

杂散电容对二次回路的影响及防范措施

汤磊^{1,2}, 高厚磊¹, 苏文博³, 解晓东⁴

(1. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061; 2. 山东青岛供电公司, 山东 青岛 266002;
3. 山东电力研究院, 山东 济南 250002; 4. 山东临沂供电公司, 山东 临沂 276003)

摘要: 通过对变电站的无故障跳闸事故的调查分析, 总结出变电站杂散电容对二次回路影响的一般规律。画出典型中间继电器跳闸回路的 RC 等效电路, 根据现场试验测量数据, 分析变电站的直流系统正负极接地故障、二次回路接地故障以及交直流混联故障; 仿真出在各种故障情况下, 中间继电器两端电压的暂态过程和动作情况。针对继电器的动作过程, 提出减小二次回路杂散电容值和提高中间继电器动作可靠性的防范措施。

关键词: 杂散电容; 二次回路; 中间继电器; 直流接地; 交直流混联

Influence of stray capacitance on secondary circuit and its countermeasures

TANG Lei^{1,2}, GAO Hou-lei¹, SU Wen-bo³, XIE Xiao-dong⁴

(1. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China; 2. Shandong Qingdao Power Supply Company, Qingdao 266002, China; 3. Shandong Electric Power Academe, Jinan 250002, China; 4. Shandong Linyi Power Supply Company, Linyi 276003, China)

Abstract: The general rule of the influence of substations' stray capacitance on secondary circuit is summarized by analyzing the trip accidents without any fault in substations. According to the RC equivalent circuit of auxiliary relay trip and the field-testing and measuring data, the DC system grounding fault, secondary circuit grounding fault and DC-AC hybrid fault are analyzed. The transient voltage and action situation of auxiliary relay are simulated in every fault. Aiming at the action process, the countermeasures of reducing the secondary circuit stray capacitance and improving the reliability of auxiliary relay are proposed.

Key words: stray capacitance; secondary circuit; auxiliary relay; DC system grounding; DC-AC hybrid

中图分类号: TM53 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)22-0206-04

0 引言

变电站二次回路处在一个强电磁环境中, 工频电流、电压和雷电、系统短路故障、开关操作、雷电侵扰等各种干扰信号可通过杂散电容进入二次回路, 不可避免地影响二次回路的正常工作。已有不少发电厂、变电站已经出现过若干次在设备一次系统无故障、保护未动作、监控没有操作的情况下开关跳闸事故, 严重影响了电力系统的安全可靠运行。例如, 500 kV聊城站2004年发生三次多台开关误跳导致全站停电事故, 对电网构成严重威胁^[1]。

1 变电站开关偷跳事故分析

500 kV聊城站事故中, 偷跳的开关绝大多数是双母线接线的母联开关或3/2接线串中的中间开关, 这是因为这两类开关的回路数比其他开关多, 且启

动跳闸的电缆较长, 实测二次回路杂散电容较大(117~236 nF)。事件记录中未见保护动作信号, 跳闸前后都伴有异常的信号(直流接地)发生。偷跳的出口中间继电器的动作电压为120~144 V, 动作电流为3.1~13.0 mA, 动作功率为0.39~1.87 W, 动作时间为4~6 ms, 动作功率及动作电流较低。

图1为典型中间继电器跳闸回路, RTJ为操作箱跳闸出口中间继电器; 101、102为分别接直流电源的正极与负极; C_1 、 C_2 、 C_3 分别为直流正极、负极、长电缆芯线对地的等值杂散电容。

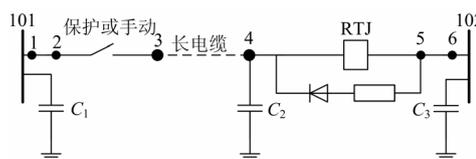


图1 带杂散电容的开关跳闸回路
Fig.1 Trip circuit with stray capacitance

正常工况下, 图1中触点4为多个跳闸回路的汇聚点, 且会有较多的长电缆接入, 因此触点4往往就会有较大的干扰信号(例如交流信号)。启动跳母联开关及3/2接线串中间开关的保护, 除有关线路保护之外, 还有变压器保护或发变组保护。从而导致接入跳闸中间继电器(操作箱)的电缆较多且较长, 使触点4对地的电容很大, 由动力电缆来的干扰信号也大。当出口跳闸中间继电器动作功率小时, 杂散电容为干扰信号提供通道, 直接跨过触点起跳中间继电器而造成开关偷跳。因此, 在一定情况下杂散电容过大是导致变电站无故障跳闸的直接原因。

