

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.202162

## 配电网单相接地故障处理保护化关键技术

刘健<sup>1,2</sup>, 王毅钊<sup>1,2</sup>, 张小庆<sup>2</sup>, 张志华<sup>1,2</sup>, 权立<sup>2</sup>, 陈洁羽<sup>2</sup>

(1. 西安理工大学电气工程学院, 陕西 西安 710048; 2. 国网陕西省电力公司电力科学研究院, 陕西 西安 710100)

**摘要:** 为了提高中性点非有效接地系统单相接地故障处理能力, 论述了变电站内外单相接地保护化的实现方式。探讨了跳闸延时时间、重合闸后故障性质判断、零序电压变化暂态过程影响的克服、间歇性弧光接地的处理、相继故障处理等关键技术问题及其解决途径。阐述了构筑消弧线圈系统、站内单相接地保护和调度自动化系统自动推拉组成的单相接地故障处理三道防线的概念, 提出了依靠现场系统测试来保障单相接地保护应用效果的方法。结合西安市三环以内 56 个变电站单相接地保护化改造案例及其成效, 说明所建议方法的可行性和有效性。

**关键词:** 变电站; 配电网; 中性点非有效接地系统; 消弧线圈; 单相接地; 继电保护

### Key technologies on single-phase earthed fault protection for a distribution network

LIU Jian<sup>1,2</sup>, WANG Yizhao<sup>1,2</sup>, ZHANG Xiaoqing<sup>2</sup>, ZHANG Zhihua<sup>1,2</sup>, QUAN Li<sup>2</sup>, CHEN Jieyu<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. State Grid Shaanxi Electric Power Research Institute, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** To help single-phase earthed fault management for neutral non-effectively grounded systems, the protection approaches in substations and on outside feeders are described. Some technical issues and solutions are discussed, such as time delay for tripping, permanent fault identification after reclosing, influence of the zero-sequence voltage transient, and handling intermittent arc earthed faults and cascading faults. The concept of three defensive lines for dealing with a signal-phase grounded fault in substations is elaborated. It consists of arc suppression coils, earthed fault protection and automatic searching approach in SCADA. It is emphasized that the field systematic test is an essential measure for earthed fault protection. The engineering of earthed fault protection with fifty-six substations in Xi'an city is introduced as an example. This shows the feasibility and effectiveness of the proposed approaches.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China "Key Technologies of Urban Intelligent Distribution Network Protection and Self-healing Control" (No. U1766208).

**Key words:** substations; distribution networks; neutral non-effectively grounded systems; arc suppression coils; single-phase earthed fault; relay protection

## 0 引言

中性点非有效接地是世界各国配电网最为广泛采用的方式<sup>[1]</sup>, 单相接地故障是最为常见的故障形式<sup>[2-3]</sup>。

若不采取跳闸措施而造成单相接地长期存在, 其危害甚大, 比如: 弧光过电压破坏健全相绝缘<sup>[4]</sup>、引发相间短路<sup>[5]</sup>、引起火灾造成电缆沟火烧连营<sup>[6]</sup>、威胁到人身安全<sup>[7]</sup>等。

单相接地保护化、在永久性接地情况下实现选择性跳闸势在必行<sup>[8-9]</sup>。欧洲一些采用中性点经消弧线圈接地方式的国家(如: 瑞典、挪威、俄罗斯、波兰、法国、瑞士、克罗地亚和意大利等)已经采取了发生单相接地后延时跳闸的措施。中国国家电网公司企业标准 Q/GDW 10370-2016《配电网技术导则(修订版)》中指出: “中性点不接地和消弧线圈接地系统, 中压线路发生永久性单相接地故障以后, 宜按快速就近隔离故障原则进行处理”<sup>[10]</sup>。

消弧线圈、互感器和单相接地检测技术已经取得突破性进展<sup>[11-13]</sup>, 在补偿良好情况下, 主流制造企业产品的单相接地检测能力至少可以耐受 1 000 Ω

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助“城市智能配电网保护与自愈控制关键技术”(U1766208)

