

平滑伪 Wigner - Ville分布在电力系统谐波和电压变动检测中的应用

乐叶青, 徐政

(浙江大学电机系, 浙江 杭州 310027)

摘要: 在分析比较了现有用于短时电能质量扰动信号检测的方法的基础上, 提出使用平滑伪 Wigner - Ville分布 (SPWVD)对电能质量信号进行检测和时频分析的新方法。平滑伪 Wigner - Ville (SPWVD)分布是一种优良的时频分析方法, 能够在时域频域上对平稳谐波信号及非平稳信号进行联合时频分析。仿真表明, 该方法能够较有效地检测出突变、非平稳扰动的短时电压波动, 谐波和间谐波等电能质量信号的起止时间、频率信息。

关键词: 电能质量; 短时电压变动; 电力系统谐波; 间谐波; 时频分析; Wigner-Ville分布 (WVD); 平滑伪 Wigner-Ville分布 (SPWVD)

中图分类号: TM711 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)16-0039-05

0 引言

随着电力系统的发展, 大型电力变压器、电力电子设备、各种自动化设备及其他一些非线性负荷的大量使用已造成了电能质量方面的一些问题, 电压波形畸变的程度越来越严重, 谐波已成为电网的一大公害^[1]。而另一方面, 各种精密的、对电能质量敏感的用电设备的不断普及, 它们对电能质量的要求也越来越高^[2], 对电能质量治理也因此具有明显的社会效益。传统的傅里叶变换由于受到不确定原理(测不准原理)的限制, 不能同时得到较高的时域和频域的分辨率, 不能满足突变的和时变的非平稳的电能质量信号的检测与时频分析的需要。对应于一定的时刻, 假设信号在窗函数的有效持续时间内应是平稳的, 短时傅氏变换 (STFT)就能够粗略地反映信号在该时刻附近的局部频谱特征; 但这个局部平稳性条件通常无法满足或只是近似满足^[3]。小波/小波包算法虽能在小波域上检测出信号的时间、频率, 并有较好的检测效果; 然而要提高小波变换检测谐波的精度必须构造分频严格、能量集中的小波基^[4]。文献[5]提出应用 HHT(Hilbert - Huang Transform)方法检测典型的电能质量扰动信号, 如谐波、电压闪变信号等。但是, 在经验模态的分解过程中所构成的上下包络三次样条函数在数据序列的两端会出现发散现象, 其结果会随着“筛”过程的不断进行逐渐向内“污染”整个数据序列而使所得结果严重失真, 致使经验模态的分解无法有效地进行, 限

制了该方法的使用^[6]。

本文将一种时频信号分析工具—Wigner - Ville分布的改进算法: 平滑伪 Wigner - Ville分布 (SPWVD), 用于检测电能质量的扰动信号, 包括短时电压变动、谐波和间谐波信号。

Wigner - Ville分布 $W_x(t, f)$ 是一种具有能量化的二次时频表示, 满足时频边缘性和时间、位移不变性等^[7, 8]。但 Wigner - Ville分布有可能出现负值, 为了将 $W_x(t, f)$ 同实际的物理性能联系起来, 我们可以认为 $W_x(t, f)$ 是在时间间隔 $(t - \frac{t}{2}, t + \frac{t}{2})$ 内流经谱窗 $(f - \frac{f}{2}, f + \frac{f}{2})$ 的能量的一种测度。该方法能够较有效地检测出突变、非平稳扰动信号的起止时间和频率信息^[8]。

1 WVD时频分布及其改进算法

1.1 Wigner - Ville分布 (WVD)

时频分析在时频域上表征信号, 它可以清晰地表示出信号在时频平面上任何一点 (t, f) 的时频分布值。作为一种时频信号分析工具, Wigner - Ville分布具有时频分布的很多性质。实际信号 $s(t)$ 的 Wigner - Ville分布 (WVD)定义为:

$$W_x(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t + \frac{\nu}{2}) x^*(t - \frac{\nu}{2}) e^{-j2\pi f\nu} d\nu \quad (1)$$

或

$$W_x(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f + \frac{\nu}{2}) X(f - \frac{\nu}{2}) e^{j2\pi f\nu} d\nu \quad (2)$$

