

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.05.021

轨道交通直流牵引系统继电保护 仿真软件的研究

郑大千,王慧芳,何奔腾

(浙江大学 电气工程学院,浙江 杭州 310027)

摘要:针对轨道交通直流牵引系统的继电保护定值缺乏有效验证手段的问题,提出了开发相应的仿真校验软件。对软件的需求进行了研究,提出了软件的功能构架,结合软件开发、直流短路电流计算及保护定值校验等技术,以软件图形界面设计、短路计算模型的选取和直流馈线断路器保护定值的校验为核心功能模块,实现了轨道交通直流牵引系统继电保护仿真软件的开发。以上海地铁的直流牵引系统为实际应用模型,对软件的仿真结果进行了验证。研究表明,该仿真软件能够实现故障模拟及继电保护定值的计算机辅助校验等多项功能,对保护整定值的使用和调整具有指导和验证作用,从而能够实现“降低轨道交通直流牵引网继电保护发生误动、拒动概率,提高直流系统运行可靠性”的目标。

关键词:城市轨道交通;直流牵引供电系统;短路计算模型;保护定值校验

中图分类号:TM7

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)05-0690-06

Relay protection simulation software of DC traction power system of urban rail transit

ZHENG Da-qian, WANG Hui-fang, HE Beng-teng

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at lacking of effective verifications for value setting of relaying protection component in DC traction system of railway transportation, development of simulation verification software was proposed. Based on the study of demand of the software, the function architecture was put forward. Based on technology of software development, DC flow calculation and setting value verification, a designing method for such software was introduced by focusing on aspects of designing of graphical interface, selection of short circuit calculation model and verification of protection setting value of DC feeder line breaker. At last, simulation of this software was verified with the case of the real DC traction system in Shanghai. The results indicate that proposed software is able to realize several functions including fault simulation and computer-aid verification. It can also guide the selection and adjustment of value setting of relaying protection system to decrease frequency of rejection and malfunction.

Key words: urban rail transit; DC traction power system; short circuit calculation mode; relay protection setting values verification

0 引 言

作为城市轨道交通电力系统的重要组成部分,直流牵引供电系统的仿真技术一直备受关注,国外已有一些相对成熟的分析软件,如德国 ELBAS 公司的 SINANET、德国 IFB 公司的 OpenPowerNet、美国 Carnegie-

Mellon 大学的 EMM 等,国内的一些设计院和科研院所也自行开发了一些相关的软件。这些软件大都是针对电力机车和牵引供电装置的实时运行进行动态仿真,旨在辅助城轨电网的设计和建设;但是针对牵引供电系统继电保护仿真的软件研究还很欠缺^[1-5]。

与交流系统相比,轨道交通直流系统的继电保护

定值计算与校验手段相对落后。由于缺乏统一的整定规程,往往由技术人员根据保护装置的说明书,结合工作经验给出,线路正式投运之前,会进行列车的试运行,在此过程中,如果未发生开关跳闸等异常现象,则校验成功,系统将正式投入运行。显然,这种校验方式是不够充分的,仅能够保证在部分正常运行情况下保护不会发生误动,无法保证在故障或异常情况下保护能够及时、正确地动作。即使考虑周全,试验系统上的校验也无法考虑到所有复杂情况,而且随着线路复杂性的提高,工作量的加大,出现错误的几率也会随之增高,这与城市轨道交通对安全性的高要求不相匹配。

本研究针对轨道交通直流牵引系统的继电保护定值缺乏有效验证手段的问题,开发相应的仿真校验软件。

1 直流牵引供电系统保护仿真软件的需求

轨道交通直流牵引供电系统主要特征如下:①一条运行线路上分布着若干个牵引变电站,牵引变电站中的整流机组将交流电流整流后提供给直流牵引网,为列车供电。直流牵引网由直流母线、馈线、回流线、接触网、钢轨和架空地线构成,运行中的列车通过受电弓从接触网上获得电能,再由钢轨回流;②为了方便故障的切除,接触网是分段的,每段接触网由两侧的牵引变电站共同供电,保护装置安装在站内的馈线开关上,当某段线路发生短路时,两侧的馈线开关都要跳开,以实现故障切除;③电动机车是系统的唯一负荷,由于列车启停和位置变动等原因,负荷电流的波动范围较大。典型的双边供电直流牵引系统如图1所示。

