

基于双尺度分形盒维数的电能质量扰动信号识别

杨耿煌¹, 张泽卉¹, 蔡剑雄², 温渤婴¹

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 福建石狮市电力联营公司, 福建 石狮 362700)

摘要: 提出一种电能质量 PQ (Power Quality) 扰动信号时域分析方法。在 PQ 扰动信号分析中, 分形维数用来描述信号的不规则性和复杂度。由于引起各种 PQ 扰动的来源不同, 致使扰动信号在不规则性和复杂度上体现出差异, 为 PQ 扰动信号分析提供依据。平面离散信号的传统分形盒维数计算通常基于正方形盒, 而对于 PQ 扰动信号, 时间和幅值是完全不同的物理概念, 采用基于时间和幅值的双尺度长方形盒对 PQ 扰动信号计算盒维数, 根据 PQ 扰动信号的周期或准周期特性推导无标度区的长方形盒尺度确定经验公式, 并通过具体波形简单验证。典型的 PQ 扰动信号分析的结果表明, 其描述的特征量明显, 可以识别扰动。盒维数的简单统计结果可以作为 PQ 神经网络分类器的输入特征量。

关键词: 双尺度; 电能质量; 分形; 盒维数; 信号处理

Power quality disturbance analysis based on dual-scale fractal box counting dimension

YANG Geng-huang¹, ZHANG Ze-hui¹, CAI Jian-xiong², WEN Bo-ying¹

(1. College of Information & Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;
2. Shishi Power Company, Shishi 362700, China)

Abstract: A new time-domain based method for power quality (PQ) analysis is brought forward. Fractal dimension is a mean to characterize the abnormality and complexity of PQ disturbance. The producers of PQ disturbance are different which result in the difference of abnormality and complexity, so fractal analysis is potential for PQ disturbance analysis. Traditional fractal box counting dimension is based on the square which confuses the coordinate physical meaning. The dual-scale fractal box counting dimension is based on the rectangle in which time and range of PQ disturbance are included. The formulae for fractal scaleless range is developed based on the periodic or approaching periodic characteristic of PQ disturbance. The effectiveness of formulae is tested by simple waveform. Fractal box counting dimension of typical PQ disturbances depict the PQ disturbances well especially in identification. After simple statistics, the dimension can act as the input vector of ANN for PQ classification.

Key words: dual-scale; power quality; fractal; box dimension; signal processing

中图分类号: TM744

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)08-0055-06

0 引言

电能质量的分析技术^[1]实际上就是对电力系统各种信号(如电压、电流等)进行分析处理。电能质量分析的目的是对采集的扰动波形进行辨识, 主要完成扰动检测、扰动的识别、特征量的提取以及扰动的分类。电能质量扰动信号分析方法^[2~5]主要基于时域、变换和人工智能。时域分析方法由于计算量较小, 比较适合于微处理器^[6~7]的实时实现。

分形^[8,9]是一门以不规则事物为研究对象、探索事物复杂度的科学, 广泛应用于各个领域^[10~14]。在信号分析中, 分形维数是度量分形不规则性的重要指标, 盒维数^[9]由于计算相对简单而得到广泛应用。信号的分形盒维数描述了信号的不规则性或复杂度。传统的分形盒维数计算都是基于正方形盒, 混

淆了信号空间坐标的差异。本文采用了双尺度共同决定的矩形盒, 对二维信号进行盒维数分析。

事物处于分形范围内称为分形无标度区, 该区域的确定是盒维数计算的基础, 其确定方法主要有: 相关系数检验法^[15], 三折线段拟合法^[16]和遗传优化选择方法^[17]。从数学理论的角度看, 上述三种方法都具有其合理性, 然而对于离散的采样信号, 这些方法存在不足, 主要体现在没有充分考虑分析主体的特点, 就信号分析而言, 没有和实际信号结合, 所以其确定的无标度区往往不准确, 甚至出现把标度区误认为无标度区, 即把非分形属性误认为分形属性, 工程实际应用中不能达到目的^[18]。针对 PQ 扰动信号周期或准周期的性质, 本文推导了无标度区的尺度计算经验公式。

