

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190756

# 含分布式电源的配电网电能质量扰动源定位研究

李长庆<sup>1</sup>, 魏云冰<sup>1</sup>, 郭元战<sup>1</sup>, 陈良<sup>1</sup>, 袁全宁<sup>2</sup>

(1. 上海工程技术大学, 上海 201620; 2. 上海浦海求实电力新技术有限公司, 上海 200093)

**摘要:** 针对含分布式电源的配电网产生的电压骤降、短路、高斯噪声以及电源产生的谐波输出等一系列问题, 提出了一种精确判断扰动源位置的方法, 旨在提高电能质量水平。根据分布式发电机配电网的拓扑结构和电能质量监测信息, 利用离散小波 Mallat 变换提取高频扰动的分量, 根据高频扰动能量的正负对扰动的方向进行判断。同时采用遗传算法, 利用高频扰动能量来设置扰动权重因子, 突出强信号在定位过程中的作用, 从而对扰动源进行精准定位。仿真结果表明, 此方法准确性比较高且容错性较好, 对电能质量监测仪的安装位置和个数方面, 也具有指导意义。

**关键词:** 分布式电源; 扰动源定位; Mallat 变换; 遗传算法; 容错性

## Research on power quality disturbance source location of a distribution network with distributed power supply

LI Changqing<sup>1</sup>, WEI Yunbing<sup>1</sup>, GUO Yuanzhan<sup>1</sup>, CHEN Liang<sup>1</sup>, YUAN Quanning<sup>2</sup>

(1. Shanghai University of Engineering and Technology, Shanghai 201620, China;

2. Shanghai Puhai Qiushi Power New Technology CO., LTD., Shanghai 200093, China)

**Abstract:** Considering a series of problems such as voltage dip, short circuit, Gaussian noise, and harmonic output from power supplies generated by distribution networks with distributed power supplies, a method for accurately determining the position of the disturbance source is proposed to improve the power quality level. Given the topology structure and power quality monitoring information of the distributed generator distribution network, the discrete wavelet Mallat transform is used to extract the components of the high-frequency disturbance. The direction of the disturbance is judged according to the positive and negative of the high-frequency disturbance energy. At the same time, a genetic algorithm is used to set the disturbance weighting factor by using the high-frequency disturbance energy. This highlights the role of the strong signal in the positioning process, so as to accurately locate the disturbance source. The simulation results show that the method has high accuracy and good fault tolerance, and it also has guiding significance for the installation position and number of power quality monitors.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51507157).

**Key words:** distributed power supply; disturbance source location; Mallat transform; genetic algorithm; fault tolerance

## 0 引言

近年来, 分布式电源在中国迅速发展, 这些新型电源为缓解电力短缺和改善能源结构做出了巨大贡献, 但与此同时, 它们的并网给传统电力系统优化和控制带来了新的问题和挑战。当配电网连接各种分布式电源时, 电网结构以及运行方式都发生了很大变化, 电网就会从单电源供电模式转变成多电

源供电模式<sup>[1-3]</sup>, 且分布式电源的位置、容量以及运行方式都对电网的线路潮流、节点电压和网络损耗造成了很大影响<sup>[4-5]</sup>。配电网电能质量扰动源的准确定位有助于快速解决电能质量问题, 降低经济损失和扰动事件责任, 具有重要意义<sup>[6-7]</sup>。文献[8]首次提出根据扰动能量和扰动功率进行扰动方向判别的方法, 定位思想是将扰动源视为一个从电网吸取能量的“能量池”, 但缺乏理论依据。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事件的判别准确率。文献[11]应用叠加定理分析扰动前后

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51507157)

的网络, 利用三相电压和电流中的扰动成分获取扰动功率, 定位准确率较高。文献[12]阐述了一种基于扰动能量法的电能质量扰动源定位方法, 但只适用于结构简单的单电源辐射式电网的扰动定位。文献[13-14]提出了基于矩阵算法的扰动源定位方法, 但其过分依赖于方向判别信息, 存在容错率较低的缺点。文献[15-16]介绍了粒子群优化算法在配电网中的应用, 具有易于实现、精度高、收敛速度快等优点, 但干扰强度和干扰方向仍存在一些不足。文献[17]董海燕提出的遗传算法定位电能质量扰动源的方法, 改善了传统符号定位方法的不足, 实现了扰动信息不可靠时干扰源的准确定位。

针对上述问题, 本文采取了两个关键技术: (1) 采用离散小波 Mallat 变换, 对监测仪采集到的电流和电压进行分解和重构, 提取高频扰动的分量, 同时算出电压和电流的高频扰动分量, 得到相应的功率, 并对其进行积分, 利用得到的高频扰动能量的正负来判别扰动方向<sup>[18]</sup>。(2) 采用遗传算法, 根据高频扰动能量来设置扰动权重因子, 突出强信号在定位过程中的作用, 从而对扰动源进行准确定位。仿真结果表明, 此方法准确性比较高且容错性较好。

