

DOI: 10.7667/PSPC170495

智能接地配电系统

刘健¹, 芮骏², 张志华¹, 吴飞成², 张小庆¹, 余银刚²

(1. 陕西电力科学研究院, 陕西 西安 710100; 2. 安徽一天电气技术股份有限公司, 安徽 合肥 230088)

摘要: 为了发挥中性点非有效接地配电网供电可靠性高的优越性, 提出了一种通过在变电站配置智能接地装置并在馈线配置具有零序保护功能的配电终端和故障指示器, 将配电网升级为智能接地配电系统的方法。发生单相接地时, 智能接地装置可以迅速将故障相短暂时金属性接地从而可靠熄灭电弧。若为永久性接地故障, 随后控制中性点短暂时投入中电阻以显著增大接地点上游的零序电流并基于配电终端和故障指示器处配置的零序电流保护可靠地实现单相接地选线、定位和隔离。论述了智能接地配电系统的组成和关键技术, 重点论述了通过电阻分级开关应对选相错误并抑制开关操作引起的系统暂态过程的方法。结合实例论证了所建议的方法的可行性和有效性。

关键词: 配电网; 单相接地; 瞬时性单相接地; 熄弧; 永久性单相接地; 选线; 定位

Smart grounding power distribution systems

LIU Jian¹, RUI Jun², ZHANG Zhihua¹, WU Feicheng², ZHANG Xiaoqing¹, YU Yingang²

(1. Shaanxi Electric Power Research Institute, Xi'an 710100, China;

2. Anhui Onesky Electric Technology Company Limited, Hefei 230088, China)

Abstract: To support neutral non-effectively grounded distribution systems to have high reliability of power supply, this paper puts forward an approach of updating distribution system to smart grounding distribution system, of which we install Smart Grounding Control Unit (SGCU) in substation and configure distribution terminal and fault indicator with zero-sequence protection function. When a single phase to ground fault occurs, the SGCU extinguishes the arc immediately by making the faulted phase metallic grounding for a while. In case of a permanent single phase to ground fault, a resistor is connected to the neutral to significantly increase the zero-sequence current of grounding point up-stream so as to reliably locate and isolate the position of the single phase to ground fault by using zero-sequence current protection installed at distribution terminal and fault indicator. The composition and key technologies of a smart grounding distribution system are described. The innovation of correcting the error of grounding phase identification and reducing the transient process during grounding switching by soft switching control is detailed. An example is given to show the feasibility and effectiveness of the proposed methodology.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China (No. U1766208)

Key words: distribution systems; single phase to ground fault; intermittent single phase grounding; arc extinction; permanent single phase grounding; fault selection; fault location

0 引言

我国配电网大都采用中性点非有效接地方式, 其具有供电可靠性高的优点。据统计, 单相接地故障占配电网线路故障总数的70%以上, 且大部分为瞬时性单相接地, 在中性点非有效接地方式下, 大多数瞬时性单相接地在灭弧后故障现象即可消失; 即使对于永久性单相接地, 中性点非有效接地系统仍可以保持正常的线电压为用户维持供电^[1-3]。

但是, 在长期运行实践中中性点非有效接地配电系统也暴露出以下问题:

一方面, 消弧线圈仅仅补偿工频电容电流, 而实际通过接地点的包含大量的高频电流及阻性电流^[4], 即使把故障点工频电流补偿到满足国标要求的5 A以下, 仍可能维持电弧的持续燃烧, 维持供电容易造成事故扩大化、引发火灾和人身伤害等灾难性后果。

另一方面, 中性点非有效接地配电系统在发生单相接地故障时, 由于故障信号小, 单相接地选线和定位都比较困难。长期以来, 在单相接地故障处

理方面的研究和关注点大都聚焦在单相接地选线和定位方面,已经取得了一些研究成果:如利用稳态量的方法、基于故障暂态信号的方法、行波法、S注入法和中性点投入中电阻倍增零序电流的方法等^[5-17]。

