

电气化铁路对微机保护装置选相元件的影响研究

刘源¹, 于群¹, 薛劲莹², 罗邦云², 李琰³, 彭东虎¹, 国翠¹

(1. 山东科技大学电气与自动化工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 新疆哈密电业局, 新疆 哈密 839000;
3. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要: 研究了电气化铁路对电力系统 220 kV 输电线路微机保护装置选相元件的影响。根据某地区电网实际参数, 在 PSCAD 中分别搭建了电力机车模型, 基于相电流差突变量和序分量原理的微机保护装置选相元件模型。在 PSCAD 仿真中, 相电流差突变量选相元件在不同工况下均能正确选出故障相, 序分量选相元件在电铁功率较大时不能正确选出故障相, 故电气化铁路对相电流差突变量选相元件影响较小, 为在电气化铁路运输任务较重地区装设选相元件提供了理论依据。

关键词: 电气化铁路; 微机保护; PSCAD; 序分量选相; 突变量选相

Research of the electrified railway influence on the phase selector in digital protection

LIU Yuan¹, YU Qun¹, XUE Jing-ying², LUO Bang-yun², LI Yan³, PENG Dong-hu¹, GUO Cui¹

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;
2. Xinjiang Hami Electric Power Bureau, Hami 839000, China; 3. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: This paper researches the influence of electrified railway on phase selector of digital protection device of 220 kV power transmission line in power system. According to the actual parameters of a regional power system, the electric locomotive model, the phase current difference superimposed phase selector model and the sequence component phase selector model are built in PSCAD. In PSCAD simulation, the phase current difference superimposed phase selector model can correctly select the fault phase in different conditions and the sequence component phase selector model can't select the fault phase when the electric railway power is larger, so this paper reaches the conclusion that electrified railway on the phase current difference superimposed phase selector has little effect. It provides principle for installation the phase selection element in the electric railway transportation of heavy task area.

Key words: electrified railway; digital protection; PSCAD; sequence components phase selector; current sudden changer phase selector

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)16-0127-06

0 引言

在铁路运输任务较重地区的电网中, 系统中奇次谐波含量较高, 并且含有较大的负序电流, 这是因为电力机车是一种具有非线性、不对称和功率波动大等特性的负荷, 这不止影响了电能质量还给微机距离保护装置造成了不利影响, 对电网的安全稳定运行造成了威胁。因此, 随着我国铁路网的发展, 研究电气化铁路对微机保护装置的影响具有十分重要的意义。

文献[1]在Matlab/Simulink环境下建立电力机车仿真模型并对单个整流器网侧电流谐波含量进行测量, 但对电磁暂态的分析却有欠缺, 也没有分析电铁负荷对继电保护装置的影响; 文献[2]研究了电力

机车对微机距离保护测量元件及启动元件的影响, 但是没有研究电铁负荷对选相元件的影响。

本文通过PSCAD/EMTDC搭建了某地区较为完善具体的电网仿真模型, 分析了电铁负荷特性对输电线路微机保护装置选相元件的影响, 并通过仿真验证了分析的正确性。

1 微机距离保护选相元件的特点

选相元件是微机保护装置的重要组成部分, 其功能是在故障时判断故障类型, 选出故障所在相, 并配合保护装置与重合闸回路在发生故障时正确自动重合闸。

按照采用不同的电气量, 选相元件主要有实测量选相元件和故障分量选相元件两种, 实测量选相

元件有相电流选相元件、低电压选相元件和距离选相元件；故障分量选相元件主要有相电流差突变量（简称突变量）选相元件和序分量电流相位比较（简称序分量）选相元件^[3]。

目前，微机保护装置普遍采用的基于相电流差突变量和序分量的选相原理，均根据占主导地位的特征量实现选相^[4]，本文主要研究了电气化铁路对这两种元件的影响。

2 PSCAD/EMTDC 数字仿真模型的建立

2.1 电力机车仿真模型

本文以 HXD2C 型机车为例，在 PSCAD 中搭建了该机车的仿真模型。其主要参数为：额定电压 25 kV，单轴功率 1 200 kW，最大时速 120 km/h，每一个动力单元由牵引变流器和牵引电机组成，在 PSCAD 中仿真模型如图 1 所示。

