

基于 10 kV 配电网 PT 频繁故障的仿真与改进措施研究

李雷¹, 罗容波¹, 王岩¹, 傅正财²

(1. 广东电网公司佛山供电局, 广东 佛山 528000;

2. 上海交通大学电气工程系电力传输与功率变换控制教育部重点实验室, 上海 200240)

摘要: 为了准确分析 10kV 母线并列电压互感器 (PT) 熔断器频繁熔断的原因, 以某地区 110kV 变电站为例, 首先对其 PT 频繁故障原因进行分析, 然后根据该站的实际参数, 利用 ATP/EMTP 仿真软件进行了模型仿真研究。分析表明, 电网线路对地电容放电产生的暂态冲击电流是导致该变电站熔断器发热, 从而引起母线 PT 频繁故障的直接原因, 同时发现三组并列 PT 励磁特性不同引起暂态冲击电流分布不均亦是熔断器熔断的重要原因。基于此, 提出在 PT 中性点加装消谐器或改用 4PT 接线方式等改进措施。仿真结果表明, 上述措施对限制单个 PT 的暂态冲击电流具有显著效果。但当母线有多 PT 并联时, 需同时考虑各个 PT, 以杜绝任何 PT 的熔断器因过流被熔断。

关键词: 配电网; 电压互感器; 熔断器; 故障仿真; 暂态电流

Simulation analysis and improved measures for preventing potential transformer fault in 10 kV distribution networks

LI Lei¹, LUO Rong-bo¹, WANG Yan¹, FU Zheng-cai²

(1. Foshan Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Company, Foshan 528000, China;

2. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education, Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: To analyze the reason why the 10 kV potential transformer (PT) frequently fused, taking a 110 kV transformer substation for example, it summarizes the theories firstly. Then, simulation of a power system model is performed according to the actual parameters of this substation using the ATP / EMTP simulation software. It concludes that the transient inrush current caused by ground capacitor discharge is a direct reason for frequent fault of the 10 kV PT. Also, the unbalanced distribution of the inrush current caused by different excitation characteristics of PTs, is an important reason for its fuse. Based on this case, it proposes several improvements such as installing resonance eliminator in the neutral points of PT, or switching to 4PT wiring. The simulation shows great improvement on limiting the transient inrush current of a single PT. But when several PTs are paralleled, the condition of each PT should be accounted in order to eliminate any possibility of PT being fused by overcurrent.

Key words: distribution network; voltage transformer; fuse; fault simulation; transient current

中图分类号: TM74 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)14-0132-06

0 引言

目前, 我国 10 kV 配电网中性点接地主要采用小电流接地方式, 包括中性点不接地和经消弧线圈接地^[1-2]。这种系统虽然供电可靠性较高, 但单相接地时由于非故障相电压升高, 容易发生高幅值的弧光接地过电压。同时母线上的电压互感器 (PT) 通常需要将中性点直接接地, 当发生合空载母线、单相接地消失或者系统负荷剧烈变化等情况时, PT 励磁电感可能与系统对地电容形成谐振, 从而引发过

电压现象, 造成系统过电压和 PT 高压绕组中的过电流, 严重影响系统的安全运行^[3-4]。

过去由于 10 kV 配电网线路对地电容小, 与 PT 电感匹配易形成铁磁谐振, 很多文献都是以此观点进行分析^[5-8]。随着 10 kV 电网的发展, 系统的对地电容已经避开了铁磁谐振区域, 但 PT 故障仍时常发生, 这就需要进一步分析。已见各文献多是以单个 PT 进行分析, 鲜有文献对并列运行的 PT 故障原因进行研究。本文针对某地区 110 kV 变电站 10 kV 母线三组并列运行 PT 的熔断器频繁故障情况进