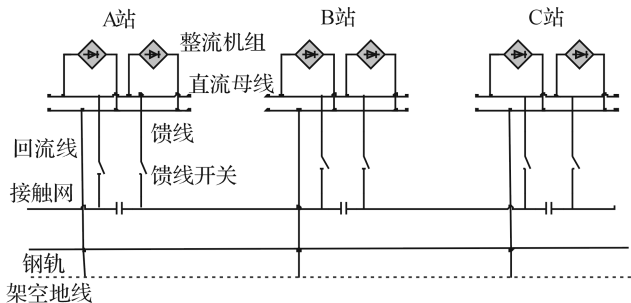


图1 双边供电直流牵引系统示意图

供电系统保护仿真软件需要具备如下功能:

(1)图形界面。要实现的功能包括:①对一些需要由用户给定的数据,软件为其提供录入界面;②提供图形建模区域以及与轨道交通实际设备相对应的图元工具箱;③提供软件功能触发按钮,用户可以通过该接口触发短路电流计算功能和保护定值校验功能;④能

够输出软件的运行结果,用户可以查询各个开关处的短路电流及保护定值校验单。

(2)短路电流计算功能。由于系统负荷的波动性较大,仅进行稳态短路电流计算不足以区分正常的负荷波动和较小的短路电流,因此,软件需要同时采用稳态短路计算模型和暂态短路计算模型,通过对短路后馈线开关处暂态电流波形的分析,实现故障和负荷波动的区分。

(3)保护定值校验功能。在满足选择性、灵敏性和速动性3个基本要求的前提下,软件在校验过程中,既要能够对单个保护进行校验(其他保护闭锁),也要能够对保护之间的配合进行校验:①区内故障时两端的馈线开关能够快速跳开;②区外故障时馈线开关不能跳开;③列车启停电流的波动不能导致保护误动。制定校验规程时必须遵循这3条原则。

2 软件的结构及功能的实现

2.1 软件的功能组成

软件的主要功能:在分析各类接触网短路条件下,馈线开关处短路电流的分布状况,校验开关所配置的继电保护整定值是否合理并给出修改意见。软件旨在减少馈线开关保护的误动和拒动,指导运营人员修改不合理的保护整定值。

该软件的功能架构如图2所示。

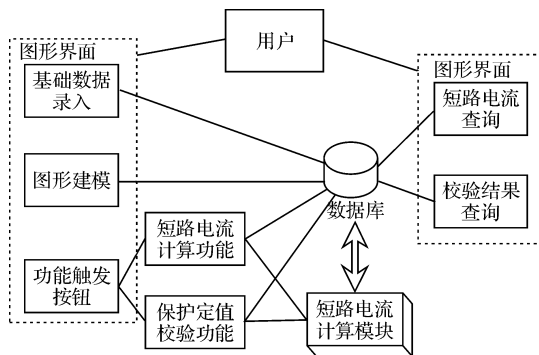


图2 软件的功能架构图

该软件架构中,基础数据录入功能为用户提供访问数据库的界面,实现添加建模及仿真所必须的基础数据,如各种型号的导线模型,各种型号电动机车启停的负荷电流模型,线路实际运行的保护整定单等。图形建模功能为用户提供图元工具箱,实现创建轨道交通电路图的绘制和参数录入,拓扑检查成功后存入数据库中。仿真功能使用接口为用户提供使用短路电流计算和保护定值校验模块的界面。短路电流计算和保护定值校验是系统的核心计算模块,它们从数据库中读取计算模型,并将计算结果保存到数据库中。用户

通过图形界面所提供的查询窗口查看各个开关的短路电流情况和保护定值的校验结果。

2.2 图形界面

(1)基础数据录入。在建模和仿真的过程中,需要从数据库中调用一些基础数据,这些数据由用户根据实际情况提前录入。其数据录入的类型如下:

①材料模型录入。录入当前轨道交通中常用的材料类型,以使用户在图形建模过程中,按照线路的实际情况选择材料。当材料类型不足时,可以在该录入界面下添加新材料类型并保存到数据库中。

②电动机车负荷电流曲线录入。电动机车是直流牵引供电系统的唯一负荷,机车的频繁启停会导致负荷电流的较大波动,严重时会导致保护误动,因此,机车负荷电流曲线将作为校验保护定值的一项依据。这里的机车负荷电流曲线是指,车辆运行过程中,馈线开关处所检测到的电流与运行时间的关系。负荷电流曲线会根据车型和线路的具体情况发生变化,一般应该由用户将现场录波仪器所采集到的负荷电流数据录入软件中,若现场无录波仪器,则根据车型选择软件提供的标准负荷曲线作为后续定值校验的依据。

③保护整定单录入。保护定值校验需要由用户提供待校验的保护定值整定单,软件的图形界面提供了录入接口。

(2)图形建模。图形建模是应用软件实现人机交互所必备的基础功能。该软件的一大核心特色就是图模一体化,用户通过对软件提供的图形元件进行参数修改和连接,搭建模拟实际线路的系统,有别于 Simulink 等大型电力仿真软件,该软件的图形建模功能有如下两个特色:

①提供了轨道交通建模所需的图元工具箱,图形元件分别对应于轨道交通中常见的电气构件;元件参数根据城轨交通的自身特点进行了调整,同时添加了一些轨道交通所独有的复合元件(如钢轨,接触网等)。用户建模时,不需要再对各个元件进行阻抗上的折算,只需根据实际情况,输入线路距离、选择材料类型和电压等级。

②当系统较大时,软件允许将之拆分成几个子系统,分列在不同的图层中。软件提供的“拷贝”功能,支持同名元件同时出现在两个子系统中,这样设定的好处是,节省建模时间的同时,还可以通过这一元件实现子系统之间的互联,增加建模图形的可读性。

(3)仿真功能使用接口。软件的仿真功能使用接

口为用户提供了使用短路电流计算和保护定值校验功能的入口界面。进行短路电流计算时,软件提供故障类型和故障位置的设置界面,故障信息输入完成后,软件调用短路电流计算模块,并将运算结果保存到数据库中。

进行保护定值校验时,软件提供保护校验设置界面,用户可以对单一保护进行校验,也可以进行所有保护的全自动校验,还可以对某些不关心的保护进行闭锁,设置完成后,软件调用保护定值校验模块,并将运算结果保存到数据库中。

(4)运行结果查询。仿真完成后,用户可以在软件提供的查询窗口中查看短路电流计算结果和保护定值校验结果。

2.3 短路电流计算

直流牵引供电系统接触网短路的仿真过程中,该软件同时采用了稳态短路计算模型和暂态短路计算模型,前者可以得到故障后各个馈线开关处的稳态电流值,后者可以得到短路发生瞬时各个馈线开关处的电流变化情况。

稳态短路计算模型。直流牵引供电系统由整流机组和牵引网两部分组成,牵引网中的各类电气元件(如钢轨、直流馈线等)在稳态仿真时都可用阻抗参数来等效,关键在于如何确定整流机组的电压电流外特性。

文献[6]从经典的6脉波整流机组3折线模型出发,推导得出了12脉波整流机组的5折线模型,而现今上海、南京等大多数城市地铁所普遍采用的等效24脉波整流机组是由两个12脉波整流机组并联而成,这种条件下,5折线模型同样适用。

针对主流的等效24脉波整流机组,该软件采用上述的5折线外特性模型,每段折线分别对应一个工作区间。计算开始时,假定所有机组都工作于第一区间,如果有任意一台机组的输出负荷不在其工作区间内,则对其进行调整。调整的流程如图3所示。

实际上,当某段线路发生短路时,只需对短路点两侧各两个站(共4站)进行机组工作区间的调整,其他整流机组距离远,提供的短路电流小,可以忽略不计。因此,即使线路复杂,软件也能有较快的运行速度。计算结束后,稳态短路电流计算的结果保存到数据库中。

