

DOI: 10.7667/PSPC151935

# 一种新型城市轨道交通馈线电流保护方法

刘建华<sup>1</sup>, 沈松伟<sup>1</sup>, 周明平<sup>1</sup>, 曹明<sup>2</sup>

(1. 中国矿业大学, 江苏 徐州 221008; 2. 徐州和纬信电科技有限公司, 江苏 徐州 221100)

**摘要:** 在直流牵引供电系统中, 机车的启动电流越来越大, 机车启动过程越来越类似于非金属短路故障过程, 多机车的启动过程越来越接近于中远端短路故障过程, 使得直流馈线电流上升率及电流增量(DDL)保护发生拒动、误动的可能性增大。通过仿真分析了现有 DDL 保护的缺陷, 提出了一种电流保护方法。该方法基于电流积分值、电流平均值和最大值的比值, 可以区别机车启动电流和非金属短路故障电流, 多列车同时启动电流和中远端短路电流, 给出了整定值。仿真验证了该保护方法的可靠性。

**关键词:** DDL 保护; 中远端短路; 多车启动; 电流积分值; 电流平均值和最大值比值

## A new protection method of feeder current in urban rail transit

LIU Jianhua<sup>1</sup>, SHEN Songwei<sup>1</sup>, ZHOU Mingping<sup>1</sup>, CAO Ming<sup>2</sup>

(1. China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China;

2. Xuzhou Information and Electrical Technology Co., Ltd., Xuzhou 221100, China)

**Abstract:** In the DC traction power supply system, the locomotive starting current becomes bigger and bigger, locomotive starting process is more and more similar to the process of non-short circuit fault, multi locomotive starting process is closer and closer to the process of middle and far end short circuit fault, which lead to the increase of the possibility to make the DC feeder current rate and current increment (DDL) protection move mistakenly and refuse to move. This paper analyzes the existing DDL method and points out its shortage by simulation, and then puts forward a kind of protection method. This method is based on the current integral value, the ratio of the current average value and the maximum current value. It's easy to distinguish non-metallic short-circuit fault current and the locomotive starting current, multi locomotive simultaneous starting current and the middle and far short circuit current, and the setting value is given. The reliability of this protection method is verified by simulation.

**Key words:** DDL protection; middle and far short circuit fault; multi locomotive starting; current integral value; the ratio of the current average value and the maximum current value

## 0 引言

城市轨道交通越来越多的应用在城市中, 其发挥的作用也越来越大, 为了保证列车的安全运行, 必须要保证供电系统的安全, 馈线保护又是供电系统安全中的重要组成部分。馈线保护主要是防止线路的短路, 并在发生短路时候切断故障, 保证列车和人员的安全<sup>[1]</sup>。

现有的城市轨道交通采用的是直流供电, 国内外对于直流保护进行了大量研究<sup>[2-3]</sup>, 目前大部分地

铁公司使用的都是电流上升率及电流增量(DDL)保护<sup>[4-6]</sup>, 但城市轨道交通压力的日益增大, 使得列车行车密度越来越大, 列车载重越来越高, 从而使得机车启动过程越来越类似于非金属短路故障过程, 多机车的启动过程越来越接近于中远端短路故障过程, 导致 DDL 保护发生拒动、误动的可能性增大。现在围绕地铁馈线保护展开着大量研究, 文献[7-11]通过利用小波变换对地铁故障电流进行了说明与分析, 提出了一种新型的地铁保护算法。文献[12-13]通过利用行波法对直流线路进行保护, 从而保护地铁馈线。文献[14]通过提取双端故障行波的固有频率中的主频率进行测距, 从而达到保护馈线的效果。

基金项目: 江苏省科技型企业技术创新项目 (BC2015067)

文献[15]通过建立一种新型的故障计算模型, 提出一种馈线保护算法。文献[16]提出一种基于电压电流变化值的新型馈线保护算法。

本文分析了直流牵引供电系统中直流馈线 DDL 保护的方法, 并指出其不足, 提出了一种基于积分值, 平均电流值和最大电流值比值的电流保护方法。

## 1 DDL 保护及其缺陷

### 1.1 DDL 保护原理

早先的馈线保护采用的是大电流脱扣保护<sup>[17]</sup>, 瞬时跳闸或者延时跳闸, 在近线端发生短路时候, 能够很快动作, 但当短路发生在中远端处或者发生的是非金属接地短路故障时, 这种保护可能会失去作用。现在大多数地铁公司都是采用 DDL 保护作为主保护来保护直流馈线电路, DDL 保护能够基本解决大电流脱扣保护不能对远端进行保护的缺点。DDL 保护的设计综合了  $di/dt$  保护和  $\Delta I$  保护的共同特性。DDL 保护逻辑图如图 1 所示。

