

西北 330 kV 线路弱电强磁问题的分析及采取的措施

宋国兵¹, 刘志良¹, 粟小华², 张健康^{1,2}, 索南加乐¹

(1. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049; 2. 西北电力调度通信中心, 陕西 西安 710048)

摘要: 分析了一起发生在西北 330 kV 线路中由线间零序互感影响而导致的纵联零序方向保护误动事件。分别从理论和定量的不同角度, 深入分析了网络结构和纵联零序方向保护误动之间的联系, 总结了双回线不同运行情况下纵联零序方向保护的動作行为, 指出弱电强磁的网络联系是保护误动的原因, 两侧零序电压反相是保护误动的必要条件。针对这种弱电强磁问题, 提出采用基于故障类型的零序方向元件替代零序方向元件的解决措施, 录波数据的分析结果证明了这种方法的有效性和准确性。

关键词: 弱电强磁; 纵联零序方向; 零序互感; 方向元件

Analysis on the weak current and strong magnetic problem of north-west 330 kV lines and its countermeasure

SONG Guo-bing¹, LIU Zhi-liang¹, SU Xiao-hua², ZHANG Jian-kang^{1,2}, SUONAN Jia-le¹

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Northwest China Power Dispatch & Communication Center, Xi'an 710048, China)

Abstract: This paper analyzes a maloperation event of longitudinal zero-sequence protection in north-west 330 kV lines, caused by zero-sequence mutual inductance between lines. By deeply analyzing the link between power network structure and maloperation of longitudinal zero-sequence protection from theoretical analysis and quantitative analysis, it sums up behaviors of longitudinal zero-sequence protection under different running situations of double-circuit lines, concludes that the reason for maloperation of protection is weak current and strong magnetic contact of lines, and points out that the necessary condition for maloperation is the reverse of zero-sequence voltage on both sides. In order to solve the weak current and strong magnetic problem, zero-sequence direction components based on fault type are used instead of zero-sequence direction components. Recording data analysis proves the effectiveness and accuracy of this measure.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No.50677051).

Key words: weak current and strong magnetic; longitudinal zero-sequence protection; zero sequence mutual inductance; directional element

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)20-0121-05

0 引言

电力需求量的不断增大, 加速了电网建设的发展, 为了有效利用土地和降低电网建设投资, 线路走廊越来越紧密, 出现了大量的同杆并架双回线和同走廊架设的双回线^[1-3]。

纵联零序方向保护是目前国内使用最为广泛和有效的快速保护之一, 在发展性故障、高阻接地等故障时起着重要作用。但是随着双回线路的增多, 线间零序互感对零序保护的影响也越来越严重, 将会造成纵联零序方向保护的误动。为了分析和解决

由双回线零序互感引起的纵联零序方向保护的误动问题, 电力工作者进行了大量的研究^[4-10]。本文就一起西北 330 kV 线路实际发生的纵联零序方向保护误动事例来分析保护误动的原因和网络结构之间的关系, 并提出解决零序互感对纵联零序方向保护影响问题的有效措施。

1 误动事例简述

2007年2月9日9:53分, 渭南330 kV变电站II母故障, 故障后, II母停电检修。2007年2月9日18:51分, 渭南330 kV变电站II母检修完毕, 并由渭北II线对II母进行充电。由于故障并未清除, 渭北II线手合加速动作。对母线进行充电时, 运行

基金项目: 国家自然科学基金项目(50677051)

于渭南变电站 I 母的渭东 I 线高频零序方向误动作，并重合成功。

故障发生时的电网拓扑示意图如图 1 所示，渭南 330 kV 变电站 II 母停电检修；渭南变和东郊变经渭东 I 线联络；北郊变与东郊变经过草滩、泮河、庄头、河寨、南郊变的 330 kV 双环网联络。渭东 I 线与对母线充电的渭北 II 线为同杆双回线，同杆部分约 45 km，零序互感 8.67 Ω。