暂态短路计算模型。暂态电流计算涉及的因素较为复杂。一方面,随着负载电流的变化,整流机组的工作区间会发生改变,等效内阻也必然随之改变;另一方面,短路位置的不同,外部等效阻抗也会发生变化。暂

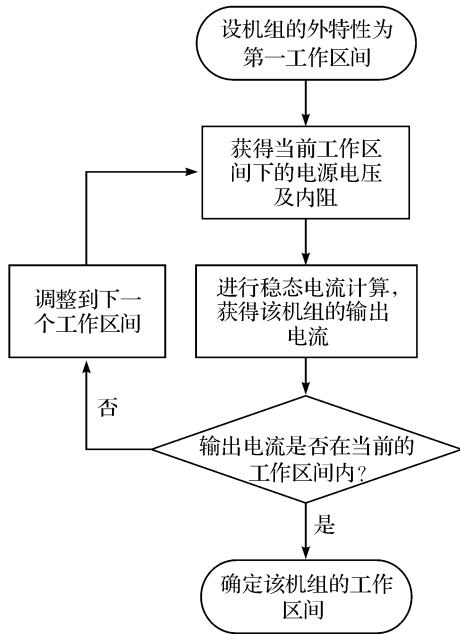


图3 机组工作区间确定流程

态短路电流很难用一种模型准确计算。

在计算接触网短路暂态电流的研究中,国内外普遍将其分为近端短路和远端短路。文献[7]中给出了接触网近端短路的计算模型,它忽略了外部线路的阻抗,通过分析整流桥臂的导通情况,最终得到出口短路的暂态电流公式;文献[8]中给出了接触网远端短路的计算模型,因为整流器内阻可以忽略,而短路位置及短路类型确定后,在不考虑集肤效应的前提下,外电路的阻抗也能够确定,所以,理想条件下短路电流呈简单的指数曲线上升。

实际条件下,必然存在“两个阻抗数量级相当,互相都不能忽略”的情况,因此,仅仅依靠这两种模型是不足以准确得到接触网任意位置短路的暂态电流波形的。针对这种情况,本研究进行了深入的研究,得到了一种折中的模型^[9],该模型的核心思想是,将两种经典模型的计算结果进行加权处理,再相加作为最终的计算结果,权重系数与短路位置(在公式中体现为外阻抗的电阻值和电抗值)存在着一定的函数关系,距离出口越近近端短路模型越占主导作用,距离出口越远远端短路模型越占主导作用。仿真实验证明,在短路之后的几个周波内,该模型的计算值是准确的,可以满足后续的校验需求。

2.4 保护定值校验

轨道交通直流牵引系统的保护装置配置在馈线开关上,以西门子公司生产的 Sitras Pro 装置为例,配置的保护包括:电流速断保护、过流保护、电流上升率保护、电流增量保护、欠压保护和阻抗保护等。该软件的

校验功能包含两部分:对单一保护原理的校验以及支持保护闭锁的全自动校验。

单一保护原理的校验。该软件对单一保护原理进行校验时,需要闭锁其他保护原理。轨道交通直流牵引系统的主保护包括电流速断保护,以及电流斜率保护^[10],后者又包括电流增量保护和电流上升率保护两个模块。与交流电网的三段式保护不同的是,这两类保护是互为后备的。当短路发生在接触网近端时,短路电流迅速上升,会在极短的时间内到达电流速断保护的整定值,但此时还未达到电流斜率保护的最小延时,因此,电流速断保护会优先动作,电流斜率保护作为后备保护延时动作;当短路发生在接触网远端时,短路电流上升相对缓慢,一般情况下,电流速断保护的整定值较高,短路电流会经过较长的时间才能到达动作值,这种情况下,电流斜率保护会优先动作,而电流速断保护将作为后备保护延时动作。两者的配合保证了故障发生后保护的速动性,因此需要这两类保护的定值进行更加严格的校验。