行详细分析, 并提出合理的改善措施, 以期通过反措降低这种故障的发生率。

1 变电站基本情况

110 kV 变电站电压等级为 110 kV/10 kV。#2 主变型号为 SZ9-50000/110, Y/△接线, 空载电流 0.8%, 空载损耗 30 kW, 短路电压 16%, 短路损耗 150 kW。该主变变低连接 2 条母线, 共包含 10 条 10 kV 出线, 估算每相对地电容量约为 18 μF。两条母线经真空断路器连接并列运行, 并经 ZN05A 智能型电抗器接地综合保护装置 (以下简称 ZN05A 装置) 接地, 该装置等效于母线并联一个 PT (下称 ZN05A 装置 PT) 和一个带选相开关的电感, 其电感值为 6.4 mH。两母线上各装设一组 PT, 分别为 52PT、55PT。依据 PT 实际的伏安特性曲线, 52PT 铁心最容易饱和, 55PT 次之, ZN05A 装置中的 PT 最难饱和。当线路发生单相接地故障恢复后, 52PT 熔断器首先熔断, 55PT 熔断器稍后熔断。

2 PT 一次侧故障原因分析

PT 一次熔断器熔断甚至发生其本体烧毁等故障, 除去 PT 本身的质量问题 (如 PT 内部发生单相接地故障) 以及保护的配置问题 (如 PT 二次回路发生短路), 主要有以下两方面的原因: 一个是电网发生铁磁谐振, 导致 PT 高压侧过电流, 二是瞬时性接地故障恢复后电网对地电容通过 PT 放电造成^[9]。

(1) 铁磁谐振

在中性点不接地系统中, 由于 PT 励磁电感和系统对地电容参数匹配, 在一定激发条件下, 可能会导致系统出过电压, 产生铁磁谐振现象, 此时铁芯处于高度饱和状态, 其具体表现形式可能是相对地电压升高, 励磁电流增大, 低频振荡等^[10-13]。根据 Peterson 的试验结论可以划分 4 种不同的情况^[14]:

①当 $X_{CO}/X_m=0.01\sim 0.07$ 时, 发生分频谐振;

②当 $X_{CO}/X_m=0.07\sim 0.55$ 时, 发生基频谐振;

③当 $X_{CO}/X_m=0.55\sim 2.8$ 时, 发生高频谐振

④当 $X_{CO}/X_m\leq 0.01$ 或 $X_{CO}/X_m\geq 2.8$ 时, 系统不发生铁磁谐振。

其中: X_{CO} 为系统每相对地容抗; X_m 为 PT 绕组在额定线电压作用下的励磁感抗。

(2) 瞬时性接地故障恢复后电网对地电容通过 PT 放电

电磁谐振并不是 PT 一次熔断器熔断的唯一原因, 电网发生瞬时性接地故障时系统三相对地电容在接地过程中发生的充放电也是造成一次保险熔断的原因之一。以单相接地故障为例, 其图形如图

1 所示, 分析原因如下。

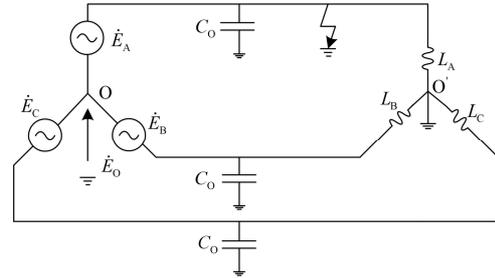


图 1 电力系统等值电路图

Fig. 1 Equivalent circuit diagram of the power system

如图 1 所示, 当电网的中性点处于不接地方式运行时, Y₀接线的 PT 高压绕组 L_A、L_B、L_C, 就成了电网中三相对地的唯一通道。当电力系统正常运行时, 线路对地电容所带总电荷之和为零; 当电力系统发生故障时, 非故障相的对地电容将充上和线电压相对应的电荷, 接地故障消失后, 非故障相将恢复至正常相电压。对地电容 C₀ 中多余的电荷只能通过 PT 高压绕组泄放, 相当于一个直流电源作用在带有铁芯的电感线圈上。在这一瞬变过程中, 如果线路长度较长, 线路对地电容大, PT 高压绕组中将会流过一个幅值很高的直流饱和电流, 使 PT 铁芯严重饱和, 这时在工频电压作用下将产生很大的暂态冲击电流, 造成 PT 高压侧熔断器的熔断。

