

基于波形时域特征聚类法的谐振接地系统故障选线

郭谋发¹, 严 敏², 陈 彬³, 杨耿杰¹

(1. 福州大学 电气工程与自动化学院, 福建 福州 350116; 2. 国网福建省电力有限公司 福州供电公司, 福建 福州 350003; 3. 国网福建省电力有限公司 电力科学研究院, 福建 福州 350007)

摘要: 利用谐振接地系统的零序网络分析单相接地后各线路零序电流波形相似性, 基于此提出一种基于暂态零序电流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。根据对各线路故障后首半个周期的零序电流波形的直方图分解结果, 采用反映状态差异的相对熵矩阵表示零序电流波形的极性信息, 结合幅值信息构造表征暂态零序电流波形时域特征的综合相对熵特征矩阵, 由免阈值设定的模糊核聚类算法判别故障线路。在不同工况下对所提方法进行仿真验证, 结果表明, 所提方法不受电弧故障、噪声干扰、采样不同步和补偿度的影响。

关键词: 谐振接地系统; 故障选线; 暂态零序电流; 直方图分解; 相对熵; 模糊核聚类

中图分类号: TM 77

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.11.010

0 引言

谐振接地系统发生单相接地故障的情况复杂多变、故障电流微弱, 使得其故障选线问题一直未能很好地解决。单相接地故障时的暂态信号蕴含了丰富的故障信息, 故障暂态零序电流幅值可达到稳态电流的几倍到几十倍。可利用各线路的故障暂态零序电流波形包含的极性、幅值等信息进行选线。近年来众多学者利用求故障后零序电流、电压波形相似性来进行选线。文献[1-2]利用零序电流间的相关系数大小选线; 文献[3]用 Prony 拟合提取主振荡频率处的零序电流波形的相关性选线; 文献[4-5]利用小波包分解得到的零序电流特征频带的相似性选线; 文献[6]利用零序电流与母线零序电压的相关系数实现选线; 文献[7]采用灰色关联算法判别故障线路。

故障暂态零序电流特征量的有效提取方法及选线判据的阈值难以确定等问题均有待进一步研究。本文利用谐振接地系统的零序网络分析接地故障后暂态零序电流波形的相似性原理, 提出一种基于暂态零序电流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。对各线路故障后首半个周期零序电流波形进行直方图分解, 求取反映暂态零序电流极性信息的相对熵矩阵 S ; 考虑暂态零序电流波形的局部性相似性及整体性相似性, 定义综合幅值矩阵 F_3 ; 由 S 和 F_3 构造综合体现暂态零序电流波形的极性、局部及整体相似性等信息的综合相对熵特征矩阵 X , 应用免阈值设定的模糊核聚类 KFCM (Kernel Fuzzy C-Means) 算法对特征矩阵 X 进行聚类, 选出故障线路。

1 故障暂态零序电流特征分析

配电网零序网络中, 线路的阻抗远小于容抗, 可忽略不计, 得到谐振接地系统单相接地简化零序网络, 如图 1 所示。图中, 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 为过渡电阻; 消弧线圈电阻远小于感抗, 也可忽略不计; $u = U_m \sin(\omega t + \varphi)$ 为故障相电源电压, 其中 U_m 为电压幅值, φ 为电压初相角。

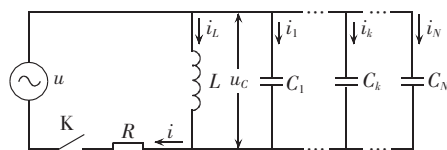


图 1 谐振接地系统单相接地简化零序网络图

Fig.1 Simplified zero-sequence network of resonance grounding system with single-phase grounding fault

根据图 1, 得到回路电压方程及支路电流方程:

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

其中, u_L 为消弧线圈电压; i_k 为第 k 条线路的零序电流。

式(1)经拉普拉斯变换得消弧线圈电流的表达式 $I_L(s)$ 及第 k 条线路零序电流的表达式 $I_k(s)$:

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

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

其中, $C = \sum_{k=1}^N C_k$; N 为线路数。

$$\text{设 } M = \frac{U_m}{R} \frac{s \sin \varphi + \omega \cos \varphi}{[s^2 + s / (RC) + 1 / (LC)](s^2 + \omega^2)}, K =$$

$1/(LC)$, $K_k = C_k/C$, 则式(2)、式(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, 所有非故障线路的电容电流总和为:

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

流过故障线路的零序电流为:

$$I(s) = -(I_L(s) + I_C(s)) = -[KM + (1 - K_i) Ms^2] \quad (7)$$

由式(3)可知, 非故障线路的零序电流为该线路对地电容电流, 其值大小与故障相电压的初相角 φ 、过渡电阻 R 、消弧线圈电感 L 以及该线路对地电容 C_k 有关。当系统发生单相接地故障时, 非故障线路的 φ 、 R 、 L 均相同, 其零序电流幅值的大小主要由 C_k 决定, C_k 与线路的长度、类型等相关。非故障线路的暂态零序电流方向均由母线流向线路。因此, 非故障线路间的暂态零序电流波形较相似。

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, 故障线路的零序电流方向由线路流向母线, 与非故障线路的零序电流方向相反。因此, 故障线路与非故障线路间的零序电流波形较不相似。

2 波形时域特征聚类法选线原理

2.1 故障暂态零序电流直方图分解

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。某灰度图像, 设其灰度级为 $[0, L_g]$, 图像总像素个数为 n , 则定义灰度直方图为离散函数 $h(r) = n_r$, 其中 r 表示某个灰度级 ($0 \leq r \leq L_g$), n_r 表示图像中灰度级为 r 的像素个数^[8]。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接地故障暂态零序电流波形的时域分布特征。首先在时间轴上将故障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故障暂态零序电流波形分成 q 个区间, 分别统计各时段的总采样点数 z 以及各时段内每个区间的采样点数 N_c ($0 \leq G \leq q$)。将 N_c 和对应时间段的 z 的比值作为波形分布系数, 得到波形的直方图。具体过程如下。

依据文献[9]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见图 2, 图中从上至下依次为线路 1—6 的暂态零序电流。