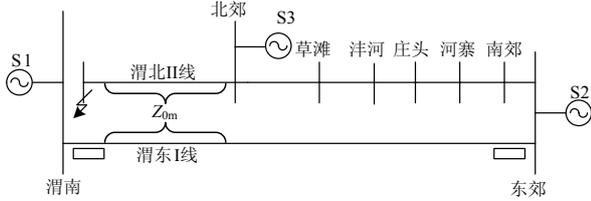


图 1 电网拓扑示意图

Fig.1 Topology of the studied power network

2 纵联零序方向误动原因分析

2.1 误动的理论分析

由于渭南侧 II 母线故障，引起与渭北 II 线同杆架设的渭东 I 线纵联零序方向的误动。为了更清楚的认识和分析线间零序互感引起纵联零序方向保护的误动情况，重点分析渭北 II 线和渭东 I 线之间的联系，建立相应的零序网络如图 2 所示。

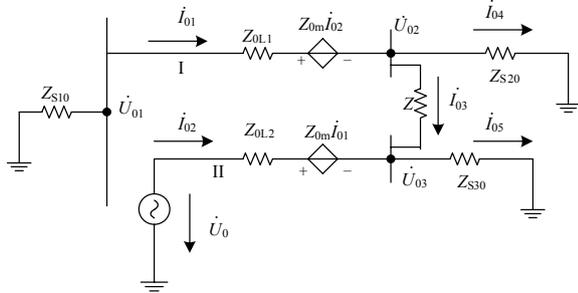


图 2 零序网络示意图

Fig.2 Diagram of zero-sequence network

参数说明： Z_{0m} 为线间的零序互感阻抗； Z_{S10} 、 Z_{S20} 、 Z_{S30} 为系统 S1、S2、S3 的零序阻抗； Z_{0L1} 、 Z_{0L2} 为线路 I、II 的零序阻抗； Z 为 I 和 II 回线之间电气联络的等效阻抗。

从图 2 可以看出，II 回线发生不对称接地故障时，受线间零序互感的影响，相当于一个受控零序电压源串接于 I 回线路，将改变线路各点的零序电势。由于 I 回线的零序电流是穿越性的，如果安装于 I 回线两侧的纵联零序方向保护要误动，则两侧保护安装处零序电压反相是必要条件，这时 I 回线路两侧

的零序电流均超前于零序电压约 90°，满足零序方向正方向动作的判据。

对图 2 所示的零序网络图，列写 KCL 方程组如式

(1)：

$$\begin{cases} Z_{0m} \dot{I}_{01} + Z_{0L2} \dot{I}_{02} + Z_{S30} \dot{I}_{05} = \dot{U}_0 \\ (Z_{S10} + Z_{0L1}) \dot{I}_{01} + Z_{0m} \dot{I}_{02} + Z_{S20} \dot{I}_{04} = 0 \\ -Z \dot{I}_{03} + Z_{S20} \dot{I}_{04} - Z_{S30} \dot{I}_{05} = 0 \\ \dot{I}_{03} = \dot{I}_{01} - \dot{I}_{04} \\ \dot{I}_{02} = \dot{I}_{05} - \dot{I}_{03} \\ \dot{U}_{01} = -Z_{S10} \dot{I}_{01} \\ \dot{U}_{02} = Z_{S20} \dot{I}_{04} \end{cases} \quad (1)$$

对方程组求解，可以求得：

$$\dot{U}_{01} = \frac{Z_{S10}}{\Delta} \left[Z_{S20} + Z_{0m} + \frac{Z_{0m}}{Z_{S30}} (Z_{S20} + Z) \right] \dot{U}_0 \quad (2)$$

$$\dot{U}_{02} = \frac{Z_{S20}}{\Delta} \left[Z_{S10} + Z_{0L1} - Z_{0m} - \frac{Z_{0m} Z}{Z_{S30}} \right] \dot{U}_0$$

式中：

$$\begin{aligned} \Delta = & (Z_{0L2} - Z_{0m}) Z_{S20} + Z_{0L1} Z_{0L2} - Z_{0m}^2 + Z_{S10} Z_{0L2} + \\ & \frac{1}{Z_{S30}} \left[Z_{0m} (Z_{S20} + Z) (Z_{0L2} - Z_{0m}) + \right. \\ & \left. Z (Z_{S20} Z_{S30} + Z_{S30} Z_{0m} + Z_{S20} Z_{0L2}) + \right. \\ & \left. (Z_{S30} + Z_{0L2}) (Z_{S20} + Z) (Z_{S10} + Z_{0L1} - Z_{0m}) \right] \end{aligned} \quad (3)$$