过渡电阻。

但是,除了基本原理以外,单相接地保护化还面临许多关键技术问题,需要特别关注。

## 1 单相接地保护化的实现方式

单相接地保护化的基本原则是:变电站内外以延时时间级差实现多级配合。

### 1.1 变电站内的单相接地保护

变电站内的单相接地保护装置可以有两种解决方案:

#### 1) 集中式单相接地选线保护装置

每段母线配置一套,通过采集母线零序电压以及各条出线的零序电流实现单相接地故障选线和保护功能。

集中式单相接地选线保护装置的优点在于:所需装置数量少;选线建立在“全局”信息基础上,所以容错性更高。其缺点是:二次连线多,一旦装置失效则整段母线的出线将失去选线保护功能。

#### 2) 分散式单相接地保护装置

每条出线配置一套,可以与针对相间短路的线路保护装置共用硬件,采集母线零序电压(或三相电压)、本线路三相电流(或零序电流)实现单相接地保护功能。

分散式单相接地保护装置的优点在于:二次连线少、站内改造容易;即使装置失效也仅影响所在馈线的单相接地保护。其缺点是:所需装置数量多,缺乏“全局”信息而容错性一般。

在变电站内,可以分别采用上述两种类型装置的一种,也可以两种都采用以进一步提高可靠性。同时采用集中式单相接地选线保护装置和分散式单相接地保护装置时,两者可以采用延时时间级差配合。

### 1.2 变电站外的单相接地保护

部署在馈线开关的自动化终端可以配置单相接地检测功能,可采用零序电压启动或相电流突变启动,当判断出下游存在单相接地时启动延时跳闸。变电站内单相接地保护装置与沿线各个自动化装置之间采用级差配合实现选择性。鉴于主干线故障率较低,可不设分级保护,而将保护配置于故障率较高的分支、次分支和用户处,这样配置的优点是不受运行方式影响。比如:变电站出线断路器 3 s,馈线分支开关 2.5 s,馈线次分支开关 2 s,用户分界开关 1 s。

大部分单相接地检测方法都可以根据安装处采集到的信息判断出其下游是否存在单相接地<sup>[14-15]</sup>。对于一二次融合智能开关,由于零序电压和零序电流

互感器的精度比较高,采用简便易行的零序功率方向法也能具有较好的检测性能。对于处于馈线末端的用户分界开关,其下游馈线短、电容电流小,即使采用稳态量法效果也不错。

对于作为 10 kV 母线延伸的开闭所,在母线出线较多的情况下,也可配置与变电站内相同的集中式单相接地选线保护装置或分散式单相接地保护装置。

## 2 关键技术问题

在单相接地保护化工程实践中,需要解决许多关键技术问题。

### 2.1 变电站出线断路器的单相接地跳闸延时时间

确定变电站出线断路器的单相接地跳闸延时时需综合考虑两个方面的因素:一是充分发挥消弧线圈的熄弧作用,因此不宜过短;二是避免长时间永久性单相接地持续存在造成破坏的严重后果,不可过长。

文献[16]的研究结果表明,在消弧线圈补偿下,当残流小于 15 A 时,弧道长度 12.5 cm 以上的电弧大都可以在 500 ms 内熄灭。但是对于更短弧道的情况,尚未见有研究报道。

欧洲配电网的电缆化率比较高,一些采用中性点经消弧线圈接地方式的 国家也采取了发生单相接地后延时跳闸的措施,延时时间差异较大,如:俄罗斯 3 s、波兰 3 s、瑞典 5 s、意大利 5 s、法国 30 s、挪威 20 min、瑞士 2 h、克罗地亚 2 h 等。

参考欧洲的情况,并考虑到中国馈线环境较差(尤其是电缆沟),可将单相接地后的跳闸延时时间设置为 3~5 s。

### 2.2 自动重合闸问题

工程实践表明,发生单相接地故障后,即使在消弧线圈熄弧失败导致跳闸的情况下,重合闸后仍有 20%~30% 的情况可以恢复供电。

在单相接地故障下,即使重合到永久性单相接地故障时,其容性电流水平也在负荷电流范围,因此即使全电缆线路在因单相接地保护动作跳闸后,也可以自动重合闸<sup>[17]</sup>。

