

跨海公铁两用大桥电力电缆与铁路共用接地系统的可行性研究

孙萍丽

(中交机电工程局有限公司, 湖北 武汉 430064)

摘要: 当高压电力电缆通过公铁两用大桥时, 电力电缆接地与铁路接地系统需共用接地装置。电力系统单相接地短路时将引起钢轨电位升高, 可能会危及铁路运行安全。为此需对电力电缆接地与铁路综合接地系统共用接地装置是否可行进行研究。基于 PSCAD 与多导体传输线理论建立了包含电力系统与铁路系统的综合模型, 研究电力系统发生单相短路故障时, 钢轨电位升高对铁路系统产生的影响。仿真结果表明在输电线路短路时引起的钢轨电位抬升没有超过钢轨电位的允许值 785 V, 电力电缆接地可与铁路综合接地系统共用接地系统。

关键词: 铁路接地系统; 贯通地线; 钢轨电位

Feasibility study on power cable and railway common grounding system of sea crossing highway and railway bridge

SUN Pingli

(CCCC Electromechanical Engineering Bureau Co., Ltd., Wuhan 430064, China)

Abstract: When the high-voltage power cable passes through the highway railway bridge, power cable grounding and railway grounding system need to share grounding device. The rail potential will rise when the single-phase grounding short circuit of power system is happened, it may endanger the safety of railway operation. Therefore, it is necessary to study the feasibility of sharing grounding device between power cable grounding and railway integrated grounding system. Based on PSCAD and multi conductor transmission line theory, a comprehensive model including power system and railway system is established, the influence of rail potential rise on railway system when single-phase short-circuit fault occurs in power system is studied. The simulation results show the rail potential rise caused by short circuit of transmission line does not exceed the allowable value of rail potential 785 V, power cable grounding can share the grounding system with railway integrated grounding system.

Key words: railway grounding system; through ground wire; rail potential

0 引言

随着海岛开发的逐步升温, 优势明显的交通桥梁成了连接海岛与大陆通道的首要选择^[1]。相较于海底电缆的敷设模式, 桥上电力电缆的敷设可以提高输送容量与输送效率, 解决长期困扰海

岛的电力输送问题。

根据电力电缆设计相关规定, 高压电缆金属层必须接地, 当电缆对金属层发生短路时, 短路电流可流入接地线。目前常用的接地方式主要有三种形式^[2]: 单端接地、双端接地和交叉互连接

地。目前,为限制金属层上的感应电压引起的环流,220 kV电力电缆一般采用交叉互联接地的形式。

根据铁路设计相关规定,为降低短路或雷电影响引起的钢轨电位,铁路沿线建筑物防雷接地、强弱电接地采用了铁路综合接地系统^[3-4]。铁路综合接地系统中的贯通地线每隔一段距离与钢轨相连,对钢轨中的负荷电流分流,降低钢轨电位。桥梁段贯通地线一般与桥墩相连。当高压电力电缆通过公铁两用大桥时,桥上电缆是采用单独设立接地装置还是与铁路综合接地系统中的贯通地线相连,共用桥墩接地体,目前尚未有研究结论。当电缆接地与铁路综合接地系统共用接地装置时,电缆线路发生短路,故障电流将会经铁路接地系统入地,提高钢轨电位。为评估电缆线路接地对铁路接地系统的影响,需要对流入铁路接地系统中的短路电流进行计算分析。

由于杆塔、电缆金属层接地的实际情况,故障条件下各相电量之间并不对称,针对输电线路短路时的分流问题,文献[5]提出了基于相参数模型的双侧消去法。文献[6-7]在此基础上进一步提出了统一广义双侧消去法,可分析具有不同电气结构互联的线路系统。但无论是哪种方法,其本质均是求解电路网络方程。本文基于PSCAD对输电线路的电力系统进行建模,根据多导线传输理论建立铁路接地系统的耦合矩阵,具体分析当输电线路发生短路时引起的钢轨电位抬升。

