

基于 AFB 的地铁直流馈线保护算法研究

董晨阳

(铁道第三勘察设计院集团有限公司, 天津 300251)

摘要: 由于线路增长, 行车密度增加等原因, 地铁直流保护装置会出现误动、拒动的现象, 设计更可靠的保护算法非常必要。研究分析了地铁直流牵引供电系统中主要的直流馈线保护方法, 以电流上升率及电流增量保护为基础, 提出一种基于电压电流变化量的地铁馈线保护新算法。应用 AFB 流程设计方法, 实现了一种方便整定和修改的保护流程。通过仿真结果分析得出: 这种新型保护算法能够快速精确地切除非金属接地和远端短路等故障, 同时避开了列车启动电流的影响, 切实可行。

关键词: 直流馈线保护; AFB 流程; 远端故障; 机车启动电流; 非金属性故障

A novel metro DC feeder line protection algorithm based on AFB

DONG Chen-yang

(Tianjin Railway Survey Design Institute Group Corp, Tianjin 300251, China)

Abstract: As the metro lines become longer and traffic density increases, malfunction or refusing action of metro DC feeder protection device occurs from time to time, so it is of great value to design a more reliable protection algorithm. This paper analyzes the main DC feeder protection of DC railway traction power supply system. Based on the rising rate of current and current increment protection, a novel algorithm with judgment of voltage and current variation for DC railway feeder line protection is proposed. With the help of AFB process design method, a protection process for convenient setting and modification is realized. By analyzing the simulation results, the algorithm can remove non-metallic grounding fault and remote fault fast and accurately, while avoiding the impact of the locomotive starting current, so it's very practical.

Key words: DC feeder protection; AFB process; remote fault; locomotive starting current; non-metal fault

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)04-0122-06

0 引言

随着城市轨道交通的高速发展, 直流馈线保护装置出现误动、拒动的现象不断出现。提出有效的保护配合策略, 研制可靠性更高、灵敏性更好的直流馈线保护算法具有非常重要的意义^[1]。

目前国内外大都单单靠电流的变化特征判别故障情况^[1-4], 地铁主保护仍然是 $di/dt + \Delta I$ 保护, 但是随着供电线路增长, 机车容量和行车密度不断增加, 机车运行过程中的启动、加速等过程与故障暂态过程的特征越来越相似, 这使故障的准确判别更加困难。故大量研究工作围绕着地铁保护展开, 文献[5]结合国内外产品对现有方法进行改进, 并提出数据分析方法; 文献[6-9]利用正在逐步兴起的小波算法对地铁短路故障电流进行判断, 提出了地铁保护算法的新思路; 文献[10]采取一种利用行波来保

护地铁馈线的算法; 文献[11-12]将 $di/dt + \Delta I$ 等保护优化组合, 取得更好的保护效果; 文献[13]利用变电站电压和电流的实际测量值, 直接计算线路功率, 对功率平衡的保护策略进行探讨。

本文综合直流故障时电流及电压变化量特点, 提出一种地铁直流馈线保护的新算法, 提高地铁保护的可靠性和灵敏性, 并应用 AFB 流程设计方法绘制出算法流程, 可应用于任何平台, 具有很好的可移植性。

1 地铁牵引供电结构及直流馈线保护配置

1.1 地铁牵引供电结构

在全世界的地铁直流供电制式有很多, 600 V, 650 V, 750 V, 1 500 V 以及 3 000 V, 但是中国普遍应用的是 750 V 直流第三轨和 1500 V 直流架空线供电方式^[12]。地铁变电站从 35 kV AC 或 10 kV AC

获得电能，经整流变压成 750 V DC 或 1500 V DC，然后通过直流馈线供给第三轨或架空线给机车供电，最后经回流轨回流到变电站整流机组负极，地铁牵引供电基本结构如图 1 所示。

