

一起间歇电弧接地过电压事故分析

随着城市配电网地下电缆的广泛应用，间歇弧光接地过电压事故时有发生，影响电网安全稳定运行。以一起间歇电弧接地过电压事故为案例，对事故原因进行了总结分析。技术上提出了两种不同的单相接地故障电流值（100 A和150 A）作为不同地区配电网中性点接地方式的选择依据；管理上建议将故障相特征电压大于200 V超过3次、SCADA系统频繁接地/复归以及正常相电压变化等作为值班调度员综合判断间歇电弧接地过电压的参考依据。

吴思成 曹云轩/国网重庆市电力公司长寿供电分公司 曹诗雅/东北林业大学机电工程学院 毛昭辉/河海大学机电工程学院

0 引言

配电网连接千家万户，安全稳定运行关系社会和谐。由于我国配电网发展不均衡，大多数地区10 kV配电网仍采用中性点不接地方式，提高了供电可靠性，但也存在遭受过电压的风险^[1-2]。特别是近几年城市配电网地下电缆的广泛应用，单相接地故障电流急剧上升，导致发生单相接地时不易熄弧，不仅造成相间短路，扩大事故，还易引发间歇电弧接地过电压^[3-6]，轻则损坏电力设备，重则造成全系统设备绝缘积累性损伤，给电网安全运行留下难以消除的隐患^[7-9]。

本文以一起间歇电弧接地过电压事故为案例，对设备损坏情况、自动化系统信息以及事故前设备试验数据等进行了综合分析，认为该变电站设备存在严重绝缘缺陷未及时处理，系统对地电容电流超标无补偿装置、值班调度员依常规方式处理造成事故处理时间较长等综合原因引发间歇电弧接地过电压是造成本次事故的直接原因。最后，从设备缺陷、技术措施和调度处理三个方面提出

了解决措施。

1 事故概况

某日21时34分，110 kV某变电站10 kV 1#段母线B相发出接地信号，21时53分、54分和58分10 kV 1#段母线3条出线分别跳闸。23时16分，1#主变压器后备保护动作，1#主变压器101#、601#开关跳闸，10 kV 1#段母线失电压，城区部分区域停电。现场检查发现事故变电站10 kV开关室、出线隔离开关、分支箱、配电房和开闭所等多处设备均有较严重的损坏。

2 事故设备检查和信息系统分析

2.1 事故设备检查

下表为部分损坏设备情况及与事故变电站的电气距离关系。从设备损坏情况看本次事故损坏的主要是套管、瓷瓶和避雷器等绝缘或过电压防护设备。从损坏设备与事故变电站的电气距离看，事故损坏设备具有“随机性”，与事故变电站电气距离并无绝对逻辑关系，离

表 部分设备损坏情况及与事故变电站的电气距离关系

10 kV设备故障点	设备损坏种类	设备损坏情况	与事故变电站电气距离/km
开关柜母线室	套管、瓷瓶、支柱绝缘子和避雷器等	熔损炸裂	事故变电站内
某线路隔离开关	瓷瓶	炸裂	0.34
某开闭所	避雷器	炸裂	0.90
某专用变压器	跌落保险	炸裂	1.50
某配电房	避雷器	炸裂	1.80
某分支箱	电缆、电缆头	击穿	2.44

关键词/Keywords

间歇电弧接地·
过电压·
事故·
解决措施·

事故变电站近的部分设备未损坏，离事故站较远的部分设备却损坏。由此可见，电网设备绝缘水平不同，可能遭受过电压冲击。部分设备损坏情况分别如图1~图4所示。



图1 开关柜有明显放电痕迹



图2 母线室三相隔离开关支柱瓷瓶炸裂



图3 部分高压避雷器炸裂



图4 地埋电缆损坏

2.2 自动化系统信息分析

图5~图7为事故变电站当日10 kV 1#母线三相实时电压曲线。从图5~图7中可以看出，事故发生时，B相电压降低至接近零，A、C两相电压升高至线电压，是典型的单相接地故障；事故期间，B相电压存在多次明显波动，表明故障为不稳定接地。图8为自动化系统SOE保护事项显示信息。本次故障从接地信号发出至线路跳闸时长为19 min，从接地信号发出至母线失压时长约为99 min，在事故发生的1 h内，接地信号多次动作/复归，也间接验证了事故中存在不稳定接地的猜测，即整个故障中存在不稳定接地—单相接地—