1 短路电流分析

电力系统短路故障可以分为变电站站内短路和站外短路两种类型,当桥上电缆接地与铁路综合接地系统相连时,电力电缆金属层与贯通地线相连经桥墩接地。与站内短路相比,站外的电力电缆短路对钢轨电位抬升具有更大的危害。这是由于站内短路时短路电流在流入铁路接地系统前大部分已沿输电线路中回流线的接地体入地,如通过电缆金属层与杆塔接地电阻入地,流入铁路

接地系统的短路电流较小。因此,本文主要研究工况为站外短路引起的钢轨电位抬升。

当桥上电力电缆芯线对金属层发生短路时,短路电流的分布如图1所示。

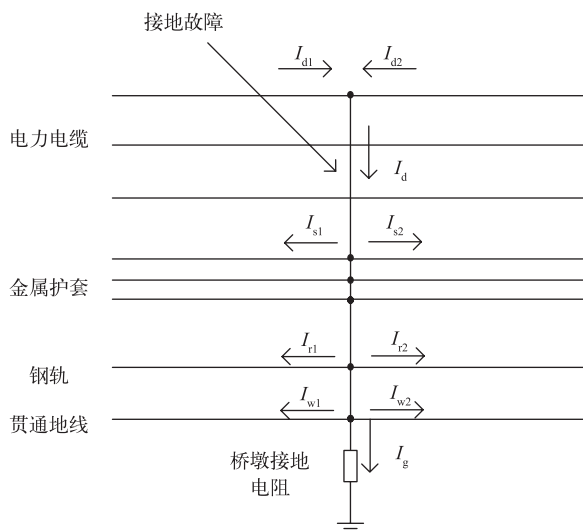


图1 短路电流分布

Fig. 1 Short circuit current distribution

图1中,短路总故障电流为 I_d ,该电流是由输电线路两侧电源提供,根据基尔霍夫定律,该电流最终会流向两侧电源。总故障电流可以分为四部分:①经电缆金属层流回两侧电源的电流 I_s ;②流入钢轨的电流 I_r ;③流入贯通地线的电流 I_w ;④通过接地体入地的电流 I_g 。

根据上述分析桥上电力电缆芯线对金属层发生短路时的电流分布,由桥墩接地电阻入地的电流 I_g 对钢轨电位抬升起主要作用,忽略接地引线电阻,钢轨电位为

$$U_r = I_g R_j \quad (1)$$

式中, U_r 为钢轨电位, R_j 为接地体电阻。

2 计算模型

2.1 铁路综合接地系统

铁路牵引供电系统中,各线路平行于钢轨架设。由承力索、接触线、正馈线、保护线、钢轨和贯通地线共同构成了一个多导体传输线系统。忽略其他导体的影响,仅考虑桥梁段钢轨、贯通地线对电缆线路故障电流分流的影响以及入地电

流对钢轨电位的抬升作用,钢轨与贯通地线参数如表1所示。相对位置如图2所示。

表1 综合接地系统主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters of integrated grounding system

类型	符号	规格	电阻 / (Ω/km)	等效半径 / mm
钢轨	T	P60	0.135	6.5
贯通地线	G	TJ70	0.28	4.055

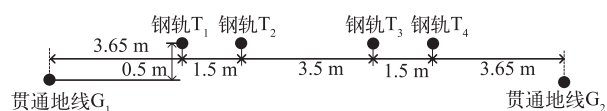


图2 铁路综合接地系统截面图

Fig. 2 Cross section of railway integrated grounding system

图2给出了铁路钢轨、贯通地线的横向侧视图。图2中钢轨 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 和贯通地线 G_1 、 G_2 每隔一段距离会相互连接。在一般的牵引供电线路中,取上行钢轨与下行钢轨之间的连接线间距为3 km;钢轨与贯通地线连接线的间隔距离为3 km。贯通地线每隔50 m会与桥墩相连,以桥墩作为铁路综合接地系统的接地体,由于桥墩位于海中,海水电阻率较小,设桥墩接地电阻为 $0.3 \Omega \cdot \text{m}$ 。