事实上,单相接地故障选线和区段定位并非单相接地故障处理的全部内容,重要的处理工作还包括:及时可靠地熄灭电弧以避免故障的影响扩大化,有效抑制过电压以安全的方式维持用户供电。

为了解决消弧线圈不能可靠熄灭瞬时性单相接地电弧问题,一些企业开发出基于可分相操作开关、在单相接地时将接地相直接金属性接地的消弧柜类产品,通过破坏电弧电压达到熄灭电弧的目的^[18-19],但是存在下列缺陷:一是一旦选错相将导致相间短路接地;二是在将接地相直接金属性接地和断开的过程中,有时会引起强烈的暂态过程,不仅可能造成互感器等电气设备的损坏,还有可能引起继电保护装置误动^[20]。

针对上述需求,本文提出智能接地配电系统的概念,综合了消弧柜熄弧与中性点投入中电阻进行单相接地选线、定位和隔离的优点,既能可靠熄灭电弧又有助于解决单相接地选线、定位和隔离困难问题,关键在于应用了一种利用电阻分级开关进行接地和断开操作的方案,不仅能避免选错相引起两相短路接地的后果,而且可以有效抑制开关操作引起的系统暂态过程。

1 智能接地配电系统基本原理

1.1 智能接地配电系统的组成

智能接地配电系统是在中性点非有效接地配电系统中,通过在变电站配置智能接地装置、在馈线配置具有零序保护功能的配电终端和故障指示器实现的。

其中,智能接地装置的作用主要是根据需要 will 将接地相短暂接地以可靠熄灭故障点电弧以及将中性点经中电阻短暂接地以方便馈线上的零序保护装置进行单相接地故障选线、定位和隔离。

实际应用中,智能接地装置宜在变电站每段 10 kV 母线配置一台,也可以在配网系统中的可接入点配置。

智能接地装置的结构组成如图 1 所示,其由下列主要元件构成:电阻分级接地开关(由开关 K1 和 K2、电阻 R 构成),接地变压器 JDB,随调式脉冲消弧线圈 XHXQ,中电阻 R_z 及其投切单相接触器 K,电压互感器 PT 及其熔断器 F,主控制器,接入断路器 D 等。其中,接地变为可选配置,若站内已有接地变则可直接利用而不必在智能接地装置中冗

余配置;脉冲消弧线圈也为可选配置,可以直接利用变电站内的消弧线圈。接入断路器 D 亦为选配,也可利用变电站出线断路器构成,用于当智能接地装置内部故障时快速切除智能接地装置。

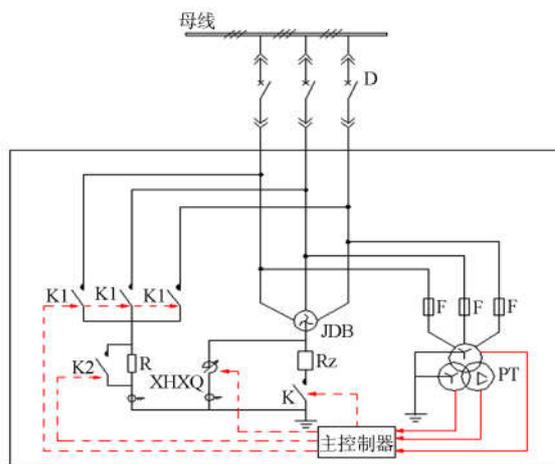


图 1 智能接地装置的组成

Fig. 1 Constitution of a smart grounding unit

1.2 智能接地配电系统工作逻辑

智能接地配电系统的工作逻辑为:

当检测到零序电压超过阈值,则表明智能接地配电系统内发生了单相接地故障。

为了尽快熄灭电弧以避免危害升级,智能接地装置迅速判断出接地故障相,并控制故障相电阻分级接地开关将故障相金属性接地,从而可靠熄灭电弧。

经短暂延时 T_1 (T_1 一般可设置为 1~3 s) 后,智能接地装置控制故障相接地开关断开,并检测零序电压是否超过阈值,若否,则表明这是一次瞬时性单相接地,已经处理完毕可以恢复正常运行;若是,则表明这是一次永久性单相接地,需继续进行后续处理。