电网间歇性的瞬时单相接地故障就相当于以上过程的反复, 造成的冲击电流就相当于几次累计后的效果, 使 PT 高压侧熔断器更容易熔断。为了更好地论证线路对地电压不平衡对电网的影响程度及验证改进措施, 利用 ATP/EMTP 仿真软件建立系统模型进行论证和分析。

3 ATP/EMTP 仿真计算

3.1 模型建立

按照变电站的实际接线方式建立该 110 kV 站 10 kV 2M、5M 母线的仿真模型, 如图 2 所示。由于 2 M、5 M 母线经真空断路器连接并列运行, 故可等效为一条母线。

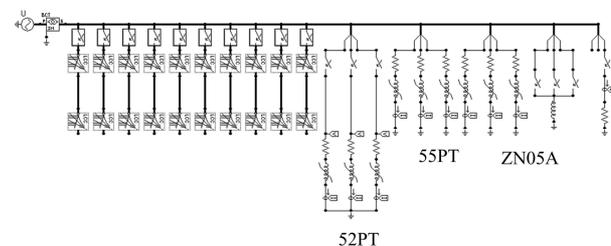


图 2 110 kV 禄堂变电站 2M、5M 母线仿真模型

Fig. 2 Simulation model of 2M, 5M busbar of 110 kV Lutang substation

为尽可能模拟实际配电网的运行情况，变压器模型采用 BCTRAN 模型，参数设置依变电站的实际情况设定。电缆架空线模型采用 LLC 模型，为简化处理，每相电缆和架空线均采取相同的参数，电缆采用单芯电缆的 π 型模型，导线电导率均为 $1.5E-8 \Omega \cdot m$ 。架空线采用 Bergeron 模型，直流电阻为 $0.1181 \Omega / km$ ，按实际线路情况输入不同线路的长度，得到各个出线的电缆和架空线串联电阻模型模型。3 组 PT 采用非线性电感串联电阻模型，ZN05A 装置电抗值设为 $6.4 mH$ 。

3.2 仿真计算

(1) 不考虑 ZN05A 装置投入的情况

模拟某条出线在 A 相 $0.2 s$ 时发生弧光接地，弧道电阻设置为 5Ω ，在 $0.5 s$ 时弧光接地消除，仿真图形如图 3 所示。在此全过程中各 PT 线圈中电流的变化过程为：在 $0-0.2 s$ 期间，系统处于正常运行状态，PT 一次绕组电流小于 $10 mA$ ；在 $0.2 s$ ，A 相发生弧光接地，PT 一次绕组电流依然小于 $10 mA$ ；在 $0.5 s$ ，弧光接地故障消除，激发低频振荡，三组 PT 中励磁电流发生异常增大，其中励磁特性较差的 52PT、55PT 一次绕组电流均超过 $0.75 A$ ，振荡频率接近 $2.7 Hz$ ，幅值随时间衰减极为缓慢，长达 $10 s$ 以上。三组 PT 上的电流分布呈现为励磁特性好的 PT 上电流小，励磁特性差的 PT 上电流大的特点。