2 直流二次回路接地故障

直流二次回路接地和交直流混联故障主要发生在直流系统正负极以及长电缆上。

直流二次回路接地或交直流混联时, 图1的等效电路如图2所示。 R_1 为直流正极对干扰点等效电阻, R_2 为长电缆的等效电阻, R_3 为中间继电器RTJ的等效电阻, R_4 为RTJ至直流负极等效电阻, R_5 为直流220 V电源等效内阻, R_6 、 R_7 为直流220 V电源绝缘监察电阻, R_3 、 R_6 、 R_7 要远大于 R_1 、 R_2 、 R_4 、 R_5 。由于直流系统正负极所接电缆很多, C_1 、 C_3 可能大于 C_2 。直流二次回路故障时主要表现为电压的变化, 因此图2中可不用考虑回路电感的作用。

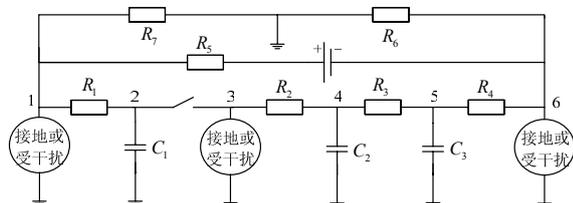


图2 二次回路等效电路

Fig.2 Equivalent circuit of secondary circuit

正常工况下, 由于直流绝缘监察电阻的存在, 直流正极对地电压为+110 V, 负极对地电压为-110 V, 即在接地零时刻, 触点1、2、3、4、5、6的电压为 $U_1=U_2=+110$ V, $U_3=U_4=U_5=U_6=-110$ V, 中间继电器RTJ两端的电压 $U_{45}=0$ V。对于图3所示电路, 直流系统220 V正、负极接地为简单的直流激励下的零状态响应。当加在继电器两端电压 U_{45} 达到了继电器动作的条件时, 继电器动作。

2.1 直流二次回路正极接地故障

图2中, 正极接地稳态后, $U_1=U_2=0$ V, 正负极压差为220 V, 即 $U_3=U_4=U_5=U_6=-220$ V, $U_{45}=0$ V。根据500 kV聊城站测量数据, R_3 约为30 k Ω , 远大于 R_4 、 R_5 , 杂散电容 C_3 、 C_2 分别为236 nF、

174 nF, 则 $(R_3+R_4+R_5)C_2 \gg (R_4+R_5)C_3$, 即 C_2 通过 R_3 、 R_4 、 R_5 向接地点充放电的速度远大于 C_3 通过 R_4 、 R_5 向接地点充放电的速度, 即 U_4 的衰减远慢于 U_5 的衰减。

$$U_4 = -110 - 110(1 - e^{-\frac{t}{(R_3+R_4+R_5)C_2}}) \quad (1)$$

$$U_5 = -110 - 110(1 - e^{-\frac{t}{(R_4+R_5)C_3}}) \quad (2)$$

$$U_{45} = -110(e^{-\frac{t}{(R_4+R_5)C_3}} - e^{-\frac{t}{(R_3+R_4+R_5)C_2}}) \quad (3)$$

根据现场实测数据对直流二次回路正极接地进行仿真计算, 结果如图3所示。继电器两端电压先上升, 其上升速度取决于 U_4 、 U_5 的衰减速度, U_4 衰减越慢、 U_5 衰减越快, 则 U_{45} 的顶值电压 U_M 越高, 电压维持时间越长, 当电压达到继电器动作条件时, 继电器便会动作。图3中电压最大值不会超过110 V, 即当继电器的动作电压在110 V以下时, 继电器会动作, 造成跳闸事故。

