

随地铁共同敷设高压电缆外表杂散电流研究

随着城市的快速发展,城市地下空间日趋紧张,利用市政公用隧道敷设高压电缆在世界范围内已经被广泛采用。近年来,随着以地铁为代表的城市交通大规模规划建设,利用地铁富余空间敷设电缆高压具有广阔的发展前景。在以直流供电系统供电的轨道交通中,作为回流通路的轨道往往不能做到对地完全绝缘,这就导致了一部分电流泄漏形成杂散电流,敷设于轨道附近的电缆外表导电层中同样会产生杂散电流。杂散电流会对随地铁敷设的高压电缆产生腐蚀,从而给电缆的长期安全稳定运行带来严重的危害。以南京地铁为例,依据地铁隧道工程图建立了地铁隧道内电阻分布的网络拓扑结构,并通过Matlab建模仿真对比了机车在单边供电和双边供电、加排流网和不加排流网以及排流网两端与轨道相连和排流网两端与电缆相连等不同工况下的杂散电流的分布情况,同时指出了杂散电流带来的危害以及必要的防护措施。

李 振¹ 王作民² 陈庭记³ 肖 晶³ 黄 磊³ / 1.东南大学电气工程学院
2.中国能源建设集团江苏省电力设计院有限公司 3.国网江苏省电力公司
南京供电公司

0 引言

城市轨道交通由地铁、轻轨和单轨单车等组成,立足于城市客运交通,具有大运量、占地少、安全快捷、受气候等因素影响小和环保节能等优点,随着我国经济的不断发展,城市持续扩容,人口高度集中,城市交通拥堵情况日趋严重,城市轨道交通能够有效地缓解城市交通的紧张状况^[1]。目前国内的城市轨道交通均采用直流牵引供电形式,直流牵引供电系统主要由牵引变电所、接触网和回流系统组成,回流系统有钢轨作为回流轨。由于钢轨对大地不能完全绝缘,且对地存在一定的压降和过渡电阻,所以会有一部分电流泄漏到大地形

成杂散电流,杂散电流会对地铁隧道的结构钢筋以及其他埋地金属件和高压电缆产生严重的电化学腐蚀,因此对杂散电流的分析研究是十分必要的。

国外对杂散电流的研究起步较早,在杂散电流的实时监控方面,美国、德国、日本和前苏联等国家的城市轨道交通已经有近百年的历史,运营过程中由杂散电流腐蚀地下金属结构造成的数起严重事故引起这些国家对杂散电流、轨道电位监测及日常维护管理的高度重视,很多高等院校及铁路研究所都设置了专门机构从事这方面的研究^[2]。目前,对杂散电流的防护国际上通常采用的标准有:国际标准IEC 62128-2、德国标准VDV 501/2和欧洲标准EN 50 122-2。这些标准适用于采用直流电力牵引和钢轨回流方式的地铁设计、施工以及运营维护等各个环节。

国内对杂散电流的研究相比国外起步较晚,但也进行了若干研讨和实践工作,并且取得了不少研究成果。在杂散电流监测方面制定了相关的规程,给出了需监测的参数及监测方法。但是由于地铁运营环境的特殊性和杂散电流产生存在的复杂性,最初国内的监测手段还不能实现日常测量,只做阶段性的间接测量和总体评价。间接测量包括杂散电流泄漏状态和结构钢筋极化状态。前者用实测走行轨对排流网过渡电阻和走行轨与排流网的电位差来计算走行轨对排流网的泄漏电流,后者通过测定结构钢筋电位与参比电极之间的电位差来评价泄漏到结构钢筋上的杂散电流。时至今