## 1 基于离散小波 Mallat 变换的扰动源方向判定

### 1.1 离散小波 Mallat 变换

Mallat 算法通过小波滤波器  $H$ 、 $G$  和  $h$ 、 $g$  对信号进行分解和重构<sup>[19]</sup>。

分解算法: 选用小波阶数较高的 Db45 小波进行 6 层小波分解。

$$\begin{cases} A_0[f(t)] = f(t) \\ A_j[f(t)] = \sum_k H(2t-k)A_{j-1}f(t), k \in z \\ D_j[f(t)] = \sum_k G(2t-k)A_{j-1}f(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $k$  为整数;  $t$  为离散时间序列,  $t=1,2,3,\dots,N$ ;  $f(t)$  为原始信号;  $j$  为层数,  $j=1,2,3,\dots,J$ ;  $H$  和  $G$  是位于时域中的小波分解滤波器;  $A_j$  是第  $j$  层中信号  $f(t)$  的相似部分, 也就是低频段的小波系数;  $D_j$  是第  $j$  层中信号  $f(t)$  的细节部分, 也就是高频段的小波系数<sup>[20-21]</sup>。

重构算法如下

$$A_j[f(t)] = 2 \left\{ \sum_k h(t-2k)A_{j+1}f(t) + \sum_k g(t-2k)D_{j+1}f(t) \right\} \quad (2)$$

式中:  $k$  为整数;  $j$  为分解的层数; 若分解的最高层为  $J$ , 则  $j=J-1, J-2, J-3, \dots, 1, 0$ ;  $h$ 、 $g$  是时域部分的小波重构滤波器, 也就是滤波器比例系数<sup>[22-23]</sup>。

本文采用离散小波 Mallat 变换, 主要有两个关键用途, 一个是用来对扰动信号进行分解和重构, 一个是用来判断扰动发生时刻。在小波分解重构完成之后, 获得电压和电流的低高频分量。

$$u = u_a + u_d \quad (3)$$

$$i = i_a + i_d \quad (4)$$

式中:  $u_a$ 、 $u_d$  分别为电压低高频分量;  $i_a$ 、 $i_d$  分别为电流低高频分量。

三相瞬时功率可表达为

$$p = p_a + p_d + p_m \quad (5)$$

式中:  $p_a$  为低功率;  $p_d$  为高功率;  $p_m$  为混合功率。根据式(5)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<sup>[17]</sup>。扰动时的三相瞬时功率为

$$p = p_s + p_D = p_{s_a} + (p_{D_a} + p_{D_d} + p_{D_m}) \quad (6)$$

式中:  $p_{s_a}$  为三相稳态瞬时功率;  $p_{D_a}$  为低频扰动功率;  $p_{D_d}$  为高频扰动功率;  $p_{D_m}$  为混合扰动功率。

结合式(5)、式(6)以获得高频分量下的扰动功率。

$$p_{D_d} = p_d \quad (7)$$

再通过对扰动功率进行积分, 得到了高频段的扰动能量。

$$E_{D_d} = \int p_{D_d} dt \quad (8)$$

然后基于高频段扰动能量的正负, 我们可以确定扰动源相对于监测点的位置。

以图 1 扰动源监测系统为例, 当  $F$  点发生扰动时, 高频扰动能量的流向如图 2 所示。仿真时间为 0.3 s, 采样点频率为 20 000 Hz, 即 1 s 采样 20 000 个点, 则 0.3 s 采样 6 000 个点。当故障点  $F$  在 0.1~0.2 s 之间造成三相短路故障时, 对监测点  $M$  的电流和电压进行收集。对收集到的电压和电流执行离散小波 Mallat 变换。这里, 仅以 A 相电压为例, 其他原理相同。

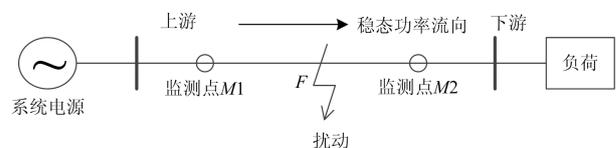


图 1 扰动源监测系统

Fig. 1 Disturbance source monitoring system

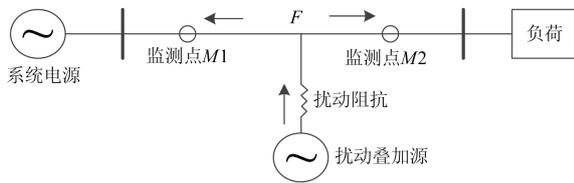


图 2 高频扰动能量流向示意图

Fig. 2 High frequency disturbance energy flow diagram

原始采集到的 A 相电压如图 3 所示。实验通过对 A 相电压离散小波 Mallat 变换, 得到了重构之后低、高频分量, 如图 4、图 5 所示。

对低、高频分量求和并获得重构后的信号, 如图 6 所示。计算原始信号和重构后信号间的误差, 从图 7 可看出, 两者实验误差几乎为 0。实验结果说明扰动信号经过离散小波 Mallat 变换后, 得到的信号与原始信号相同。