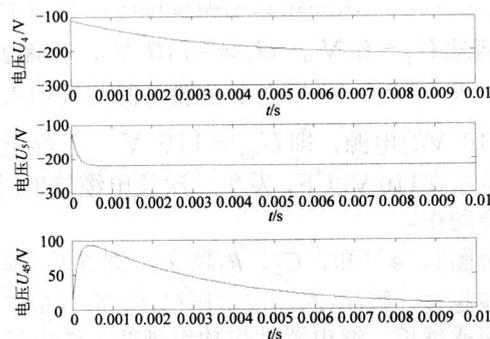


图3 直流正极接地暂态过程仿真

Fig.3 Transient process simulation for grounding fault of positive polar of DC source

2.2 直流二次回路负极接地故障

图2中, 负极接地稳态后, $U_1=U_2=+220$ V, $U_3=U_4=U_5=U_6=0$ V, $U_{45}=0$ V。 R_3 远大于 R_4 , C_3 与 C_2 相差不多, 则 $(R_3+R_4)C_2 \gg R_4C_3$, 即 C_2 通过 R_3 、 R_4 向接地点放电的速度远大于 C_3 通过 R_4 向接地点放电的速度, 即 U_4 的衰减远慢于 U_5 的衰减。RTJ两端电压为

$$U_{45} = -110(e^{-\frac{t}{(R_3+R_4)C_2}} - e^{-\frac{t}{R_4C_3}}) \quad (4)$$

根据现场实测数据对直流负极接地进行仿真计算, 结果如图4所示。与直流正极接地一样, 直流负极接地时 U_{45} 顶值电压 U_M 不会超过110 V。但直流负极接地时 U_{45} 为负值, 即在继电器两端所加电

压为负值，而继电器两端一般会并有续流二极管使电压不会作用在继电器上，且由于直流继电器的极性，所以单纯的直流负极接地不能使继电器动作。

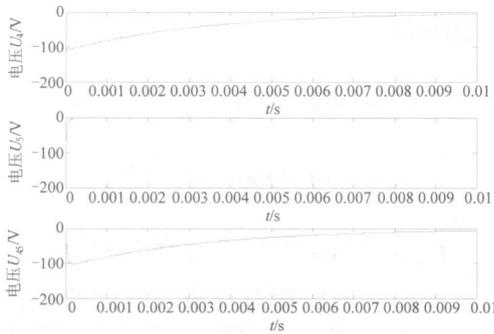


图4 直流负极接地暂态过程仿真

Fig.4 Transient process simulation for grounding fault of negative polar of DC source

2.3 二次回路长电缆接地故障

二次回路中，与中间继电器相连的电缆一般很长，并有多根接入，因此常会有接地故障以及干扰信号的侵入。二次回路长电缆接地时，相当于在继电器两端 $U_3 = 0 \text{ V}$ ， $U_6 = -110 \text{ V}$ ，而图2中 R_3 远大于 R_2 、 R_4 ，即相当于在继电器两端加入一个直流110 V的电源，即 $U_{45} = 110 \text{ V}$ 。当继电器的动作电压在110 V以下，发生二次长电缆接地时，继电器会动作。

由图3、4可知， C_2 、 R_3 越大，则 R_3C_2 越大， U_4 衰减越慢，则 U_{45} 的顶值电压 U_M 越高。 U_{45} 电压维持时间就越长，继电器动作功率越低，继电器越容易动作。因此，杂散电容过大、继电器动作功率低、继电器动作快是直流接地时造成继电器动作的主要因素。

500 kV聊城站现场实测RTJ的动作电压在120~144 V之间，上述直流接地故障时RTJ动作的可能性不大，但在下列情况下RTJ仍有可能动作：

(1) 直流系统不平衡，当直流负极电压大于-110 V时，直流正极接地时会造成继电器动作；当直流负极电压接近0 V时，直流正极接地时 U_{45} 的顶值电压 U_M 可能接近220 V，造成继电器动作。

(2) 有的光耦回路带稳压管，正常工况下， U_4 电压不能被钳制在-110V，而是为0 V，正极接地时， U_{45} 顶值电压可能接近220 V，大于光耦动作电压^[2]。

(3) 实际运行中的直流电源电压维持在230~240 V之间，直流正极接地故障会造成继电器动作。

此外，直流一点接地后，如果再发生另一处接地或多点接地时，可能造成继电器的动作。

3 直流二次回路与交流混联

直流系统220 V与交流混联时，其暂态分析可同直流接地情况，只是在交流电压作用下，继电器两端电压为其电阻与杂散电容的分压。考虑到 R_3 远大于 $(R_4 + R_5 + R_1)$ ，可将图2简化为图5。

