

# 基于配电网一二次融合成套设备的 接地故障处理方案研究

曾先锋,任百群,宋兵,石勇,朱中华

(南京南瑞继保电气有限公司,江苏南京 211102)

**摘要:**针对单相接地故障检测和快速隔离的难题,提出了基于配电网一二次融合技术的接地故障处理方案。方案通过一二次融合成套设备及小波包暂态零序选线技术,利用来电合闸、无压分闸、合于故障加速跳闸、故障路径优先等策略,有效解决了多分支、多供电方式下单终端选线选段的难题。同时结合现场应用案例,证明了所提方案可以快速实现接地故障区段的定位和隔离,具有普遍的适用性。

**关键词:**小电流接地系统;单相接地;一二次融合;小波包;故障路径优先

**中图分类号:**TM 452 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2022)01-0021-05

**DOI:**10.16527/j.issn.1003-6954.20220105

## Research on Earthing Fault Treatment Based on Primary and Secondary Integration Technology of Distribution Network

ZENG Xianfeng, REN Baiqun, SONG Bing, SHI Yong, ZHU Zhonghua

(NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, Jiangsu, China)

**Abstract:**In order to solve the problems about the detection and quick isolation of single-phase earthing faults in a small current grounding system, an earthing fault treatment scheme is proposed based on primary and secondary integration technology of distribution network. Through a complete set of primary and secondary fusion equipment and wavelet packet transient zero-sequence line selection technology, and combined with the use of incoming call closing, voltage-free opening, closing on fault accelerated tripping, fault path priority and other strategies, the problems of single terminal line selection under multi-branch and multi-power supply modes are effectively solved. At the same time, combined with on-site application cases, it is proved that the proposed scheme can quickly realize the location and isolation of ground fault zone and has universal applicability.

**Key words:**small current grounding system; single-phase earthing fault; primary and secondary integration; wavelet packet; fault path priority

## 0 引言

中国的配电网大多是小电流接地系统,长期以来单相接地故障的检测一直是困扰配电网运行的技术难题<sup>[1-2]</sup>。近年来,随着一二次融合成套设备的推广应用及小电流接地故障保护技术的逐步成熟<sup>[3-4]</sup>,国家电网有限公司和中国南方电网有限责任公司均根据新的运行规程,要求提升配电网单相接地故障快速处理能力,以消除事故扩大风险,进一

步提高供电安全性与可靠性<sup>[5-6]</sup>。

基于一二次融合的配电网成套设备的推广使用,为解决单相接地故障问题提供了良好的基础。首先,规范了现场电压及电流互感器配置模式,具备零序 PT 和零序 CT 采集功能;其次,采用标准化航插接口设计和标准化定义,有效避免 PT、CT 极性错接等问题<sup>[7]</sup>;最后,完善了配电终端接地故障处理功能的部署,为单相接地故障的检测和快速隔离提供了有利条件。

下面针对配电网小电流接地系统单相接地故障检测和快速隔离的难题,首先,对配电网一二次融合

成套设备的传感器进行了研究;其次,根据一二次融合成套设备具备高精度零序传感器特点,研究了基于小波包的接地算法,并阐述了基于一二次融合和暂态零序功率方向、故障路径优先方法的接地故障处理方案;最后,结合现场应用案例,说明了所提方案可有效解决多分支、多供电方式下单终端选线选段和故障快速隔离的难题,具有普遍的适用性。

## 1 配电网一二次融合成套设备零序电压传感技术

配电网一二次融合成套设备在小电流接地上运用,主要实现了零序电压的采集,同时对三相电流和零序电流的采集精度提出了更高的要求,为小电流接地选线提供了物理和技术条件。

1) 柱上开关(指断路器或负荷开关,下同)零序电压小信号传感技术的应用。由于柱上开关体积和结构的限制,内部很难加装常规电磁式原理的零压互感器,因此常规柱上开关一般没有零序电压采集。为了实现零序电压的采集,一二次融合成套柱上开关一般使用电容分压形式的小信号传感器,采用类似 CVT 互感器结构的复合膜电容,图 1 为电容型零序电压传感器示意图。