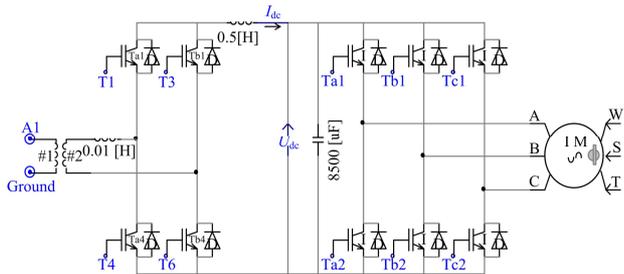


图 1 电力机车仿真模型

Fig. 1 Simulation model of electric locomotive

牵引变流器主要分为整流器、中间直流环节和逆变电路三部分，参数设置：整流器输入侧电感设为 0.01 H，中间直流环节支撑电容设为 8.5 mF。

整流电路采用瞬态电流控制，其优点是电路结构简单、静态特性好、动态响应快^[5]，其数学模型为

$$\begin{cases} I_{N1}^* = K_p(U_{dc}^* - U_{dc}) + K_i \int (U_{dc}^* - U_{dc}) dt \\ I_{N2}^* = I_{dc} U_{dc} / U_N \\ I_N^* = I_{N1}^* + I_{N2}^* \\ u_{ab}(t) = u_N(t) - (I_N^* R_N \sin \omega t + \omega L_N I_N^* \cos \omega t) - K [I_N^* \sin \omega t - i_N(t)] \end{cases}$$

式中： K_p 为 PI 调节器比例放大系数； K_i 为 PI 调节器积分时间常数； U_{dc}^* 为整流电路直流侧电压比较值； I_{dc} 为整流电路直流侧输出电流； K 为比例放大系数^[6]。

根据上式在 PSCAD 中建立瞬态电流控制策略的仿真模型如图 2 所示。设置 U_{dc}^* 为 2.8 kV，交流

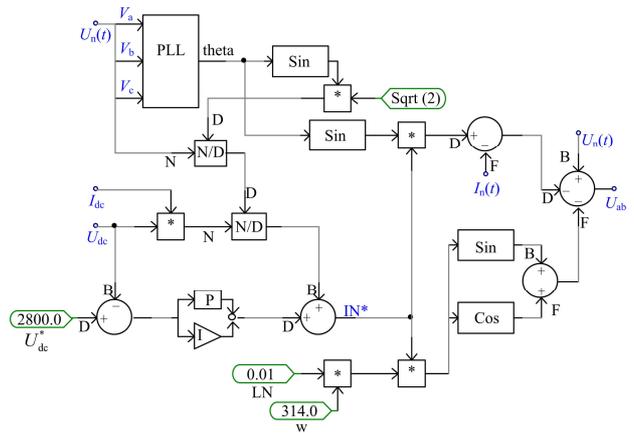


图 2 瞬态电流控制仿真模型

Fig. 2 Simulation model of transient current control

侧电压相位由 Three-Phase PI-Controlled Phase Locked Loop 获取，PI 调节器选用 PI Controller。

逆变电路触发信号采用空间矢量脉宽调制法进行调制，该法直流电压损耗小，谐波含量低，较少的开关次数和功耗小等优点。SVPWM 的基本原理是：在每个开关周期内，选择合适的两电平基本电压矢量，代替旋转参考矢量作用^[7-8]。根据此原理，在仿真模型中部分元件通过 Fortran 语言编程实现其功能，在 PSCAD 中 SVPWM 仿真模型如图 3 所示。