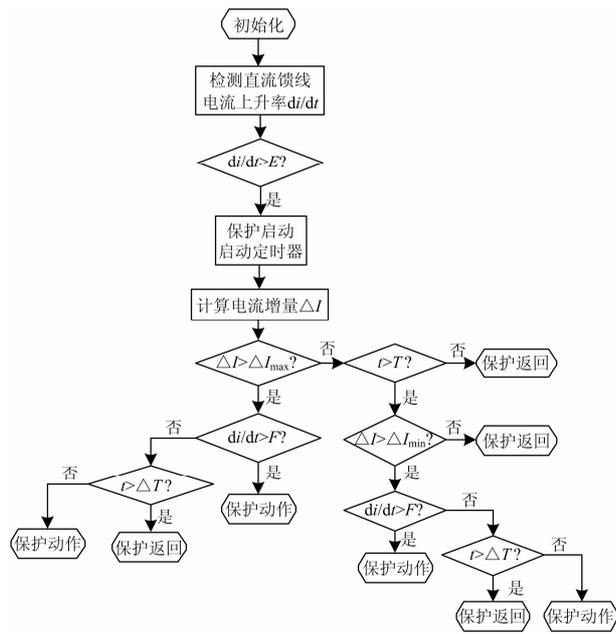


图 1 DDL 保护逻辑图

Fig. 1 Logic diagram of DDL protection

(1) 地铁的DDL保护装置不停的监测馈线电流的变化率  $di/dt$ , 并将  $di/dt$  与整定值  $E$  进行比较, 如果  $di/dt > E$ , 从这个时候开始监测电流的增加量  $\Delta I$  和时间  $t$ , 当  $\Delta I > \Delta I_{max}$  时, 保护动作。如果  $\Delta I$  不大于  $\Delta I_{max}$ , 但在时间  $t > T$  时, 有  $\Delta I > \Delta I_{min}$ , 保护动作。

(2) 如果在保护监测过程中, 在  $\Delta I$  达到  $\Delta I_{max}$  整定值或者  $t$  达到整定值  $T$  之前, 有  $di/dt < F$ , 并持续一定时间  $\Delta T$ , 这时保护返回。

定时限过流保护, 热过负荷保护, 双边联跳保护等作为地铁馈线的后备保护, 如图 2 所示, 共同保证地铁的安全运行<sup>[18]</sup>。

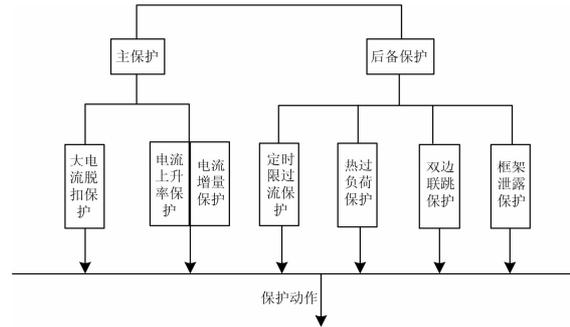


图 2 馈线保护配置

Fig. 2 Protection configuration for feeder

### 1.2 DDL 保护缺陷

伴随着交通压力的越来越大, 列车运行的密度也是越来越大, 列车载重也越来越大, 还会出现同一区间内多辆列车同时或相继启动, 使得机车启动的电流增大, 类似于中远端短路电流, DDL 容易发生误动作。在发生非金属接地短路时, 故障电流会比较小, 接近于机车启动的电流, 这时 DDL 可能会发生拒动。

图 3 为双边供电系统的牵引网络发生短路时候的仿真模型, TA, TB 为牵引变电所, 变电所采用 24 脉波整流<sup>[19-20]</sup>, 两变电所之间的距离为 4km, 变电所向接触网提供 1500V 的直流电压,  $R_1, R_2$  为接触网的电阻,  $L_1, L_2$  为接触网的电抗,  $r_1=0.013\Omega/km, x_1=1.021mH/km, R_3, R_4$  为钢轨电阻,  $L_3, L_4$  为钢轨电抗,  $r_2=0.019\Omega/km, x_2=1.780mH/km, R_5$  为短路过渡电阻,  $R_5=0.004\Omega$ <sup>[21]</sup>。整个系统模拟短路故障。

