

基于特征频带内暂态零序电流特点的配电网单相 接地故障选线方法

张保会, 赵慧梅, 张文豪, 徐靖东

(西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 提出了一种新的采用特征频带内暂态零序电流集中式比较单相接地故障的自适应选线原理, 设计了两种选线算法: 提取各馈线中特征频带内的暂态零序电流幅值并进行相对比较, 算法可以随系统运行方式变化、故障条件变化自适应的捕捉特征频带内暂态电流分量。当故障初始角较小、过渡电阻很大暂态分量很小时, 采用零序电流有功低频分量幅值比较算法。该算法可适用于中性点不接地、非直接接地系统单相接地故障的各种情况。ATP 仿真数据和现场实录数据的测试表明, 综合选线方法具有很高的准确性和灵敏度, 算法已经应用于 YH-B811 小电流选线装置中。

关键词: 单相接地选线; 暂态零序电流; 特征频带; 有功分量

Faulty line selection by comparing the amplitudes of transient zero sequence current in the special frequency band for power distribution networks

ZHANG Bao-hui, ZHAO Hui-mei, ZHANG Wen-hao, XU Jing-dong

(Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: This paper proposes a faulty-line-selection (FLS) method of comparing zero sequence transient currents in all feeders for power distribution networks. The method synthetically utilizes two algorithms. The first algorithm is to select the faulty line by comparing the transient amplitudes of zero sequence currents in the special frequency band, which is the first capacitive band and can be captured adaptively. The second FLS algorithm is by comparing the active-component amplitudes of zero sequence current in low frequency band (about 50 Hz). The proposed FLS method is tested with ATP simulation and field-recorded data, and the test results show that the synthetic method is suitable to all kinds of faults in non-solid earthed networks and works sensitively and accurately. This algorithm has been adopted in YH-B811 equipment.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China (No.50277027).

Key words: faulty line selection; zero sequence transient currents; special frequency band; active power components

中图分类号: TM773 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)13-0005-06

0 引言

几十年来, 进行中性点非直接接地系统的单相接地故障选线多采用工频零序分量, 但问题一直没有很好地解决。近年来, 人们提出一些利用暂态电压、电流信号的配电网单相接地故障选线方法, 大多基于某一固定频带内电流或电压信号的比较, 选线的准确度有所提高, 但是由于暂态量的频率成分和含量受网络参数、故障模式等多种因素的影响, 不同线路在不同故障条件下, 暂态量的幅频分布并

不总是完全一致的^[1,2], 因而选线算法的适应性和准确性难以保证。

文献[3~7]提出采用首容性频带(即特征频带)内的暂态电流进行故障线路的判断, 可以提高判别的准确性, 然而其上限截止频率需要根据系统的参数来确定; 对不同的系统, 或同一系统的不同状态(线路停运), 该上限截止频率会变化。为此, 本文提出一种能自动适应系统参数和故障模式的“特征频带”捕捉方法, 用于暂态零序电流幅值比较式故障选线。

然而, 在消弧线圈接地系统中, 当故障初相角为 0° 附近时暂态量很小, 故障选线困难。此时, 利

基金项目: 国家自然科学基金项目(50277027)

用零序电流的有功分量幅值比较作为其有效补充,形成综合选线方案。大量 ATP 仿真和现场实录数据的测试,显示该综合选线方案是可行的,并且灵敏度高。算法已经被应用于北海银河继保公司的 YH-B811 小电流选线装置中。

1 特征频带内暂态零序电流幅值比较式选线原理

1.1 暂态零序电流的特点

对中性点非直接接地系统中暂态零序电流的分析可知^[7],当单相接地故障发生时,流经故障线路的暂态零序电流为其他线路暂态零序电流之和,这对任一频率的暂态电流分量都是成立的,即

$$\dot{I}_{0j}(f) = -\sum_{i \neq j} \dot{I}_{0i}(f) \quad (1)$$

式中: $\dot{I}_{0j}(f)$ 、 $\dot{I}_{0i}(f)$ 为故障线路 j 、健全线路 i 上任意频率 f 的暂态零序电流分量; $i=1 \sim m$, m 为出线数。

特别地,在健全线路 $\dot{I}_{0i}(f)$ 相位一致的频带上,各线路暂态零序电流的幅值有如下关系:

对于故障线路

$$I_{0j}(f) = \sum_{i \neq j} I_{0i}(f) \quad (2)$$

或:

$$2I_{0j}(f) = \sum_{i \neq j} I_{0i}(f) + I_{0j}(f) \quad (3)$$

$$I_{0j}(f) = \sum I_0(f)/2 \quad (4)$$

对于健全线路 $\dot{I}_{0i}(f)$,由式(2)可知,

$$I_{0i}(f) < I_{0j}(f) \quad (5)$$

将式(4)代入式(5)得

$$I_{0i}(f) < \sum I_0(f)/2 \quad (6)$$

因此,在健全线路暂态零序电流相位一致的频带内,故障线路暂态零序电流幅值等于所有出线暂态零序电流幅值和的一半(记为 $\sum I_0(f)/2$);而健全线路暂态零序电流幅值小于 $\sum I_0(f)/2$ 。

1.2 特征频带及其自适应捕捉

所谓特征频带,就是健全线路暂态零序电流相位一致的首段频带。在特征频带内,故障线路暂态零序电流具有最大的幅值,大于任一健全线路电流幅值。因此,可以在特征频带内进行暂态电流分量的幅值比较,确定故障线路。

文献[3~7]显示,线路零序阻抗的相频特性是在正负 90° 上交变的周期方波函数,随着频率的升高,线路零序阻抗呈容性、感性交替出现,且首段频带为容性。这就说明,任何线路都有一个最低的容性频带,若取所有线路的公共容性频带为特征频带,

则此频带内各健全线路的零序电流分量都为容性。

图1所示为某一具有4条出线的简单中性点不接地系统发生单相接地故障时,各线路零序阻抗的相频特性。可见,健全线路的阻抗呈容性、感性交替出现,而在任一健全线路阻抗由容性变为感性时(由电路原理及文献[4]分析可知,此时发生串联谐振),故障线路的阻抗也会由容性变为感性。

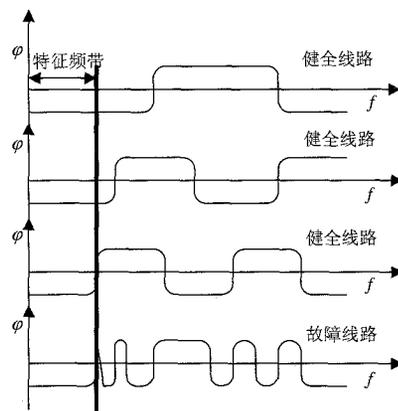


图1 零序网络相频特性示意图

Fig.1 Angle-frequency characteristics of zero sequence network for neutral-isolated system

若设 f_1 为所有健全线路自身串联谐振频率(即首容性频带的上限截止频率)的最小值,则在 $f_0 \sim f_1$ 频带内(不接地系统中 $f_0=0$ Hz; 经消弧线圈补偿系统中 $f_0=150$ Hz),健全线路和故障线路的零序阻抗都呈容性。换言之,在频带 $[f_0, f_1]$ 内,各线路的电流相位一致,因而将此频带称为“特征频带”。

确定特征频带 $[f_0, f_1]$ 的关键在于上限 f_1 。一般地,线路自身的串联谐振频率取决于线路的长度,线路越长,串联谐振频率就越小^[3~6]。对于不同的系统或同一系统的不同运行方式,特征频带上限 f_1 不是一个固定值,需要根据系统的具体条件来确定。

一种在线确定上限特征频率 f_1 的简便方法是:将暂态零序电流进行各频率分量分解,对不同的频率分量使用式(6)试判。 f_1 为各线路首次出现 $I_{0i}(f) < \sum I_0(f)/2$ 所对应的频率的最大值。

1) 为了减少计算量,通过估计将一定健全的线路排除。若 $I_{0i}(f) < \sum I_0(f)/m$,则确定该线路为健全线路,不再参与选频和选线。否则记该线路为候选故障线路,记电流为 $\dot{I}_{0h}(f)$,需要进行下一步判断,相应的式(4)的故障线判据可改写为:

$$\begin{cases} I_{0i}(f) \geq \sum I_{0h}(f)/2 \\ I_{0i}(f) \approx \sum I_{0h}(f)/2 \end{cases} \quad (7)$$