故障和非故障线路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

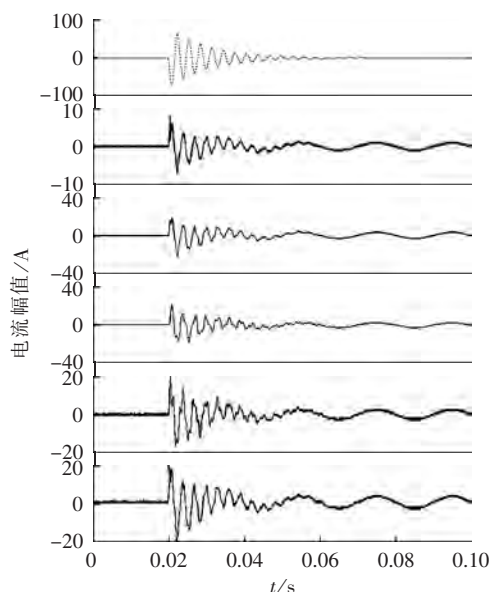


图 2 各线路故障暂态零序电流波形

Fig.2 Waveform of transient zero-sequence current during fault for different lines

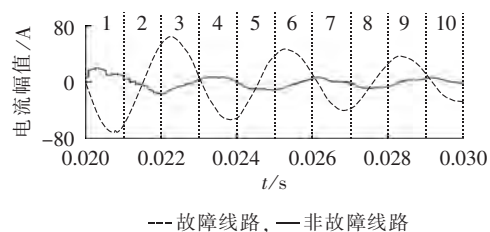


图 3 故障暂态零序电流首半波波形

Fig.3 Transient zero-sequence current waveform for first post-fault half-period

数 $p \in [5, 20]$ 进行大量仿真, 综合考虑取 $p = 10$ 。仿真采样频率取 20 kHz, 则半个周期的零序电流波形采样点数为 $1/2 \times 0.02 \times 20\,000 = 200$, 一个时间段内的总采样点数 $z = 200/10 = 20$ 。

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, 对不同的区间个数 $q \in [5, 20]$ 进行大量仿真, 综合考虑取 $q = 10$, 如图 4 所示。

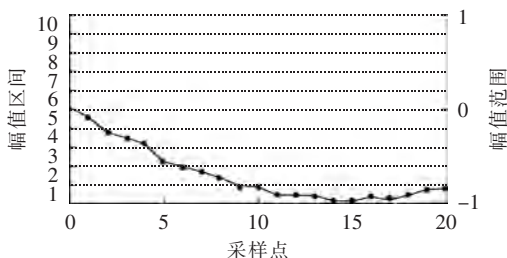


图 4 第 1 时间段内电流波形在幅值轴上的区间分布图

Fig.4 Current amplitude distribution in first time interval

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 ($k=1, 2, \dots, N$) 条线路的第 i ($i=1, 2, \dots, 10$) 个时段的第 j ($j=1, 2, \dots, 10$) 个幅值区间内的采样点数与其所在时段内的总采样点数 z 的比值, 以 $N_c(k, i, j)$ 为幅值形成直方图, 见图 5。图中横坐标为电流的幅值分布区间 q , 纵坐标为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 $N_c(k, i, j)$ 。

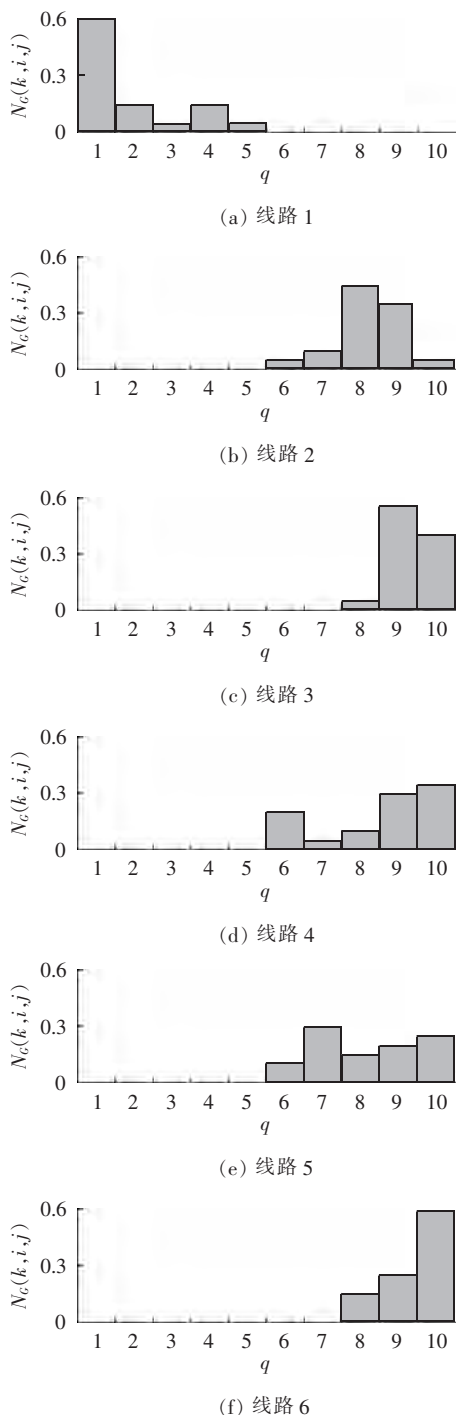


图 5 各线路第 1 时间段内零序电流波形的直方图
Fig.5 Histogram of zero-sequence current in first time interval for different lines

同一时间段内故障线路与非故障线路的暂态零序电流波形若近似以横轴为对称, 则该段时间内二者的直方图分布区间差异性较大, 如图 3 中第 1 时间段内故障线路与非故障线路的暂态零序电流波形; 同一时间段内故障线路与非故障线路的暂态零序电流波形若近似以过零点为中心对称, 则该段时间内二者的直方图分布区间差异性较小, 如图 3 中第 2 时间段内故障线路与非故障线路的暂态零序电流波形。另外, 同为非故障线路的暂态零序电流波形, 因波形相似, 各时间段内的波形的直方图分布区间差异性相对较小。如图 5 所示, 非故障线路暂态零序电流在第 1 时段内的各波形相似, 其对应直方图分布具有相似性, 主要分布在第 6—10 区间内; 而故障线路与非故障线路暂态零序电流在第 1 时段内的波形近似以横轴为对称, 其对应直方图分布差异性较大, 故障线路主要分布在第 1—5 区间内。