李 振/讲师

关键词/Keywords

杂散电流·

网络拓扑·

排流网·

杂散电流腐蚀·

国家电网江苏电力公司科技项目(J2015053)。

日,国内大多数新建地铁项目都有杂散电流监控系统,对杂散电流的模型研究也进行了小规模实验验证^[3]。

国内外的直流牵引供电系统中杂散电流的防护一般采取两种方式:第一种是隔离方式,即控制杂散电流产生的根源,隔离所有可能的杂散电流泄漏途径;第二种是排流方式,这种方式是人为地使杂散电流回到干扰源,国内普遍的做法是利用轨道轨枕下纵向设置的杂散电流收集网,引至各牵引变电所的负母线^[4]。

地铁杂散电流的影响是地铁设计、建设和运营维护中必须考虑的问题。研究中主要存在的问题在于:杂散电流分布的准确模型很难确定,杂散电流难以直接准确测量,根据所监测的参数,很难预测出金属结构在杂散电流作用下的腐蚀程度和腐蚀趋势;目前广泛使用整体道床排流网进行杂散电流的排流,其中杂散电流的分布情况、排流网的合理分布都需要进一步研究;影响地铁杂散电流分布的钢轨纵向电阻和钢轨对地电阻等重要参数缺乏有效的测量手段和监控方法^[5]。

目前直流牵引供电系统的轨道交通往往通过对隧道内地铁机车运行时产生的杂散电流的研究,依据实地考察的隧道工程结构建立了相应的杂散电流分布的网络拓扑结构,结合地铁机车实际运行情况,对单边供电和双边供电、加排流网和不加排流网以及排流网两端与钢轨相连和排流网两端与电缆相连等不同工况下机车运行时所造成的杂散电流进行对比分析。同时结合得到杂散电流对高压电缆腐蚀情况的结果,提出降低杂散电流大小的相应措施,从而将杂散电流对高压电缆和地铁安全运行的影响降至最低。

1 模型建立

1.1 离散电阻网络拓扑

本文以南京地铁三号线轨道为例进行研究。地铁轨道断面如图1所示。高压电缆计划敷设于地铁隧道底部的腔体内,在腔体两侧的混凝土壁上设置电缆支架,电缆置于支架之上。在轨道-电

缆-地构成的电阻网络中,轨道经过混凝土填充层与地连接,同时轨道也经过混凝土填充层及电缆支架与电缆外表导电层相连,电缆外表通过电缆支架及混凝土填充层与地相连接。



图1 地铁轨道断面

轨道-电缆-地之间构成一个三层的电阻网络,该电阻网络为分布参数网络,其离散拓扑结构如图2所示。

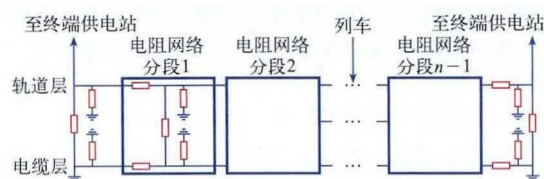


图2 离散电阻网络拓扑结构

1.2 节点电压方程

根据电缆随地铁敷设的离散电阻网络可列写网络的节点电压方程如下

$$\begin{cases} -u_{1n-1}G_{11} + (G_{12} + G_1 + 2G_{11})u_{1n} - G_{12}u_{2n} - G_{11}u_{1n+1} = 0 \\ -u_{2n-1}G_{12} + (G_{12} + G_2 + 2G_{12})u_{2n} - G_{12}u_{1n} - G_{12}u_{2n+1} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, G_{11} 、 G_{12} 为轨道和电缆外表皮的纵向电导; G_1 、 G_2 为轨道和电缆的对地电导; G_{12} 为轨道与电缆之间的电导; u_{1n} 、 u_{2n} 分别为第 n 个分段节点处轨道和电缆外表皮的电位。