其中: $x(t)$ 是实际信号 $s(t)$ 的解析信号。用实际信号 $s(t)$ 作实部, 用对信号 $s(t)$ 做 Hilbert 变换所得的序列作虚部, 即为实际信号 $s(t)$ 的解析信号 $x(t)$ 。

$W_x(t, f)$ 在 $t-f$ 平面上对时间 t 和频率 f 的总积分等于信号的能量 E , 即

$$\frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} W_x(t, f) dt df = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)|^2 dt = E \quad (3)$$

由式 (3) 可知 WVD 是信号在 $t-f$ 平面上的能量分布。

由式 (1)、(2) 可知, WVD 具有双线性, 因此, 它存在交叉项。假定 $x(t)$ 是 n 个 $x_k(t)$ 成份之和:

$$x(t) = \sum_{k=1}^n x_k(t) \quad (4)$$

按照定义可知

$$W_x(t, f) = \sum_{k=1}^n W_{x_k}(t, f) + \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n 2\text{Re}[W_{x_k x_l}(t, f)] \quad (5)$$

$\sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n 2\text{Re}[W_{x_k x_l}(t, f)]$ 为交叉项。交叉项提供了虚假的频谱分布, 影响了 WVD 的物理解析。

1.2 平滑伪 Wigner-Ville 分布 (SPWVD)

平滑伪 Wigner-Ville 分布对时域变量和频域变量同时加窗, 以减少交叉项。其定义为:

$$SPWD_x(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x\left(t + \frac{u}{2}\right) x^*\left(t - \frac{u}{2}\right) h(u) g(u) e^{-j2\pi f u} du \quad (6)$$

这里的 h 和 g 是两个实对称窗口, 并且 $h(0) = g(0) = 1^{[9]}$ 。

对信号进行时域频域加窗平滑处理后, 时域和频域上的交叉项可以得到很大的抑制。然而 SPWVD 却因此失去了 WVD 的很多数学性质, 联合时频分辨率也会同时下降。但是, 时域平滑和频域平滑的尺度却很容易得到控制, 并且可以独立选择窗函数 $h(t)$ 和 $g(t)$ 的长度^[10]。

本文根据 $W_x(t, f)$ 随时域变量和频域变量的改变而改变的规律, 进行扰动信号的时频分析。前面已说明, 认为 $W_x(t, f)$ 是在时间间隔 $(t - \frac{t}{2}, t + \frac{t}{2})$

内流经谱窗 $(f - \frac{f}{2}, f + \frac{f}{2})$ 的能量的一种测度。根据式 (6) 对信号的解析信号 $x(t)$ 进行处理, 得到信

号 $W_x(t, f)$ 的值, 在时间-频率平面 ($t-f$ 平面) 上形成二维的信号能量时频分布图。在正常稳定运行的情况下, 只有 50 Hz (工频) 上有能量分布。当所检测的信号有短时扰动时, 则信号在时域和频域上能量分布就会因此而改变。本文根据能量分布的变化, 测得扰动信号的起止时间和频率信息。

2 平滑伪 Wigner-Ville 分布 (SPWVD) 检测短时电压波动的实例仿真

2.1 电压骤降信号分析

暂时电压骤降的典型持续时间为 30 周波至 3 s, 典型电压幅值为 0.1 ~ 0.9 p.u.。这里我们设电压骤降的信号为:

$$u(t) = (1 + p(t)) \sin(2\pi ft) \quad (7)$$

当 $0.2 \text{ s} < t < 0.4 \text{ s}$ 时, $p(t) = -0.4$, 其他情况下 $p(t) = 0$; f 为工频, 即 $f = 50 \text{ Hz}$ 。根据式 (6) 对信号 $u(t)$ 的解析信号进行处理, 得到如图 1 所示的二维信号能量时频分布图。

在电压跌落发生期间, 信号能量有一定的减少。如图 1 示, 50 Hz 上的分布的能量即 $W_x(t, f)$ 的值有一段时间明显减少。在 0.2 s 左右, 能量骤减, 但这个过程持续时间非常短, 在工程上可以忽略不计, 因而可以认为电压骤降的起始时间为 0.2 s 。同理, 认为电压骤降终止的时刻为 0.4 s 。

