



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 103941162 A

(43) 申请公布日 2014. 07. 23

(21) 申请号 201410197421. 8

(22) 申请日 2014. 05. 12

(71) 申请人 福州大学

地址 350108 福建省福州市闽侯县上街镇大学城学园路 2 号福州大学新区

(72) 发明人 郭谋发 严敏 杨耿杰 高伟 缪希仁

(74) 专利代理机构 福州元创专利商标代理有限公司 35100

代理人 蔡学俊

(51) Int. Cl.

G01R 31/08 (2006. 01)

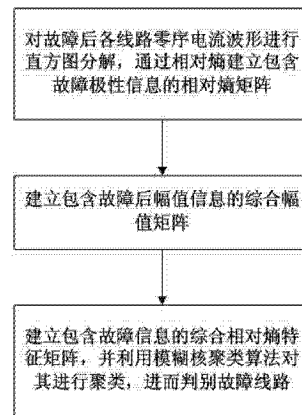
权利要求书3页 说明书15页 附图6页

(54) 发明名称

利用波形时域特征聚类的谐振接地系统故障选线方法

(57) 摘要

本发明涉及一种利用波形时域特征聚类的谐振接地系统故障选线方法,包括以下步骤:1、对谐振接地系统单相接地故障后各线路半个周波暂态零序电流波形进行直方图分解,得到反映故障后各线路暂态零序电流波形的时域分布特征的直方图;基于故障后各线路暂态零序电流波形的时域分布特征,采用反映状态差异的相对熵建立包含故障极性信息的相对熵矩阵 S;2、建立包含故障幅值信息的综合幅值矩阵 F₃;3、结合相对熵矩阵 S和综合幅值矩阵 F₃建立包含暂态零序电流波形的故障信息的综合相对熵特征矩阵 XS,利用免阈值设定的模糊核聚类算法对所述综合相对熵特征矩阵 XS进行聚类,进而判别故障线路。该方法提高了故障选线的自动化程度。



1. 一种利用波形时域特征聚类的谐振接地系统故障选线方法,其特征在于,包括以下步骤:

步骤 1:对谐振接地系统单相接地故障后各线路半个周波暂态零序电流波形进行直方图分解,得到反映故障后各线路暂态零序电流波形的时域分布特征的直方图;基于故障后各线路暂态零序电流波形的时域分布特征,采用反映状态差异的相对熵建立包含故障后各线路暂态零序电流波形极性信息的相对熵矩阵 S ;

步骤 2:建立包含故障后各线路暂态零序电流波形幅值信息的综合幅值矩阵 F_3 ;

步骤 3:结合相对熵矩阵 S 和综合幅值矩阵 F_3 建立包含暂态零序电流波形的故障信息的综合相对熵特征矩阵 XS ,利用免阈值设定的模糊核聚类算法对所述综合相对熵特征矩阵 XS 进行聚类,进而判别故障线路。

2. 根据权利要求 1 所述的利用波形时域特征聚类的谐振接地系统故障选线方法,其特征在于,在步骤 1 中,按如下方法对各线路半个周波暂态零序电流波形进行直方图分解:

首先在时间轴上将暂态零序电流波形分成 p 个时段,进而在幅值轴上将每个时段内的暂态零序电流波形分成 q 个区间,统计各时段内每个区间的采样点数 N_c ;将采样点数 N_c 和对应时段的总采样点数 zd 的比值作为波形分布系数,得到暂态零序电流波形的直方图。

3. 根据权利要求 1 所述的利用波形时域特征聚类的谐振接地系统故障选线方法,其特征在于,在步骤 1 中,按如下方法建立反映故障后各线路暂态零序电流波形极性信息的相对熵矩阵 S :

以故障后各线路暂态零序电流波形的时域分布特征矩阵为系统,以所述时域分布特征矩阵内的元素为所述系统的状态,以所述元素的元素值为状态出现的概率,定义第 k 条线路的第 i 个时段内的第 j 个幅值区间的相对熵值为 $S(k, i, j)$,其值为 $N_c(k, i, j)$ 相对于 $N_c(m, i, j)$ 的相对熵值与 $N_c(m, i, j)$ 相对于 $N_c(k, i, j)$ 的相对熵值之和, $m=1, 2, \dots, n$, $m \neq k$;

则相对熵值 $S(k, i, j)$ 为:

$$S(k, i, j) = \left| \sum_{m=1, m \neq k}^n \ln N_G(k, i, j) \frac{N_G(k, i, j)}{N_G(m, i, j)} \right| + \left| \sum_{m=1, m \neq k}^n \ln N_G(m, i, j) \frac{N_G(m, i, j)}{N_G(k, i, j)} \right| \quad (10)$$

式中, $N_c(k, i, j)$ 表示第 k 条线路的第 i 个时段内的第 j 个幅值区间内的采样点数与其所在时段内的总采样点数 zd 的比值;

定义第 k 条线路的第 i 个时段的相对熵值为 $S(k, i)$,以一个时段内的 p 个幅值区间的相对熵值之和作为该时段的相对熵值,则该时段的相对熵值 $S(k, i)$ 为:

$$S(k, i) = \sum_{j=1}^p S(k, i, j) \quad (11)$$

基于各线路每个时段的相对熵值得到反映故障后各线路暂态零序电流波形极性信息的相对熵矩阵 S 。

4. 根据权利要求 1 所述的利用波形时域特征聚类的谐振接地系统故障选线方法,其特征在于,在步骤 2 中,按如下方法建立包含故障后各线路暂态零序电流波形幅值信息的综合幅值矩阵 F_3 :

第一幅值矩阵 F_1 定义为各线路每个时段内的暂态零序电流幅值绝对值最大值与该线路所有时段内的幅值绝对值最大值的比值构成的矩阵, 第一幅值矩阵 F_1 中元素为:

$$F_1(k, i) = \frac{MAX(k, i)}{MAX1(k)} \quad (12)$$

式中, $F_1(k, i)$ 为第 k 条线路的第 i 个时段的第一幅值, $MAX(k, i)$ 为第 k 条线路的第 i 个时段内的暂态零序电流幅值绝对值最大值, $MAX1(k)$ 为第 k 条线路所有时段内的幅值绝对值最大值;

第二幅值矩阵 F_2 定义为同一时段内各线路的暂态零序电流幅值绝对值最大值与该时段内所有线路的幅值绝对值最大值的比值构成的矩阵, 第二幅值矩阵 F_2 中元素为:

$$F_2(k, i) = \frac{MAX(k, i)}{MAX2(i)} \quad (13)$$

式中, $F_2(k, i)$ 为第 k 条线路的第 i 个时段的第二幅值, $MAX(k, i)$ 为第 k 条线路的第 i 个时段内的暂态零序电流幅值绝对值最大值, $MAX2(i)$ 为第 i 个时段内所有线路的幅值绝对值最大值;

结合第一幅值矩阵 F_1 、第二幅值矩阵 F_2 , 建立综合幅值矩阵 $F_3 = F_1 \cdot F_2$ 。

5. 根据权利要求 1 所述的利用波形时域特征聚类的谐振接地系统故障选线方法, 其特征在于, 在步骤 3 中, 按如下方法建立综合相对熵特征矩阵 XS :

结合相对熵矩阵 S 和综合幅值矩阵 F_3 , 建立包含暂态零序电流波形的故障信息的综合相对熵矩阵 XS , 综合相对熵矩阵 XS 中元素为:

$$XS(k, i) = F_3(k, i) \cdot S(k, i) \quad (14)$$

式中, $XS(k, i)$ 为第 k 条线路的第 i 个时段的综合相对熵值;

对得到的综合相对熵值 $XS(k, i)$ 进行归一化处理:

$$XS(i, j) = \frac{XS(i, j) - \min(XS)}{\max(XS) - \min(XS)} \quad (15)$$

式中, $XS(i, j)$ 为综合相对熵矩阵 XS 中元素, $\max(XS)$ 为综合相对熵矩阵 XS 中最大值元素, $\min(XS)$ 为综合相对熵矩阵 XS 中最小值元素, 则归一化后的综合相对熵矩阵 XS 的元素值在 $[0, 1]$ 间; 综合相对熵矩阵 XS , 如式 (16) 所示

$$XS = \begin{bmatrix} XS_{11} & XS_{12} & \dots & XS_{1p} \\ XS_{21} & XS_{22} & \dots & XS_{2p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ XS_{n1} & XS_{n2} & \dots & XS_{np} \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中, XS_{ij} 为第 i 条线路的第 j 个时段的综合相对熵值。

6. 根据权利要求 1 所述的利用波形时域特征聚类的谐振接地系统故障选线方法, 其特征在于, 在步骤 3 中, 按如下方法对综合相对熵特征矩阵 XS 进行聚类, 进而判别故障线路:

设 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 为输入空间的样本集, c 为聚类个数, v_j 为第 j 个类的聚类中心, $j=1, 2, \dots, c$, 通过非线性特征映射, 在高维特征空间中, 将欧式距离展开并利用高斯核函数 $K(x, y)$ 计算高维空间中样本的内积, 得到模糊核聚类的目标函数

$$J_{\text{KFCM}} = 2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^c u_{ij}^m [1 - K(x_i, v_j)] \quad (17)$$

式中, n 为样本数, m 为加权指数, u_{ij} 为样本 x_i 对应于第 j 个聚类的隶属度; 对于隶属度 u_{ij} 满足:

$$\forall i, \sum_{j=1}^c u_{ij} = 1; \forall i, j, u_{ij} \in [0, 1], \forall j, \sum_{i=1}^n u_{ij} > 0 \quad (18)$$

分别对目标函数 J_{KFCM} 关于 u_{ij} 、 v_j 求偏导, 得到新的聚类中心和隶属度矩阵的更新公式:

$$v_j = \frac{\sum_{i=1}^n u_{ij}^m K(x_i, v_j) x_i}{\sum_{i=1}^n u_{ij}^m K(x_i, v_j)} \quad (19)$$

$$u_{ij} = \frac{[1 - K(x_i, v_j)]^{-1/(m-1)}}{\sum_{j=1}^c [1 - K(x_i, v_j)]^{-1/(m-1)}} \quad (20)$$

采用模糊核聚类算法按如下步骤对归一化后的综合相对熵特征矩阵 XS 进行聚类:

步骤 301: 给定聚类个数 c 、阈值 ε 、最大迭代次数 T 和加权指数 m ;

步骤 302: 初始化聚类中心, $V^{(1)} = [v_1^{(1)}, v_2^{(1)}, \dots, v_c^{(1)}]$, 设置迭代次数 $k = 1$;

步骤 303: 利用式 (20) 计算第 k 次迭代的隶属度 $u_{ij}^{(k)}$, $i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, c$;

步骤 304: 利用式 (19) 计算第 $k+1$ 次迭代的聚类中心 $v_j^{(k+1)}$, $j = 1, 2, \dots, c$;