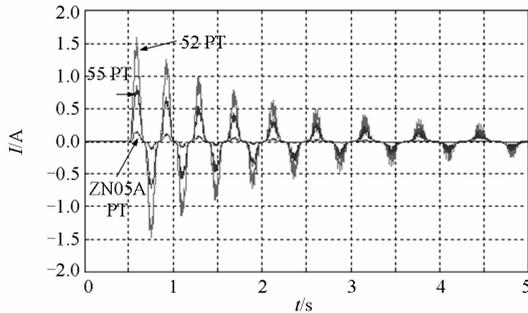


图 3 各 PT 一次绕组电流变化

Fig. 3 Primary winding current change of PTs

(2) 考虑 ZN05A 装置投切的情况

假定其过程为 $0.2 s$ 单相接地、 $0.5s$ 装置投入、 $0.7 s$ 单相接地消除、 $1s$ 装置切除，仿真图形如图 4 所示。其电流变化如下：在 0 至 $0.2 s$ 期间，系统处于正常运行状态，PT 一次绕组电流小于 $10 mA$ ；在 $0.2 s$ ，A 相发生弧光接地，PT 一次绕组电流依然小于 $10 mA$ ；在 $0.5 s$ ，装置动作，三组 PT 电流没有明显增加；在 $0.7 s$ 单相接地消除，两组 PT 电流也没有明显增加。在 $1 s$ ZN05A 装置切除时，激发低

频振荡，三组 PT 中励磁电流发生异常增加。其中励磁特性较差的 52PT、55PT 一次绕组电流幅值超过 $0.75 A$ ，振荡频率接近 $2.7 Hz$ ，幅值随时间衰减极为缓慢，长达 $10 s$ 以上。电三组 PT 上的电流分布呈现为励磁特性好的 PT 上电流小，励磁特性差的 PT 上电流大的特点。另外将仿真计算的 52PT 电压波形曲线（图 5）与电能质量在线监测装置录得的故障时的电压波形（图 6）对比，两者的波形比较吻合，证明仿真结果准确、可靠。

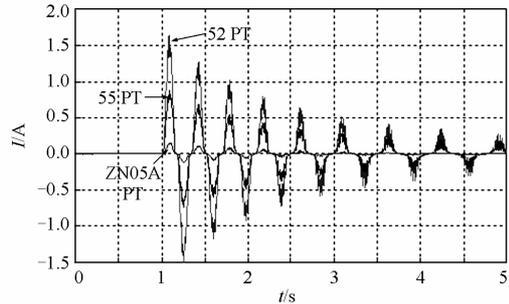


图 4 PT 一次绕组电流变化

Fig. 4 Change of primary winding current

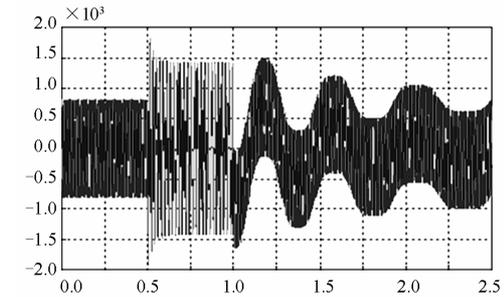


图 5 PT 电压变化情况

Fig. 5 Changes of PT voltage

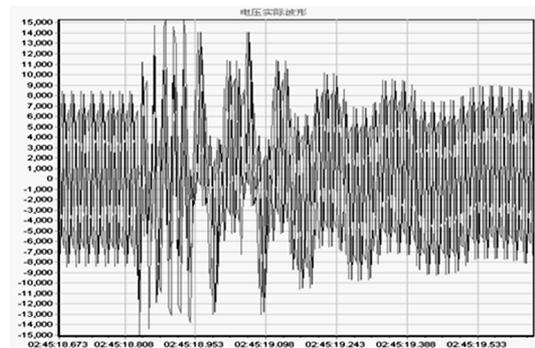


图 6 电能质量在线监测装置录得的电压波形

Fig. 6 Voltage wave recorded from the power quality monitoring device

3.3 原因分析

结合该站实际参数，系统每相对地电容约为 18

μF , 估算三组并列 PT 在额定线电压作用下的励磁感抗约 $80\text{ k}\Omega$, 可计算得 $X_{\text{CO}}/X_{\text{m}} \approx 0.004$ 。由 Peterson 试验结论可知, 此时系统已脱离了谐振区域, 因此 PT 熔断器频繁熔断并非铁磁谐振所致。

