

具有容错能力的电能质量扰动源定位方法

董海艳, 贾清泉, 王宁

(燕山大学电力电子节能与传动控制河北省重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 为改善传统符号型定位方法的不足, 实现扰动信息不可靠时扰动源的准确定位, 提出一种基于遗传算法的电能质量扰动源定位方法。通过对扰动信号高频分量产生机理的分析, 利用小波变换提取高频分量, 将高频扰动能量的极性作为扰动方向判别的依据, 给出了一种扰动方向判别的通用算法。根据系统拓扑结构及监测点布置情况, 建立了扰动源定位优化模型, 将扰动源定位问题转化成为 0-1 整数规划问题, 采用遗传算法进行求解。仿真结果表明该方法具有定位准确, 容错能力强等优点, 为扰动源定位问题提供了一种新的解决思路。

关键词: 电能质量; 扰动源定位; 遗传算法; 容错能力

An algorithm for power quality disturbance source positioning with fault-tolerant capability

DONG Hai-yan, JIA Qing-quan, WANG Ning

(Key Lab of Power Electronics for Energy Conservation and Motor Drive of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: In order to improve the deficiencies of the traditional symbolic positioning method and position the disturbance source accurately when the disturbance information is unreliable, a positioning algorithm of power quality disturbance source based on the genetic algorithm is proposed. Through analyzing the mechanism of the high frequency component of the disturbance signal, the high frequency components are extracted by using wavelet transform, and the polarity of the high frequency disturbance energy is used as the discrimination basis for the disturbance direction, a general algorithm of the disturbance determination is given. According to the topology of the system and the arrangement of monitoring points, an optimization model of the disturbance source localization is established. It makes the disturbance source location problem transform into 0-1 integer programming problem and uses the genetic algorithm to get the results. The simulation results show that this method has accurate orientation and strong fault tolerant ability etc, which provides a new solution for the disturbance source location problem.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (50877069).

Key words: power quality; disturbance source location; genetic algorithm; fault tolerance capability

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)16-0076-08

0 引言

随着电能质量问题日益突出, 国内外学者针对电能质量扰动检测^[1-2]、电能质量扰动分类^[3-5]、电能质量评估^[6]以及扰动源定位^[7]等问题进行了大量研究。电能质量扰动源定位作为电能质量分析的一项核心功能, 对查明扰动源位置、治理电网污染具有重要作用。

电压暂降、电压暂升、瞬时中断、脉冲暂态、振荡暂态属于暂态电能质量扰动问题。网络化电能质量监测与分析系统中, 暂态电能质量扰动源定位

的任务主要包括单个监测点扰动方向的判别和基于多测点的扰动源定位。文献[8]首先提出一种根据扰动功率和扰动能量进行扰动方向判别的方法。文献[9-10]在此基础上进行了改进, 提高了对电容器投切扰动的判别准确率。文献[11]对功率能量法进行了扩展, 使该方法不仅可用于系统向外释放能量的扰动, 还可用于向系统注入能量的扰动。这些改进方法针对文献[8]的不足提出了切实有效的解决办法, 能够进行电压暂降、电容器投切以及电压脉冲扰动的定位, 但扰动定位的准确度较大程度上依赖于扰动功率和扰动能量判别结果的吻合程度, 并且该方法并不属于暂态扰动源定位的通用算法, 具有局限性。文献[12]指出离扰动源越近的母线扰动

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50877069)

现象越严重, 提出利用支路电流偏移指标定位电压暂降或电容器投切扰动, 但该方法并不适用于定位其他暂态电能质量扰动。另有专门针对电压暂降扰动方向判别的研究, 文献[13-16]给出了基于阻抗实部的判别法, 文献[17]提出了基于暂降起因的判别法, 文献[18]在三点法估计系统参数的基础上, 定量地给出电压暂降源定位结果。电容器投切扰动是一种发生频率仅次于电压暂降的暂态电能质量问题, 近年来, 引起了国内外学者的广泛关注^[19-20]。由于这些电压暂降源以及电容器投切扰动的定位方法不能拓展到判别其他暂态电能质量扰动, 所以具有一定的局限性。文献[21-22]根据分布式电能质量监测系统结构提出一种扰动源定位的矩阵算法。将覆盖范围矩阵和扰动方向矩阵进行矩阵乘法运算, 若得到的矩阵中存在某行元素的数值等于监测装置总数, 则该行对应的支路即为扰动源所在支路。该方法原理简单, 但不具备容错性能, 当扰动方向信息不可靠时不能实现扰动源定位。

