所在位置视为管道分析隔断点,可将两侧视为新管段进行独立计算。

### 2.3 管道防腐层破损的影响

由于生产施工不当、外界干扰等不利因素,管道防腐层可能存在破损,导致管道金属层直接接地。为分析其影响,在第1节基础上建立图5仿真模型,即以一小段无防腐层管段等效破损点。图5上半部分展示耦合电压的变化情况,可以看出耦合电压最低点向破损点偏移,破损点处电压值降低。

## 3 管道感性耦合电压最低点位置计算

### 3.1 有效影响区域确定

针对最低点位置的计算,可划定有效影响区域减少计算量。定义有效影响区域为在该区域内的管道走向明显影响一侧管道耦合电压最低点位置,如图6所示。依据输电线路和管道的水平距离进行

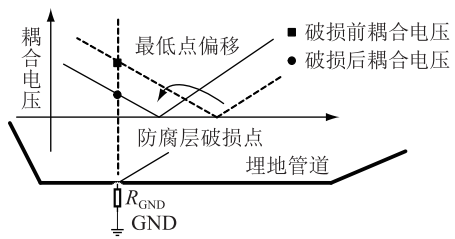


图5 防腐层破损点对管道耦合电压影响

Fig.5 The influence of damage point of anticorrosive coating on coupling voltage of pipeline

划分,各电压等级下影响区域划分具体如表3。



图6 有效影响区的定义

Fig.6 Definition of effective disturbing area

表3 有效影响区的划分

Table 3 The distance of the effective disturbing area

电压等级/kV	有效影响区域/m
100	300
220	500
500	800
>500	1 000

### 3.2 单管道段对最低点位置偏移的分析与计算

为研究在邻近输电线路时,管道段对耦合电压最低点的偏移影响,建立了图7所示的偏移分析模型。针对非跨越的管道段,将其分为平行段和延长段,图中原平行段长度为 $X$ ,非平行的管道延长段长度为 $L$ 。则在管道延长段上,每单位长度对平行段上耦合电压最低点位置的偏移大小,由下式计算:

$$C_i = f(x, y, X) \quad (5)$$

式中: $C_i$ 是单位长度偏移值,单位为 $m/m$ 。

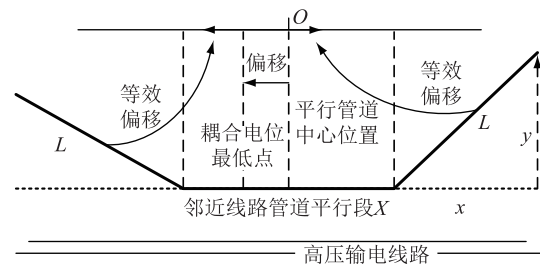


图7 单管道段对最低点位置偏移的分析模型

Fig.7 Model for analyzing the influence contributed by the single direction pipeline segment