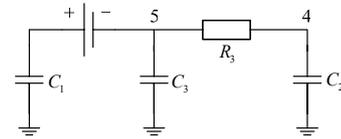


图5 交直流混联等效电路

Fig.5 Equivalent circuit for DC connecting to AC system

3.1 直流系统与交流 220 V 混联

在直流正极与交流220 V火线混联时，交流220 V的零线电压接近0 V，与大地电位相当，可采用叠加原理对图5进行分析。当只考虑交流220 V单独作用时，故障后继电器两端的交流电压为

$$U_{45ac} = 220\sqrt{2}K_{R3} \sin(\omega t + \theta) \quad (5)$$

式(5)中： $\omega = 314 \text{ rad/s}$ ， $K_{R3} = R_3 / \sqrt{R_3^2 + (1/\omega C_2)^2}$ ， θ 为电阻分压的初始角。当只考虑混联瞬间直流源的作用时，即为直流系统正极接地，此时电压 U_{45} 即为式(3)。将式(5)与式(3)相加得到

$$U_{45} = 220\sqrt{2}K_{R3} \sin(\omega t + \theta) - 110(e^{-\frac{t}{(R_3+R_4+R_5)C_3}} - e^{-\frac{t}{(R_4+R_5)C_3}}) \quad (6)$$

由式(6)可以看出，稳态后直流作用完全消失，仅剩下交流作用，即式(5)单独作用。因此， R_3 越大， C_2 越大，则 U_{45} 越大，继电器动作功率越低，继电器越容易动作。

根据聊城站现场实测数据，得到直流正极与交流220 V混联的仿真图6，图6(a)为暂态过程，图6(b)为稳态过程。 U_{45} 的初始电压与故障初始角有关，稳态后 U_{45} 的值即为交流回路分压值。考虑到工频交流电压半波周期为10 ms，其维持继电器动作的时间不会超过10 ms，中间继电器的动作时间一般仅为4~6 ms，因此，此类事故完全能造成继电器误动，且动作频率为50 Hz。

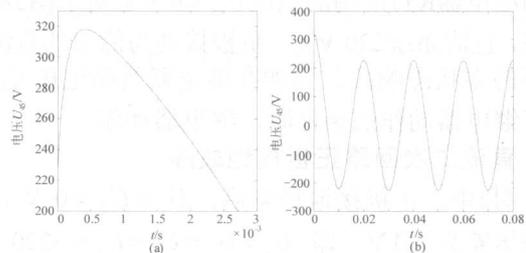


图6 直流正极与交流220 V混联时 U_{45} 的波形

Fig.6 Waveform of U_{45} when DC positive polar connects to AC 220 V system

同理, 直流负极与交流混联时, 继电器两端电压为

$$U_{45} = 110(e^{-\frac{t}{(R_3+R_4)C_3}} - e^{-\frac{t}{R_4C_3}}) + 220\sqrt{2}K_{R_3} \sin(\omega t + \theta) \quad (7)$$

与直流系统正极与火线混联一样, 负极与交流 220 V混联时, 继电器动作且其动作频率为 50 Hz。

3.2 交流混入直流控制回路

操作箱的三相跳闸触点一般有多路跳闸信号并联注入, 若其中某一长线电缆串入交流信号, 则将与直流负极构成回路。正常工况下, 图 5 中 $U_5 = -110 \text{ V}$, 若在触点 4 加入交流电压, 相当于在继电器两端加入交流信号与直流 110 V 迭加, 迭加电压达到继电器动作电压时, 继电器便可动作。二次回路长电缆与交流 220 V 混联时, 故障情况最恶劣, 不但能导致继电器故障而且会烧坏设备。

交直流混联要比直直接地严重得多, 若继电器动作功率较低, 一般都会导致继电器动作。而引入交流干扰信号的一般是变电站存在的杂散电容。

4 防范措施

由以上分析不难看出, 当直流系统故障时, 引起开关误动的两大因素为: 二次回路杂散电容值大小和继电器动作值大小。因此, 防止二次回路接地故障及交直流混联故障, 主要是从干扰的入侵途径和提高二次回路自身可靠性等方面考虑。