基于多导体传输线理论的链式网络模型,根据下式求取钢轨与贯通地线的耦合矩阵方程

$$Z_{ii} = R_i + R_c + j0.144 \lg \frac{D_g}{r_{ci}} \quad (2)$$

$$Z_{ij} = R_c + j0.144 \lg \frac{D_g}{d_{ij}} \quad (3)$$

式中, Z_{ii} 为单位长度自阻抗, Ω/km ; Z_{ij} 为单位长度自阻抗, Ω/km ; R_i 为导线自电阻, Ω/km ,忽略趋肤效应的影响,其值等于直流下的导线电阻; R_c 为大地电阻,工频下可以取 $0.05 \Omega/\text{km}$; r_{ci} 为导线等效半径,mm; d_{ij} 为导线 i 与导线 j 之间的垂直距离,mm; D_g 为大地电流等值深度。

D_g 的计算公式为

$$D_g = \frac{20.85}{\sqrt{f\delta \times 10^{-9}}} \quad (4)$$

式中, f 为电流频率,工频下取50 Hz; δ 为大地电导率,不同地质下的大地电导率不同,但大地电导率的取值对结果影响较小,一般取为 0.01 S/m 。

2.2 电力系统

本文建立的输电线路包含220 kV架空线路、220 kV桥上电缆与陆上电缆三部分,线路整体结构如图3所示。

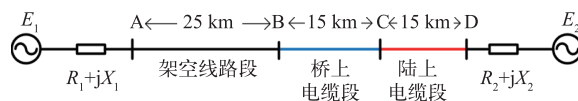


图3 线路整体结构

Fig. 3 Overall structure of line

在图3表示的线路整体结构中,输电线路全长为55 km,AB段为架空线路,长度 $L_{AB}=25 \text{ km}$ 。线路由两根避雷线、一回三相交流输电线路构成,档距为400 m。BD段电缆线路总长度 $L_{BD}=30 \text{ km}$ 。其中,BC段桥上电缆段长度 $L_{BC}=15 \text{ km}$,CD段陆上电缆段的长度 $L_{CD}=15 \text{ km}$,架空线路与电缆线路的具体参数如表2、表3所示。

表2 架空线路参数

Tab. 2 Overhead line parameters

类型	型号	电阻 / (Ω/km)
导线	LGJ-240	0.198
避雷线	GJ-50	0.642

表3 220 kV 电缆线路参数

Tab. 3 220 kV cable line parameters

结构	内半径 / mm	外半径 / mm	材料
导体	0	30.5	铜
半导体层	30.5	62.6	交联聚乙烯
金属层	62.6	65.4	电工铝
外绝缘	65.4	70.4	聚氯乙烯

仿真电路图如图4所示。在PSCAD中建立输电线路中架空线路、桥上电缆和陆上电缆的模型,分别为Transmission Line模块、Bridge Cable Line模块和Land Cable模块。架空线路杆塔接地电阻为 10Ω ,每隔1.5 km,电缆金属层与铁路综合接地系统相连;电缆金属层接地电阻为 4Ω ,线路两侧为电源 E_1 、 E_2 ,电源内阻 R_1+jX_1 、 R_2+jX_2 ,均取 $(0.131+j3.375) \Omega$,变电站接地电阻为 0.5Ω 。

