

# 小电阻接地系统间歇性接地故障的动态增量判据及保护方案

贺兴<sup>1</sup>, 艾芊<sup>1</sup>, 章健<sup>2</sup>

(1. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240; 2. 上海市电力公司市区供电公司, 上海 200080)

**摘要:** 为准确识别小电阻接地系统间歇性接地故障, 以该故障实际案例为例进行研究, 分析了故障发生时传统反时限及三段保护无法正确动作的原因及该故障可能引发的严重后果。进一步对该故障进行仿真, 结果表明间歇性单相接地故障的故障电流有效值不高且持续时间短, 即具有冲击性及间歇性。针对该特点, 提出一种相应的电流动态增量判据, 并结合微机系统设计故障的保护方案逻辑流程, 形成微机系统动态增量保护方法。该方法可对间歇性单相接地故障的准确识别进而进行保护, 提高小电阻接地系统运行的可靠性。

**关键词:** 小电阻接地系统; 接地故障; 间歇性; 零序电流保护; 动态增量判据

## Study on the protection measures based on dynamic increment criterion for the intermittent earth fault in the distribution network

HE Xing<sup>1</sup>, AI Qian<sup>1</sup>, ZHANG Jian<sup>2</sup>

(1. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;  
2. Urban Power Supply Company, SMEPC, Shanghai 200080, China)

**Abstract:** When the single phase intermittent earth fault occurs, it is instantaneous and the ground current is small, which make the fault difficult to be identified. This paper analyzes the reason that the traditional inverse-time overcurrent protection and even three-section current protection can not operate correctly and the possible severe consequences caused by the fault. This paper analyses the circuit caused by the fault by both simulation and record of the fault disturbance recorder. Then, a solution combined the "dynamic increment" criterion based on the characteristics of the circuit and the energy management system is presented to identify and clear the fault. The solution improves the reliability of the power system with neutral grounding via low resistance.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51077092).

**Key words:** low resistance grounding network; earth fault; intermittent; zero-sequence current protection; dynamic increment criterion

中图分类号: TM77      文献标识码: A      文章编号: 1674-3415(2014)11-0067-06

## 0 引言

以电缆为主的城市(如北京、上海、广州等)配电网中, 中性点经小电阻的接地方式得到了广泛应用<sup>[1-3]</sup>。近年来, 在配电网实际运行中发生了多起间歇性接地故障, 部分故障导致中性点接地电阻烧毁、中性点电流互感器(CT)损坏甚至全站停电的严重事故<sup>[4-8]</sup>。在中性点经小电阻接地的系统中, 当线路发生间歇性接地故障时, 由于接地电流较小, 并且具有瞬时性的特点, 造成出线零序电流保护不动作,

不能切除故障线路, 使配电网长期处于异常运行状态。有分析显示<sup>[9-12]</sup>: 如不能正确检测出电阻故障, 在电阻长期工作发热后, 将丧失热稳定性而致使阻值升高, 甚至会出现电阻或 CT 烧毁, 造成保护动作。在多段或分段母线系统中, 分段断路器自切合闸后后加速保护由于故障的间歇性也不会动作, 这将会使故障扩大进而引起全站停电的重大事故。

关于小电阻接地方式的保护及整定方面, 专家学者做了大量的研究, 并提出了一系列的方案<sup>[13-23]</sup>: 文献[13-14]讨论了小电阻接地系统的应用及出现的问题; 文献[15-16]就间歇性弧光过电压的问题进行分析; 文献[17-18]重点对事故进行了仿真; 文献[19-23]分别从选线、保护、检测等方面提出了一些可行的保护措施。

**基金项目:** 国家科技支撑计划课题(2013BAA01B04); 国网公司 2012 年科技项目“以电网低碳化为特征的智能电网综合集成技术研究与示范”资助项目

目前，对于间歇性接地故障，速断保护配合自适应系统诊断方案存在改造难度大、设备灵敏度和逻辑复杂等问题；反时限保护对故障电流持续时间有要求，时间阈值难以整定。两者均不能做出很好的诊断。

### 1 故障分析及事故案例

在实际运行中，电缆接头可能存在一定的故障，电缆受潮或进水等使得电缆绝缘性降低。同时，由于降雨等可能引发地下积水，绝缘性不良的电缆与水接触后将造成短路。短路电流形成后短时间内，电缆将会因应力迅速弹起与水隔离，短路电流消失。电缆继续处在不安全运行状态，随着水位的变化等因素短路故障可能再度发生，造成接地故障间歇性出现。图 1 所示为实际运行中，间歇性接地故障致使电缆变形及绝缘烧穿。