步骤 305: 如果 $\|V^{(k+1)} - V^{(k)}\| < \varepsilon$ 或迭代次数 $k > T$, 则算法结束, 输出最终聚类结果,

即隶属度矩阵 U ; 否则, 令 $k=k+1$, 返回步骤 303 继续迭代; 最终得到隶属度矩阵 U 为

$$U = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \dots & u_{1N} \\ u_{21} & u_{22} & \dots & u_{2N} \end{bmatrix} \quad (21)$$

式中, N 为线路数目, u_{ij} 为第 j 条线路故障暂态零序电流属于第 i 类的隶属度;

由隶属度矩阵 U 将各线路分为两类, 被单独分为一类的暂态零序电流对应的线路即为故障线路。

利用波形时域特征聚类的谐振接地系统故障选线方法

技术领域

[0001] 本发明涉及智能配电系统继电保护技术领域,特别涉及一种利用波形时域特征聚类的谐振接地系统故障选线方法。

背景技术

[0002] 我国 6~35kV 配电网主要采用小电流接地方式。在小电流接地方式下单相接地故障发生率最高,占配电网故障的 80% 以上。小电流接地系统由于中性点和大地之间没有直接的电气联系或串接了电抗器,因此短路电流很小,且三相之间的线电压仍然保持对称,对负荷的供电没有影响,因此在一般情况下允许再继续运行 1~2 小时,而不必立即跳闸。但在单相接地以后,小电流接地故障引起的过电压可能会进一步扩大成两点或多点接地短路,危害电网绝缘,导致事故扩大。因此,当发生小电流接地故障后需要尽快选出故障线路加以处理。中性点不接地系统在实际应用中采用比幅、比相原理选线可以达到很高的准确率,但当谐振接地系统发生单相接地故障时,由于消弧线圈的补偿作用,系统故障电流微弱,给故障选线造成很大的影响。故谐振接地系统故障选线一直是配电网故障选线中的难点,进一步研究谐振接地系统故障选线方法具有重要的理论和实际意义。

[0003] 目前国内外的选线方法主要为利用故障稳态量与故障暂态量的选线方法。其中利用故障稳态量的选线方法易受线路长度、过渡电阻大小以及各种测量误差和噪声的影响。利用故障暂态量的选线方法由于故障暂态电流中包含了丰富的故障信息,故障暂态电流值达到稳态电流的几倍到几十倍,运用故障暂态量进行故障选线成为学者研究的热点。但暂态过程十分复杂且时间短,如何对暂态信号进行处理和分析成为利用暂态信息选线的难点。近年来,也有学者利用故障线路与非故障线路零序电流波形间的相似性进行故障选线。

[0004] 现有的利用故障后暂态零序电流波形间的相似性实现谐振接地系统故障选线的方法中,只通过故障后非故障线路的充放电过程相似或观察仿真后的零序电流波形相似现象来描述零序电流波形间的相似性,均无对其相似性原理进行说明。

发明内容

[0005] 本发明的目的在于提供一种利用波形时域特征聚类的谐振接地系统故障选线方法,该方法提高了故障选线的自动化程度。

[0006] 为实现上述目的,本发明的技术方案是:一种利用波形时域特征聚类的谐振接地系统故障选线方法,包括以下步骤:

步骤 1:对谐振接地系统单相接地故障后各线路半个周波暂态零序电流波形进行直方图分解,得到反映故障后各线路暂态零序电流波形的时域分布特征的直方图;基于故障后各线路暂态零序电流波形的时域分布特征,采用反映状态差异的相对熵建立包含故障后各线路暂态零序电流波形极性信息的相对熵矩阵 S ;

步骤 2:建立包含故障后各线路暂态零序电流波形幅值信息的综合幅值矩阵 F_3 ;

步骤 3:结合相对熵矩阵 S 和综合幅值矩阵 F_3 建立包含暂态零序电流波形的故障信息

的综合相对熵特征矩阵 XS , 利用免阈值设定的模糊核聚类算法对所述综合相对熵特征矩阵 XS 进行聚类, 进而判别故障线路。

[0007] 进一步的, 在步骤 1 中, 按如下方法对各线路半个周波暂态零序电流波形进行直方图分解:

首先在时间轴上将暂态零序电流波形分成 p 个时段, 进而在幅值轴上将每个时段内的暂态零序电流波形分成 q 个区间, 统计各时段内每个区间的采样点数 N_G ; 将采样点数 N_G 和对应时段的总采样点数 zd 的比值作为波形分布系数, 得到暂态零序电流波形的直方图。

[0008] 进一步的, 在步骤 1 中, 按如下方法建立反映故障后各线路暂态零序电流波形极性信息的相对熵矩阵 S :

以故障后各线路暂态零序电流波形的时域分布特征矩阵为系统, 以所述时域分布特征矩阵内的元素为所述系统的状态, 以所述元素的元素值为状态出现的概率, 定义第 k 条线路的第 i 个时段内的第 j 个幅值区间的相对熵值为 $S(k, i, j)$, 其值为 $N_G(k, i, j)$ 相对于 $N_G(m, i, j)$ 的相对熵值与 $N_G(m, i, j)$ 相对于 $N_G(k, i, j)$ 的相对熵值之和, $m=1, 2, \dots, n$, $m \neq k$;

则相对熵值 $S(k, i, j)$ 为:

$$S(k, i, j) = \left| \sum_{m=1, m \neq k}^n \ln N_G(k, i, j) \frac{N_G(k, i, j)}{N_G(m, i, j)} \right| + \left| \sum_{m=1, m \neq k}^n \ln N_G(m, i, j) \frac{N_G(m, i, j)}{N_G(k, i, j)} \right| \quad (10)$$

式中, $N_G(k, i, j)$ 表示第 k 条线路的第 i 个时段内的第 j 个幅值区间内的采样点数与其所在时段内的总采样点数 zd 的比值;

定义第 k 条线路的第 i 个时段的相对熵值为 $S(k, i)$, 以一个时段内的 p 个幅值区间的相对熵值之和作为该时段的相对熵值, 则该时段的相对熵值 $S(k, i)$ 为:

$$S(k, i) = \sum_{j=1}^p S(k, i, j) \quad (11)$$

基于各线路每个时段的相对熵值得到反映故障后各线路暂态零序电流波形极性信息的相对熵矩阵 S 。

[0009] 进一步的, 在步骤 2 中, 按如下方法建立包含故障后各线路暂态零序电流波形幅值信息的综合幅值矩阵 F_3 :

第一幅值矩阵 F_1 定义为各线路每个时段内的暂态零序电流幅值绝对值最大值与该线路所有时段内的幅值绝对值最大值的比值构成的矩阵, 第一幅值矩阵 F_1 中元素为:

$$F_1(k, i) = \frac{MAX(k, i)}{MAX1(k)} \quad (12)$$

式中, $F_1(k, i)$ 为第 k 条线路的第 i 个时段的第一幅值, $MAX(k, i)$ 为第 k 条线路的第 i 个时段内的暂态零序电流幅值绝对值最大值, $MAX1(k)$ 为第 k 条线路所有时段内的幅值绝对值最大值;

第二幅值矩阵 F_2 定义为同一时段内各线路的暂态零序电流幅值绝对值最大值与该时段内所有线路的幅值绝对值最大值的比值构成的矩阵, 第二幅值矩阵 F_2 中元素为:

$$F_2(k, i) = \frac{MAX(k, i)}{MAX2(i)} \quad (13)$$

式中, $F_2(k, i)$ 为第 k 条线路的第 i 个时段的第二幅值, $MAX(k, i)$ 为第 k 条线路的第 i 个时段内的暂态零序电流幅值绝对值最大值, $MAX2(i)$ 为第 i 个时段内所有线路的幅值绝对值最大值;

结合第一幅值矩阵 F_1 、第二幅值矩阵 F_2 , 建立综合幅值矩阵 $F_3 = F_1 \cdot F_2$ 。

[0010] 进一步的, 在步骤 3 中, 按如下方法建立综合相对熵特征矩阵 XS :

结合相对熵矩阵 S 和综合幅值矩阵 F_3 , 建立包含暂态零序电流波形的故障信息的综合相对熵矩阵 XS , 综合相对熵矩阵 XS 中元素为:

$$XS(k, i) = F_3(k, i) \cdot S(k, i) \quad (14)$$

式中, $XS(k, i)$ 为第 k 条线路的第 i 个时段的综合相对熵值;

对得到的综合相对熵值 $XS(k, i)$ 进行归一化处理:

$$XS(i, j) = \frac{XS(i, j) - \min(XS)}{\max(XS) - \min(XS)} \quad (15)$$

式中, $XS(i, j)$ 为综合相对熵矩阵 XS 中元素, $\max(XS)$ 为综合相对熵矩阵 XS 中最大值元素, $\min(XS)$ 为综合相对熵矩阵 XS 中最小值元素, 则归一化后的综合相对熵矩阵 XS 的元素值在 $[0, 1]$ 间; 综合相对熵矩阵 XS , 如式 (16) 所示

$$XS = \begin{bmatrix} XS_{11} & XS_{12} & \dots & XS_{1p} \\ XS_{21} & XS_{22} & \dots & XS_{2p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ XS_{n1} & XS_{n2} & \dots & XS_{np} \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中, XS_{ij} 为第 i 条线路的第 j 个时段的综合相对熵值。

[0011] 进一步的, 在步骤 3 中, 按如下方法对综合相对熵特征矩阵 XS 进行聚类, 进而判别故障线路:

设 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 为输入空间的样本集, c 为聚类个数, v_j 为第 j 个类的聚类中心, $j=1, 2, \dots, c$, 通过非线性特征映射, 在高维特征空间中, 将欧式距离展开并利用高斯核函数 $K(x, y)$ 计算高维空间中样本的内积, 得到模糊核聚类的目标函数

$$J_{KFCM} = 2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^c u_{ij}^m [1 - K(x_i, v_j)] \quad (17)$$

式中, n 为样本数, m 为加权指数, u_{ij} 为样本 x_i 对应于第 j 个聚类的隶属度;

对于隶属度 u_{ij} 满足:

$$\forall i, \sum_{j=1}^c u_{ij} = 1; \forall i, j, u_{ij} \in [0, 1]; \forall j, \sum_{i=1}^n u_{ij} > 0 \quad (18)$$

分别对目标函数 J_{KFCM} 关于 u_{ij} 、 v_j 求偏导, 得到新的聚类中心和隶属度矩阵的更新公式:

$$v_j = \frac{\sum_{i=1}^n u_{ij}^m K(x_i, v_j) x_i}{\sum_{i=1}^n u_{ij}^m K(x_i, v_j)} \quad (19)$$

$$u_{ij} = \frac{[1 - K(x_i, v_j)]^{-1/(m-1)}}{\sum_{j=1}^c [1 - K(x_i, v_j)]^{-1/(m-1)}} \quad (20)$$