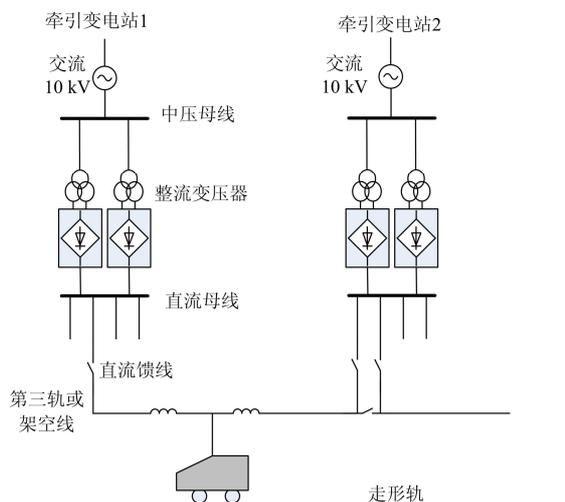


图 1 地铁供电基本结构图

Fig. 1 Typical sketch of DC railway power supply system

1.2 地铁直流馈线保护配置

地铁保护早期采用直流断路器本体保护方式：大电流脱扣保护，瞬时速断或延时跳闸，对近端故障反应迅速，在牵引供电系统的保护配置中将其作为近端短路的主保护。该保护能保护线路全长的一半以上，但是如果发生远端短路或非金属性故障，其灵敏度较低，甚至失去保护^[14]。

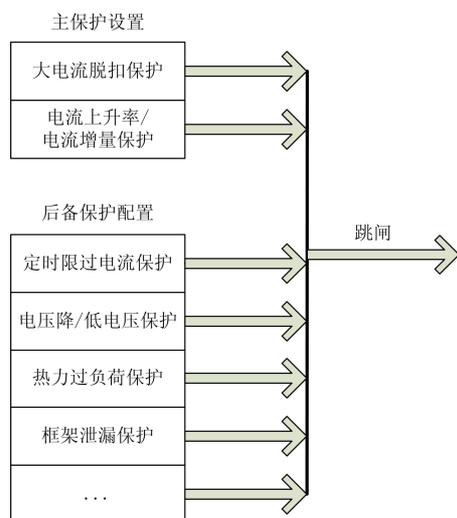


图 2 地铁直流馈线保护配置

Fig. 2 Protection configuration for metro DC feeder

针对大电流脱扣保护不能保护远端故障的缺点， $di/dt + \Delta I$ 保护的提出并基本弥补了它的不足。

$di/dt + \Delta I$ 保护基本要求是躲过机车启动电流； ΔI 足够大以躲过保护区外发生故障电流； di/dt 延时足够长来防止越区跳闸等。此外，还有双边联跳、低电压、电压降保护及热力过负荷保护等后备保护，如图 2 所示，监视地铁供电运行状态，保证地铁安全运营^[15]。

2 AFB 流程设计方法

Stateflow 作为构建在 Matlab/Simulink 之中的离散时间系统的图形化仿真环境，建模简洁、明晰，使复合离散事件的逻辑仿真变得十分方便和直观^[16-17]。Stateflow 实现了有限状态代码的自动生成，用户只需在其设计界面描述状态转移图和流程条件便可自动反编译成 C 代码。状态流程图与 Simulink 数学模型的模块化组合称为应用功能模块（AFB）。AFB 设计理念在国外的仿真设计中已普遍采用，但是目前国内应用相对较少。

地铁保护产品更新换代非常快，升级保护平台时，代码一般需大幅修改甚至重新编写，然而利用 AFB 设计的流程，只需要修改模块中的接口或状态逻辑就可以应用于新的平台，减少了维护工作量。

此外，利用 VB, C 等语言开发软件的编码工作量大且繁琐，如图 3 所示，起初的可行性研究和基础设计阶段，很多的设计错误无法预知，会产生累积效应导致不断修改甚至返工。

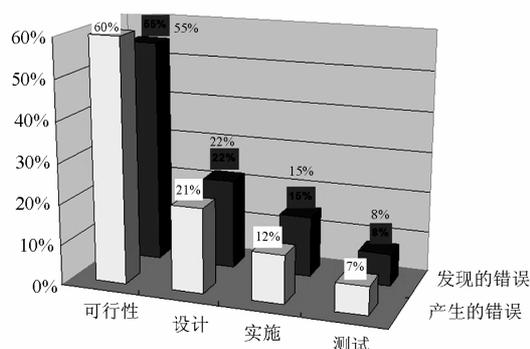


图 3 普通软件设计方法产生错误随时间百分比

Fig. 3 Error percentage with time in ordinary software design method

然而利用 AFB 设计流程仿真时可以很直观地观察状态转换过程，实现了边设计边测试边修改的目的，能够及时发现设计思路的错误，具有可实时验证性的优点。如图 4 所示，采用 AFB 设计方法可以大大缩短产品开发周期，故应用其开发出的保护功能模块具有很好的经济价值。

