

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2018.01.013

# 转移型消弧装置对线路首端断线故障 试验处理异常分析

程维欣<sup>1,2</sup>, 肖伸平<sup>1,2</sup>, 刘弘洋<sup>3</sup>, 李萍<sup>3</sup>, 冯兆<sup>3</sup>

(1. 湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007; 2. 电传动控制与智能装备湖南省重点实验室, 湖南 株洲 412007; 3. 长沙信长电力科技有限公司, 湖南 长沙 410000)

**摘要:** 针对故障转移消弧装置发生首端断线故障, 装置不能准确选相并可靠动作, 可能会进一步发生变电站相间短路故障的问题, 在某 10 kV 配电真型试验场进行了故障接地转移装置首端断线故障试验, 分析了配电网首端断线故障特征。试验结果表明, 线路首端断线故障与单相接地故障的母线电压变化有相似之处, 故障转移消弧装置仅利用中性点位移电压的变化和相电压的变化来判断是否发生单相接地故障是不可靠的, 装置会出现选相错误的现象, 应增加零序电流的判据条件加以限制。

**关键词:** 故障转移; 首端断线; 消弧装置; 选相判断; 配电真型试验场

**中图分类号:** TM475; TM773 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-9833(2018)01-0070-06

## Analysis of the Abnormal Treatment of the First End Line Failure Test by Using Transferring-Type Arc-Suppression Device

CHENG Weixin<sup>1, 2</sup>, XIAO Shenping<sup>1, 2</sup>, LIU Hongyang<sup>3</sup>, LI Ping<sup>3</sup>, FENG Zhao<sup>3</sup>

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;  
2. Key Laboratory for Electric Drive Control and Intelligent of Hunan Province, Zhuzhou Hunan 412007, China;  
3. Changsha Xinchang Power Technology Co., Ltd., Changsha 410000, China)

**Abstract:** In view of the potential failure at the first end line by using transferring-type arc-suppression device, which cannot accurately select the phase and act reliably, and may further cause the problem of inter-phase short circuit fault in the substation, the first end broken line fault test of the fault grounding transfer device has been carried out in a 10 kV distribution true test field, followed by an analysis of the fault characteristics of the first end of the distribution network. The test results show that the fault of the first end line is similar to the change of the busbar voltage of the single-phase grounding fault. The fault transfer arc suppression device only uses the change of neutral point displacement voltage and the change of phase voltage to judge whether a single-phase grounding fault occurs, which result is not reliable. The phase selection error will occur in this device, therefore, the criterion of the zero sequence current should be increased.

**收稿日期:** 2017-09-20

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(61672225), 科技部火炬计划基金资助项目(2015GH712901), 湖南省教育厅重点基金资助项目(14A038), 湖南省教育厅优秀青年基金资助项目(16B069), 湖南省自然科学省市联合基金资助项目(2017JJ4021)

**作者简介:** 程维欣(1991-), 女, 河南漯河人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为电力网络自动化技术及应用, E-mail: 2898808193@qq.com

**通信作者:** 肖伸平(1965-), 男, 湖南东安人, 湖南工业大学教授, 博士, 主要从事鲁棒控制, 智能控制及过程控制等方面的教学与研究, E-mail: xsph\_519@163.com

**Keywords:** fault transfer; disconnection fault; arc suppression device; phase selection; true-type distribution test field

## 0 引言

我国的配电网普遍采用中性点非有效接地方式, 因而单相接地的故障率较高, 据统计分析, 单相接地故障次数约占配电线路故障总次数的 80%<sup>[1]</sup>。单相接地故障发生后若不能及时进行熄弧处理, 可能会进一步发展为相间短路故障。实践证明, 绝大部分的相间短路故障是由单相接地故障发展而来的<sup>[1]</sup>, 所以当配电网发生单相接地故障时, 要尽快对单相接地故障进行处理。

近年来, 城市配电网的结构变化较大, 其电容电流迅速增大, 因此很难保证消弧线圈的可靠运行, 中性点经消弧线圈接地方式的一些问题日益突出。当配电网发生单相接地故障时, 故障点的接地电流包括电网的对地电容电流、谐波电流和阻性电流。当这些电流流经消弧线圈接地系统时, 消弧线圈的电感与系统线路对地电容会发生谐振, 从而抑制接地点电流的增大<sup>[2-3]</sup>。传统的消弧线圈只能补偿电容电流的基频无功分量, 无法对接地故障电流中的谐波及有功分量进行补偿<sup>[4-6]</sup>。而谐波和有功分量可导致单相接地故障快速发展为其他事故, 扩大对配电网供电可靠性和安全用电的影响<sup>[7]</sup>。