通过对 PSCAD/EMTDC 仿真的典型 PQ 信号进

行双尺度分形盒维数计算,结果表明,可以简单检测并识别这些 PQ 扰动信号。

1 分形理论与分析

1.1 分形基本原理

分形理论是基于事物整体与其组成部分具有自相似性的特性而提出来的,这种特性体现为严格自相似性和统计自相似性。根据分形理论,集合 F 可以由具有紧支集的函数 $\beta(t)$ 组成, $\beta(t)$ 的描述如式(1)所示。

$$\beta(t) = r^{-H} \beta(rt) \quad (1)$$

式中: r 为自相似仿射算子,且 $r > 0$, H 为与维数相关的参数且 $H > 0$ 。

设 $x(j)$ 的盒维数表示为 d_B , PQ 扰动信号的盒维数为介于 1 和 2 之间的一个实数,信号越复杂,盒维数越大,这样, d_B 就可以描述 PQ 信号的不规则性和复杂程度。

1.2 离散信号盒维数的一般算法

设离散信号 $x(j) \subset X$, X 为 n 维欧氏空间 R^n 上的闭集。将 R^n 划分为尽可能多的 Δ 网格,若 N_Δ 是网格宽度为 Δ 的离散空间上集合 X 的网格计数,则盒维数定义为:

$$d_B = \lim_{\Delta \rightarrow 0} (-\lg N_\Delta / \lg \Delta) \quad (2)$$

由于离散信号 $x(j)$ 的最高分辨率为采样间隔 Δ , 所以式(2)中的极限运算是不能按其定义中的 $\Delta \rightarrow 0$ 计算。实际计算中一般通过近似方法实现。具体的实现方法为: 将 Δ 网格看成最小网格,逐步放大为 $k\Delta$ 网格(k 为正整数)。设 $N_{k\Delta}$ 为网格宽度为 $k\Delta$ 的离散空间上集合 X 的网格计数,则 $N_{k\Delta}$ 的计算如式(3)、(4)、(5)所示。

$$p_1 = \max \{x_{k(j-1)+1}, x_{k(j-1)+2}, \dots, x_{k(j-1)+k+1}\} \quad (3)$$

$$p_2 = \min \{x_{k(j-1)+1}, x_{k(j-1)+2}, \dots, x_{k(j-1)+k+1}\} \quad (4)$$

$$P(k\Delta) = \sum_{j=1}^{N_0/k} |p_1 - p_2| \quad (5)$$

式中: $j = 1, 2, \dots, N_0/k$, $k = 1, 2, \dots, K$ 且 $K < N_0$, $P(k\Delta)$ 为一维坐标点的纵向尺度范围。则信号 $x(j)$ 的网格计数为:

$$N_{k\Delta} = P(k\Delta)/(k\Delta) + 1 \quad (6)$$

在 $\lg k\Delta \sim \lg N_{k\Delta}$ 图中确定线性度好的一段作为信号无标度区,由式(2)中有 $N_{k\Delta} \sim (k\Delta)^{-d_B}$ 的关系,

如果无标度区的起始点和终止点分别记为 k_1 、 k_2 , 则在该区域内 $\lg k\Delta$ 、 $\lg N_{k\Delta}$ 应满足线性回归模型,即:

$$\lg N_{k\Delta} = -d_B \lg k\Delta + b \quad (7)$$

式中: $k_1 \leq k \leq k_2$ 。

根据最小二乘法可以求得信号 $x(j)$ 的盒维数为:

$$d_B = -[(k_2 - k_1 + 1) \sum (\lg k \times \lg N_{k\Delta}) - \sum \lg k \sum \lg N_{k\Delta}] / [(k_2 - k_1 + 1) \sum \lg^2 k - (\sum \lg k)^2] \quad (8)$$