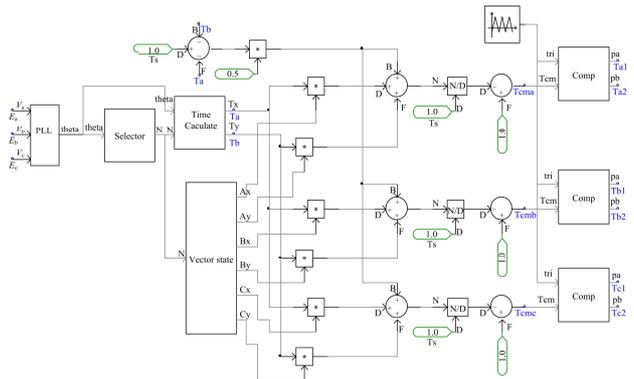


图 3 SVPWM 仿真模型

Fig. 3 Simulation model of SVPWM

2.2 区域电网仿真模型

根据电网的实际参数，建立了该电网的 PSCAD 仿真模型。该地区电网如图 4 所示，输电线路 TL1、TL3、TL4 为 LGJ-2*300 型 TL2 为 LGJ-240 型，线路 TL1、TL2、TL3、TL4 长度分别为 134.5 km、10 km、3 km、30 km；1 号主变是一台接线方式为 YG/YG/D 的三绕组变压器，变比为 220 kV/110 kV/35 kV，容量为 180 MVA；牵引变电站接入系统相序为 CAB，牵引变压器为 V/V 接线，牵引负荷

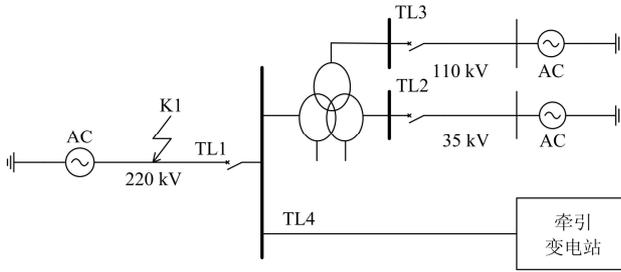


图4 某地区电网模型

Fig. 4 Electric primary system

为 HDX 型电力机车。在仿真过程中 0.5 s 时电铁投入, 1 s 时在 K1 处发生故障。

当 K1 处发生故障时, 系统由主变低压侧供电, 电铁负荷产生的负序电流可能会对 TL1 末端的微机保护装置造成影响。

为了分析不同运行方式及功率下电铁负荷特性对选相元件的影响, 本文设定了如下四种工况:

(1) 工况一(单站单臂): 正常运行方式, 牵引站单独接入系统, 单臂供电负荷 11 MW;

(2) 工况二(单站单臂): 正常运行方式, 牵引站单独接入系统, 单臂供电负荷 41 MW;

(3) 工况三(单站单臂): 制动运行方式, 牵引站单独接入系统, 制动反馈功率 8 MW;

(4) 工况四(单站单臂): 制动运行方式, 牵引站单独接入系统, 制动反馈功率 32 MW。

3 电铁负荷对选相元件的影响

作为微机保护装置的重要元件, 当系统发生故障时, 能够准确判断出故障类型并选出故障相, 对于重合闸动作行为和系统可靠性的提高, 具有十分重要的意义。基于突变量或序分量原理的选相元件被广泛应用于微机保护装置, 以下将分析牵引供电系统故障特性并讨论电铁负荷对这两种选相元件的影响。

3.1 故障特性分析

电力系统中, 故障类型可分为不对称故障和对称故障。当系统发生不对称故障时, 系统中出现负序或零序故障分量, 若故障发生在区外, 线路两侧零序电流大小相等, 方向相反; 若故障发生在区内, 线路两侧零序电流方向相同, 大小取决于故障点两侧的系统零序阻抗和线路零序阻抗。当系统发生对称故障时, 系统中零序分量几乎为零, 若故障发生在区外, 线路两侧正序电流大小相等, 方向相反; 若故障发生在区内, 线路两侧正序电流方向相同, 大小取决于故障点两侧的系统正序阻抗和线路正序

阻抗^[9]。

微机保护装置主要受电气化铁路产生的负序电流影响, 故本文在研究其对选相元件的影响时只考虑负序电流。在 PSCAD 仿真中, 将与电铁负荷功率相同的对称负荷代替电铁负荷, 故障时线路 TL1 上测得的负序电流作为基准值。当系统接入电铁负荷时, 故障时测得各工况下线路 TL1 上负序电流与基准电偏差如表 1 所示。

表 1 负序电流偏差

Table 1 Deviation for negative sequence current

故障类型	AG	BG	CG	ABG	AB
工况一	1.59%	0.61%	0.82%	0.71%	0.64
工况二	5.90%	1.68%	2.45%	2.54%	1.82
工况三	0.64%	0.46%	1.14%	0.42%	0.75
工况四	2.39%	1.84%	4.74%	3.67%	2.89