综上所述, 直方图分布可较好地体现故障线路与非故障线路暂态零序电流波形的极性分布特征。不同故障情况下, 各线路的故障暂态零序电流在各时间段内的波形将发生变化, 直方图分布情况也随之改变, 但其所反映的故障线路与非故障线路暂态零序电流波形的极性分布特征不变, 即二者首半波的极性相反。

2.2 波形时域特征识别方法

相对熵表示系统处于一个状态相对于另一个状态的概率差异程度^[10]。若一个测试系统含有 N_s 个不同状态, 则除第 X 个状态外的剩余 N_s-1 个状态相对于第 X 个状态的熵值, 加上相对于除第 X 个状态外的剩余 N_s-1 个状态的熵值, 称为系统中第 X 个状态的相对熵值, 该相对熵值反映了第 X 个状态与系统其余状态的概率差异性, 2 个状态间的相对熵值差异值越大, 则 2 个状态相差越大。式(8)表示第 X 个状态相对于第 Y 个状态的熵, 式(9)表示第 Y 个状态相对于第 X 个状态的熵, 二者不相等。

$$H(X) = - \sum_{X,Y} P(X) \ln \frac{P(X)}{P(Y)} \quad (8)$$

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

其中, $P(X)$ 为系统处于第 X 个状态的概率; $P(Y)$ 为系统处于第 Y 个状态的概率。

对故障暂态零序电流波形在时间轴及幅值轴上进行区间划分, 以波形各时段的直方图分布作为波形分布特征矩阵。将波形分布特征矩阵看成一个系统, 矩阵内的元素看作该系统的状态, 元素值看作状态出现的概率。则可用相对熵表征各线路故障暂态零序电流波形间极性的差异性。定义第 k 条线路中第 i 个时段的第 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 $N_c(m, i, j)$ ($m=1, 2, \dots, N, m \neq k$) 的相对熵值与 $N_c(m, i, j)$ ($m=1, 2, \dots, N, m \neq k$) 相对于 $N_c(k, i, j)$ 的相对熵值之和。

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, 故对相对熵取绝对值, 突出体现相对熵值变化的趋势和大小^[11]。其表达式为:

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

其中, 若分子 N_c 为 0, 规定 $0 \times \ln \frac{0}{N_c} = 0$; 若分母 N_c 为 0, 取 $N_c = 10^{-30}$ 。

第 k 条线路的第 i 个时段波形的相对熵值定义为 $S(k, i)$, 以一个时段内的 q 个幅值区间的相对熵值之和作为该时段的相对熵值, 则有:

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

为运用故障后零序电流波形的幅值信息, 考虑暂态零序电流波形的整体相似性及局部相似性, 分别定义幅值矩阵 F_1, F_2 , 用于刻画零序电流波形的幅值信息。

a. 幅值矩阵 F_1 。 F_1 的元素 $F_1(k, i)$ 为各线路每个时段内暂态零序电流的幅值绝对值最大值与该条线路幅值绝对值最大值的比值, 则有:

$$F_1(k, i) = \frac{M(k, i)}{M_1(k)} \quad (12)$$

其中, $M(k, i)$ 为第 k 条线路暂态零序电流的第 i 个时段内幅值绝对值最大值; $M_1(k) = \max(M(k, \cdot))$ 为第 k 条线路暂态零序电流绝对值最大值。

用幅值矩阵 F_1 表征故障后第 k 条线路暂态零序电流的第 i 个时段的幅值信息。

b. 幅值矩阵 F_2 。 F_2 的元素 $F_2(k, i)$ 为同一个时段内, 各线路暂态零序电流幅值绝对值最大值与该时段内所有线路中幅值绝对值最大值的比值, 则有:

$$F_2(k, i) = \frac{M(k, i)}{M_2(i)} \quad (13)$$

其中, $M_2(i) = \max(M(\cdot, i))$ 为第 i 个时段内各线路暂态零序电流绝对值最大值。

用幅值矩阵 F_2 表征故障后第 i 个时段不同线路暂态零序电流幅值信息。

c. 定义 F_3 为综合幅值矩阵, 用于表征故障后第 k 条线路暂态零序电流第 i 个时段的幅值信息, F_3 的元素 $F_3(k, i) = F_1(k, i)F_2(k, i)$ 。

用综合相对熵矩阵 X 来反映暂态零序电流波形的总体时域特征, 其元素 $X(k, i)$ 表达式为:

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

其中, $X(k, i)$ 为第 k 条线路暂态零序电流第 i 个时段的综合相对熵值。

对求取的综合相对熵利用式(15)进行归一化处理:

$$X'(k, i) = \frac{X(k, i) - \min(X)}{\max(X) - \min(X)} \quad (15)$$

其中, $X(k, i)$ 为 X 中元素; $X'(k, i)$ 为归一化后的元素; $\max(X)$ 为 X 中最大值元素; $\min(X)$ 为 X 中最小值元素, 则归一化后的综合相对熵矩阵 X' 的元素值在 $[0, 1]$ 间。综合相对熵矩阵 X' 如式(16)所示。

$$X' = \begin{bmatrix} X'(1, 1) & X'(1, 2) & \cdots & X'(1, p) \\ X'(2, 1) & X'(2, 2) & \cdots & X'(2, p) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ X'(N, 1) & X'(N, 2) & \cdots & X'(N, p) \end{bmatrix} \quad (16)$$

2.3 模糊核聚类选线

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, 在高维特征空间中进行聚类^[12]。模糊核聚类方法在性能上较经典 c -均值聚类和模糊 c -均值聚类方法均有较大的改进, 它通过非线性映射能较好地分辨、提取并放大有用的特征量, 从而实现更为准确的聚类, 其算法收敛速度也较快。

设 $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ 是输入空间的样本集, c ($2 \leq c \leq n$) 为聚类个数, v_j ($j=1, 2, \dots, c$) 为第 j 个类的聚类中心, 通过非线性特征映射, 在高维特征空间中, 将欧氏距离展开并利用高斯核函数 $K(y_i, v_j)$ 计算高维空间中样本的内积, 可得到模糊核聚类的目标函数^[13]:

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

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

对于隶属度 u_{ij} 须满足:

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

分别对 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更新公式^[15]:

$$v_j = \frac{\sum_{i=1}^n u_{ij}^m K(y_i, v_j) y_i}{\sum_{i=1}^n u_{ij}^m K(y_i, v_j)} \quad j=1, 2, \dots, c \quad (19)$$

$$u_{ij} = \frac{[1 - K(y_i, v_j)]^{-1/(m-1)}}{\sum_{j=1}^c [1 - K(y_i, v_j)]^{-1/(m-1)}} \quad i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, c \quad (20)$$

模糊核聚类算法的具体步骤如下^[14]。

- a. 给定聚类数目 $c(2 \leq c \leq n)$ 、阈值 ε 、最大迭代次数 T 、加权指数 m 。
- b. 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 $N_i = 1$ 。
- c. 利用式(20)计算隶属度 $u_{ij}^{(N)}$ 。
- d. 利用式(19)计算聚类中心 $v_j^{(N+1)}$ 。
- e. 如果 $\|V^{(N+1)} - V^{(N)}\| < \varepsilon$ 或算法迭代次数 $N_i > T$, 则算法结束, 输出最终聚类结果; 否则, $N_i = N_i + 1$, 执行步骤 c。

聚类结果分为故障线路与非故障线路 2 类, 则聚类数目 $c = 2$; 取阈值 $\varepsilon = 10^{-5}$, 最大迭代次数 $T = 100$, 加权指数 $m = 2$ 。向量 y_i 与 $X(k, i) (k = 1, 2, \dots, 10; i = 1, 2, \dots, n)$ 对应。利用模糊核聚类对归一化后的综合相对熵矩阵 X' 进行聚类, 得到隶属度矩阵 U 为:

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

其中, 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 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。

2.4 故障选线流程

故障选线流程如图 6 所示。以零序电压是否超限作为启动接地选线流程的依据, 若发生单相接地故障, 则取各线路零序电流的首半波并在时间轴上对其进行分段, 对每一个时段内的零序电流在幅值轴上做直方图分解, 进而求得综合幅值矩阵 F_3 及归

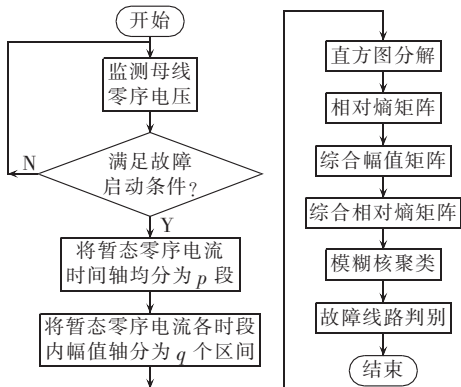


图 6 故障选线流程图

Fig.6 Flowchart of faulty line selection

$$F_3 = \begin{bmatrix} 1.00 & 0.84 & 0.90 & 0.75 & 0.59 & 0.66 & 0.56 & 0.44 & 0.52 & 0.40 \\ 0.11 & 0.07 & 0.11 & 0.03 & 0.05 & 0.06 & 0.03 & 0.04 & 0.04 & 0.03 \\ 0.21 & 0.27 & 0.34 & 0.09 & 0.17 & 0.21 & 0.10 & 0.15 & 0.15 & 0.12 \\ 0.30 & 0.13 & 0.20 & 0.14 & 0.24 & 0.31 & 0.11 & 0.14 & 0.10 & 0.17 \\ 0.27 & 0.21 & 0.17 & 0.17 & 0.20 & 0.18 & 0.08 & 0.04 & 0.21 & 0.07 \\ 0.19 & 0.24 & 0.34 & 0.09 & 0.15 & 0.19 & 0.09 & 0.14 & 0.13 & 0.10 \end{bmatrix}$$

一化后的综合相对熵矩阵 X' , 对 X' 进行模糊核聚类, 选出故障线路。

3 仿真实验

用 ATP 搭建 6 条缆线混合的谐振接地系统模型, 如图 7 所示。图中, J_L 为架空线路长度; D_L 为电缆线路长度; R 为接地电阻。110 kV 主变压器型号为 SZ-31500/110/10, 连接组别为 Yd11; 10 kV 变压器型号为 S11-MR-1000/10/0.4, 连接组别为 Dy11。架空线路正序参数, $r_{j1} = 0.17 \Omega/\text{km}$, $l_{j1} = 1.21 \text{ mH}/\text{km}$, $c_{j1} = 0.0097 \mu\text{F}/\text{km}$; 架空线路零序参数, $r_{j0} = 0.23 \Omega/\text{km}$, $l_{j0} = 5.478 \text{ mH}/\text{km}$, $c_{j0} = 0.008 \mu\text{F}/\text{km}$ 。电缆线路正序参数, $r_{D1} = 0.27 \Omega/\text{km}$, $D_{D1} = 0.255 \text{ mH}/\text{km}$, $c_{D1} = 0.339 \mu\text{F}/\text{km}$; 电缆线路零序参数, $r_{D0} = 2.7 \Omega/\text{km}$, $l_{D0} = 1.019 \text{ mH}/\text{km}$, $c_{D0} = 0.28 \mu\text{F}/\text{km}$ 。计算得系统总电容电流 $I_C = 3\omega C U_N = 24.6(\text{A}) > 20 \text{ A}$, 应装设消弧线圈。过补偿度取 5%, 电感 $L = 1 / (1.05 \times U_N / (\omega I_C)) = 0.7116(\text{H})$, 其中 U_N 为相电压额定值; 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 $R_L = 0.03 U_N / (1.05 I_C) = 6.7(\Omega)$ 。