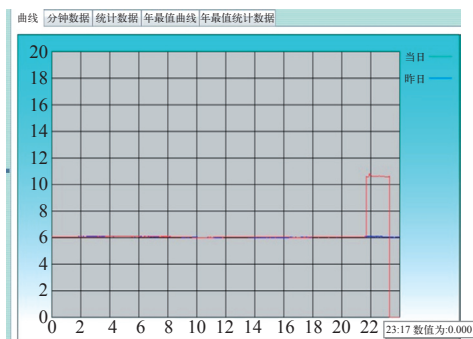


图5 10 kV 1#段母线A相电压信息

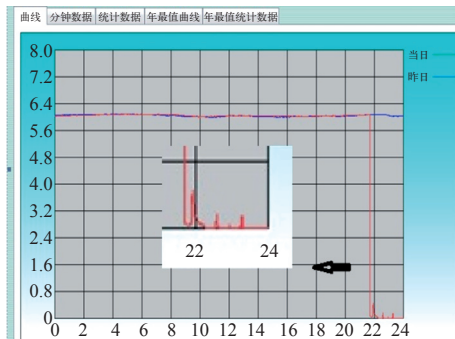


图6 10 kV 1#段母线B相电压信息

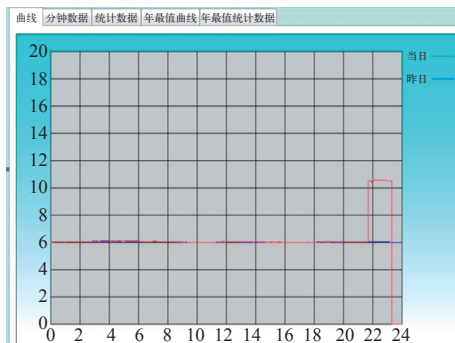


图7 10 kV 1#段母线C相电压信息

事件类型	发生时间	厂站名	事件名称	具体内容	附加信息	备注信息
保护动作	21:58:38.491		10kV I#母线接地	复归		正常
保护动作	21:58:38.494		10kV I#母线接地	动作		正常
保护动作	21:58:38.519		10kV I#母线接地	复归		正常
保护动作	21:58:38.594		10kV I#母线接地	动作		正常
保护动作	21:58:38.622		10kV I#母线接地	复归		正常
保护动作	21:58:40.775		10kV I#母线接地	复归		正常
保护动作	21:58:40.775		10kV I#母线接地	动作		正常
保护动作	10 kV I#母线接地	动作	10kV I#母线接地	复归		正常
保护动作	10 kV I#母线接地	动作	10kV I#母线接地	动作		正常
保护动作	10 kV I#母线接地	复归	10kV I#母线接地	动作		正常
保护动作	10 kV I#母线接地	复归	10kV I#母线接地	复归		正常
保护动作	10 kV I#母线接地	复归	10kV I#母线接地	动作		正常
保护动作	10 kV I#母线接地	动作	10kV I#母线接地	复归		正常
保护动作	10 kV I#母线接地	动作	10kV I#母线接地	复归		正常
保护动作	10 kV I#母线接地	复归	10kV I#母线接地	动作		正常
保护动作	10 kV I#母线接地	复归	10kV I#母线接地	复归		正常
保护动作	10 kV I#母线接地	复归	10kV I#母线接地	动作		正常
保护动作	10 kV I#母线接地	复归	10kV I#母线接地	复归		正常
保护动作	21:57:59.348		10kV I#母线接地	动作		正常
保护动作	21:57:59.348		10kV I#母线接地	动作		正常
保护动作	21:57:59.849		10kV I#母线接地	动作		正常
保护动作	21:57:59.813		10kV I#母线接地	复归		正常
保护动作	21:57:59.456		10kV I#母线接地	动作		正常
保护动作	21:57:59.415		10kV I#母线接地	复归		正常
保护动作	21:57:59.210		10kV I#母线接地	动作		正常
保护动作	21:58:16.418		10kV I#母线接地	复归		正常
保护动作	21:58:14.887		10kV I#母线接地	复归		正常
保护动作	21:58:16.905		10kV I#母线接地	动作		正常
保护动作	21:58:16.200		10kV I#母线接地	动作		正常

图8 自动化系统SOE保护信息

不稳定接地等转换过程。综合分析判断,事故可能由间歇电弧接地过电压引起。

3 事故原因分析

3.1 缺陷未及时处理

事故前一个月,带电检测发现事故变电站10 kV两条出线开关室有较严重的局部放电现象。因停电困难和对带电检测结果的重视不够,母线缺陷未及时消除。本次故障中,损坏最严重的开关室正是其中的一条。事故后开柜检查,发现母线室内有明显电弧放电痕迹(如图2所示),确定为故障点。

3.2 电容电流未补偿

《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》^[10]中规定,6~10 kV以电缆线路居多的单相接地故障电流超过10 A时,应装设电容电流补偿装置。事故变电站10 kV系统为中性点不接地系统,约87%的出线为电缆线路,电缆出线总长度约为74 km,且无电容电流补偿装置。事故前对该站电容电流测试达到103.38 A,远超过10 A的规定值。故障发生时,事故站跳闸保护信息显示,3条10 kV出线均为A、B、C相接地,已快速发展成相间短路故障并跳闸。同时B相(故障相)电压多次由零上升至50~400 V(见图6),表明故障点电弧多次复燃。