采用模糊核聚类算法按如下步骤对归一化后的综合相对熵特征矩阵 XS 进行聚类：

步骤 301：给定聚类个数 c 、阈值 ε 、最大迭代次数 T 和加权指数 m ；

步骤 302：初始化聚类中心， $V^{(1)} = [v_1^{(1)}, v_2^{(1)}, \dots, v_c^{(1)}]$ ，设置迭代次数 $k = 1$ ；

步骤 303：利用式 (20) 计算第 k 次迭代的隶属度 $u_{ij}^{(k)}$ ， $i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, c$ ；

步骤 304：利用式 (19) 计算第 $k+1$ 次迭代的聚类中心 $v_j^{(k+1)}$ ， $j = 1, 2, \dots, c$ ；

步骤 305：如果 $\|V^{(k+1)} - V^{(k)}\| < \varepsilon$ 或迭代次数 $k > T$ ，则算法结束，输出最终聚类结果，

即隶属度矩阵 U ；否则，令 $k=k+1$ ，返回步骤 303 继续迭代；最终得到隶属度矩阵 U 为

$$U = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \dots & u_{1N} \\ u_{21} & u_{22} & \dots & u_{2N} \end{bmatrix} \quad (21)$$

式中， N 为线路数目， u_{ij} 为第 j 条线路故障暂态零序电流属于第 i 类的隶属度；

由隶属度矩阵 U 将各线路分为两类，被单独分为一类的暂态零序电流对应的线路即为故障线路。

[0012] 与现有技术相比，本发明的有益效果是：将模糊核聚类算法引入谐振接地系统故障选线，避免了人工经验选取阈值从而实现智能化故障选线；采用直方图描述谐振接地系统接地故障暂态零序电流波形的时域分布特征，将体现暂态零序电流波形极性信息的相对熵矩阵与反映暂态零序电流波形幅值信息的综合幅值矩阵相结合来构造表征故障后暂态零序电流信息的综合相对熵矩阵，从而综合反映暂态零序电流的极性和幅值信息，更加准确的刻画出故障线路和非故障线路暂态零序电流特征。

附图说明

[0013] 图 1 是本发明实施例中谐振接地系统单相接地故障零序网络简化图。

[0014] 图 2 是本发明实施例中各线路故障暂态零序电流波形图。

[0015] 图 3 是本发明实施例中故障暂态零序电流首半波图。

[0016] 图 4 是本发明实施例中一时间段电流波形在幅值轴上的区间分布图。

[0017] 图 5 是本发明实施例中各线路第一时段内零序电流波形的直方图。

[0018] 图 6 是本发明实施例中谐振接地系统仿真模型图。

[0019] 图 7 是本发明实施例中故障线路及非故障线路暂态零序电流图。

[0020] 图 8 是本发明实施例中交流电弧电路仿真模型图。

[0021] 图 9 是本发明实施例中交流电弧电压及电流波形图。

[0022] 图 10 是本发明实施例中相电压过峰值时经 50cm 电弧接地电弧电流图。

[0023] 图 11 是本发明实施例中相电压过峰值时经 50cm 电弧接地电弧弧光电阻特性图。

[0024] 图 12 是本发明实施例的实现流程图。

具体实施方式

[0025] 谐振接地系统发生单相接地故障时,故障后非故障线路间的暂态零序电流波形的相似度大于故障线路与非故障线路间的相似度,本发明基于故障后暂态零序电流波形的相似性原理,提出一种利用波形时域特征聚类的谐振接地系统单相接地故障选线新方法。

[0026] 本发明利用波形时域特征聚类的谐振接地系统故障选线方法,如图 12 所示,包括以下步骤:

步骤 1:对谐振接地系统单相接地故障后各线路半个周波暂态零序电流波形进行直方图分解,得到反映故障后各线路暂态零序电流波形的时域分布特征的直方图。基于故障后各线路暂态零序电流波形的时域分布特征,采用反映状态差异的相对熵建立包含故障后各线路暂态零序电流波形极性信息的相对熵矩阵 S 。

[0027] 步骤 2:考虑暂态零序电流波形的局部相似性及整体相似性,定义第一幅值矩阵 F_1 、第二幅值矩阵 F_2 ,建立包含故障后各线路暂态零序电流波形幅值信息的综合幅值矩阵 F_3 。

[0028] 步骤 3:结合相对熵矩阵 S 和综合幅值矩阵 F_3 建立包含暂态零序电流波形的故障信息的综合相对熵特征矩阵 XS ,利用免阈值设定的模糊核聚类(Fuzzy kernel C-mean, KFCM)算法对所述综合相对熵特征矩阵 XS 进行聚类,进而判别故障线路。

[0029] 配电零序网络中,线路的阻抗远小于容抗,可忽略不计。同时忽略线路三相换位不平衡。得到谐振接地系统单相接地故障零序网络简化图,如图 1 所示。

[0030] 其中 L 为消弧线圈电感, C_k 为第 k 条线路的三相对地等效电容, R 为接地电阻。由于消弧线圈电阻远小于感抗,也可忽略不计, $u=U_m \sin(\omega t+\phi)$ 为故障相电源电压(与故障前的相电压大小相等,方向相反),其中 U_m 为电压幅值, ϕ 为电压初相角。

[0031] 由图 1 的运算电路列写回路的 KVL 方程,得

$$\begin{cases} u = u_C + \left(C \frac{du_C}{dt} + i_L \right) R \\ u_C = u_L = L \frac{di_L}{dt} \\ i_k = C_k \frac{du_C}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

式中, u_L 为消弧线圈电压, i_k 为第 k 条线路零序电流。

[0032] 式 (1) 经过拉普拉斯变换计算得消弧线圈的电流表达式 $I_L(s)$ 与第 k 条线路零序电流的表达式 $I_k(s)$ 为

$$I_L(s) = \frac{U_m}{R} \frac{\frac{1}{LC}(s \sin \varphi + \omega \cos \varphi)}{\left(s^2 + \frac{1}{RC}s + \frac{1}{LC} \right) (s^2 + \omega^2)} \quad (2)$$

$$I_k(s) = \frac{C_k U_m}{C R} \frac{s^2 (s \sin \varphi + \omega \cos \varphi)}{\left(s^2 + \frac{1}{RC} s + \frac{1}{LC} \right) (s^2 + \omega^2)} \quad (3)$$

式中, $C = \sum_{k=1}^n C_k$, n 为线路的条数。

[0033] 设
$$M = \frac{U_m}{R} \frac{s \sin \varphi + \omega \cos \varphi}{\left(s^2 + \frac{1}{RC} s + \frac{1}{LC} \right) (s^2 + \omega^2)}, k = \frac{1}{LC}, k_k = \frac{C_k}{C}$$
, 式(2)与(3)可写

为

$$I_L(s) = kM \quad (4)$$

$$I_k(s) = k_k Ms^2 \quad (5)$$

设第 i 条线路发生故障, 非故障线路的电容电流总和为

$$I_C(s) = \sum_{k=1, k \neq i}^n I_k(s) = (1 - k_i) Ms^2 \quad (6)$$

则流过故障线路的零序电流为

$$I(s) = I_L(s) + I_C(s) = kM + (1 - k_i) s^2 M \quad (7)$$

由式(3)可知, 非故障线路的零序电流为线路本身的对地电容电流, 其数值大小与故障相电压的初相角 φ , 过渡电阻 R , 消弧线圈的补偿电感 L , 及自身的对地电容 C_k 有关。当系统发生单相接地故障时, 非故障线路零序电流 φ 、 R 、 L 均相同, 其幅值大小由 C_k 的不同而不同, 其中 C_k 与线路的长度、类型等有关。又非故障线路的暂态零序电流方向均为母线流向线路, 故其零序电流波形相似。

[0034] 故障线路的零序电流 $I(s)$ 为消弧线圈的补偿电流 $I_L(s)$ 与所有非故障线路的零序电流 $I_C(s)$ 之和。由式(5)、式(7)可以看出, 故障线路的零序电流幅值与非故障线路的零序电流幅值相差较大。同时, 故障线路零序电流方向为线路流向母线, 与非故障线路方向相反。从其零序电流波形上表现为变化趋势与非故障线路相比相差很大。即故障线路与非故障线路间的波形极其不相似。

[0035] 在步骤1中, 按如下方法对各线路半个周波暂态零序电流波形进行直方图分解:

直方图分解是一种常用的数字图像处理方法, 图像的直方图常用于描述图像的特征。对于一灰度图像, 设其灰度级范围为 $[0, L]$, 图像总像素个数为 n , 则可定义灰度直方图为离散函数 $h(r) = n_r$, 其中 r 表示灰度级, $0 \leq r \leq L$, n_r 表示图像中灰度级为 r 的像素个数。借鉴图像的直方图处理技术, 采用直方图描述谐振接地系统单相接地故障暂态零序电流波形的时域分布特征。

[0036] 首先在时间轴上将暂态零序电流波形分成 p 个时段, 进而在幅值轴上将每个时段内的暂态零序电流波形分成 q 个区间, 统计各时段内每个区间的采样点数 $N_c(k, i, j)$, $1 \leq i \leq q, 1 \leq j \leq q, 1 \leq k \leq n, n$ 为线路总数; 将采样点数 N_c 和对应时段的总采样点数 zd 的比值作为波形分布系数, 得到暂态零序电流波形的直方图。具体过程如下:

建立 6 条缆-线混合的谐振接地系统仿真模型, 仿真线路 1 发生相电压过峰值时的小电阻接地故障, 各线路暂态零序电流波形如图 2 所示。

[0037] 线路 1 故障暂态零序电流的首半波如图 3 所示。在时域上将其均分成 p 段, 对不同的时段个数 $p=(5\sim 20)$ 进行大量仿真, 综合考虑取 $p=10$ 。仿真采样频率取 20kHz, 则半个周波的零序电流波形采样点数为 $1/2*0.02*20000=200$, 一个时间段内的总采样点数为 $zd=200/10=20$ 。

[0038] 以图 3 第 1 个时段内的零序电流波形为例, 首先用该时段内绝对值最大的零序电流值作为幅值归一化基准, 将该时段内零序电流的幅值限定在 $[-1, +1]$ 之间。归一化处理后, 分别对每个时段内的零序电流波形在幅值轴上进行划分, 分为上下各 $q/2$ 个幅值区间, 对不同的区间 $q=(5\sim 20)$ 个数进行大量仿真, 综合考虑取 $q=10$, 如图 4 所示。

[0039] 计算各个幅值区间内的采样点数占其所在时段内总采样点数的比值 $N_c(k, i, j)$, $N_c(k, i, j)$ 表示第 $k(1, \dots, n)$ 条线路的第 $i(1, \dots, 10)$ 个时段的第 $j(1, \dots, 10)$ 个幅值区间内的采样点数与其所在时段内的总采样点数 zd 的比值, 以 $N_c(k, i, j)$ 为幅值形成直方图, 如图 5 所示。