但是,一些单相接地保护装置采用了基于暂态量法的检测方法,比如相电流突变法等,在进行重合闸时,即使在单相接地已经消除的情况下,三相电流也发生了突变,有可能给重合后的故障性质判断带来困扰。

为了解决上述问题,在重合闸时可采用零序电压判断故障性质,但需短暂延时躲开励磁涌流和三相非同期合闸过程(一般 100~200 ms),检测零序电压是否仍在阈值以上,若是则为永久性单相接地,

再次跳开该线路的开关；否则为瞬时性单相接地，此次单相接地故障处理过程结束。

### 2.3 间歇性弧光接地问题

间歇性弧光接地故障是单相接地故障中危害最大的一类故障<sup>[18]</sup>，它会造成健全相高倍数过电压，对电缆及设备绝缘伤害较大。

间歇性弧光接地故障的表现为：在某条线路上多次弧光接地故障在间隔比较短的时间内连续发生，每次弧光接地故障持续时间可在半个到数十个周波之间，各次弧光接地故障的间隔时间可达秒级。

间歇性弧光接地情况下，一些单纯基于延时跳闸机制的单相接地保护装置有可能频繁启动却由于单次故障持续时间不能达到装置跳闸延时而返回，从而无法完成跳闸功能，导致故障长期不被切除。

例如，某电缆线路曾在某日4点17分21秒开始至4点17分44秒结束的23s时间内，先后发生了11次弧光接地故障，单次持续时间最大210ms，间隔时间最小1s、最大5s以上，最终引起电缆沟起火。

为了实现间歇性弧光接地故障时的可靠跳闸，可以在单相接地保护装置中增加基于时间窗内瞬时性接地故障计数的跳闸逻辑，即：在一定的时间窗内若监测到同一线路发生多次瞬时性(弧光)接地故障，则跳开该线路。比如：若装置在10s内检测到同一线路3次及以上的瞬时性接地故障(短时延判据)，或在30s内检测到同一线路5次及以上的瞬时性接地故障(长时延判据)，则跳开该线路。

之所以设置短时延判据和长时延判据两个判据，是为了在弧光接地比较频繁的紧急状况下能更快地切除故障线路。

### 2.4 零序电压变化暂态过程的影响

单相接地故障发生时，预调式消弧线圈需要经历串阻尼(并阻尼)状态到无阻尼状态的切换过程，随调式消弧线圈需要经历无补偿状态到充分补偿状态的切换过程。

预调式消弧线圈阻尼电阻的切除是由晶闸管或接触器自触发的，阻尼电阻切除时间很快，但是流经消弧线圈的电流需经历逐渐变大的过程，导致零序电压也呈现逐渐上升的过程。

随调式消弧线圈启动后由电力电子元件调节补偿电流的过程，进入充分补偿状态的时间较长，导致零序电压也呈现逐渐上升的过程；当过渡电阻太大时，也会导致随调式消弧线圈根本无法启动，造成零序电压及其变化量始终达不到单相接地保护装置的启动阈值。

零序电压逐渐上升的暂态过程，会使依靠零序电压启动的单相接地保护装置的启动时刻滞后于单

相接地故障发生时刻，也会使依靠零序电压变化量启动的单相接地保护装置的启动时刻滞后于单相接地故障发生时刻若干周波。

对于基于暂态量原理的单相接地保护装置，在单相接地保护装置启动后，反映接地特征的首半波暂态信号可能已经过去几个周波。因此，单相接地保护装置必须加大滑动录波窗口，向前追溯几个周波去搜索比较明确的暂态信号，而不能仅根据启动后的波形进行单相接地检测。

当然，单相接地保护装置更不能将启动前的零序电流当做三相不平衡电流、并用它去修正启动后的零序电流来获得故障电流，而应向前追溯较多周波(比如5~10周波)找到故障前的真正反映不平衡电流的零序电流作为修正量。