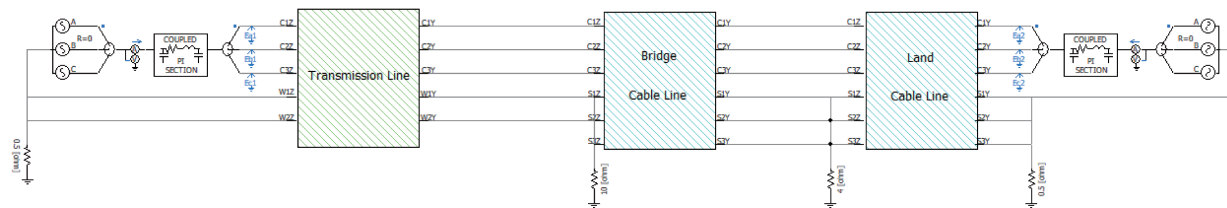


图4 仿真模型

Fig. 4 Simulation model

3 结果分析

由于三相短路故障一般发生概率较低，且短路入地电流远小于单相短路时的短路入地电流，本文仅研究输电线路单相短路故障对钢轨电位的影响。

设置电缆芯线与金属层接地短路，当短路故障点位于桥上电缆段，距左侧桥头7.5 km，即桥梁中间位置时，钢轨沿线电位分布如图5所示。

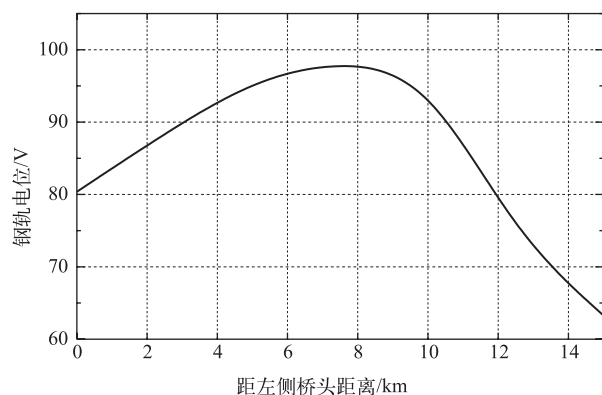


图5 钢轨电位分布

Fig. 5 Rail potential distribution

在图5中，由于短路点处入地电流最大，短路点处钢轨电位最大，桥梁段在短路点位置钢轨电位为98 V。远离短路点位置时，随着短路总故障电流的分流，钢轨电位逐渐减小。由于架空线路避雷线接地电阻大于电缆线路金属层接地电阻，左侧桥头短路入地电流较大，左侧桥头钢轨电位大于右侧桥头钢轨电位。

短路入地电流的大小与短路故障点的位置有关，短路入地电流的大小直接影响钢轨电位的大小。当短路故障点位于桥上电缆段不同位置时，钢轨电位沿线分布的最大值如图6所示。

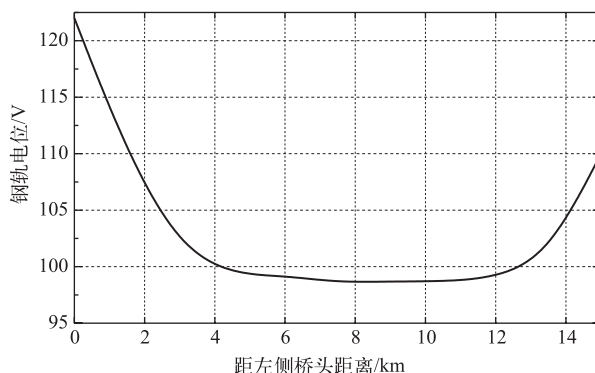


图6 不同短路位置时钢轨电位最大值

Fig. 6 Maximum rail potential at different short circuit positions

由图6可知，当短路故障点靠近桥头与桥尾时，钢轨电位增大。短路点位于左侧桥头处的钢轨电位大于位于右侧桥头处的钢轨电位，钢轨电位最大值为122 V。这是由于相较于桥梁段桥墩接地电阻，陆上电缆与架空线路接地电阻较大，当短路故障点向桥梁两端靠近时，通过桥墩接地电阻入地的电流增大，钢轨电位抬升增大。当短路故障点分别位于架空线路段、桥上电缆段与陆上电缆段时，钢轨电位最大值如表4所示。

表4 钢轨电位最大值

Tab.4 Maximum rail potential

短路故障点位置	钢轨电位最大值/V
架空线路段	101
桥上电缆段	122
陆上电缆段	95

由表4可以看出，架空线路段钢轨电位最大值小于陆上电缆段钢轨电位最大值，当短路故障点位于桥上电缆段时，钢轨电位最大值最大。

由于每个桥墩投影面积较大，且处于海水中，水的电阻率较低，单个桥墩接地电阻不会超过10 Ω。为分析桥墩接地电阻对钢轨电位的影响

响,结合跨海大桥每个桥墩实际接地电阻的可能性,设置桥墩电阻为 $0.3\ \Omega$ 、 $0.5\ \Omega$ 、 $1\ \Omega$ 、 $5\ \Omega$ 和 $10\ \Omega$,当短路故障点位置在桥上电缆段时,钢轨电位最大值如图7所示。