以上分析可知, 在线路发生单相弧光接地时, 不会出现大电流流过 PT, 但当弧光接地消失时, 线路电容与 PT 阻抗就发生超低频振荡。电容电流储存的电荷对 PT 放电, 导致较大的电流流过 PT 一次绕组, 并且持续时间较长, 容易引起 PT 熔断器烧断, 此即为瞬时性接地故障恢复后电网对地电容的放电。

当一段母线上接多组 PT 时, 电流与相应电压下 PT 励磁阻抗成反比分配, 阻抗小的 PT 电流大, 熔断器也容易烧断。通过分析图 3、图 4 中三 PT 不同电流大小, 励磁特性好的 ZN05A 装置 PT 流过较小的电流, 而励磁特性较差 52PT、55PT 的流过较大的电流, 这样就可能使 52PT、55PT 熔断器更容易烧掉, 分析结果与实际情况相吻合。

3.4 改进措施分析

基于以上分析, 电网单相接地故障恢复后线路对地电容通过 PT 放电而产生的暂态冲击电流是造成该变电站 10 kV 系统 PT 高压熔断器异常熔断的主要原因, 而三组 PT 励磁特性不同引起暂态冲击电流分布不均亦是其熔断的重要原因。从以上仿真可以看出, ZN05A 装置的投入并不能抑制超低频暂态冲击电流的发生。为此, 在实际应用中, 我们可以选用励磁特性更好的 PT, 并尽量使并列运行的 PT 励磁特性相同或相近, 除此之外还可以从以下几个方面考虑。

(1) 在中性点加装消谐器

为了抑制 52PT 高压侧熔断器熔断, 在 52PT 中性点加装消谐电阻器, 消谐器装置为非线性电阻, 将其代入并进行 A 相在 0.2 s 时发生弧光接地, 0.5 s 时熄灭时的仿真, 得到流过三个 PT 的一次侧电流如图 7 所示。

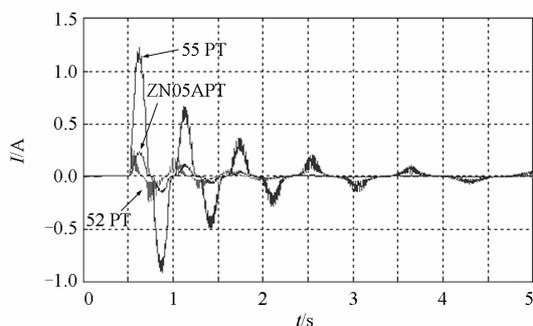


图 7 52PT 加装消谐器流过 PT 一次绕组电流

Fig. 7 Primary winding current of three PTs, after 52PT installed harmonic elimination

比较图 3 和图 7, 52PT 加装消谐装置不仅可以减小电流幅值, 并以更快的速度衰减至很小, 因而可有效解决接地消失时, 在 PT 高压绕组上产生的大电流问题。但与此同时, 55PT 电流幅值有了一定的增长, 为了限制 55PT 电流, 在其一次侧也加装消谐器, 得到仿真图形如图 8 所示。

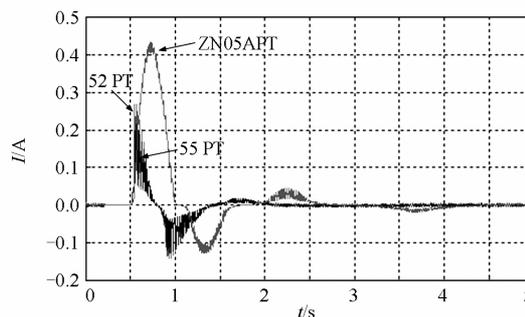


图 8 52PT、55PT 均加装消谐器流过 PT 一次绕组电流

Fig. 8 Primary winding current of three PTs, after 52PT and 55PT installed harmonic elimination