随着配电网的迅速发展, 中性点经故障转移消弧装置接地的方式得到了越来越广泛的应用。故障转移

消弧装置通过断线开关准确、快速地经接地相与接地网重复接地的方法, 采用转移故障电流、钳制故障点电压的原理进行灭弧、分流, 以解决现有不接地系统发生单相接地故障时的飞弧、过电压、人身触电、接地选相选线、故障定位、故障隔离等问题<sup>[8-10]</sup>。因故障转移型消弧装置采用转移故障电流到母线的方式进行灭弧, 故当发生首端断线故障时, 装置若不能准确选相并可靠动作, 可能会进一步发生变电站相间短路故障, 对变电站设备安全和工作人员人身安全造成危害<sup>[11-13]</sup>。

真型试验场是用真实架空线路、真实电缆线路和集中参数模拟线路模拟真实配电网的试验平台。其网络结构的电压要求与真实的配电网高度一致, 因而所得试验结果与真实配电网验证结果的吻合度较高。基于此, 本研究拟结合真型试验场首端断线试验结果, 分析线路首端断线后母线电压的变化, 以探讨接地装置选相错误及误动作的原因, 为接地装置避免选相错误提供参考依据。

## 1 首端断线试验

### 1.1 试验平台及环境

真型试验场测试系统的一次接线如图 1 所示, 该系统主要包括变电所子系统、线路子系统和故障模拟子系统 3 个部分。

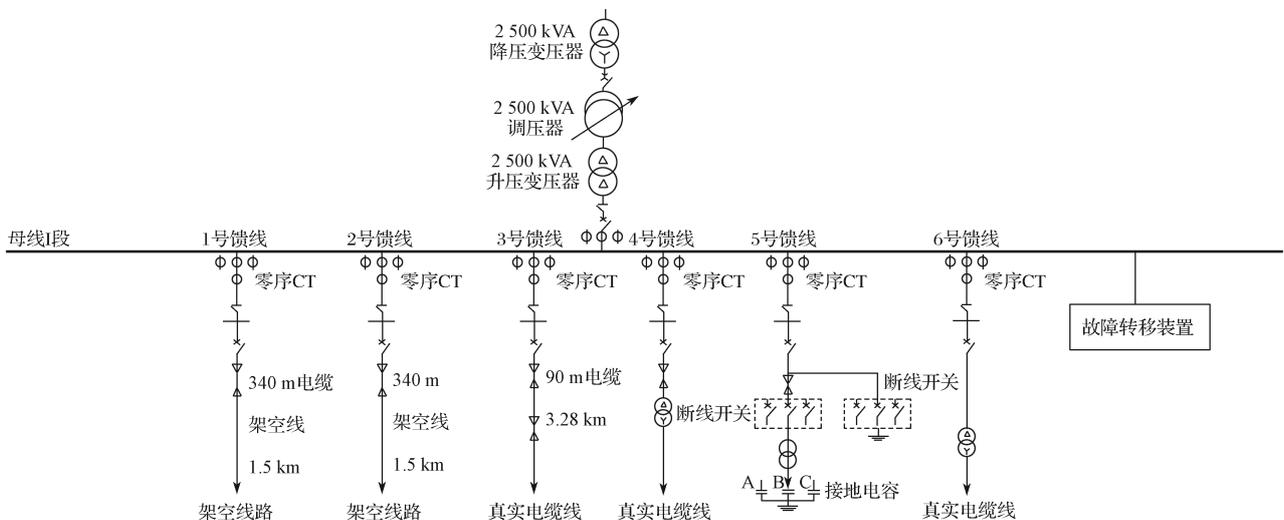


图 1 真型试验场测试系统一次接线图

Fig. 1 Primary connection of test system of the true type test ground

图2为变电所子系统实景图。



图2 变电所子系统实景图

Fig. 2 Real map of the substation system

变电所子系统主要由2 500 kVA 降压变压器、2 500 kVA 调压器、2 500 kVA 升压变压器、中性点工作方式模拟单元、高压开关柜、母线及线路出线测控柜与二次保护屏组成。