[0040] 由图 5 可看出非故障线路暂态零序电流在第一时段内的直方图分布具有相似性, 主要分布在第 6 到 10 区间内, 而故障线路与非故障线路暂态零序电流在第一时段内的直方图分布差异性较大, 故障线路主要分布在第 1 到 5 区间内, 该直方图分布的差异性体现了故障与非故障线路暂态零序电流波形的极性差异。

[0041] 在步骤 1 中, 按如下方法建立反映故障后各线路暂态零序电流波形极性信息的相对熵矩阵 S :

相对熵表示系统处于一个状态相对处于另一个状态的概率差异程度。若一个测试系统含有 N 个不同状态, 则除状态 X 外的剩余 $N-1$ 个状态相对于状态 X 的熵值, 加上状态 X 相对于除状态 X 外的剩余 $N-1$ 个状态的熵值, 称为系统中状态 X 的相对熵值, 该相对熵值反映了状态 X 与系统其余状态的概率差异性, 两个状态间的相对熵值差异值越大, 则两个状态相差越大。公式 (8) 表示状态 X 相对于状态 Y 的熵, 公式 (9) 表示状态 Y 相对于状态 X 的熵, 二者不相等。其中 $P(X)$ 为系统处于状态 X 的概率, $P(Y)$ 为系统处于状态 Y 的概率。

$$[0042] \quad H(X) = -\sum_{x,y} P(X) \ln \frac{P(X)}{P(Y)} \quad (8)$$

$$H(Y) = -\sum_{x,y} P(Y) \ln \frac{P(Y)}{P(X)} \quad (9)$$

以故障后各线路暂态零序电流波形的时域分布特征矩阵为系统, 以所述时域分布特征矩阵内的元素为所述系统的状态, 以所述元素的元素值为状态出现的概率, 采用相对熵表征故障后各线路暂态零序电流波形间极性的差异性。定义第 k 条线路的第 i 个时段内的第 j 个幅值区间的相对熵值为 $S(k, i, j)$, 其值为 $N_c(k, i, j)$ 相对于 $N_c(m, i, j)$ 的相对熵值与 $N_c(m, i, j)$ 相对于 $N_c(k, i, j)$ 的相对熵值之和, $m=1, 2, \dots, n, m \neq k$ 。

[0043] 根据不同概率之比求得的相对熵值可正可负, 在累加过程中存在相互抵消的可能, 故采用相对熵的绝对值进行计算, 这样可突出表现相对熵值变化的趋势和大小。则相对熵值 $S(k, i, j)$ 为:

$$S(k, i, j) = \left| \sum_{m=1, m \neq k}^n \ln N_G(k, i, j) \frac{N_G(k, i, j)}{N_G(m, i, j)} \right| + \left| \sum_{m=1, m \neq k}^n \ln N_G(m, i, j) \frac{N_G(m, i, j)}{N_G(k, i, j)} \right|$$

(10)

式中, $N_G(k, i, j)$ 表示第 k 条线路的第 i 个时段内的第 j 个幅值区间内的采样点数与其所在时段内的总采样点数 zd 的比值; 对于分子出现 N_G 为 0 的情况, 规定

$$0 \times \log \frac{0}{N_G(m, i, j)} = 0; \text{ 对于分母出现 } N_G \text{ 为 } 0 \text{ 的情况, 取 } N_G = 10^{-30}.$$

[0044] 定义第 k 条线路的第 i 个时段的相对熵值为 $S(k, i)$, 以一个时段内的 p 个幅值区间的相对熵值之和作为该时段的相对熵值, 则该时段的相对熵值 $S(k, i)$ 为:

$$S(k, i) = \sum_{j=1}^p S(k, i, j) \quad (11)$$

基于各线路每个时段的相对熵值得到反映故障后各线路暂态零序电流波形极性信息的相对熵矩阵 S 。

[0045] 在步骤 2 中, 按如下方法建立包含故障后各线路暂态零序电流波形幅值信息的综合幅值矩阵 F_3 :

线路各时段的零序电流波形经过归一化后, 其相对熵矩阵仅体现了故障后各线路暂态零序电流波形的极性信息。为运用故障后各线路暂态零序电流波形的幅值信息, 考虑故障后各线路暂态零序电流波形的整体相似性及局部相似性, 分别定义第一幅值矩阵 F_1 、第二幅值矩阵 F_2 来刻画幅值信息。

[0046] 第一幅值矩阵 F_1 定义为各线路每个时段内的暂态零序电流幅值绝对值最大值与该线路所有时段内的幅值绝对值最大值的比值构成的矩阵, 第一幅值矩阵 F_1 中元素为:

$$F_1(k, i) = \frac{MAX(k, i)}{MAX1(k)} \quad (12)$$

式中, $F_1(k, i)$ 为第 k 条线路的第 i 个时段的第一幅值, $MAX(k, i)$ 为第 k 条线路的第 i 个时段内的暂态零序电流幅值绝对值最大值, $MAX1(k)$ 为第 k 条线路所有时段内的幅值绝对值最大值, $MAX1(k) = \max(MAX(k, :))$ 。

[0047] 第一幅值矩阵 F_1 体现了故障后第 k 条线路中第 i 个时段的幅值信息量的大小。

[0048] 第二幅值矩阵 F_2 定义为同一时段内各线路的暂态零序电流幅值绝对值最大值与该时段内所有线路的幅值绝对值最大值的比值构成的矩阵, 第二幅值矩阵 F_2 中元素为:

$$F_2(k, i) = \frac{MAX(k, i)}{MAX2(i)} \quad (13)$$

式中, $F_2(k, i)$ 为第 k 条线路的第 i 个时段的第二幅值, $MAX(k, i)$ 为第 k 条线路的第 i 个时段内的暂态零序电流幅值绝对值最大值, $MAX2(i)$ 为第 i 个时段内所有线路的幅值绝对值最大值, $MAX2(i) = \max(MAX(:, i))$ 。

[0049] 第二幅值矩阵 F_2 体现了故障后第 i 个时段不同线路幅值信息量的大小。

[0050] 结合第一幅值矩阵 F_1 、第二幅值矩阵 F_2 , 建立综合幅值矩阵 $F_3 = F_1 \cdot F_2$, 综合幅值矩阵 F_3 体现了故障后第 k 条线路中第 i 个时段的幅值信息量。

[0051] 在步骤 3 中,按如下方法建立综合相对熵特征矩阵 XS :

结合相对熵矩阵 S 和综合幅值矩阵 F_3 ,建立包含暂态零序电流波形的故障信息的综合相对熵矩阵 XS ,综合相对熵矩阵 XS 中元素为 :

$$XS(k, i) = F_3(k, i) \cdot S(k, i) \quad (14)$$

式中, $XS(k, i)$ 为第 k 条线路的第 i 个时段的综合相对熵值。

[0052] 对得到的综合相对熵值 $XS(k, i)$ 进行归一化处理 :

$$XS(i, j) = \frac{XS(i, j) - \min(XS)}{\max(XS) - \min(XS)} \quad (15)$$

式中, $XS(i, j)$ 为综合相对熵矩阵 XS 中元素, $\max(XS)$ 为综合相对熵矩阵 XS 中最大值元素, $\min(XS)$ 为综合相对熵矩阵 XS 中最小值元素,则归一化后的综合相对熵矩阵 XS 的元素值在 $[0, 1]$ 间。综合相对熵矩阵 XS ,如式 (16) 所示

$$XS = \begin{bmatrix} XS_{11} & XS_{12} & \dots & XS_{1p} \\ XS_{21} & XS_{22} & \dots & XS_{2p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ XS_{n1} & XS_{n2} & \dots & XS_{np} \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中, XS_{ij} 为第 i 条线路的第 j 个时段的综合相对熵值。

[0053] 在步骤 3 中,按如下方法对综合相对熵特征矩阵 XS 进行聚类,进而判别故障线路 :

模糊核聚类利用 Mercer 核,把输入空间的样本映射到高维特征空间,并在高维特征空间中进行聚类。

[0054] 设 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 为输入空间的样本集, c 为聚类个数, v_j 为第 j 个类的聚类中心, $j=1, 2, \dots, c$,通过非线性特征映射,在高维特征空间中,将欧式距离展开并利用高斯核函数 $K(x, y)$ 计算高维空间中样本的内积,得到模糊核聚类的目标函数

$$J_{\text{KFCM}} = 2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^c u_{ij}^m [1 - K(x_i, v_j)] \quad (17)$$

式中, n 为样本数, m 为加权指数, u_{ij} 为样本 x_i 对应于第 j 个聚类的隶属度。

[0055] 对于隶属度 u_{ij} 满足 :

$$\forall i, \sum_{j=1}^c u_{ij} = 1; \forall i, j, u_{ij} \in [0, 1]; \forall j, \sum_{i=1}^n u_{ij} > 0 \quad (18)$$

分别对目标函数 J_{KFCM} 关于 u_{ij} 、 v_j 求偏导,得到新的聚类中心和隶属度矩阵的更新公式 :

$$v_j = \frac{\sum_{i=1}^n u_{ij}^m K(x_i, v_j) x_i}{\sum_{i=1}^n u_{ij}^m K(x_i, v_j)} \quad (19)$$

$$u_{ij} = \frac{[1 - K(x_i, v_j)]^{-1/(m-1)}}{\sum_{j=1}^c [1 - K(x_i, v_j)]^{-1/(m-1)}} \quad (20)$$

采用模糊核聚类算法按如下步骤对归一化后的综合相对熵特征矩阵 XS 进行聚类：

步骤 301：给定聚类个数 c ($2 \leq c \leq n$)、阈值 ε 、最大迭代次数 T 和加权指数 m 。

[0056] 步骤 302：初始化聚类中心， $V^{(1)} = [v_1^{(1)}, v_2^{(1)}, \dots, v_c^{(1)}]$ ，设置迭代次数 $k = 1$ 。

[0057] 步骤 303：利用式 (20) 计算第 k 次迭代的隶属度 $u_{ij}^{(k)}$ ， $i = 1, 2, \dots, n$ ， $j = 1, 2, \dots, c$ 。

[0058] 步骤 304：利用式 (19) 计算第 $k+1$ 次迭代的聚类中心 $v_j^{(k+1)}$ ， $j = 1, 2, \dots, c$ 。

[0059] 步骤 305：如果 $\|V^{(k+1)} - V^{(k)}\| < \varepsilon$ 或迭代次数 $k > T$ ，则算法结束，输出最终聚类结果，即隶属度矩阵 U ；否则，令 $k=k+1$ ，返回步骤 303 继续迭代。最终得到隶属度矩阵 U 为

$$U = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \dots & u_{1N} \\ u_{21} & u_{22} & \dots & u_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ u_{N1} & u_{N2} & \dots & u_{NN} \end{bmatrix} \quad (21)$$