3.3 调度依常规处理

事故发生时,由于《国家电网调度控制管理

规程》^[11]中并未明确给出间隙电弧接地过电压的判断标准和调度应急处置方法。值班调度员忽视接地信号多次动作/复归、接地相电压多次出线明显波动等特征,仍按常规方法处理,即先通知重要用户,然后对事故变电站10 kV出线逐条搜索接地查找故障,出线开关拉开后接地信号未消除,则重新合上,直至接地信号消除,隔离故障。由于事故变电站属城市核心变电站,10 kV出线和重要用户较多,从接地信号发出至母线失电压时长约为1.5 h,接地点仍未隔离,造成事故扩大;同时,正常线路开关拉开,又重新合上后对故障点存在二次冲击,也对事故扩大有一定影响。

由以上分析可推测事故的过程为:某10 kV出线开关室因严重局部放电,形成母线间歇单相接地,由于系统电容电流较大,且无电容电流补偿装置,电弧不易熄灭,3条出线发展成相间短路并跳闸;同时,引发间歇电弧接地过电压,遍布整个系统,击穿电网中的绝缘薄弱设备,造成多地开关室、出线隔离开关、避雷器、瓷瓶和电缆等炸裂、烧毁或击穿。事故变电站运行设备存在严重绝缘缺陷未及时处理,系统电容电流超标无补偿装置、值班调度员依常规方式处理造成处理时间较长和可能形成的二次冲击等是造成本次事故的直接原因。

4 解决措施

4.1 重视设备缺陷

加强技术监督,研究并强化状态检修,发挥好在在线监测和带电检测的作用,及时发现运行设备缺陷,特别是发现母线缺陷时,应重新平衡系统安全与供电可靠性。强化电缆和配电网设备的参数管理,关注设备附属件(如隔离开关、熔断器等设备瓷柱)的选型。加强设备的验收和运行维护工作,验收时要注意安装距离是否足够、母排倒角是否规范等容易忽视的问题,运行中要关注并处理好潮湿、脏污和绝缘破损等常见问题,提高设备的健康水平。

针对已遭受过电压的电气设备,开展全网

设备绝缘大检查，建立积累性伤害区域的设备档案，准备好应急抢修物品，做好应急抢修的准备工作。

4.2 补偿电容电流

补偿配电网较大的电容电流其核心是配电网中性点接地方式的选择问题。针对以电缆居多的10 kV城市配电网，主要采用中性点经消弧线圈或自动跟踪补偿的消弧线圈接地^[12-15]和中性点经小电阻接地^[16]等方式。中性点经小电阻接地本质上属于有效接地，特别是对于全电缆线路，线路故障往往是永久性的，保护快速跳闸，切除故障，最大限度地保障电网安全。而中性点经消弧线圈接地属于非有效接地，具有供电可靠性高、人身安全性高等优点。显然，对单相接地故障电流大于10 A的城市配电网，由架空线路或架空线路、电缆混合构成的系统建议使用中性点经消弧线圈接地方式，且为保障供电可靠性，应投入线路重合闸；而由全电缆构成的系统建议使用中性点经小电阻接地方式，线路重合闸不需投入。

其次，国外配电网中性点多采用经小电阻接地方式，实现基础是配电网网络已逐渐完善，并形成多电源环网或网格供电，故障时自动转移配电网负荷，提升供电可靠性。这将是未来我国配电网中性点接地方式的重点发展方向。但对中性点经消弧线圈接地方式而言，目前的继电保护技术已具备瞬时跳闸和可待负荷转移后跳闸等选择性跳闸功能，大大降低了传统带故障运行2 h引发的风险。从技术经济角度看，配电网中性点接地选择依据重点在于配电网网架完善度、架空线路与电缆线路并存度和绝缘水平等。因此，对网架完善度、线路绝缘水平相对较高，而架空线路与电缆线路并存度较低的配电网，故障时自动转移负荷，快速切除故障为首选，建议将单相接地故障电流100 A作为划分点，介于10~100 A时，优先考虑选用中性点经消弧线圈接地方式；大于100 A时则选用中性点经小电阻接地方式^[17]。反之，保证城市高供电可靠性为首选，建议将单相故障电流150 A作为划分点，选择方法同上。与采用消弧

线圈相比，采用自动跟踪补偿的消弧线圈能使单相接地故障转换为相间故障的概率明显降低。事故变电站10 kV出线为架空线路和电缆混合型，网架完善度、线路绝缘水平都较低，系统总电容电流约为104 A，经现场实际考察和综合决策，在事故变电站接地变压器与大地间装设可自动调谐的消弧线圈装置，经运行实测，效果较好。

