

短时电压扰动检测与定位新方法

秦英林^{1,2}, 田立军¹

(1. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061; 2. 山东建筑大学计算机学院, 山东 济南 250101)

摘要: 提出了基于奇异值分解技术的短时电压扰动检测方法。根据短时电压扰动的电压采样序列构造 Hankel 矩阵, 并对该矩阵进行奇异值分解; 基于该分解结果将原电压信号分解到多个分解层, 得到信号的一种线性分解, 在某些分解层上电压扰动起点和终点表现为突变, 根据这些突变可以定位扰动起始和结束时刻。从原采样序列中, 在起点两侧分别提取一个周波信号进行 FFT 运算以获取扰动发生前后的基波幅值, 基于两者幅值关系可以确定扰动的类型, 并计算出其指标。搭建了短时电压扰动信号的模拟电路, 并基于 LabVIEW 虚拟仪器检测平台建立实验系统, 实验结果证明了所提方法的有效性, 且比小波变换方法优越。

关键词: 奇异值分解; Hankel 矩阵; 短时电压扰动; 电能质量

A new method to detect and locate instantaneous voltage disturbances

QIN Ying-lin^{1,2}, TIAN Li-jun¹

(1. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. School of Computer Science & Technology, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China)

Abstract: A characteristic method for voltage disturbances based on singular value decomposition is proposed. Hankel matrix is constructed using the time series of voltage signal. Then singular value decomposition is executed to the Hankel matrix and the decomposition of the voltage signal is calculated. At every decomposition layer, the start point and the end point show prominence and then they can be detected. At each side of the start point in the original signal, one cycle signal is taken out to calculate the fundamental component by FFT. The type of the voltage disturbance can be gotten by the relationship between the fundamental components and the index can also be gotten. A circuit to simulate instantaneous voltage disturbance is made. Experiment system is set up based on LabVIEW and data acquisition system. The experiment results show the correctness of the method and its superiority over the wavelet.

This work is supported by National Natural Science Foundation of Shandong Province(No.Y2008F37).

Key words: singular value decomposition; Hankel matrix; instantaneous voltage disturbances; power quality

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)04-0021-04

0 引言

短时电压扰动如电压暂降、电压暂升、电压中断是配电系统中常见的电能质量扰动现象。近年来微处理器控制的工业设备和电力电子设备在工业系统中得到广泛应用, 而短时电压扰动是使这些敏感设备不能正常工作的主要原因, 因而近年来受到国内外学者和工业界的广泛关注。

短时电压扰动事件主要从电压偏离程度和持续时间两个指标进行表征, 但这些指标是从均方根曲

线计算得到的, 从时间角度来看偏离了短时电压扰动事件的真实发生和结束时刻, 对分析设备在受电压扰动情况下的性能产生较大影响, 因此短时电压扰动的定位问题在分析短时电压扰动影响中成为焦点问题。小波变换^[1]是最常用的方法, 通过小波变换模极大值理论获取信号的突变点, 从而得到信号的时间定位。文献[2]采用三次样条函数作为小波函数并利用阈值去噪方法及ad hoc搜索算法得到噪声环境下的时间定位; 文献[3]采用db6小波作为小波函数, 利用模极大值在不同分解层上的传递特性不同获得时间定位。小波变换缺点是在不同尺度上模极大值分布集中性较差, 且易受噪声干扰。文

基金项目: 山东省自然科学基金项目(Y2008F37)

献[4]中提出的dq变换法首先构造虚拟的三相系统, 然后进行dq变换得到电压有效值曲线, 该电压有效值曲线可以较准确地得到电压扰动的时间定位, 但该方法一方面需要构造虚拟三相系统, 另一方面需要原信号的同步信号才能准确获得dq变换, 在电压发生扰动的情况下, 该信号不易获得。Teager能量算子方法^[5]是一种解调方法, 能够快速获取调幅调频信号包络线, 具有良好的实时性, 但该方法对噪声非常敏感; 文献[6]提出了在原始信号上叠加一个对称三角模态的方法保留信号的扰动信息, 采用分段EMD和Teager能量算子求取扰动幅值包络的分析方法。文献[7]提出的信号自回归模型法是通过已有信号根据自回归模型对信号进行预测并与实际信号比较, 二者的差值曲线在信号的突变点处产生较大差值从而获得突变点的时间定位。该方法需要逐点地自回归运算并与实际信号比较才能够得到差值曲线。

本文提出了基于奇异值分解技术的短时电压扰动检测的方法。首先根据电压信号的采样序列构造Hankel矩阵, 并对该矩阵进行奇异值分解。利用上述的分解结果计算对应于各个奇异值的分解信号。这种信号分解方法是原信号的一种线性分解。在某些分解层信号上, 短时电压扰动信号的起始和结束时刻表现为剧变, 从而实现扰动的时间定位。从原采样序列中扰动起点时刻的左右两侧各取一个周波的采样点进行FFT运算, 获取扰动发生前后的基波电压幅值, 根据幅值关系可以确定扰动类型并可计算指标。为检验上述方法的正确性, 搭建了短时电压扰动模拟电路, 并基于LabVIEW虚拟仪器检测平台建立实验系统, 实验结果证明了本文所提方法的有效性, 性能比小波变换方法优越。

1 基于奇异值分解的扰动检测与定位方法

对于一个实矩阵 $A \in R^{m \times n}$, 必定存在正交阵 $U \in R^{m \times m}$ 和 $V \in R^{n \times n}$ 使得式 (1) 成立:

$$A = USV^T \quad (1)$$

其中:

$$U = [u_1, u_2, \dots, u_m] \in R^{m \times m} \quad (2)$$

$$V = [v_1, v_2, \dots, v_n] \in R^{n \times n} \quad (3)$$

$$S = [diag(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_p), O] \quad (4)$$