类似地，在消弧线圈成功熄灭电弧(瞬时性故障)后，零序电压也并非立即下降到阈值以下，而是逐渐下降，有时需要经历几个周波时间<sup>[19]</sup>。因此需要经过足够的延时时间后才能根据零序电压判断出故障的性质(即是永久性故障还是瞬时性故障)，即使对于最末端的用户分界开关也必须配置足够长的延时时间而不能无延时跳闸，这个延时时间应考虑消弧线圈的熄弧时间与熄弧后零序电压逐渐上升的时间之和，一般需取600ms以上。

### 2.5 相继故障处理

一处单相接地故障发生后，健全相对地电压升高，单相接地保护装置启动并检测，但有可能在其延时动作时间以内引发异相接地构成相间短路故障，称为相继故障。相继故障可能发生在本条线路上，也可能发生在其他线路上<sup>[20-21]</sup>。

由于两相均经过过渡电阻接地，有可能导致短路电流水平较低而无法达到Ⅲ段过流保护定值，从而无法引起过电流保护动作跳闸。

对于采用分散式单相接地保护装置的情形，即使相继故障发生在其他线路上，也能分别引起本线路和相继故障所在线路的保护装置动作，从而跳开相应两条线路开关切除故障。

对于采用集中式单相接地选线保护装置的情形，如果相继故障发生在其他线路上，由于常规选线装置只选出一条故障线路，将只跳开首先发生故障的线路开关而不能跳开相继故障所在线路开关。

为了解决这个问题，可在集中式单相接地选线保护装置中为各条线路分别设置一个零序过流保护，定值可按躲开相应线路自身电容电流整定。但是这个措施的抗过渡电阻能力不够高。

为了解决高过渡电阻相继故障问题，可在集中式单相接地选线保护装置中增加在延时时间内零序

电压突变启动的单相接地选线保护功能,在延时时间内一旦检测到零序电压突变就再次进行选线,当到达延时时间后,将所有选中的线路开关都跳开。

## 2.6 构筑变电站内单相接地保护三道防线

为了进一步避免变电站内单相接地保护装置不正确动作、使单相接地故障不能可靠切除的影响,可以在调度自动化系统设置自动推拉选线分闸功能<sup>[22-23]</sup>。采用零序电压延时启动或由人工启动,启动后自动执行推拉流程,根据零序电压是否消失判断推拉效果,最终正确切除单相接地线路。

这样,在变电站中就构筑了三道针对单相接地故障的防线:

第一道防线是消弧线圈系统,完好的消弧线圈系统不仅能有效熄弧或极大程度减轻破坏程度,为后续故障处理留出充足的时间,而且能确保针对单相接地故障处理的自动化装置的启动灵敏度。第二道防线是单相接地选线保护装置。第三道防线是调

度自动化系统自动推拉选线分闸。

## 3 加强现场系统级测试

变电站内的单相接地故障处理是一个系统工程,需要消弧线圈系统、零序电压系统、电流互感器和单相接地保护装置等各个环节协调配合,才能得到令人满意的效果。

上述各个环节的缺陷以及它们配合上的不足,仅仅采取单项检查或测试一般难以发现,为了及时发现缺陷并有针对性地加以消除,必须进行现场系统级测试<sup>[24]</sup>。

借助图1所示的移动式单相接地现场系统测试装备,在现场运行的馈线上直接制造单相接地,考察单相接地故障处理装置的响应情况,是进行单相接地故障处理能力现场测试的合适方法,它不仅简单易行、完全真实、不影响正常供电,而且对任何单相接地定位原理都普遍适用。