2) 实现时为了防止信号的干扰, 作连续三个频率点的判断, 确定该线路的 f_{1i} 。

以图 2 的仿真系统为例, 具体阐明特征频带的捕捉方法。

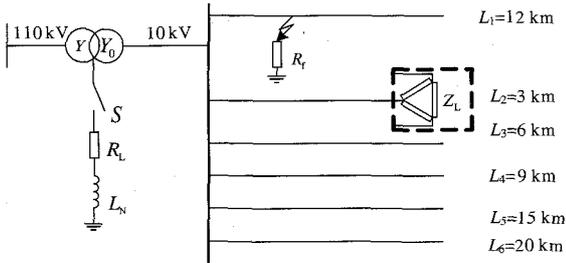


图 2 仿真用配电系统

Fig. 2 The distribution system for simulation

图 3 为图 2 系统 L_1 线路单相接地时, 记各线路电流频谱 I_{0i} 与 $\sum I_{0h}/2$ 的差为 ΔI_{0i} 。 ΔI_{01} 首次小于 0 的频率值为 1800 Hz, 但不满足连续性, 继续判断, 确定 $f_1=2250$ Hz。而 ΔI_{05} 、 ΔI_{06} 首次小于 0 的值都为 f_0 , 因此确定的特征频带上限截止频率 $f_1=2250$ Hz。

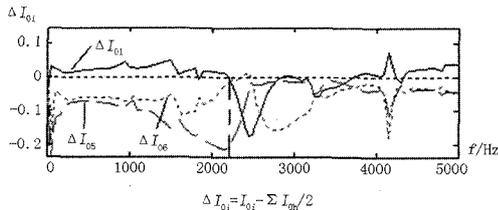


图 3 自适应选取特征频带

Fig.3 Adaptive selection of special frequency band

当线路 L_6 (最长线路) 停运, 线路 L_1 发生单相接地时, 特征频带选取如图 4 所示, 同理可确定 $f_1=3100$ Hz。

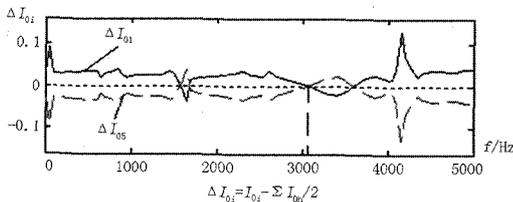


图 4 系统状态变化时特征频带的自适应选取

Fig.4 Adaptive selection of special frequency band for different system states

由图 3、图 4 的分析发现, 特征频带的上限截止频率 f_1 在系统运行方式发生变化时, 即使发生相

同故障, 其特征频带也是不同的。特别地, 系统的所有出线中, 最长线路越长, 特征频带越短。因此特征频带不是固定不变的, 需要自适应捕捉。

1.3 暂态零序电流幅值比较式选线算法的适用特点

特征频带被自适应捕捉以后, 提取此特征频带内各线路的暂态电流的幅值, 将具有最大暂态电流的线路判定为故障线路。

此算法适用于故障线路中暂态零序电流幅值较大的配网系统及其故障场合。因而,

(a) 在中性点不接地系统中故障发生时, 故障线路暂态零序电流较大, 适合于此选线算法;

(b) 在中性点经消弧线圈接地系统中发生强故障 (在故障初相角大于 10° 、过渡电阻小于 500Ω 时, 线路暂态电流能量主要集中在高频带) [8,9], 此时故障特征明显, 适合于此选线算法;

(c) 在中性点经消弧线圈接地的系统中发生弱故障 (即系统在相电压过零点附近或过渡电阻很大时故障发生), 此时健全线路暂态电流能量主要集中在工频范围 [8,9], 故障特征也很不明显。若选择不包括工频量的第一个容性频带内零序电流暂态分量进行选线判断, 则由于电流值太小而引起较大误差, 影响到选线结果的可靠性, 需要采用其他算法进行判别。