式中， N 为线路数目， u_{ij} 为第 j 条线路故障暂态零序电流属于第 i 类的隶属度。

[0060] 由隶属度矩阵 U 将各线路分为两类，由隶属度矩阵 U 可确定隶属于第 1 类的暂态零序电流和隶属于第 2 类的暂态零序电流，被单独聚为一类的暂态零序电流对应的线路即为故障线路。

[0061] 故障后非故障线路间的暂态零序电流波形间的相似度大于故障线路与非故障线路间的相似度，在综合相对熵矩阵上则表现为故障线路与非故障线路间的特征值差异大于非故障线路间的特征值差异，因此利用隶属度矩阵 U 可对故障线路进行判别。

[0062] 下面结合附图及具体实施例对本发明作进一步说明。

[0063] 利用 ATP 搭建 6 条缆线混合的谐振接地系统模型，如图 6 所示。图中： J_L 为架空线路长度； D_L 为电缆线路长度； R 为过渡电阻。110kV 主变压器型号为 SZ-31500/110/10，连接组别 Yd11；10kV 变压器型号为 S11-MR-1000/10/0.4，连接组别 Dy11。架空线路每千米正序参数： $R_1=0.17 \Omega$ ， $L_1=1.21\text{mH}$ ， $C_1=0.0097 \mu\text{F}$ ；零序参数： $R_0=0.23 \Omega$ ， $L_0=5.478\text{mH}$ ， $C_0=0.008 \mu\text{F}$ 。电缆线路每千米正序参数： $R_1=0.27 \Omega$ ， $L_1=0.255\text{mH}$ ， $C_1=0.339 \mu\text{F}$ ；零序参数： $R_0=2.7 \Omega$ ， $L_0=1.019\text{mH}$ ， $C_0=0.28 \mu\text{F}$ 。计算得系统总电容电流 $I_C=3\omega C_\Sigma U_N=24.6\text{A}>20\text{A}$ ，应装设消弧线圈。过补偿度取 5%，电感 $L=1/1.05 \times U_N / \omega I_C=0.7116\text{H}$ ；消弧线圈的有功损耗大约为感性损耗的 2.5%~5%，取 3%，则电阻 $R_L=0.03U_N / 1.05I_C=6.7 \Omega$ 。

[0064] 对不同故障情况下的单相接地故障利用本发明进行选线，限于篇幅，仅列举部分典型故障情况。

[0065] 线路 1 在距离母线 2km 处、C 相电压过峰值、接地电阻为 2Ω 时发生故障，故障线路 1 和某 2 条非故障线路的暂态零序电流波形如图 7 所示。

[0066] 从图 7 可看出，故障线路与非故障线路暂态零序电流方向相反，非故障线路间暂态零序电流变化趋势一致，相位相同，且非故障线路之间的幅值差异远远比非故障线路与故障线路之间的幅值差异小；当暂态量衰减完毕进入稳态后，故障线路与非故障线路的相位一致，且两者间幅值差异变小，波形相似性增强，不利于故障选线。因此利用暂态过程中

非故障线路间暂态零序电流相似程度大,而故障线路与非故障线路的暂态零序电流相似程度小的特点,可实现故障选线。

[0067] 取 6 条线路故障后半周波(0.01s)的暂态零序电流 $I_{01} \sim I_{06}$, 在时间轴上十等分 $t_1 \sim t_{10}$ (每一时段 0.001s), 再对各条线路每一时间段内的暂态零序电流在幅值轴上分上下各 5 个区间($A_1 \sim A_{10}$)。分别求取幅值矩阵 F_3 (6×10)及相对熵矩阵 S (6×10), 进一步求取

综合相对熵矩阵 XS , 利用式 $XS(i, j) = \frac{XS(i, j) - \min(XS)}{\max(XS) - \min(XS)}$ 对综合相对熵矩阵进行归一化处理, 其中, $XS(i, j)$ 为 XS 中元素, $\max(XS)$ 为 XS 中最大值元素, $\min(XS)$ 为 XS 中最小值元素, 则归一化后的综合相对熵矩阵 XS 元素值在 $[0, 1]$ 间。得归一化的综合相对熵矩阵为

$$XS = \begin{bmatrix} 1.0000 & 0.4871 & 0.3014 & 0.2730 & 0.1053 & 0.3052 & 0.0667 & 0.1631 & 0.0462 & 0.1878 \\ 0.0218 & 0.0194 & 0.0122 & 0.0078 & 0.0131 & 0.0062 & 0.0021 & 0.0038 & 0 & 0.0082 \\ 0.0657 & 0.0744 & 0.0476 & 0.0249 & 0.0428 & 0.0291 & 0.0199 & 0.0204 & 0.0048 & 0.0391 \\ 0.0502 & 0.0943 & 0.0663 & 0.0258 & 0.0954 & 0.0785 & 0.0049 & 0.0776 & 0.0175 & 0.0125 \\ 0.0641 & 0.0366 & 0.0466 & 0.0745 & 0.0064 & 0.0337 & 0.0375 & 0.0166 & 0.0566 & 0.0563 \\ 0.0628 & 0.0457 & 0.0755 & 0.0356 & 0.0497 & 0.0254 & 0.0108 & 0.0182 & 0.0070 & 0.0440 \end{bmatrix}$$

(22)

利用 KFCM 对归一化后的综合相对熵矩阵 XS 进行聚类, 得到隶属度矩阵 U 为

$$U = \begin{bmatrix} 1.0000 & 0.0050 & 0.0007 & 0.0077 & 0.0046 & 0.0010 \\ 0.0000 & 0.9950 & 0.9993 & 0.9923 & 0.9954 & 0.9990 \end{bmatrix}$$

隶属度矩阵 U 的行代表状态类别, 1~6 列分别代表线路 1~6 属于故障类与非故障类的隶属度。故障后非故障线路间的暂态零序电流波形间的相似度大于故障线路与非故障线路间的相似度, 在综合相对熵矩阵上则表现为故障线路与非故障线路间的特征值差异大于非故障线路间的特征值差异, 因此利用隶属度矩阵 U 可对故障线路进行判别。由隶属度矩阵 U 可以看出, 线路 1 聚为一类, 其余 5 条线路聚为一类, 故判别故障线路为线路 1, 与实际情况一致。

[0068] 典型故障选线结果:

1) 两点接地故障

谐振接地系统中, 某一线路发生高阻接地故障后, 故障相电压幅值变化不大, 在某些情况下该线路故障相可能发生二次接地故障。仿真线路 3、5 发生两点接地故障的选线结果见表 1。

表 1 同线路两点接地故障选线结果

L_m	$\theta/\%$	x_f/km	R/Ω	隶属度矩阵 U	选线结果
3	0	4	2000	$\begin{bmatrix} 0.0072 & 0.0029 & 1.0000 & 0.0027 & 0.0058 & 0.0033 \\ 0.9928 & 0.9971 & 0.0000 & 0.9973 & 0.9942 & 0.9967 \end{bmatrix}$	L ₃ 故障
	90	10	20		
5	0	5	2000	$\begin{bmatrix} 0.0053 & 0.0022 & 0.0023 & 0.0138 & 1.0000 & 0.0018 \\ 0.9947 & 0.9978 & 0.9977 & 0.9862 & 0.0000 & 0.9982 \end{bmatrix}$	L ₅ 故障
	90	8	20		
3	30	4	2000	$\begin{bmatrix} 0.9921 & 0.9973 & 0.0000 & 0.9965 & 0.9973 & 0.9941 \\ 0.0079 & 0.0027 & 1.0000 & 0.0035 & 0.0027 & 0.0059 \end{bmatrix}$	L ₃ 故障
	90	10	20		
5	30	5	2000	$\begin{bmatrix} 0.0050 & 0.0022 & 0.0018 & 0.0060 & 1.0000 & 0.0031 \\ 0.9950 & 0.9978 & 0.9982 & 0.9940 & 0.0000 & 0.9969 \end{bmatrix}$	L ₅ 故障
	90	8	20		

[0069] 2) 噪声干扰

线路 2、4 在叠加信噪比为 20dB 的高斯白噪声干扰下的 4 种典型接地故障选线结果见表 2。结果表明该选线方法具有较强的抗干扰能力。

表 2 叠加噪声情况下的选线结果

$\theta/\%$	L_m	R/Ω	隶属度矩阵 U	选线结果
0	2	2	$\begin{bmatrix} 0.0012 & 1.0000 & 0.0002 & 0.0002 & 0.0001 & 0.0001 \\ 0.9988 & 0.0000 & 0.9998 & 0.9998 & 0.9999 & 0.9999 \end{bmatrix}$	L ₂ 故障
0	4	2000	$\begin{bmatrix} 0.0022 & 0.0026 & 0.0039 & 1.0000 & 0.0017 & 0.0004 \\ 0.9978 & 0.9974 & 0.9961 & 0.0000 & 0.9983 & 0.9996 \end{bmatrix}$	L ₄ 故障
90	2	2	$\begin{bmatrix} 0.9938 & 0.0000 & 0.9994 & 0.9934 & 0.9983 & 0.9997 \\ 0.0062 & 1.0000 & 0.0006 & 0.0066 & 0.0017 & 0.0003 \end{bmatrix}$	L ₂ 故障
90	4	2000	$\begin{bmatrix} 0.0200 & 0.0144 & 0.0243 & 1.0000 & 0.0160 & 0.0074 \\ 0.9800 & 0.9856 & 0.9757 & 0.0000 & 0.9840 & 0.9926 \end{bmatrix}$	L ₄ 故障

[0070] 3) 信号采样不同步

线路 6 在距离母线 2km 处发生单相接地故障，过渡电阻为 2Ω。仿真线路 3、线路 4 滞

后线路 1、线路 2 十个采样点，线路 5、线路 6 滞后线路 1、线路 2 十五个采样点。其选线结果见表 3。

表 3 采样不同步情况下的选线结果

$\theta/\%$	隶属度矩阵 U	选线结果
0	$\begin{bmatrix} 0.9983 & 0.9993 & 0.9997 & 0.9976 & 0.9997 & 0.0000 \\ 0.0017 & 0.0007 & 0.0003 & 0.0024 & 0.0003 & 1.0000 \end{bmatrix}$	L_6 故障
30	$\begin{bmatrix} 0.0143 & 0.0036 & 0.0012 & 0.0249 & 0.0058 & 1.0000 \\ 0.9857 & 0.9964 & 0.9988 & 0.9751 & 0.9942 & 0.0000 \end{bmatrix}$	L_6 故障
60	$\begin{bmatrix} 0.0214 & 0.0067 & 0.0078 & 0.0419 & 0.0123 & 1.0000 \\ 0.9786 & 0.9933 & 0.9922 & 0.9581 & 0.9877 & 0.0000 \end{bmatrix}$	L_6 故障
90	$\begin{bmatrix} 0.9606 & 0.9848 & 0.9905 & 0.8289 & 0.9326 & 0.0009 \\ 0.0394 & 0.0152 & 0.0095 & 0.1711 & 0.0674 & 0.9991 \end{bmatrix}$	L_6 故障