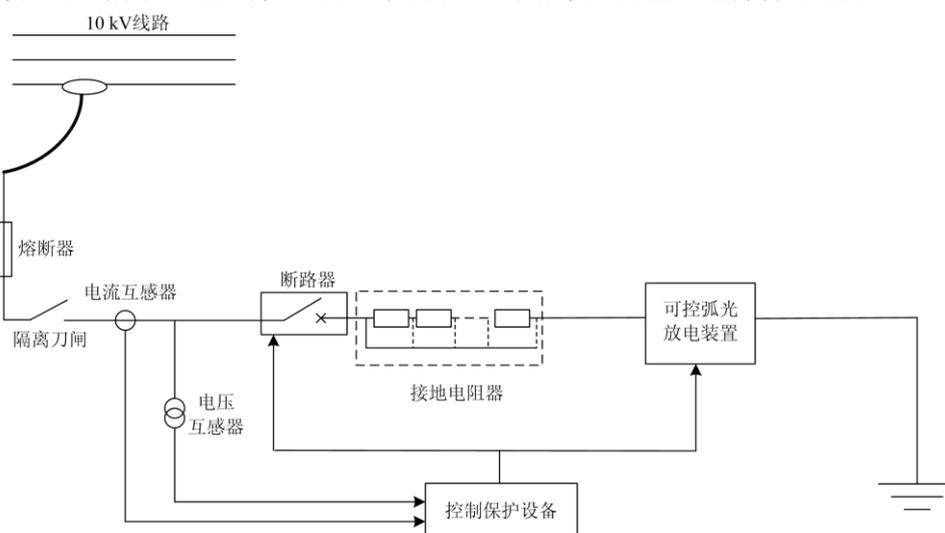


图1 移动式单相接地现场测试装备

Fig. 1 A test equipment for field earthed fault procession

作者研制的移动式单相接地现场测试成套装备包含熔断器、隔离刀闸、电流互感器、电压互感器、10 kV 断路器、大容量接地电阻器组、可控弧光放电装置、接地极以及控制保护设备等关键部件。

试验过程中,控制保护设备控制断路器闭合时间,实现单相接地持续时间的调节,通过调节接地持续时间模拟永久性故障和瞬时性故障。通过调整可控电弧放电装置的工作参数,可以实现对间歇性电弧接地放电相位、放电频率和放电时间的调节控制。采用具有旁路功能的大容量电阻器实现对单相接地过渡电阻的分档调节。移动式单相接地现场测试成套装备可以实现对单相接地过渡电阻、单相接

地持续时间、间歇性电弧接地放电相位、放电频率和放电时间的控制,可发生各种典型场景的单相接地现象,测试单相接地故障处理的性能。试验过程中进行录波,记录母线三相电压和零序电压、各出线零序电流、中性点电压和电流、接地点电压和电流。测试结束后根据对各个环节的录波数据的分析,及时发现缺陷,并指导消除。

## 4 应用案例

西安三环以内56座变电站运用本文论述的技术路线实施了单相接地保护化改造,共涉及133段母线,电容电流60~240 A,站内采用自动跟踪式消

弧线圈、集中式单相接地选线保护方式，跳闸延时间为 5 s。

在改造竣工后对每座变电站均采用笔者研制的成套测试装备进行了现场系统测试，发现并消除消弧线圈及其控制器、零序电压互感器、零序电流互感器、自动化装置缺陷 1 052 处。

消除缺陷后，单相接地保护跳闸正确率超过 90%，三道防线有效率 100%。

目前正在进行全省另外 187 座谐振接地变电站 374 段母线的单相接地保护化改造。

### 5 结论

单相接地保护化的含义包括：永久性单相接地选择性跳闸和自动重合闸，其基本原则是：变电站内、外协调以延时时间级差实现多级配合。

除了基本原理以外，单相接地保护化的关键技术问题还包括：跳闸延时间、重合闸后故障性质判断、间歇性弧光接地的处理、零序电压变化暂态过程影响的克服、相继故障处理等。

构筑消弧线圈系统、站内单相接地保护和调度自动化系统自动推拉三道防线，是单相接地保护化的坚强保障。

变电站内的单相接地故障处理是一个系统工程，需要各个环节协调配合，开展现场系统级测试能够及时发现设备缺陷并指导消缺。

### 参考文献

[1] 要焕年, 曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 2 版. 北京: 中国电力出版社, 2009.