电流速断保护校验。设短路发生后,馈线开关处的稳态电流值为 I ,保护的整定值为 I_{\max} (A)。

故障位置设置在本段线路的中点,短路类型为接触网对架空地线短路,若开关处电流 $I > kI_{\max}$, ($k \approx 1.2$),则定值 I_{\max} 满足灵敏性;反之,灵敏性不足,需要适当降低整定值。故障设置在线路中点的原因是,系统工作于双边供电模式,两端的电流速断保护共同保护线路的全长。

短路故障设置在下级线路的出口,短路类型为接触网对钢轨短路,若开关处电流 $I < kI_{\max}$, ($k \approx 0.8$);则定值 I_{\max} 满足选择性,反之,不满足选择性,应该适当提高整定值。

电流增量保护校验。设电流增量保护的启动整定值为 E (A/ms),跳闸值 I_{trip} (A),该保护的校验需要结合电动机车的负荷电流。

设一辆机车启动过程中的最大电流变化率为 A ,若 $E > kA$, ($k \approx 1.2$),则定值 E 满足选择性;反之,机车负荷电流会导致保护的误启动,需要适当提高整定值。

设机车启动过程中的最大电流冲击电流为 I_{start} ,若 $I_{\text{trip}} > kI_{\text{start}}$, ($k \approx 1.2$),则定值 I_{trip} 满足选择性;反之,机车负荷电流会导致保护的误启动,需要适当提高整定值。

电流上升率保护校验。设电流上升率保护的动作为 F (A/ms),保护延时整定值为 t_{dur} (ms),该保护主要用于区分远端短路电流和机车启动电流,原则上,延

时越大越有利于躲开机车启动电流的冲击时间。

短路位置设置在本段线路的末端,短路类型为接触网对架空地线短路,通过暂态短路仿真得到馈线开关处的电流波形,获得 $t = 0 \sim t_{dur}$ 时间内馈线开关处的电流值,计算得出该短时间内的发热量,若超出线路的热承受范围,则需适当减少延时整定值;

短路位置设置在本段线路的末端,短路类型为接触网对架空地线短路,通过暂态短路仿真得到馈线开关处的电流波形,获得 $t = t_{dur}$ 时刻的电流上升率 B ,若 $B > kF$, ($k \approx 1.2$),则定值 F 满灵敏性;反之,灵敏性不足,需要适当降低整定值。

后备保护校验。与交流电网相似,后备保护的 保护范围一般超出本段线路,需通过较长时间的延时来完成与主保护之间的配合。针对这一特点,该软件对后备保护仅进行灵敏性校验,故障位置一律 设置在该段线路的末端,故障类型为接触网对架空 地线的短路。

全自动校验。全自动校验模式下,用户勾选出参 与校验的保护,闭锁掉不参与校验的保护。该软件 在运行的过程中,会根据参与校验的保护类型,按照 上述的校验原则,自动设置短路位置及短路类型,全 部计算完成后,系统会将未通过校验的保护定值及 调整建议保存到数据库中,用户可以在查询界面查 看结果。

3 算例分析

以上海地铁为例,本研究取临平路至浦东南路共 4 个站点 3 段线路作为仿真对象,对上体馆站下行线 路馈线开关的主保护定值进行校验,站点分布情况如 图 4 所示。

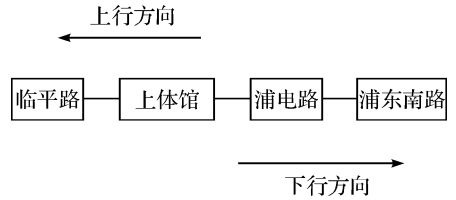


图 4 站点结构图

仿真参数如下所示(其中序号 1,2,3,4 分别对应 从左到右的 4 个站):

(1)整流变压器参数如表 1 所示。

表 1 各站整流变压器参数

序号	容量/ MVA	全短路 阻抗/(%)	半短路 阻抗/(%)	空载损 耗/MW	负载损 耗/MW
1	4.000	7.35	13.64	0.007	0.021
2	3.300	8.3	14.30	0.005	0.019
3	3.300	8.3	14.30	0.005	0.019
4	3.300	8.3	14.30	0.005	0.019