从图 8 可以看出, 在 52PT、55PT 均加装消谐器后, 各 PT 一次绕组电流均已在正常范围内, 说明此方法可靠、有效。

(2) 采用 4PT 接线方式

4PT 接线方式是在 PT 高压侧中性点加装一个单相零序 PT^[25], 正常运行时零序 PT 中并不通过电流。此方法相当于改善了 PT 电压互感器铁心的励磁特性, 增加了零序电抗, 减小原 PT 承受的零序电压, 使其不容易进入饱和区。52PT 中性点加装一个不易饱和的零序 PT 得到 A 相在 0.2 s 时发生弧光接地, 0.5 s 时熄灭时的仿真图形如图 9 所示。

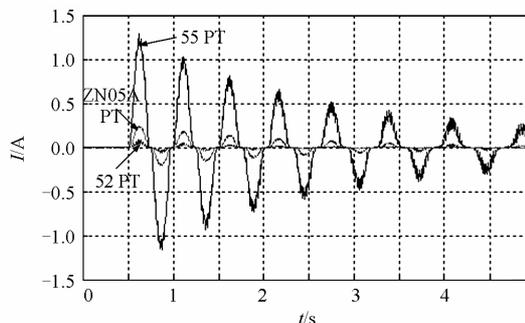


图 9 52PT 采用 4PT 法流过各 PT 一次绕组电流

Fig. 9 Primary winding current of three PTs, after 52PT using 4PT method

比较图 3 和图 9, 52PT 加装零序 PT 后, 其电流峰值已大幅减小, 表明 4PT 接线方式对限制暂态冲击电流有明显作用。但同时, 55PT 的暂态冲击电流明显变大, 表明 55PT 受其影响也需要同时进行

改造。52PT 和 55PT 均加装零序 PT 的仿真图形如图 10 所示。

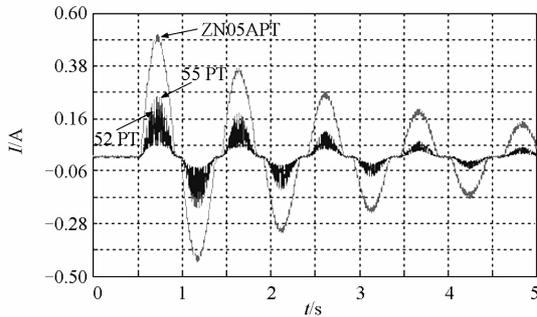


图 10 52PT、55PT 采用 4PT 法流过各 PT 一次电流

Fig. 10 Primary winding current of three PTs, after 52PT、55PT using 4PT method

从图 10 可知，两 PT 都改为 4PT 接线后电流已限制在安全范围内，ZN05A 装置 PT 电流虽有所增大但仍满足其不熔断要求。

以上出现电流分布不均的原因是由于各 PT 在一定电压和频率情况下，PT 阻抗分布不均所造成的。由图 5 可知，单相故障消除后母线电压还将周期性地到达 10 kV，这时容易饱和 PT 的在线电压作用下阻抗将变得更小。为分析其电流分布情况，以母线 A 相为例，如图 11 所示。在总暂态冲击电流 i 一定的情况下，流过各 PT 电流大小与其阻抗成反比，当只向 52PT 串联消谐器或加装零序 PT 时， Z_{55PT} 相比 Z_{52PT} 和 Z_{ZN05A} 明显小，因而电流将更多的流向 55PT，使得 i_{55PT} 相比 i_{52PT} 和 i_{ZN05A} 更大，这可以从图 7 和图 9 的仿真结果看出；而当 55PT 也加装消谐器或零序 PT 时，三个 PT 阻抗相差已不大，故电流更均衡。