图 1 间歇性接地故障现象

Fig. 1 Intermittent earth fault with damaged XLPE power electric cable

间歇性单相接地故障表现形式为流过中性点电阻的零序异常电流的间歇性出现。在中性点经小电阻接地系统中，当间歇性单相接地故障发生时，其中性点接地电阻零序异常电流一般为几百安，可躲过电流速断保护(动作条件：1 000 A 以上)；其间歇性的特点又使得故障可躲过定时限保护(动作条件：几百安培，持续数秒)。间歇性故障电流反复多次出现直至中性点电阻烧毁。

以某变电站 K 为例，K 站主接线图如图 2 所示。

K 站初始运行状态如图 2 所示，K7 发生间歇性接地故障。其故障电流在一段时间内间断性的如  $I_{F1}$  所示线路流经 K7 线路和 2#主变压器中性点接地电阻，该异常电流不能达到 K7 线路保护和 2#主变压器零序保护整定阈值，反复多次最终导致 2#主变压器中性点接地电阻或 CT 异常，进而导致 2#主变压器零序电流保护动作，2#主变压器高低压侧断路器跳闸，使得 2#主变压器停役，二段母线失压，分段断路器自切动作合闸；随后，由于间歇性接地故障仍未排除，故障电流将如  $I_{F2}$  所示线路流经 K7 线路、分段断路器和 1#主变压器中性点接地电阻，该异常电流仍不能达到 K7 线路保护和 1#主变压器零序保

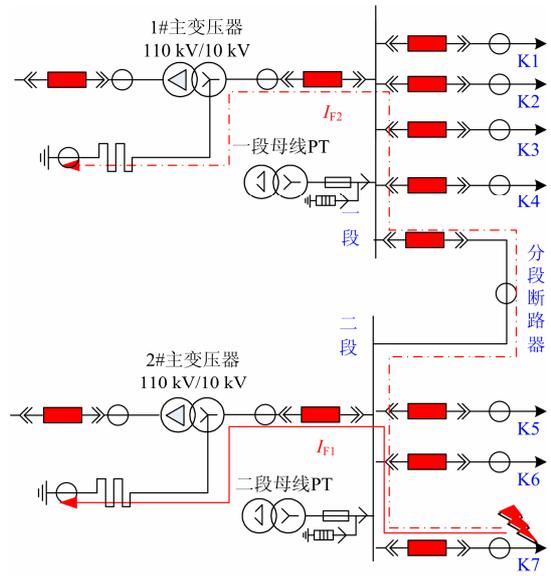


图 2 K 站电气主接线图

Fig. 2 Main electric connection of K substation

护整定阈值，而分段断路器自切合闸后后加速保护由于故障的间歇性也不会动作，继而造成 1#主变压器中性点接地电阻或 CT 异常，进而导致 1#主变压器零序电流保护动作，1#主变压器高低压侧断路器跳闸，使得 1#主变压器停役，最终造成全站停电。

经检查，此次事故中，出现电缆间歇性接地故障的 K7 线路保护始终未动作，2#主变压器和 1#主变压器的零序电流保护在事故中相继动作，设备故障时间顺序如表 1 所示。

表 1 故障后设备动作时间顺序

Table 1 Devices reaction for the fault

时间	事件
9:38 之前	10 kV 电缆三相合成零序故障电流为 300 A 左右
9:58	2#主变压器断路器跳闸
10:06	1#主变压器断路器跳闸

事故发生后，2#主变压器中性点接地电阻器在事故中经历了较严重的过电流，导致电阻片出现严重发热后的变色现象，同时支撑绝缘子出线不同程度的损伤。经检查，2#主变压器中性点 CT 已严重损坏。1#主变压器中性点接地电阻器在事故中也出现与 2#主变压器电阻器类似的情况，电阻片发热后严重变色，同时电阻器箱体外壳经过高温烘烤后油漆烧焦脱落，电阻器支撑绝缘子出现不同程度的损坏，但是电阻器本体未熔断，1#主变压器中性点 CT 靠电阻器侧烧焦，未出现开裂、环氧脱落现象，二次引线完全烧毁。同时，K7 的 10 kV 电缆在分线位置电缆绝缘烧穿，电缆芯体部分熔断。