由表 1 知, 在牵引供电系统中, 发生故障时系统中负序电流偏差主要受电铁负荷大小和发生故障相别影响, 电铁负荷越大故障时负序电流偏差越大, 供电臂所在相或公共相发生故障时负序电流偏差较大。

3.2 对相电流差突变量选相元件的影响

当系统发生故障时, 相电流差突变量选相元件计算 $I_A - I_B$ 、 $I_B - I_C$ 、 $I_C - I_A$ 的绝对值, 即计算 I_{AB} 、 I_{BC} 、 I_{CA} 的幅值并按一定的流程选出故障相。

利用对称分量法, 可将相电流差突变量表示为^[10]

$$\begin{cases} I_{AB} = (1 - \alpha^2)C_1 I_{g1} + (1 - \alpha)C_2 I_{g2} \\ I_{BC} = (\alpha^2 - \alpha)C_1 I_{g1} + (\alpha - \alpha^2)C_2 I_{g2} \\ I_{CA} = (\alpha - 1)C_1 I_{g1} + (\alpha^2 - 1)C_2 I_{g2} \end{cases}$$

式中: I_{g1} 、 I_{g2} 为故障点的正、负序故障分量电流; C_1 、 C_2 为保护端的正、负序电流分布系数。

单相短路(A相)时, $I_{g1} = I_{g2}$, 代入可得

$$\begin{cases} I_{AB} = 3I_{g1} \\ I_{BC} = 0 \\ I_{CA} = 3I_{g1} \end{cases}$$

由此可知, 单相短路时的幅值特征为非故障相电流差为零。

两相短路(BC相)时, $I_{g1} = -I_{g2}$, 代入可得

$$\begin{cases} I_{AB} = \sqrt{3}I_{g1} \\ I_{BC} = 2\sqrt{3}I_{g1} \\ I_{CA} = \sqrt{3}I_{g1} \end{cases}$$

由此可知，两相短路时的幅值特征是故障相电流差最大。

三相短路时， $I_{g2} = 0$ ，代入可得

$$I_{AB} = I_{BC} = I_{CA}$$

由此可知，三相短路时各相电流差相等。

由以上结论结合电铁负荷特性可知，当系统介入电铁负荷时，虽然电铁负荷产生的负序电流改变了各相电流差值的大小，但其故障时的大小关系并没有发生改变。在微机保护中，系统发生故障后将 I_{AB} 、 I_{BC} 、 I_{CA} 进行比较，分为大、中、小量，并分别命名为 I_{max} 、 I_{mid} 、 I_{min} ，判断条件如下：

条件 1: $I_{max} > I_{min}$ ，且 $I_{mid} > I_{min}$

条件 2: $(I_{max} - I_{mid}) > (I_{mid} - I_{min})$

当满足条件 1 时，判定故障为单相故障且 I_{min} 对应的相别为故障相。若不满足条件 1，判定故障为相间故障，根据条件 2 故障相为 I_{max} 对应的相别^[11]。故电铁负荷不会对相电流差突变选相元件造成影响，这在 PSCAD 仿真中也得到了验证。

相电流差突变选相流程图如图 5 所示。

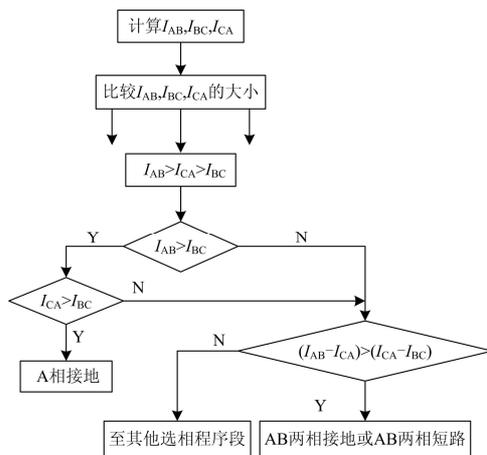


图 5 相电流差突变选相流程图

Fig. 5 Phase current difference phase selector diagram

由于相电流差突变选相元件不反映稳态量，故在全相或非全相运行的负荷状态下不会误动作，即该选相元件不会受到电铁接入方式的影响。本文在 PSCAD 中根据上述原理搭建了相电流差突变量的模型，设置故障发生在 1 s 时。在不同工况不同