由图1可以得知,真型试验场测试系统的线路子系统具备3条真实线路和3条模拟线路共6条出线。

1) 3条真实线路。分别为1号、2号、3号馈线,其中1号、2号馈线为真实架空线路,3号馈线为真实电缆线路。

2) 3条模拟线路。分别为4号、5号、6号馈线,均为集中参数模拟线路,其通过设置对地电容实现系统模拟10~150 A 电容电流水平的配电网系统。5号、6号馈线带有负荷台区,具备负荷模拟能力。同时,5号馈线具备断线模拟能力,6号馈线具备在末端产生特定压降的模拟试验能力。

各条出线具备线路测控单元以及线路阻抗模拟单元,模拟线路能够满足典型线路参数的模拟,图3所示为1号馈线的实景图。



图3 1号馈线实景图

Fig. 3 Real map of partial line system

图4所示为故障模拟子系统实景图。故障模拟子系统具备2个故障发生地点,能够发生单相接地故障与断线故障,具备同相单点多次频繁接地故障与异名相接地故障的触发能力,能够模拟各种接地故障类型,如弧光接地、经电阻接地、金属性接地、断线接

地等。断线接地能够模拟架空线路发生断线后线路在电源侧发生接地、负荷侧发生接地、电源侧与负荷侧两端都接地的情形,接地路面可以为土地、沙地、水泥地等。



图4 故障模拟子系统实景图

Fig. 4 Real map of the fault simulation system

各子系统具备完善的测控与录波单元,能够对各监测物理量进行录波与分析处理。同时,能够对2个故障点分别进行视频监控。10 kV 电源进线、出线配有电流速断保护、限时电流速断保护、定时限过流保护、过负荷保护、单相接地零序电流保护装置;负荷台区的高压线配有速断保护装置,低压线具备零序电流保护装置。

## 1.2 试验参数设置与试验过程

设置中性点经转移型消弧装置接地方式,设定为平衡系统,其电容电流水平为10 A。设定1号、2号馈线零序电流均为1 A左右;实测3号馈线路零序电容为0.81  $\mu\text{F}$ ;设定4号馈线为空载;设定5号馈线为断线故障线路,故障点位于5号馈线首端A相,接有断线开关,馈线末端配置0.7  $\mu\text{F}$  三相对地电容;设定6号馈线空载。为模拟首端断线故障,A相断线接干沙地。

实际运行中,中性点不接地系统正常运行时,中性点位移电压偏移度约为5%,10 kV 架空裸导线或架空绝缘线一般约距离地面10~13 m。断线故障后导线接地前,断落导线做自由落体运动落向地面,此过程为断线过程,系统非全相运行,时间约为1~2 s;之后导线落地,发生接地现象。因此,断线故障模拟试验方式设置为5号馈线首端A相的断线开关打开,模拟断线未接地过程,1.5 s后断线开关接地,模拟断线接地后的过程。

试验中,所设故障相故障点处断线开关断开后,5号馈线的C相电容脱离,系统中性点电压偏移度达14%。系统监测到中性点电压变化后即进入故障识别与处理阶段,动作时间约为60~80 ms。选A相为故障相并动作,此时尚处于断线未接地状态,所以A相启动接地后状态正常,装置认为没有误判。故障处

断线开关断开 1 s 后, 断线开关接地, 即 C 相发生断线接地故障, 导致 A、C 相间短路, 故障电流造成线路 5 出口 I 段电流保护动作。

### 1.3 试验结果

甲公司故障转移消弧装置选相时只比较零序电压, 不考虑线电压模角; 乙公司故障转移消弧装置采用零序电压与线电压模角比较的方法, 同时考虑幅值与相位判断接地相别。以下将甲公司故障转移消弧装置、乙公司故障转移消弧装置简称为甲装置、乙装置。对甲、乙装置进行断线接地故障试验, 所得结果见表 1 和 2。表 1 为不同断线位置断线接地试验正确选相并可靠动作次数的统计, 表 2 为首端断线试验中性点电压及三相电压数据。

表 1 甲、乙两装置断线故障试验结果统计

Table 1 Statistical analysis of test results for A and B devices

断线位置	甲装置		乙装置	
	测试次数	正确次数	测试次数	正确次数
尾端线路	3	3	3	3
中间线路	3	3	3	3
首端线路	3	0	3	0

表 2 首端断线试验中性点电压及三相电压数据

Table 2 Neutral point voltage and three-phase voltage data of head end break tests