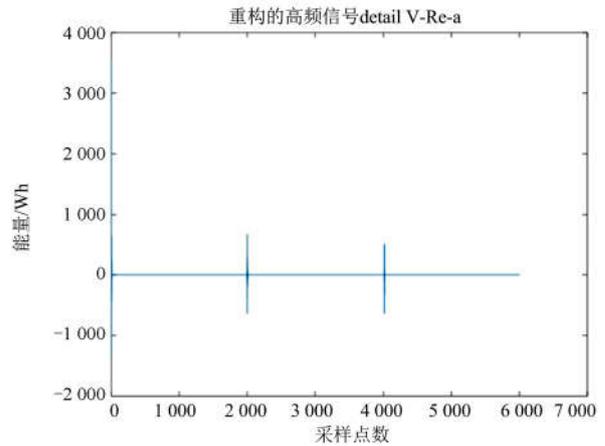


图 5 重构的高频信号曲线

Fig. 5 Reconstructed high frequency signal curve

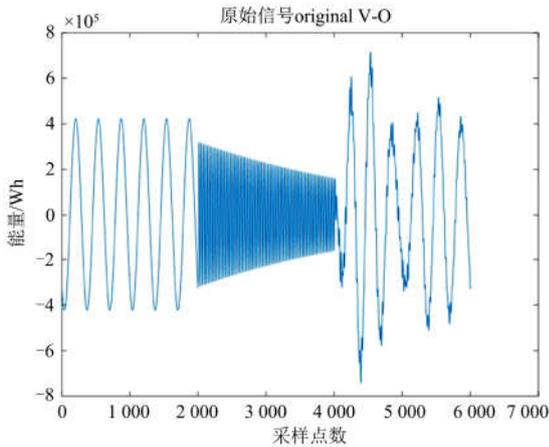


图 3 原始信号曲线

Fig. 3 Original signal curve

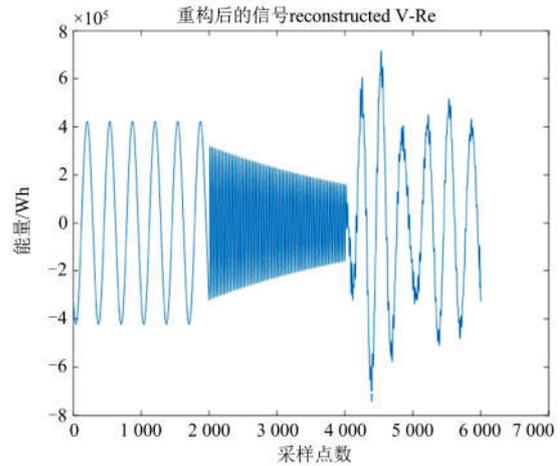


图 6 重构后的信号曲线

Fig. 6 Reconstructed signal curve

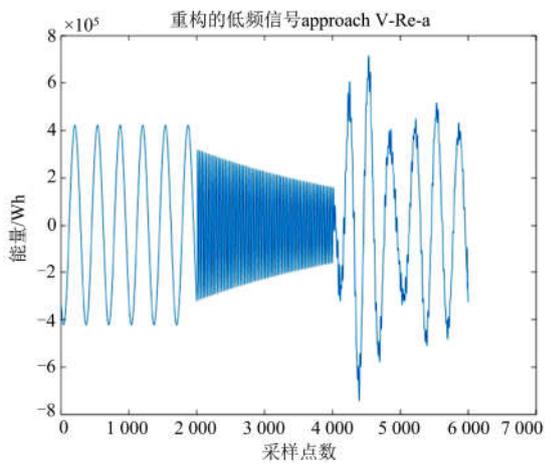


图 4 重构的低频信号曲线

Fig. 4 Reconstructed low-frequency signal curve

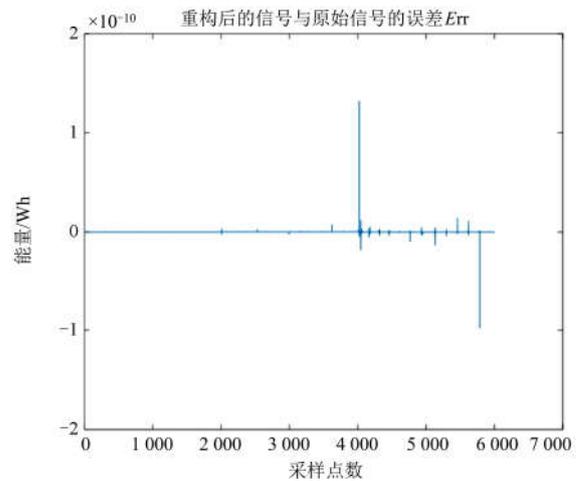


图 7 重构后的信号与原始信号的误差曲线

Fig. 7 Error curve of reconstructed signal and original signal

由图 5 可见, 采样点在 2 000 时, 也就是 0.1 s 时刻, 图形出现一个突变阶跃, 说明此时系统状态发生了明显的变化, 与前提“故障时刻”0.1 s 相吻合。因此, 扰动信号经过小波 Mallat 分解和重构后, 能够准确判断扰动发生的时刻。

