

一种基于重排二次型时频分布的电能质量检测新方法

王丽霞, 何正友, 赵 静

(西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘 要: 电能质量扰动信号是一种典型的非平稳信号, 采用二次型时频分布能够获得其时间频率联合特性。提出一种基于重排二次型时频分布的电能质量检测新方法, 首先采用瞬时无功功率理论和广义形态滤波器将电能质量信号的基波成分和扰动成分分离, 再利用重排二次型时频分布对扰动分量进行分析, 从而获得时频聚集型更好的扰动分量的时频联合分布, 直观地表达出扰动信号的时频特性。仿真算例验证了此方法对各种常见电能质量扰动和交叉电能质量扰动的检测和特征提取是有效的。

关键词: 电能质量; 瞬时无功功率; 广义形态滤波; 二次型时频分布; 重排

Abstract: Bilinear time-frequency analysis is a useful character description to study non-static signal such as power quality disturbance. A new method based on rearranged bilinear time-frequency distribution is introduced for power quality disturbance detection. Firstly, the fundamental component and the disturbance are separated using instantaneous reactive power theory and generalized morphological filter, and then the disturbance is analyzed with rearranged bilinear time-frequency distribution accordingly for better time-frequency concentration. Simulation results of common power quality disturbances and crossed power quality disturbances have proven the effectiveness of the proposed method.

Key words: power quality; instantaneous reactive power; generalized morphological filter; bilinear time-frequency distribution; rearrangement

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1003-6954(2009)04-0005-06

0 引 言

电能作为一种高效、清洁、可控的能源, 已经得到最广泛的应用。但随着科技的发展, 电力系统中电负荷类型的改变和非线性负载的使用使得波形畸变、电能质量下降; 而带有基于微处理机的控制器和功率电子器件的现代用电设备的使用, 又提高了对电能质量的要求。因此, 电能质量的研究成为一个热点问题。

电能质量问题主要包括谐波畸变问题和电力系统发生故障及投切操作时所伴随的暂态现象, 如电压瞬变、冲击和中断等^[1]。其中稳态谐波问题可由快速傅立叶变换及其改进算法、最小二乘估计、卡尔曼滤波、时间序列分析及神经网络等来解决^[2]。但对于时变谐波和暂态现象等非平稳信号, 需要有一个时间和频率的联合分布来描述其局部特性。对于信号的时频联合分布, 目前提出的方法有短时傅立叶变换、小波分析等等。但是短时傅氏变换只能在窗函数

的有效持续时间内信号是平稳的前提下, 粗略地反映信号在该时刻附近的局部频谱特征, 而这个局部平稳性条件通常无法满足或只是近似满足^[3]。由于缺乏能量集中的小波基, 小波变换事实上只是时间-尺度的联合分布, 只能获得信号在某一个频段上的系数, 难以对时变谐波作出精确的分析^[4,5]。Wigner-Vill分布(WVD)通过自相关函数将信号的时间和频率联合起来, 成为真正意义上的时间-频率联合函数。相对于其他时频分析方法而言, Wigner-Vill分布不仅简洁、有效, 而且具有较高的分辨率, 能量集中性和跟踪瞬时频率的能力, 可以更清晰表征信号在时频域内的变化。但是, Wigner-Vill分布存在一个缺陷就是交叉项的存在, 限制了 Wigner-Vill分布的使用, 因此也产生了许多改进算法^[6]。重排二次型时频分布就是在 Wigner-Vill分布的基础上进行改进, 通过增加核函数和进行分布系数重排来进一步抑制交叉项和提高时频分辨率。

这里针对电能质量扰动信号的特点, 提出使用瞬时无功功率分解, 广义形态滤波和重排二次型时频分布相结合的方法。通过对基波成分的剔除和对二次

基金项目: 国家自然科学基金项目(50407009); 四川省杰出青年基金项目(06ZQ026-012); 教育部优秀新世纪人才支持计划项目(NCET-06-0799)