式中: $k_1 \leq k \leq k_2$, 即盒维数为最小二乘法拟合直线的斜率估计值 d_B 。

1.3 盒维数一般算法存在的问题

1.3.1 正方形网格的缺陷

工程实际应用中,平面上描述信号的横、纵向尺度往往与实际的物理意义不同,以 PQ 扰动信号为例,横向尺度为时间,纵向尺度为电压或电流幅值,因此 PQ 扰动信号具有双尺度,若使用边长为 $k\Delta$ 的正方形网格对 PQ 信号进行覆盖,直接出现的问题是时间和幅值的量纲不同,但却使用了同一种尺度进行测量,必然无法正确反映平面离散点的无标度区。

1.3.2 无标度区算法缺点

分形无标度区是存在自相似性的尺度范围,是分形盒维数计算过程中的重要参数。在 $\lg k\Delta \sim \lg N_{k\Delta}$ 图中确定无标度区是盒维数计算的关键,下面列举常用的无标度区确定方法存在的缺点:

相关系数检验法是直接根据人的判断,找出线性度好的一段数据点进行相关性检验,如检验通过,则确定该端数据为无标度区。如果无标度区的数据段范围小而且边界不明显,其上下限比较难以分辨,再者,相关系数检验的标准并不是特别严格,容易出现线性关系不好的点也可以通过检验,由于最小二乘法对奇异点比较敏感,无标度区的起始和终止点稍有差异,就直接导致盒维数计算出现较大偏差,所以相关系数检验法适用于盒维数的粗略计算或估计。

三折线段拟合法把数据点分为 L_1 、 L_2 、 L_3 三个部分,通过逐步修改两个边界点求取分段拟合直线的残差和,当残差和最小时,确定两个边界点为无标度区的起始点和终止点,即 L_2 为信号的无标度区。

事实上, 数据点并不一定会按照 L_1 、 L_2 、 L_3 的规律分布, 当离散信号的采样频率较低时, PQ 信号可能不会出现无标度区以下的区域 L_1 。

遗传优化选择算法在整个区域内以平均残差和最小的标准搜索无标度区的起始点和终止点, 而摒弃了把数据点分为三段的作法, 从而弥补了三段折线拟合法的不足。但是, 平均残差和最小的区间不一定是无标度区, 文献[18]通过具体实例, 对于遗传优化选择算法出现的问题进行说明。

2 双尺度盒维数算法

2.1 基于一般算法的改进

2.1.1 矩形网格

针对 1.3.1 中提出的问题, 可以采用矩形网格替代正方形网格, 其中矩形网格的宽度和高度分别对应时间和归一化后的电压或电流幅值。设矩形网格的最小宽度和高度分别为 Δ_t 和 Δ_h , 令 $P(k\Delta_t)$ 为离散信号 $x(j)$ 在 N_0/k 个区间 $[(j-1)k\Delta_t, jk\Delta_t]$ ($j=1, 2, \dots, N_0/k$) 的分段峰峰值之和, 在 $k\Delta_t \times k\Delta_h$ 的网格覆盖下信号 $x(j)$ 的网格计数 $N_{k\Delta}$ 可以修改为:

$$N_{k\Delta} = P(k\Delta_t)/(k\Delta_h) + 1 \quad (9)$$

2.1.2 PQ 扰动信号无标度区确定方法

PQ 扰动信号表现出周期或准周期特性, 通过对叠加噪声的正弦信号分析, 如图 1 所示, 可以获得无标度区的经验公式。

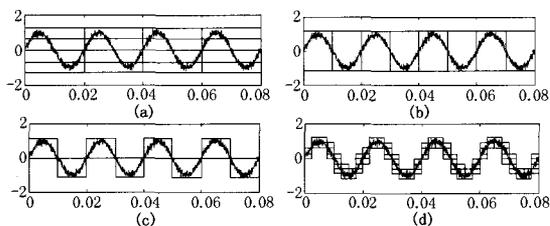


图1 噪声环境下正弦信号的网络覆盖

Fig.1 Gridding for sine wave added by white noise

图 1(a)是 $\Delta_t = T$, $\Delta_h = A/2$ 时 $x(j)$ 的网络覆盖图, 显然, 当网格宽度 $\Delta_h \geq T$ 时, 一个信号周期 $x(j)$ 被误认为充满整个平面的曲线, 同样地, 当 $T/2 < \Delta_t < T$ 时, 通常不能体现信号的周期性。图 1(b)是 $\Delta_t = T/2$, $\Delta_h = 2A$ 时 $x(j)$ 的网络覆盖图, 信号 $x(j)$ 被近似地看成直线, 网格宽度太大, 无法正确反映信号幅值的波动。图 1(c)是 $\Delta_t = T/2$, $\Delta_h = A$ 时 $x(j)$ 的网络覆盖图, 可以粗略地描述信