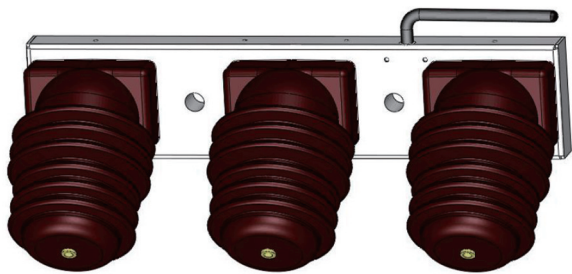


图 1 电容型零序电压传感器

2) 电容型零序电压传感器原理。如图 2 所示,电容分压器由安装在 A、B、C 三相的高压耐受电容  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  和低压信号电容  $C_4$  构成。其中高压耐受电容  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  电容值相同,典型参数为 600 pF,电容  $C_4$  的典型参数为 1.6  $\mu$ F。当三相电压对称平衡时,此时电容  $C_4$  两侧的电压为 0,当发生单相金属接地时,电容  $C_4$  两侧的电压约为 6.5 V。

3) 一二次融合成套设备内采用高精度零序 CT,变比一般为 20 A/1 A,一次侧零序电流不到 1 A 时也有很高的采集精度,保证高阻接地时接地特征的有效提取。

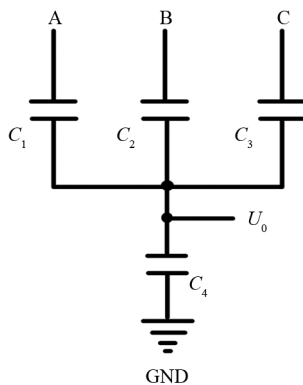


图 2 电容型零序电压传感器原理

应用以上关键技术的配电网一二次融合成套设备的推广使用,为解决配电网单相接地故障问题提供了良好的物理和技术条件。

## 2 接地故障小波包选线技术

接地故障处理的关键是把故障时的特征量选出来进行分析。针对小电流接地系统单相接地故障时稳态故障特征不明显的问题,采用小波包变换方法,可以提取暂态零序功率方向作为选线判据,识别是否发生单相接地故障<sup>[8-10]</sup>。

### 2.1 小波包变换理论分析

多分辨率分析(multi-resolution analysis, MRA)理论作为小波分析中的基本框架<sup>[7]</sup>,满足二尺度方程:

$$\varphi(t) = \sqrt{2} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} h(n) \varphi(2t - n) \quad (1)$$

$$\psi(t) = \sqrt{2} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} g(n) \psi(2t - n) \quad (2)$$

式中: $\varphi(t)$ 为尺度函数; $\psi(t)$ 为小波函数; $h(n)$ 和 $g(n)$ 为小波分解滤波器组系数。在分解滤波器组系数已知的情况下,原始信号的小波分解可以通过 Mallat 快速算法实现。对于正规性条件较好的 db10 正交小波, $h(n)$ 和 $g(n)$ 构成一个共轭正交滤波器组(conjugate quadrature filter, CQF),具有划分较高频率倍频程的能力,能提高频域分辨率,同时降低计算的复杂度。

对于基本小波 $\psi(t)$ 经伸缩与位移引出的函数族,如果满足框架条件则原始信号 $x(t)$ 可以根据小波变换结果进行稳定的重构。重构公式为

$$c_n^{j-1} = \sum_k h'_{n-2k} c_k^{(j)} + \sum_k g'_{n-2k} d_k^{(j)} \quad (3)$$