故障下，相电流差突变选相元件选出的故障相如表 2 所示。

表 2 是在不同工况下 TL1 发生不同故障时，相电流差突变选相元件实际动作情况。由表 2 可知，相电流差突变选相元件在各工况下都可以准确选出系统故障相。

表 2 相电流差突变选相元件动作情况

Table 2 Phase selector act of difference phase current					
故障类型	AG	BG	CG	ABG	AB
工况一	AG	BG	CG	ABG	AB
工况二	AG	BG	CG	ABG	AB
工况三	AG	BG	CG	ABG	AB
工况四	AG	BG	CG	ABG	AB

通过上述分析可以证明相电流差突变选相元件不仅不受电铁负荷运行状态的影响，亦不受电铁负荷大小的影响，故电铁负荷不会对相电流差突变选相元件产生影响。

3.3 对序分量电流相位比较选相元件的影响

序分量选相是根据对称分量法得到故障时正、负、零序故障分量，通过各分量相位关系来进行故障类型的判别。分区的基本原理主要有利用零序、负序电流分量比相以及正序故障分量和负序分量比相两种^[12]。本文在 PSCAD 中以正序故障分量和负序分量比相原理搭建了序分量选相元件模型。

在系统发生各种不对称故障时正序电流 I_{A1} 与负序电流 I_{A2} 的相位关系 ($\arg \frac{I_{A1}}{I_{A2}}$) 可以作为微机保护装置判断故障相别的依据，具体关系为 A 相单相接地 ($-60^\circ, 60^\circ$)；B 相单相接地 ($-180^\circ, -60^\circ$)；C 相单相接地 ($60^\circ, 180^\circ$)；AB 两相和 AB 两相接地故障 ($-120^\circ, 0^\circ$)；BC 两相和 BC 两相接地故障 ($120^\circ, 240^\circ$)；CA 两相和 CA 两相接地故障 ($0^\circ, 120^\circ$)。

根据上述判据，其相区划分如图 6 所示。

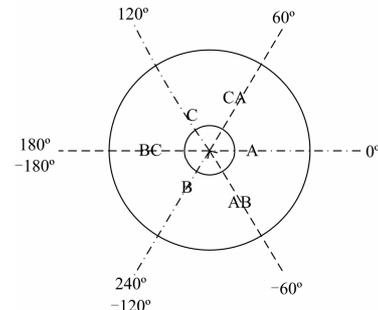


图 6 不对称故障时 I_{A1} 与 I_{A2} 比相的相区划分

Fig. 6 Partition of I_{A1} and I_{A2} phase plane with asymmetry fault

该法的主要原理是利用零序电流是否大于门槛电流判断故障类型(接地故障或相间故障),然后根据正序电流与负序电流绝对值差判断故障是单相故障还是两相接地故障。由图6可知,正序故障分量和负序分量比相法存在两相短路和两相接地故障特性相同且单相短路和相间短路相区划分有重叠部分的特点。当系统中接入电铁负荷时,电铁负荷产生的负序电流足够大时必然影响故障时正序电流和负序电流的绝对值差,使选相元件无法正确判定故障为单相接地还是两相接地,这一点由PSCAD仿真结果得到了证明。

电铁负荷功率越大,产生的负序电流越大,故工况二与工况四下选相元件会受到较大影响。在不同工况不同故障下,序分量选相元件选出的故障相如表3所示。

表3 序分量选相元件动作情况

Table 3 Phase selector act of sequence components

故障类型	AG	BG	CG	ABG	AB
工况一	AG	BG	CG	ABG	AB
工况二	ACG	ABG	ABCG	ABG	AB
工况三	AG	BG	CG	ABG	AB
工况四	ACG	ABG	BCG	ABG	AB

表3是在不同工况下TL1发生不同故障时,序分量选相元件实际动作情况。当电铁处于工况一和工况三时,序分量选相元件可以正确判定故障类型并准确选出故障所在相;当电铁处于工况二和工况四时,序分量选相元件在发生单相接地故障时不可以准确选出故障所在相。

