

[变电站]

北京城市变电站及其电缆线路对埋地燃气管线的电磁影响与防护措施研究

文/陈 晶¹ 李 伟¹ 王恩德¹ 陈 骁² 李 潇¹

1. 北京电力经济技术研究院有限公司; 2. 北京秦准数据有限公司

介绍了北京城市变电站及其电缆线路与邻近埋地燃气管道平行接近的基本情况; 参考国内外相关标准, 提出了针对本工程的变电站和电缆线路对埋地燃气管道的电磁影响限值建议。针对城市变电站及其电缆线路正常运行、变电站发生单相接地短路时对附近埋地燃气管道的电磁影响程度进行了计算分析和评估。

北京某220 kV变电站周边有城市燃气管线, 与变电站及电力电缆存在交叉和平行的情况。变电站和电力电缆对埋地油气管道可能造成的危害主要有两方面: 一是站外电缆线路正常运行时的交流电流对金属管线的稳态电磁影响; 二是当变电站或电力电缆发生单相接地故障时在金属管线上产生瞬态电磁影响。这两类影响可能威胁管线操作人员的人身安全; 击穿金属管线的绝缘层, 导致金属管道遭受的交流腐蚀超标。针对上述问题, 对变电站及其电缆线路出线对邻近埋地燃气管道的电磁影响进行仿真分析和防护措施研究, 为工程的设计和建设提供数据支撑。

影响机理及对象分析

变电站及其电缆线路对埋地油气管道的电磁影响从机理上主要可分为感性耦合影响和阻性耦合影响两类, 主要涉及对人身安全的影响、对管道安全的影响以及对管道的交流腐蚀等问题。

电磁影响限值

1. 人身安全电压限值

(1) 电缆线路正常运行时的人身安全电压

长时间作用下的人体接触电压限值一般分为15 V、33 V和60 V三级。本工程中人体长时间安全电压限值应按照职业人员来确定, 取60 V(有效值)。

(2) 输变电工程发生短路故障时的人身安全电压

根据短时作用下的人体瞬间安全电压有关标准, 本工程的故障切除时间不超过0.12 s, 采用1 500 V作为本工程人体瞬间安全电压限值。

2. 埋地油气管道安全电压限值

熔结环氧粉末(FBE)防腐层工频情况下的瞬时耐压为14~15 kV, 三层聚乙烯(3PE)防腐层工频下的瞬时耐压为57 kV。管道防腐层的工频瞬时耐受电压值远高于人体瞬时安全电压。因此, 对于变电站或电缆线路发生单相接地故障时的工况, 以1 500 V的人体瞬时安全电压作为该工况下的管道防

腐层电压限值。

3. 埋地油气管道交流腐蚀限值

管道的腐蚀程度和防腐层耐腐蚀水平应根据管道向土壤中流散电流的密度来衡量。本研究采用当管地电位 ≤ 4 V或管地电位 >4 V时,交流泄漏电流密度 <30 A/m²作为管道的交流腐蚀是否需要采取防护措施的控制标准。

工程基本参数

某220 kV变电站及其电缆线路按照2025年规划考虑。220 kV变电站共有8回220 kV和4回110 kV电缆出线,220 kV电缆型号为ZC-XLPE-127/220 kV-1 $\times$ 2 500 mm²,110 kV电缆型号为ZC-YJLW02-64/110-1 $\times$ 800 mm²。变电站和电缆线路与埋地燃气管道的相对位置关系如图1所示,两条埋地燃气管道与220 kV变电站的相对位置关系均按距离变电站接地网5 m考虑。隧道两侧接地线每隔100 m相互连接,且接地线全线贯通直至连接至变电站接地网。隧道内不超过500 m均会在两侧埋设一组接地棒(材质选用钢材或无氧热镀锌覆钢)。每组接地棒敷设方式:每5 m打一个垂直接地棒(L50 mm $\times$ 5 mm $\times$ 2 500 mm),其中深入土壤长度为2 000 mm,每侧打10根(共50 m范围),综合接地电阻小于1 Ω 。变电站接地电阻约为0.3 Ω 。220 kV变电站涉及电缆线路正常输送电流为180~460 A,发生单相接地故障时的故障电流为48 kA左右。