对于永久性单相接地的情形,智能接地装置控制短暂(一般只需几秒钟即可)投入中性点中电阻以增大接地点上游的零序电流,此时基于馈线上配置的具有零序保护功能的配电终端和故障指示器就能可靠地实现单相接地选线、定位和隔离。随后,智能接地装置控制中性点投入的中电阻退出。

1.3 智能接地装置与配电终端配合永久性单相接地故障定位示例

例如,对于图 2 所示的配电网,虚线内为智能接地装置,变电站和馈线分段处均配置了具有零序保护功能的智能配电终端,从馈线末端(分支)到母线方向其延时时间分别为 0 s、 ΔT 、 $2\Delta T$ 和 $3\Delta T$ 。

假设如图 2 发生永久性 C 相单相接地,智能接

地装置首先将 C 相金属性接地以熄灭电弧。延时一段时间后, 断开 C 相金属性接地, 因是永久性故障, 零序电压信号再次出现, 智能接地装置在中性点投入中电阻倍增零序电流, 单相接地位置上游的零序保护全部启动。 ΔT 后上游距离接地位置最近的零序保护动作跳闸, 上游其余零序保护返回, 随后中性点投入的中电阻退出。

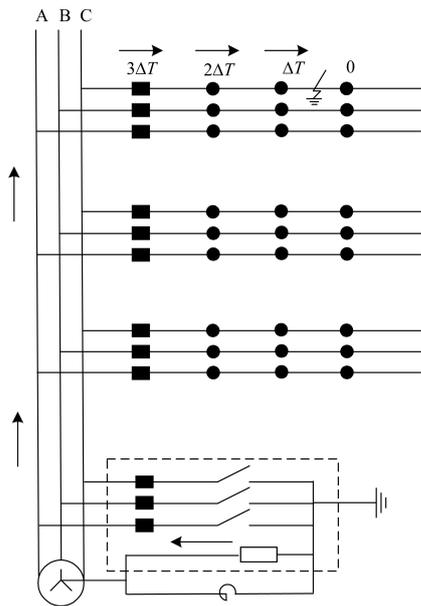


图 2 永久性单相接地故障处理示意图

Fig. 2 Procedure of a permanent single phase grounding fault processing

2 智能接地装置单相接地选相防误措施及校正

智能接地装置在将故障相金属性接地时, 若单相接地选相错误, 将导致相间短路接地。

接地故障相的电阻分级接地开关是实现选相错误防护及校正的有效手段。

X相电阻分级接地开关的组成如图3所示。其中, K1、K2为开关, R为过渡电阻(一般可取50~100 Ω)。

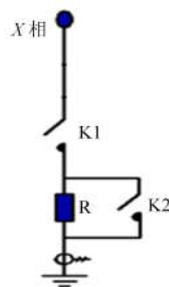


图 3 X相接地软开关的构成

Fig. 3 Soft switching of X-phase to ground

当需要将X相金属性接地时, 先控制合开关K1, 将该相过渡到经电阻 R 接地, 然后再控制合开关K2, 实现 X 相金属性接地。

当需要断开 X 相金属性接地时, 先控制分开关K2, 将该相过渡到经电阻 R 接地, 然后再控制分开关 K1, 实现相与地彻底断开。

以将 B 相单相接地误选为 A 相单相接地为例, 当控制智能接地装置 A 相“软导通”接地时, 先控制 A 相的开关 K1 合闸, 将该相过渡到经电阻 R 接地, 此时由于实际接地相为 B 相, 会导致 A、B 两相经电阻 R 相间短路接地, 由于 R 的限流作用, 短路电流既不造成危害(最大一般不超过 100~200 A), 又足以被可靠检测出, 当控制器检测到在 A 相的开关 K1 合闸导致发生相间短路接地后立即将 A 相的 K1 打开, 有效实现选错相时的安全防护。只有当 K1 合闸后未检测到相间短路接地特征时才执行下一步控制合 A 相的开关 K2, 最终实现 A 相金属性接地。