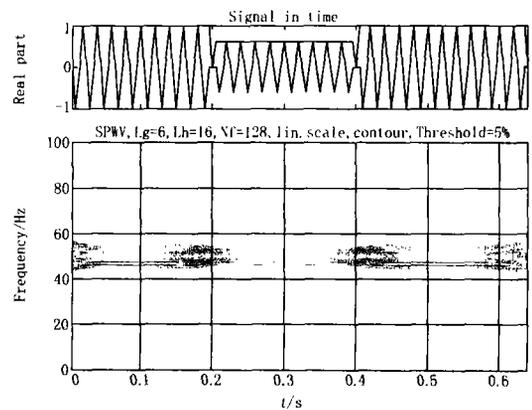


图 1 电压骤降信号分析

Fig 1 Time-frequency analysis of voltage sag signal

2.2 电压骤升信号分析

暂时电压骤升的典型持续时间为 30 周波至 3 s, 电压幅值为 1.1 p.u. 至 1.4 p.u.。设信号的表达式为:

$$u(t) = (1 + p(t)) \sin(2\pi ft) \quad (8)$$

当 $0.2 \text{ s} < t < 0.4 \text{ s}$ 时, $p(t) = 0.2$, 其他情况下 $p(t) = 0$; $f = 50 \text{ Hz}$ 。信号波形及其 SPWVD 时频分

析结果如图 2 所示。得到如图 2 所示的 SPWVD 时频分析。

如图 2 所示,大约在 0.2 s 至 0.4 s 之间, $W_x(t, f)$ 曲线有个高峰,即信号能量在这个期间有一定的增加。如 2.1 所述,在容许误差范围内,认为电压骤升起止时刻分别为 0.2 s 和 0.4 s

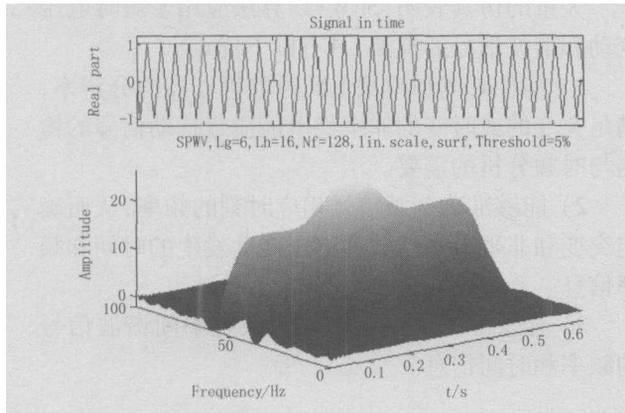


图 2 电压骤升信号分析

Fig 2 Time-frequency analysis of voltage swell signal

2.3 电压中断信号分析

根据 IEEE 标准,暂时电压中断的典型持续时间为 0.5 周波到 3 s,典型电压幅值小于 0.1 p.u.,我们设其信号表达式为:

$$u(t) = \begin{cases} 0.1 \sin(2\pi ft) & 0.3 \text{ s} < t < 0.4 \text{ s} \\ \sin(2\pi ft) & \text{其它} \end{cases} \quad (9)$$

这里, $f = 50 \text{ Hz}$ 。得到信号的 SPWVD 时频分析结果如图 3 所示。中间有段时间, 50 Hz 上基本没有信号能量分布。根据前面 2.1 分析的结果,认为电压中断的起止时刻分别为 0.3 s 和 0.4 s

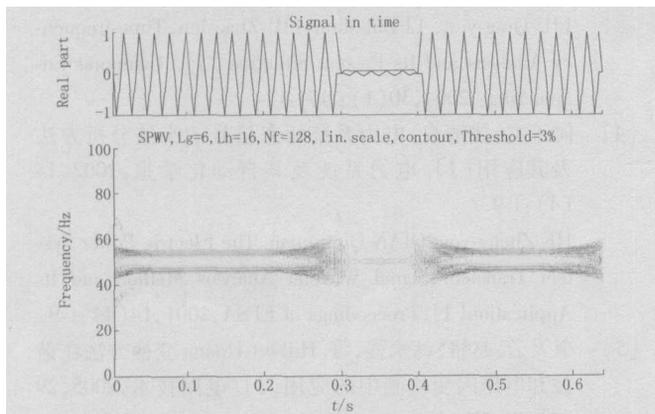


图 3 暂时电压中断信号分析

Fig 3 Time-frequency analysis of voltage interruption signal

3 平滑伪 Wigner - Ville 分布 (SPWVD) 分析电力系统谐波的实例仿真

SPWVD 优点在于非平稳信号的分析,在电力系统谐波分析中显示了其良好的性能。SPWVD 能够测出任何频率的间谐波,而傅氏变换只能测出基波整数倍次的谐波。

3.1 短时间谐波失真信号

设短时间谐波失真信号为:

$$s_{h1}(t) = \begin{cases} \sin(2\pi ft) + 0.4 \sin(2\pi \frac{1}{2} ft) & 0.2 \text{ s} < t < 0.6 \text{ s} \\ \sin(2\pi ft) & \text{其它} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $f = 50 \text{ Hz}$ 。得到信号的 SPWVD 的时频分析结果如图 4 所示。

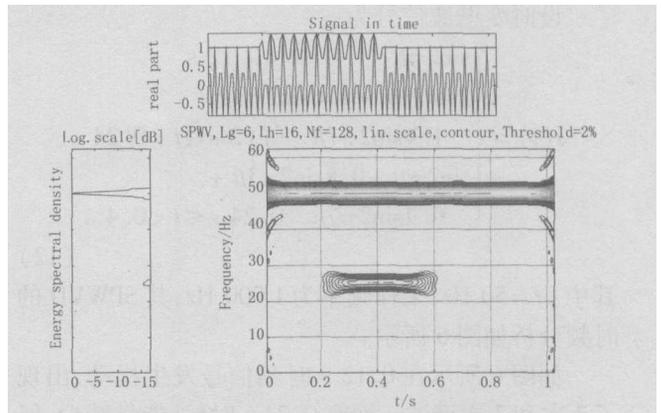


图 4 短时间谐波失真信号分析

Fig 4 Time-frequency analysis of short-duration interharmonics distortion signal

如图 4 所示,大致在 0.2 s 和 0.6 s 之间,频率 25 Hz 上有平稳的能量分布。在容许误差范围内,认为信号含有 1/2 次谐波和其起止时刻分别为 0.2 s 和 0.6 s

3.2 短时谐波失真信号

设短时谐波失真信号的表达式为:

$$s(t) = \begin{cases} \sin(2\pi ft) + \sum_{i=1}^2 A_i \sin(2\pi m_i ft) & 0.04 \text{ s} < t < 0.14 \text{ s} \\ \sin(2\pi ft) & \text{其它} \end{cases} \quad (11)$$

其中: $A_1 = 0.5 \text{ V}$, $A_2 = 0.4 \text{ V}$; $m_1 = 3$, $m_2 = 7$; $f = 50 \text{ Hz}$ 。采样频率为 1 000 Hz

其 SPWVD 的时频分析如图 5 所示。

从图 5 我们可以准确测得信号含有 3 次和 7 次谐波,其起止时刻分别为 0.04 s 和 0.14 s

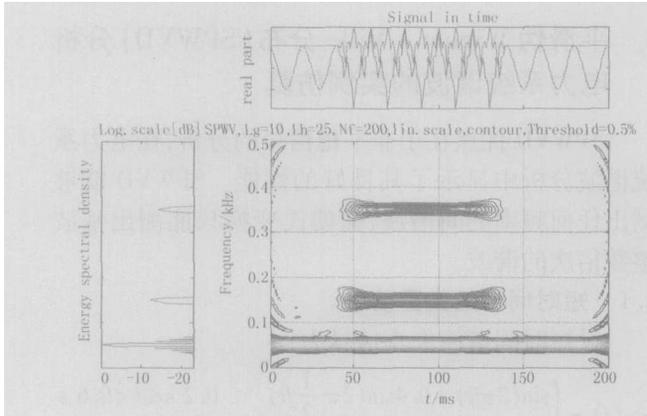


图 5 短时谐波失真信号分析

Fig 5 Time-frequency analysis of transient harmonic distortion signal

3.3 时变谐波信号

设时变谐波信号为:

$$s(t) = \begin{cases} \sin 2\pi ft & 0 \leq t < 0.12 \text{ s} \\ 2 \sin 2\pi ft + 1.6 \sin 2\pi 3ft + \\ 1.4 \sin 2\pi 7ft & 0.12 \text{ s} \leq t < 0.24 \text{ s} \\ \sin 2\pi ft + 0.8 \sin 2\pi 3ft + \\ 0.7 \sin 2\pi 7ft & 0.24 \text{ s} \leq t < 0.4 \text{ s} \end{cases} \quad (12)$$