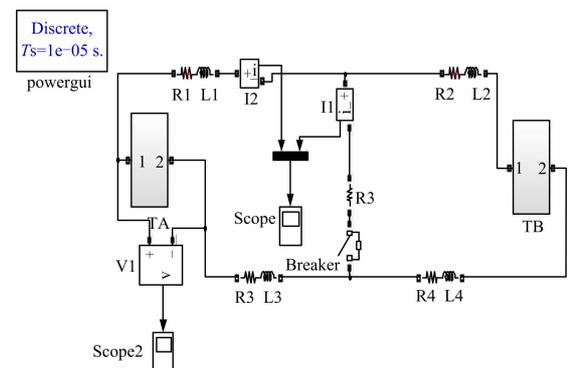


图 3 双边供电系统的牵引网络短路仿真模型

Fig. 3 Simulation model of short circuit of bilateral power supply system traction network

在地铁馈线发生短路时, 馈线不同点发生短路

时对应的短路电流也不一样，短路点越接近于变电所，短路电流越大，如图 4 所示。

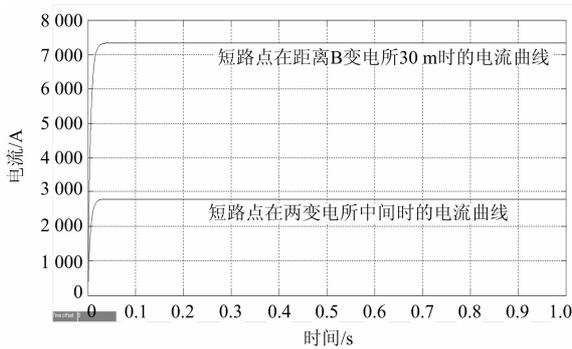


图 4 短路点在两牵引变电所中间和短路点在距离 B 变电所 30m 时的短路电流曲线

Fig. 4 Short circuit current curve of the short circuit point at the middle of the two traction substation and the short circuit point 30 meters away from traction substation B

在地铁发生非金属短路故障时，此时的短路电流会较小，接近于机车启动电流，如图 5 所示。

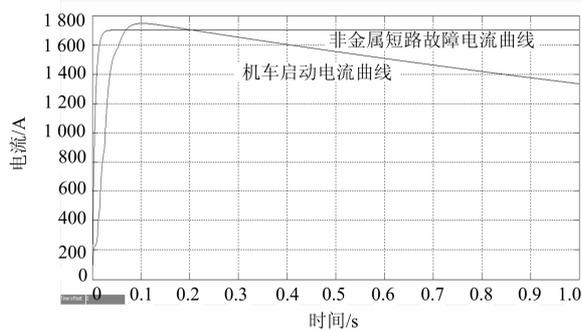


图 5 非金属短路故障电流曲线和机车启动电流曲线  
Fig. 5 Non-metallic short-circuit fault current curve and locomotive starting current curve

当双机车同时启动时，启动电流较大，类似于中远端短路电流，如图 6 所示。

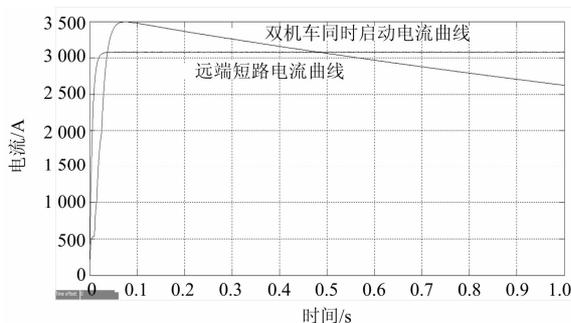


图 6 远端短路电流曲线和双机车同时启动电流曲线  
Fig. 6 Remote short circuit current curve and current curve of two locomotive starting at the same time

由图 5 可以看出：当地铁发生非金属性短路故障时，这时短路电流相对而言比较小，和机车启动电流相似，电流增加量可能小于整定值 $\Delta I$ , DDL 保护可能会发生拒动。由图 6 可以看出：当两辆机车同时启动时候，启动电流增大，电流增加量可能会大于整定值 $\Delta I$ , DDL 保护可能会发生误动。在遇到发生非金属短路故障和多机车同时启动时候，DDL 保护不再能准确动作，可能发生误动或者拒动。