纵向电导为串联关系,每分段电导为单位长度电导除以分段长度;对地电导和轨道与电缆之间电导为泄漏电导,分段间电导为并联关系,每分段电导为单位长度电导乘以分段长度。

根据电阻网络两端的连接情况可确定节点电压方程的边界条件如下

$$\begin{aligned} (G_{12}/2 + G_1/2 + G_{11})u_{11} - G_{11}u_{12} + I_1 &= 0 \\ u_{21} &= 0 \\ (G_{12}/2 + G_1/2 + G_{11})u_{1n} - G_{11}u_{1n-1} + I_2 &= 0 \\ u_{2n} &= 0 \\ -u_{1m-1}G_{11} + (G_{12} + G_1 + 2G_{11})u_{1m} - G_{12}u_{2m} - G_{11}u_{1m+1} &= I_r \end{aligned} \quad (2)$$

式中, I_1 、 I_2 分别为左右两端从轨道流入终端供电站的电流; I_r 为列车运行总电流, 该电流从列车所在位置注入铁轨。

I_1 、 I_2 和 I_r 三者之间满足关系如下

$$I_1 + I_2 = I_r \quad (3)$$

1.3 模型求解

根据离散电阻网络的节点电压方程, 在Matlab中编写程序对系统的各节点电压进行求解, 并从节点电压获取杂散电流。求解结果如图3~图5所示。本文建模过程中采用220 kV高压电缆随地铁轨道敷设, 根据电缆结构图计算得到电缆外表导电层的纵向电阻为 $2.516 \Omega/\text{m}$, 轨道纵向电阻根据地铁公司数据取 $2.5 \times 10^{-5} \Omega/\text{m}$, 轨道对地电阻取 $1.5 \times 10^4 \Omega/\text{m}$, 轨道对电缆电阻取 $3 \times 10^3 \Omega/\text{m}$, 电缆对地电阻取 $1.5 \times 10^4 \Omega/\text{m}$; 列车运行时工作电流取3 kA, 两端供电站之间距离为3 km。

从图3可知, 电缆外表导电层的电位两端位置

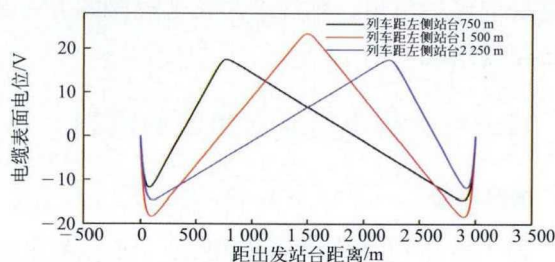


图3 随地铁轨道敷设电缆表面电位分布

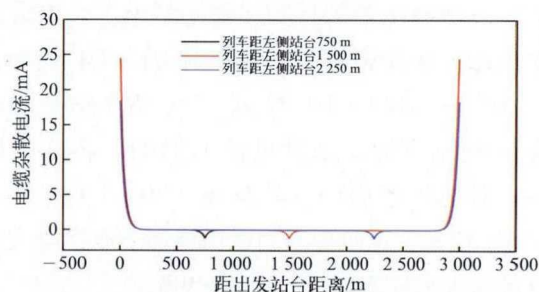


图4 随地铁轨道敷设电缆表面杂散电流分布

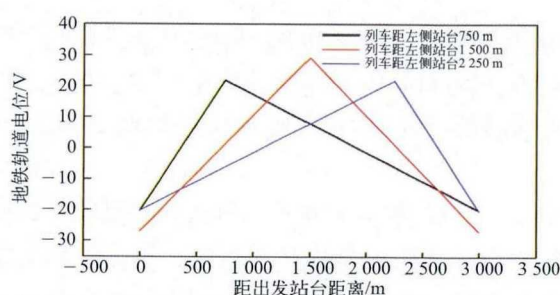


图5 地铁轨道电位分布

低于地电位, 而中间位置高于地电位; 由于列车处有很强的运行电流注入, 因此电缆外表电位在列车所在位置达到最大值。但从图4中来看, 电缆外表杂散电流在轨道两端最大, 在轨道中间位置杂散电流基本为零; 而在列车所在位置杂散电流为负值。造成这一现象的原因在于: 在轨道的两端, 虽然电缆表面电位为负, 但轨道电位更低。在电缆-轨道构成的电化系统, 电缆外表导电层构成阳极, 杂散电流从电缆流出。在轨道中段, 虽然电缆导电层电位高于地电位, 但轨道的电位相比电缆更高, 地铁轨道构成阳极, 电缆导电层有杂散电流流入。