## 1.2 扰动方向判定

对标准容量为 100 MVA 的 IEEE14 节点配电网进行仿真, 系统开环运行。接入 3 处 DG 后, 用 Matlab/Simulink 电力系统仿真软件构建了配电网模型, 如图 8 所示, 其中, 空心监测仪 PQM5、10、12 为虚拟监测仪, 其余实心监测仪为实际监测仪。

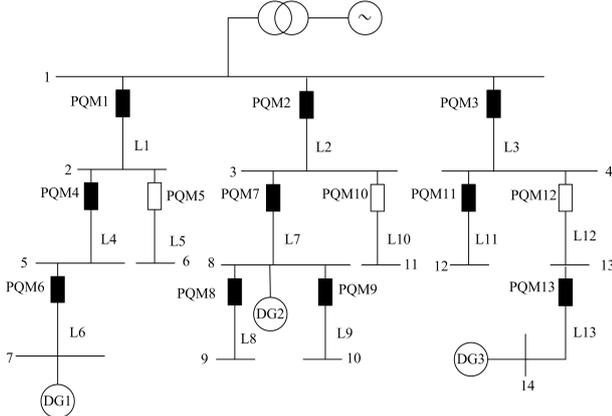


图 8 增加风电的 IEEE14 节点算例模型

Fig. 8 IEEE 14-node model of wind power

仿真时长为 0.3 s, 故障发生时间为 0.1~0.2 s, 故障类型为三相短路, 故障发生在线路 2。选取监测点 PQM2、7、8、11 分析。理论情况下, 故障点位于监测点 PQM2 的下游, 扰动能量为负; 故障点位于监测点 PQM7、8、11 的上游, 扰动能量为正。对模型进行仿真计算, 该 4 个监测点得到的扰动能量分别如图 9、图 10、图 11、图 12 所示。

