直流海缆对海底油气管线的感应电压计算

直流海缆故障时对邻近海底油气管线产生的感应电压可能会影响管道的安全。根据电磁耦合原理，采用等效电路的方法，计算不同条件下油气管道上的感应电压值，并分析其影响因素。结果表明，油气管道上的感应电压随着油气管道距离海缆的距离增加，磁感应电压急剧减小；不同交叉角度时，暂态感应电动势随着交叉角度的增大急剧减小。

陈国志[1,2] 宣耀伟[2] 陈国东[2] 张娜飞[1,2] 胡凯[1,2]/1.浙江舟山海洋输电研究院有限公司 2.国网舟山供电公司

陈国志/工程师

关键词/Keywords
直流海缆·
油气管道·
感应电压·
并行敷设·
交叉跨越·

直流海缆发生故障时，交变电缆产生的磁场在邻近的金属管道上通过磁耦合产生纵向感应电动势，当海缆与金属管道平行，且平行长度较长时，此纵向感应电动势在管道上引起较大的感应对地电压U，对管道造成威胁[1]。

本文计算了不同布置情况下直流海缆故障时对海底油气管线的感应电压，分析了影响因素，并进行了实例计算与分析。

计算原理

交变电流在管道上产生纵向感应电动势的示意图如图1所示。

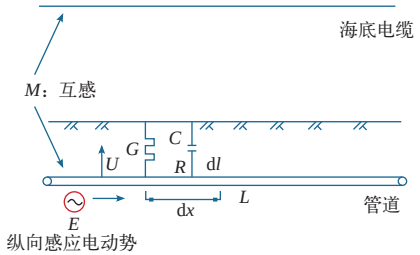

图1 海底电缆与管道理想平行时的感性耦合干扰示意图

对于管道而言，在进行干扰研究时可用如图2所示的电路等效，其中R'为管道分布电阻，L'为分布电感，G'为分布电导，C'为分布电容。

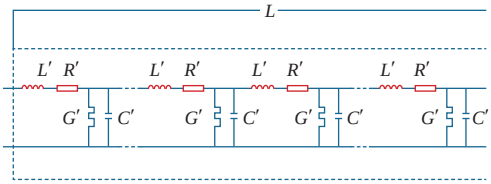

图2 管道等效电路

于是，输电线路对管道感性耦合干扰的计算电路图如图3所示[2]。

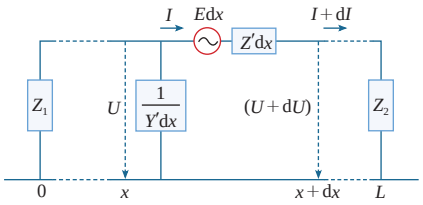

图3 感性耦合干扰的计算电路图

其中埋地管道特性参数Z'、Y'与R'、L'、G'和C'有关，计算埋地金属管道所受感应干扰电压时，必须知道管道特性参数。这些参数包括管道纵向阻抗Z'、管道横向导纳Y'、管道传输系数γ和特性阻抗Z等，又称为“管道－土壤”回路二次参数。管道纵向阻抗Z'包括管道分布电阻R'及分布电抗$\omega L'$，管道横向导纳Y'包括管道分布电导G及分布电纳$\omega C'$，关系如下[3]

$$Z' = R' + j\omega L' = |Z'|e^{j\alpha} \quad (1)$$

$$Y' = G' + j\omega C' = |Y'|e^{j\beta} \quad (2)$$

$$\gamma = \sqrt{Z'Y'} \quad (3)$$

$$Z = \sqrt{\frac{Z'}{Y'}} \quad (4)$$

式中，Z'的模满足$|Z'|^2 = R'^2 + (\omega L')^2$；相角$\alpha$满足$\tan\alpha = \omega L'/R'$；$Y'$的模满足$|Y'|^2 = G'^2 + (\omega C')^2$；相角$\beta$满足$\tan\beta = \omega C'/G'$。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