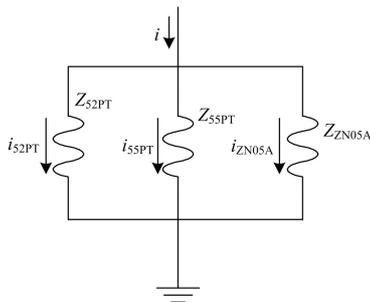


图 11 A 相母线上各 PT 一次电流

Fig. 11 Primary winding current of three PTs of A phase bus

因此，但当母线有多 PT 并联时，需同时考虑各个 PT，使各 PT 加装消谐器或零序 PT 后，能在振荡频率和线电压下保持 PT 连同串联器件的总阻抗尽可能相等，防止暂态电流集中于某一 PT，以杜绝任何 PT 的熔断器因过流被熔断。

(3) 其他改进措施

在 PT 二次侧安装阻尼电阻，相当于在变压器高压侧 Y_0 接线绕组上并联一个电阻，正常运行时，零序电压绕组所接的电阻不会消耗能量^[3,15]。在实际应用时，需考虑到阻尼电阻的容量要求，当阻尼电阻太小时，PT 过载现象严重，可能使电阻本身因过热而烧坏，因而需使用其他一些方法加以克服，设计较为复杂。另外，系统还可以在设计时采用中性点经消弧线圈接地的方式。

4 结论

本文通过对某地区 110 kV 变电站 10 kV 母线 PT 熔断器熔断的原因进行了理论分析和仿真研究，得出如下结论：

1) 当线路发生单相接地消除时，故障相电压突然上升，另外两相电压突然下降，电压存在阶跃分量，母线存在从一个稳态向另一个稳态过渡，线路电容电荷只能通过 PT 一次释放到地，必然造成 PT 感抗和线路对地电容容抗振荡，本案例频率低至约 2.7 Hz，引起了熔断器熔断。

2) 如果存在多组 PT 并联接在母线上，励磁阻抗大的 PT 分流小，熔断器不容易熔断，励磁阻抗小的 PT 分流大，熔断器容易熔断，这与实际运行中 52PT、55PT 熔断器熔断，而 ZN05A 装置 PT 励磁特性好，没有发生熔断器熔断的情况吻合。因此并列运行 PT 尽量选用励磁特性相同或相近的 PT，以避免电流过于集中于某 PT。

3) 经过仿真分析，ZN05A 装置的投入并不能抑制超低频暂态冲击电流的发生，解决这类缺陷的方法有四：更换励磁特性好的 PT；在 PT 中性点安装消谐器；采用 4PT 接线方式；在 PT 二次侧接入阻尼电阻。

4) 在多 PT 并列运行的母线中，应慎用只在单个 PT 上加装消谐器或 4PT 接线方式的方法，而需同时考虑各个 PT，以杜绝任何 PT 的熔断器因过流被熔断。

参考文献

[1] 苏继锋. 配电网中性点接地方式研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(8): 141-148.
 SU Ji-feng. Research of neutral grounding modes in power distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(8): 141-148.

[2] 朱珂, 裴佑楠, 陈晨, 等. 自适应控流型故障选线方案[J]. 电工技术学报, 2009, 24(8): 174-182.
 ZHU Ke, PEI You-nan, CHEN Chen, et al. Self-adaptable and current controllable faulted line identification