(2)整流器容量:3.600 MW;

(3)站间距:1~2:3 468 m;2~3:2 373 m;3~4:2 461 m;

(4)钢轨单位电阻:0.030 Ω/km;钢轨单位电感: 1.498 mH/km;

(5)接触网单位电阻:接触线 0.058 3 Ω/km;承力 索 0.074 4 Ω/km;辅助馈电线 0.058 3 Ω/km;即总单 位电阻为 0.058 3//0.074 4//0.058 3 = 0.020 9 Ω/km; 电感忽略不计;

(6)架空地线单位电阻 0.145 8 Ω/km;单位电感 1.194 6 mH/km;

(7)整流机组与母线连接线单位电阻 0.047 Ω/ km;母线与接触网(馈线)单位电阻 0.047 Ω/km;整 流变与整流器单位电阻 0.043 74 Ω/km;电感忽略 不计。

软件的仿真建模界面部分示意如图 5 所示。

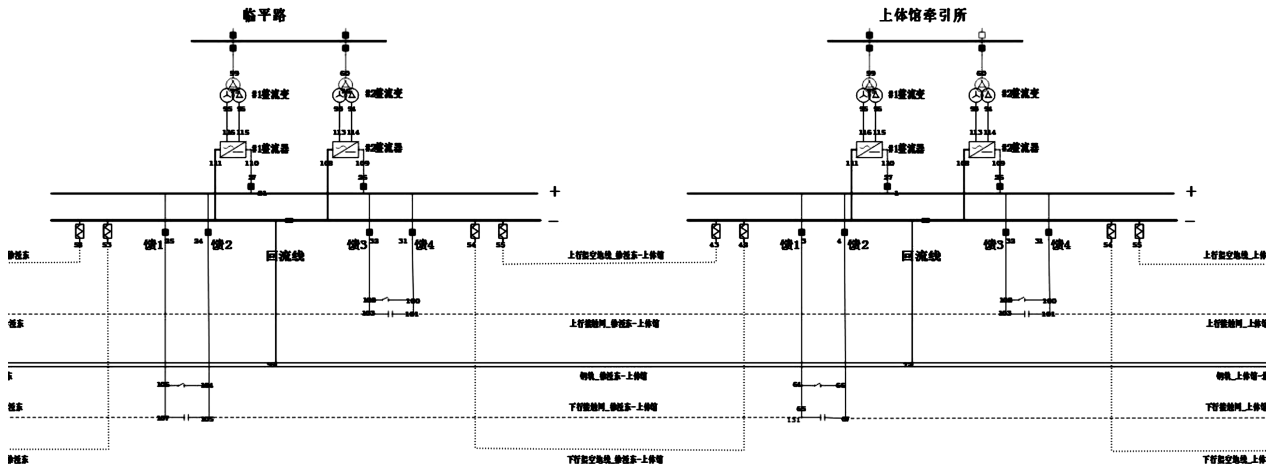


图 5 软件仿真建模界面示意图

仿真中,设置的主保护的整定值如表2所示。该整定值为线路实际运行中所采用的整定值。

表2 馈线开关主保护整定值

I_{max}/A	$E/(A \cdot ms^{-1})$	I_{trip}/A	$F/(A \cdot ms^{-1})$	t_{dur}/ms
7 500	60	4 800	40	50

本研究按照线路的实际参数进行图形建模,输入整定单,分别对浦东大道站的电流速断保护、电流增量保护及电流上升率保护进行校验,校验完成后,在图形界面中可以查询校验结果,输出到 excel 表格中的校验单如图6所示。