时频分布的重排进一步抑制交叉项,提高时频分析的精度。该方法能够更精确地对多分量谐波和各种暂态扰动以及交叉扰动做出分析。

1 基本原理

1.1 基于瞬时无功功率理论和广义形态滤波的基波分量提取

H. Akagi等提出了 $\alpha \beta 0$ 坐标系下的瞬时无功功率和瞬时无功电流的概念^[7]。该方法应用于提取基波的基本思路是先对信号进行 $\alpha \beta$ 变换和 dq 变换,信号中的基频分量被转换为直流分量,而谐波分量转换为频率 $f_k = f_k - f_s$ 的量(其中: f_k 为变换前的谐波频率 f_s 为系统频率, $\alpha \beta$ 变换和 dq 变换的表达式分别为

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \\ u_0 \end{bmatrix} = C_{23} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\omega t & -\cos\omega t \\ -\cos\omega t & -\sin\omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} \quad (1)$$

得到信号 u_α 和 u_β 后,对其进行低通滤波,滤波的目的是将非直流分量滤去,仅保留直流分量。然后对信号进行 dq 反变换和 $\alpha \beta$ 反变换,即可获得信号的基波分量。基于无功功率分解最初是对三相系统进行变换,但是对于单相的信号,可以通过人为的将采样信号向后移动 120° 和 240° 来构造一个虚拟的三相系统,再对其进行变换。

信号的无功功率分解将信号的基波成分和扰动成分分为直流成分和振动成分。降低了信号的滤波难度,因此只需设计一个能够将直流成分和其它成分分离的低通滤波器即可。这里可以采用广义形态滤波器,广义形态滤波器对直流信号的滤波去噪效果很好,并且只有加减和取最大最小值的运算,相对于其它方法有计算简单对硬件要求低的优点^[8]。

通常使用的形态滤波器,都是以形态开一闭、形态闭一开运算的组合形式出现^[8]。为避免统计偏倚现象,可以采用开运算和闭运算为不同结构元素的广义形态滤波器^[10]。这里采用广义开一闭(GOC)与广义闭一开(GCO)运算的算数平均来构造滤波器。两者分别定义为

$$GOC(f(n)) = (f \circ g_1 \cdot g_2)(n) \quad (2)$$

$$GCO(f(n)) = (f \cdot g_1 \circ g_2)(n) \quad (3)$$

若要把基波分量以外的分量除去,结构元素的长度就必须大于其他分量进行无功功率分解后的信号半个周期的长度^[11]。因此若信号的采样点是 5 000 Hz 即每周 100 点, g_1 和 g_2 长度就可以选取为 50 和 60 点。由于这里需要保留的信号为直流成分,因此结构元素的形状取扁平结构元素即可。

1.2 重排二次型时频分布理论

Wigner分布通过信号的相关函数将时间和频率联系起来,获得了真正意义上的时频联合分布函数^[6,12]。Wigner分布的定义如下。

信号 $x(t)$ 的自 Wigner 分布定义为

$$W_{xx} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t+\tau/2) x^*(t-\tau/2) e^{-j\Omega\tau} d\tau \quad (4)$$

因为信号在 Wigner 分布的公式中出现过两次,因此此类分布被称之为双线性时频分布,二次型时频分布或是非线性时频分布。Wigner 分布给出了构造时间频率联合分布的方法,但是在信号分析的领域,为了避免负频率的出现,在进行时频变换前需要先将实信号通过 Hilbert 变换成为解析信号。其定义如下。

设 $x(t)$ 为实信号,则其解析信号为

$$z(t) = x(t) + j\hat{x}(t) \quad (5)$$

其中 $\hat{x}(t)$ 为信号 $x(t)$ 的 Hilbert 变换,定义为

$$\hat{x}(t) = H[x(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t-\tau} d\tau \quad (6)$$

WVD 具有许多优良的性质,因此才能在信号分析中得到应用。这些性质包括实值性,时、频边缘特性,能量边缘特性及有限支撑特性。但是由于 WVD 是非线性的,因此存在着交叉项的问题,采用合适的核函数可以有效的抑制核函数。Cohen 给出了所有二次型时频分布的统一形式。

$$C_{xx}(t, \Omega; g) = \frac{1}{2\pi} \iint_{-\infty}^{\infty} \hat{r}(t) e^{-j\Omega(\tau+\tau')} g(\Omega, \tau) d\Omega d\tau d\tau' \quad (7)$$