2 排流网对杂散电流的影响

为了减少杂散电流对地铁轨道的腐蚀, 地铁一般利用混凝土填充层中的钢筋结构作为排流网, 从而减小轨道中的杂散电流。本课题研究了在排流网情况下, 电缆随地铁轨道敷设时电缆表皮中的杂散电流大小。排流网的增加相当于将图2的三层电阻网络变成了轨道-排流网-电缆-地组成的四层电阻网络, 其离散电阻网络结构如图6所示。

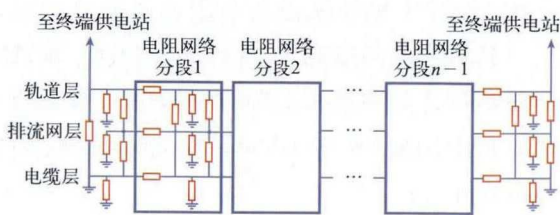


图6 含排流网的离散电阻网络拓扑结构

根据电阻网络结构, 可列写系统的节点电压方程如下

$$\begin{cases} -u_{1n-1}G_{11}+(G_{12}+G_{13}+G_1+2G_{11})u_{1n}-G_{12}u_{2n}-G_{13}u_{3n}-G_{11}u_{1n+1}=0 \\ -u_{2n-1}G_{12}+(G_{12}+G_{23}+G_2+2G_{12})u_{2n}-G_{12}u_{1n}-G_{23}u_{3n}-G_{12}u_{2n+1}=0 \\ -u_{3n-1}G_{13}+(G_{13}+G_{23}+G_3+2G_{13})u_{3n}-G_{13}u_{1n}-G_{23}u_{2n}-G_{13}u_{3n+1}=0 \end{cases} \quad (4)$$

式中, G_{11} 、 G_{12} 和 G_{13} 为轨道、排流网和电缆外表皮的纵向电导; G_1 、 G_2 和 G_3 为轨道、排流网和电缆的对地电导; G_{12} 为轨道与排流网之间横向电导; G_{13} 为轨道与电缆之间横向电导; G_{23} 为电缆与排流网之间横向电导; u_{1n} 、 u_{2n} 和 u_{3n} 分别为第 n 个分段节点处轨道、排流网和电缆外表皮的电位。

地铁排流网通常的处理方法是在端部将混凝土填充层内的所有钢筋焊接在一起,再通过引线连接到终端供电站的负极,在不考虑引线阻抗的情况下,这种连接方法相当于在端部将排流网与轨道短接。此连接方法将影响到第一组节点和最后一组节点的节点电压方程,始端和终端的节点电压方程为

$$\begin{aligned} & \left(\frac{G_{13}+G_{23}+G_1+G_2}{2} + G_{11} + G_{12} \right) u_{11} - \frac{G_{13}+G_{23}}{2} u_{31} - G_{11}u_{12} - G_{12}u_{22} = 0 \\ & u_{11} - u_{21} = 0 \\ & u_{31} = 0 \\ & -G_{11}u_{1k-1} - G_{12}u_{2k-1} + \left(\frac{G_{13}+G_{23}+G_1+G_2}{2} + G_{11} + G_{12} \right) u_{1k} - \frac{G_{13}+G_{23}}{2} u_{3k} = 0 \\ & u_{1k} - u_{2k} = 0 \\ & u_{3k} = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