2 零序电流有功分量幅值比较式选线原理

经消弧线圈接地系统中发生单相接地故障时, 故障线路 j 的零序电流为:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{0j}(f) = & -\dot{U} \left[\frac{1}{3(R_N + j\omega L_N)} + j\omega(C_{0\Sigma} - C_{0j}) \right] = \\ & -\frac{\dot{U} R_N}{3(R_N^2 + \omega^2 L_N^2)} \\ & j\omega \dot{U} \left[\frac{L_N}{3(R_N^2 + \omega^2 L_N^2)} + C_{0\Sigma} - C_{0j} \right] \quad (8) \end{aligned}$$

对于健全线路 i 则有:

$$\dot{I}_{0i} = j\dot{U}_{0\omega} C_{0i} \quad (9)$$

由式(8)和(9)可见由于消弧线圈的并(串)电阻会在故障线路中产生有功分量电流, 而有功电流只流过故障线路, 与非故障线路无关。消弧线圈本身的有功成分较大 (实测单相接地时其有功电流达 2~3 A), 在故障线路中会有较大的零序有功分量电流 [10]。因此, 故障线路的零序电流有功分量远大于非故障线路的零序电流有功分量。据此, 可以选出故障线路 [11]。

在具体实现时, 以零序电压作为参考矢量, 将零序电流投影到零序电压方向, 有功分量电流的获

取如下所示:

$$I_p = I_0 \cos(\theta) \quad (10)$$

其中: I_p 为有功分量电流幅值, I_0 为零序电流幅值, θ 为零序电流 I_0 、零序电压 \dot{U}_0 夹角。

3 综合选线方案

基于暂态零序电流幅值比较的算法和零序电流有功分量算法构成综合选线方案。当配网系统发生单相接地故障时, 采用零序电流突变量和零序电压启动判据, 若大于门槛值, 启动故障选线算法。若三秒后故障特征消失, 认为发生弧光接地, 否则认为发生单相接地故障, 启动以下算法:

(1) 提取故障后各线路 (m 条出线) 一周波内零序电流 $i_0(k)$ 的故障分量。

(2) 在各条馈线上 (m 条), 求零序电流 $i_{0i}(k)$ 的有效值 $I_{0i.VAL} = \sqrt{\sum_{k=1}^n i_{0i}^2(k)/n}$, 并求 m 条馈线的平均值 I_{0mean} 。若线路 i 中有 $I_{0i} < I_{0mean}$ 确定其为健全线路, 排除一定健全的线路后候选故障线路数 m' 条。

(3) 对剩余的 m' 条线路进行下一步判断:

对不接地系统和经消弧线圈接地系统强故障时, 采用自适应捕捉特征频带的暂态零序电流幅值比较式选线算法。在经消弧线圈接地系统弱故障时, 采用零序电流有功分量选线; 强、弱故障根据低频分量 (0~150 Hz) 所占全电流比例来判断。

(4) 若采用自适应捕捉特征频带的选线方法: 求取特征频带 $[f_0, f_1]$, 不接地系统中 $f_0 = 0$ Hz, 消弧线圈接地系统中, $f_0 = 150$ Hz。

(5) 确定上限截止频率 f_1 。求取各线路零序电流 i_{0i} 的频谱 I_{0i} , 从 f_0 开始, 按前文所述原则确定各线路上限频率 f_{1i} , 取最大值为特征频带的上限截止频率 $f_1 = \max(f_{1i})$ 。

(6) 设计合适的滤波器, 其带通为 $[f_0, f_1]$, 滤取特征电流有效值 $i_{0i.VAL}$, 确定 $i_{0i.VAL}$ 最大对应为故障线路, $i_{0i.VAL} = \sqrt{\sum_{k=1}^n i_{0i.tran}^2(k)/n}$ 。

(7) 若采用零序电流有功分量幅值比较的选线方法, 则求零序电流低频有功分量值 (这里取 150 Hz 以下), 把各频点零序电流有功分量叠加, 具有电流频谱最大值的线路被确定为故障线路。

4 实录数据验证

使用电磁暂态仿真软件对中性点不接地配电系统, 中性点经消弧线圈接地配电系统的全补偿、欠补偿和过补偿等运行状态下的单相接地不同故障条件 (故障初相角 θ 、过渡电阻 R_f 、故障线路、故障点位置) 近千种故障仿真计算, 采用本文的自适应选线方法均能正确选出故障线。