[2] 徐丙垠. 配电网继电保护与自动化[M]. 北京: 中国电力出版社, 2017.

[3] 郭清滔, 吴田. 小电流接地系统故障选线方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(2): 146-152.  
GUO Qingtao, WU Tian. Survey of the methods to select fault line in neutral point ineffectively grounded power system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(2): 146-152.

[4] 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): 30-34.  
JIN Enshu, YANG Mingfang, LI Weigang, et al. Simulation of PF arc grounding over-voltage based on MODELS[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(13): 30-34.

[5] 许颖. 中性点不接地和消弧线圈接地电力系统中单相接地引发相间短路的探析[J]. 上海电力, 2004(3): 212-215.  
XU Ying. Study of short circuit between phases caused

by single phase grounding in electric power system with neutral point ungrounded or grounded through arc suppression coil[J]. Shanghai Electric Power, 2004(3): 212-215.

[6] 刘素蓉, 胡钰骁, 郑建康, 等. 10 kV 电缆单相电弧接地故障引燃隧道的火灾动态仿真[J/OL]. 高电压技术: 1-8[2021-03-15].<https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20201203>.

LIU Surong, HU Yuxiao, ZHENG Jiankang, et al. Dynamics simulation of 10 kV cable tunnel fire for single-phase arc grounding fault[J/OL]. High Voltage Engineering: 1-8[2021-03-15].<https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20201203>.

[7] 徐丙垠, 李天友, 薛永端. 配电网触电保护与中性点接地方式[J]. 供用电, 2017, 34(5): 21-26.  
XU Bingyin, LI Tianyou, XUE Yongduan. Electric shock protection and earthing methods of distribution networks[J]. Distribution & Utilization, 2017, 34(5): 21-26.

[8] 张世栋, 郭雨豪, 张林利, 等. 基于层次分析法的小电流接地故障自适应跳闸方案[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(9): 28-34.  
ZHANG Shidong, GUO Yuhao, ZHANG Linli, et al. Adaptive tripping scheme for non-solidly grounding fault based on analytic hierarchy process[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(9): 28-34.

[9] WANG Yikai, YIN Xin, XU Wen, et al. Fault line selection in cooperation with multi-mode grounding control for the floating nuclear power plant grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(2): 74-83. 2020, 5(2): 164-173. DOI: 10.1186/s41601-020-00160-0.

[10] 配电网技术导则: Q-GDW10370—2016[S]. 北京: 国家电网公司, 2016.

[11] 薛永端, 李娟, 徐丙垠. 中性点经消弧线圈接地系统小电流接地故障暂态等值电路及暂态分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(22): 5703-5714.  
XUE Yongduan, LI Juan, XU Bingyin. Transient equivalent circuit and transient analysis of single-phase fault in arc suppression coil grounded system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(22): 5703-5714.

[12] 李跃, 郑涛, 文安. 基于单端量的超高压交流输电线路单相接地故障测距方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(6): 27-33.  
LI Yue, ZHENG Tao, WEN An. A new location method for UHV AC transmission lines with high resistance faults based on single terminal volume[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(6): 27-33.