式中,  $h'(n)$  和  $g'(n)$  分别为与  $h(n)$  和  $g(n)$  相对应的小波重构滤波器组系数。

通过上述小波重构方法,可以得到原始信号在不同频段下的信息,这就为接地故障时的暂态特征信号的提取和分析提供了基础。

### 2.2 故障特征提取

小电流接地系统发生单相接地故障时,故障支路的暂态零序电流与暂态零序电压相位相反,非故障支路暂态零序电流与暂态零序电压相位相同,暂态零序功率方向与故障支路相反。利用小波包对零序电压和零序电流的暂态特征进行 db10 正交小波分解,得到原始信号在不同频段下的信息,滤除工频区域频带,剩余频带中高频能量包含暂态零序电压和零序电流的接地特征,根据暂态零序功率方向判断本支路是否发生单相接地故障。

图 3 所示为某小电流接地系统发生单相接地故障后的原始录波波形经小波包变换后提取的暂态零序电流和暂态零序电压故障特征,显而易见故障支路和非故障支路的暂态零序功率方向相反。

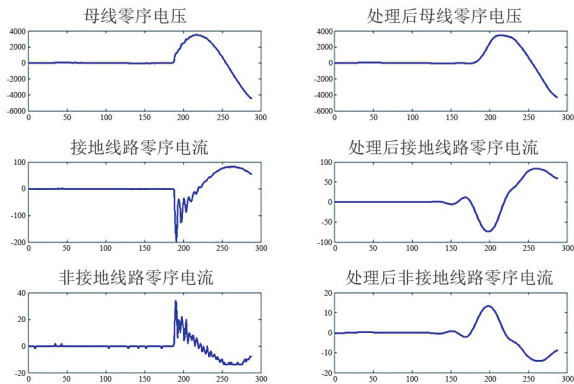


图 3 小波包变换后暂态零序功率方向对比

应用以上基于小波包变换的暂态零序功率方法后,可以有效提高频域分辨率,更好提取故障特征,根据接地时暂态零序电流与零序电压的相位关系,计算暂态零序功率方向,进而可以识别本线路是否为单相接地故障线路。

## 3 一二次融合成套设备接地故障处理

通过自适应型馈线自动化“无压分闸、来电延时合闸”方式,配合变电站出线断路器重合闸<sup>[11]</sup>,实现多分支多联络配电网架的故障定位与隔离,自动完成接地故障的选线、定位及隔离,非常适用于主站与终

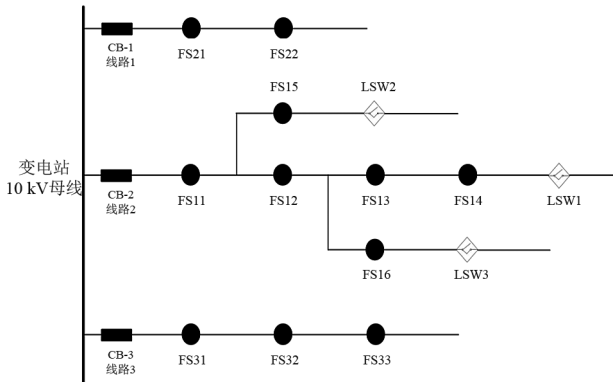


图 4 主接线

端间通信条件不可靠或不具备通信条件的区域。

以图 4 所示典型主接线为例说明单相接地故障处理逻辑,每条出线配置一定数量的柱上开关—二次成套设备。

主接线图元含义如表 1 所示。

表 1 主接线图元含义

图元	含义	图元	含义
	变电站出线断路器在合闸位置		变电站出线断路器在分闸位置
	成套分段开关在合闸位置		成套分段开关在分闸位置
	联络开关在合闸位置		联络开关在分闸位置

主接线中成套分段开关采用负荷开关—二次融合成套设备或断路器—二次融合成套设备,即 FS11—FS16, FS21—FS22, FS31—FS33 均为一二次融合成套分段开关。

配电网线路首开关 FS11、FS21、FS31 处的馈线终端(feeder terminal unit, FTU)设置为首开关,自动适应首开关接地选线模式。其余非首开关的分段开关处 FTU 设置为非首 FTU,自动选段,联络开关处的 FTU 则为联络模式,在单侧长时间失压后可自动或人工合闸转换供电方式。