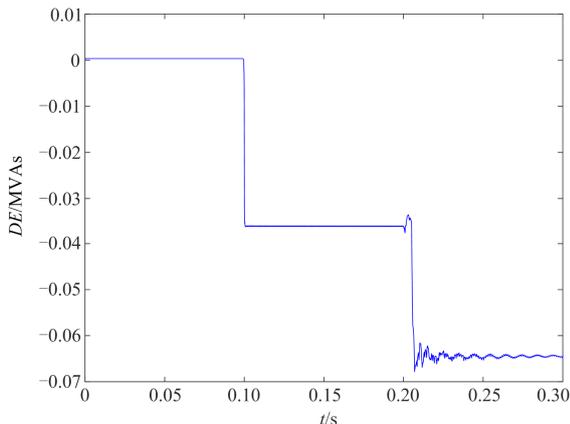


图 9 PQM2 扰动能量仿真结果图

Fig. 9 Simulation results of PQM2 disturbance energy

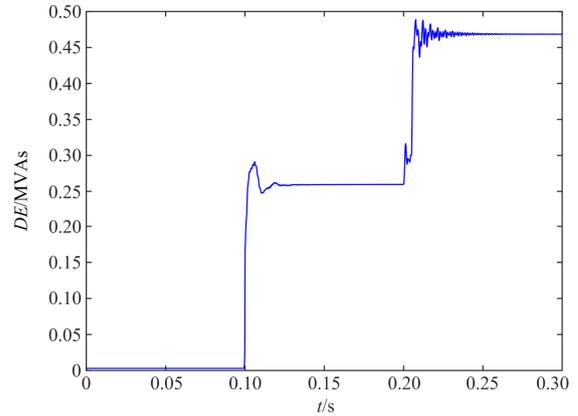


图 10 PQM7 扰动能量仿真结果图

Fig. 10 Simulation results of PQM7 disturbance energy

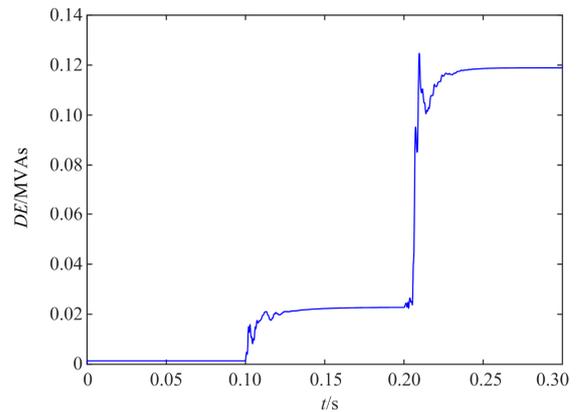


图 11 PQM8 扰动能量仿真结果图

Fig. 11 Simulation results of PQM8 disturbance energy

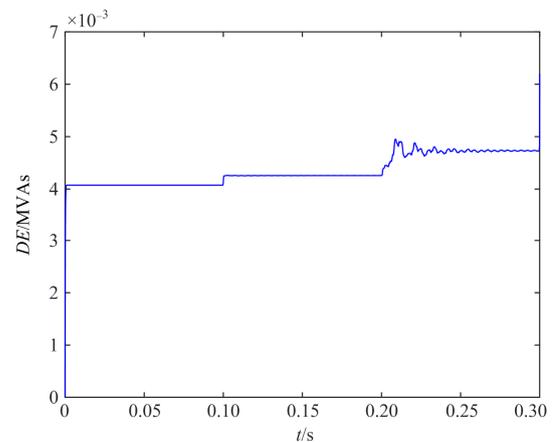


图 12 PQM11 扰动能量仿真结果图

Fig. 12 Simulation results of PQM11 disturbance energy

由 4 个图可知, 只有监测点 PQM2 在扰动期间的能量为负, 其余为正。与理论相符, 证明采用离散小波 Mallat 算法进行扰动能量计算, 能够对扰动源的方向进行准确定位。当然, 当监测点距离扰动

源较远时, 扰动能量较小或者出现反向, 会对结果产生误判, 这就需要在扰动源定位的时候进行容错率分析, 这点将在以下介绍。

## 2 基于遗传算法的扰动源定位

根据 PQM 监测仪检测到的电流  $i$  和电压  $u$  信号判断出扰动源相对于监测仪的位置, 然后根据监测仪的位置以及扰动源相对于监测仪的位置, 利用遗传算法(Genetic Algorithm, GA), 即可将扰动源进行定位。

遗传算法的收敛条件是具有适应值  $Q$  的个体出现在群体中, 或算法达到最大更新上限时完成实验步骤。因为每个监测点监测状态是在单个扰动下建立的, 因此输出的最优解不仅要使适应度函数达到最大外, 且还需要符合相应的约束条件<sup>[17]</sup>。当线路状态之和为 1 时, 代表这是扰动源所在的线路; 当线路状态之和为 0 时, 表示最佳个体的编码中没有状态 1, 因此扰动源位于电源和出口母线之间。

扰动源定位的基本步骤:

(1) 开始对每个监测设备提取的扰动方向信息编码, 如果扰动方向属于前向扰动时, 则编码就是 1; 当扰动方向判别为后向扰动时的, 编码为 0。其次, 创建可以显示线路状态与监测点扰动方向信息关系的适应度函数, 如式(9)所示。

$$Es(s) = Q - \sum_{k=1}^{n_r} A_k |r_k - r_k^*(s)| \quad (9)$$

式中:  $Q$  为一个较大的整数, 本文取 1;  $n_r$  是监测点的数量;  $s$  为线路的状态向量;  $n$  为维数;  $r_k$  是第  $k$  个监测点的监测状态;  $r_k^*(s)$  是第  $k$  个监测点的扰动方向信息的监测函数;  $A_k$  表示第  $k$  个监测点的扰动权重参数。

(2) 对于监测点来说, 如果上游线路都没有扰动源, 但其中一条下游线路有扰动源时, 该点监测函数的对应值应为 1; 反之, 该点对应的监测函数值为 0。所以, 第  $k$  个监测点的监测函数如式(10)所示。

$$r_k^*(s) = \prod_i (1 - s_i) \times \sum_j s_j \quad (10)$$

式中:  $s_i$  是监测点  $k$  上游方向第  $i$  条线路的状态, 有扰动源时值取 1, 反之则取 0;  $s_j$  是监测点  $k$  下游方向第  $j$  条线路的状态, 存在扰动源时值取 1, 反之则取 0<sup>[11]</sup>。

(3) 当某个监测点的扰动信号较弱时, 扰动方向判别的结果往往是不准确的, 所以, 应该对扰动信号比较强的监测点赋予以偏大的权重。本文中, 第  $k$  个检测点状态的比例权重参数  $A_k$  如式(11)所示。

$$A_k = \frac{|E_{dk}|}{\sum_{k=1}^{n_r} |E_{dk}|} \quad (11)$$

式中,  $E_{dk}$  是第  $k$  个监测点在扰动完成后的高频扰动能量。

(4) 使用 GA, 获取最佳的适应度函数值, 解码种群最佳解并实现扰动源的初始定位, 分析获得的线路是否位于监测盲区, 如果是, 则扩展定位结果。

## 3 仿真与分析

对 1.1 的 IEEE14 节点配电网进行仿真, 并开环运行。连接 3 处 DG, 用 Matlab/Simulink 仿真软件构建配电网模型, 其中, PQM5、10、12 为虚拟监测仪, 其余实心监测仪为实际监测仪。

根据优化配置原则得到, 该系统中共有 10 个监测点, 13 条线路。所以, 式(9)中  $n_r$  设置为 6, GA 的基因维数取 14。本实验设置的基因数取 20, 迭代次数取 100, 交叉概率  $P_c$  以及变异概率  $P_m$  分别取值 0.5 和 0.05。具体结果如表 1 和表 2 所示。