其中 $\hat{r} = x(t+\tau/2) x^*(t-\tau/2)$ 为信号的自相关函数。 $g(\Omega, \tau)$ 称为核函数,作用为对模糊域进行滤波。选择不同的核函数,就得到不同类型的分布。不定原理的约束限制了时频分辨率的提高,核函数的选择有时也难以在时域和频域上都较好的抑制交叉项而保留自项,但是对二次时频分布的系数处理可以进一步提高分辨率和抑制交叉项,其中的一个方法就是重排。

Cohen 时频分析可视为一个核函数和信号 Wigner

er-V ill分布的二维卷积。即在点 (t f)附近区域的一个加权平均。重排的关键在于这些值不必以 (t f)为时频的几何中心对称分布,因此加权平均不应位于点 (t f)而是位于时频域的重心,更能表现信号的局部能量^[13]。

$$C_x(t f \Pi) = \iint_{-\infty}^{\infty} \iint_{-\infty}^{\infty} \Pi(t-s f-s) W_x(s \xi) ds d\xi \quad (7)$$

经过推导 Cohen的时频分布可以化为上式的形式,其中 $W_x(S \xi)$ 代表信号的 Wigner-V ill分布, $\Pi(t-s f-s)$ 为核函数。重排二次型时频分布的第一步就是先对信号进行二次型时频分布计算,然后在计算时频分布的重心, Cohen类时频分布的时频重心计算公式如下。

$$\begin{aligned} \hat{t} &= \frac{\iint_{-\infty}^{\infty} \iint_{-\infty}^{\infty} s \Pi(t-s f-s) W_x(s \xi) ds d\xi}{\iint_{-\infty}^{\infty} \iint_{-\infty}^{\infty} \Pi(t-s f-s) W_x(s \xi) ds d\xi} \\ \hat{f} &= \frac{\iint_{-\infty}^{\infty} \iint_{-\infty}^{\infty} \xi \Pi(t-s f-s) W_x(s \xi) ds d\xi}{\iint_{-\infty}^{\infty} \iint_{-\infty}^{\infty} \Pi(t-s f-s) W_x(s \xi) ds d\xi} \end{aligned} \quad (8)$$

\hat{t} 和 \hat{f} 分别为转移到的时间和频率的中心。重排后的每一点时频分布系数等于所有转移到这一点时频分布系数的叠加。计算的公式如下。

$$C_x(\hat{t} \hat{f} \Pi) = \iint_{-\infty}^{\infty} \iint_{-\infty}^{\infty} C_x(t f \Pi) \delta(t-\hat{t}) \delta(f-\hat{f}) dt df \quad (9)$$

2 算法设计

电能质量扰动信号多可以视为扰动信号和标准工频信号的叠加,由于二次时频分布的非线性,两者之间会存在很大的交叉项,并且对于扰动分量能量较小的信号,很难选择合适的核函数使得在抑制交叉项的同时较好的保留扰动分量的自项,易造成误测和扰动湮没的现象。因此,为了更好地减小交叉项出现的可能,更方便准确地检测出扰动分量,故提出一种基于重排二次型时频分布的电能质量检测算法,其计算步骤可分为以下三步。

(1)基波提取:把采集到的待分析的单相信息向后移动 $1/3$ 和 $2/3$ 个周波作为 b相和 c相,虚构出三相电压。然后将构造的三相电压信号按式(1)进行 $\alpha \beta$

变换和 d q变换,此时信号的基波成分变成 d q坐标下的直流分量,因此对 u_d 和 u_q 进行低通滤波,滤波器采用广义形态开闭运算和闭开运算的算数平均,具体的计算如式(2)和式(3)。然后将滤波后的 u_d 和 u_q 进行 d q反变换和 $\alpha \beta$ 反变换就得到了信号的基波成分。用原信号减去提取到的基波成分即得到了扰动波形。

(2)扰动信号的二次型时频分布:将提取到的扰动信号进行 H ibert变换使之成为解析信号,再按照式(7)进行二次型时频变换。这里采取的变换方式为平滑伪 WVD,这种分布通过在时域和频域上加窗能对交叉项进行较好的抑制。