从设备故障及保护动作情况分析, K7 的 10 kV 电缆接头存在一定的故障, 同时在经历了一晚的降雨后发生绝缘受潮现象, 并逐步引发电缆间歇性单相接地故障, 故障零序电流约为 300 A, 持续时间较短, 未达到线路零序电流保护和主变零序电流保护动作条件, 如表 2 所示。

表 2 K 站保护整定值

Table 2 Value and time settings of protection of K substation

No.	内容	整定电流/A	时间/s	保护动作
1	1#主变压器	500	4	1#主变压器
	零序电流			断路器跳闸
2	2#主变压器	500	4	2#主变压器
	零序电流			断路器跳闸
3	K7 零序电流	420	3	K7 线路断路器跳闸

## 2 间隙性接地故障的识别及保护

从故障录波仪记录数据来看, 中性点接地电阻器与 CT 至少经历了 20 min 的间歇性故障电流, 2#主变压器零序电流保护动作后, 1#主变压器中性点接地电阻器仍然流过较大的零序电流, 并最终导致 1#主变压器中性点接地电阻的 CT 过热烧毁, 电阻器本体经检查未受到明显损伤, 仅存在过热变色现象。

从事故分析可以看出, 间歇性故障未被快速识别进而切除是造成本次事故的主要原因。因此, 从变压器中性点电阻相关参数变化、故障电流的间歇性和持续性入手, 可以实现对 10 kV 小电阻接地系统间隙性接地的综合保护。

### 2.1 小电阻接地系统间歇性电流故障特性

以上述地底电缆发生间歇性短路故障为例, 假定电缆于 1 s 时受潮, 因应力于 0.05 s 后弹开, 随后于 1.2 s 及 1.7 s 又再度浸润于水中及被弹开, 用 PSCAD 仿真该过程得到结果如图 3 所示。其中, 绿线表示中性点接地电阻的故障电流, 蓝线表示接地电阻故障电流的有效值。

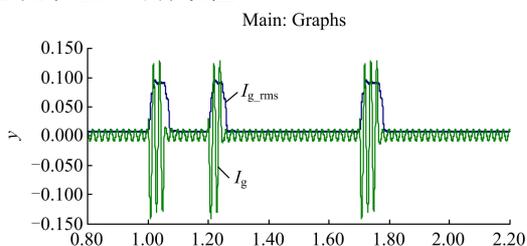


图 3 中性点小电阻故障电流波形及其有效值仿真

Fig. 3 Fault current and its RMS for low resistance in the neutral point

在实际运行数据中, 经小电阻接地的故障实际记录波形并未取到, 图 4 为经消弧线圈接地系统的故障录波仪波形记录。因电感器的原因, 故障恢复后故障电流会出现一个衰减的过程, 其波形如图 4 所示<sup>[24]</sup>。

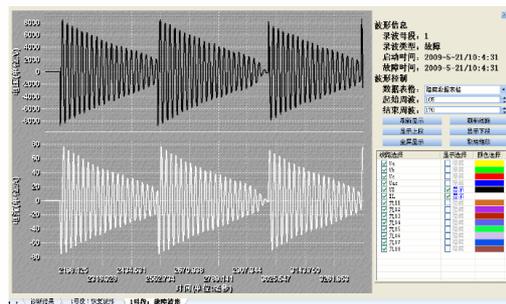


图 4 间歇性接地故障发生期间中性点电压波形及经消弧线圈的电流记录数据

Fig. 4 Record data of Fault voltage of the neutral point and the fault current through arc-suppression coils

由图 3、图 4 可知, 小电阻接地系统间歇性接地故障其主要特性为: 故障电流的有效值不高且持续时间短, 具有冲击性及间歇性。

由于其故障电流不能满足整定值要求, 系统零序电流保护不会动作, 其保护单元的门槛值将不断地触发、返回, 而故障电流和电压将一直存在于系统中。因此, 在针对间歇性故障时, 可针对其间歇性故障电流的冲击性和间歇性的特性来采取相应方案以实现对接发性故障的准确识别进而进行保护。

### 2.2 微机系统动态增量保护方法

配电网电缆故障主要采用反时限过电流保护和三段式电流保护中的过电流保护(阶梯时限原则整定的动作时间), 其特性不能很好地针对间歇性故障的现象进行保护。基于图 3 的仿真及图 4 的录波仪记录, 采用传统的电流/电压实时值不能进行很好的整定及判别, 如第 1 节事故案例所示, 按照系统实际运行中的保护整定不能触发对接发性故障的正确保护动作, 调整整定值则会因躲不开系统不平衡电流而引起保护误动作。经仿真及实际观察, 单相短路故障电流与负荷三相不平衡造成的零序电流相比其电流的冲击性及间歇性反复是非常明显的区分点。基于此, 本文提出了动态增量判据, 结合微机保护系统来对接发性故障进行正确识别并采取相应保护。