仿真分析了平行段为2 000 m时,单位延长段(200 m分段)对管道耦合电压最低点偏移作用并绘

出了 X-Y 平面相对于平行段偏移量速率的彩色等高线图,如图 8 所示。

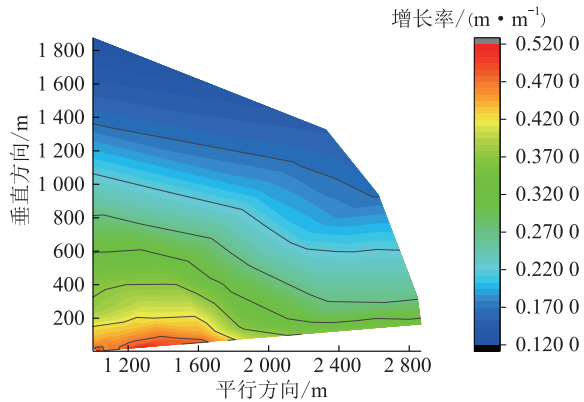


图 8 不同相对位置的偏移速率

Fig.8 Shifting rate map at different relative positions

由图 8 可知,水平方向附近存在延伸管道时对最低点偏移的影响较大,在远离平行段时影响较小。沿着管道水平方向较小角度时( $<10^\circ$ ),斜方向的管道起始对最低点偏移的影响很大,但在 1/2 平行段长度后,增长率快速下滑,并在之后保持一个缓慢的减少趋势;从管道垂直方向看,在垂直方向增长 1 000 m 后,新增斜方向管道段对平行段上最低点偏移小于最大单位偏移量的 30%,且各个方向增长率速度相同,即在该区域内,无论管道如何移动,其对最低点的偏移相等。该结论也适用于平行段长度为 300 m,500 m,1 000 m 的情况。

多次仿真分析表明,平行段管道旁的管道延伸段对平行段管道中心点的位偏移  $L_i$  与管道水平段长度,及管道延伸段距离管道的垂直和水平距离有关。通过拟合大量仿真数据,可用如下公式近似表达每米管道段对管道平行段中心点的平移。

$$\begin{cases} L_i = ax + by + c \\ b = -\frac{0.1171}{L_x} + \frac{60}{L_x^2} - 0.00014 \\ a = -7.32 \times 10^{-5} \\ c = 0.47923 \end{cases} \quad (6)$$

式中: $x$  为水平方向增长量; $y$  为垂直方向增长量; $b$  和水平段长度  $L_x$  有关。

### 3.3 耦合电压最低点位置计算流程

对于管道和线路平行邻近的情况,求取其耦合电压最低点位置时,可按照以下 3 个步骤计算:

(1) 确定管道平行段,即与邻近输电线路角度小于  $5^\circ$  的管道段均为平行段,并确定平行管道段的中心位置,作为原始最低点基准。

(2) 按照式(6)计算在有效影响区内的各单位

管段对平行段的耦合电压最低点位置的等效偏移。

(3) 统计各单位管道段的偏移作用,令右侧延伸段对最低点的偏移作用为正,反之为负。则相对于平行段中心的最低点偏移值为:

$$\Delta X = \pm \sum C_i L_i \quad (7)$$

式中: $C_i$  为对应  $L_i$  长度非平行段的等效耦合电压最低点偏移速率。

## 4 管道感性耦合电压计算流程

当已知管道在线路和管道邻近区的耦合电压最低点位置后,便可从最低点开始,结合单位长度管道电压计算管道两侧电位分布。流程见图 9。

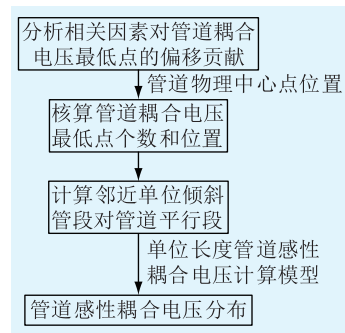


图 9 管道感性耦合电压分布计算流程

Fig.9 Flow chart of coupled voltage calculation

图 9 中步骤具体如下所示:

(1) 分析管道和输电线路相关因素的偏移作用;

(2) 确定管道耦合电压最低点位置和数量;

(3) 计算有效影响区域内各单位管段对分析管段的偏移作用;

(4) 以管道物理中心位置为起始点,计算两侧管道各段落的耦合电压增量,得到管道电压分布。

## 5 实例分析

苏南埋地输油管道工程中管道材质为 L415,管道直径为 406 mm,平均壁厚为 8 mm,管道防腐层采用熔结环氧粉末和 3PE。文献[18]中,对管道多处进行了多时间段的连续监测,发现多个管道段被干扰并得到了现场测试数据。初步分析,干扰源包括高铁变电所以及高压输电线路等。实例选择了其中某省道段附近管道,该区域附近和 500 kV 高压交流输电线路并行,测量结果表明其管道上耦合的交流电压日间变化幅度大,夜晚变化幅度小,符合输电线路负荷变化规律,因而可认为输电线路是管道产生耦合电压的主要来源。管道段测试桩平均间隔管道长度为 1~2 km。