通过上述分析可以证明序分量选相元件不受电铁负荷运行状态的影响,但会受到电铁负荷大小的影响,较大负荷时会导致序分量选相元件无法准确判断单相故障相别。

4 结语

通过对比分析可知,电力机车运行工况不会影响微机保护装置中的相电流差突变量选相元件,同时电力机车的功率大小也不会对其产生影响,在系统发生故障时该元件能够准确选出故障相;序分量选相元件基本不受电力机车运行工况的影响,但电力机车负荷大小对其影响较大,在发生单相故障时,不能够正确选出故障相。

由于220 kV及以上输电线路发生故障时,故障类型往往为单相接地故障,故在电铁负荷较重地区宜选用相电流差突变量选相元件作为微机距离保护的选相元件。

参考文献

- [1] 杨显进. CRH5牵引变流器的研究[D]. 成都:西南交通大学, 2009.
YANG Xian-jin. Research of the traction converter used in CRH5[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009.
- [2] 蓝智晖, 徐永海. 电铁负荷特性对微机保护测量元件的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(15): 59-64.
LAN Zhi-hui, XU Yong-hai. Research of the influence to the measurement unit of digital distance protection from electric locomotive loads[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(15): 59-64.
- [3] 王兴国, 黄少峰, 刘千宽. 一种利用电压模故障分量的选相元件[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(9): 42-46.
WANG Xing-guo, HUANG Shao-feng, LIU Qian-kuan. A phase selector used voltage mode fault components[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(9): 42-46.
- [4] 李伟, 毕天姝, 徐振宇, 等. 相间接地故障时常规选相元件动作行为分析及改进措施[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(3): 67-72.
LI Wei, BI Tian-shu, XU Zhen-yu, et al. Analysis of phase selector action and improving scheme for two-phase-to-ground fault[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(3): 67-72.
- [5] 程启明, 程伊曼, 薛阳, 等. 三相电压源型PWM整流器控制方法的发展综述[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(3): 145-154.
CHENG Qi-ming, CHENG Yi-man, XUE Yang, et al. A summary of current control methods for three-phase voltage-source PWM rectifiers[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(3): 145-154.
- [6] 江承武. CRH2 三电平牵引整流器的控制研究[D]. 成

- 都: 西南交通大学, 2011.
- JIANG Cheng-wu. Research on three-level traction rectifier of CRH2[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.
- [7] 夏长亮, 谭智涵, 张云. 多电平逆变器简化空间矢量调制算法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(8): 218-223.
- XIA Chang-liang, TAN Zhi-han, ZHANG Yun. A simplified space vector pulse width modulation algorithm for multi-level inverter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(8): 218-223.
- [8] 王翠. n 级逆变器 SVPWM 调制零序电压优化算法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(6): 158-164.
- WANG Cui. An optimal algorithm on zero order voltage of space vector PWM modulation for n-cell inverters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(6): 158-164.
- [9] 李振兴, 尹项根, 张哲, 等. 基于序电流相位比较和幅值比较的广域后备保护方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1): 242-250.
- LI Zhen-xing, YIN Xiang-gen, ZHANG Zhe, et al. Comparative sequence current phase and wide area backup protection method based on the amplitude comparison[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 242-250.
- [10] 唐宝锋. 输电线路故障选相新方法的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2004.
- TANG Bao-feng. Study on the new method of the fault phase selection for transmission line[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2004.
- [11] 杨奇逊. 微型机继电保护基础[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- YANG Qi-xun. Basis of microcomputer relay protection[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2005.
- [12] 张举. 微型机继电保护原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.
- ZHANG Ju. Principle of digital distance protection[M]. Beijing: China Water Power Press, 2004.
-
- 收稿日期: 2013-11-18; 修回日期: 2014-02-27
- 作者简介:
- 刘 源 (1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: ly_npc@163.com
- 于 群 (1970-), 男, 副教授, 主要从事电力系统继电保护方面的研究;
- 薛劲莹 (1973-), 女, 高级工程师, 主要从事电力系统调度运行管理工作。