本文从分析扰动信号高频分量产生的原因出发, 提出基于高频扰动能量的扰动方向判别方法。根据系统中多个监测点的扰动方向判别结果, 提出基于遗传算法的电能质量扰动源定位方法, 基于模式寻优思想, 将扰动源定位问题转化为 0-1 整数规划问题进行求解。仿真结果表明, 基于高频扰动能量的扰动方向判别方法具有判别准确率高、通用性强等优点; 基于遗传算法的扰动源定位方法能够在扰动方向信息不可靠情况下实现准确定位, 具有容错能力强的优点。

1 基于高频扰动能量的扰动方向判别法

1.1 问题的提出

当系统中发生各类暂态电能质量扰动时, 会产生很多频率高于工频的高频分量。这些高频分量包含丰富的扰动信息, 为电能质量扰动相关问题的分析提供了广阔的研究空间。下面以几种典型扰动为例, 对扰动信号中高频分量产生的原因进行分析。

对于故障情况, 高频分量产生的原因主要有以下两个方面:

(1) 在故障瞬间, 可以把网络看成一个线性系统, 应用叠加定理, 在故障发生瞬间, 相当于在故障点叠加上一个附加电源。该电源造成线路电压突变, 突变信号在频域中包含整个频谱。

(2) 由于故障附加等效电源的存在, 线路中将产生由故障点向线路两端传播的前进波。该前进波受到线路分布参数的影响, 在频域中体现为较宽频带的高频分量。

脉冲暂态大多由雷电引起。当发生直击雷时,

会有幅值很高的雷电流直接注入到输电线路。该雷电流以行波的形式向输电线路两端传播, 在不连续点上发生折反射, 形成一系列高频信号^[23]。

电容器投切引发的振荡暂态扰动是一种常见的电能质量问题。电容为储能元件, 当工作状态发生变化时, 电容上的电压不能突变。电容的这种强阻尼作用使系统产生振荡性的过渡过程, 扰动中的高频分量相当于是从扰动点发出的阻碍电路状态改变的阻尼波。

通过对高频分量产生原因的分析, 不难看出, 几种典型暂态电能质量扰动之间存在共同点, 即高频分量均由扰动源位置发出, 并向线路两端传播。这种情况同样适合于其他暂态电能质量扰动。这就相当于在扰动源位置叠加了一个电源, 该扰动叠加源沿线路向两端输送高频能量。高频能量的流动方向为扰动源定位问题提供了新的解决思路。

1.2 高频扰动能量的理论计算

若系统中三相瞬时电压分别为 u_A 、 u_B 和 u_C , 三相瞬时电流分别为 i_A 、 i_B 和 i_C , 则三相瞬时功率可表示为

$$p = u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C \quad (1)$$

当有扰动发生时, 各相电压或电流都可表示为以工频为主的低频分量和高频分量之和, 即

$$u = u_a + u_d \quad (2)$$

$$i = i_a + i_d \quad (3)$$

式中: u_a 和 u_d 分别为电压低频分量和高频分量; i_a 和 i_d 分别为电流低频分量和高频分量。

将式(2)和式(3)代入式(1), 则扰动时的三相瞬时功率可推导为

$$\begin{aligned} p = & (u_{Aa} + u_{Ad})(i_{Aa} + i_{Ad}) + \\ & (u_{Ba} + u_{Bd})(i_{Ba} + i_{Bd}) + \\ & (u_{Ca} + u_{Cd})(i_{Ca} + i_{Cd}) = \\ & (u_{Aa} i_{Aa} + u_{Ba} i_{Ba} + u_{Ca} i_{Ca}) + \\ & (u_{Ad} i_{Ad} + u_{Bd} i_{Bd} + u_{Cd} i_{Cd}) + \\ & (u_{Aa} i_{Ad} + u_{Ba} i_{Bd} + u_{Ca} i_{Cd}) + \\ & (u_{Ad} i_{Aa} + u_{Bd} i_{Ba} + u_{Cd} i_{Ca}) \end{aligned}$$

这里令 p_a 为低频功率, p_d 为高频功率, p_m 为混合功率, 有

$$p_a = u_{Aa} i_{Aa} + u_{Ba} i_{Ba} + u_{Ca} i_{Ca} \quad (4)$$

$$p_d = u_{Ad} i_{Ad} + u_{Bd} i_{Bd} + u_{Cd} i_{Cd} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} p_m = & (u_{Aa} i_{Ad} + u_{Ba} i_{Bd} + u_{Ca} i_{Cd}) + \\ & (u_{Ad} i_{Aa} + u_{Bd} i_{Ba} + u_{Cd} i_{Ca}) \end{aligned} \quad (6)$$