(3)时频分布结果的重排:为了进一步提高分辨率和抑制交叉项,对平滑伪 WVD分布的结果进行重排。重排的计算过程如式(8)和(10)所示。

信号处理的流程如图 1所示。

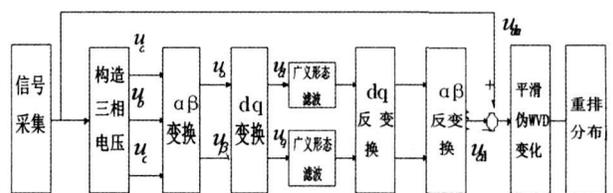


图 1 算法示意图

3 仿真结果与分析

3.1 算法的特性分析

以谐波扰动为例,分析其设计的算法所具有的优势和特性。

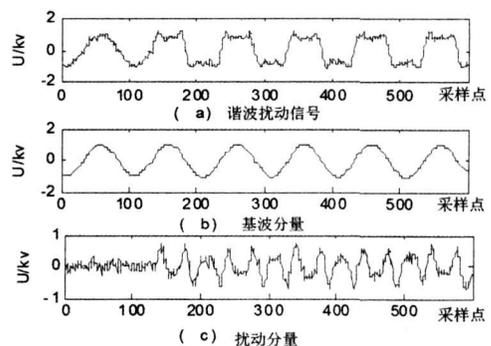


图 2 谐波扰动信号的提取

本算例采用的电能质量扰动信号为一预设的谐波扰动信号(如图 2(a)),其中基波的幅值为 1 kV,信号从 133点开始加入三次和五次谐波,谐波分量幅值分别为 0.4和 0.2并且添加了方差为 0.1的高斯白噪声。图 2(b)和(c)为采用无功功率分解和广义

滤波器所提取的基波分量和谐波分量,可以看出此算法可以较好的将信号的基波成分和扰动成分分离。将信号的基波和扰动分离的目的是为了避免在进行二次型时频变换时,基波和扰动成分之间出现的交叉项影响分析效果。为了获得扰动分量的时频信息,对扰动分量进行平滑伪 WVD 及重排。

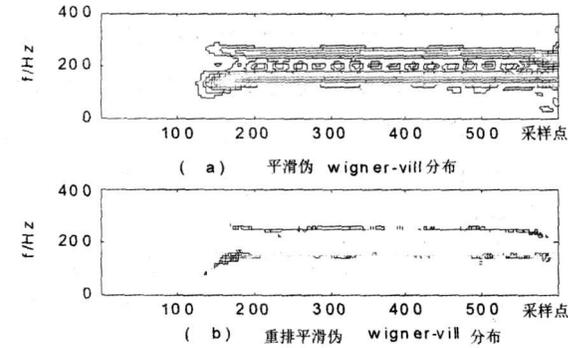


图 3 扰动分量的二次型时频变换

图 3(a)为谐波扰动信号的平滑伪 Wigner-Vill 分布,横轴表示时间,纵轴表示频率,颜色反映此点分布系数的大小,也一定程度上反映信号在此点附近的能量。从图中可以直观的读出扰动信号的能量主要积聚在 150 Hz 和 250 Hz 附近,并可以读得信号的扰动分量是从 100 点到 150 点之间开始出现的,因此可以获得大致的扰动起至时刻。但是,从图 3(a)中可以看到,分布结果的时频分辨率不是很高,并且在两个扰动分量之间,还存在着一些振荡的交叉项。图 3(b)为重排后的平滑伪 WVD,从图中可以明显的看到,系数更加集中的分布在 150 Hz 和 250 Hz 附近,说明通过重排确实能够进一步的提高时频分辨率。并且,两个扰动分量之间的交叉项基本消失,说明重排可以更好的抑制交叉项。以上两图的对比表明,重排平滑伪 WVD 比平滑伪 WVD 能更准确的反应信号的时间和频率特征。