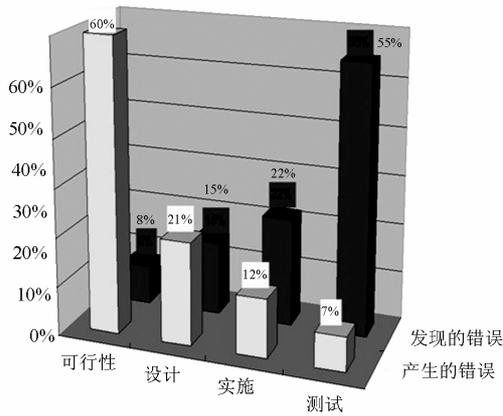


图 4 AFB 流程设计产生错误随时间百分比

Fig. 4 Error percentage with time in AFB design method

3 基于 AFB 的保护算法流程设计

3.1 基于电压电流变化量的保护算法

基于电压电流变化量的新型保护算法同样以电流变化率作为保护启动量，满足 $di/dt > E$ 则开始计算电压和电流的变化值，保护算法包括三个同时执行的逻辑，保护逻辑如图 5 所示。

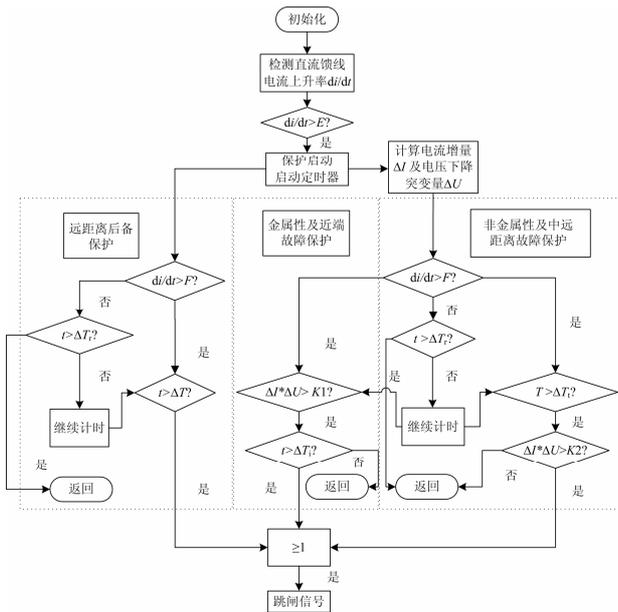


图5 电压电流变化量算法逻辑框图

Fig. 5 Logic diagram of algorithm based on voltage and current change

(1) 计时开始后始终大于保护返回值 F ，如果一段时间 ΔT_i 内电压与电流变化量相乘的值一直大于整定值 $K1$ ，保护出口跳闸，主要针对近端保护和金属性短路。

(2) 保护启动后，计时达到 ΔT_i 后，假如电压与电流变化量相乘的值大于整定值 $K2$ ，保护动作出口，主要针对非金属性保护及部分远端保护。

(3) 考虑到线路过长情况，选用计时 ΔT 时间内始终 $di/dt > F$ 作为嵌入在这个保护逻辑中的后备保护。

3.2 保护算法的整定

(1) 起始门限 E 及复位门限 F (kA/s 或 A/ms) 选择非常重要。为了计算短路的起始斜率 E ，可以用短路暂态电流测量值 I_0 和时间常数 τ 来计算：

$$di/dt|_0 = \frac{I_0}{\tau} \quad (2)$$

为了保证一般故障情况下保护的可靠启动，需要降低起始电流门限，为了躲过机车电流影响，故一般情况下设置为上述计算值的一半。一般选择适当降低 F 值以提高保护精度。

(2) 为了获得更好的保护功能， $K1$ 值的设定十分重要，宜在供电区间机车处于满载运行情况下通过对系统进行测试得出建议值，设置过高或过低都是不可取的，根据仿真的实际参数设置为 $200\ 000\ V \cdot A$ 。电压量的加入使整定时间可以比普通 DDL 保护设置更小，建议可以设置 $0\sim 3\ ms$ 之间的数值。