根据上述各节点的电压方程,通过Matlab编写程序对系统的各节点电压进行求解,并从节点电压获取杂散电流。含排流网情况下电缆表面杂散电流与不含排流网情况下的杂散电流对比如图7所示。计算中地铁轨道与电缆电阻取值和前文相同,排流网纵向电阻取 $1.1 \times 10^{-4} \Omega/\text{m}$,地铁轨道与排流网之间电阻取 $1.5 \times 10^4 \Omega/\text{m}$,排流网与电缆之间电阻取 $3 \times 10^3 \Omega/\text{m}$,排流网对地电阻取 $3 \times 10^3 \Omega/\text{m}$ 。

从图7可看出,增加排流网后,电缆表面杂散电流显著降低。增加排流网相当于为地铁轨道和电缆构建了一个泄流通道,一大部分杂散电流通过排流网后再经过地回路回流到供电系统中,因此地铁

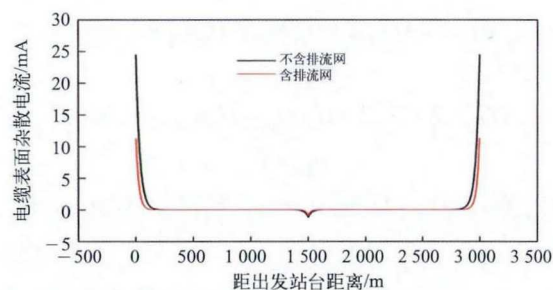


图7 排流网对电缆表面杂散电流影响

轨道与电缆导电层的杂散电流均会大大降低。

为了研究排流网对电缆的保护作用,本课题还研究了另一种排流网的接法,即在轨道端部将排流网与电缆外皮短接,而非一般情况下与地铁轨道短接。这两种连接方法下,列车处于不同位置时的电缆最大杂散电流如图8所示。

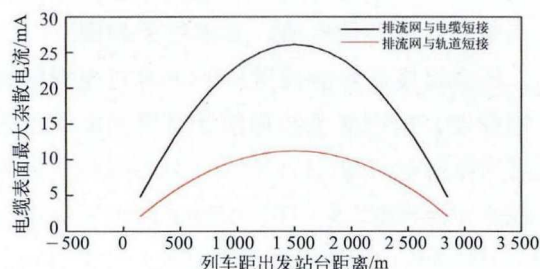


图8 排流网不同连接方式对电缆杂散电流的影响

从图8不难看出,在排流网与轨道短接的情况下,电缆中的杂散电流更小。因此为了对电缆起到更好的保护作用,排流网与轨道短接的方式是最佳连接方式。

3 降低电缆导电层杂散电流的措施

3.1 加强绝缘

为了减小电缆中的杂散电流,可加强电缆对轨道、排流网及地的绝缘,从而更好地隔绝机车牵引电流对电缆的影响。初始情况下,电缆对地铁轨道、地及排流网电阻分别为 $3 \times 10^3 \Omega/\text{m}$ 、 $1.5 \times 10^4 \Omega/\text{m}$ 和 $3 \times 10^3 \Omega/\text{m}$ 。为研究加强电缆处绝缘对电缆导电层杂散电流的影响,本文同时对这三种电阻增加 $5 \times 10^3 \Omega/\text{m}$ 、 $10 \times 10^3 \Omega/\text{m}$ 及 $15 \times 10^3 \Omega/\text{m}$ 。这四种不同电阻情况下电缆最大杂散电流随机车位置变化结果如图9所示。

从图9可以看出,加强电缆处对外绝缘能够非

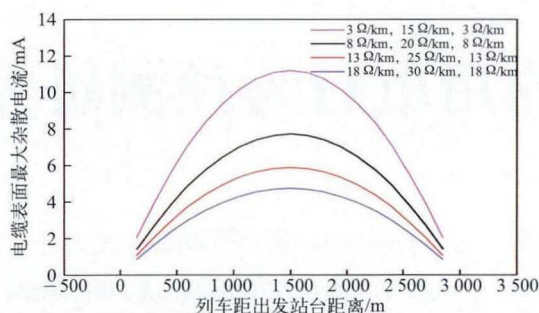


图9 加强电缆处绝缘对电缆导电层杂散电流影响

常有效地降低电缆内杂散电流,是电缆杂散电流防护的有效措施。但电缆处绝缘从 $3 \times 10^3 \Omega/\text{m}$ 增加到 $8 \times 10^3 \Omega/\text{m}$ 时,表面最大杂散电流仅降低了25%左右,加强绝缘成本较高,而效果并非十分理想。此外,随着时间的推移,轨道混凝土层变得潮湿,电缆处的绝缘会随之降低,此种防护方法的效果也会大大降低。