为了进一步考察重排平滑伪 WVD 的特性,参考边缘特性的计算,对平滑伪 WVD 分布系数矩阵和重排后的分布系数矩阵进行频率特性提取。二次型时频分布获得的都是一个 $N \times M$ 的矩阵 (N 为数据采样点数, M 代表信号的归一化频率从 0 到 0.5 离散为多少份)。由于平滑窗和能量重排的影响,信号的平滑伪 Wigner-Vill 分布和重排平滑伪 Wigner-Vill 分布很可能丧失了边缘特性,但是既然分布的结果是反映信号的时频特性,仍可以参考频率边缘特性的定义通过对矩阵的运算来检测扰动信号的频率成分。具体的计算如式 (10) 所示。

$$|s(f_h)|^2 = \sum_{n=1}^N C_x(n, f_h) \quad h = 1, 2, \dots, M \quad (10)$$

按上式计算算例的频率成分。

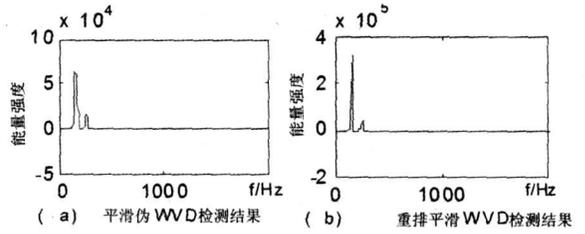


图 4 扰动分量的频率检测

观察图 4 的频率检测结果,两种分布都出现了两个尖峰,说明扰动的谐波成分有两个,从计算结果中寻找两个极大值出现的位置,分别都对应着频率 150 Hz 和 250 Hz。但是,重排后的平滑伪 WVD 频率检测脉冲明显比未重排的窄,说明重排确实使得能量更加集中,获得了更高的频率分辨率。同时,以上的统计也可以作为获得信号的频率成分的一个方法。

以上的分析说明,所设计的方法能够有效的分离基波和扰动,直观的反映扰动信号的时频特征。与直接对信号进行二次型时频分布比较,能够更有效避免和抑制交叉项的出现,并进一步的提高分辨率。实现算法设计的目标。下面采用此方法对其它类型的电能质量扰动和交叉电能质量扰动算例进行仿真,进一步证明此方法的可行性。

3.2 其他类型电能质量扰动信号的仿真结果

电能质量扰动的另一种类型是电压的暂变,包括电压的暂降、暂升和中断。除了电压完全中断为 0,此类扰动的信号频率并未发生变化,因此理想的时频分析中不应该出现基频以外的频率成分,但是由于该算法是通过将信号的数据点移动来虚构三相的信号,也就意味着三相的电压变动不出现在相同时刻,因此在电压暂变时刻后的 $2/3$ 周期内会出现一些系数。以最常出现的电压暂降为例进行计算。

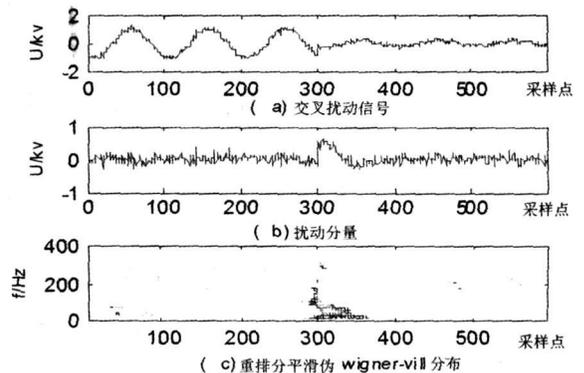


图 5 电压暂降及其分析结果

此算例为一电压暂降信号,在 300 点时,电能质量信号发生暂降,暂降为 0.2 pu 同时信号中加入了高斯白噪声。图 5(c)给出了扰动信号的重排平滑伪 Wigner-Vill 分布,从图中可以看出从 300 点以后,信号出现了一些在基频周围的分量。

除了单一的电能质量扰动以外,还时常会出现一些扰动出现时刻重叠的交叉扰动。如电压暂变的同时往往伴随着一些暂态,这些暂态往往频率比较高,出现时间较短。以下这个算例就是在电压中断时刻同时出现暂态振荡的电压扰动信号。