则三相瞬时功率可表示为

$$p = p_a + p_d + p_m \quad (7)$$

根据文献[8], 扰动时的三相瞬时功率也可表示为稳态的三相瞬时功率 p_S 和扰动功率 p_D 的叠加。根据式(7)的表示方法, 将 p_S 和 p_D 分别进行分解。由于三相稳态瞬时功率 p_S 中不存在高频信号分量, 因此 p_S 中高频功率和混合功率均为零。扰动时的三相瞬时功率为

$$p = p_S + p_D = p_{Sa} + (p_{Da} + p_{Dd} + p_{Dm}) \quad (8)$$

式中: p_{Sa} 称为三相稳态瞬时功率; p_{Da} 称为低频扰动功率; p_{Dd} 称为高频扰动功率; p_{Dm} 称为混合扰动功率。

结合式(7)、式(8)可知

$$p_{Dd} = p_d \quad (9)$$

对高频扰动功率 p_{Dd} 进行积分, 即可获得高频扰动能量, 即

$$E_{Dd} = \int p_{Dd} dt \quad (10)$$

1.3 扰动方向判别原则

发生扰动瞬间, 可将系统看成是线性网络, 由叠加原理可知, 系统各部分电压和电流是由系统电源和扰动叠加源共同作用产生。电压和电流的高频分量是除去系统电源时由扰动叠加源单独作用产生的分量, 因此高频扰动能量相当于是由扰动叠加源向系统注入的能量, 并沿线路向两端传播。图 1 为电能质量扰动源监测系统示意图, 当 F 点发生扰动时, 高频扰动能量的流向如图 2 所示。扰动发生后, 若监测点处的高频扰动能量为正值, 说明扰动源在监测点的上游方向, 发生了后向扰动; 若监测点处的高频扰动能量为负值, 说明扰动源在监测点的下游方向, 发生了前向扰动。

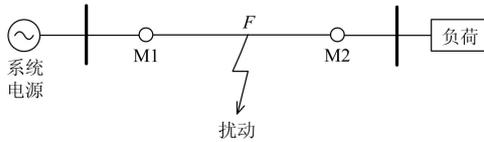


图 1 扰动源监测系统

Fig. 1 Disturbance source monitoring system

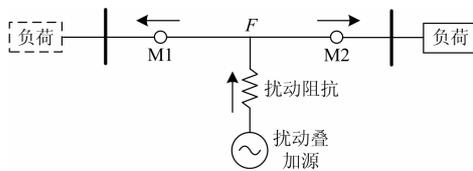


图 2 高频扰动能量流向示意图

Fig. 2 Flow of high-frequency disturbance energy

虽然本文方法和文献[8]的功率能量法都是依据能量的流动方向进行扰动方向判别, 但原理不同。功率能量法的扰动功率包括式(8)中的高频扰动功率、低频扰动功率和混合扰动功率三部分, 其中混合扰动功率和低频扰动功率是由系统电源和扰动叠加源共同产生, 高频扰动功率是由扰动叠加源产生。由于这三部分功率的流向并不一致, 因此三部分功率的和不能作为扰动方向判别的依据。这也就是功率能量法判别准确率不高的根本原因。

1.4 实现步骤

本方法应用正交小波变换获得原始信号的高频成分, 通过求取三相高频扰动能量对监测点与扰动源的相对位置进行判别。考虑到 Daubechies 小波具有时频局部性好、选择灵活等优点, 本文选用 Daubechies 小波。该小波随着小波阶数增大, 小波的频带划分能力增强。本文需要有效提取扰动发生瞬间的高频成分, 通过仿真比较, 选用小波阶数较高的 Db45 小波进行信号的多分辨分解与重构。扰动方向判别的具体步骤为:

(1) 以扰动发生时刻为基准, 取扰动前几个周波和扰动后几个周波的数据作为扰动方向分析的数据段。不同类型扰动的扰动持续时间会有所不同, 待分析的数据段应尽可能包含扰动终止时刻的数据, 本文将数据的起始时刻和截止时刻分别取为扰动前 0.25 s 和扰动后 0.25 s。

(2) 分别对三相电压和电流信号进行多分辨分解和重构。原始信号的采样频率为 10 000 Hz, 每周采样 200 点。应用 Mallat 快速算法将信号分解到第 6 层, 重构后高频带为 78~5000 Hz, 低频带为 0~78 Hz。

(3) 在 Matlab 仿真环境中, 根据式(5)、式(9)求取高频扰动功率, 然后通过对高频扰动功率的样条函数求积分获得三相高频扰动能量。

(4) 根据高频扰动能量的极性进行扰动方向判别。

2 基于遗传算法的扰动源定位方法

2.1 定位的基本思想

扰动源定位就是如何根据分布式监测系统中多个监测点的扰动方向信息来确定扰动源的位置, 定位过程可以归为优化技术的全局寻优问题。采用优化技术进行扰动源定位的基本思路是利用各监测点上传的扰动方向信息, 建立目标函数, 将扰动源定位问题表示为 0-1 整数规划问题, 然后进行求解。由于遗传算法在处理 0-1 整数规划问题中属于比较成熟的算法, 是一种自适应启发式全局搜索的概率