号 $x(j)$ 的周期性。图 1(d)是 $\Delta_t = T/8$, $\Delta_h = A/4$ 时 $x(j)$ 的网格覆盖图, 可以较好地描述信号 $x(j)$ 的周期性和幅值波动等特征。

从上面分析可以看出, 周期信号 $x(j)$ 的无标度区只可能在网格 $\Delta_t < T/2$ 、 $\Delta_h < A$ 时才能实现。不断缩小网格, 可以进一步了解 $x(j)$ 的细节特征, 对于 PQ 离散采样信号的采样时间间隔为 Δt , 网格宽度小于 Δt 的网格覆盖是没有意义的, 同样地, 网格高度 Δ_h 也不能太小, 低于幅值分辨率的网格覆盖也是没有意义的。两个相邻采样点的幅值差是变换的, 可能很小, 甚至于没有变化, 因此, Δ_h 的确定存在一定困难, 可以通过宽度即时间尺度来最终确定 Δ_h 的最小值, 具体的做法是: 先确定 Δ_t 和 Δ_h 的上限 $T/2$ 和 A , 再等比例缩小 Δ_t 和 Δ_h , 使得 $\Delta_t/(T/2) = \Delta_h/A$, 当 Δ_t 减少到 Δt 时, 相应地 Δ_h 的最小值也就随着确定。

综上所述, 可以推导出周期或准周期信号无标度区的经验公式, 设信号的周期为 T , 电压或电流的幅值为 A , 则矩形网格的宽度和高度必须满足式 (10)、(11)。

$$\Delta t < \Delta_t < T/2 \quad (10)$$

$$\Delta_h = 2A\Delta_t/T \quad (11)$$

2.2 盒维数改进算法的检验

设正弦函数 $x(t) = A \sin(2\pi ft)$, 频率 $f = 50$ Hz, 采样频率为 12.8 kHz, 获得的正弦系列 $x(j)$, 每个工频周期有 256 采样点, 记为 T 。图 2 为网格宽度 $\Delta_t = k\Delta t$, $\Delta_h = kA/(2T) = kA/512$, 当 $k=1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256$ 时, $x(j)$ 的网格计数 $\lg k\Delta \sim \lg N_{k\Delta}$ 点图。

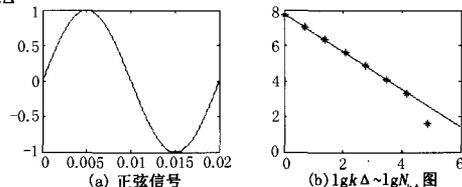


图2 正弦信号 $\lg k\Delta \sim \lg N_{k\Delta}$ 图

Fig. 2 $\lg k\Delta \sim \lg N_{k\Delta}$ distribution of sine wave

观察图 2 可知, 前 7 个点的线性很好, 从第 8 个点开始出现明显偏移, 可以计算网格宽度为 $128\Delta t$, 正好为正弦信号一个周期采样点数的一半, 证明了公式(10)的正确性。直接采用前 7 个点进行直线拟合, 可以计算出正弦曲线的盒维数为

1.0289, 这与简单正弦盒维数理论盒维数 1 接近。

网格宽度下面对正弦信号上叠加 3 次、5 次谐波的情况进行分析, 其中和高度分别取 $\Delta_t = k\Delta t$, $\Delta_h = kA/(T/8) = kA/32$, 其中 $k=1,2,4,8,16,32,64,128$ 。