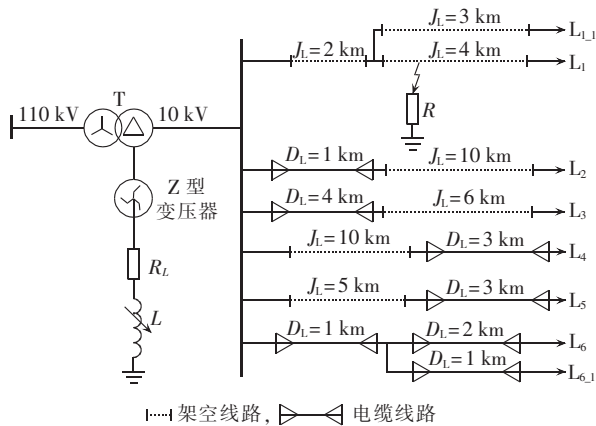


图 7 谐振接地系统仿真模型

Fig.7 Simulation model of resonance grounding system

线路 L_1 在距母线 6 km 处 C 相电压过峰值时发生接地故障, 过渡电阻为 0.2Ω , 取 6 条线路故障后零序电流的首半波进行直方图分解, 求得综合幅值矩阵 F_3 及相对熵矩阵 S , 在此基础上进一步求得综合相对熵矩阵 X , 并利用式(15)对 X 进行归一化得 X' 。对 X' 进行模糊核聚类, 得隶属度矩阵 U 。

$$S= \begin{bmatrix} 656.8 & 71.8 & 579.6 & 655.8 & 105.7 & 644.9 & 583.0 & 80.0 & 655.3 & 580.2 \\ 159.6 & 41.5 & 132.8 & 151.1 & 130.7 & 147.1 & 130.7 & 73.7 & 144.0 & 150.9 \\ 189.4 & 32.0 & 138.6 & 183.7 & 53.3 & 150.3 & 130.4 & 70.2 & 144.1 & 151.0 \\ 168.5 & 41.0 & 136.3 & 153.8 & 114.6 & 157.8 & 190.9 & 69.3 & 189.1 & 151.7 \\ 188.7 & 44.1 & 140.6 & 175.5 & 74.6 & 197.0 & 167.2 & 90.0 & 158.6 & 148.9 \\ 188.8 & 31.6 & 135.1 & 147.5 & 79.7 & 150.9 & 130.6 & 70.2 & 143.9 & 147.3 \end{bmatrix}$$
$$X'= \begin{bmatrix} 1.00 & 0.08 & 0.80 & 0.74 & 0.09 & 0.65 & 0.50 & 0.05 & 0.51 & 0.35 \\ 0.02 & 0 & 0.02 & 0.01 & 0.01 & 0.01 & 0.01 & 0.01 & 0.01 & 0.01 \\ 0.06 & 0.01 & 0.07 & 0.02 & 0.01 & 0.04 & 0.02 & 0.01 & 0.03 & 0.02 \\ 0.07 & 0.01 & 0.04 & 0.03 & 0.04 & 0.07 & 0.03 & 0.01 & 0.02 & 0.03 \\ 0.07 & 0.01 & 0.03 & 0.04 & 0.02 & 0.05 & 0.02 & 0.01 & 0.05 & 0.01 \\ 0.05 & 0.01 & 0.07 & 0.02 & 0.01 & 0.04 & 0.01 & 0.01 & 0.02 & 0.02 \end{bmatrix}$$

$$U= \begin{bmatrix} 0 & \underline{0.9985} & \underline{0.9996} & \underline{0.9990} & \underline{0.9993} & \underline{0.9998} \\ \underline{1.0000} & 0.0015 & 0.0004 & 0.0010 & 0.0007 & 0.0002 \end{bmatrix}$$

隶属度矩阵 U 的行代表状态类别,1—6 列分别代表线路 $L_1—L_6$ 故障暂态零序电流隶属于不同状态类别的程度, u_{ij} 的值越接近于 1 表示线路 L_j 暂态零序电流隶属于第 i 个状态类的程度越大。由隶属度矩阵 U 可知,线路 L_1 的暂态零序电流被单独归为一类,其他线路的暂态零序电流归于另一类,由此可判定线路 L_1 为接地线路。

不同线路在不同故障点、不同故障合闸角、不同过渡电阻情况下发生单相接地故障的选线结果见表 1。表中, L_m 为故障线路; x_f 为故障点到母线的距离; θ 为故障合闸角; R 为过渡电阻。

4 选线方法的适应性

4.1 电弧故障

ATP 的 OBJECT 模块提供的 MODEL 语言可用于描述电弧的动态特征及电弧熄弧、燃弧过程。创建 sup-file 并编写 mod-file,实现电弧故障的一次电弧模型仿真^[15]。线路 L_1 在不同弧长及不同时刻下的电弧接地选线结果见表 2,其中 l 为电弧的弧长。

4.2 噪声影响

工程应用中,需考虑外界随机噪声干扰对选线方法的影响。对线路 $L_2、L_4$ 的故障暂态零序电流叠加信噪比为 20 dB 的高斯白噪声干扰,4 种典型接地故障的选线结果见表 3,结果表明该选线方法具有较强的抗干扰能力。

表 1 故障选线结果
Table 1 Results of faulty line selection

L_m	$\theta/(^{\circ})$	x_f/km	R/Ω	隶属度矩阵 U	选线结果
L_1	0	2	2000	$\begin{bmatrix} \underline{1.0000} & 0.0023 & 0.0006 & 0 & 0 & 0.0004 \\ 0 & \underline{0.9977} & \underline{0.9994} & 1.0000 & \underline{1.0000} & \underline{0.9996} \end{bmatrix}$	L_1 故障
	45	2	200	$\begin{bmatrix} \underline{1.0000} & 0.0158 & 0.0020 & 0.0123 & 0.0059 & 0.0014 \\ 0 & \underline{0.9842} & \underline{0.9980} & \underline{0.9877} & \underline{0.9941} & \underline{0.9986} \end{bmatrix}$	L_1 故障
	90	2	2	$\begin{bmatrix} \underline{1.0000} & 0.0050 & 0.0007 & 0.0077 & 0.0046 & 0.0010 \\ 0 & \underline{0.9950} & \underline{0.9993} & \underline{0.9923} & \underline{0.9954} & \underline{0.9990} \end{bmatrix}$	L_1 故障
L_3	0	4	2	$\begin{bmatrix} 0.0016 & 0.0008 & \underline{1.0000} & 0.0021 & 0.0006 & 0.0002 \\ \underline{0.9984} & \underline{0.9992} & 0 & \underline{0.9979} & \underline{0.9994} & \underline{0.9998} \end{bmatrix}$	L_3 故障
	45	4	200	$\begin{bmatrix} 0.0076 & 0.0043 & \underline{1.0000} & 0.0058 & 0.0060 & 0.0021 \\ \underline{0.9924} & \underline{0.9957} & 0 & \underline{0.9942} & \underline{0.9940} & \underline{0.9979} \end{bmatrix}$	L_3 故障
	90	4	2000	$\begin{bmatrix} \underline{0.9718} & \underline{0.9820} & 0 & \underline{0.9863} & \underline{0.9739} & \underline{0.9888} \\ 0.0282 & 0.0180 & \underline{1.0000} & 0.0137 & 0.0261 & 0.0112 \end{bmatrix}$	L_3 故障
L_4	0	10	2000	$\begin{bmatrix} \underline{0.9997} & \underline{0.9999} & \underline{0.9999} & 0 & \underline{0.9999} & \underline{0.9999} \\ 0.0003 & 0.0001 & 0.0001 & \underline{1.0000} & 0.0001 & 0.0001 \end{bmatrix}$	L_4 故障
	45	10	200	$\begin{bmatrix} \underline{0.9958} & \underline{0.9986} & \underline{0.9987} & 0 & \underline{0.9979} & \underline{0.9975} \\ 0.0042 & 0.0014 & 0.0013 & \underline{1.0000} & 0.0021 & 0.0025 \end{bmatrix}$	L_4 故障
	90	10	2	$\begin{bmatrix} 0.0043 & 0.0010 & 0.0029 & \underline{1.0000} & 0.0010 & 0.0008 \\ \underline{0.9957} & \underline{0.9990} & \underline{0.9971} & 0 & 0.9990 & 0.9992 \end{bmatrix}$	L_4 故障