(3) 远端及非金属故障保护的 $K2$ 设定值应小于或等于线路末端短路电流和电压乘积，时间的整定一般可以设计为时间常数的 1.5 倍，亦可以通过现场测量。

(4) 后备保护的时间 ΔT 需要比中远距离保护的整定更长，一般取 $20\sim 30\ ms$ 之间的数值。若变电站间距离不长，甚至可以设计其整定与近距离保护相同，相当于将此保护屏蔽。

4 保护算法的仿真测试

利用 Matlab/stateflow，根据上述保护算法框图绘制保护流程，如图 6 所示，分别对应图 5 中近距离保护，非金属性故障和中远距离保护及远距离后备保护。

4.1 远端短路测试

仿真设置地铁线路长 1.5 km，直流馈线发生远端短路故障时，仿真发现电流上升率相对近端短路较小，但是电压由 790 V 左右下降到约 670 V，如图 7，保护启动且电流和电压的变化率相乘后断路器相当于瞬时动作。Stateflow 中显示的状态转换路径为保护启动，通过中远距离故障逻辑来计时出口，理论上反应时间可以设置比 $di/dt + \Delta I$ 保护更小，亦可不改变 1 ms 的整定时间，这样可以使保护更可

靠，保证供电系统正常运行。

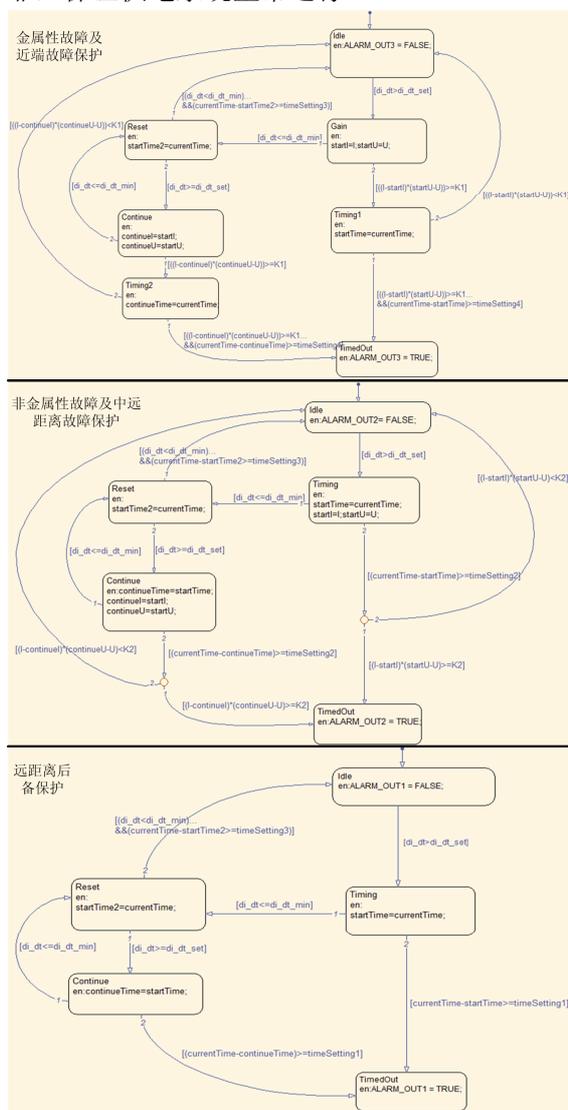


图 6 Stateflow 中绘制的保护流程

Fig. 6 Protection process drawn in Stateflow

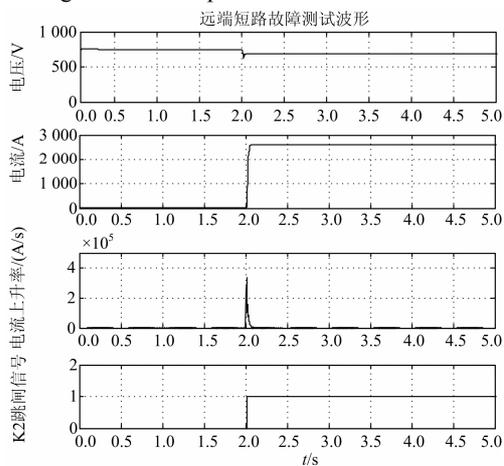


图 7 远端短路故障测试波形

Fig. 7 Waveform of remote short fault test

4.2 机车启动电流测试

正确识别地铁机车启动电流是地铁保护逻辑的基本要求^[18-19]，如图 8，一列地铁列车（六台电机）启动过程中电流上升率很高，可能超过 di/dt 启动整定值，但是由于电压变化量并不大，电压下降量与电流增量的乘积数值和短路故障相比较要小得多，故加入电压量的判断有助于躲过机车启动电流的影响，提高整定值的裕量，提升了保护的可靠性。电流上升率超过整定值的时间不会大于远距离后备保护的整定时间，故也不会通过远端保护出口。

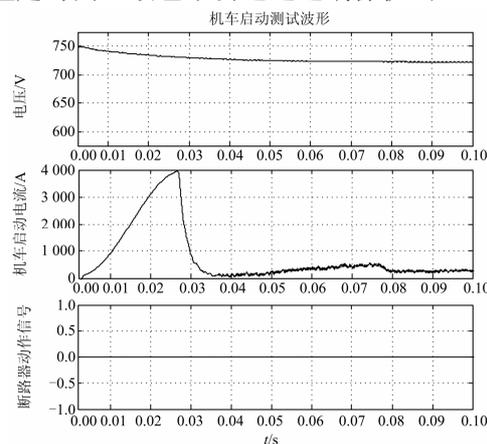