## 2 基于积分值，电流平均值和最大值比值的电流保护方法

### 2.1 原理

由图 5 可以看出，尽管机车启动时  $di/dt$  非常大，但电流也不是瞬间就达到最大值，而是在经过一段时间的增长后达到最大值，到达最大值后电流会慢慢回落。由图 4 中可以看出，不管是近端短路还是中远端短路，电流的  $di/dt$  和电流峰值都很大，而且短路电流在达到最大值时候并没有减少。虽然机车启动电流很大，甚至可能超过了中远端短路电流，但从整个积分期间内来看，机车启动电流和中远端短路电流的变化情况是有区别的，短路电流在上升稳定后不再变化，机车启动电流在上升达到最大值后会有回落。因此，在一个积分期间内，平均电流值和最大电流值会相差较大，而我们可以通过这个区别来辨别多机车启动电流和中远端短路电流。在机车启动条件下的平均电流值与最大电流值的比值相对比较小，而在中远端短路条件下的平均电流值与最大电流值的比值相对比较大。利用电流积分值、积分期间内的平均电流值和最大电流值比值来是可以达到保护目的的。图 7 为逻辑图。

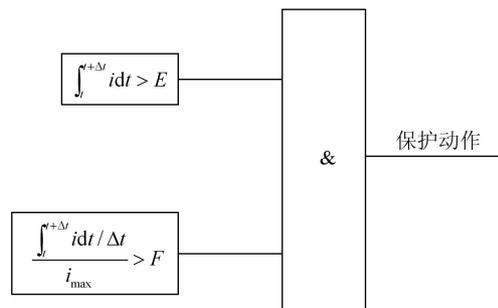


图 7 保护动作逻辑图  
Fig. 7 Protection action logic

从图 7 可知，只有在电流积分值和积分期间内的平均电流值和最大电流值的比值都达到了整定值的时候保护才会动作。

### 2.2 E 和 F 值的整定

双机车在一个区间里启动时候的仿真结果如表

1 所示。

表 1 双机车在一个区间里启动时候的仿真结果

Table 1 Simulation results of two locomotives starting in the same interval

启动地点 距离 变电站 TA 距离 $L_1/L_2/$ km	$\Delta t$ 内电流 积分值 $\int_t^{t+\Delta t} idt /$ As	$\Delta t$ 内电流平均值 $\frac{\int_t^{t+\Delta t} idt}{\Delta t} /A$	$\Delta t$ 内 电流 最大值 $i_{max}/A$	电流平 均值与 最大值 比值
0.02/1.02	1946	1946	2764	0.704
0.30/1.30	1726	1726	2434	0.709
0.50/1.50	1592	1592	2233	0.713
0.70/1.70	1485	1485	2074	0.716
1.00/2.00	1357	1357	1882	0.721
1.50/2.50	1179	1179	1617	0.729
2.50/3.50	1033	1033	1404	0.736
3.00/4.00	906	906	1213	0.747

一个区间里出现短路时候的仿真结果如表 2 所示。

表 2 一个区间里出现短路时候的仿真结果

Table 2 Simulation results for a short circuit in an interval

短路点 距离变 电所 TA 的距离 $L/km$	$\Delta t$ 内电流 积分值 $\int_t^{t+\Delta t} idt /As$	$\Delta t$ 内电流 积分值 $\int_t^{t+\Delta t} idt /As$	$\Delta t$ 内 电流 最大值 $i_{max}/A$	电流 平均值 与最大 值的 比值
0.10	9460	9460	9488	0.997
0.20	8647	8647	8690	0.995
0.50	7044	7044	7108	0.991
0.70	6187	6187	6268	0.987
1.00	5145	5145	5250	0.980
1.50	4352	4352	4477	0.972
2.00	3709	3709	3840	0.966
2.50	3196	3196	3326	0.961
3.00	2733	2733	2862	0.955
3.50	2450	2450	2574	0.952
4.00	2173	2173	2290	0.949

由表 1 和表 2 的数据可以设定整定值:

$$E=2173 \times 0.9=1955.7$$

$$F=0.949 \times 0.9=0.8541$$

在短路发生在线路最远端时的 1 s 里, 保护所在点的短路电流积分值达到 2 173 A, 平均电流是 2 173 A, 而在这 1 s 积分期间里最大短路电流值达到 2 290 A, 平均电流值与最大电流值的比值是 0.949。在机车启动电流最大的时候, 电流积分值达到 1 946 A, 平均电流值是 1 946 A, 而在这 1 s 积分期间里最大短路电流值达到 2 764 A, 平均电流值与最大电流值的比值是 0.704。