表 2 发生电弧故障时的选线结果
Table 2 Results of faulty line selection for arc fault

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

表 3 叠加噪声情况下的选线结果
Table 3 Results of faulty line selection in noisy condition

$\theta/$ ($^{\circ}$)	L_m	R/Ω	隶属度矩阵 U						选线 结果
0	L ₂	2	$\begin{bmatrix} 0.0012 & \underline{1.0000} & 0.0002 & 0.0002 & 0.0001 & 0.0001 \\ \underline{0.9988} & 0 & \underline{0.9998} & \underline{0.9998} & \underline{0.9999} & \underline{0.9999} \end{bmatrix}$						L ₂ 故障
0	L ₄	2000	$\begin{bmatrix} 0.0022 & 0.0026 & 0.0039 & \underline{1.0000} & 0.0017 & 0.0004 \\ \underline{0.9978} & \underline{0.9974} & \underline{0.9961} & 0 & \underline{0.9983} & \underline{0.9996} \end{bmatrix}$						L ₄ 故障
90	L ₂	2	$\begin{bmatrix} \underline{0.9938} & 0 & \underline{0.9994} & \underline{0.9934} & \underline{0.9983} & \underline{0.9997} \\ 0.0062 & \underline{1.0000} & 0.0006 & 0.0066 & 0.0017 & 0.0003 \end{bmatrix}$						L ₂ 故障
90	L ₄	2000	$\begin{bmatrix} 0.0200 & 0.0144 & 0.0243 & \underline{1.0000} & 0.0160 & 0.0074 \\ \underline{1.9800} & \underline{0.9856} & \underline{0.9757} & 0 & \underline{0.9840} & \underline{0.9926} \end{bmatrix}$						L ₄ 故障

4.3 采样不同步

实际应用中,接地故障发生后,选线装置对各条线路的暂态零序电流的采样有可能不同步,将产生相位移。对各条线路做了多种情况下采样不同步的仿真,以线路 L₃、L₄ 滞后线路 L₁、L₂ 10 个采样点;线路 L₅、L₆ 滞后线路 L₁、L₂ 15 个采样点为例。线路 L₆ 在距离母线 2 km 处发生过渡电阻为 2 Ω 的单相接地故障,其选线结果见表 4。

表 4 采样不同步情况下的选线结果
Table 4 Results of faulty line selection in non-synchronous sampling condition

$\theta/$ ($^{\circ}$)	隶属度矩阵 U						选线结果
0	$\begin{bmatrix} \underline{0.9983} & \underline{0.9993} & \underline{0.9997} & \underline{0.9976} & \underline{0.9997} & 0 \\ 0.0017 & 0.0007 & 0.0003 & 0.0024 & 0.0003 & \underline{1.0000} \end{bmatrix}$						L ₆ 故障
30	$\begin{bmatrix} 0.0143 & 0.0036 & 0.0012 & 0.0249 & 0.0058 & \underline{1.0000} \\ \underline{0.9857} & \underline{0.9964} & \underline{0.9988} & \underline{0.9751} & \underline{0.9942} & 0 \end{bmatrix}$						L ₆ 故障
60	$\begin{bmatrix} 0.0214 & 0.0067 & 0.0078 & 0.0419 & 0.0123 & \underline{1.0000} \\ \underline{0.9786} & \underline{0.9933} & \underline{0.9922} & \underline{0.9581} & \underline{0.9877} & 0 \end{bmatrix}$						L ₆ 故障
90	$\begin{bmatrix} \underline{0.9606} & \underline{0.9848} & \underline{0.9905} & \underline{0.8289} & \underline{0.9326} & 0.0009 \\ 0.0394 & 0.0152 & 0.0095 & 0.1711 & 0.0674 & \underline{0.9991} \end{bmatrix}$						L ₆ 故障

4.4 两点接地故障

当谐振接地系统中两点不同时发生单相接地故障时,该选线方法仍然有效。线路 L₃、L₅ 在不同情况下发生两点接地故障的选线结果见表 5。但对于 2 条不同线路发生两点同时接地故障的情况,仅能正

确选出其中 1 条故障线路,选线方法有待进一步改进。

表 5 2 条线路同时发生两点接地故障的选线结果
Table 5 Results of faulty line selection for two-point grounding fault on two lines

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

4.5 不同补偿度的影响

取不同的补偿度,线路 L₄ 距母线 2 km 处,在不同故障电压初相角、不同接地电阻下发生单相接地故障,其选线结果见表 6。结果表明该方法对谐振接地系统在不同补偿度下发生单相接地故障同样适用。

表 6 不同补偿度下的故障选线结果
Table 6 Results of faulty line selection for different compensation degrees