若控制 A 相 K1 合闸后检测到“合错相”, 在立即将 A 相的 K1 打开后, 可继续尝试将其他相别的 K1 合闸, 重复上述过程, 最终正确地将接地相金属性接地。

3 智能接地装置动作引起的系统暂态过程分析

3.1 接地开关闭合时的系统暂态过程分析

在判断出接地故障相以后, 智能接地装置若将接地相开关直接接地, 引起的系统暂态过程可能出现高频电流, 给配电系统带来暂态冲击并对二次设备造成干扰, 接地相开关直接接地时流过接地开关的高频放电电流如图 4(a)所示, 这可以解释采用直接接地的应用案例在故障相接地瞬间有时导致保护动作跳闸的现象。

采用图 3 所描述的电阻分级接地开关技术后, 其在导通接地引起的系统暂态过程中流过接地开关 K1 的高频放电电流如图 4(b)所示, 可见本文采用的电阻分级接地开关技术能有效抑制高频放电电流。

3.2 接地开关打开时的系统暂态过程分析

智能接地装置在将故障相金属接地后再打开时, 若控制接地相开关从金属性接地直接断开, 则可能产生系统中性点低频振荡, 造成健全相过电压和在 PT 一次绕组上产生低频涌流, 损害 PT 或 PT 熔断器, 如图 5(a)所示, 流过 PT 中性点的低频涌流幅值可达 20 A, 且出现多次涌流, 足以烧断额定电流为 0.5 A 的 PT 保护熔断器或破坏 PT 一次绕组。