为了更真实验证在各种传感器误差下算法的有效性, 还采用了福建大淮、凤山两个配电变电站现场实录故障数据进行了验证, 下面给出强故障情况和弱故障情况两组故障数据进行详细说明。

(1) 强故障情况

采用大淮变电站中性点不接地运行, 海滨线 (编号 618) 某次单相接地故障数据进行分析。选线基本过程如下:

表 1 强故障选线过程中有关中间结果

Tab.1 The related outcomes in the process of severe fault line selection

| 线路号 | 零序电流 /A | 健全线 路 | 低频分 量/A | 低频比 例/(%) | 特征电 流/A |
|-----|------------|----------|------------|--------------|------------|
| 611 | 4.55 | 健全 | | | |
| 612 | 4.61 | 健全 | | | |
| 613 | 2.47 | 健全 | | | |
| 614 | 3.27 | 健全 | | | |
| 615 | 17.70 | | 11.57 | 43 | 15.40 |
| 616 | 7.38 | 健全 | | | |
| 617 | 17.31 | | 11.57 | 45 | 15.08 |
| 618 | 75.33 | | 45.91 | 37 | 67.35 |
| 619 | 3.92 | 健全 | | | |
| 610 | 13.18 | | 9.65 | 54 | 11.10 |
| 641 | 0.56 | 健全 | | | |
| 24 | 12.52 | 健全 | | | |
| 平均值 | 12.523 | | | | |

(a) 根据录波数据计算得到 12 条馈线零序电流 i_{0i} 有效值 $I_{0i.val}$ 如表 1 第 2 列所示, 若 $I_{0i.val} < I_{0mean} = 12.523$, 被标注为健全线路, 见第 3 列。其余的线路四条馈线 615、617、618、610, 需要参与下一步判断。

(b) 图 5 示出 4 条备选线路电流在 0~150 Hz 内分量 $i_{0i.f}$, 并求得 $i_{0i.f}$ 的有效值 $I_{0i.f}$, 如表 1 第 4 列所示。

(c) 表 1 第 5 列给出低频零序电流所占比例, 从中可以看出都小于设定值 50%, 即电流主要集中在高频, 因此判断为强故障, 而采用自适应捕捉特征频带的选线算法。

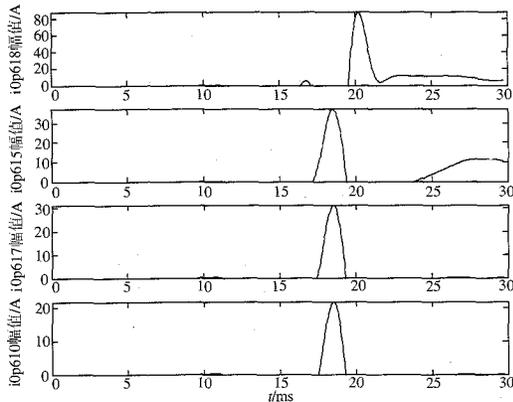


图 5 低频电流分量

Fig.5 Low frequency current component

(d) 图 6 示出零序电流频谱 I_{0i} 与 $\sum I_{0h} / 2$ 的差 ΔI_{0i} 。从中可见, 根据前文所述的特征频带上下限选取原则, $f_{1,618} = 4350 \text{ Hz}$, $f_{1,615} = f_{1,617} = f_{1,610} = 300 \text{ Hz}$ 。因此, 可得特征频带为 $[300, 4350] \text{ Hz}$ 。

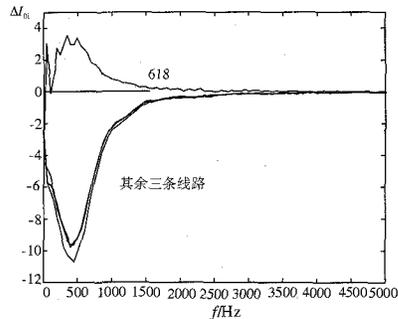


图 6 零序电流频谱 I_{0i} 与 $\sum I_{0h} / 2$ 的差

Fig.6 Difference between I_{0i} and $\sum I_{0h} / 2$

(e) 图 7 为各线路频域零序电流 (红线) 以及滤波后在特征频带内暂态电流分量 (蓝线), 据此, 可计算出暂态电流分量的有效值如表 1 第 6 列所示。因此可判断 618 为故障线路。