以 FS12、FS13、FS16 间发生单相接地故障为例,说明单相接地故障的处理过程。

1) 感受到接地故障的 FS11—FS16、FS21—FS22、FS31—FS33,根据暂态零序功率方向开始判断该线路下游是否发生接地故障,若接地故障在其后端则自动记忆,并动态调节本开关来电合闸延时。

图 5 中 FS11 和 FS12 判断出在其后端发生接地故障,FS13—FS16、FS21—FS22、FS31—FS33 判断出其后端未发生接地故障。

2) 首开关 FS11 经整定延时后选线跳闸, FS11 跳闸后, FS12—FS16 因为感受到失压而分闸, 主线失电跳闸(如图 6 所示)。

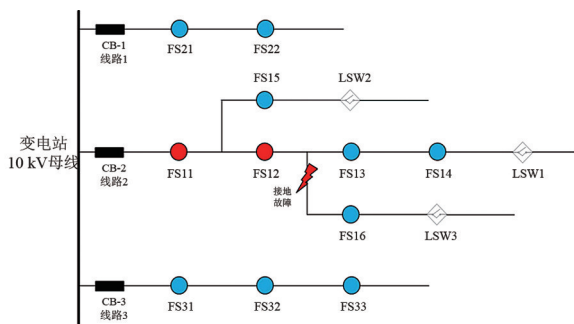


图 5 单相接地故障逻辑判断

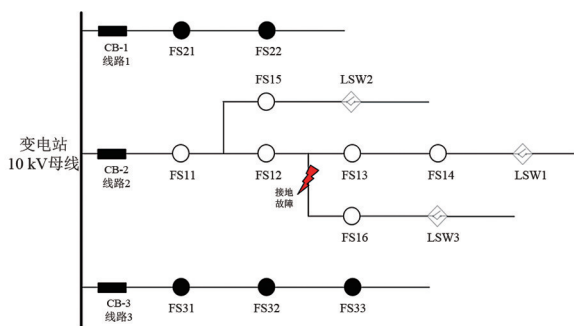


图 6 FS11 选线跳闸, FS12—FS16 失压跳闸

3) 首开关 FS11 选线跳闸后, 经整定延时重合闸。FS11 重合闸后, 若在一段时间内没有检测到故障, 说明故障不在紧临 FS11 的下游, FS11 将自动在一定时间内闭锁接地跳闸, 避免频繁跳闸和重合闸, 同时减少线路供电恢复时间。由于首开关有重合闸, 极端情况下, 即使选线失误, 也可保证恢复正常供电(如图 7 所示)。

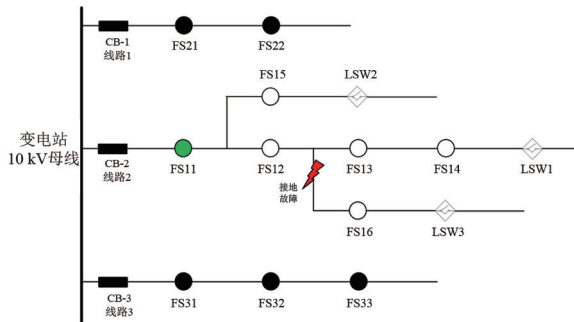


图 7 FS11 重合闸

4) 其他开关检测到来电后根据故障记忆状态执行动态时间来电合闸逻辑, FS12 因为有故障记忆, 经短延时合闸, FS15 无故障记忆, 经长延时合闸。在逐级合闸过程中, FS12 合闸后合于故障, 由此可定位故障点位于 FS12 下端。

5) FS12 合闸后会立即检测到接地故障。由于合于故障, FS12 加速保护动作跳闸(单相接地时故

障电流很小, 负荷开关可直接跳闸), 并正向闭锁来电合闸, 防止再次合于故障; FS13 和 FS16 因为检测到来电后迅速失电, 执行反向闭锁逻辑, 防止反向来电时合于故障(如图 8 所示)。