算法, 具有良好的鲁棒性和全局优化性, 因此本文采用遗传算法进行求解。通过对种群的遗传操作, 根据适应度的计算来进行全局最优化求解, 实现对扰动源所在线路的定位。

对于扰动信号而言, 不同的扰动, 扰动特征不尽相同, 即使同一类扰动也有强弱之分, 并且在各测点的分布也不一样。加上负荷波动、随机干扰、测量误差等不确定因素的影响, 扰动信号较弱的测点扰动方向特征可能并不可靠。本文基于遗传算法的扰动源定位方法, 由于其适应度函数的构造是对各个监测点扰动方向算式的求和, 所以, 根据适应度极值的计算进行全局寻优时, 若个别监测点扰动方向判别错误, 对定位结果影响不大。也就是说, 这种方法具有一定的容错性能, 能够进行扰动方向信息不可靠时的扰动源定位。

2.2 编码方法

遗传算法在处理问题时, 首先需要将每个候选解进行编码, 然后对这些编码(基因)组成的字符串(染色体)进行操作。线路的状态分为存在扰动源和无扰动源2种, 进行编码时, 若线路无扰动源, 将其编码为0; 若线路有扰动源, 将其编码为1。此外, 还需对各个监测装置提供的扰动方向信息进行编码, 当扰动方向判别结果为前向扰动时, 将其编码为1; 当扰动方向判别结果为后向扰动时, 将其编码为0。

2.3 适应度函数的构造

利用遗传算法进行扰动源定位, 是在扰动源线路的可行解空间中找到一条线路, 当这条线路发生扰动事件时, 最能解释系统中各监测点的扰动方向信息。为此, 需要建立能够反映线路状态与监测点扰动方向信息之间关系的适应度函数。适应度函数是采用遗传算法求解问题的关键, 本文建立的适应度函数如式(11)所示。

$$E(s) = M - \sum_{k=1}^{n_r} A_k |r_k - r_k^*(s)| \quad (11)$$

式中: M 为一个较大的整数, 为确保适应度值为正, 本文将其取为监测点数目的两倍; s 为线路状态向量, 维数为 n , 由系统中线路的数目确定, 有扰动源线路对应的元素用1表示, 无扰动源线路对应的元素用0表示; r_k 为第 k 个监测点的监测状态, 扰动方向判别结果为前向扰动时用1表示, 为后向扰动时则用0表示; $r_k^*(s)$ 为第 k 个监测点扰动方向信息的期望值函数, 简称为监测函数, 与线路状态信息有关; A_k 表示第 k 个监测状态的扰动权重。

2.3.1 监测函数

求解扰动源定位适应度函数最优解的过程就是使监测函数值最佳逼近各监测点监测状态的过程。假设系统中发生单一扰动, 则系统中各条线路的状态与监测状态之间存在着确定的对应关系。对某一监测点而言, 若上游所有线路无扰动源, 且下游某条线路存在扰动源, 则该点监测函数对应的值为1; 若上游某条线路有扰动源, 且下游所有线路无扰动源, 则该点监测函数对应的值为0。因此, 求解第 k 个监测点的期望值函数 $r_k^*(s)$ 为

$$r_k^*(s) = \prod_i (1 - s_i) \times \sum_j s_j \quad (12)$$

式中: s_i 为监测点 k 上游第 i 条线路的状态, 有扰动源为1, 没有扰动源为0; s_j 为监测点 k 下游第 j 条线路的状态, 有扰动源为1, 没有扰动源为0; Π 为求积符号, 累项相乘; Σ 为求和符号, 累项相加。

2.3.2 扰动权重

由于扰动信号弱的测点所得到的扰动方向判别结果往往不可靠, 因此, 应突出强信号在扰动方向定位过程中的作用, 将扰动信号强的测点所对应的项设置更高的权重。扰动权重 A 设置的方法为: 将所有测点的高频扰动能量终值的绝对值相加, 求取各个测点高频扰动能量终值的绝对值在其中的比重。第 k 个监测状态的扰动权重 A_k 的表达式为

$$A_k = \frac{|E_{dk}|}{\sum_{k=1}^{n_r} |E_{dk}|} \quad (13)$$

式中, E_{dk} 为第 k 个监测点在扰动结束时刻的高频扰动能量。

2.4 遗传操作

遗传操作包括选择、交叉和变异操作过程。选择过程采用简单实用的轮盘赌选择机制, 确保种群中适应度高的个体被选中的概率高于那些适应度低的个体。交叉操作体现信息交换思想, 是把两个父代个体的部分结构加以替换重组而生成新个体的操作。交叉概率 P_c 决定种群中的个体进行交叉的速率, 取值越大, 新个体产生的就越快。变异过程通过变异概率 P_m 来控制。