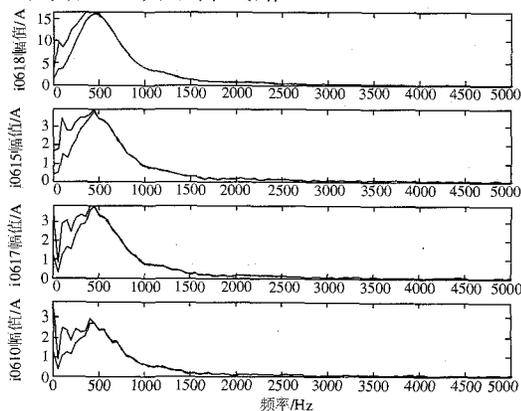


图 7 电流原始值及滤波后分量

Fig.7 Zero sequence currents and the filtered currents

(2) 弱故障情况

采用大淮变电站系统中性点通过消弧线圈接地, 海滨线 (代号 618) 另外一次故障数据进行分析。表 2 给出了该次故障的基本选线过程。

表 2 弱故障选线过程中有关中间结果

Tab.2 The related outcomes in the process of weak fault line selection

| 线路号 | 零序电流/A | 健全线路 | 低频分量/A | 低频比例/(%) | 特征电流/A |
|-----|--------|------|--------|----------|--------|
| 611 | 1.92 | 健全 | | | |
| 612 | 1.34 | 健全 | | | |
| 613 | 3.66 | | 2.42 | 66 | 3.95 |
| 614 | 3.58 | | 2.34 | 65 | 4.05 |
| 615 | 4.57 | | 3.85 | 84 | 6.00 |
| 616 | 2.05 | 健全 | | | |
| 617 | 4.80 | | 4.04 | 84 | 5.22 |
| 618 | 8.34 | | 7.53 | 81 | 11.33 |
| 619 | 2.58 | 健全 | | | |
| 610 | 4.13 | | 3.80 | 92 | 4.60 |
| 641 | 0.30 | 健全 | | | |
| 24 | 3.11 | 健全 | | | |
| 平均值 | 3.107 | | | | |

各线路零序电流值及平均值见表 2 第 1 列, 小于平均值的认为一定是健全的线路, 其余六条线路需要进一步判断。表 2 第 5 列数据表明, 低频电流 (0~150 Hz) 所占全电流比例都比较大, 因此, 判定发生的故障为弱故障, 采用零序电流有功分量幅值比较的选线方法。求 150 Hz 以下频率点零序电流频谱, 将其叠加后值列于表 2 第 6 列, 这 6 个数据表明线路 618 的频谱最大, 线路 618 为故障线路。

限于篇幅, 表 3 只列出大淮站和凤山站各五组实录故障数据进行的验证结果, 不再给出中间结果。

表 3 现场数据对综合选线方案的验证结果

Tab.3 The result of line selection with recorded data for verifying the method proposed in this paper

| 故障线路编号 | 特征频带 /Hz | 最大 f_{0i} 出现线路 | 所选取的故障线路 | 正确性 |
|--------|----------|------------------|----------|-----|
| DH610 | 150~6850 | DH610 | DH610 | 正确 |
| DH618 | 150~3450 | DH618 | DH618 | 正确 |
| DH618 | 150~4350 | DH618 | DH618 | 正确 |
| DH618 | 150~5600 | DH618 | DH618 | 正确 |
| DH618 | 有功分量 | | DH618 | 正确 |
| FS616 | 有功分量 | | FS616 | 正确 |
| FS618 | 有功分量 | | FS618 | 正确 |
| FS619 | 150~5250 | FS619 | FS619 | 正确 |
| FS634 | 150~2100 | FS634 | FS634 | 正确 |
| FS634 | 150~2100 | FS634 | FS634 | 正确 |

注: 文中“FS”指凤山变, “DH”指大淮变。

5 结论

本方法选择故障差异最为显著的“特征频带”内暂态电流进行故障线路的判断,在该特征频带内,故障线路暂态零序电流幅值大于任一健全线路电流幅值,具有最大的暂态电流。但是,这一特征频带不是固定不变的,而是受系统参数和故障情况的影响。因此本文提出了在线自动捕捉特征频带的方法,经理论分析和仿真验证,该方法简捷有效。