对于管道电阻R'及感抗$\omega L'$，管道横向导纳Y'包括管道电导G及容抗$\omega C'$，由下列各式给出[4-6]：

$$R'=\frac{\sqrt{\rho_{\text{steel}}\mu_0\mu_{\text{r}}\omega}}{\pi d\sqrt{2}}+\frac{\mu_0\omega}{8} \tag{5}$$

$$\omega L'=\frac{\mu_0\omega}{2\pi}\ln\left(\frac{3.7}{d}\sqrt{\frac{\rho_{\text{soil}}}{\omega\mu_0}}\right)+\frac{\sqrt{\rho_{\text{steel}}\mu_0\mu_{\text{r}}\omega}}{\pi d\sqrt{2}} \tag{6}$$

$$G'=\frac{\pi d}{r_{\text{u}}} \tag{7}$$

$$\omega C'=\frac{\omega\pi d\varepsilon_0\varepsilon_{\text{r}}}{s} \tag{8}$$

式中，d为管道直径；s为管道防腐层厚度；r_u为管道防腐层电阻率；ρ_{soil}为管道沿线土壤电阻率；ρ_{steel}为管道钢质本体电阻率；μ_0为真空磁导率；μ_{r}为管道钢的相对磁导率；ε_0为真空介电常数；ε_{r}为管道防腐层相对介电常数。

直流海缆对油气管道的安全防护计算

1. 故障状态下油气管道上的感应电压计算

直流海缆对金属管道安全运行的影响，主要考虑直流海缆故障时的暂态影响。海缆短路故障时对油气管道影响如图4所示。

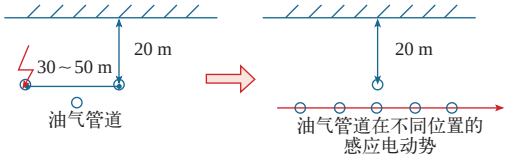

图4　单根海缆短路故障时对油气管道影响示意图

海缆与海底油气管道：上下间距保持1 m，海缆居上，海缆加无磁保护套管保护。油气管道金属护套直径取50 cm，管道外层材质：3～5 cm水泥层。

以海缆200 MV·A容量，并行长度39 km为例，计算结果如图5所示。

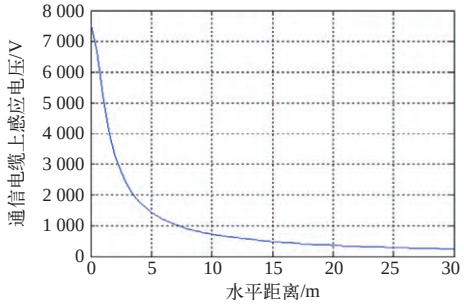

图5　单极短路故障时油气管道上的感应电压

2. 上下间距变化对管道感应电压的影响

海缆与海底油气管道：海缆居上；海缆加无磁保护套管保护。短路电流20 kA，上下间距变化。油气管道金属护套直径取333.4 mm，管道外层材质：51 mm混凝土层。计算结果如图6所示。

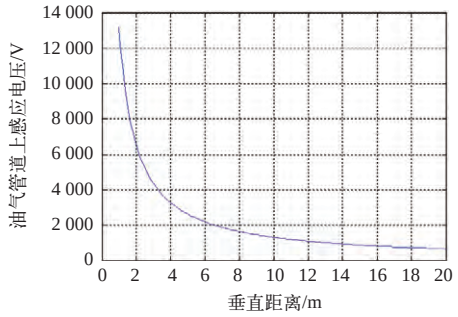

图6　单极短路故障时油气管道在不同位置处的暂态感应电动势

3. 交叉跨越对管道感应电压的影响

考虑交叉角度的影响，交叉角度θ从0～90°变化。海缆与油气管道交叉情况下的计算模型如图7所示。

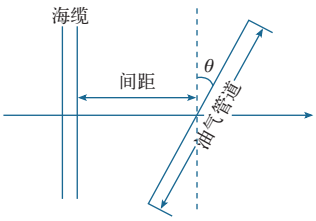

图7　油气管道与海缆交叉的计算示意图

国际大电网会议36.02工作组在题为“Guide on the Influence of High Voltage AC Power Systems on Metallic Pipelines”的导则中指出：“当电力线路发生故障时，电力线路在邻近金属管线上产生的感应电压的安全限值为800～1 000 V[7]。”取安全限值1 000 V，由图6计算结果可得海缆与油气管道的安全间距为13.5 m。取海缆与油气管道的平行间距为13.5 m，其他计算条件与上述海缆并行条件相同。