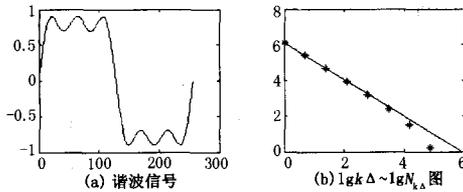


图 3 谐波信号 $\lg k\Delta \sim \lg N_{\Delta s}$ 图

Fig. 3 $\lg k\Delta \sim \lg N_{\Delta s}$ distribution of harmonic

观察图 3 可知, 前 6 个点的线性很好, 从第 7 个点开始出现明显偏移, 可以计算网格的宽度为 $64\Delta_t$, 网格的高度为 $\Delta_h = 2A$, 可以看出, 当网格高度大于信号幅值 A 时, 网格覆盖超出无标度区, 因此公式 (11) 也满足要求。直接采用 6 个点可以计算谐波信号的盒维数为 1.0963, 表明谐波信号比单一的正弦信号具有更高的复杂性。

由上述的检验可知, 经验公式 (10)、(11) 为 PQ 信号的盒维数确定提供了简单可靠的方法, 采样频率越高, 计算出来的盒维数的精度就越高。

3 仿真算例与结果分析

3.1 仿真系统电路图

采用 PSCAD/EMTDC 对文献 [2] 中小系统进行仿真, 如图 4 所示。

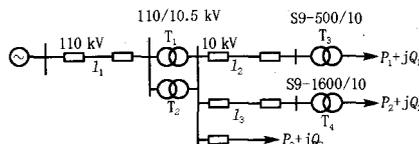


图 4 仿真电路图

Fig. 4 Simulation system

3.2 仿真数据与分析

分别对 I_2 线路上发生三相短路接地故障、 I_2 线路甩负荷、 I_2 线路接电弧炉模型^[2]以及 I_3 线路接全控整流桥在 10 kV 侧产生的电压扰动信号进行分析。上述四种扰动源分别产生典型的电压暂降、电压暂升、电弧炉扰动电压和电压缺口扰动信号。选取 I_2 线路断电后 380 V 电压侧的电压中断波形。基于文献 [19] 对机车谐波分析结果, 选取典型的机车谐波电压扰动。在正常信号上叠加 30 dB 白噪声的扰动信号作为噪声下电压扰动。信号数据长度为 1 280, 原始采样

频率为 12.8 kHz。

PQ 信号的小波分形盒维数计算并没有对 PQ 信号的幅值进行限制, 但为了更好地限制 PQ 信号幅值范围, 以适合于定点运算的处理器环境, 同时模糊各个电压等级 PQ 扰动信号的幅值差异, 有必要对 PQ 信号进行标准化处理。本节只涉及 PQ 扰动中的电压信号标准化处理。为了简化 PQ 信号的标准化的计算过程, 直接将 PQ 采样信号除以正常的额定电压值后所得到的数据系列作为标准化的 PQ 扰动信号。采用本文提出的方法, 计算上述各种 PQ 扰动信号的分形盒维数, 结果如表 1 所示。

表 1 典型 PQ 扰动信号分形盒维数

Tab.1 Fractal box dimension of typical PQ disturbances

PQ	d_t	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5
1	1.077 3	1.042 5	1.042 5	1.293 1	1.040 1	1.039 2
2	1.030 2	1.042 5	1.042 5	1.080 2	1.042 3	1.042 2
3	1.017 3	1.042 5	1.042 5	1.044 9	1.027 2	1.027 2
4	1.015 4	1.034 8	1.063 6	1.034 8	1.063 6	1.034 8
5	1.306 0	1.337 3	1.337 9	1.338 4	1.338 9	1.339 3
6	1.096 1	1.136 6	1.144 7	1.144 7	1.144 7	1.136 6
7	1.158 9	1.209 0	1.213 3	1.219 3	1.229 1	1.218 0
8	1.011 7	1.045 6	1.045 6	1.045 6	1.045 6	1.045 6