[0071] 4) 断线故障

在发生断线情况下不同电压初相角、不同相断线、不同断口侧落地等条件下选线结果见表 4。

表 4 断线情况下的选线结果

距母线 x(km)	断线相	落地侧	$\varphi/^\circ$	隶属度矩阵	选线结果
6	A	电源侧	90	$\begin{bmatrix} 0.9970 & 0.0000 & 0.9997 & 0.9986 & 0.9991 & 0.9998 \\ 0.0030 & 1.0000 & 0.0003 & 0.0014 & 0.0009 & 0.0002 \end{bmatrix}$	L ₂ 故障
		负荷侧	90	$\begin{bmatrix} 0.0081 & 1.0000 & 0.0013 & 0.0004 & 0.0037 & 0.0004 \\ 0.9919 & 0.0000 & 0.9987 & 0.9996 & 0.9963 & 0.9996 \end{bmatrix}$	L ₂ 故障
6	C	电源侧	90	$\begin{bmatrix} 0.0031 & 1.0000 & 0.0007 & 0.0008 & 0.0004 & 0.0004 \\ 0.9969 & 0.0000 & 0.9993 & 0.9992 & 0.9996 & 0.9996 \end{bmatrix}$	L ₂ 故障
		负荷侧	90	$\begin{bmatrix} 0.0073 & 1.0000 & 0.0012 & 0.0004 & 0.0037 & 0.0003 \\ 0.9927 & 0.0000 & 0.9988 & 0.9996 & 0.9963 & 0.9997 \end{bmatrix}$	L ₂ 故障
		负荷侧	45	$\begin{bmatrix} 0.9807 & 0.1840 & 0.8974 & 0.9717 & 0.9478 & 0.7054 \\ 0.0193 & 0.8160 & 0.1026 & 0.0283 & 0.0522 & 0.2946 \end{bmatrix}$	L ₂ 故障
6	A	电源侧	0	$\begin{bmatrix} 0.0001 & 1.0000 & 0.0002 & 0.0001 & 0.0000 & 0.0002 \\ 0.9999 & 0.0000 & 0.9998 & 0.9999 & 1.0000 & 0.9998 \end{bmatrix}$	L ₂ 故障
		负荷侧	0	$\begin{bmatrix} 0.0042 & 1.0000 & 0.0016 & 0.0004 & 0.0024 & 0.0002 \\ 0.9958 & 0.0000 & 0.9984 & 0.9996 & 0.9976 & 0.9998 \end{bmatrix}$	L ₂ 故障
6	C	电源侧	0	$\begin{bmatrix} 0.9990 & 0.0000 & 0.9998 & 0.9998 & 1.0000 & 0.9999 \\ 0.0010 & 1.0000 & 0.0002 & 0.0002 & 0.0000 & 0.0001 \end{bmatrix}$	L ₂ 故障
		负荷侧	0	$\begin{bmatrix} 0.0041 & 1.0000 & 0.0025 & 0.0005 & 0.0012 & 0.0005 \\ 0.9959 & 0.0000 & 0.9975 & 0.9995 & 0.9988 & 0.9995 \end{bmatrix}$	L ₂ 故障

[0072] 5) 电弧故障

利用 ATPDraw 的 OBJECT 模块提供的 MODEL 语言对电弧的动态特征及电弧熄弧、燃弧过程进行描述。首先创建 sup-file,即定义模型控制块的节点名称及类型,并设计控制块外观形状。其次是一次电弧模型的 mod-file 编写,通过循环迭代计算,得到控制电弧模型的 TACS 非线性电阻阻值,利用 MODEL 语言的编程,实现对控制块控制功能的描述。建立一个电阻性动态二端元件作为交流电弧的电路仿真模型(如图 8)验证所建一次电弧的有效性。

[0073] 由图 9(a)可以看出交流电弧电压波形类似于马鞍形,呈现明显的非线性特性。图 9 (b)为电弧电流波形,理论上电弧电流仅在某一时刻过零,但由图 9 (b)可以看出,在电流过零前后一小段时间内,电流近似地等于零,这一段时间就是所谓的“电弧电流零休”时间。“电弧电流零休”现象是由于在电流自然过零前后一段时间内,弧隙电阻变大,所以在电流前半周结束和下半周开始时,电弧中电流按照电弧电压与电弧电阻的比值而变化。

[0074] 仿真第一条架空线路距离母线 6km 处在 C 相电压过峰值(0s)时发生电弧接地故障,测得 50cm 电弧接地电流及其弧光电阻特性,如图 10、图 11 所示。

[0075] 由图 10 (a) 可知,燃弧之后(即故障后)的第一个周波里,由于电容电流高频振荡的存在使得电弧一直没有熄弧而保持燃弧状态。由图 10 (a)与图 11 (a)可知当电容电流振荡基本衰减完后的第一个电流过零点(0.035s)出现熄弧现象,此后电弧稳定燃烧,熄弧(即高阻状态)、燃弧交替进行,每一个周波在电弧电流的两个过零点有两次熄弧,电弧稳定燃烧的电流波形如图 10 (b) 所示,在电弧稳定燃烧后在电流过零处可以看到“零休现象”,即图 11 (b) 中的电弧电阻特性。

[0076] 线路 1 在不同弧长及不同时刻下的电弧接地故障选线结果见表 5。其中 l 为电弧的弧长。

表 5 电弧故障选线结果

$\theta/^\circ$	l/cm	x_0/km	隶属度矩阵 U	选线结果
0	50	6	$\begin{bmatrix} 1.0000 & 0.0007 & 0.0001 & 0.0005 & 0.0001 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.9993 & 0.9999 & 0.9995 & 0.9999 & 1.0000 \end{bmatrix}$	L ₁ 故障
0	200	6	$\begin{bmatrix} 0.0000 & 0.9994 & 1.0000 & 0.9992 & 0.9998 & 1.0000 \\ 1.0000 & 0.0006 & 0.0000 & 0.0008 & 0.0002 & 0.0000 \end{bmatrix}$	L ₁ 故障
90	50	6	$\begin{bmatrix} 1.0000 & 0.0024 & 0.0002 & 0.0051 & 0.0018 & 0.0002 \\ 0.0000 & 0.9976 & 0.9998 & 0.9949 & 0.9982 & 0.9998 \end{bmatrix}$	L ₁ 故障
90	200	6	$\begin{bmatrix} 1.0000 & 0.0063 & 0.0004 & 0.0098 & 0.0054 & 0.0007 \\ 0.0000 & 0.9937 & 0.9996 & 0.9902 & 0.9946 & 0.9993 \end{bmatrix}$	L ₁ 故障