管道1、管道2和管道3内/外半径为0.254 m/0.246 m,埋深2~2.5 m,防腐层按三层聚乙烯(3PE)考虑。

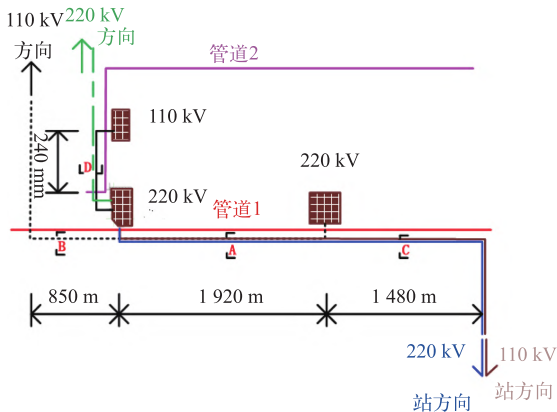


图1 相对位置关系模型示意图

对埋地燃气管道电磁影响的计算

1. 220 kV 变电站及其电缆线路对埋地燃气管道电磁影响的计算

1. 电缆线路正常运行时的管地电压计算

采用专用电磁仿真软件,建立220 kV变电站及其电缆线路与埋地燃气管道的三维模型,并计算得到管道沿线对地电压结果。220 kV变电站及其电缆线路正常运行时,在管道1上产生的对地电压最大值在1.62~3.59 V之间,在管道2上产生的对地电压最大值在0.48~0.86 V之间,均满足管地电压不超过4 V的交流腐蚀限值要求,更满足不超过60 V的人体长时安全电压限值要求。管道1上的对地电压主要受电缆护套上的感应电流影响,管道2上的对地电压主要受接地网附近的地电位影响。

为尽可能清晰地分析电缆金属护套上感应电流的由来及其对管道的影响,计算分析了6个仿真模型,结果如图2所示。

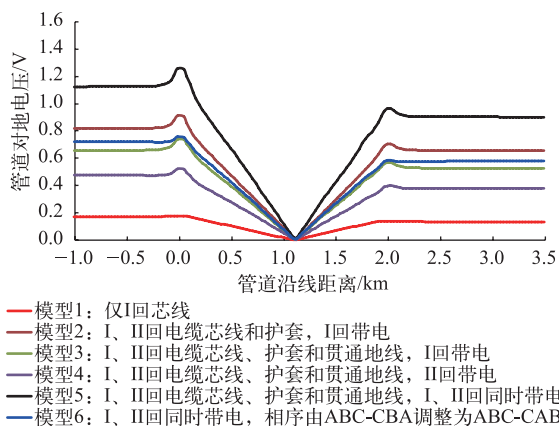


图2 六个模型下管道对地电压沿线分布图

1) 模型1结果显示,仅芯线在其护套(三相综合)上感应的电流较小,约0.06 A,管道上的对地电压最大值为0.18 V,主要由三相芯线与管道的距离不平衡而引起。

2) 模型2结果显示, I回路芯线在II线路护套上感应的电流较大,约13.8 A,管道上的对地电压主要由II线路护套上的感应电流引起。主要原因是, II回线路的三相金属护套均在I回线路的同侧,全线感应电动势都属叠加状态,因此,三相综合的护套感应电流较大。

3) 模型3结果显示,隧道两侧的贯通地线对电缆金属护套上的感应电流起到一定的削弱作用。

4) 模型4结果显示, II回线路芯线在I回线路金属护套上感应的电流大小基本相同, 且由于相序关系, 两个模型中护套感应电流的相角也相差不大; 而I回线路芯线距离管道较近, 考虑芯线电流和护套感应电流的综合影响, 模型3的管道对地电压最大值较模型4的大。

5) 模型5结果显示, 当I、II回线路均带电运行时, 由于两回线路上感应电流的大小和相角基本相同, 因此, 其在管道上产生的对地电压基本等于两回线路单独运行时管地电压相加。

6) 模型6结果显示, 由于相序调整, II回线路芯线在I回线路金属护套上的感应电流相差不大, 但相角相差 100° , 两者对管道相互之间的影响有一定的削弱, 因此, 其在管道上产生的综合对地电压比单回线路的影响略大, 但比两回线路单独运行时直接相加的影响小。

可见, 电缆金属护套上的感应电流主要由附近回路电缆芯线上的电流感应而来, 对于邻近电缆线路的埋地燃气管道, 金属护套上的感应电流通过空间的磁耦合也会在管道上产生对地电压。

为进一步明确影响规律, 分别计算管道与220 kV变电站接地网距离1 m、5 m、10 m和15 m以及与电缆线路的对应距离分别为28 m、24 m、19 m和14 m时的对地电压, 结果如图3所示。