图 8 6 电机机车启动测试波形

Fig. 8 Waveform of 6-motor car starting test

4.3 非金属性故障测试

地铁直流馈线出现非金属性短路时，如经电弧接地短路，长时间运行会产生机械金属外壳带电的情况，出现接触电压或跨步电压，甚至发生故障扩大，严重威胁电力系统安全运行^[20-21]。故如果出现非金属性故障应及时切断相应电源，排除故障。地铁直流馈线保护中，中远距离非金属性接地故障发生电弧短路是最不利情况，设置接地电阻为 1 Ω，设置长 10 cm 的电弧故障。图 9 中得到仿真结果，

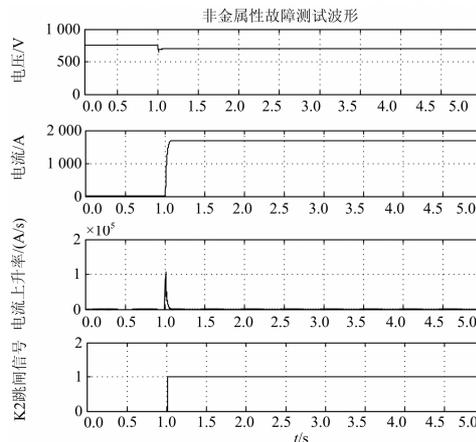


图 9 非金属性故障测试波形

Fig. 9 Waveform of non-metal fault test

电流上升率足够进入保护延时，但是短路电流非常低，若只考虑电流可能由于整定的问题导致拒动，但是新的保护逻辑中电流、电压变化量的乘积足够大，保护流程会通过中远距离非金属性故障动作出口。

5 结论

本文针对现有地铁直流馈线保护中非金属性及远端故障检测方面的不足，在提出的新算法中加入了电压量的检测，利用三种逻辑相互配合实现保护地铁馈线线路全长，使保护的整定更加灵活，采用常用的整定方法即可增加保护的可靠性。这也表明保护仍有提升空间，可以根据现场需要适当修改整定值以实现保护的更快速动作。应用 AFB 流程设计方法开发出的保护流程直观地将保护逻辑展现出来，便于开发测试及修改，可根据需要重新生成代码直接应用于新的平台。测试结果表明：该逻辑算法能准确辨识机车启动等非故障情况，且能实现对任何接地故障正确快速动作。

参考文献

[1] 于松伟, 杨兴山. 城市轨道交通供电系统设计原理与应用[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2008.
YU Song-wei, YANG Xing-shan. Design principle and application for urban rail power system[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2008.