3.2 主动降电位防护法

之所以在轨道两端处电缆导电层有杂散电流流出,原因在于轨道两端处电缆表面的电位高于地铁轨道电位。因此,若采取一定措施,主动降低轨道两端处的电缆电位,将能够对降低电缆导电层杂散电流起到良好的效果。根据前文中列车运行时的地铁轨道电位,设置轨道两端电缆导电层的电位分别为 -2 V 、 -4 V 和 -6 V ,即在原先电缆外表接地处施加一低压直流电源,主动降低电缆导电层电位情况下的电缆表层杂散电流分布如图10所示。

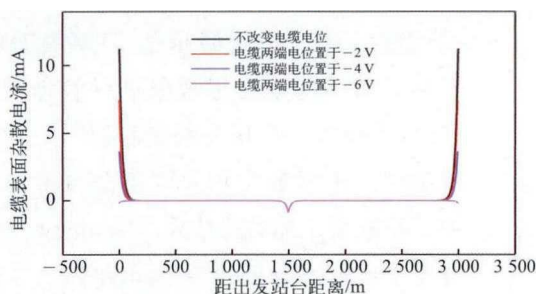


图10 主动降低电缆导电层电位对电缆导电层杂散电流影响

从图10可以看出,主动降低电缆表面电位对于改善电缆导电层杂散电流效果十分显著,随着外加电压幅值的增加,电缆导电层杂散电流迅速下降,当外加电压达到 -6 V 时,电缆导电层不再

存在向外流出的杂散电流。

相比于传统的加强绝缘的方法,主动降低电缆电位的防护方法仅需要若干低压直流电源,实施成本低;且防护效果持续性强,不会受到绝缘下降的影响。另外,该方法仅需要降低电缆电位几个伏特,对电缆本身基本没有影响。

4 结束语

本文以南京地铁为例,依据地铁隧道工程图建立了地铁隧道内电阻分布的网络拓扑结构,并通过Matlab建模计算了地铁运行时在电缆表面导电层中产生的杂散电流分布及电缆表面电位分布。本文对比了安装排流网和无排流网、排流网两端与轨道相连和排流网两端与电缆相连等不同工况对电缆杂散电流的影响。研究表明排流网的安装对于降低电缆表面杂散电流效果显著,并且在排流网与轨道短接的情况下,排流网对电缆的保护效果更好。

本文还根据研究成果提出了增强电缆处绝缘和降低电缆电位两种防护措施,以降低电缆表面杂散电流,根据研究成果,两种防护措施均有明显效果,但加强绝缘的方法成本较高,且随着时间的推移绝缘下降将导致防护效果变差;而降低电缆电位的方法成本更低,效果持续性更好,因此推荐使用降低电缆电位的防护措施。

参考文献

- [1] 王逸松. 国外城市轨道交通建设及其对我国发展轨道交通的启示[J]. 铁道通信信号, 2000, 36(1): 32-33.
- [2] 李威. 地铁杂散电流腐蚀监测及防护技术[M]. 北京: 中国矿业大学出版社, 2004.
- [3] 李振芳. 地铁杂散电流分布及在线监测系统研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.
- [4] 马笑松. 地铁杂散电流的腐蚀及防护影响分析[J]. 城市轨道交通研究, 2007, 10(6): 64-66.
- [5] 庞原冰. 城市轨道交通杂散电流研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.

(收稿日期: 2015-10-11) EA