表 1 中, 1~8 分别为电压暂降、电压暂升、电压中断、机车谐波、电弧炉电压、电压缺口、噪声下电压、正常电压。

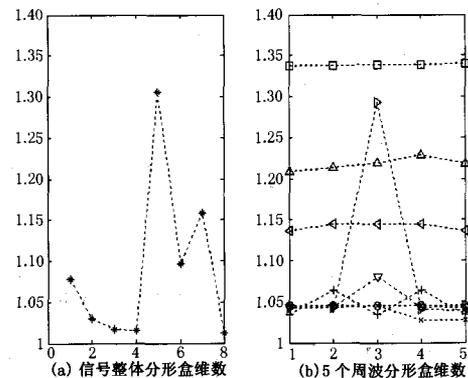


图 5 典型 PQ 扰动信号分形盒维数

Fig. 5 Fractal box dimension of typical PQ disturbances

图 5(a) 是分析整个采样系列所得到的整体分形盒维数, 5(b) 是分析各个周波系列所得到的局部分形盒维数。图 5(a) 中的仿真实验结果表明, 电压短时变动 (电压暂降、电压暂升和电压中断) 的 PQ 扰动信号分形盒维数只存在稍微差别, 数量等级为 10^{-2} , 主要原因在于三种 PQ 信号是事件型^[20]扰动,

是突然发生的 PQ 扰动现象, 表现为电压短时偏离额定值或理想波形。事件过程的时间短, 对整个 PQ 波形的复杂度影响较小; 含有谐波成分的 PQ 信号, 由于谐波成分比基波成分小, 而且对于整个 PQ 信号的影响较小, 其体现出来的分形盒维数仅比正常波形稍微大, 随着谐波次数和能量的增加, 分形盒维数随着增加。电弧炉电压扰动波形复杂程度高, 其体现出来的分形盒维数就大; 电压缺口波形的分形盒维数显然与缺口的深度和振荡幅值密切相关, 其分形盒维数大于电压短时变动事件; 30 dB 噪声环境下的 PQ 信号, 分形盒维数与噪声能量相关, 噪声含量越大, 分形盒维数越大, 噪声含量对分形盒维数的影响较大。机车谐波扰动信号、电压缺口、电压波动以及噪声环境下的 PQ 扰动信号都属于变化型扰动^[20], 是连续出现的 PQ 扰动现象, 其主要特征是电压的幅值、频率在事件尺度上连续发生小的变化。从 PQ 扰动信号的分形盒维数计算结果可以看出, 整体分形盒维数对变化型 PQ 扰动信号敏感, 能作为表征该类扰动信号的特征量。

图 5(b) 中的仿真实验结果表明, 各个周波分形盒维数的波动程度可以作为区分各种事件型 PQ 信号的判据。电压暂降、电压暂升、电压中断的波形暂态过程直接体现为其所在的周波分形盒维数增加, 但电压暂降比电压暂升和电压中断明显, 电压中断在暂态过程后的分形盒维数趋近于 1, 小于正常波形。在变化型 PQ 扰动识别中, 机车谐波扰动信号的分形盒维数小, 但波动程度较大, 噪声环境下的 PQ 扰动, 各个周波的分形盒维数有小幅度的波动, 明显比电弧炉扰动电压和电压缺口的波动幅度大。因此, 各个周波的分形盒维数的波动程度可以作为识别各种典型扰动信号的特征量。

4 结论

PQ 扰动信号分析中, 矩形代替正方形, 双尺度分形盒维数计算能更好地描述坐标轴的物理差异。基于 PQ 扰动信号的周期性或准周期性, 推导的 PQ 扰动信号的无标度区经验公式, 与其他无标度区确定方法相比, 计算简单、有效。通过 PSCAD/EMTDC 仿真典型的 PQ 扰动信号, 其盒维数的统计特性可以简单地辨别这些扰动。对于大量的 PQ 扰动信号分类, 可以把分形盒维数的整体分形盒维数以及各个周波的分形维波动作为扰动识别系统, 特别是人工神经网络识别系统的输入特征量。

参考文献

[1] 肖湘宁, 徐永海. 电能质量问题剖析[J]. 电网技术,

2001, 25(3): 66-69.

XIAO Xiang-ning, XU Yong-hai. Power Quality Analysis and Its Development[J]. Power System Technology, 2001, 25(3): 66-69.