[2] 韩志伟, 董杰, 屠黎明, 等. 一种直流牵引馈电区段保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(22): 135-138.
HAN Zhi-wei, DONG Jie, TU Li-ming, et al. A domain protection method of DC traction feeder segment[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(22): 135-138.

[3] 沈小军, 江秀臣, 达世鹏. 轨道交通直流电缆绝缘诊断技术现状及展望[J]. 电工技术学报, 2007, 22(9): 22-27.
SHEN Xiao-jun, JIANG Xiu-chen, DA Shi-peng. Review and expectation of diagnosis technology on insulation of DC cable of urban transit[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(9): 22-27.

[4] 朱林, 陈金富, 段献忠. 数字化变电站冗余体系结构的改进及其可靠性和经济性评估[J]. 电工技术学报, 2009, 24(10): 147-151.
ZHU Lin, CHEN Jin-fu, DUAN Xian-zhong. Improvement of redundant architecture in digital

substation and its reliability & economic assessment[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(10): 147-151.

[5] Li M X, He J H, Bo Z Q, et al. Simulation and algorithm development of protection scheme in DC traction system[C] // Powertech, 2009 IEEE, Bucharest, 2009.

[6] Chang C S. Remote short-circuit current determination in DC railway systems using wavelet transform[J]. IEE Proceedings-Electric Power Applications, 2000, 147(6): 520-526.

[7] 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 Jing-han, WANG Xiao-jun, 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.

[8] 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.

[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 Zhen-qiang, LU Gai-feng, Lü Yan-ping. 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] 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 Xiao-zhi. Research on traveling wave protection method for subway feeder line[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2006.

[11] 王广峰, 孙玉坤, 陈坤华. 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 Guang-feng, SUN Yu-kun, CHEN Kun-hua. DDL protection in subway DC traction power supply system[J]. Proceedings of CSU-EPSA, 2007, 19(1): 59-62.

[12] 张秀峰, 王毅非. 地铁馈线电流增量保护 ΔI 检出精度与分离方法的研究[J]. 西南交通大学学报, 1997, 32(1): 23-27.
ZHANG Xiu-feng, WANG Yi-fei. On the ΔI checkout

- precision and separating measure of current increment protection of subway feed line[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1997, 32(1): 23-27.
- [13] 曹雅怀. 城市轨道交通直流馈线保护新原理研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
CAO Ya-huai. The new research on protection of DC feeder in urban rail transit[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2011.
- [14] 孔玮. 城市轨道交通直流牵引系统故障分析及若干问题的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2005.
KONG Wei. Investigation into fault analysis and some problems on DC traction power supply system for urban railway transit system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2005.
- [15] 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.
- [16] CHEN Chun-qing. Formal analysis for stateflow diagrams[C] // 2010 Fourth International Conference on Secure Software Integration and Reliability Improvement Companion (SSIRI-C), 2010: 102-109.
- [17] 邹辉, 陈万春, 殷兴良. Stateflow 在巡航导弹仿真中的应用[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(8): 1854-1860.
ZOU Hui, CHEN Wan-chun, YIN Xing-liang. Simulation of a cruise missile with stateflow[J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(8): 1854-1860.
- [18] Brown J C, Allan J, Mellitt B. Calculation and measurement of rail impedance applicable to remote short circuit fault currents[J]. IEE Proceedings-B, 1992, 139(4): 295-320.
- [19] 刘炜, 李群湛, 陈民武. 城市轨道交通交直流统一的牵引供电计算[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(8): 128-133.
LIU Wei, LI Qun-zhan, CHEN Min-wu. Study of unified AC/DC power flow in DC traction power supply system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(8): 128-133.
- [20] 王峰, 徐政, 黄莹, 等. 高压直流输电主回路稳态参数计算[J]. 电工技术学报, 2009, 24(5): 135-140.
WANG Feng, XU Zheng, HUANG Ying, et al. Calculation of main circuit parameters for HVDC transmission[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(5): 135-140.
- [21] Yu L, He J H, Hu J, et al. Accurate track modeling for fault current on DC railways based on Matlab/Simulink[C] // PESGM2010. Minnesota, USA, July 25-29, 2010.

收稿日期: 2013-05-24; 修回日期: 2013-09-22

作者简介:

董晨阳 (1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制。E-mail: 11125704@bjtu.edu.cn