输电线路平均电流按 1 500 A 计,其余参数值参考 500 kV 线路设计标准<sup>[12]</sup>。由于地区土壤电阻率范围约为 100~200  $\Omega \cdot \text{m}$ ,计算中按 200  $\Omega \cdot \text{m}$  进行单位长度管道耦合电压的计算。

管道和线路邻近区域计算如图 10 所示。可知管道和输电线路最近处距离为 47 m。为计算耦合电压分布,将管道和线路邻近区域等效为 7 个管道段,并以 I—VII 标号。图中阴影区为非有效影响区。

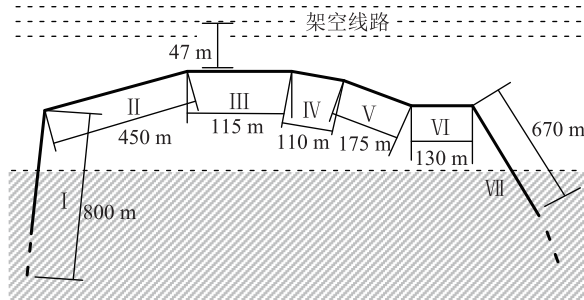


图 10 输电线路与埋地金属管道邻近区域地理图

Fig.10 Map for case study based on Transmission Line and nearby pipeline

由于绝缘法兰远离输电线路,可知管道上耦合电压最低点数量为 1 个。从图 10 得,第 III 段和第 IV 段与线路基本平行,认为两者都为平行段。此外, I 段和 VII 段与输电线路所呈角度大,在有效影响区内的长度基本相同,故认为其对耦合电压最低点位置贡献等效。因此,仅需考虑 II、V、VI 段对管道最低点偏移的影响。按第 3 节中方法计算得到结果如表 4 所示。

表 4 耦合电压最低点偏移

Table 4 Shift for lowest point of voltage

管道段	偏移量/m
II	-158.63
V	65.84
VI	39

按式(7)计算得总偏移量为-47.8 m,即耦合电压最低点的位置在 III 段上。因 I 段与 III 段的相对角度太大且距离远,忽略其贡献。计算 II—VII 段单位长度感性耦合电压增量,结果如表 5 所示。

表 5 各段变化电压值表

Table 5 The voltage variety value for each segment

管道段	单位变化量/( $\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$ )	变化值/V
II	0.012/0.024	8.1
III	0.034	1.6/2.3
IV	0.026	2.86
V	0.010	1.75
VI	0.011	1.43
VII	0.006	0.66

根据表 5,耦合电压最低点左侧最远处的耦合电压为 9.7 V,耦合电压最低点右侧最远处的耦合电压为 9.0 V。与 CDEGS 仿真的结果对比如表 6。由表 6 得,该方法和仿真计算值的误差在 10% 以内,说明该计算方法能够较好地代替仿真软件。经现场勘查,线路阴极测试桩实测值如表 7。

表 6 仿真软件结果的对比

Table 6 Comparison between CDEGS simulation and presented method

位置	计算值/V	CDEGS 值/V	差异率/%
2 段左侧	9.7	9.1	6.6
7 段远侧	9	8.3	8.4

表 7 苏南某成品油管道受邻近线路耦合电压现场测试值

Table 7 Filed monitoring value of Jiangsu petroleum pipeline near transmission line

测试桩	实测值/V	测试桩	实测值/V	测试桩	实测值/V
11	7.8	14	7.4	17	3.4
12	6.9	15	8.9	18	8.5
13	7.6	16	3.1	19	7.9

可以发现,现场测试最大值出现在测试桩 15 和测试桩 18,而计算得到的最大耦合电压值略大于实际测量最大值,差异率分别为 8.9% 和 5.8%。测试桩 16 和测试桩 17 测得的交流电压较低,符合管道耦合电压分布的一般规律。总的来说,文中的计算方法能够较好地给出管道感性耦合电压的值,帮助分析管道实际所受的交流耦合影响。