[2] 王晶, 束洪春, 陈学允. 动态电能质量的分形指数小波分析方法 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(5): 40-45.

WANG Jing, SHU Hong-chun, CHEN Xue-yun. Fractal Exponent Wavelet Analysis of Dynamic Power Quality[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(5): 40-45.

[3] 文继锋, 刘沛. 一种电能质量扰动检测的新方法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(12):17-20.

WEN Ji-feng, LIU Pei. A New Method for Detection of Power Quality Disturbances[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(12):17-20.

[4] 刘应梅, 白晓民, 张红斌, 等. 基于动态测度的电能质量扰动检测 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10):57-62.

LIU Ying-mei, BAI Xiao-min, ZHANG Hong-bin, et al. The Detection of Power Quality Disturbance Based on Dynamics[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10):57-62.

[5] 李庚银, 罗艳, 周明, 等. 基于数学形态学和网格分形的电能质量扰动检测及定位[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(3):25-30.

LI Geng-yin, LUO Yan, ZHOU Ming, et al. Power Quality Disturbance Detection and Location Based on Mathematical Morphology and Grille Fractal[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(3):25-30.

[6] 潘洪湘, 宗伟, 刘连光. 基于数字信号处理器的短时电能质量扰动检测算法 [J]. 电网技术, 2004, 28(20):68-71.

PAN Hong-xiang, ZONG Wei, LIU Lian-guang. A Digital Signal Processor Based Algorithm to Detect Short-term Power Quality Disturbance[J]. Power System Technology, 2004, 28(20):68-71.

[7] 崔学深, 张建华, 肖刚. DSP 技术在电力系统中的应用和硬件实现方法[J]. 现代电力, 2002, 19(2): 36-42.

CUI Xue-shen, ZHANG Jian-hua, XIAO Gang. Application of DSP Technique to Power System and Its Hardware Implementation[J]. Modern Electric Power, 2002, 19(2): 36-42.

[8] 李水根. 分形[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004. 1-5. LI Shui-gen. Fractal[M]. Beijing: Higher Education Press, 2004.1-5.

[9] 王东升, 汤鸿霄, 栾兆坤. 分形理论及其研究方法 [J]. 环境科学学报, 2001, 21: 10-16.

WANG Dong-sheng, TANG Hong-xiao, LUAN Zhao-kun. A Brief Introduction to the Fractal Theory and Methodology[J]. Acta Scientiae Circumstance, 2001, 21: 10-16.

[10] 樊福梅, 梁平, 吴庚申. 基于分形盒维数的汽轮机转子振动故障诊断的实验研究[J]. 核动力工业, 2006, 27(1):85-89.