很明显， $Z_{0L1} > Z_{0m}$ ， $Z_{0L2} > Z_{0m}$ ，因此， Δ 恒大于 0。依据两侧零序电压反相是纵联零序方向保护误动的必要条件，即只有 $(Z_{S10} + Z_{0L1} - Z_{0m} - Z_{0m} Z / Z_{S30}) < 0$ 时，才能满足两侧零序电压 \dot{U}_{10} 和 \dot{U}_{20} 反相。

以下从有电气联系的互感线路、无电气联系的互感线路及其各种特殊情况进行分析。

1) 当 $Z_{0m} = 0$ 时， \dot{U}_{02} 的分子恒大于 0，即两侧零序电压不反向，说明两条线路在无互感的情况下，一回线不对称接地故障不会造成对邻线纵联零序方向保护的影响。

2) 当 $Z = 0$ 时， $\Delta > 0$ ， \dot{U}_{02} 的分子恒大于 0，即两侧零序电压不反向，说明一侧共端点的有互感双回线路一回线路不对称接地故障时，不会造成两侧零序电压的反相，不会导致纵联零序方向的误动。

3) 当 Z 和 Z_{0m} 越大，两侧零序电压越容易反相。 Z 的大小体现两回线电气联系的强弱， Z_{0m} 的

大小表示两回线磁联系的强弱, 这说明越是弱电强磁的双回线路越容易导致纵联零序方向保护的误动。

4) 当 $Z = \infty$ 时, 将 \dot{U}_{10} 和 \dot{U}_{20} 的分子分母都除以 Z , 很明显

$$\frac{\Delta}{Z} = \frac{1}{Z_{S30}} \left[\frac{Z_{0m}(Z_{0L2} - Z_{0m}) + Z_{S20}Z_{S30} + Z_{S30}Z_{0m} + Z_{S20}Z_{0L2}}{Z_{S20}(Z_{S30} + Z_{0L2})(Z_{S10} + Z_{0L1} - Z_{0m})} \right] > 0$$

\dot{U}_{01} 的分子为: $\frac{Z_{S10}Z_{0m}}{Z_{S30}}\dot{U}_0 > 0$, \dot{U}_{02} 的分子为:

$$-\frac{Z_{0m}Z_{S20}}{Z_{S30}}\dot{U}_0 < 0, \text{ 两侧零序电压反相。说明无电}$$

气联系有互感的双回线纵联零序方向一定误动。

通过理论分析可知, 影响电压反相造成纵联零序保护误动的因素包括电的联系强弱、磁的强弱影响两方面。电的联系越弱, 磁的联系越强, 误动的可能性越大。

2.2 误动的定量分析

为了更好地分析和说明弱电强磁引起的纵联零序方向保护误动问题, 将利用故障发生时渭南侧和东郊侧的现场故障录波数据分析零序电压和零序电流的相位关系。渭南侧采样频率为每周波 100 点, 东郊侧的采样频率为每周波 20 点。

零序电流方向保护动作原理如下:

零序正方向动作区为:

$$-162^\circ \leq \arg(3U_0 / 3I_0) \leq 0^\circ$$

零序反方向动作区为:

$$18^\circ \leq \arg(3U_0 / 3I_0) \leq 180^\circ$$

(1) 渭南侧的录波数据分析

渭南侧电压电流二次侧录波数据和自产零序电压零序电流数据如图 3 所示。

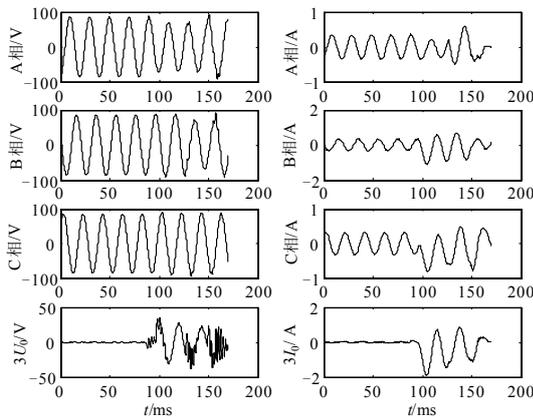


图 3 渭南侧录波数据

Fig.3 Recording data of Weinan station

在图 3 中的录波波形可以看出, 故障发生在 85

ms 左右, 根据相电压电流的波形看出, 故障发生前负荷的流向是从渭南流向东郊方向。

根据录波数据, 计算得渭南侧零序方向元件 $3\dot{U}_0 / 3\dot{I}_0$ 的判别结果如图 4 所示。

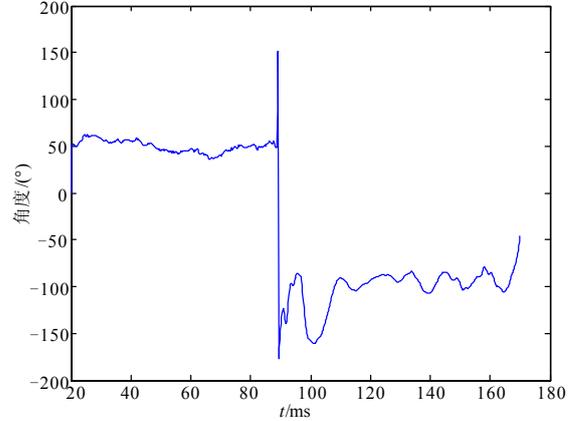


图 4 渭南侧零序方向

Fig.4 Zero-sequence direction at Weinan station

由图 4 可以看出, 故障发生后渭南侧零序方向元件判别为故障在正方向。

(2) 东郊侧的录波数据分析

东郊侧电压电流二次侧录波数据和自产零序电压零序电流数据如图 5 所示。

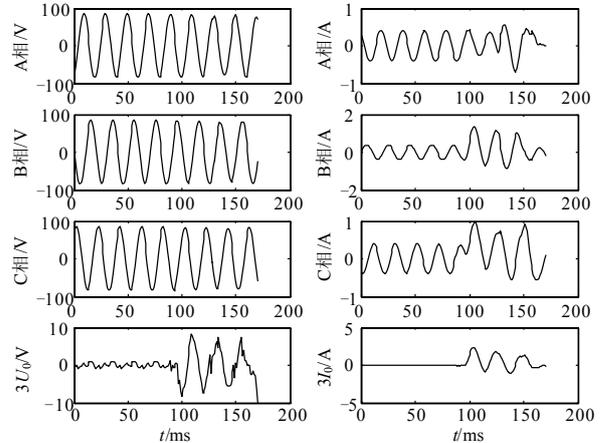


图 5 东郊侧录波数据

Fig.5 Recording data of Dongjiao station

在图 5 中的录波波形可以看出, 故障发生在 85 ms 左右, 根据相电压电流的波形看出, 故障发生前负荷的流向是从渭南至东郊方向。

根据录波数据, 计算得东郊侧零序方向元件 $3\dot{U}_0 / 3\dot{I}_0$ 的判别结果如图 6 所示。

由图 6 可以看出, 故障发生后东郊侧零序方向元件判别为故障在正方向。

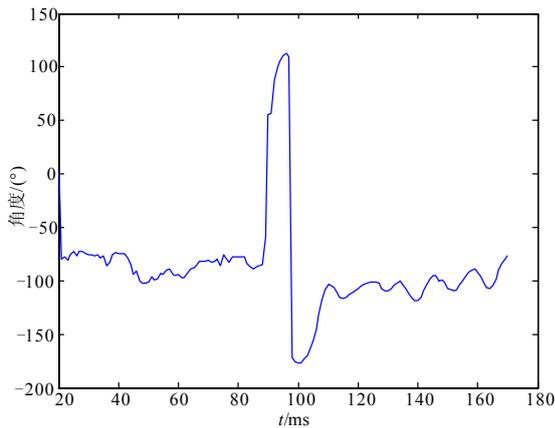


图 6 东郊侧零序方向

Fig.6 Zero-sequence direction at Dongjiao station

由图 4 和图 6 看出故障发生后，渭南和东郊侧的零序方向元件都判断为正方向，从而导致了渭东 I 线纵联零序方向保护的误动作。故障发生时，渭东 I 线和渭北 II 线之间通过草滩、泮河、庄头、河寨、南郊变的 330 kV 双环网相联系，电气联系比较弱，而两条线又是同杆架设，因此属于弱电强磁联系，在零序互感的作用下，渭北 II 线发生接地故障时会在渭东 I 线中感应出一个串接于渭东 I 线的零序电压源，比较图 3 和图 5 中两侧零序电压，可以看出两侧零序电压相位相反，零序互感造成东郊侧的零序电压反相，从而使得该侧零序方向元件发生误判。