## 6 结论

文中通过工程仿真软件深入探究各影响因素对管道感性耦合电压的分布规律,提出了一种交流架空输电线路正常时对平行埋地钢制管道耦合电压的计算方法,并得出以下结论:

(1) 线路电流独立影响管道耦合电压,水平距离和土壤电阻率等共同对其产生综合影响。由此建立多输入单输出的单位长度管道感性耦合电压计算模型,并确定了输入参数和输出量的数学关系。

(2) 提出了耦合电压最低点个数和位置的计算方法,以确定耦合电压的分布形式。发现绝缘连接会影响耦合电压最低点个数,防腐层破损影响耦合电压分布。提出了结合管道耦合电压分布形式和单位长度耦合电压的管道耦合电压分布计算方法。

(3) 利用该计算方法对实际案例进行了计算,并与文献案例中的现场测试值和仿真值进行了对比,证明了该方法的有效性。

## 参考文献:

- [1] 王川化, 余鹏飞. 一种基于可靠性分析的输电线路路径设计方法[J]. 电力工程技术, 2017, 36(5):149-154.  
WANG Chuanhua, YU Pengfei. A transmission line path design method based on reliability analysis[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(5):149-154.
- [2] 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]. 山东:中国石油大学(华东), 2013.  
WANG Ailing. 750 kV high-voltage AC transmission lines on buried pipelines disturbance study[D]. Shandong: China University of Petroleum (East China), 2013.
- [3] 中国电力科学研究院, 北京国电华北电力工程有限公司. 保北一房山 500 kV 交流输电线路对输油输气管道电磁影响研究[R]. 北京:中国电力科学研究院, 北京国电华北电力工程有限公司, 2006.  
China Electric Power Research Institute, North China Power Engineering(Beijing) Co.Ltd. Research on electromagnetic interference from the baobei-fangshan 500 kV AC transmission line to nearby oil/gas pipeline [R]. Beijing: China Electric Power Research Institute, North China Power Engineering Co. Ltd, 2006.
- [4] TRIANTAFYLIDIS D G, PAPAGIANNIS G K, LABRIDIS D P. Calculation of overhead transmission line impedances a finite element approach[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(1):287-293.
- [5] GRCEV L, DAWALIBI F. An electromagnetic model for transients in grounding systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990, 5(4):1773-1781.
- [6] DAWALIBI 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.
- [7] 齐磊, 崔翔, 郭剑, 等. 特高压交流输电线路正常运行时对输油输气管道的感性耦合计算模型[J]. 中国电机工程学报, 2010(21):121-126.  
QI Lei, CUI Xiang, GUO Jian, et al. Inductive coupling modeling of normally operating UHV-AC transmission line to adjacent oil/gas pipeline [J]. Proceedings of the CSEE, 2010(21):121-126.
- [8] 唐剑. 电力线路对邻近并行埋地金属管道电磁干扰影响的研究[D]. 保定:华北电力大学, 2005.  
TANG Jian. Research of electromagnetic interference from power lines to a nearby underground metallic pipeline [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2005.
- [9] CHRISTOFORIDIS G C, DOKOPOULOS P S, PSANNIS K E. Induced voltages and currents on gas pipelines with imperfect coatings due to faults in a nearby transmission line[C]. 2001 IEEE Porto Power Tech Proceedings, 2001.
- [10] 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.
- [11] MA J, DAWALIBI F P, SOUTHEY R D. Computation and measurement of electrical interference effects in aqueducts due to a nearby parallel transmission line[C]//Proceedings of the 1997 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC, Piscataway, NJ, United States, 1997.
- [12] SELBY A, DAWALIBI F. Determination of current distribution in energized conductors for the computation of electromagnetic fields[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 9(2):1069-1078.
- [13] DAWALIBI F P, DONOSO F. Integrated analysis software for grounding, EMF, and EMI[J]. IEEE Computer Applications in Power, 1993, 6(2):19-24.
- [14] DAWALIBI F, SELBY A. Electromagnetic fields of energized conductors[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1993, 8(3):1275-1284.
- [15] 中国电力企业联合会. 110-750 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 110-750 kV overhead transmission lines [M]. Beijing: China Planning Press, 2010.
- [16] 王知芳, 杨秀, 潘爱强. 一种新的电压偏差预测方法[J]. 电力工程技术, 2018, 37(5):26-31.  
WANG Zhifang, YANG Xiu, PAN Aiqiang. A method of short-term voltage deviation forecasting[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(5):26-31.
- [17] 李路明, 刘志明, 张治国, 等. 基于 FBC 技术的抛物线与 BP 神经网络联合算法应用于架空线覆冰厚度监测的研究[J]. 智慧电力, 2017, 45(8):58-63.  
LI Luming, LIU Zhiming, ZHANG Zhiguo, et al. Overhead lines ice thickness monitoring based on FBC parabola method and BP neural network[J]. Smart Power, 2017, 45(8):58-63.
- [18] 陈亮. 苏南成品油管道交流杂散电流干扰检测及防护措施[J]. 腐蚀与防护, 2015, 36(8):779-783.  
CHEN Liang. AC interference detection and mitigation measures for sunan refined oil pipelines [J]. Corrosion and Protection, 2015, 36(8):779-783.