4.1 减小二次回路杂散电容

杂散电容与所处环境的温度、湿度、电缆敷设路径、电缆芯线以及现场的电介质有关, 在导线长度远大于导线直径的情况下, 两平行导线间杂散电容有公式 (8):

$$C = \pi \epsilon l \ln \frac{a}{2d} \quad (8)$$

式 (8) 中: C 为线间电容; l 为导线长; d 为线间距离; a 为导体直径; ϵ 为介电常数。杂散电容与导线长度、介电常数及导体直径成正比, 而与导线间的距离成反比。变电站湿度越大, 介电常数越大, 杂散电容就越大, 因此阴雨天二次回路易受干扰。

通过增大干扰源与二次回路之间的距离, 减少二次电缆的长度, 优化电缆的敷设路径, 可有效减小二次回路的杂散电容。由于 $C = \epsilon S/d$, 所以减小接触面的面积, 也可以减小杂散电容, 而减小接触面积就是要使一二次导线不要平行走线以及减少二次电缆的长度。当二次电缆较长杂散电容较大时, 可采用光纤进行跳合闸信号的传输。

同时还应采用双屏蔽电缆, 外屏蔽层两端接地, 内屏蔽层单端接地, 可有效减小电缆芯线对地的杂散电容, 同时还可有效抑制电场容性耦合干扰及磁场容性耦合干扰^[3]。

4.2 提高中间继电器的动作可靠性

如图 7 所示, 一般的操作箱出口中间继电器动作回路由 RTJ1~RTJ4 四个 24 V 继电器和一个电阻 R_8 串联而成。对此回路进行直流电压试验得到继电器动作回路的动作电压为 125 V, 动作电流为 5.83 mA, 动作时间为 5 ms, 动作功率为 0.73 W。动作电流及动作功率很小, 极易受到外部干扰的影响。

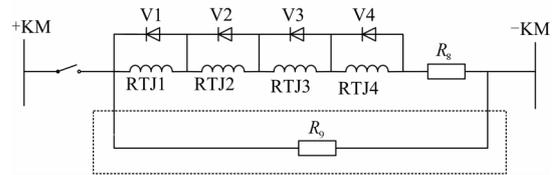


图7 出口中间继电器内部电路

Fig.7 Inside circuit of auxiliary relay

若在原继电器跳闸回路中并联一个电阻 R_9 , 可有效提高整个继电器跳闸回路的动作电流和动作功率。若取 $R_9 = 2.4 \text{ k}\Omega$, 则动作电流提高为 58.89 mA, 动作功率提高为 7.4 W。由于并联电阻 R_9 的存在, 整个继电器动作回路的动作电流和动作功率均为原来的 10 倍, 有效提高中间继电器的动作值; 并联电阻 R_9 也使得整个图 2 中 RTJ 的等效电阻 R_3 变小, 有效减小接地故障时电压 U_{45} 和交直流混联的电阻分压 U_{45ac} , 从而减小继电器动作的可能。

由直直接地故障分析可知, 直流接地的最坏情况是继电器两端的电压为 110 V, 所以保护装置出口继电器及断路器的跳闸线圈的动作电压不得小于直流额定电压的 55%^[4]。此外还应保证二次回路对地绝缘良好, 例如不采用电缆备用芯两端同时接地, 不采用交直流共用电缆等方法作为抗干扰措施^[5]。

5 结论

当二次回路发生接地故障和交直流混联故障时, 二次回路便会与杂散电容构成回路, 形成一系列充放电、交流分压过程, 当达到继电器动作条件时便会动作。故障时继电器动作情况与杂散电容值和继电器动作值有关, 接地故障不易引起误动, 交直流混联极易引起误动。防范措施应主要从减小杂散电容和提高二次回路可靠性两个方面考虑。

(下转第 213 页 continued on page 213)