从故障录波数据和事故分析来看，本次误动的原因同前面的理论分析结果相吻合，故障时同杆部分属于弱电强磁联系，从而造成同杆相邻线的零序方向误动。

3 基于故障类型的零序方向元件

弱电强磁联系的线路中，在线间零序互感的作用下，零序电压发生变化，导致非故障线路两侧的零序电压反相，一侧同故障点零序电源电压基本同相位，另一侧刚好相反，引起纵联零序方向保护误动作。若是两侧零序电压都和故障点的零序电源电压同相位，将不会导致纵联零序方向保护的误动。本文提出采用基于故障类型的零序方向元件来代替零序方向元件的方法来解决该问题。

基于故障类型的零序方向元件依据选相元件的选相结果，采用保护安装处故障前的故障相电压代替零序电压，进行方向判别^[11]。文献[11]分析的结论中指出故障前的故障相电压 $-\dot{U}_{\phi|0}$ 和 \dot{U}_0 基本同相位，可以推知，故障点的零序电源电压和故障

前故障相电压 $-\dot{U}_{\phi|0}$ 基本同相位。在弱电强磁联系的线路中，在零序互感的作用下，可能导致保护安装处的零序电压和故障点的零序电源电压反相，从而引起故障方向的误判。但是故障前故障相电压 $-\dot{U}_{\phi|0}$ 中不含零序分量，不受零序互感的影响，同时又同故障点零序电源电压基本同相，因此在保护安装处，用故障前故障相电压代替零序电压进行方向判别，能够准确反应故障方向。

采用基于故障类型的零序方向元件保护，判别结果如图 7 所示。

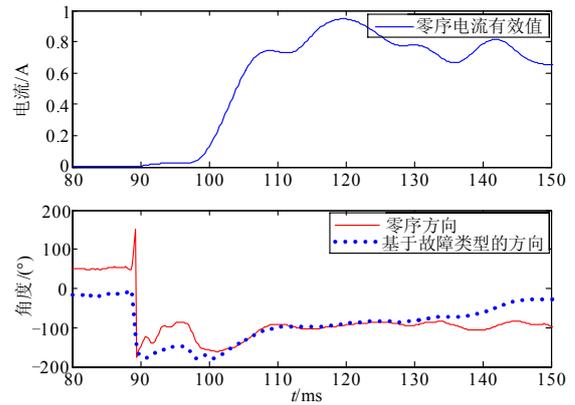


图 7 渭南侧零序电流有效值及采用零序方向元件/基于故障类型零序方向元件的判别结果

Fig.7 Effective value of zero-sequence current and discriminant result with zero-sequence direction element / zero-sequence direction element based on fault type at Weinan station

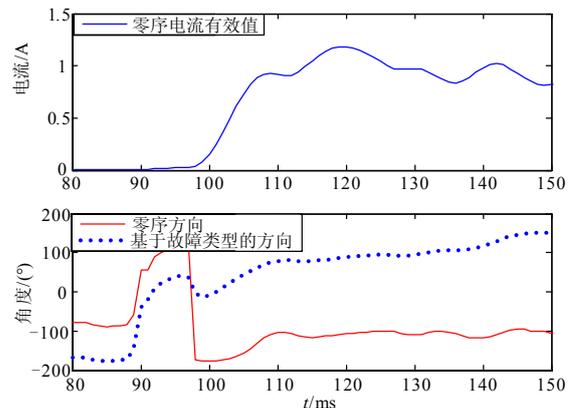


图 8 东郊侧零序电流有效值及采用零序方向元件/基于故障类型零序方向元件的判别结果

Fig.8 Effective value of zero-sequence current and discriminant result with zero-sequence direction element / zero-sequence direction element based on fault type at Dongjiao station