- FAN Fu-mei, LIANG Ping, WU Geng-shen. Experimental Research on Steam-turbine Rotor Variation Fault Diagnosis Based on Fractal Box Counting Dimension[J]. Nuclear Power Engineering, 2006, 27(1):85-89.
- [11] 孙玉英, 金成德, 张洪彬. 分形理论及分形维数的应用[J]. 林业科技情报, 2005, 37(4): 8-9.
- SUN Yu-ying, JIN Cheng-de, ZHANG Hong-bin. Fractal Theory and Application of Fractal Dimension[J]. Forest Technology Information, 2005, 37(4): 8-9.
- [12] 赵树魁, 周景新, 黄楠. 分形维数在机械故障诊断中的具体应用[J]. 东北电力学院学报, 2005, 25(6):68-72.
- ZHAO Shu-kui, ZHOU Jing-xin, HUANG Nan. Application of Fractal Dimension in Engine Fault Diagnosis[J]. Journal of Northeast China Institute of Electric Power Engineering, 2005, 25(6):68-72.
- [13] 于子凡, 杜君君, 林宗坚. 图象盒子维数特征计算方法改进[J]. 测绘科学, 2006, 31(1):87-89.
- YU Zi-fan, DU Gui-jun, LIN Zong-jian. An Improved Algorithm of Box Counting for Digital Image[J]. Science of Surveying and Mapping, 2006, 31(1):87-89.
- [14] 瞿艳阳, 何正嘉, 张周锁. 小波分形技术及其在非平稳故障诊断中的应用[J]. 西安交通大学学报, 2000, 34(9):83-87.
- ZI Yan-yang, HE Zheng-jia, ZHANG Zhou-suo. Wavelet Fractal Technology and Its Application to Nonstationary Fault Diagnosis[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2000, 34(9):83-87.
- [15] 谢和平, 张永平, 宋晓秋. 分形几何-数学基础与应用[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1991.189-196.
- XIE He-ping, ZHANG Yong-ping, SONG Xiao-qiu. Fractal Geometry Mathematics Elements and Application[M]. Chongqing: Chongqing University Press 1991.189-196.
- [16] 李厚强, 汪富泉. 分形理论及其在分子科学中的应用[J]. 北京: 科学出版社, 1993.179-184.
- LI Hou-qiang, WANG Fu-quan. Fractal Theory and Its Application in Molecule Analysis[J]. Beijing: Science Press, 1993.179-184.
- [17] 费斌, 蒋庄德, 王海容. 基于遗传算法求解分形无标度区的方法[J]. 西安交通大学学报, 1998, 32(7): 72-75.84.
- FEI Bing, JIANG Zhuang-de, WANG Hai-rong. Genetic Algorithm for Scale Independent Fractals Associated with Grinding Surface [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1998, 32(7): 72-75.84.
- [18] 瞿艳阳. 基于非平稳信号特征提取原理的实用诊断技术研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2000.
- ZI Yan-yang. Research on Practical Diagnosis Techniques Based on Principle of Nonstationary Signal Feature Extraction[D]. Xi'an, Xi'an Jiaotong University, 2000.
- [19] 赵娟, 李建华, 黄永宁. 基于 MATLAB/SIMULINK 的 SS_{3B} 型电力机车仿真模型 [J]. 机车电传动, 2002, (5): 25-27.42.
- ZHAO Juan, LI Jian-hua, HUANG Yong-ning. Simulation Model of SS_{3B} Electric Locomotive Based on MATLAB/SIMULINK[J]. Electric Drive for Locomotives, 2002, (5): 25-27.42.
- [20] 肖湘宁. 电能质量分析与控制 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- XIAO Xiang-ning. Analysis and Control of Power Quality[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.

收稿日期: 2006-09-22; 修回日期: 2006-12-19

作者简介:

杨耿煌(1978-), 男, 在读博士, 研究方向为电能质量扰动检测与分析; E-mail: ygenghuang@yahoo.com.cn

张泽卉(1985-), 男, 本科, 主要从事电力系统自动装置的研发;

蔡剑雄(1978-), 男, 本科, 主要从事变电站监测工作。

(上接第 54 页 continued from page 54)

- WANG Zhu-ding, YANG Xiu-tai. Optimal Var Compensation with Shunt Capacitors in Radial Distribution Network[J]. Electric Power, 1987, 11: 26-30.
- [11] 刘健, 阎昆, 程红丽. 树状配电线路并联电容器无功优化规划[J]. 电网技术, 2006, 30(18):81-84.
- LIU Jian, YAN Kun, CHENG Hong-li. Optimal Planning of Shunt Capacitors Based Reactive Power Compensation for Arborescent Distribution Feeders[J]. Power System Technology, 2006, 30(18):81-84.
- [12] 陈珩. 电力系统稳态分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.
- CHEN Heng. Power System Steady Analysis[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2000.
- [13] 微软公司. 开发 Microsoft Visio 解决方案[M]. 北京: 北京大学出版社, 2002.
- Microsoft Corporation. Developing Microsoft Visio Solutions[M]. Beijing: Beijing University Press, 2002.

收稿日期: 2006-03-21; 修回日期: 2007-01-04

作者简介:

章健(1963-), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为电力负荷特性辨识、电力系统分析与运行; E-mail: zdzhangj@tom.com

华红艳(1963-), 女, 教授, 主要从事电力系统运行与分析方向的研究;

张洪波(1982-), 女, 硕士, 主要从事电力仿真培训系统的开发。