从上述两个表格内数据我们可以看到, 在线路发生中远端短路时候, 电流平均值和电流最大值相差不大, 比值大于  $F(0.8541)$ , 并且积分电流值大于  $E(1955.7A)$ , 保护动作。列车启动的时候, 尽管有时最大电流值会比较大, 甚至可能会超过末端短路电流值, 但大多数情况电流积分值是小于整定值  $E$  的, 即使多辆列车同时(相继)启动, 机车启动电流很大, 使得积分电流值大于整定值  $E$ , 但电流平均值要远远小于电流最大值, 平均电流值和最大电流值比值要小于整定值  $F$ , 保护不会动作。运用这种方法能够辨别非金属短路故障和机车启动, 中远端短路和多机车启动, 保护不会误动作, 能够很好的保护供电系统。

### 2.3 保护的时限特性

在以上整定值( $E=1955.7, F=0.8541$ )条件下, 测得接触网上不同点发生短路时候的保护跳闸时间如表 3 所示。

表 3 接触网上不同点发生短路时候的保护跳闸时间

Table 3 Protective tripping time of different point of contact net

短路地 点距离 变电站 TAL/km	电流积分 值达到 $E$ 的时间 $t/s$	$\Delta t$ 内电流平均值 $\frac{\int_t^{t+\Delta t} idt}{\Delta t} /A$	$\Delta t$ 内电 流最大值 $i_{max}/A$	电流平均 值与电 流最大 值比 值
0.10	0.229	9460	9488	0.997
0.20	0.276	8647	8690	0.995
0.50	0.385	7044	7108	0.991
0.70	0.447	6187	6268	0.987
1.00	0.526	5145	5250	0.980
1.50	0.645	4352	4477	0.972
2.00	0.743	3709	3840	0.966
2.50	0.822	3196	3326	0.961
3.00	0.879	2733	2862	0.955
3.50	0.93	2450	2574	0.952
4.00	0.978	2173	2290	0.949

从上述表格结果我们可以看到, 按照积分值, 电流平均值和最大值比值的电流保护方法, 距离变电所越近, 短路电流会越大, 切断故障所用的时间会更短, 能够更好的保护供电系统。

### 3 结语

在线路发生故障时候, 短路电流越大, 就能够在越短的时间内使得电流积分值达到  $E$ , 便于快速切断故障, 在短路电流比较小的时候, 会在经过一定的延时时间后切断电路。运用基于电流积分值, 电流平均值和最大值比值的电流保护方法可以在不同的短路电流时, 有与之相应的故障切断时间, 便

于更好的保护电路。在列车启动的时候,可能在启动过程中会有最大电流值比末端短路电流值还要大的情况,但列车启动时的积分电流值却是要小于末端短路时的积分电流值,即使在多辆列车同时启动时候,积分电流值大于整定值  $E$ ,但电流平均值与最大电流值比值还是要小于整定值  $F$ 。为了提高保护的灵敏度,可以适当的降低整定值  $E$ 。通过基于电流积分值和电流平均值和最大值比值的电流保护方法能够有效避免保护的误动作,更好的保护供电系统。