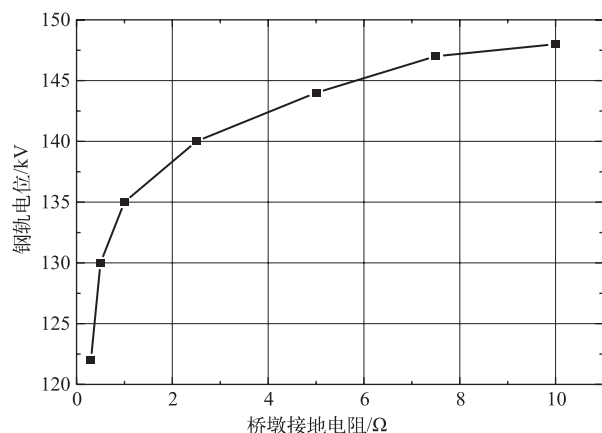


图7 不同桥墩接地电阻时钢轨电位最大值

Fig. 7 Maximum rail potential under different pier grounding resistance

图7表明,桥墩接地电阻增大,虽然短路电流中经桥墩接地电阻入地的电流分量减小,但由于接地电阻增大,钢轨电位增大,并呈饱和趋势,当单个桥墩接地电阻小于 $10\ \Omega$ 时,钢轨电位小于 $150\ \text{V}$ 。

4 结束语

本文基于PSCAD与多导体传输线理论建立了包含电力系统与铁路系统的综合模型,研究电力系统发生单相短路故障时钢轨电位升高对铁路系统产生的影响,通过以上分析得到如下结论。

1) 当短路故障点位于桥上电缆段时,钢轨电位在短路故障点处有最大值,靠近桥梁两端时,钢轨电位减小,左侧桥头钢轨电位略大于右侧桥头钢轨电位。

2) 短路故障点位置对钢轨电位有影响,短路故障点位于桥上电缆段时,钢轨电位最大值大于架空线路段与陆上电缆段。

3) 桥墩接地电阻增大,经桥墩电阻入地的电流减小,引起的钢轨电位减小。

4) 由于电缆线路金属层、架空线路避雷线的分流作用,流入桥墩接地电阻的短路入地电流

较小,引起的钢轨电位较小,当单个桥墩接地电阻小于 $10\ \Omega$ 时,钢轨电位不超过 $150\ \text{V}$,小于TB 10621—2014《高速铁路设计规范》规定的短路状态钢轨电位 $785\ \text{V}$ 。因此,公铁两用大桥电力电缆与铁路可以共用接地系统。EA

参考文献

- [1] 梅新咏,徐伟,段雪炜,等.平潭海峡公铁两用大桥总体设计[J].铁道标准设计,2020,64(增刊1):18-23.
- [2] 杜伯学,李忠磊,张锴,等.220 kV交联聚乙烯电力电缆接地电流的计算与应用[J].高电压技术,2013,39(5):1034-1039.
- [3] 王建国,郭星,孙建明,等.高速铁路隧道综合接地系统接地特性分析[J].铁道标准设计,2019,63(2):143-147,171.
- [4] 王建国,樊亚东,张义,等.高速铁路综合接地系统的接地阻抗与散流特性[J].高电压技术,2015,41(11):3576-3582.
- [5] DAWA LIBI F. Ground fault current distribution between soil and neutral conductors[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, 1980, 99(2): 452-461.
- [6] 黄锐锋,李琳.新的基于相分量的变压器模型及其在统一广义双侧消去法中的应用[J].中国电机工程学报,2004(7):192-197.
- [7] 邹军,袁建生,周宇坤,等.统一广义双侧消去法与架空线路-地下电缆混合输电系统故障电流分布的计算[J].中国电机工程学报,2002(10):113-116.

作者简介



孙萍丽

孙萍丽(1987—),女,工程师,主要研究方向为铁路电力设计。

(收稿日期:2021-07-21)