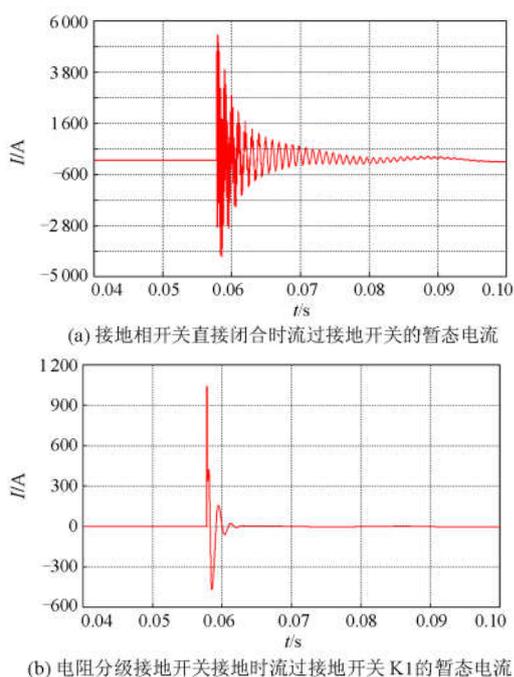


图 4 故障相接地暂态过程

Fig. 4 Transient process of fault-phase to ground

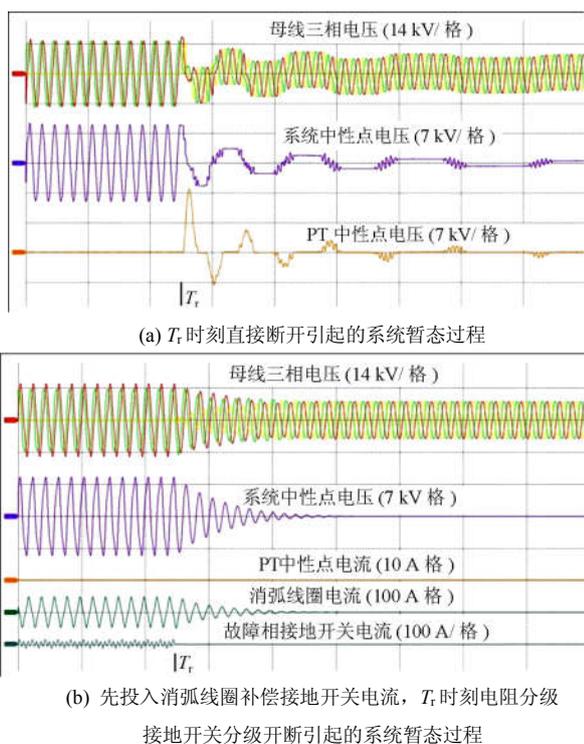


图 5 接地相开断暂态过程

Fig. 5 Transient process of grounded-phase being separated

采用图 3 所描述的电阻分级接地开关技术与随调式消弧线圈配合, 在电阻分级接地开关动作前先用消弧线圈对流过电阻分级接地开关的工频电容电流进行补偿, 再进行电阻分级接地开关断开操作,

电阻分级接地开关断开时, 先控制分开关 K2, 将该相过渡到经电阻 R 接地, 然后再控制分开关 K1, 实现相与地彻底断开, 则能有效抑制暂态过程, 如图 5(b)所示。

4 结论

智能接地配电系统通过在变电站配置智能接地装置和在馈线分段处配置具有零序保护功能的配电终端和故障指示器实现。

在瞬时性单相接地时, 智能接地装置能可靠熄弧, 从而维持安全可靠供电。

在永久性单相接地时, 智能接地装置在中性点投入中电阻倍增零序电流, 配合馈线上具有零序保护功能的配电终端和故障指示器进行单相接地选线、定位和隔离。

智能接地装置中的电阻分级接地开关技术, 不仅能避免选错相引起两相短路接地的后果, 而且可以有效抑制开关操作引起的电力系统暂态过程。

目前已有 120 余套智能接地装置投入运行, 例如某大型钢厂共装有 14 套 10 kV 智能接地柜, 八套 35 kV 智能接地柜, 到目前为止已发生八次单相接地故障, 七次瞬时性故障经过开关接地消弧后恢复了正常运行, 还有一次永久性故障为电缆绝缘损伤, 处理过程中既保障了系统供电的持续性, 又避免了事故的扩大化。

参考文献

- [1] 要焕年, 曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [2] 郭丽伟, 薛永端, 徐丙垠, 等. 中性点接地方式对供电可靠性的影响分析[J]. 电网技术, 2015, 39(8): 2340-2345.
GUO Liwei, XUE Yongduan, XU Bingyin, et al. Research on effects of neutral grounding modes on power supply reliability in distribution networks[J]. Power System Technology, 2015, 39(8): 2340-2345.
- [3] 李景禄, 周羽生. 关于配电网中性点接地方式的探讨[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(8): 85-86, 94.
LI Jinglu, ZHOU Yusheng. Study on neutral grounding modes of distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(8): 85-86, 94.
- [4] 许颖. 对消弧线圈“消除弧光接地过电压”的异议[J]. 电网技术, 2002, 26(10): 75-77.
XU Ying. Dissidence to "the elimination of ground arcing faults caused overvoltage by Peterson's coils"[J]. Power System Technology, 2002, 26(10): 75-77.
- [5] 薛永端, 李天友, 李伟新, 等. 小电流接地故障暂态分析及区段定位新方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(23): 101-107.
XUE Yongduan, LI Tianyou, LI Weixin, et al. A novel