上海地铁四站系统馈线开关保护校验单				
保护名称	保护安装位置	校验方式	校验结果	结论
电流速断保护	浦东大道站下行馈线开关	设置短路故障,故障位置在本段线路中点,短路类型为接触网对架空地线短路	保护动作	电流动作值灵敏性满足
电流速断保护	浦东大道站下行馈线开关	设置短路故障,故障位置在下段线路出口,短路类型为接触网对钢轨短路	保护未动作	电流动作值选择性满足
电流增量保护	浦东大道站下行馈线开关	与机车启动电流最大上升率比较	保护未动作	保护启动值合理,机车启动不会导致保护误动
电流增量保护	浦东大道站下行馈线开关	与机车启动过程中最大冲击比较	保护未动作	保护动作值合理,机车启动不会导致保护误动
电路上升率保护	浦东大道站下行馈线开关	设置短路故障,故障位置在本段线路末端,短路类型为接触网对架空地线短路	未超出线路的热承受范围	整定值合理,在满足保护速动性的前提下,延时整定值还可以适当增加
电路上升率保护	浦东大道站下行馈线开关	设置短路故障,故障位置在本段线路末端,短路类型为接触网对架空地线短路	保护动作	保护的動作值灵敏性满足

图6 软件生成的定值校验单

图6中,第一行校验的是电流速断保护的灵敏性,短路位置设置为线路中点,接触网对架空地线短路,短路电流要小于接触网对钢轨短路的情况,此时如果能够可靠动作,则说明区内故障均能够动作,保护的灵敏性达到要求;第二行校验的是电流速断保护的选择性,短路位置设置在下段线路的出口,接触网对钢轨短路的短路电流要大于对架空地线短路的情况,此时如果保护仍未动作,则说明保护不会越区跳闸,满足选择性的要求。其他行的情况类似。软件的校验结果表明,上述各主保护的整定值满足灵敏性和选择性的要求,保护不会发生误动和拒动的情况。

4 结束语

本研究介绍了轨道交通直流牵引供电系统继电保

护仿真校验软件的功能需求和实现方法,并用算例形式呈现了实际应用效果。软件使用结果表明,开发仿真软件对保护定值进行校验,既能够考虑到所有可能发生的情况,又能够指导工作人员对整定值进行调整,有利于城轨交通安全、高效运行。

参考文献(References):

- [1] 邢华栋.城市轨道交通供电仿真系统的研究与开发[D].北京:华北电力大学电气工程学院,2013.
- [2] 万庆祝,陈建业,王赞基.电气化铁道系统计算机仿真的研究进展[J].机车电传动,2006,1(3):1-5.
- [3] 周福林,李群湛.城市轨道交通供电系统仿真软件开发研究[J].城市轨道交通研究,2007,10(5):25-27.
- [4] 韦莉,张逸成,达世鹏,等.城市轨道交通牵引系统仿真技术研究[J].同济大学学报,2011,39(8):1161-1166.
- [5] 王晓东,张洪斌.城市轨道交通直流牵引供电系统的仿真研究[J].系统仿真学报,2002,14(12):35-39.
- [6] Paolo Pozzobon. Transient and steady-state short-circuit currents in rectifiers for DC traction supply [J]. **Vehicular Technology, IEEE Transactions on**, 1998, 47(4): 1390-1404.
- [7] BROWN J C. Six-pulse three-phase rectifier bridge models for calculating closeup and remote shortshort circuit transients on DC supplied railways[J]. **Electric Power Applications, IEE Proceedings B**, 1991, 138(6):303-310.
- [8] BROWN J C, ALLAN J, MELLITT B. Calculation of remote short circuit fault currents for DC railways [J]. **Electric Power Applications, IEE Proceedings B**, 1992, 139(4): 289-294.
- [9] 许成.轨道交通直流牵引系统短路故障研究[D].杭州:浙江大学电气工程学院,2014.
- [10] 王广峰,孙玉坤.地铁直流牵引供电系统中的DDL保护[J].电力系统及其自动化学报,2007,19(1):59-62.

[编辑:李辉]

本文引用格式:

郑大千,王慧芳,何奔腾.轨道交通直流牵引系统继电保护仿真软件的研究[J].机电工程,2015,32(5):690-695.

ZHENG Da-qian, WANG Hui-fang, HE Beng-teng. Relay protection simulation software of DC traction power system of urban rail transit[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2015,32(5):690-695.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>