电压位置	甲装置			乙装置		
	故障前	断线未接地	断线接地后	故障前	断线未接地	断线接地后
A 相	5 890.20	5 729.49	5 538.47	5 891.55	5 736.24	5 543.82
B 相	5 931.15	5 918.55	5 729.09	5 932.05	5 919.63	5 763.34
C 相	5 856.45	7 142.58	7 120.98	5 870.49	7 232.69	7 327.14
中性点	10.80	1 850.40	2 030.68	13.40	1 867.20	2 019.64

由表 1 中的数据可知, 甲、乙两装置在进行首端断线接地故障试验时, 均出现了 3 次选相错误, 其中甲装置在误判故障相后动作, 进一步造成了相间短路故障。由表 2 中数据可知, 故障发生后 C 相电压升高到约 1.5 倍相电压。图 5 所示为 C 相故障时甲装置选相波形。

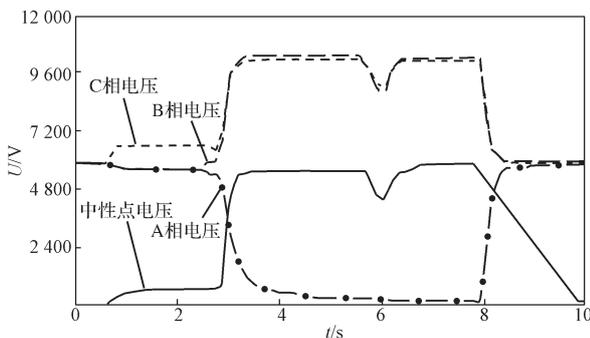


图 5 C 相故障时甲装置选相波形

Fig. 5 Phase selection waveforms of C phase fault

由图 5 可以得知, 在进行首端断线故障处理试验时, 测试平台设置 C 相首端发生断线故障, 而甲装置将故障相误判为 A 相, 并动作。乙故障转移消弧装置在进行首端断线接地故障试验时, 也出现了 3 次选相错误, 但误判故障相后并未动作, 没有进一步造成相间短路故障。

## 2 首端断线故障母线电压异常分析

### 2.1 断线后导线落地前的母线电压变化

正常运行时, 系统的三相电源及负荷处于对称状态, 三相对地导纳相等, 即

$$Y_A = Y_B = Y_C$$

式中  $Y_A$ 、 $Y_B$ 、 $Y_C$  分别为 A 相、B 相、C 相对地导纳。

系统的中性点电压为零, 无偏移电压, 系统等值电路如图 6 所示, 图中  $O$  为中性点,  $O_1$  为负荷侧中性点电位,  $Z$  为线路阻抗,  $C_1$  为 C 相 (故障相) 电源侧对地电容,  $C_2$  为 C 相负荷侧对地电容,  $C_A$  为 A 相对地电容,  $C_B$  为 B 相对地电容。

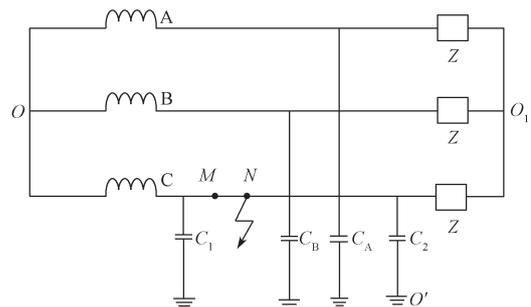


图 6 系统等值电路

Fig. 6 System equivalent circuit

此时系统的三相对称, 即

$$C_A = C_B = C_1 + C_2$$

当系统某相发生断线时, 三相对地导纳不再相等, 三相负载的对称性遭到破坏, 中性点电压不再为零, 在电源侧中性点产生了一个偏移电压, 破坏了系统三相电压的对称性。

C 相断线开路时, 电源中性点对地电位为

$$U_{OO'} = -\frac{U_A Y_A + U_B Y_B + U_C Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C}$$

式中  $U_A$ 、 $U_B$ 、 $U_C$  分别为 A、B、C 相的相电压。

若在首端断线开路, 则  $C_1 \approx 0$ ,  $C_2 \approx 0$ , A、B 相对地电容相等, 此时电源中性点对地电位为

$$U_{OO'} = -\frac{U_A Y_A + U_B Y_B}{Y_A + Y_B} = -\frac{(U_A + U_B) Y_B}{2 Y_B} = -\frac{U_A + U_B}{2} = -\frac{U_C}{2} = \frac{U_C}{2}$$