### 参考文献

- [1] 李良威. 城市轨道交通直流侧短路故障研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2005.  
LI Liangwei. The study of short circuit fault on the direct current side of urban rail transit[D]. Chengdu: Southeast Jiaotong University, 2005.
- [2] 于洋, 孙学锋, 高鹏. 高压直流输电线路暂态保护分析与展望[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 148-154.  
YU Yang, SUN Xuefeng, GAO Peng. Analysis and prospect on transient protection for HVDC transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 148-154.
- [3] 刘剑, 范春菊, 郇能灵. 考虑直流控制系统影响的 HVDC 输电线路后备保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 73-80.  
LIU Jian, FAN Chunju, XUAN Nengling. Backup protection research for HVDC transmission line considering the impact of DC control system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 73-80.
- [4] 王广峰, 孙玉坤, 陈坤华, 等. 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.  
WANG Guangfeng, SUN Yukun, CHEN Kunhua, et al. DDL protection in metro DC traction power supply system[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2007, 19(1): 59-62.
- [5] 于喜林. DDL 保护在直流牵引供电系统中的应用[J]. 电气化铁道, 2004(3): 27-30.  
YU Xilin. Application of DDL protection in DC traction power supply system[J]. Electric Railway, 2004(3): 27-30.
- [6] 曹莉. 城轨交通直流牵引馈线 DDL 保护及其功能分析[J]. 现代城市轨道交通, 2008(4): 21-24.  
CAO Li. The analysis of DDL protection and its function of DC traction feeder in urban rail transit[J]. Modern Urban Transit, 2008(4): 21-24.
- [7] 喻乐. 城市轨道交通供电系统建模与直流馈线保护的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.  
YU Le. Research on power supply system modeling and DC feeder protection of DC railway transit system[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.
- [8] 喻乐, 和敬涵, 王小君, 等. 基于 Mexh 小波变换的直流馈线保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(11): 42-45.  
YU Le, HE Jinghan, WANG Xiaojun, et al. An algorithm of short-circuit skin effect current calculation based on Mexh wavelet[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(11): 42-45.
- [9] 李振强, 鲁改凤, 吕艳萍. 基于小波变换的高压直流输电线路暂态电压行波保护[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(13): 40-45.  
LI Zhenqiang, LU Gaifeng, LÜ Yanping. A novel scheme of HVDC transmission line voltage traveling wave protection based on wavelet transform[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(13): 40-45.
- [10] 鲁小兵. 城市轨道交通远端短路电流鉴别研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.  
LU Xiaobing. Research on the identification of remote short circuit current of urban rail transit[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.
- [11] 何桦. 基于小波变换的地铁直流侧远方短路电流分析[D]. 南京: 河海大学, 2002.  
HE Ye. Remote fault current analysis for DC system based on wavelet transform[D]. Nanjing: Hohai University, 2002.
- [12] 易小智. 地铁馈线电路行波保护方式研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2006.  
YI Xiaozhi. Research on traveling wave protection method for subway feeder line[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2006.
- [13] 郑伟, 张楠, 杨光源. 西门子及 ABB 直流线路行波保护对比和改进研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 149-154.  
ZHENG Wei, ZHANG Nan, YANG Guangyuan. Comparative and improvement investigation on the DC transmission line traveling wave protections of Siemens and ABB[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 149-154.
- [14] 高沁翔, 贾明泽, 陈赛慧. 直流牵引供电系统故障测距的新方法[J]. 北京交通大学学报, 2015, 39(5): 39-43.

- GAO Qinxiang, JIA Mingze, CHEN Saihui. A new method of fault location for DC traction power supply system[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2015, 39(5): 39-43.
- [15] 许成, 王慧芳, 王晓保. 直流牵引供电系统短路计算模型分析[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(22): 84-90.
- XU Cheng, WANG Huifang, WANG Xiaobao. Analysis of short-circuit model for DC traction supply system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(22): 84-90.
- [16] 董晨阳. 基于 AFB 的地铁直流馈线保护算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(4): 122-127.
- DONG Chenyang. A novel metro DC feeder line protection algorithm based on AFB[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(4): 122-127.
- [17] 吴书锋, 胡平. 地铁直流牵引供电系统馈线保护方法分析[J]. 电力列车与城轨车辆, 2014, 37(4): 67-69.
- WU Shufeng, HU Ping. Analysis of the protection for metro DC traction power supply system[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2014, 37(4): 67-69.
- [18] HILL R J, BROWN J C. Correspondence-calculation of remote short circuit fault currents for DC railways[J]. IEE Proceedings-B, 1993, 140(6): 417-420.
- [19] 董海燕, 田铭兴, 杜斌祥, 等. 地铁 24 脉波整流机组的仿真及谐波电流分析[J]. 电源技术, 2011, 35(5): 593-611.
- DONG Haiyan, TIAN Minxing, DU Binxiang, et al. Simulation and harmonic current analysis of 24-pulse rectifier unit in metro[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2011, 35(5): 593-611.
- [20] 陆佳政, 朱思国, 李波, 等. 特高压输电线路直流融冰变流系统设计[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(11): 124-129.
- LU Jiazheng, SONG Siguo, LI Bo, et al. DC ice-melting converter system design for EHV transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(11): 124-129.
- [21] 龚廷志. 直流牵引供电系统数学模型与短路计算研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
- GONG Tingzhi. Study on mathematical model and short-circuit current calculation of DC traction power supply system[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009.

收稿日期: 2015-10-20; 修回日期: 2016-06-24

作者简介:

刘建华(1973-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为智能电网与电网安全;

沈松伟(1991-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 从事直流牵引供电安全的研究; E-mail: 947869829@qq.com

周明平(1992-), 男, 硕士研究生, 研究方向为配电网自动化。

(编辑 张爱琴)