其中: $f=50$ Hz, 采样频率为 1 000 Hz, 其 SPWVD 的时频分析如图 6 所示。

如图 6 所示在 0.12 s 时刻信号发生扰动, 出现了 3 次和 7 次谐波。而在 0.24 s 时候, 能量减少, 但频率没有改变。也即信号所含的谐波结构没有变, 只是各次谐波和基波的幅值有了一定的改变。

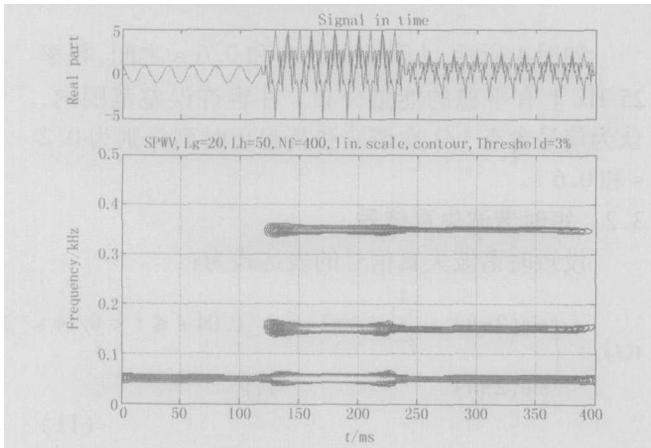


图 6 时变谐波信号分析

Fig 6 Time-frequency analysis of time-varying transient harmonic signal

4 结论

本文将一种非平稳信号处理方法, 即 SPWVD 算法应用于电能质量扰动信号的检测, 包括短时间电压变动和谐波信号; 通过平滑伪 Wigner-Ville 分布中的能量变化, 实现扰动信号的特征检测。

大量的仿真表明, SPWVD 算法应用于短时电压变动和谐波信号的检测, 具有以下优点:

1) 能在时域和频域上同时取得较高的分辨率, 满足突变的或时变的非平稳电能质量扰动信号的检测与时频分析的需要。

2) 能够准确刻画信号相应时刻的频率, 从而确定突变和非平稳的谐波和电压变动发生的时间和频率信息。

3) 能较准确地检测出电力系统中谐波信号的频率和时间信息。

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): 5-12
L N Hai-xue. Main Problems of Modern Power Quality [J]. Power System Technology, 2001, 25 (10): 5-12
- [2] 杨洪耕, 肖先勇, 刘俊勇. 电能质量问题的研究和技术进展 (一)——电能质量一般概念 [J]. 电力自动化设备, 2003, 23 (10): 1-5.
YANG Hong-geng, XIAO Xian-yong, LIU Jun-yong. Issues and Technology Assessment on Power Quality, Part I: General Concepts on Power Quality [J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23 (10): 1-5.
- [3] 刘庆云, 李志舜, 刘朝晖. 时频分析技术及研究现状 [J]. 计算机工程, 2004, 30 (1): 171-174.
L I U Qing-yun, L I Zhi-shun, L I U Zhao-hui. Time-frequency Analysis and Its Present Situation [J]. Computer Engineering, 2004, 30 (1): 171-174.
- [4] 何正友, 钱清泉. 电力系统暂态信号的小波分析方法及其应用 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2002, 14 (4): 1-9.
HE Zheng-you, QIAN Qing-quan. The Electric Power System Transient Signal Wavelet Analysis Method and Its Application [J]. Proceedings of EPSA, 2001, 14 (4): 1-9.
- [5] 李天云, 赵妍, 韩永强, 等. Hilbert-Huang 变换方法在谐波和电压闪变检测中的应用 [J]. 电网技术, 2005, 29 (2): 73-77.
L I Tian-yun, ZHAO Yan, HAN Yong-qiang, et al. Application of Hilbert-Huang Transform Method in Detection of Harmonic and Voltage Flicker [J]. Power System Technology, 2005, 29 (2): 73-77.