动态增量判据为瞬时电流电压的增加量是否突变, 利用单相短路瞬时冲击电流的特性捕捉其信号, 信息量为  $di/dt$  或  $dv/dt$ 。基于此, 设置  $K_{Impulse}$  及  $K_{Back}$

作为冲击及回落的阈值。以电流为例，对一个周波(0.02 s)进行 24 次采样，得到 24 个  $di/dt$  的值，如有 10 个高于  $K_{Impulse}$ ，即半个周波发生突变，则可判定此周波内出现了异常零序电流。为对故障进行识别及防止误跳，仅让系统进入报警状态，并不进行实际操作。

微机保护系统的逻辑流程如图 5 所示，如动态增量判据进入报警状态，系统仍继续运行，此时系统将记录接下来线路定时保护整定值内(如 2 s 共计 100 个周波)的电流动态增量信息。

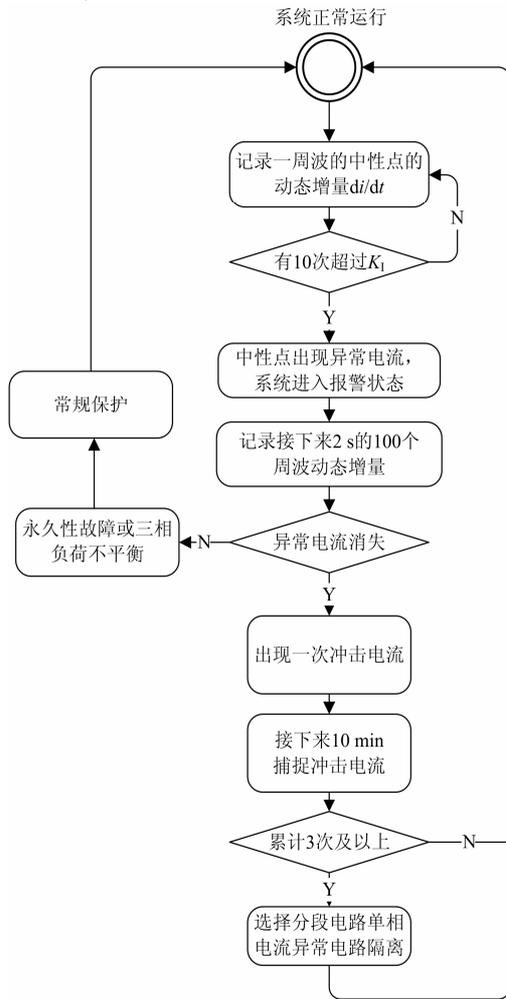


图 5 基于故障电流特性的动态增量保护判断逻辑

Fig. 5 Judgement logic of the dynamic-increment protection based on the characteristic of the fault current

1) 如短期内该异常零序电流消失(有 10 次低于  $K_{Back}$ )，则可认为该异常零序电流为冲击电流；如不消失，则可能是三相负荷不平衡或者永久性故障，采取常规的保护动作，故障切除后系统返回为正常运行状态。

2) 如判定该电流为冲击性电流时，对系统进行持续周期 15 min 的观测，每出现一次冲击电流计数一次。若在周期内未达到冲击次数，则报警返回；若出现冲击电流大于整定次数时，则启动间歇性保护。

3) 间歇性保护启动后，微机对所在线路电流进行采集筛选，并将异常电流线路隔离，保护动作跳闸。

而在基于故障电流特性的保护方案中，结合微机管理系统，参考其对系统运行状态的划分，设计相应逻辑及流程如图 6 所示。

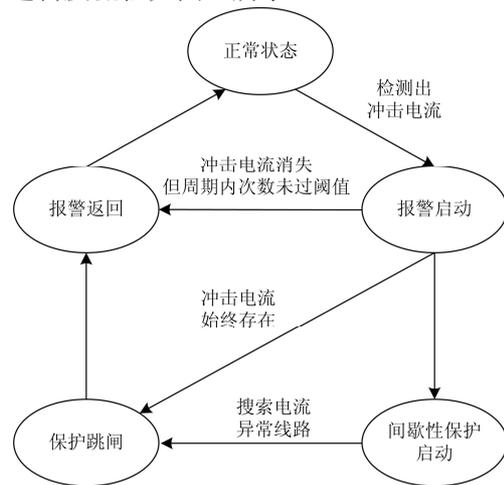


图 6 间歇性接地故障的系统微机保护系统示意图

Fig. 6 Micro-computer protection system for the intermittent earth fault

系统检测出冲击电流后系统启动报警，电网继续保持现运行状态。如判定为非间歇性接地故障，进行相应的常规保护跳闸，故障排除后返回正常状态；如判定是间歇性接地故障，则启动间歇性接地保护以保证故障不扩大，剩余的系统经检测正常则返回正常状态；如判定是瞬时故障，系统返回正常状态。