2.5 收敛条件及译码

扰动源定位过程就是在解空间中搜索最优解的过程。本文设计的遗传算法收敛条件为种群中出现适应度值为 M 的个体, 或者当算法达到最大迭代次数时结束操作。由于各监测点监测状态的确立是以单一扰动为前提, 所以输出的最优解除了满足使适应度函数最大, 还需满足潜在的等式约束条件,

使 $\sum_{i=1}^n s(i)=1$ 或 $\sum_{i=1}^n s(i)=0$ 。线路状态之和为1时，最优个体编码中，数字1位置所代表的线路可能为扰动源所在线路；线路状态之和为0时，说明最优个体的编码中无数字1，此时扰动源在电源和电源出口母线之间的范围内。

在遗传算法收敛或结束操作时，可能会有多个个体同时达到适应度最大值，并且满足线路状态之和等于1。这是由于在网络化电能质量监测系统中，考虑到监测仪的成本、监测数据的信息处理等问题，没有在每个节点均安装监测设备，系统中出现了监测盲区。监测盲区内的各条线路发生扰动时，在每个监测点处得到的扰动方向判别结果具有一致性，所以根据各监测点的扰动方向判别结果进行扰动源定位时，应将盲区内的所有线路均列为扰动源可能存在的线路。为防止搜索结果中漏掉同一盲区内的某些线路，在算法结束时，增加一个扩展环节，使定位结果包含盲区内的所有线路。

2.6 扰动源定位基本步骤

电能质量扰动源定位算法的基本步骤如下：

- (1) 由系统的拓扑结构和监测点布置情况，确定各监测点的监测函数；
- (2) 根据各监测点高频扰动能量的极性对扰动方向进行编码，得到各监测点的监测状态；
- (3) 由式(13)求取各监测状态的扰动权重；
- (4) 启动遗传算法，求取适应度函数的最优解；
- (5) 对最优解进行译码，完成扰动源的初步定位；
- (6) 判断所得线路是否属于某监测盲区，若属于，则对定位结果进行扩展。

3 仿真分析

3.1 仿真模型及参数

为验证算法的有效性，以图3所示10 kV中性点不接地系统为例，采用数字动态实时仿真系统DDRTS进行电能质量扰动仿真。线路供电半径为8.5 km，功率因数为0.95，线路具体参数为：

$$R=0.27\Omega/\text{km}, X_L=0.34\Omega/\text{km}.$$

图3中，监测点数目为6个，线路数为10条，因此，式(11)中 n_r 为6，遗传算法的基因维数为10。本文在算例中设定的基因个数为1000，迭代次数为100，交叉概率 P_c 取0.5，变异概率 P_m 取0.05。根据系统的拓扑结构以及监测点布置情况，列出监测点的监测范围覆盖情况如表1所示，监测盲区如表2所示。

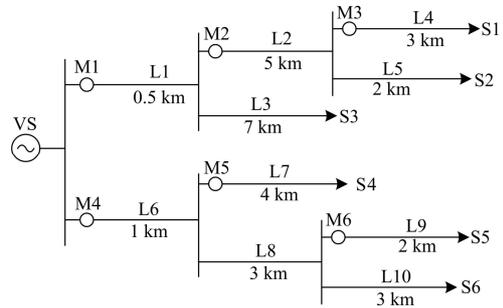


图3 典型配电系统拓扑结构

Fig. 3 Typical distribution system topology

表1 监测点的覆盖范围

Table 1 Coverage of monitoring points

监测点	上游线路	下游线路
M1	L6、L7、L8、L9、L10	L1、L2、L3、L4、L5
M2	L1、L3、L6、L7、L8、L9、 L10	L2、L4、L5
M3	L1、L2、L3、L5、L6、 L7、L8、L9、L10	L4
M4	L1、L2、L3、L4、L5、	L6、L7、L8、L9、L10
M5	L1、L2、L3、L4、L5、 L6、L8、L9、L10	L7
M6	L1、L2、L3、L4、L5、L6、 L7、L8、L9、L10	L9

表2 监测盲区

Table 2 Region of no monitoring

盲区1	盲区2	盲区3
L1、L3	L2、L5	L6、L8、L10

3.2 仿真算例

算例1：在线路L2设置单相接地故障，故障电阻为10 Ω，故障持续时间为一个周波。由于图3所示系统为中性点不接地系统，所以当故障发生时，虽然故障相电压降低，但非故障相电压要升高。