[0077] 以上是本发明的较佳实施例,凡依本发明技术方案所作的改变,所产生的功能作用未超出本发明技术方案的范围时,均属于本发明的保护范围。

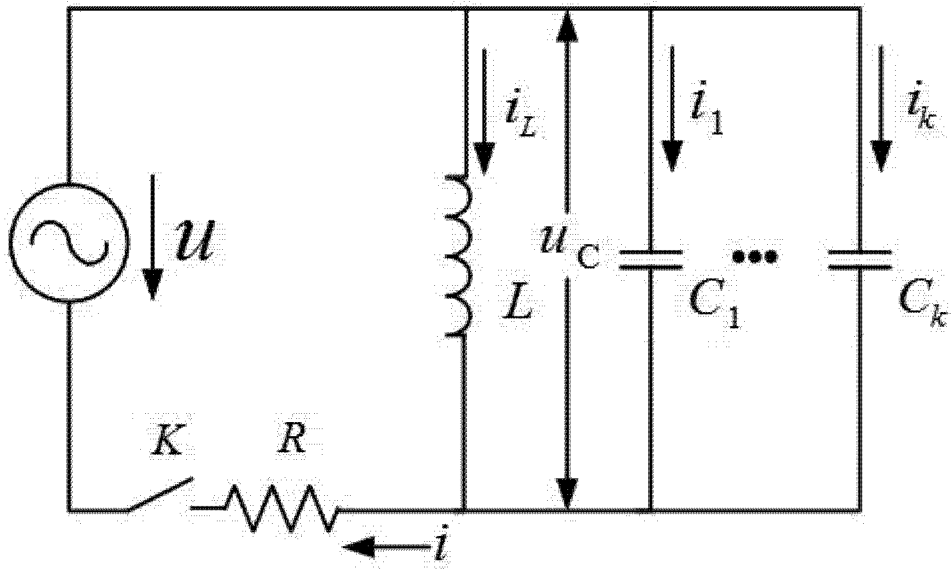


图 1

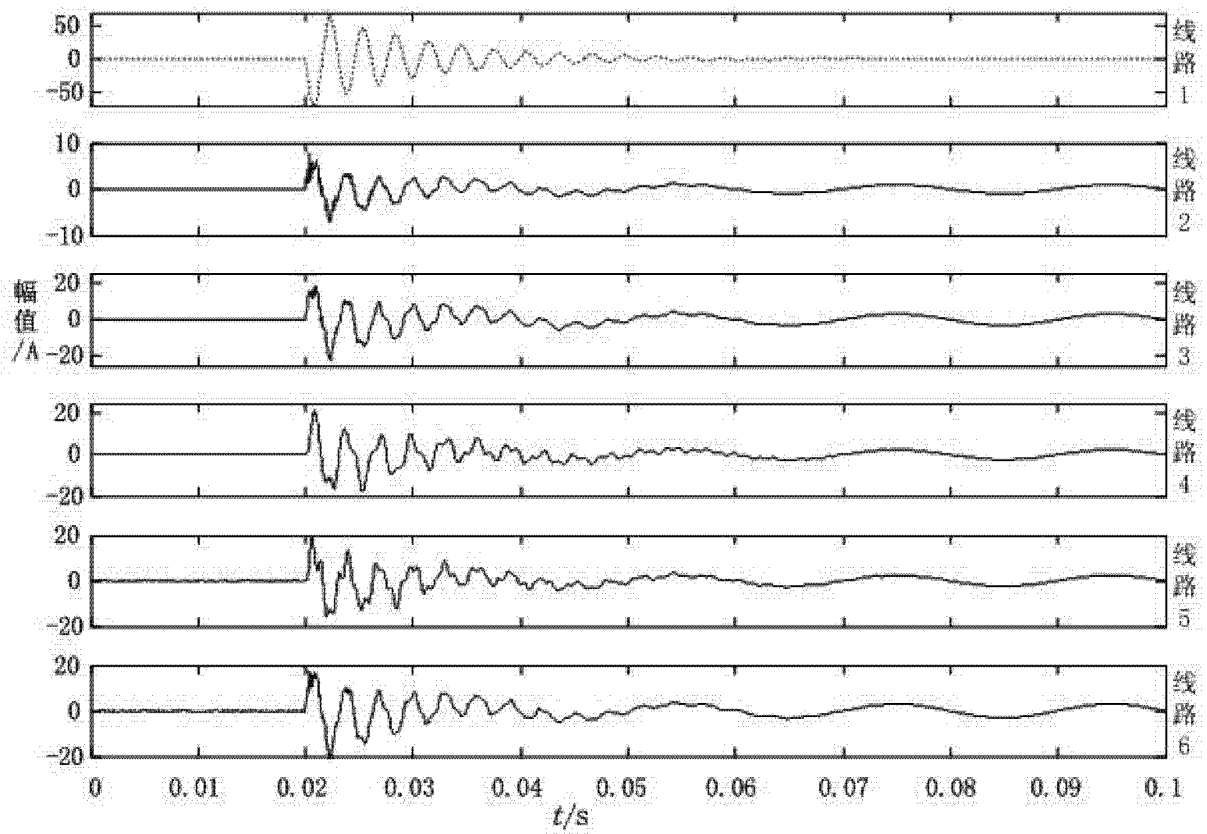


图 2

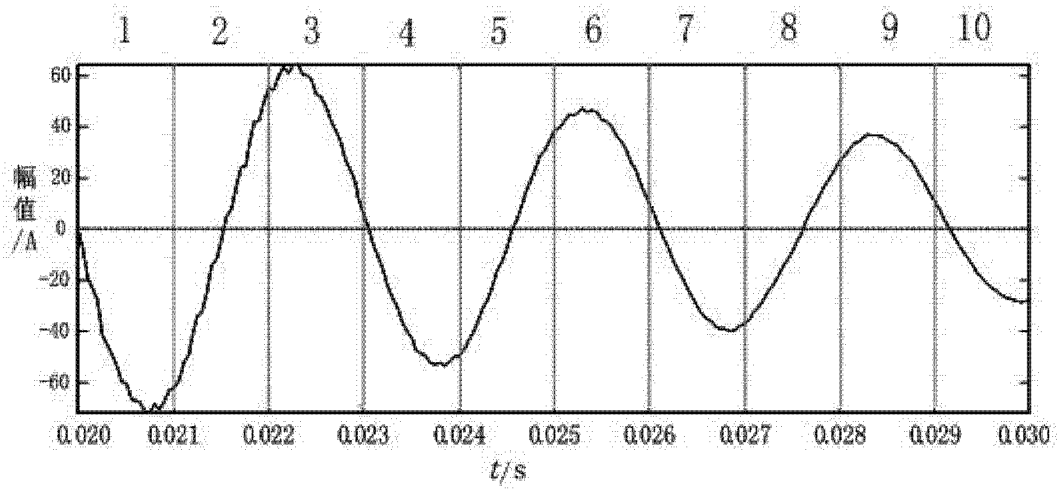


图 3

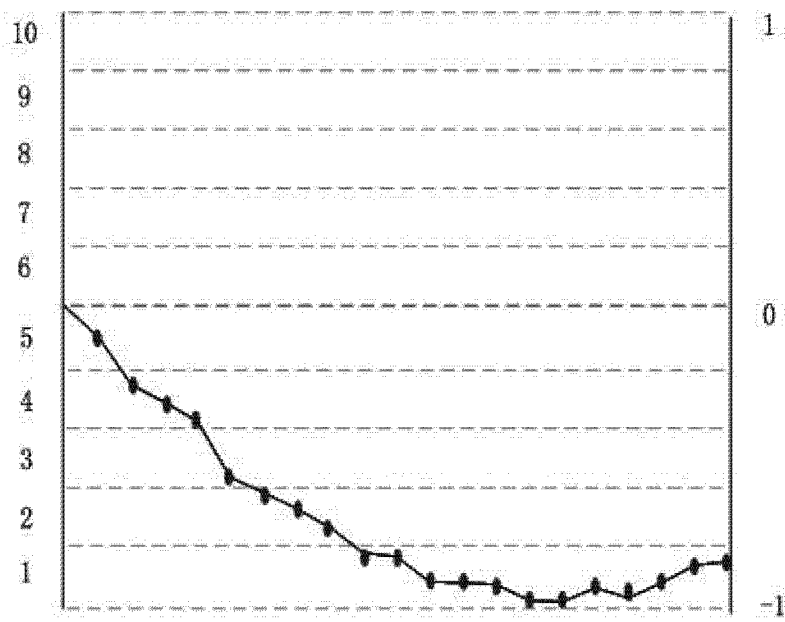


图 4

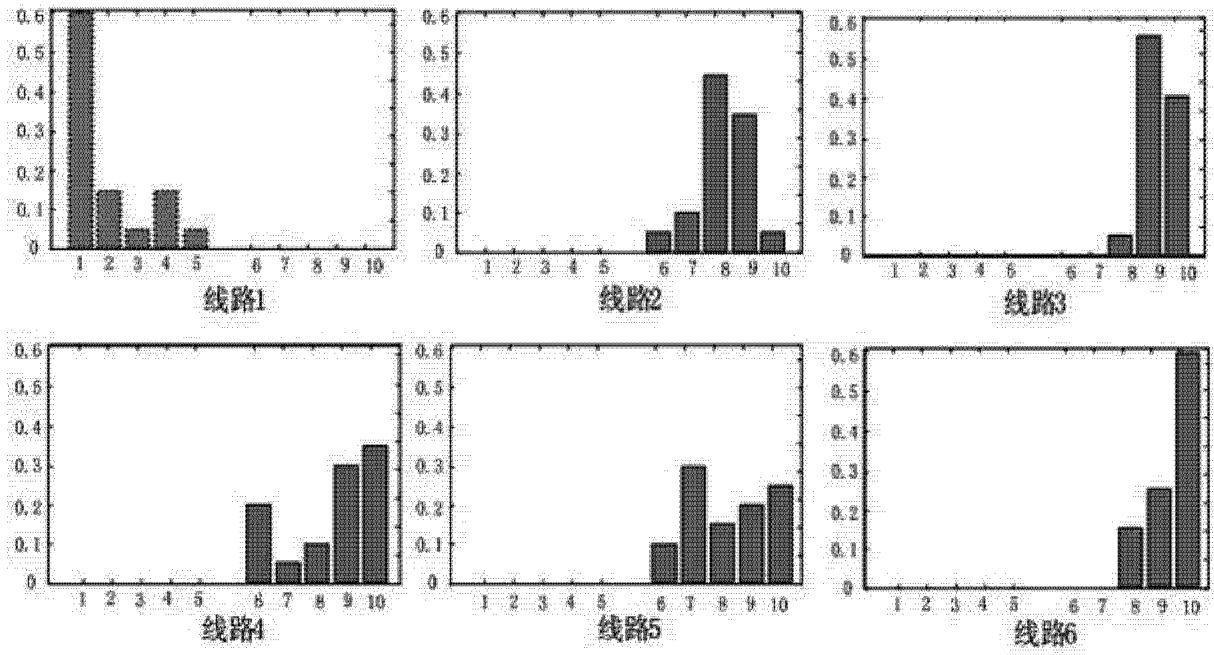


图 5