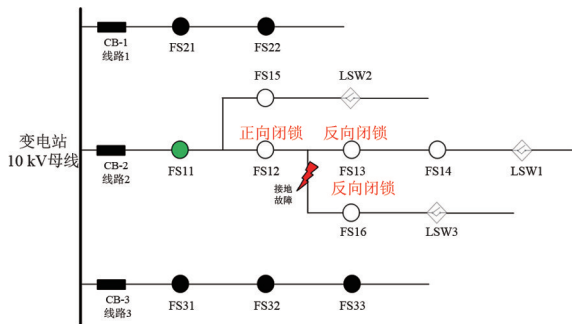


图 8 FS12 跳闸并正向闭锁, FS13、FS16 反向闭锁

6) 其他非故障区段开关 FS15 自适应长延时合闸, 逐级恢复非故障区域供电(如图 9 所示)。

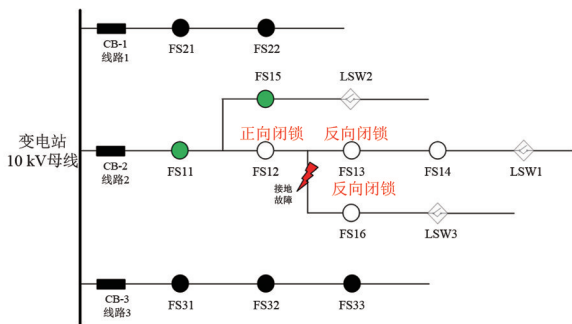


图 9 其他非故障区段开关逐级合闸, 恢复供电

7) 联络开关 LSW1 和 LSW3 在单侧失压后经整定延时后自动合闸(若担心联络开关自投会导致线路过载发生, 亦可退出联络开关自投模式转为人工模式), FS14 执行来电合闸逻辑, FS13 和 FS16 因为有反向闭锁不合闸, 最后完成故障区段的隔离和非故障区段的供电恢复。

上述接地故障处理过程表明, 通过一二次融合成套设备可靠实现了接地故障的准确选线选段和快速隔离。

## 4 现场应用

根据上述暂态零序功率方向作为选线选段判据的一二次融合配电网成套设备已在多个省份投入运行, 在华中某市的现场真型接地测试中, 在中性点经消弧线圈接地方式下, 模拟 2500  $\Omega$ 、1500  $\Omega$ 、500  $\Omega$ 、金属性、破损绝缘子以及树枝等接地故障情形, 一二次融合成套设备均能准确可靠选线选段。

该市红莲湖站主接线如图 10 所示, 在莲 2301 和莲 2304 区间内发生单相接地故障后, 由该支路莲

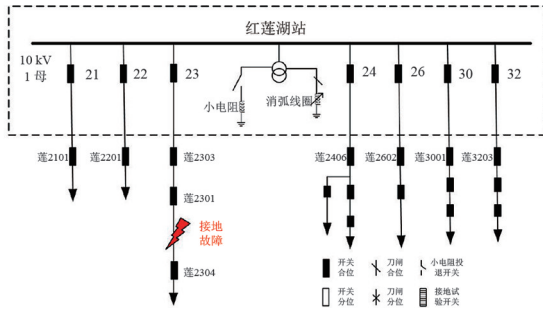


图 10 红莲湖站主接线

2303 处的一二次融合成套设备准确选线选段并隔离了故障。

此次故障发生时,莲 2303 处的一二次融合成套设备核心单元(馈线终端)的动作情况及录波波形如图 11 和图 12 所示。

16:16:46:420ms	自适应型闭锁信号 1->0
16:16:44:480ms	开关合位置 0->1
16:16:44:476ms	开关分位置 1->0
16:16:44:469ms	弹簧未储能 0->1
16:16:44:419ms	自适应型闭锁信号 0->1
16:16:44:371ms	自适应型跳闸信号 1->0
16:16:44:071ms	接地选线动作遥信 1->0
16:16:42:422ms	开关分位置 0->1
16:16:42:418ms	开关合位置 1->0
16:16:42:371ms	自适应型跳闸信号 0->1
16:16:42:071ms	接地选线动作遥信 0->1