表 1 监测点的覆盖范围

监测点	上游线路	下游线路
M1	L2,L3,L7,L8,L9,L10,L11,L12	L1,L4,L5,L6
M2	L1,L4,L5,L6,L3,L11,L12,L13	L2,L7,L8,L9,L10
M3	L1,L4,L5,L6,L2,L7,L8,L9,L10	L3,L11,L12,L13
M4	L2,L3,L7,L8,L9,L10,L11,L12,L13,L1,L5	L4,L6
M5	L1,L4,L5,L6,L3,L11,L12,L13,L2,L10	L7,L8,L9
M6	L1,L4,L5,L6,L2,L7,L8,L9,L10,L12,L13	L11
M7	L2,L3,L7,L8,L9,L10,L11,L12,L13,L1,L5,L4	L6
M8	L1,L4,L5,L6,L3,L11,L12,L13,L2,L10,L7,L9	L8
M9	L1,L4,L5,L6,L3,L11,L12,L13,L2,L10,L7,L8	L9
M10	L1,L4,L5,L6,L2,L7,L8,L9,L10,L12,L13,L11	L13

表 2 监测盲区

盲区1	盲区2	盲区3
L1,L5	L2,L10	L3,L12

此时, 各监测点的状态为

$$r = (1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0)$$

各监测点扰动权重为

$$A = (0.0751, 0.0007, 0.0047, 0.1210, 0.7885, 0.0030, 0.0003, 0.0011, 0.0014, 0.0034)$$

此时通过遗传算法, 在初始染色体为 20 个, 迭代 100 次,  $P_c$  为 0.5,  $P_m$  为 0.05 的设定下, 扰动源位

置位置可以精确定位为L4, 与所设置的故障信息一致。

为了验证所提 GA 对扰动源定位的容错性能, 进行以下仿真实验。在正常情况下, 也就是没有误判时, 故障点在 M6 的上游, M6 扰动能量应为正, 但是由于分布式电源 DG1 存在, 监测点 M6 的扰动方向判断就会产生变化, 得到 M6 的扰动能量为负, 即下游方向, 如图 13 所示。使用遗传算法, 初始染色体数量为 20, 迭代 100 次,  $P_c$  和  $P_m$  分别为 0.5 和 0.05, 并将每代个体数量限制为 20, 进行 1000 次遗传算法的计算, 最终正确率为 97.7%。适应度最大值变化如图 14 所示, 适应度平均值如图 15 所示。

由图 14、图 15 可以看出, 在进行遗传算法对电能质量扰动源进行定位时, 大概在 20 代就出现了扰动源位置的最优解, 适应度的最大值开始稳定, 同时适应度的平均值维持在 0.9 以上, 这充分说明