单极短路故障时，油气管道在不同交叉角度的感应电动势如图8所示。由图8可以看出，单极短路故障时，油气管道在不同交叉角度时的暂态感应电动势随着交叉角度的增大急剧减小。当油气管道与海缆交叉时，由于长度远大于中心间距，可近似认为油气管道关于电力电缆中心对称

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

交叉，这样在油气管道上的磁通方向相反，产生的感应电动势会完全抵消。

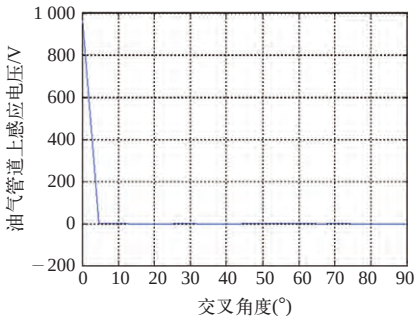

图8 单极短路故障时油气管道在不同交叉角度时的暂态感应电动势

且由图8可知，当交叉角度为90°时，油气管道上的感应电动势为零。即垂直交越时，油气管道上无感应电动势。

计算实例分析

计算条件：燃气管道钢管等级API 5L×52，内径333.4 mm，外径355.66 mm，管壁外包覆6 mm厚煤焦油瓷漆防腐涂层，涂层外有51 mm混凝土配重层，计算管线上的暂态感应电压。假设线路交越如图9所示，求解直流海缆故障时在输气管道上的感应电压。

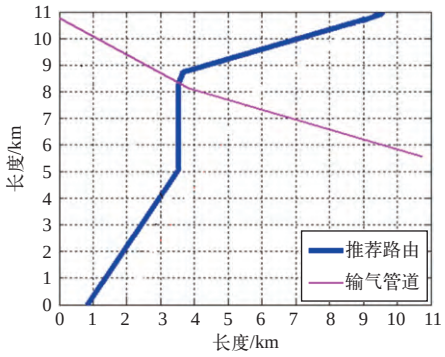

图9 交越计算示意图

对于不规则形状的磁场计算，采用分段求解的方式，对要求解的区域进行细分dl，当分段足够小时，可取dl中心到电缆的距离近似代替平均距离。由安培定律可求得管道上的感应电压ε，即

$$\begin{cases}\phi=\dfrac{\mu_0 I}{4\pi}\iint S\dfrac{\vec{W}\,\mathrm{d}l_1}{W^3}\mathrm{d}l_2\\ \varepsilon=\dfrac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}t}\end{cases}\tag{9}$$

式中，W为电流路径到计算点的距离；l为电流积分路径；S为管道截面积；ε为管道上感应电压。

取短路电流值为20 kA，具体计算结果如下表所示。

表 计算结果

干扰对象	暂态干扰计算值/V	干扰限值/kV	是否满足安全要求
输气管道	3.3	1	是

结束语

直流海缆故障时，油气管道上由磁耦合感应的电压感应电压值与管道的直径相关，且随着油气管道距离海缆的距离增加，磁感应电压急剧减小；不同交叉角度时暂态感应电动势随着交叉角度的增大急剧减小。

通过对交越线路的计算得出，直流海缆在短路电流取20 kA时，交越段输气管道上的暂态干扰电压值为3.3 V，远小于干扰限值1 kV，满足安全要求。此计算可为工程应用提供依据。

参考文献

[1] 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]．河北：华北电力大学，2004．

[2] 谢辉春，宋晓兵．交流输电线路对埋地金属管道稳态干扰的影响规律 [J]．电网与清洁能源，2010，26 (5)：22-26．

[3] 吴燕．输电线路正常运行时对埋地金属管道的电磁影响研究 [D]．北京：华北电力大学，2009．

[4] 齐磊，原辉，崔翔．埋地金属管与架空电力线路并行时管道饱和平行长度及最大金属电位计算 [J]．高电压技术，2011，37 (10)：2601-2606．

[5] 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．

[6] 齐磊，原辉，崔翔．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，2010，30 (21)：126-126．

[7] 郭剑，曹玉杰，胡士信，等．交流输电线路对输油输气管道电磁影响的限值 [J]．电网技术，2008，32 (2)：17-20．

（收稿日期：2015－02－10）EA

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net