### 3 结论

本文针对间歇性故障电流有效值不大且具有冲击性和间歇性的特点，提出动态增量判据；并结合微机管理系统，提出一种新的保护方案对间歇性故障。该方案避开了间歇性故障在传统速断保护和反时限保护中其阈值及时间难以整定以捕捉到间歇性故障的问题，其涉及到的设备系统等在现有条件下改造较小。该保护方案提高了电网运行的可靠性，降低了因间歇性故障而造成的全站停电等重大事故的风险。

## 参考文献

- [1] 董雷, 何林, 蒲天骄. 中性点接地方式对配电网可靠性的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 96-101.  
DONG Lei, HE Lin, PU Tian-jiao. Effect of neutral grounding mode on reliability of distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 96-101.
- [2] 万善良. 城市配电网节能主要途径分析[J]. 供用电, 2008, 25(2): 5-7.  
WAN Shan-liang. Analysis on the major ways of the energy-saving in urban power distribution network[J]. Distribution & Utilization, 2008, 25(2): 5-7.
- [3] 王成山, 王赛一, 葛少云, 等. 中压配电网不同接线模式经济性和可靠性分析[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(24): 34-38.  
WANG Cheng-shan, WANG Sai-yi, GE Shao-yun, et al. Economy and reliability analysis of different connection modes in MV distribution systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(24): 34-38.
- [4] 童奕宾, 尤智文, 李姝. 小电阻接地系统间歇性弧光过电压分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(3): 116-120.  
TONG Yi-bin, YOU Zhi-wen, LI Shu. Analysis of intermittent arc overvoltage in low resistance grounded systems[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2012, 24(3): 116-120.
- [5] 金恩淑, 杨明芳, 李卫刚, 等. 基于 MODELS 的工频弧光接地过电压的仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(13): 24-28.  
JIN En-shu, YANG Ming-fang, LI Wei-gang, et al. Simulation of PF arc grounding over-voltage based on MODELS[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(13): 24-28.
- [6] 徐波, 张建文, 蔡旭, 等. 电网不对称条件下小电流接地系统接地相辨识[J]. 电工技术学报, 2011, 26(12): 175-182.  
XU Bo, ZHANG Jian-wen, CAI Xu, et al. Grounding phase determination in non-effective grounding systems in case of unsymmetrical voltage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(12): 175-182.
- [7] 董新洲, 王珺, 施慎行. 配电线路单相接地行波保护的原理与算法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 154-160.  
DONG Xin-zhou, WANG Jun, SHI Shen-xing. Principle and algorithm of traveling waves based single-phase-to-ground protection for distribution lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 154-160.
- [8] 曾祥君, 王媛媛, 李健, 等. 基于配电网柔性接地控制的故障消弧与馈线保护新原理[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(16): 137-142.  
ZENG Xiang-jun, WANG Yuan-yuan, LI Jian, et al. Novel principle of faults arc extinguishing & feeder protection based on flexible grounding control for distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16): 137-142.
- [9] 张海平, 何正友, 张钧. 基于量子神经网络和证据融合的小电流接地选线方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(12): 171-178.  
ZHANG Hai-ping, HE Zheng-you, ZHANG Jun. A fault line detection method for indirectly grounding power system based on quantum neural network and evidence fusion[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(12): 171-178.
- [10] 何志勤, 张哲, 尹项根, 等. 基于故障电压比较的广域后备保护新算法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(7): 274-283.  
HE Zhi-qin, ZHANG Zhe, YIN Xiang-gen, et al. A novel wide area backup protection algorithm based on fault voltage comparison[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(7): 274-283.
- [11] 要焕年, 曹梅月. 电缆网络的中性点接地方式问题[J]. 电网技术, 2003, 27(2): 84-89.  
YAO Huan-nian, CAO Mei-yue. On neutral grounding modes of cable network[J]. Power System Technology, 2003, 27(2): 84-89.
- [12] 刘明岩. 配电网中性点接地方式的选择[J]. 电网技术, 2004, 28(16): 86-89.  
LIU Ming-yan. Selection of neutral grounding modes in power distribution network[J]. Power System Technology, 2004, 28(16): 86-89.
- [13] 徐强超, 何铭宁, 林金洪. 广州 10 kV 电网中性点经小电阻接地的研究[J]. 继电器, 2007, 35(增刊1): 158-161.  
XU Qiang-chao, HE Ming-ning, LIN Jin-hong. Analysis of Guangzhou 10 kV power grid neutral low resistance grounding[J]. Relay, 2007, 35(S1): 158-161.
- [14] 付晓奇, 徐粮珍, 赵宝丽. 10 kV 配网中性点小电阻接