4.3 调度处理建议

间歇电弧接地与普通金属接地的主要差别在于电弧接地电阻是非线性的，因此电弧复燃引起的接地点电压会出现较大范围的波动。普通金属接地故障，故障相电压一般接近零，而间歇电弧接地过电压单相故障特征电压（即可明显观察到的较大的波动电压）一般大于200 V^[17]（图6中的B相波动电压超过200 V的有4次，最高达到400 V）；SCADA系统频繁出现接地动作/复归等信号（见图8）表明存在不稳定接地；文献[18]中发生间歇电弧接地过电压事故时，消弧线圈出现位移越限或装置故障等信号。综合考虑，可将故障相特征电压大于200 V超过3次（低于3次可视为电弧已熄灭）、SCADA系统频繁接地/复归以及消弧线圈位移越限等，结合正常相电压变化情况作为调度员综合判断间歇电弧接地过电压的参考依据。

在判明为间隙电弧接地情况下，授权值班调度员应急处置权利：逐条拉开供电线路以至母线，当拉开正常线路，接地信号未消失时，不应再合上该线路开关，以免二次冲击扩大事故，直至接地消除，隔离故障设备后再对正常设备逐条恢复送电，以降低间隙性电弧接地过电压对系统绝缘的伤害。安装小电流接地选线装置^[19-20]，出现接地信号时，优先拉开提示线路，缩短故障查找时间。

5 结束语

间歇性电弧接地过电压会造成电力设备的损坏，更严重的是过电压对配电网绝缘整体造成积累性损伤，给电网安全运行留下难以消除的隐患。为了避免类似事故的发生：技术上针对网架

较完善、线路绝缘水平较高的配电网，建议选取单相接地故障电流100 A作为中性点接地方式的选择依据，并侧重快速切除故障；反之，选取150 A作为中性点接地方式的选择依据，侧重高供电可靠性；管理上建议将单相故障特征电压大于200 V超过3次、SCADA系统频繁接地/复归以及消弧线圈位移越限等作为值班调度员综合判断间歇性电弧接地过电压的参考依据，同时赋予值班调度员应急处置权利，防止事故扩大化；在发生间歇性电弧接地过电压事故后，部分设备虽未直接损坏，但可能存在积累性损伤，应提前做好抢修准备。

参考文献

- [1] 董振亚. 城市配电网中性点接地方式的发展和改进[J]. 中国电力, 1998(8): 38-41.
- [2] 冯宝玥. 中压电网中性点接地的研究[D]. 济南: 山东大学, 2006.
- [3] 陈亚. 中压电网中性点接地方式运行特性的研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2004.
- [4] 顾荣斌. 小电流接地电网单相电弧接地故障分析与仿真研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- [5] 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决策[J]. 高压电器, 2010, 46(1): 72-75.
- [6] 毛卫华. 弧光接地过电压的危害及消弧措施[J]. 电气应用, 2008, 27(10): 49-51.
- [7] 王健. 消除弧光接地过电压的方法研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2004.
- [8] 贾飞. 乌海电网单相间歇性电弧接地过电压分析与防范[D]. 保定: 华北电力大学, 2012.
- [9] 石正理. 电弧接地过电压的危害与防治措施[J]. 安徽电力, 2005, 22(1): 14-16.
- [10] GB/T 50064—2014 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范[S].
- [11] 国家电网公司. 国家电网调度控制管理规程[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- [12] 王涛. 新型消弧线圈自动跟踪补偿装置[D]. 济南: 山东大学, 2006.
- [13] 郭清淡. 自动调谐消弧线圈对10 kV系统运行的影响[J]. 电工技术, 2005(4): 8-10.
- [14] 顾毅华. 抑制弧光接地过电压危害的措施[J]. 电工技术, 2009(4): 13-14.
- [15] 唐世宇, 孙渝江, 魏淑琼. 重庆城市配电网中性点接地方式的改进[C]. 全国电网中性点接地方式与接地技术研讨会, 2005: 65-67.
- [16] 高亚栋, 等. 中性点经小电阻接地配电网中弧光接地过电压的研究[J]. 高压电器, 2004, 40(5): 345-348.
- [17] Q/GDW-10-375—2008 中压系统中性点接地方式选用技术导则[S].
- [18] 廖晓辉, 黄冰飞, 周永宝. 10 kV配网单相弧光接地故障及调度处理建议[J]. 上海电力, 2011(3): 245-247.
- [19] 薛永端, 冯组仁, 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.
- [20] 肖白, 束洪春, 高峰. 小电流接地系统单项接地故障选线方法综述[J]. 继电器, 2001, 29(4): 18-23.

(收稿日期: 2015-12-23) **EA**