算例2：在电源出口母线上设置三相接地故障。

算例3：切除线路L10末端负荷，设置电压暂升扰动。

算例4：将线路L7末端负荷功率因数降低为0.6，投切电容100 μF提高功率因数至0.95。

为验证利用高频扰动能量进行扰动方向判别的有效性，与文献[8]功率能量法的判别结果进行了比较。表3为两种方法的判别结果，表中的法1为基于高频扰动能量的扰动方向判别方法，法2为功率能量法。

表 3 扰动方向判别结果

监测点	算例 1		算例 2		算例 3		算例 4	
	法 1	法 2	法 1	法 2	法 1	法 2	法 1	法 2
M1	下游	下游	上游	上游	上游	下游	上游	上游
M2	下游	下游	上游	上游	上游	下游	上游	上游
M3	上游	下游	上游	上游	上游	下游	上游	上游
M4	上游	下游	上游	上游	下游	上游	下游	下游
M5	上游	下游	上游	上游	上游	下游	下游	下游
M6	上游	下游	上游	上游	上游	下游	上游	上游

由表 3 可知, 采用基于高频扰动能量的扰动方向判别方法在 4 个算例中得到的判别结果全部正确; 采用功率能量法仅在算例 2 和算例 4 中得到的判别结果正确, 而在算例 1 和算例 3 中得到的结果与假设情况不符。图 4 给出了算例 1 中监测点 M4 的高频扰动能量波形, 因扰动发生后高频扰动能量的极性为正, 所以扰动源在监测点的上游方向, 发生了后向扰动。图 5、图 6 分别是采用功率能量法得到的算例 1 中监测点 M4 的扰动功率和扰动能量波形。根据功率能量法的判别准则, 可知扰动源在监测点的下游方向。与假设情况相对照, 功率能量法的扰动方向判别结果错误。

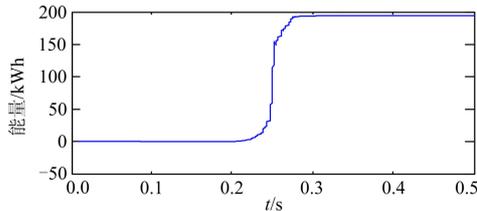


图 4 监测点 M4 高频扰动能量波形

Fig. 4 Disturbance energy of high frequency at M4

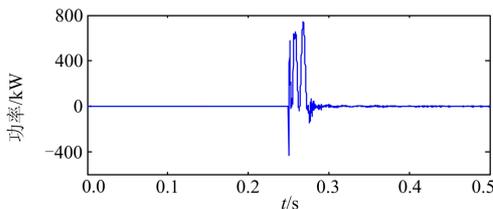


图 5 监测点 M4 扰动功率波形

Fig. 5 Disturbance power at M4

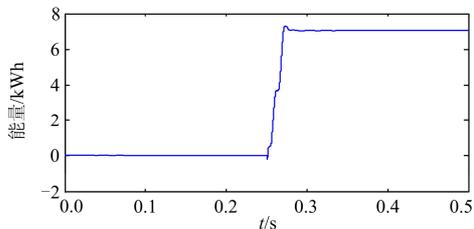


图 6 监测点 M4 扰动能量波形

Fig. 6 Disturbance energy at M4

由对比可知, 本文所述方法更具普遍性, 是一种定位暂态电能质量扰动的通用算法, 不仅可用于电压暂降和电容器投切扰动, 还可用于电压暂升、雷电脉冲等扰动类型。大量仿真结果也表明, 基于高频扰动能量的扰动方向判别方法具有准确率高的特点。

根据表 1, 由式(12)可建立各个监测点的监测函数。例如, 监测点 M1 处的期望状态表达式为

$$r_1^*(S) = (1-s_6) \times (1-s_7) \times (1-s_8) \times (1-s_9) \times (1-s_{10}) \times (s_1 + s_2 + s_3 + s_4 + s_5)$$