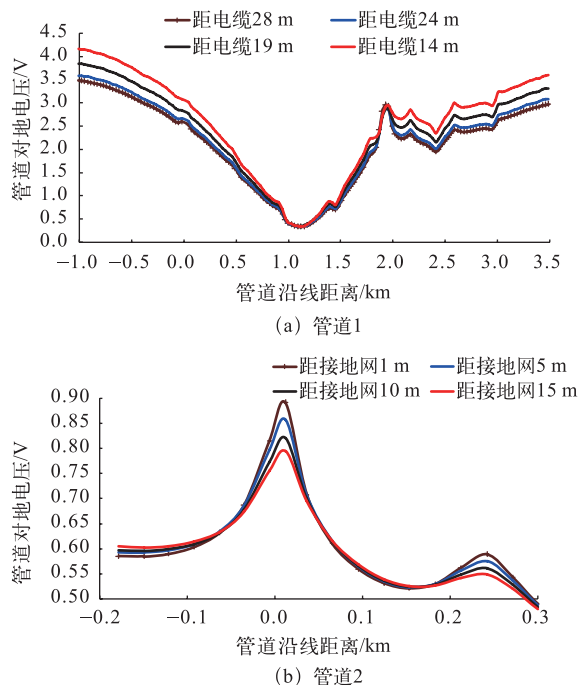


图3 不同接近距离下管道上对地电压沿线分布图

1) 对于管道1, 随着管道距离电缆线路越近, 管道上的对地电压越大。这主要是由于其与电缆线路有约4.2 m的近距离平行, 电缆线路护套上电流在管道上通过感性耦合产生的对地电压远大于接地网附近地电位对管地电压的影响。本例中当管道1与电缆线路距离为14 m时, 管道上的对地电压最大值可达4.16 V, 超过了4 V。

2) 对于管道2, 随着管道距离电缆线路越远 (即距离接地网越近), 管道上的对地电压越大。主要原因是管道2与电缆线路仅有240~500 m的近距离平行, 护套上电流在管道上产生的感性耦合电压较小, 管道上的对地电压由于距离接地网较近, 受接地网附近地电位影响较大。

2. 220 kV变电站发生单相接地短路故障时对管道电磁影响的计算

以最靠近管道1的A相电缆作为故障相建立仿真模型, 计算220 kV变电站单相接地故障时对邻近埋地燃气管道的电磁影响。从计算结果可以看出: 管道1上的防腐层电压最大值不超过600 V, 管道2上的防腐层电压最大值不超过330 V, 均满足不超过1 500 V的人体瞬时安全电压限值要求, 如图4所示。

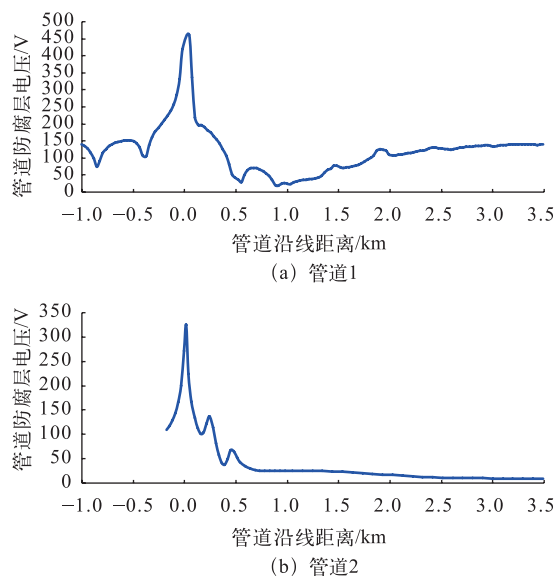


图4 发生单相接地故障时管道的防腐层电压沿线分布图

220 kV变电站发生单相接地故障时, 故障电流一部分经由变电站接地网流入大地, 一部分则经由电缆金属护套和贯通地线回流至各相连变电站和隧道两侧接地体。此时, 故障电流在220 kV变

电站接地网处的入地系数约为2.6%（总故障电流48 000 A，接地网入地电流1 248 A）。一方面，接地网入地电流较小，通过土壤在管道上产生的阻性耦合电压也相应较小；另一方面，电缆金属护套和贯通地线的回流较大（方向与故障电流相反），在管道上产生的感应耦合电压可极大削弱电缆芯线上故障电流产生的管地电压，使得管道上的综合对地电压较小。