A 相对地电位为

$$U_{AO'} = U_A + U_{OO'} = U_A + \frac{1}{2}U_C |U_{AO'}| = 0.866 U_C,$$

B 相对地电位为

$$U_{BO'} = U_B + U_{OO'} = U_B + \frac{1}{2}U_C |U_{BO'}| = 0.866 U_C,$$

C 相对地电位 (即 M 点对地电位) 为

$$U_{CO'} = U_{MO'} = U_C + U_{OO'} = U_C + \frac{1}{2}U_C = \frac{3}{2}U_C.$$

线路首端 C 相断线未接地时, 由于 N 侧 C 相对地电容通过 N 侧主变形成电容电流, 使 M 侧中性点电压偏移, 形成偏移电压  $U_{MO'}$ 。由于电源三相电路对称, 而且 C 相断线后, 考虑到电压源 A、B 相的负荷是对称的, N 点的电位与 O' 点的电位相同。A、B 两相对地电位等于  $U_A$ 、 $U_B$  与偏移电压  $U_{MO'}$  向量之和, C 相 (即 N 点) 对地电位等于负荷侧中性点对电源侧中性点电位加上中性点对地电位。

## 2.2 断线后导线落地造成单相接地故障的母线电压变化

断线接地后若不考虑线路阻抗压降, N 侧 C 相接地, 负荷侧中性点电位  $O_1$  与大地电位相同, 电源侧中性点 O 对大地间的电位为

$$U_{OO'} = -\frac{U_A Y_A + U_B Y_B + U_C Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C} = -\frac{U_A Y_A + U_B Y_B}{Y_A + Y_B} = -\frac{(U_A + U_B) Y_B}{2 Y_B} = -\frac{-U_C}{2} = \frac{U_C}{2},$$

A 相对地电位为

$$U_{CO'} = U_{CO_1} = U_A + U_{OO_1} = U_A + \frac{1}{2}U_C = -\frac{1}{2}U_{AB} |U_{AO'}| = 0.866 U_C,$$

B 相对地电位为

$$U_{BO'} = U_{BO_1} = U_B + U_{OO_1} = U_B + \frac{1}{2}U_C = -\frac{1}{2}U_{AB} |U_{BO'}| = 0.866 U_C,$$

C 相对地电位为

$$U_{CO'} = U_{CO_1} = U_C + U_{OO_1} = U_C + \frac{1}{2}U_C = \frac{3}{2}U_C |U_{CO'}| = \frac{3}{2}U_C.$$

若系统断线且在负荷侧接地时, 由于负荷侧接地, 因此负荷侧变压器中性点 O' 与大地电位相同, 对于电源侧, 非故障相的对地电压与负荷侧情况完全一样; 而对于故障相, 其对地电压的情况取决于电源的感应电动势。

## 3 首端断线故障电压特征

系统等值电路分析所得首端断线故障电压特征如表 3 所示。

表 3 首端断线故障电压特征

Table 3 Voltage characteristics of head end fault

故障相 电源侧电压	正常相 电源侧电压	故障相 负荷侧电压	正常相 负荷侧电压
约 1.5 倍 相电压	约 0.866~0.900 倍相电压	约 0.5 倍 相电压	约 0.866~0.900 倍相电压

由表 3 所示结果可知, 首端断线故障时, 电源侧 C 相电压将升高为约 1.5 倍相电压, A、B 相电压将下降为约 0.866~0.900 倍相电压; 负荷侧 C 相电压将下降为约 0.5 倍相电压, A、B 相电压将下降为约 0.866~0.900 倍相电压。

首端断线故障试验中, A 相电压为 5.5~5.9 kV, B 相电压为 5.7~5.9 kV, C 相电压为 7.1~7.4 kV。可见, 各相电压数值变化与上述分析一致。

## 4 结论

根据对试验数据的分析, 可以得知:

1) 母线电压在线路首端断线故障与单相接地故障的变化有相似之处, 均表现为中性点位移电压增大, 相电压升高;