根据表 3 中基于高频扰动能量的扰动方向判别结果, 对扰动方向信息进行编码, 4 个算例的监测状态分别为

$$\text{算例 1: } r = (1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0);$$

$$\text{算例 2: } r = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0);$$

$$\text{算例 3: } r = (0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0);$$

$$\text{算例 4: } r = (0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0)。$$

根据各测点高频扰动能量的终值, 由式(13)可确定各个算例的扰动权重 A 分别为

$$\text{算例 1:}$$

$$A = (0.236 \ 0.292 \ 0.052 \ 0.253 \ 0.001 \ 0.165);$$

$$\text{算例 2:}$$

$$A = (0.273 \ 0.18 \ 0.089 \ 0.273 \ 0.09 \ 0.095);$$

$$\text{算例 3:}$$

$$A = (0.27 \ 0.178 \ 0.09 \ 0.27 \ 0.095 \ 0.1);$$

$$\text{算例 4:}$$

$$A = (0.014 \ 0.01 \ 0.005 \ 0.058 \ 0.609 \ 0.305)。$$

采用遗传算法寻求最优解, 各个算例输出的最优个体如下所示。

$$\text{算例 1: } s = (0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0);$$

$$\text{算例 2: } s = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0);$$

$$\text{算例 3: } s = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0);$$

$$\text{算例 4: } s = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0)。$$

根据最优个体编码中数字 1 的位置可判断扰动源可能存在的线路。由表 2 可知, 算例 1 得出的可疑线路为线路 L2, 属于盲区 2; 算例 3 得出的可疑线路为线路 L8, 属于盲区 3。所以算例 1 和算例 3 的定位结果需进行扩展, 使之包含盲区内的所有线路。各算例扰动源定位的结果如表 4 所示, 全部正确。如果采用文献[21]所述方法进行扰动源定位, 则算例 1、算例 3 和算例 4 的定位结果与本文相同, 但不能实现算例 2 的定位。

表 4 扰动源定位结果

Table 4 Results of disturbance source location

定位结果	算例 1	算例 2	算例 3	算例 4
扰动源位置	L2 或 L5	电源与出口母线 之间	L6、L8 或 L10	L7

3.3 容错校验

为验证本文扰动源定位方法的容错性能, 进行如下仿真实验。

将算例 1 的故障电阻更改为 300Ω , 并在线路 L2 发生故障的同时, 将线路 L9 末端负荷由 1.1 MW 增加至 1.25 MW。因扰动强度相对减弱, 并受负荷波动影响, 监测点 M1 和监测点 M6 的扰动方向判别结果发生了变化, 更改为扰动源在监测点 M1 的上游方向, 在监测点 M6 的下游方向, 其余测点的扰动方向判别结果仍与算例 1 相同。此时, 监测状态和扰动权重分别为

$$r = (0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1);$$

$$A = (0.082 \ 0.12 \ 0.207 \ 0.359 \ 0.189 \ 0.044)。$$

此时最优个体有两个, 分别为

$$s_1 = (0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0);$$

$$s_2 = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)。$$

定位的结果为线路 L2 或线路 L5 为扰动源所在线路, 结果正确。

在算例 2 中, 假设监测点 M3 的扰动方向判别结果因扰动强度较弱出现错误, 根据监测状态 $r = (0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0)$ 和原算例 2 中扰动权重再次进行定位。定位的结果未受到个别监测点扰动方向判别错误的影响, 结果正确。

仿真结果表明, 基于遗传算法的电能质量扰动源定位方法具有很强的容错能力, 当扰动方向信息不可靠时, 能够实现扰动源的准确定位。

4 结论

本文通过高频扰动能量的极性进行扰动方向判别, 采用基于遗传算法的扰动源定位方法实现了扰动源定位。扰动信号包含多种频率成分, 各种频率成分具有的扰动特征不同, 基于高频扰动能量的扰动方向判别方法, 具有判别准确、通用性强等优点。基于模式寻优思想, 将扰动源定位问题转换成 0-1 整数规划问题, 利用优化算法进行求解, 为扰动源定位提供了新的解决思路。仿真结果表明, 基于遗传算法的扰动源定位方法具有定位准确、容错能力强等特点。

参考文献

[1] 储琨, 马建伟. 基于小波变换的电能质量扰动信号的

检测[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(5): 34-36, 64.
CHU Jun, MA Jian-wei. Detection of power quality disturbed signals based on wavelet transform[J]. Power System Protection and Control. 2009, 37(5): 34-36, 64.

[2] 李加升, 戴瑜兴, 柴世杰. 基于预测机制的电能质量扰动检测方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 96-100.

LI Jia-sheng, DAI Yu-xing, CHAI Shi-jie. Research of the power quality disturbance detection method based on forecasting mechanism[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(17): 96-100.

[3] 王丽霞, 何正友, 赵静. 一种基于线性时频分布和二进制阈值特征矩阵的电能质量分类方法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(4): 185-191.

WANG Li-xia, HE Zheng-you, ZHAO Jing. Power quality disturbance classification based on linear time-frequency distribution and binary threshold feature matrix[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(4): 185-191.

[4] 覃思师, 刘前进. 基于 STFT 变换和 DAGSVMs 的电能质量扰动识别[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(1): 83-86, 103.

QIN Si-shi, LIU Qian-jin. Power quality disturbances detection and identification based on STFT transform and DAGSVMs[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(1): 83-86, 103.