- 出版社, 1991.
ZHUO Le-you. Electric design manual[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1991.
- [2] 夏红光. 110 kV 综合自动化变电站蓄电池容量的计算[J]. 继电器, 2004, 32 (18): 64-66.
XIA Hong-guang. Capacity calculation of storage battery in 110 kV integrated automation substation[J]. Relay, 2004, 32 (18): 64-66.
- [3] 王振动, 徐礼达. 110 kV 变电站蓄电池容量的选择[J]. 人民长江, 2007, 38 (5): 90-91.
- [4] 张殿科, 赵树海. 蓄电池在线监测仪的研制与应用[J]. 电力系统自动化, 2002, 26 (9): 80-81.
ZHANG Dian-ke, ZHAO Shu-hai. Research and application of storage battery on-line monitor[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26 (9): 80-81.
- [5] 黄海宏, 王海欣, 等. 二次放电在线检测蓄电池内阻[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (15): 93-97.
HUANG Hai-hong, WANG Hai-xin, et al. Storage battery internal resistance on-line monitor with secondary discharge[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (15): 93-97.
- [6] 刘百震. 蓄电池组容量选择的计算方法[J]. 电力建设, 1989(6).
- [7] 鲍慧. 蓄电池运行检测与诊断系统[J]. 电力系统自动化, 2002, 26 (14): 70-72.
BAO Hui. Monitoring and diagnosing system of storage battery[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26 (14): 70-72.
- [8] 国家电力公司电力规划设计总院. 阀控式密封铅酸蓄电池资料汇编[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
Electric Power Programming and Design Academy of the State Power. The information compilation of the VRLA battery[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2001.
- [9] 董明, 魏秉政. 变电站直流系统运行现状及存在问题分析[J]. 继电器, 2006, 34 (3): 87-89.
DONG Ming, WEI Bing-zheng. Analysis of status and questions of DC power source in substation[J]. Relay, 2006, 34 (3): 87-89.
- [10] 郑宇. 220 kV 变电站直流系统改造实例及问题的处理[J]. 继电器, 2001, 29 (12): 58-59.
ZHENG Yu. Innovation on DC system of 220 kV substation[J]. Relay, 2001, 29 (12): 58-59.
- [11] 鲍玉川. 变电站直流系统设计及运行中需注意的几个问题[J]. 继电器, 1999, 27 (4): 61-62, 70.
BAO Yu-chuan. Some questions to be considered in design and operation on substation's DC system[J]. Relay, 1999, 27 (4): 61-62, 70.

收稿日期: 2009-11-16; 修回日期: 2010-01-25

作者简介:

田羽(1979-), 女, 工程师, 硕士, 从事继电保护研究和变电站设计; E-mail: tytjoy@163.com

何仲(1973-), 男, 高级工程师, 本科, 从事变电站设计;

范春菊(1967-), 女, 副教授, 博士, 研究方向为继电保护和配电自动化。

(上接第 209 页 continued from page 209)

参考文献

- [1] 汤建红, 苏文博, 潘向华. 500 kV 变电站开关无故障跳闸事故分析[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(12): 77-79.
TANG Jian-hong, SU Wen-bo, PAN Xiang-hua. Research of non-fault trip accident in 500 kV substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(12): 77-79.
- [2] 李刚, 刘平, 孙集伟, 等. 变电站及电厂直流系统二次回路干扰分析[J]. 华北电力技术, 2007 (9): 37-39.
LI Gang, LIU Ping, SUN Ji-wei, et al. Analysis of secondary circuit interference of DC system in substation and power plant[J]. North China Electric Power, 2007(9): 37-39.
- [3] 刘帆, 陈伯超, 卞利钢. 变电站二次电缆屏蔽层接地方式探讨[J]. 电网技术, 2003, 27(2): 63-67.
LIU Fan, CHEN Bai-chao, BIAN Li-gang. Discussion on shielded grounding mode of cables in secondary circuits of substations[J]. Power System Technology, 2003, 27(2): 63-67.
- [4] 国家电力调度通信中心. 电力系统继电保护典型事故分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
National Electric Power Dispatching and Communication Center. Typical accidents analysis of power system protection[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2001.
- [5] 江苏省电力公司. 电力系统继电保护原理与实用技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
Jiangsu Electrical Power Company. Power system protection principle and practical technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2006.

收稿日期: 2009-11-09; 修回日期: 2010-06-30

作者简介:

汤磊(1984-), 男, 硕士, 主要从事电力系统继电保护方面的研究, E-mail: tanglei1020@126.com

高厚磊(1963-), 男, 教授, 主要从事电力系统继电保护方面的教学和研究;

苏文博(1959-), 男, 高工, 主要从事机组并网运行、继电保护运行和科研工作。