## 作者简介:



李后英

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(E-mail:1374757093@qq.com);

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

梁玄鸿(1994),男,博士在读,研究方向为电气设备状态评估与故障诊断。

## Calculation method for coupling voltage of parallel buried steel pipelines during normal operation of AC overhead transmission lines

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

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

**Abstract:** With the increase of urban development and energy demand, the electromagnetic influence of overhead alternating current (AC) transmission lines on buried steel pipelines is becoming more serious. Traditionally, the coupling voltage calculation methods mainly include electromagnetic simulation and calculation using earth loop equivalent model, which are complicated and time-consuming to get the pipeline coupled voltage. So, a method for calculating the coupled voltage on pipelines nearby the overhead transmission lines is proposed. Firstly, a calculation model for the unit-length pipeline coupling voltage under multiple factors is established. Secondly, by discussing the offset effect of insulation connection and pipeline breakage on the lowest point of inductive coupling voltage, the calculation method of the lowest point is given to determine the distribution form of pipeline coupling voltage. Finally, the calculation method of coupled voltage based on the increment of inductive coupling voltage per unit length pipeline and the distribution of coupling voltage is proposed. The example analysis shows that the error is less than 10% compared with simulated value and the measured value, and the coupling voltage can be reasonably calculated.

**Keywords:** buried steel pipeline; overhead ac line; coupling voltage; voltage distribution

(编辑 杨卫星)

(上接第 122 页)

## Design and implementation of network monitoring and fault location system for process layer network in smart substation

LI Chao<sup>1,2,3</sup>, LUO Linglu<sup>1,2,3</sup>, WANG Dehui<sup>1,2,3</sup>, ZUO Huanhuan<sup>1,2,3</sup>

(1. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211006, China;  
2. NARI Technology Co. Ltd., Nanjing 211006, China;  
3. State Key Laboratory of Smart Grid Protection and Operation Control, Nanjing 210061, China)

**Abstract:** In order to solve the problem that most of the existing network monitoring system can not support the display of process layer network topology and virtual connection circuit, this paper proposes a network monitoring online system based on the process layer switch. The system includes the host monitoring system and the process layer switch. The host monitoring system obtains the preset process level network topology and virtual connection logic circuit by parsing the SCD file. The process layer switch uses the ACL rule to capture and parse certain GOOSE and SV packets to obtain the device information connected to the switch. Then the host monitoring system obtains the actual process level network topology and the virtual connection physical circuit. Real-time monitoring and fault location of the process layer network are realized by comparing preset and actual network topology and virtual link loop. In practical applications, the system assists power system operation and maintenance personnel in real-time monitoring of network operation status and fault location, and improves the management level of power system automation operation and maintenance.

**Keywords:** process layer network; network monitoring; fault localization; network topology; virtual connection circuit

(编辑 方晶)