[13] 安东亮, 陈涛, 李军, 等. 基于半波傅氏算法的小电流接地选线装置设计[J]. 电力系统保护与控制, 2020,

- 48(9): 157-163.  
AN Dongliang, CHEN Tao, LI Jun, et al. Design of a small current grounding line selection device based on a half-wave Fourier algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(9): 157-163.
- [14] 宋国兵, 李广, 于叶云, 等. 基于相电流突变量的配电网单相接地故障区段定位[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(21): 84-90.  
SONG Guobing, LI Guang, YU Yeyun, et al. Single-phase earth fault section location based on phase current fault component in distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(21): 84-90.
- [15] 李振兴, 万佳灵, 王新, 等. 基于中值电阻投切的故障选线方法与定位新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(7): 57-65.  
LI Zhenxing, WAN Jialing, WANG Xin, et al. A novel method of fault line selection and section location based on the input and cutoff of medium resistance[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(7): 57-65.
- [16] 颜湘莲, 陈维江, 贺子鸣, 等. 10 kV 配电网单相接地故障电弧自熄特性的试验研究[J]. 电网技术, 2008, 32(8): 25-28.  
YAN Xianglian, CHEN Weijiang, HE Ziming, et al. Experiment research on self-extinction behavior of arc caused by single-phase earth fault in 10 kV distribution network[J]. Power System Technology, 2008, 32(8): 25-28.
- [17] 连鸿波, 杨以涵, 潘永刚, 等. 小电流接地系统中面向单相接地故障的自动重合闸技术[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(6): 73-77.  
LIAN Hongbo, YANG Yihan, PAN Yonggang, et al. The auto-reclosing technique for the-single-phase-to-ground fault in non-valid grounded systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(6): 73-77.
- [18] 韩爱芝, 曾定文, 鲁铁成. 配电网间歇性电弧接地过电压的仿真分析与对策[J]. 高压电器, 2010, 46(1): 72-75.  
HAN Aizhi, ZENG Dingwen, LU Tiecheng. Simulation of intermittent arc earthing over-voltage and countermeasure[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(1): 72-75.
- [19] 陈栋, 胡兵, 彭勃, 等. 电压恢复缓慢导致的接地保护误重合分析及算法优化[J]. 供用电, 2021, 38(1): 67-73.  
CHEN Dong, HU Bing, PENG Bo, et al. Analysis and algorithm optimization of the earth fault protection reclosing caused by slow voltage recovery[J]. Distribution & Utilization, 2021, 38(1): 67-73.
- [20] 姜博, 董新洲, 施慎行. 近似熵在配电网继发性故障检测中的应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(17): 15-21.  
JIANG Bo, DONG Xinzhou, SHI Shenxing. Application of approximate entropy to cross-country fault detection in distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(17): 15-21.
- [21] 张维, 宋国兵, 吴敏秀, 等. 参数识别法在 10 kV 小电流接地系统继发性单相接地故障检测中的应用研究[J]. 供用电, 2017, 34(6): 72-78, 13.  
ZHANG Wei, SONG Guobing, WU Minxiu, et al. Application of parameter identification in secondary single-phase grounding fault detection of 10 kV small current grounding system[J]. Distribution & Utilization, 2017, 34(6): 72-78, 13.
- [22] 周耀辉, 李永, 梁学良, 等. 基于调度自动化系统的单相接地故障研判功能研究与实现[J]. 电子设计工程, 2015, 23(19): 159-161.  
ZHOU Yaohui, LI Yong, LIANG Xueliang, et al. Research and implementation based on the single phase to ground fault functions of dispatching automation system[J]. Electronic Design Engineering, 2015, 23(19): 159-161.
- [23] 袁超, 薛永端, 梅睿, 等. 不同接地方式下配电网绝缘监察的灵敏性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(3): 130-137.  
YUAN Chao, XUE Yongduan, MEI Rui, et al. Sensitivity analysis of insulation monitoring of distribution network under different grounding modes[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3): 130-137.
- [24] 刘健, 张小庆, 申巍, 等. 中性点非有效接地配电网的单相接地定位能力测试技术[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(1): 138-143.  
LIU Jian, ZHANG Xiaoqing, SHEN Wei, et al. Performance testing of single phase to earth fault location for distribution network with neural point non-effectively grounded systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(1): 138-143.

收稿日期: 2021-04-08; 修回日期: 2021-09-15

作者简介:

刘健(1967—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 新世纪百万人才工程国家级人选, 国家电网公司科技领军人才, 主要研究方向为配电网及其自动化技术; E-mail: powersys@263.net

王毅钊(1992—), 男, 博士研究生, 工程师, 主要研究方向为单相接地故障处理;

张小庆(1971—), 男, 学士, 教授级高工, 主要研究方向为电力系统继电保护。

(编辑 葛艳娜)