从图7、图8可以看出，在感受到零序电流期间，渭南侧基于故障类型的零序方向元件和零序方向元

件判别结果相同; 东郊侧基于故障类型的零序方向元件和零序方向元件判别结果相反。因此, 采用基于故障类型零序方向元件的保护装置, 不会发生误动作。

4 结论

随着电网建设的不断发展和线路走廊越来越紧密, 同走廊架设双回线或多回线的比例逐渐增多, 由于弱电强磁现象引起的纵联零序方向保护误动已经严重影响到电网系统安全稳定的运行。因此, 一方面需要更加深入的研究弱电强磁现象对电网运行的影响, 另一方面需要采取积极措施严防误动的发生, 保证系统的安全稳定运行。同时, 研究弱电强磁联系的双回线中的整体保护方案也显得尤为迫切。

参考文献

- [1] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1996.
GE Yao-zhong. New types of protective relaying and fault location: their theory and techniques[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1996.
- [2] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
ZHU Sheng-shi. Principle and technology of high voltage networks protection[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2005.
- [3] 国家电力调度通信中心. 电力系统继电保护实用技术问答[M]. 2版. 北京: 中国电力出版社, 2004.
State Electric Power dispatching & communication center. questions and answers for the practical technology of relay protection in electric power system[M]. 2nd ed. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [4] 曾耿晖, 黄明辉, 刘之尧. 同杆线路纵联零序保护误动分析及措施[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(20): 103-107.
ZENG Geng-hui, HUANG Ming-hui, LIU Zhi-yao. Analysis and counter measures of misoperation of zero sequence pilot protection on circuit lines of same pole[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(20): 103-107.
- [5] 史亚南, 李志建. 110 kV 平行线路零序互感对零序保护的影响分析[J]. 内蒙古电力技术, 2006, 24(2): 15-17.
SHI Ya-nan, LI Zhi-jian. Analysis on influence of zero-sequence mutual induction on zero-sequence protection in 110 kV parallel lines[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2006, 24(2): 15-17.
- [6] 郭润生, 何彩虹, 鄧建杰. 相邻线路零序互感对线路零序纵联方向保护的影响[J]. 继电器, 2004, 32(9): 71-73.
GUO Run-sheng, HE Cai-hong, ZHI Jian-jie. Affect of zero pilot protection in zero mutual inductance of border upon circuit[J]. Relay, 2004, 32(9): 71-73.
- [7] 康小宁, 梁振锋, 索南加乐. 相邻线路零序互感对平行双回线电流平衡保护的影响及改进措施[J]. 继电器, 2005, 33(20): 1-4.
KANG Xiao-ning, LIANG Zhen-feng, SUONAN Jia-le. Influence of zero-sequence mutual inductance to transverse differential current protection and approaches to the improved measures[J]. Relay, 2005, 33(20): 1-4.
- [8] 李一泉, 焦邵麟, 张弛. 平行线路纵联零序方向保护安全性分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(6): 104-107.
LI Yi-quan, JIAO Shao-lin, ZHANG Chi. Safety analysis on pilot zero sequence direction relay applied in parallel line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(6): 104-107.
- [9] 陈少华, 梁志雄, 孙何洪. 电力网超高压平行双回线路弱电强磁现象仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(22): 1-7.
CHEN Shao-hua, LIANG Zhi-xiong, SUN He-hong. Simulation and research of weak current and strong magnetic phenomenon in EHV parallel double lines[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(22): 1-7.
- [10] 樊占峰, 叶东印, 李瑞生. 平行线弱电强磁模型下零序方向元件改进[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(17): 100-103.
FAN Zhan-feng, YE Dong-yin, LI Rui-sheng. Improvement of zero-sequence directional relay for the parallel line with magnetically strong and electrically weak connection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(17): 100-103.
- [11] 索南加乐, 孟祥来, 陈勇, 等. 基于故障类型的零序方向元件[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(1): 25-30.
SUONAN Jia-le, MENG Xiang-lai, CHEN Yong, et al. A novel zero sequence directional element based on fault type[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(1): 25-30.

收稿日期: 2009-10-21; 修回日期: 2010-03-03

作者简介:

宋国兵 (1972-), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事输电线路的继电保护研究; E-mail: song.gb@mail.xjtu.edu.cn

刘志良 (1984-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为同杆并架双回线的距离保护;

索南加乐 (1960-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统继电保护的研究。