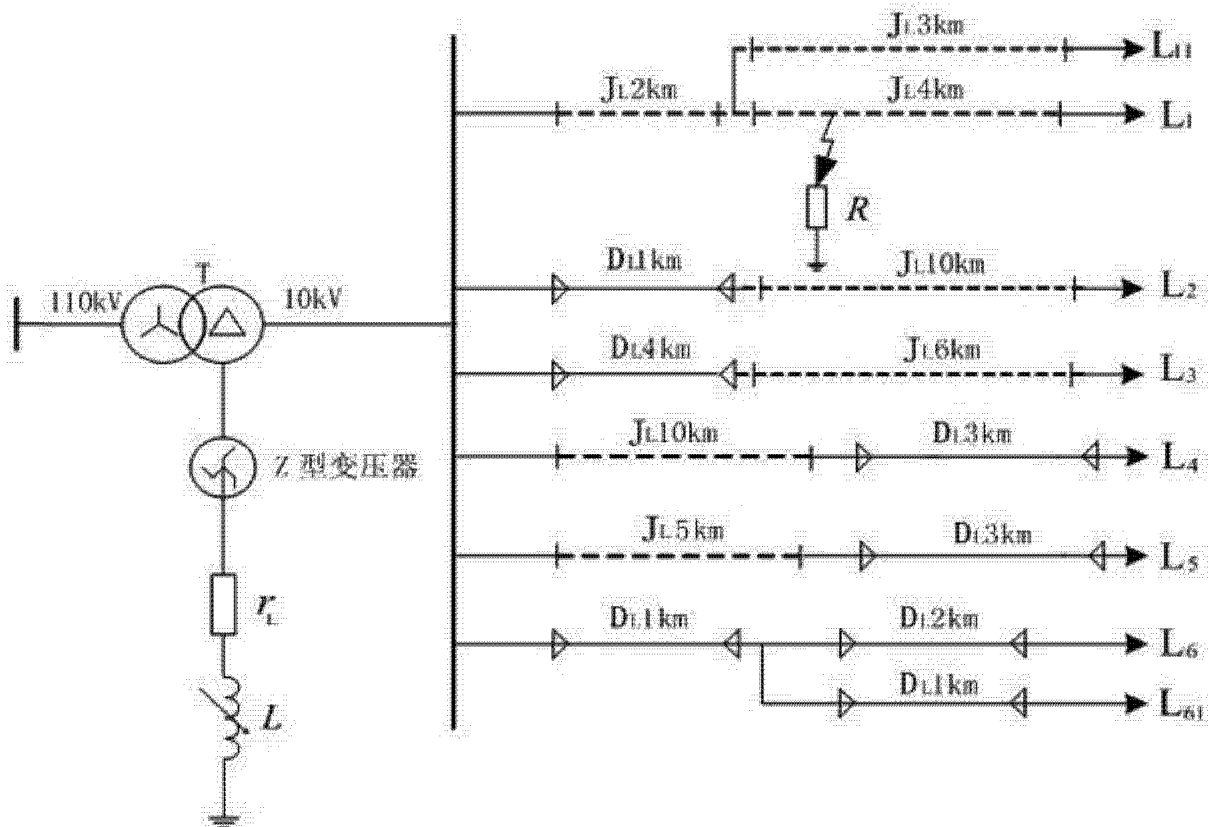


图 6

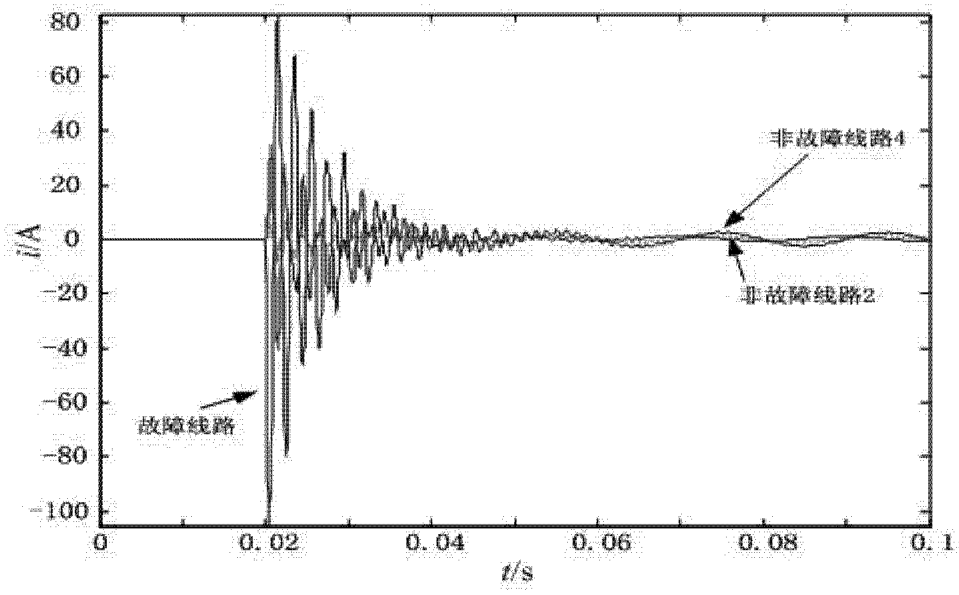


图 7

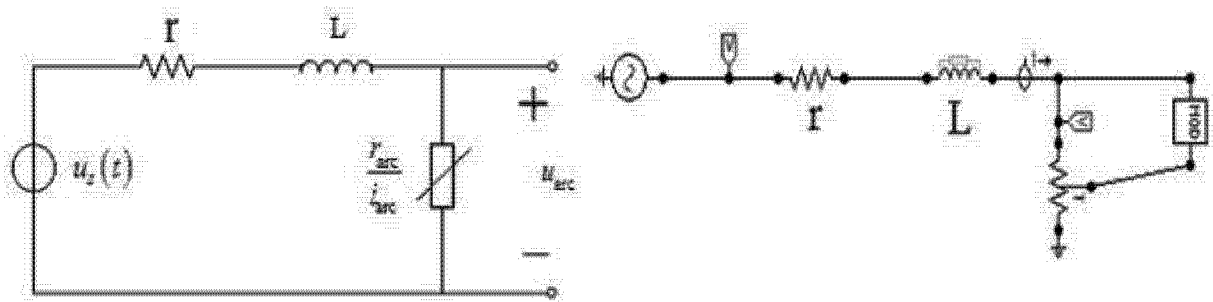


图 8

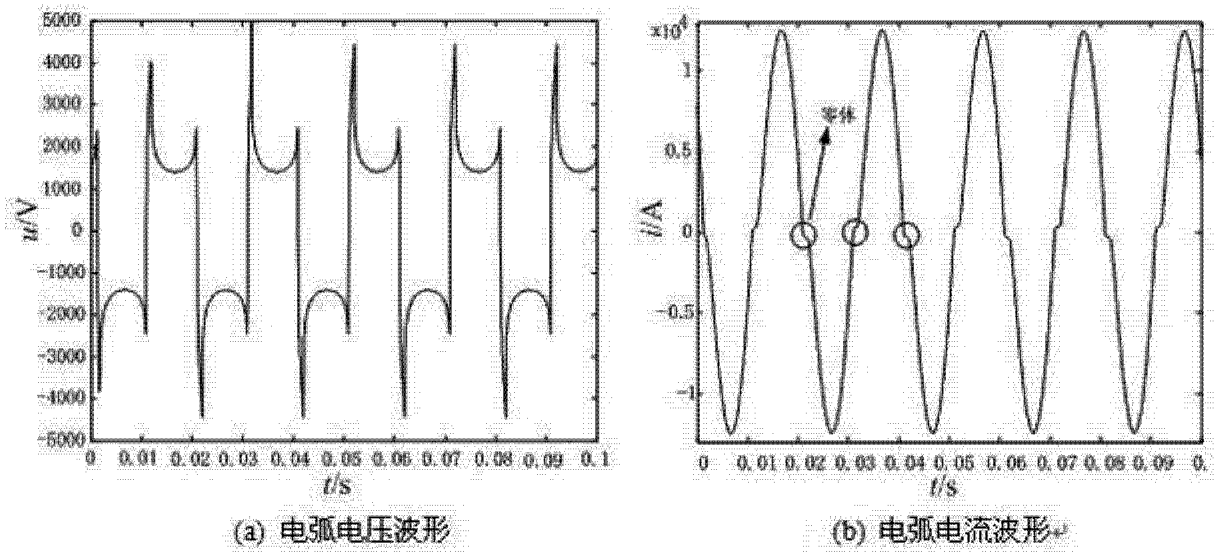


图 9

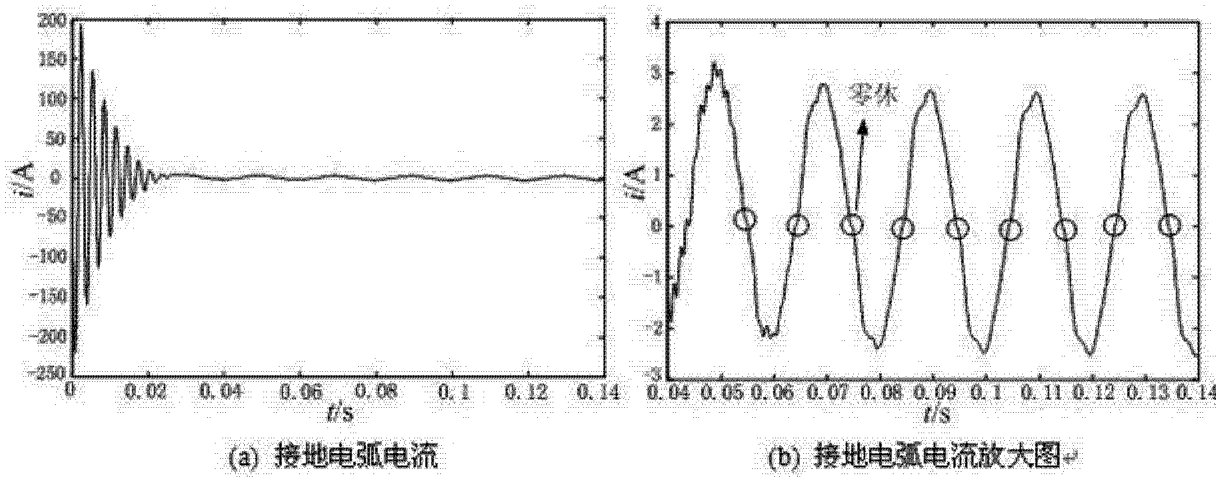


图 10

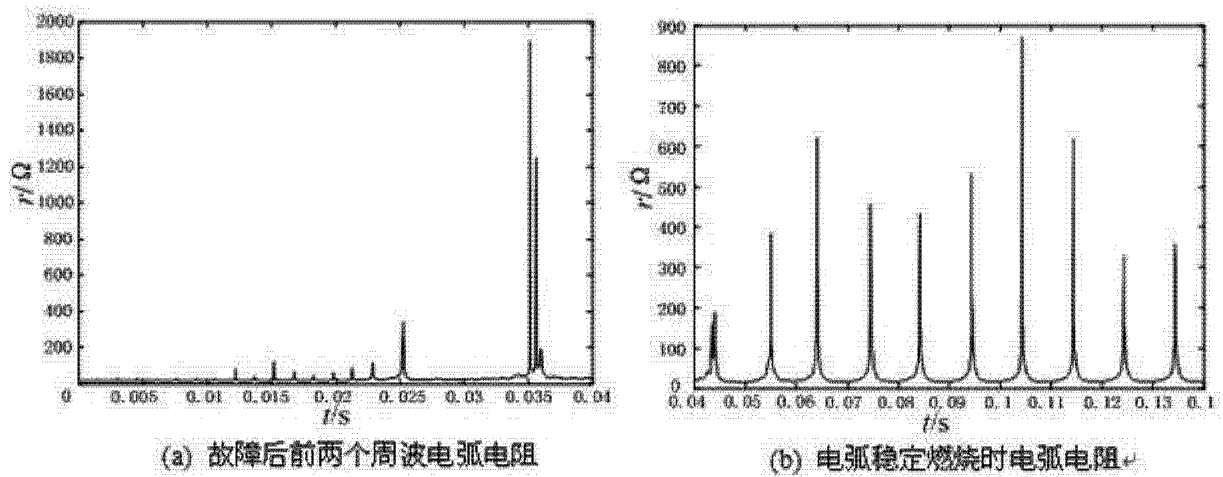


图 11

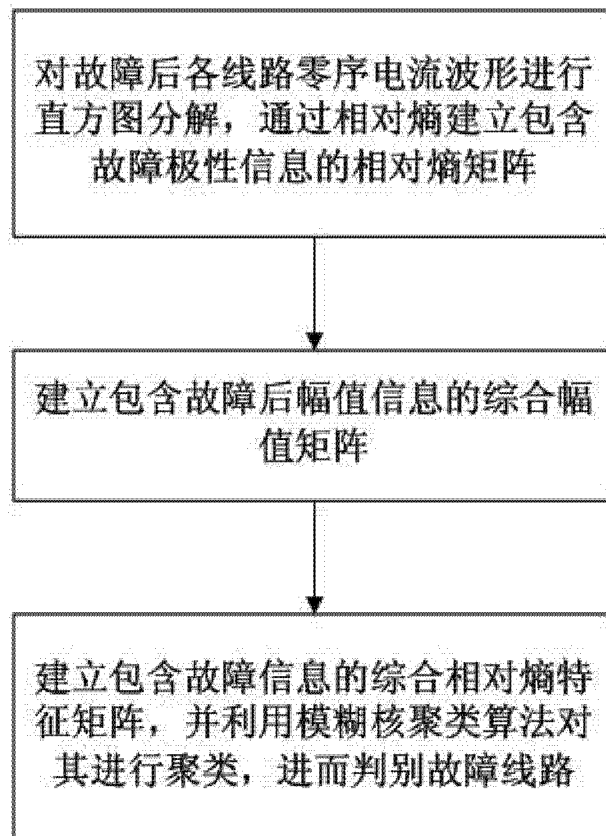


图 12