- method of transient analysis and faulty section location for single-phase earth fault in non-effectively earthed network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(23): 101-107.
- [6] 蔡颖倩, 王钢, 樊晨曦, 等. 利用故障全过程信息的消弧线圈接地系统间歇性接地故障选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(9): 1-8.
CAI Yingqian, WANG Gang, FAN Chenxi, et al. Fault line selection based on information in the whole process of intermittent earth fault in resonant grounding distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(9): 1-8.
- [7] 宋金钊, 李永丽, 石峥, 等. 一种新的谐振接地系统单相接地故障选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(6): 9-15.
SONG Jinzhao, LI Yongli, SHI Zheng, et al. A fault line selection method for resonant earthed system with high accuracy[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(6): 9-15.
- [8] 赖平, 周想凌, 邱丹. 小电流接地系统暂态电流频率特性分析及故障选线方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(4): 51-57.
LAI Ping, ZHOU Xiangling, QIU Dan. Research on transient-current frequency analysis and faulty line detecting method in indirectly grounding power system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(4): 51-57.
- [9] 王吉庆, 沈其英. 中性点经消弧线圈接地系统的单相接地故障选线[J]. 电网技术, 2003, 27(9): 78-79.
WANG Jiqing, SHEN Qiyang. Single phase grounded line detection for power network with arc suppression coil grounding[J]. Power System Technology, 2003, 27(9): 78-79.
- [10] 樊淑娴, 徐丙垠, 张清周. 注入方波信号的经消弧线圈接地系统故障选线方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(4): 91-95.
FAN Shuxian, XU Bingyin, ZHANG Qingzhou. A new method for fault line selection in distribution system with arc suppression coil grounding with square-wave signal injection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(4): 91-95.
- [11] 王慧, 范正林. “S 注入法”与选线定位[J]. 电力自动化设备, 1999, 19(3): 18-20.
WANG Hui, FAN Zhenglin. The “S signal injection method” and its application in single phase-to-earth fault line identification and fault point location[J]. Electric Power Automation Equipment, 1999, 19(3): 18-20.
- [12] 陈禾, 陈维贤. 配电线路的零序电流和故障选线新方法[J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 49-52.
CHEN He, CHEN Weixian. Zero-sequence current and new method of fault line location in distribution network[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1): 49-52.
- [13] 王倩, 王保震. 基于残流增量法的谐振接地系统单相接地故障选线[J]. 青海电力, 2010, 29(1): 50-52.
WANG Qian, WANG Baozhen. Single phase earth fault line selection of resonant grounding system based on residual current incremental method[J]. Qinghai Electric Power, 2010, 29(1): 50-52.
- [14] 薛永端, 冯祖仁, 徐丙垠. 中性点非直接接地电网单相接地故障暂态特征分析[J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(2): 195-199.
XUE Yongduan, FENG Zuren, XU Bingyin. Analysis of transient characteristics of signals phase earth fault in non-solidly earthed network[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2004, 38(2): 195-199.
- [15] 索南加乐, 李宗朋, 王莉, 等. 基于频域参数识别方法的配电网单相接地故障选线[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(23): 93-97, 125.
SUONAN Jiale, LI Zongpeng, WANG Li, et al. Fault line selection in distribution networks based on parameter identification method in frequency domain[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(23): 93-97, 125.
- [16] 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.
- [17] 李泽文, 郑盾, 曾祥君, 等. 基于极性比较原理的广域行波保护方法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(3): 49-53.
LI Zewen, ZHENG Dun, ZENG Xiangjun, et al. A wide-area traveling wave protection method based on polarity comparison principle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(3): 49-53.
- [18] 吴旭涛, 艾绍贵, 樊益平. XHG 消弧消谐选线过电压保护装置的现场试验研究[J]. 宁夏电力, 2007(2): 14-18, 41.
WU Xutao, AI Shaogui, FAN Yiping. Field test study on XHG arc extinction, harmonic eliminating and line selection over voltage protective device[J]. Ningxia Electric Power, 2007(2): 14-18, 41.
- [19] 合肥思源电气有限公司. 一种智能型消弧消谐装置: 中国专利, CN201620587381.2[P]. 2016-11-23.
- [20] 孙嘉宁. 中压电网系统消弧、消谐、单相接地故障综合保护新方法及智能综合保护装置[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2007.

收稿日期: 2017-04-07; 修回日期: 2017-06-01

作者简介:

刘健(1967—), 男, 博士, 教授, 总工程师, 博士生导师, 百千万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

芮骏(1977—), 男, 硕士, 主要研究方向为过电压与接地技术;

张志华(1987—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为配电网及其自动化技术。

(编辑 周金梅)