图 11 莲 2303 馈线终端动作情况

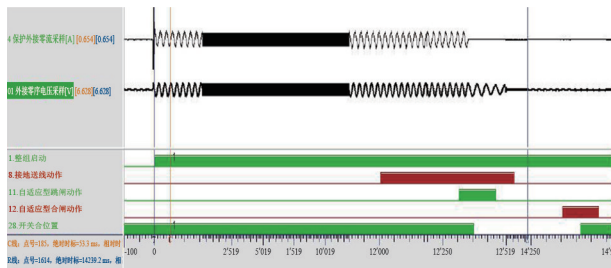


图 12 莲 2303 馈线终端录波波形

由此可见,基于配电网一二次融合成套设备,采用小波包暂态零序功率方向法、故障路径优先的接地故障选线选段关键技术能有效解决小电流接地系统单相接地故障选线选段的难题,方案具有普遍的适用性。

## 5 结论

针对配电网小电流接地系统单相接地故障检测和快速隔离的难题,提出了基于配电网一二次融合技术的接地故障处理方案,具有以下优势:

1)可以避免或减少人为参与,不依赖主站、不依赖通信,由配电终端自动完成接地故障的选线、定位及隔离,可实现单相接地故障的秒级定位、数十秒

隔离和供电恢复,极大减少故障处理时人力物力消耗,大大提高供电可靠性。

2)不需要监控系统主机或单独的选线装置,不用增设信号注入源设备。

3)相比于电压时间型或电压电流时间型馈线自动化,自适应型可实现非故障区段延时的自调整,能适应多电源联络、多分支一次网架等更多运行场合。

4)首开关选线重合闸保证极端情况下即使选线不准,该线路其他开关也能在短时间内来电合闸恢复正常供电;通过非故障区段延时自调整,馈线自动化逻辑自适应多电源联络、多分支一次网架。

## 参考文献

- [1] 徐丙垠,薛永端,冯光,等.配电网接地故障保护若干问题的探讨[J].电力系统自动化,2019,43(20):1-7.
- [2] 叶强,胥威汀,汪伟,等.“碳中和”愿景下的四川电力减碳路径构想[J].四川电力技术,2021,44(2):28-32.
- [3] 薛永端,徐丙垠,冯祖仁,等.小电流接地故障暂态方向保护原理研究[J].中国电机工程学报,2003,23(7):51-56.
- [4] 薛永端,李娟,徐丙垠,等.中性点不接地系统小电流接地故障暂态等值电路的建立[J].中国电机工程学报,2013,33(34):223-232.
- [5] 国家电网有限公司设备部.国网设备部关于加强大城市配电网电缆网单相接地故障快速处置工作的通知[Z].北京:国家电网有限公司,2019.
- [6] 中国南方电网有限责任公司.小电流接地选线装置技术规范:Q/CSG 110040—2012[S].北京:中国电力出版社,2012.
- [7] 雷杨.基于一二次融合成套设备的单相接地故障处理应用及思考[C]//2019年全国配电网接地故障快速处置技术论坛.厦门:中国电机工程学会智慧用能与节能专业委员会,2019.
- [8] 戴剑锋,张艳霞,侯喆.小波重构算法在配电网接地选线中的应用[J].电网技术,2004,28(3):43-47.
- [9] 梁睿,叶开,彭楠,等.暂态零序电流波形差异的单相接地故障选线[J].电力工程技术,2019,38(4):74-79.
- [10] 鲁改凤,化雨,金小兵,等.小电流接地系统单相接地故障选线方法探究[J].电力系统保护与控制,2010,38(12):44-49.
- [11] 李兆拓,金松茂,张华.基于区域序号的自适应就地型馈线自动化故障处理方法[J].电力系统自动化,2019,43(19):179-184.

## 作者简介:

曾先锋(1987),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为配电自动化、配电保护与控制;

任百群(1972),男,主要从事电力系统继电保护及自动运动专业工作。(收稿日期:2021-10-22)