- [6] 邓拥军,王伟,钱成春,等. EMD方法及 Hilbert变换中边界问题的处理 [J]. 科学通报, 2001, 46 (3): 257-263
DENG Yong-jun, WANG Wei, QIAN Cheng-chun, et al Comments and Modifications on EMD Method [J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46 (3): 257-263
- [7] 张贤达. 现代信号处理 [M]. 北京:清华大学出版社, 1994.
ZHANG Xian-da Modern Signal Processing [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1994.
- [8] 史习智,等. 信号处理与软计算 [M]. 北京:高等教育出版社, 2003.
SHI Xi-zhi, et al Signal Processing and Soft Computation [M]. Beijing: Higher Education Press, 2003.
- [9] Auger A, Flandrin P. Improving the Readability of Time-Frequency and Time-Scale Representations by the Reassignment Method [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1995, 43 (5).
- [10] 姜鸣,陈进,汪慰军. 几种 Cohen类时频分布的比较及应用 [J]. 机械工程学报, 2003, 29 (3): 129-134.
JIANG Ming, CHEN Jin, WANG Wei-jun Comparison and Application of Some Time-frequency Distribution Belonging to Cohen Class [J]. Chinese Journal of Mechanic
- cal Engineering, 2003, 29 (3): 129-134
- [11] Poisson O, Rioual P. New Signal Processing Tools Applied to Power Quality Analysis [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1999, 14 (2): 561-566
- [12] Shin Y J, Parsons A C, Powers E J, et al Time-frequency Analysis of Power System Disturbance Signals for Power Quality [A]. Power Engineering Society Summer Meeting, IEEE 1999. 402-407.
- [13] 刘安定,肖先勇,邓武军. 短时电能质量扰动检测的一种新方法 [J]. 继电器, 2005, 33 (8): 27-30.
LIU An-ding, XIAO Xian-yong, DENG Wu-jun A New Method for Detecting Short Duration Disturbance of Power Quality [J]. Relay, 2005, 33 (8): 27-30.

收稿日期: 2005-12-20; 修回日期: 2006-01-24

作者简介:

乐叶青 (1980 -),男,硕士研究生,主要从事电能质量、高压直流输电系统谐波抑制方面的研究工作; E-mail: leyeqing@126.com

徐政 (1962 -),男,博士,教授,博士生导师,主要从事直流输电、柔性交流输电和电力系统谐波分析等方面的研究工作。

Application of smoothed Pseudo Wigner-Ville distribution in detecting harmonics and short duration voltage variations

LE Ye-qing, XU Zheng

(Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: This paper analyzes and compares the current techniques applied to detect SDPQD (Short Duration Power Quality Disturbances), and proposes a new method to detect and analyze SDPQD using Smoothed Pseudo Wigner-Ville distribution (SPWVD). Smoothed Pseudo Wigner-Ville distribution is an excellent algorithm to analyze the non-steady signal by joint time-frequency analyzing. The simulated results show the time-frequency analysis method is remarkably efficient in detecting the time and frequency information of accident short-time voltage variations, harmonics and interharmonics in power system.

Key words: power quality; short duration voltage variations; harmonics; interharmonics; cross time-frequency; Wigner-Ville distribution (WVD); Smoothed Pseudo Wigner-Ville distribution (SPWVD)

(上接第 26页 continued from page 26)

3. School of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: This paper proposes an antibody clone algorithm which based on the clonal selection theory of artificial immune system. It is firstly to clone the higher affinity antibodies, then to take advantage of the mutations between small and large scope to find out the global best solution. Mutation in small scope can find the better solution based on the optimal solution and has more chance to get the global best solution. Mutation in large scope can prevent the antibodies premature and make sure of the diversity of antibodies. The algorithm can be used in overloading caused by season change or overloading caused by post-fault power restoration in distribution network, to get the loading balance through the optimal switching operation. The test shows that the antibody clone algorithm has the prominent efficiency and significant global optima searching performance, and can be effectively used to reconfigure power distribution network for making loading balance.

Key words: clone selection; antibody clone algorithm; artificial immune system; distribution network reconfiguration; load balance