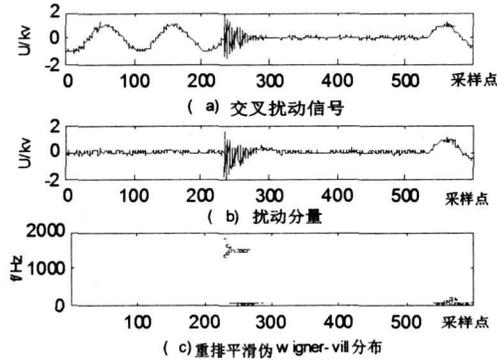


图 6 交叉扰动及其分析结果

信号在 234 点时发生了电压中断并伴随着一个暂态振荡。振荡为频率 1 500 Hz 的常数调频高斯调幅振荡,振荡的最大幅值为 2 pu 持续的时间为 40 个采样点。由图 6(c)为扰动分量的时频表示,由图中可以看到扰动存在于扰动发生的起止点,并可以观察到在扰动发生的开始时刻,不仅存在一个基频附近的分量,还存在一个以 1 500 Hz 频率为中心的分量。因此文中所述的方法,不但能够检测出暂态扰动,还能够将各类型的扰动分离,直观的给出各种扰动的时频信息。

为了证明此算法能够应用于实测信号的分析,以下算例选取的原始信号是来自于一组牵引供电系统的一组实测信号。实测算例 1 见图 7。

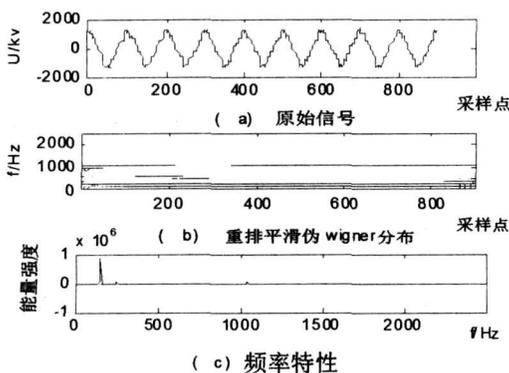


图 7 实测算例 1

本算例数据的采样频率为 5 000 Hz 长度为 900 点。从分析的结果来看,明显为发生谐波扰动的信号,谐波的成分主要为 3 次 5 次和 21 次,其中 3 次和 5 次谐波贯穿于整个信号,21 次谐波有中断,期间还存在一些其它分量的谐波。按照式 (10) 进行频率特性计算,检测到三个比较明显的极大值,分别对应着 150 Hz 250 Hz 和 1 050 Hz 其中以三次谐波的能量最大。

4 结 论

前面介绍了一种基于重排二次型时频分布的电能质量检测的新方法。先利用无功功率分解和广义形态滤波,将电能质量扰动信号的基频成分从信号中分离,然后使用重排二次型时频分布对扰动分量进行变换,从而得到扰动的时频联合分布,获得扰动的时频信息。通过预设信号和实测数据的仿真证明了此种方法能有效防止交叉项的出现,获得更好的时频聚集性,对电能质量的扰动检测是直观和有效的。如何从分布矩阵中进一步提取数字特征,结合人工智能的方式进行分类识别是下一步的研究工作。

参考文献

- [1] 林海雪. 现代电能质量的基本问题 [J]. 电网技术, 2001, 25(10): 5-10.
- [2] 王兆安、杨军、刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿 [M]. 北京:机械工业出版社. 1998.
- [3] Wright P S Short-time fourier transforms and wigner-vill distributions applied to the calibration of power frequency harmonic analyzers [J]. IEEE Trans on Instrumentation and Measurement 1999, 48(2): 475-478.
- [4] Keaochantranond T. Boonseng C. Harmonics and interharmonics estimation using wavelet transform [C]. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition (Cat No 02CH37377), Yokohama Japan, 2002; 775-777.
- [5] 周厚奎, 张昱, 金心宇. 基于傅立叶和小波变换的电网谐波分析 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17(6): 59-99.
- [6] 胡广书. 现代信号处理教程 [M]. 北京, 清华大学出版社, 2006.
- [7] Angrisani L, Daponte P, D'Apuzzo M, et al. A measurement method based on the wavelet transform for power quality analysis [J]. IEEE Trans Power Delivery 1998, 13(4): 990

—997.

[8] 岳蔚,刘沛. 基于数学形态学消噪的电能质量扰动检测方法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(7): 13—17.

[9] 崔屹. 图象处理与分析——数学形态学方法及应用[M]. 北京, 科学出版社, 2002.

[10] 赵春晖. 数字形态滤波器理论及其算法研究[D]. 哈尔滨工业大学, 1998.

[11] 曾纪勇. 基于数学形态学的电能质量检测方法及应用[D]. 华中科技大学, 2006.