[5] 管春, 周维维, 卢伟国. 基于多标签 RBF 神经网络的电能质量复合扰动分类方法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(8): 198-204.

GUAN Chun, ZHOU Luo-wei, LU Wei-guo. Recognition of multiple power quality disturbances using multi-label RBF neural networks[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(8): 198-204.

[6] 王深哲, 高山, 李海峰, 等. 含风电接入的电网规划方案电能质量评估[J]. 电工技术学报, 2013, 28(8): 56-65.

WANG Shen-zhe, GAO Shan, LI Hai-feng, et al. Evaluation of power quality in grid planning scheme with wind power integration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(8): 56-65.

[7] 吕干云, 孙维蒙, 汪晓东, 等. 电力系统电压暂降源定位方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(23): 241-245.

Lü Gan-yun, SUN Wei-meng, WANG Xiao-dong, et al. Review on methods for voltage sag source location in power system[J]. Power System Protection and Control,

- 2010, 38(23): 241-245.
- [8] PARSONS A C, GRADY W M, POWERS E J, et al. A direction finder for power quality disturbances based upon disturbance power and energy[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15(3): 1081-1086.
- [9] 王继东, 王成山. 基于小波变换的电容器投切扰动源定位[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(5): 20-23.
WANG Ji-dong, WANG Cheng-shan. Capacitor switching disturbance source locating based on wavelet transform[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(5): 20-23.
- [10] 张文涛, 王成山. 基于小波熵的电容器扰动识别和定位[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(7): 71-86.
ZHANG Wen-tao, WANG Cheng-shan. Recognition and locating of wavelet entropy based capacitor switching disturbances[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(7): 71-86.
- [11] 张文涛, 王成山. 基于改进扰动功率和能量法的暂态扰动定位[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(8): 32-35.
ZHANG Wen-tao, WANG Cheng-shan. Transient disturbances location based on improved disturbance power and energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(8): 32-35.
- [12] CHANG G W, CHAO Ju-peng, HUANG H M, et al. On tracking the source location of voltage sags and utility shunt capacitor switching transients[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2008, 23(4): 2124-2131.
- [13] TAYJASANANT T, LI C, Xu W. A resistance sign-based method for voltage sag source detection[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(4): 2544-2551.
- [14] PRADHAN A K, ROUTRAY A. Applying distance relay for voltage sag source detection[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(1): 529-531.
- [15] HAMZAH N, MOHAMED A, HUSSAIN A. A new approach to locate the voltage sag source using real current component[J]. Electric Power Systems Research, 2004, 72(2): 113-123.
- [16] LI C, TAYJASANANT T, XU W, et al. Method for voltage-sag-source detection by investigating slope of the system trajectory[J]. IEE Proceedings on Gener, Trans and Distr, 2003, 150(3): 367-372.
- [17] AHN S J, WON D J, CHUNG L Y, et al. Determination of the relative location of voltage sag source according to event cause[C]// IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2004: 620-624.
- [18] 吕干云, 孙维蒙, 汪晓东, 等. 利用三点法的电压暂降源定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(7): 36-40.
Lü Gan-yun, SUN Wei-meng, WANG Xiao-dong, et al. Voltage sag source location based on three-point method[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(7): 36-40.
- [19] HUR K, SANTOSO S. On two fundamental signatures for determining the relative location of switched capacitor banks[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2008, 23(2): 1105-1112.
- [20] CHANG G W, SHIH M H, CHU S Y, et al. An efficient approach for tracking transients generated by utility shunt capacitor switching[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(1): 510-512.
- [21] WON D J, CHUNG I Y, KIM J M, et al. A new algorithm to locate power-quality event source with improved realization of distributed monitoring Scheme[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(3): 1641-1647.
- [22] 翁国庆, 张有兵. 网络化电能质量监测与分析系统的设计[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(15): 79-83.
WENG Guo-qing, ZHANG You-bing. Design of a networked power quality monitoring and analysis system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(15): 79-83.
- [23] 王钢, 李海峰, 赵建仓, 等. 基于小波多尺度分析的输电线路直击雷暂态识别[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 139-144.
WANG Gang, LI Hai-feng, ZHAO Jian-cang, et al. Identification of transients on transmission lines caused by direct lightning strokes based on multiresolution signal decomposition[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 139-144.

收稿日期: 2013-11-21; 修回日期: 2014-01-13

作者简介:

董海艳(1978-), 女, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为电能质量分析; E-mail: dyldhy@163.com

贾清泉(1970-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电能质量分析与治理、分布式发电和微电网运行控制与保护技术、配电网故障选线保护等;

王宁(1981-), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为电能质量分析。