- scheme[J]. Transactions of China Electrochemical Society, 2009, 24(8): 174-182.
- [3] 周浩, 余宇红, 张利庭, 等. 10 kV 配电网铁磁谐振消谐措施的仿真比较研究[J]. 电网技术, 2005, 29(22): 28-38.
ZHOU Hao, YU Yu-hong, ZHANG Li-ting, et al. Comparative study on ferroresonance elimination measures in 10 kV power distribution system by system by simulation method[J]. Power System Technology, 2005, 29(22): 28-38.
- [4] 武万才, 吴志勇, 边疆. 地区电网电磁式电压互感器烧损和高压熔丝熔断原因分析[J]. 高压电器, 2011, 47(3): 87-88.
WU Wan-cai, WU Zhi-yong, BIAN Jiang. Analysis of potential transformer burning-out and fuse's blowing in local power system[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(3): 87-88.
- [5] 司马文霞, 郑哲人, 杨庆, 等. 用参数不匹配混沌系统的脉冲同步方法抑制铁磁谐振过电压[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 218-225.
SIMA Wen-xia, ZHENG Zhe-ren, YANG Qing, et al. Suppressing the ferroresonance overvoltage by impulsive synchronization of chaotic systems with parameter mismatched[J]. Transactions of China Electrochemical Society, 2012, 27(6): 218-225.
- [6] 吴骏, 卢刚. 小电流接地系统单相接地与谐振状态辨识技术[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(13): 144-147, 150.
WU Jun, LU Gang. Virtual grounding identification technology in neutral point non-effectively grounded system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(13): 144-147, 150.
- [7] 季涛. 利用电磁式电压互感器实现小电流接地系统行波故障定位和选相[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 172-178.
JI Tao. Study of the fault location and fault phase position selection based on traveling waves using electromagnetic voltage transformer in neutral non-effective grounding system[J]. Transactions of China Electrochemical Society, 2012, 27(8): 172-178.
- [8] 滕永禧, 许明, 李向军, 等. 10 kV TV 高压熔丝频繁熔断的分析[J]. 高电压技术, 2008, 34(1): 204-206.
TENG Yong-xi, XU Ming, LI Xiang-jun, et al. The analyses on frequently rated of fuse in 10 kV TV[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(1): 204-206.
- [9] 王圻, 何正友, 张姝. 基于零序电荷-零序电压关系的谐振接地系统单相接地故障特征分析[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(11): 18-24.
WANG Qi, HE Zheng-you, ZHANG Shu. Characteristics analysis of single-phase ground fault in resonant grounding system based on zero-sequence charge-voltage relationship[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(11): 18-24.
- [10] 林莉, 王军兵, 唐凤英, 等. 10 kV 电压互感器损坏的仿真计算研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(17): 51-55.
LIN Li, WANG Jun-bing, TANG Feng-ying, et al. Simulation and computational analysis on potential transformer damage in 10 kV system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(17): 51-55.
- [11] 周丽霞, 尹忠东, 郑立. 配网 PT 铁磁谐振机理与抑制的试验研究[J]. 电工技术学报, 2007, 22(5): 153-158.
ZHOU Li-xia, YIN Zhong-dong, ZHENG Li. Research on principle of PT resonance in distribution power system and its suppression[J]. Transactions of China Electrochemical Society, 2007, 22(5): 153-158.
- [12] 王明钦, 陈维江, 李永君, 等. 油田 35 kV 系统电压互感器高压熔断器异常熔断故障的抑制措施[J]. 电网技术, 2012, 36(12): 283-288.
WANG Ming-qin, CHEN Wei-jiang, LI Yong-jun, et al. A countermeasure to deal with abnormal fusing of high voltage fuse for potential transformer in 35 kV oilfield power distribution system[J]. Power System Technology, 2012, 36(12): 283-288.
- [13] IRAVANI M R, CHAUDHARY A K S. Modeling and analysis guidelines for slow transients-part: the study of ferroresonance[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15(1): 255-265.
- [14] HAROLD A. Transients in power system[M]. New York: John Wiley & Sons, INC, 1951.
- [15] 王世旭, 李法章, 张国红. 小电流接地系统 4PT 消谐接线方式的分析[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(12): 151-154.
WANG Shi-xu, LI Fa-zhang, ZHANG Guo-hong. Analyses of the connection mode of anti-resonance using 4PT in the neutral non-effectively grounded system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(12): 151-154.

收稿日期: 2013-10-13; 修回日期: 2013-12-02

作者简介:

李雷(1987-), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事电力系统电气试验工作; E-mail: hacm@163.com

罗容波(1979-)男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电力系统电气试验及管理工作;

王岩(1974-)男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电力系统电气试验及管理工作。