[12] 王宏禹. 非平稳随机信号分析与处理[M]. 北京, 国防工业出版社, 1999.

[13] 葛哲学,陈仲生. Matlab时频分析技术及其应用[M]. 北京, 人民邮电出版社, 2006.

作者简介:

王丽霞(1985—),女,山西,硕士研究生,研究方向为数字信号处理及信息理论在电力系统中的应用;

何正友(1970—),男,教授,四川,博士生导师,主要从事现代信息论在电力系统故障分析中的应用、配电网综合自动化等方面的研究工作;

赵静(1982—),女,四川,博士研究生,研究方向为数字信号处理及信息理论在电力系统中的应用。

(收稿日期: 2009—05—10)

(上接第 4 页)

表达,综合考虑了两方面的不确定性,提出了一种更符合实际的综合不确定性评估方法。对个人计算机的仿真结果证明了提出的评估模型及算法的合理性和准确性。

参考文献

[1] IEEE Std 1159—1995. IEEE Recommended Practice on Monitoring Electric Power Quality

[2] 程浩忠. 电能质量概论[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.

[3] 王克星,宋政湘,陈德桂,王建华,耿英三. 基于小波变换的配电网电压暂降的干扰源辨识[J]. 中国电机工程学报, 2003. 6.

[4] M. H. J. Bollen. Reliability Analysis of Industrial Power Systems Taking into Account Voltage Sags [J]. Industry Applications Society Annual Meeting 1993., Conference Record of the 1993 IEEE 2—8 Oct 1993 Page(s): 1461—1468 vol 2.

[5] Lee G J, Abu M M, Heydt G T. A power quality index based on equipment sensitivity, cost and network vulnerability[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19(3): 1504—1510.

[6] Martinez J A, Martin A J. Voltage sag studies in distribution networks— part II: voltage sag assessment [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(3): 1679—1688.

[7] Gupta B, Milanovic J V. Probabilistic assessment of equipment trips due to voltage sags [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(2): 711—718.

[8] Milanovic J V, Gupta C P. Probabilistic assessment of financial losses caused by interruptions and voltage sags part I— the methodology [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(2): 918—924.

[9] Milanovic J V, Gupta C P. Probabilistic assessment of financial losses due to interruptions and voltage sags— part II: practical implementation [J]. IEEE Trans on Power De-

livery, 2006, 21(2): 935—932.

[10] 肖先勇,王希宝,薛丽丽,刘波,杨洪耕. 敏感负荷电压凹陷敏感度的随机估计方法[J]. 电网技术, 2007, 31(22): 30—33.

[11] 沈正杰. 敏感性设备受电压骤降影响评估[C]. 中国台湾: 中国台湾国立中山大学博士学位论文, 2007.

[12] T. A. Short 著, 徐政译. 配电可靠性与电能质量[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.

[13] Milanovic J V, Aung M T, Gupta C P. The influence of fault distribution on stochastic prediction of voltage sags [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(1): 278—285.

[14] 董玉革. 随机变量和模糊变量组合时的模糊可靠性设计[J]. 机械工程学报, 2000, 36(6): 25—29.

[15] 杨纶标,高英仪. 模糊数学原理及应用[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2006.

[16] 李安贵,张志宏. 模糊数学及其应用[M]. 第二版. 北京, 冶金工业出版社, 2006.

[17] C. H. Park and G. Jang. Stochastic Estimation of Voltage Sags in a Large Meshed Network [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2007, 22(3): 1655—1664.

[18] M. H. J. Bollen. Understanding Power Quality Problems, Voltage Sags and Interruptions [M]. ser Power Engineering Piscataway, NJ: IEEE Press, 2000.

[19] 李娟娟. 电网电压骤降的分析评估及其抑制措施[D]. 福州: 福州大学, 2005.

[20] C. H. Park, G. Jang and R. J. Thomas. The Influence of Generator Scheduling and Time-Varying Fault Rates on Voltage Sag Prediction [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2008, 23(2): 1243—1250.

作者简介:

王华伟(1981—),男,硕士研究生,研究方向:电压稳定及电压无功控制;

李华强(1965—),男,博士,教授,长期从事电压稳定及优化问题研究。

(收稿日期: 2009—04—11)