需要说明的是：交流输电工程发生单相接地故障时，若管道某处无任何金属部分延伸至地面，人无法接触到管道金属部分，即使此处的对地电压超过了人体瞬时安全电压限值，不会对人体产生危害。

从结果可以看出：在其他条件不变的情况下，变电站处发生单相接地短路故障时，随着土壤电阻率的增大，管道防腐层电压也增大。主要由两方面原因引起：一是随着土壤电阻率的增大，变电站接地网附近的地电位明显增大；另一方面，土壤电阻率的增大，使得电缆芯线上故障电流在管道上产生的感性耦合作用增强，从而导致管道上的防腐层电压增大。本例中，当土壤电阻率为 $300\ \Omega\cdot\text{m}$ 、管道1距离220 kV变电站接地网5 m时，管道防腐层电压最大值超过了1 500 V的人体瞬时安全电压限值，达到了1 598 V，如图5所示。

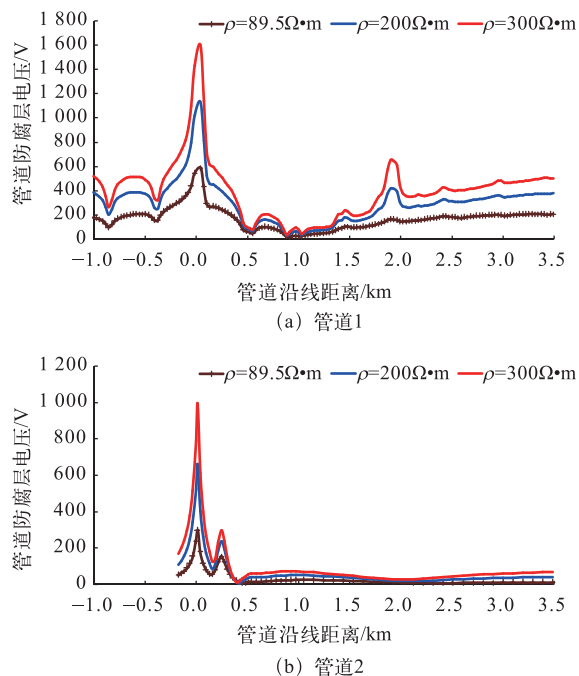


图5 不同土壤电阻率下发生单相接地故障时管道的防腐层电压沿线分布图

防护措施研究

根据前述计算分析，本工程220 kV变电站及其电缆线路对邻近的埋地燃气管道的电磁影响均满足相关限值要求，不需要采取防护措施。目前我国管道部门在对管道进行防护时，较多采用的一项措施是沿管道敷设锌带，锌带与管道通过隔断直流、导通交流与耦合器相连（避免管道上的阴保电流流失）。这种防护措施发挥了锌带的屏蔽效应，更重要的是由于锌带具有良好的接地效果，管道相当于通过小电阻接地，因此可以显著降低管道的对地电压。

结束语

1) 220 kV变电站及其电缆线路正常运行时，在管道1上产生的对地电压最大值在1.62~3.59 V之间，在管道2上产生的对地电压最大值在0.48~0.86 V之间，均满足管地电压不超过4 V的交流腐蚀限值要求，更满足不超过60 V的人体长时安全电压限值要求。

2) 220 kV变电站发生单相接地短路故障时，管道1上的防腐层电压最大值不超过600 V，管道2上的防腐层电压最大值不超过330 V，均满足不超过1 500 V的人体瞬时安全电压限值要求。

3) 电缆线路正常运行时，芯线电流在邻近其他回路电缆金属护套上产生的感应电流是导致邻近埋地燃气管道上感性耦合电压较高的主要原因。同时，电缆线路的输送电流、相序、与埋地燃气管道的平行长度、接近距离和变电站地网的接地电阻等参数对管地电压结果也有较大影响，工程分析中相关参数需尽可能准确。

4) 给出了管道常用的排流接地措施，结果表明：对于城市变电站及其电缆线路附近的埋地燃气管道，选择合适的敷设位置和接地体长度，常用的排流接地措施可以有效地降低电缆护套上感应电流以及变电站故障电流对管道的电磁影响程度。EA

（收稿日期：2022-10-17）

参考文献

- [1] 白锋，陆家榆，林珊珊，等．特高压交直流输电线路同走廊正常运行时对邻近埋地油气管道的电磁影响分析[J]．电网技术，2016，40(11)：3609-3614．