- 地技术与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(23): 227-230.
- FU Xiao-qi, XU Liang-zhen, ZHAO Bao-li. Discussion on the technology and application of 10 kV distribution network neutral grounding through small resistance[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(23): 227-230.
- [15] 陈筱平, 刘雅洁, 汪颖, 等. 某实际间歇性弧光接地事故仿真分析与对策研究[J]. 电力科学与工程, 2012, 28(9): 10-17.
- CHEN Xiao-ping, LIU Ya-jie, WANG Ying, et al. Intermittent arc grounding accident simulation analysis and solution research in one practical distribution system[J]. Electric Power Science and Engineering, 2012, 28(9): 10-17.
- [16] 王洪, 梁志强, 张忠民. 中性点非有效接地系统遇到的问题与对策[J]. 华北电力技术, 2011(8): 44-47.
- WANG Hong, LIANG Zhi-qiang, ZHANG Zhong-min. Problems and countermeasures of neutral point non-effectively grounded system[J]. North China Electric Power, 2011(8): 44-47.
- [17] 周恒逸, 毛柳明, 刘味果, 等. 配网小电阻系统单相接地故障模拟试验研究[J]. 湖南电力, 2012, 32(4): 13-16.
- ZHOU Heng-yi, MAO Liu-ming, LIU Wei-guo, et al. Simulation test study on single phase grounding fault for distribution network with low resistance neutral groundings[J]. Hunan Electric Power, 2012, 32(4): 13-16.
- [18] 许庆强, 许扬, 周栋骥, 等. 小电阻接地配电网线路保护单相高阻接地分析[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(9): 91-95.
- XU Qing-qiang, XU Yang, ZHOU Dong-ji, et al. Analysis of distribution network line relay protection during single-phase high-resistance grounding faults in low resistance neutral grounded system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(9): 91-95.
- [19] BIRKNER P. Field experience with a condition-based maintenance program of 20 kV XLPE distribution system using IRC-analysis[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19(1): 3-8.
- [20] 葛耀中, 杜兆强, 刘浩芳. 自适应速断保护的動作性能分析[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(18): 28-32.
- GE Yao-zhong, DU Zhao-qiang, LIU Hao-fang. Analysis on performance of the adaptive instantaneous trip protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(18): 28-32.
- [21] 薛永端, 冯祖仁, 徐丙垠, 等. 基于暂态零序电流比较的小电流接地选线研究[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(9): 48-53.
- XUE Yong-duan, FENG Zu-ren, XU Bing-yin, et al. Earth fault protection in non-solidly earthed network based on transient zero sequence current comparison[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(9): 48-53.
- [22] 薛永端, 吴敏, 王俊江, 等. 一种电压型配电网单相接地故障处理方法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(12): 68-71.
- XUE Yong-duan, WU Min, WANG Jun-jiang, et al. Single phase fault isolation based on voltage measurements in non-solid grounded distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(12): 68-71.
- [23] 严平欧. 深圳特区 10 kV 配电网中性点接地方式的探讨[J]. 高电压技术, 1996, 22(3): 22-24.
- YAN Ping-ou. Discussion on neutral-point earthing of 10 kV net in Shenzhen[J]. High Voltage Engineering, 1996, 22(3): 22-24.
- [24] 尤智文. 上海 10 kV 配网小电阻接地系统间歇性接地故障分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.

收稿日期: 2013-08-22; 修回日期: 2014-03-06

作者简介:

贺兴(1986-), 男, 通信作者, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统自动化技术、微电网及保护; E-mail: hexing\_hx@126.com

艾芊(1969-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电能质量、人工智能在电力系统中的应用、电力系统元件建模、微电网;

章健(1982-), 男, 硕士, 助理工程师, 从事设备运行工作。