本文的自适应选线方法具有自动适应系统条件,准确选线的特点,经仿真数据和现场实录数据表明,这种选线方法能以较高的准确率选取故障线路。

参考文献

- [1] 戴剑锋,张艳霞.基于多频带分析的自适应配电网故障选线研究[J].中国电机工程学报,2003,23(5):44-47.
DAI Jian-feng, ZHANG Yan-xia. Study on Adaptively Choosing Fault Line Under Single-phase to Grounded Fault Based on Analysis of Multi-frequency Bands[J]. Proceedings of the CSEE, 2003,23(5):44-47.
- [2] 王耀南,霍百林,王辉,等.基于小波包的小电流接地系统故障选线的新判据[J].中国电机工程学报,2004,24(6):54-58.
WANG Yao-nan, HUO Bai-lin, WANG Hui, et al. A New Criterion for Earth Fault Line Selection Based on Wavelet Packets in Small Current Neutral Grounding System[J]. Proceedings of the CSEE, 2004,24(6):54-58.
- [3] 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 Yong-duan, FENG Zu-ren, XU Bing-yin. 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.
- [4] 薛永端,陈羽,徐丙垠,等.利用暂态特征的新型小电流接地故障监测系统[J].电力系统自动化,2004,28(24):83-87.
XUE Yong-duan, CHEN Yu, XU Bing-yin, et al. Characteristic Transient Based Monitoring System for Earth Fault in Non-Solidly Earthed Network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004,28(24):83-87.
- [5] 薛永端,冯祖仁,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.
XUE Yong-duan, FENG Zu-ren, XU Bing-yin, et al. Earth Fault Protection in Non-Solidly Earthed Network based on Transient Zero Sequence Current Comparison[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003,27(9):48-53.
- [6] 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.
XUE Yong-duan, XU Bing-yin, FENG Zu-ren, et al. The Principle of Directional Earth Fault Protection Using Zero Sequence Transient in Non-solid Earthed Network[J]. Proceedings of the CSEE, 2003,23(7):51-56.
- [7] 马珂.中性点非直接接地系统中暂态谐波故障选线新原理的研究(硕士学位论文)[D].西安:西安交通大学,2003.
MA Ke. Transient Harmonic Methods for Ground-Fault Detecting in the Non-effectively Grounded Neutral Systems, Thesis[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2003.
- [8] 贺家李,宋从矩.电力系统继电保护原理(第三版)[M].北京:中国电力出版社,1994.
- [9] 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.
DAI Jian-feng, ZHANG Yan-xia, HOU Zhe. Application of Wavelet Reconstruction Algorithm in Phase-to Ground Fault Detection of Distribution Networks[J]. Power System Technology, 2004,28(3):43-47.
- [10] 赵慧梅.基于暂态特征信息的中性点非直接接地系统单相接地故障选线研究(硕士学位论文)[D].西安:西安交通大学,2005.
ZHAO Hui-mei. The Research on Fault Line Selection in Non-solid Earthed Networks Based on Transient Signals, Thesis[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2005.
- [11] 牟龙华.零序电流有功分量方向接地选线保护原理[J].电网技术,1999,23(9):60-62.
MU Long-hua. Principle of Selective Grounding Fault Protection Based on Active Component Direction of Zero-sequence Current[J]. Power System Technology, 1999,23(9):60-62.
- [12] 杜丁香,徐玉琴.消弧线圈接地电网的有功选线[J].继电器,2002,30(5):33-36.
DU Ding-xiang, XU Yu-qin. Faulted Line Detecting with Active Power in an Auto-compensated Network [J]. Relay, 2002,30(5):33-36.

收稿日期:2008-05-19

作者简介:

张保会(1953-),男,教授,博士生导师,主要从事电力系统继电保护、安全稳定控制和电力线通信等领域的教学、科研工作;E-mail: bhzhang@mail.xjtu.edu.cn

赵慧梅(1980-),女,硕士研究生,主要从事电力系统继电保护的研究;

张文豪(1982-),男,硕士研究生,主要从事电力系统继电保护装置的开发。