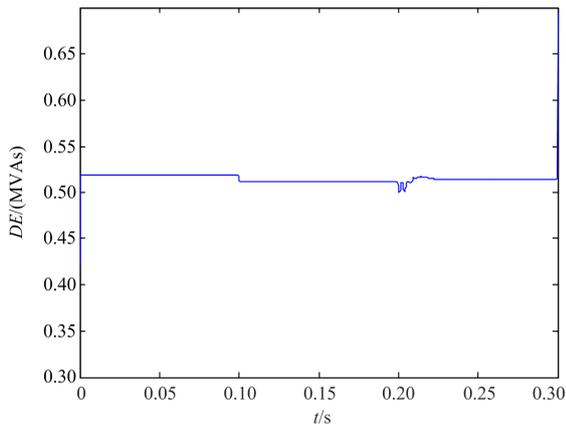


图13 PQM6扰动能量仿真结果图

Fig. 13 Simulation results of PQM6 disturbance energy

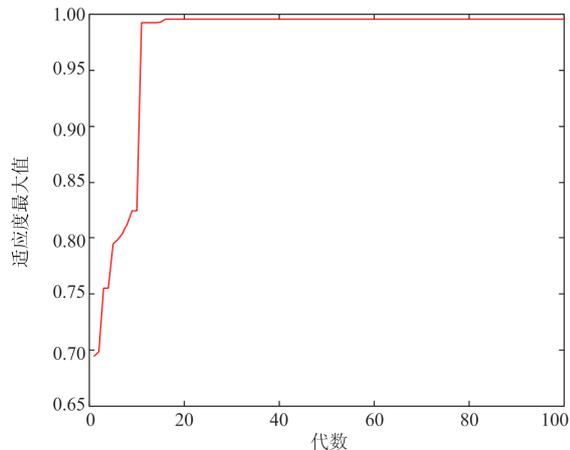


图14 适应度最大值变化曲线

Fig. 14 Fitness maximum change curve

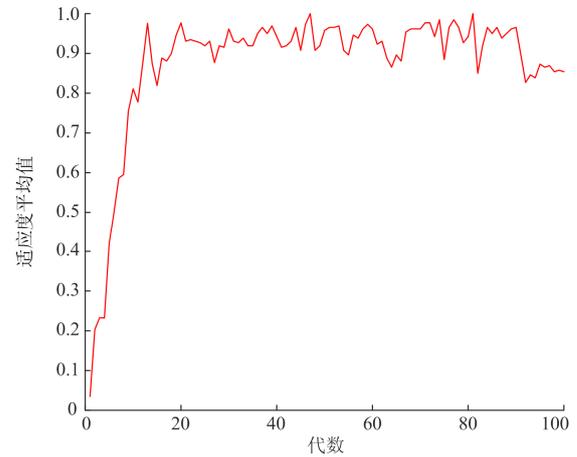


图 15 适应度平均值变化曲线

Fig. 15 Fitness mean change curve

了遗传算法在问题求解时的速度较快, 稳定性较高的特点。

为了充分验证遗传算法的准确性, 本文进行了多组实验, 分别计算了当 L4 处出现三相短路时, 并且在不同监测点扰动方向判断错误的情况下, 分别计算相应准确率, 结果如表 3 所示。

表 3 不同监测点误判时的计算准确度

Table 3 Calculation accuracy when different monitoring points misjudge

误判监测点编号	计算准确度/%
M1	95.5
M2	97.8
M3	96.9
M6	98.0
M8	97.7
M9	97.2
M10	97.6
M1,M3	90.1
M6,M10	94.1
M2,M8	93.8

由表 3 可以看出, 当出现一个监测点扰动方向误判时, 采用遗传算法判断扰动源位置的准确度保持在 95%以上, 当存在两个监测点扰动方向误判时, 准确度保持在 90%以上, 这说明采用遗传算法进行扰动源定位具有很高的容错率与准确性。

同时, 为了验证定位过程中, 对监测点施加权重比不施加权重对计算结果更加准确, 分别计算施加权重与不施加权重的准确度, 分析并计算两者之间的相对误差, 计算结果如表 4 所示。

表 4 施加权重与不施加权重对计算准确度的影响  
 Table 4 Influence of applying weights and not applying weights on calculation accuracy

误判监测点	不施加权重时计	施加权重时计	相对误
M1	95.3	95.5	0.21
M2	95.1	97.8	2.84
M3	95.4	96.9	1.57
M6	97.8	98.0	0.20
M8	96.9	97.7	0.83
M9	97.1	97.2	0.10
M10	95.2	97.6	2.52
M1,M3	86.3	90.1	4.40
M6,M10	91.5	94.1	2.84
M2,M8	89.6	93.8	4.69

由表4可以看出, 只有一个监测点误判时, 施加权重对准确度的提升, 最小有0.10%, 最大可达2.84%; 当有两个监测点误判时, 施加权重对准确度的提升, 最小有2.84%, 最大可达4.69%, 提升幅度大于单个监测点误判。以上表明, 对根据扰动能量的大小对监测点施加权重之后, 遗传算法计算扰动源位置的准确性普遍提升, 当两个监测点扰动方向判断错误时, 准确性提升效果更为显著。

#### 4 结论

本文采用离散小波 Mallat 快速算法, 利用对高频扰动能量正负的分析来区分扰动方向; 采用遗传算法, 构造适应度函数, 设置扰动权重因子, 对扰动源进行了精准的定位。标准 IEEE14 节点实验结果表明, 上述扰动源定位方法不仅准确性较高、容错能力较强, 而且还能为电能质量扰动源定位提供一定的指导意义。

目前, 电能质量扰动源定位研究并不太成熟, 不同的扰动源定位方法不同, 且方法缺陷也不小。今后, 将持续关注这方面研究, 希望能研究出一种针对不同扰动源进行定位的方法, 为复杂电力系统扰动源定位提供帮助。

#### 参考文献

[1] 胡明, 郭健鹏, 李富强, 等. 基于自适应 CEEMD 方法的电能质量扰动检测与分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(21): 103-110.  
 HU Ming, GUO Jianpeng, LI Fuqiang, et al. Power quality disturbance detection and analysis based on adaptive CEEMD[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(21): 103-110.

[2] 许珊, 谈金晶. 配电网规划中分布式电源的选址和定

容[J]. 电工电气, 2017(8): 8-13.  
 XU Shan, TAN Jinjing. Location and capacity determination of distributed power generation in distribution network planning[J]. Electrical Engineering, 2017(8): 8-13.

[3] 肖浩, 裴玮, 邓卫, 等. 分布式电源对配电网电压的影响分析及其优化控制策略[J]. 电工技术学报, 2016, 31(增刊 1): 203-213.  
 XIAO Hao, PEI Wei, DENG Wei, et al. Analysis of the influence of distributed power supply on distribution network voltage and its optimal control strategy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(S1): 203-213.

[4] 于潇涵. 基于简单遗传算法分布式电源的优化规划[J]. 电子制作, 2015(22): 72.  
 YU Hanhan. Optimization planning of distributed power source based on simple genetic algorithm[J]. Electronic Production, 2015(22): 72.

[5] 杨剑锋, 姜爽, 石戈戈. 基于分段改进 S 变换的复合电能质量扰动识别[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(9): 64-71.  
 YANG Jianfeng, JIANG Shuang, SHI Gege. Composite power quality disturbance identification based on subsection modified S transform[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(9): 64-71.