$\theta/$ ($^{\circ}$)	$\delta/$ %	$R/$ Ω	隶属度矩阵 U						选线 结果
0	8	2	$\begin{bmatrix} 0.0032 & 0.0008 & 0.0007 & \underline{1.0000} & 0.0030 & 0.0009 \\ \underline{0.9968} & \underline{0.9992} & \underline{0.9993} & 0 & \underline{0.9970} & \underline{0.9991} \end{bmatrix}$						L ₄ 故障
0	8	2000	$\begin{bmatrix} 0.0228 & 0.0161 & 0.0257 & \underline{1.0000} & 0.0136 & 0.0030 \\ \underline{0.9772} & \underline{0.9839} & \underline{0.9743} & 0 & \underline{0.9864} & \underline{0.9970} \end{bmatrix}$						L ₄ 故障
90	10	2	$\begin{bmatrix} 0.0031 & 0.0008 & 0.0007 & \underline{1.0000} & 0.0029 & 0.0009 \\ \underline{0.9969} & \underline{0.9992} & \underline{0.9993} & 0 & \underline{0.9971} & \underline{0.9991} \end{bmatrix}$						L ₄ 故障
90	10	2000	$\begin{bmatrix} 0.0227 & 0.0160 & 0.0251 & \underline{1.0000} & 0.0134 & 0.0030 \\ \underline{0.9773} & \underline{0.9840} & \underline{0.9749} & 0 & \underline{0.9866} & \underline{0.9970} \end{bmatrix}$						L ₄ 故障
0	-5	2	$\begin{bmatrix} 0.0005 & 0.0001 & 0.0002 & \underline{1.0000} & 0.0002 & 0.0002 \\ \underline{0.9995} & \underline{0.9999} & \underline{0.9998} & 0 & \underline{0.9998} & \underline{0.9998} \end{bmatrix}$						L ₄ 故障
0	-5	2000	$\begin{bmatrix} 0.0047 & 0.0021 & 0.0024 & \underline{1.0000} & 0.0016 & 0.0013 \\ \underline{0.9953} & \underline{0.9979} & \underline{0.9976} & 0 & \underline{0.9984} & \underline{0.9987} \end{bmatrix}$						L ₄ 故障
90	-10	2	$\begin{bmatrix} 0.0003 & 0.0001 & 0.0008 & \underline{1.0000} & 0.0025 & 0.0019 \\ \underline{0.9997} & \underline{0.9999} & \underline{0.9992} & 0 & \underline{0.9975} & \underline{0.9981} \end{bmatrix}$						L ₄ 故障
90	-10	2000	$\begin{bmatrix} 0.0334 & 0.0168 & 0.0241 & \underline{1.0000} & 0.0157 & 0.0130 \\ \underline{0.9666} & \underline{0.9832} & \underline{0.9759} & 0 & \underline{0.9843} & \underline{0.9870} \end{bmatrix}$						L ₄ 故障

综上可知对各出线的故障暂态零序电流波形的综合相对熵特征矩阵进行模糊核聚类,可选出故障线路,但母线故障时,因各出线暂态零序电流波形相似,无法正确选线,可通过增加进线暂态零序电流的检测来解决该问题,即增加检测由主变 10 kV 侧流入母线的故障暂态零序电流,选线方法相同。

5 结论

对故障后各线路暂态零序电流波形做直方图分

解,构造综合相对熵特征矩阵表征暂态零序电流波形的幅值、极性信息,根据波形时域特征矩阵模糊核聚类的结果,选出故障线路。得到的主要结论如下:

a. 基于直方图分解及相对熵理论所求取的相对熵特征矩阵 S ,结合包含各线路不同时段幅值信息的矩阵 F_3 ,可构造有效表征故障暂态零序电流波形幅值和极性信息的综合相对熵矩阵 X ;

b. 对特征矩阵进行模糊核聚类,可解决传统选线方法中利用设置阈值来判别故障线路的弊端;

c. 所提选线方法适用于电弧故障、噪声干扰、采样不同步、消弧线圈不同补偿度等工程应用中可能存在的影响因素。

参考文献:

- [1] 邢亚辉. 利用零序电流的相关性进行小电流接地系统故障选线[J]. 电力自动化设备,2008,28(9):64-67.
XING Yahui. Faulty line selection with correlativity of zero sequence current in non-solid-earthed network[J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28(9):64-67.
- [2] 王韶,朱姜峰. 基于改进相关分析法的配电网单相接地故障选线[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(15):76-81.
WANG Shao,ZHU Jiangfeng. Fault line selection of single-phase to ground fault in distribution network based on improved correlation analysis method[J]. Power System Protection and Control,2012,40(15):76-81.
- [3] 彭仕欣,李斌,赵兴兵. 基于 PRONY 特征提取的谐振接地电网故障选线相关分析新方法[J]. 昆明理工大学学报:理工版,2008,33(2):67-71.
PENG Shixin,LI Bin,ZHAO Xingbing. A new correlation analysis approach to fault line selection in resonant earthed system using feature extraction by Prony[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology:Science and Technology Edition,2008,33(2):67-71.
- [4] 熊亮,罗志娟,吕艳萍. 基于多频带相关分析的小电流接地系统故障选线新方法[J]. 电气应用,2010,29(21):66-70.
XIONG Liang,LUO Zhijuan,LÜ Yanping. A novel fault line selection method based on multi-band correlation analysis for small current grounding system[J]. Electrotechnical Application,2010,29(21):66-70.
- [5] 王玉梅,董洋洋,刘兴艳. 基于 SFB 和相关分析法的小电流接地故障选线方法[J]. 电力自动化设备,2011,31(2):48-51.
WANG Yumei,DONG Yangyang,LIU Xingyan. Selection of faulty line based on SFB and correlation analysis for small-current neutral grounding system[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(2):48-51.
- [6] 李森,宋国兵,康小宁,等. 基于时域下相关分析法的小电流接地故障选线[J]. 电力系统保护与控制,2008,36(13):15-20.
LI Sen,SONG Guobing,KANG Xiaoning,et al. Time-domain fault line selection based on correlation analysis in neutral indirect ground system[J]. Power System Protection and Control,2008,36(13):15-20.
- [7] 梁睿,王崇林. 零序暂态电流灰色关联分析的小电流接地选线[J]. 中南大学学报,2010,41(2):585-591.
LIANG Rui,WANG Chonglin. Fault line selection for single-phase-to-earth faults based on zero sequence transient current and grey relation analysis[J]. Journal of Central South University,2010,41(2):585-591.
- [8] 王雪,王增平. 基于波形时域分布特征的变压器励磁涌流识别[J]. 电工技术学报,2012,27(1):148-154.
WANG Xue,WANG Zengping. Identification of transformer inrush currents based on waveform distribution characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2012,27(1):148-154.
- [9] 郭谋发,刘世丹,杨耿杰. 利用时频谱相似度识别的配电线路接地选线方法[J]. 中国电机工程学报,2013,33(19):183-190.
GUO Moufa,LIU Shidan,YANG Gengjie. A novel approach to detect fault lines in distribution network using similarity recognition based on time-frequency spectrum[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(19):183-190.
- [10] 郭谋发,高源,杨耿杰. 谐振接地系统暂态波形差异性识别法接地选线[J]. 电力自动化设备,2014,34(5):59-66.
GUO Moufa,GAO Yuan,YANG Gengjie. Faulty line detection based on transient waveform difference recognition for resonant earthed system[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(5):59-66.
- [11] 罗国敏,何正友,林圣. 利用小波相对熵值的差异识别输电线路暂态信号的探讨[J]. 电网技术,2008,32(15):47-51.
LUO Guomin,HE Zhengyou,LIN Sheng. Discussion on using discrepancy among wavelet relative entropy values to recognize transient signals in power transmission line[J]. Power System Technology,2008,32(15):47-51.
- [12] 李超顺,周建中,安学利,等. 基于加权模糊核聚类的发电机组振动故障诊断[J]. 中国电机工程学报,2008,28(35):79-83.
LI Chaoshun,ZHOU Jianzhong,AN Xueli,et al. Vibration fault diagnosis of generating set based on weighted fuzzy kernel clustering[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(35):79-83.
- [13] 郭谋发,郑新桃,杨耿杰,等. 利用暂态波形伸缩变换的谐振接地系统故障选线方法[J]. 电力自动化设备,2014,34(9):33-40.
GUO Moufa,ZHENG Xintao,YANG Gengjie,et al. Faulty line detection based on transient waveform stretching transformation for resonance-grounding system[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(9):33-40.
- [14] 范九伦,赵凤,吴青,等. 模式识别导论[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2012.
- [15] 程玲,徐玉琴,宋祎霖. 基于电弧小波谱能量分析的输电线路单相自适应重合闸[J]. 电网技术,2007,31(24):81-85.
CHENG Ling,XU Yubin,SONG Zilin. Single-pole adaptive reclosure of transmission line based on arc models and wavelet spectrum energy analysis[J]. Power System Technology,2007,31(24):81-85.

作者简介:



郭谋发

郭谋发(1973—),男,福建福清人,副教授,硕士,研究方向为电力系统自动化(E-mail:gmf@fzu.edu.cn);

严敏(1988—),男,福建福州人,工程师,硕士,研究方向为配电网自动化;

陈彬(1982—),男,福建福州人,高级工程师,硕士,研究方向为配电技术和智能电网;

杨耿杰(1966—),男,福建武夷山人,教授,研究方向为电力系统分析。

(下转第 81 页 continued on page 81)

on distribution grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011,35(17):38-43.

[20] SOROUDI A,EHSAN M,CAIRE R,et al. Possibilistic evaluation of distributed generations impacts on distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2011,26(4):2293-2301.

[21] WARFIELD J N. Participative methodology for public system planning[J]. Computers & Electrical Engineering,1973,1(1): 23-40.

[22] VAIDYA O S,KUMAR S. Analytic hierarchy process:an over-view of applications[J]. European Journal of operational Re-search,2006,169(1):1-29.

作者简介:



王守相

王守相(1973—),男,山东高密人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为智能配电系统分析、分布式发电系统分析与仿真(E-mail:sxwang@tju.edu.cn);

张一帆(1989—),女,河北河间人,硕士研究生,主要研究方向为配电网负荷预测(E-mail:zyf_tju@126.com);

葛磊蛟(1984—),男,湖北咸宁人,博士研究生,研究方向为智能配电网与不确定性仿真。

Interpretative structural model of influencing factors for distribution network of new-type town

WANG Shouxiang,ZHANG Yifan,GE Leijiao

(Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education,Tianjin University,Tianjin 300072,China)

Abstract: The influencing factor set of new-type town distribution system is put forward and the interactions among them are analyzed to form the reachability matrix,according to which,its ISM(Interpretative Structural Model) is constructed. In order to directly reflect the impact of each factor on the new-type town distribution system,an extended AHP(Analytic Hierarchy Process) is proposed to calculate the weight of each influencing factor in the model. The main factors influencing its development and construction are analyzed,which provides the reference for the development and construction of China’s new-type town distribution system. Two analysis cases verify the practicability and adaptability of the proposed model.

Key words: new-type town; distribution network; influencing factor; interpretative structural model; analytic hierarchy process

(上接第 66 页 continued from page 66)

Faulty line selection based on waveform feature clustering in time domain for resonance grounding system

GUO Moufa¹,YAN Min²,CHEN Bin³,YANG Gengjie¹

- (1. College of Electrical Engineering and Automation,Fuzhou University,Fuzhou 350116,China;
- 2. Fuzhou Power Supply Company of State Grid Fujian Electric Power Company,Fuzhou 350003,China;
- 3. Electric Power Research Institute of State Grid Fujian Electric Power Company,Fuzhou 350007,China)

Abstract: The waveform similarity of line zero-sequence currents after the single-phase grounding fault of resonance grounding system is analyzed based on its zero-sequence network and a method of faulty line selection based on the waveform feature clustering in the time domain is proposed for it. The line zero-sequence current waveform of the first post-fault half-period is decomposed in histograms and the relative entropy matrix is adopted to reflect the state difference among the zero-sequence currents,as well as their polarity information. Combined with the amplitude information,an integrated relative entropy matrix is established to represent the time-domain waveform feature of transient zero-sequence currents. The fuzzy KFCM(Kernel Fuzzy C-Means) without the threshold setting is used to detect the faulty line. The proposed method is verified by the simulations under different working conditions and the results show that,it is immune to the arc fault,noise disturbance,non-synchronized sampling and compensation degree.

Key words: resonance grounding system; faulty line selection; transient zero-sequence current; histogram decomposing; relative entropy; fuzzy kernel clustering