2) 母线电压在线路首端断线故障与单相接地故障变化的不同之处, 在于单相接地故障是故障相电压降低, 非故障相电压升高, 而首端断线故障则是故障相电压升高。

可见, 故障转移消弧装置仅利用中性点位移电压的变化和相电压的变化来判断是否发生单相接地故障是不可靠的。接地装置选相错误及误动作的原因主要为无法仅依据电压的变化准确判断故障相, 故建议增加零序电流的判据条件加以限制。系统发生单相接地故障后, 零序回路中的电流有较大的变化, 通过算法计算, 能够有效区分断线故障和单相接地故障, 避免出现选相错误。

## 参考文献:

- [1] 程路, 陈乔夫. 小电流接地系统单相接地选线技术综述 [J]. 电网技术, 2009, 33(18): 219-224.  
CHENG Lu, CHEN Qiaofu. A Survey on Faulty Line Selection Technology for Single-Phase Grounded Transmission Line in Small Current Neutral Grounded System [J]. Power System Technology, 2009, 33(18): 219-224.

- [2] BURGESS R, AHFOCK A. Minimising the Risk of Cross-Country Faults in Systems Using Arc Suppression Coils[J]. IET Generation, Transmission and Distribution, 2011, 5(7): 703-711.
- [3] PAPP K, KÖNIGI R. Arc Suppression Coils: The key Component of Modern Earthfault Protection Systems[C]// Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America. New York: IEEE/PES, 2010: 366-371.
- [4] 杨以涵, 齐 郑. 中低压配电网单相接地故障选线及定位技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2014: 2-10. YANG Yihan, QI Zheng. Fault Line Selection and Location Technology of Single Phase to Ground Fault in Medium and Low Voltage Distribution Network[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2014: 2-10.
- [5] 许 颖, 徐士珩. 交流电力系统过电压防护及绝缘配合 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2006: 6-15. XU Ying, XU Shiheng. Over-Voltage Protection and Insulation Coordination of AC Power System[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2006: 6-15.
- [6] 贾晨曦, 杨龙月, 杜贵府. 全电流补偿消弧线圈关键技术综述 [J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 145-154. JIA Chenxi, YANG Longyue, DU Guifu. Review of Key Technologies on Full Current Compensation Arc Suppression Coil[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 145-154.
- [7] 万善良. 上海市区配电网中性点接地方式的技术分析 [J]. 上海电力, 2006 (1): 46-53. WAN Shanliang. Analysis of the Neutral Point Grounding Method of Shanghai's Distribution Network[J]. Shanghai Electric Power, 2006 (1): 46-53.
- [8] 杨万涛. 配电网单相接地故障消弧及定位的研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2016. YANG Wantao. Research on the Distribution Network Single-Phase Ground Fault Arc Suppression and Positioning[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.
- [9] 李新泉, 齐 郑, 杨以涵. 消弧线圈与接地故障转移装置配合使用的消弧方法 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(19): 71-75. LI Xinquan, QI Zheng, YANG Yihan. Arc-Suppression Method for Coordinated Using of Arc-Extinguish Coil with Grounded-Fault Transfer Device[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(19): 71-75.
- [10] 赵 军, 袁雪琼, 阮 琦, 等. 基于对地参数跟踪测量的不接地系统单相接地故障选相研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 81-85. ZHAO Jun, YUAN Xueqiong, RUAN Qi, et al. Research on Single Phase Grounding Fault Phase Selection Based on Ground Parameter Tracking and Measurement[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 81-85.
- [11] 马 腾. 10 kV 配电线路断线故障检测与定位研究 [D]. 济南: 山东大学, 2013. MA Teng. Line-Break Fault Detection and Location of 10 kV Distribution Line[D]. Jinan: Shandong University, 2013.
- [12] 何金良, 傅芳伟, 陈水明, 等. 10 kV 绝缘导线配电线路断线机理分析 [J]. 电力建设, 2001, 22(7): 6-9. HE Jinliang, FU Fangwei, CHEN Shuiming, et al. Analysis on Wire Breakage Mechanism of 10 kV Insulated Conductor for Distribution Lines[J]. Electric Power Construction, 2001, 22(7): 6-9.
- [13] 罗俊华, 邱毓昌, 杨黎明. 10 kV 及以上电力电缆运行故障统计分析 [J]. 高电压技术, 2003, 29(6): 14-16. LUO Junhua, QIU Yuchang, YANG Liming. Operation Fault Analysis of CLPE Power Cable Above 10 kV[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(6): 14-16.

(责任编辑: 廖友媛)