[6] 欧阳森, 石怡理. 改进熵权法及其在电能质量评估中的应用[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(21): 156-159, 164.  
 OUYANG Sen, SHI Yili. Improved entropy weight method and its application in power quality assessment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(21): 156-159, 164.

[7] 张淑清, 翟欣沛, 刘永富, 等. 滑动去趋势波动分析在电能质量暂态扰动检测中的应用[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(8): 52-57.  
 ZHANG Shuqing, ZHAI Xinpei, LIU Yongfu, et al. Application of sliding detrended fluctuation analysis in power quality transient disturbance detection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(8): 52-57.

[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 Transactions 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]. 电力系统自动化, 2004, 28(5): 20-23.  
 WANG Jidong, WANG Chengshan. Location of disturbance source of capacitor switching based on wavelet transform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(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]. 电工技术学报, 2007, 22(7): 71-74, 89.  
ZHANG Wentao, WANG Chengshan. Capacitor disturbance identification and location based on wavelet entropy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(7): 71-74, 89.
- [11] 唐轶, 文雷, 于琪, 等. 基于扰动功率的电压暂降源方向判断[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(9): 2202-2208.  
TANG Yi, WEN Lei, YU Qi, et al. Judging the direction of voltage sag source based on disturbance power[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(9): 2202-2208.
- [12] 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 Wentao, WANG Chengshan. Transient disturbance location based on improved disturbed power and energy method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(8): 32-35.
- [13] 任子晖, 王琦. 基于优化 DDAGSVM 多类分类策略的电能质量扰动识别[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(5): 82-88.  
REN Zihui, WANG Qi. Power quality disturbance identification based on optimal DDAGSVM multi-class classification strategy[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(5): 82-88.
- [14] 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 Guoqing, ZHANG Youbing. Design of networked power quality monitoring and analysis system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(15): 79-83.
- [15] 李超文, 何正友, 张海平, 等. 基于二进制粒子群算法的辐射状配电网故障定位[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(7): 35-39.  
LI Chaowen, HE Zhengyou, ZHANG Haiping, et al. Fault location of radial distribution network based on binary particle swarm optimization[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(7): 35-39.
- [16] 陈志奎, 司威. 传感器网络的粒子群优化定位算法[J]. 通信技术, 2011, 44(1): 102-104, 108.  
CHEN Zhikui, SI Wei. Particle swarm optimization location algorithm for sensor networks[J]. Communications Technology, 2011, 44(1): 102-104, 108.
- [17] 董海艳, 贾清泉, 王宁. 具有容错能力的电能质量扰动源定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(16): 76-83.  
DONG Haiyan, JIA Qingquan, WANG Ning. Power quality disturbance source location method with fault tolerance[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(16): 76-83.
- [18] 严居斌, 张正炜. 基于扰动功率法的短期电能质量扰动源判定[J]. 华中电力, 2011, 24(2): 36-39.  
YAN Jubin, ZHANG Zhengwei. Judging of short-term power quality disturbance source based on disturbance power method[J]. Central China Electric Power, 2011, 24(2): 36-39.
- [19] 汪艳丽. 基于二进小波理论的医学图像增强性能研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2016.  
WANG Yanli. Research on medical image enhancement performance based on dyadic wavelet theory[D]. Urumchi: Xinjiang Normal University, 2016.
- [20] 康丹. 基于小波包改进算法的谐波分析仪[D]. 北京: 华北电力大学, 2011.  
KANG Dan. Harmonic analyzer based on improved wavelet packet algorithm[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2011.
- [21] 王英, 曾光宇. 基于小波的 EMD 去噪法应用于心电信号去噪[J]. 数值计算与计算机应用, 2011, 32(4): 274-282.  
WANG Ying, ZENG Guangyu. Application of wavelet-based EMD denoising method to denoise ECG signals[J]. Numerical Calculation and Computer Applications, 2011, 32(4): 274-282.
- [22] 梁可道. 粒子群优化的小波算法在避雷器老化诊断中的应用[J]. 中国电力, 2018, 51(6): 102-106.  
LIANG Kedao. Application of particle swarm optimization wavelet algorithm in the arrester aging diagnosis[J]. Electric Power, 2018, 51(6): 102-106.
- [23] 雷国伟, 郭剑雄, 舒强, 等. 基于 DSP 的癫痫病电信号处理[J]. 现代电子技术, 2007(11): 109-111.  
LEI Guowei, GUO Jianxiong, SHU Qiang, et al. Signal processing of epileptic EEG based on DSP[J]. Modern Electronic Technology, 2007(11): 109-111.

收稿日期: 2019-07-01; 修回日期: 2019-09-08

作者简介:

李长庆(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统负荷预测; E-mail: 1216818771@qq.com

魏云冰(1970—), 男, 教授, 硕士生导师, 研究方向为电力设备在线监测与诊断、电力系统及其自动化等;

郭元战(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统负荷预测。

(编辑 张爱琴)