或其转置(取决于 $m < n$ 还是 $m > n$), 其中, O 为零矩阵, $p = \min(m, n)$, 且有 $\sigma_1 > \sigma_2 > \dots > \sigma_p >$

0 , $\sigma_i (i=1, \dots, p)$ 称为矩阵 A 的奇异值, 式 (1) 称为 A 的奇异值分解。

利用奇异值分解对信号进行处理的关键是如何从信号的采样序列构造出合适的矩阵 A 。本文中根据信号的采样序列构造 Hankel 矩阵, 通过对该 Hankel 矩阵做奇异值分解后, 计算信号的一个多层分解, 信号的奇异性可以在分解信号中表现出来。

对于一个 N 点采样序列向量 $X = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_N]$, 构造其 Hankel 矩阵如式 (5) 所示。

$$A = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_n \\ x_2 & x_3 & \dots & x_{n+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{N-n+1} & x_{N-n+2} & \dots & x_N \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: $1 < n < N$, 令 $m = N - n + 1$, 则 $A \in R^{m \times n}$ 。

对构造矩阵 A 进行奇异值分解得到类似式 (1) 的结果, 对式 (1) 进行展开有:

$$A = \sigma_1 u_1 v_1^T + \sigma_2 u_2 v_2^T + \dots + \sigma_p u_p v_p^T \quad (6)$$

其中: $u_i \in R^{m \times 1}$; $v_i \in R^{n \times 1}$; $i=1, 2, \dots, p$; $p = \min(m, n)$ 。令:

$$A_i = \sigma_i u_i v_i^T \in R^{m \times n} \quad (7)$$

令每个 A_i 矩阵的第一行为 $P_{i,1}$, 第 n 列除去第一行的元素外记为 $H_{i,n}$, 如图 1 所示, 将 $P_{i,1}$ 同 $H_{i,n}$ 构成一个向量, 即

$$A_i = \begin{bmatrix} P_{i,1} \\ \begin{bmatrix} x_{i,1} & x_{i,2} & \dots & x_{i,n} \\ x_{i,2} & x_{i,3} & \dots & x_{i,n+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{i,N-n+1} & x_{i,N-n+2} & \dots & x_{i,N} \end{bmatrix} \\ H_{i,n} \end{bmatrix}$$

图 1 由 A_i 元素构造 P_i 方法

Fig.1 Construction of P_i from A_i

$$P_i = (P_{i,1}, H_{i,n}^T) \quad (8)$$

其中: $P_{i,n} \in R^{1 \times n}$, $H_{i,n} \in R^{(m-1) \times 1}$

可以证明^[8]:
$$X = \sum_{i=1}^p P_i \quad (9)$$

从式 (9) 可以看出, 通过对原始信号采样序列构造 Hankel 矩阵并进行奇异值分解, 进而计算各个分解层信号 P_i , 得到原始信号的线性分解。采用

文献[9]中的电压暂降模型,在 Matlab 下生成信噪比为 35 dB 的电压暂降信号如图 2 (a) 所示。按照上述方法,对该信号进行分解,得到 5 层分解信号 P_1 至 P_5 ,如图 2 (b)~(f) 所示。可以看出,在 P_3 至 P_5 分解层上,信号的突变点位置表现为剧烈的突变,且突变点的标识在各层上均有较好的集中性。在 P_1 至 P_5 分解层中,相对于由信号突变引起变化,噪声引起的各层信号变化较小。因此上述方法在突变点定位方面具有良好的特性,对原信号中的噪声不太敏感。短时电压扰动的起始和结束时刻表现为电压信号的突变,因此采用上述的方法可以对短时电压扰动进行时间定位。

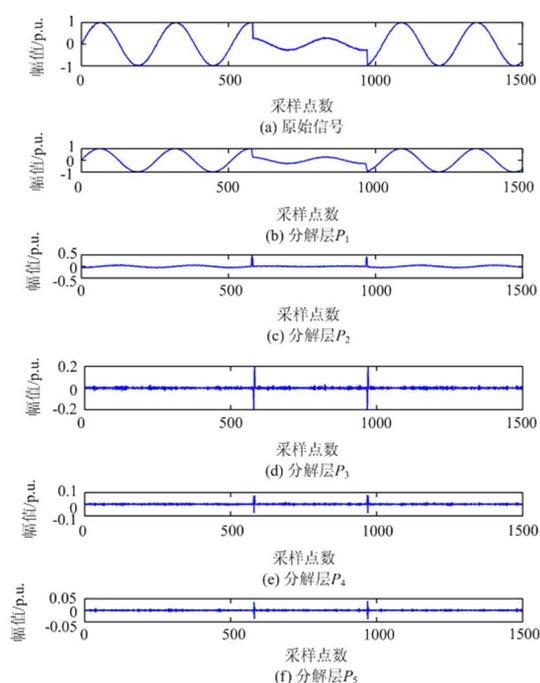


图 2 电压暂降波形的 SVD 分解结果

Fig.2 Decomposition result of a voltage sag gotten by SVD

2 短时电压扰动的类型确定及指标计算

根据电压扰动信号的奇异值分解对扰动发生及结束时刻的时间定位,可以确定电压扰动的类型并对特征数据进行计算。假定短时电压扰动的电压采样序列为 $\mathbf{X}=[x_1, x_2, x_3, \dots, x_N]$, 由前述的时间定位算法得到的扰动发生时刻的索引值为 k , 以 x_k 为界,在其左右两边分别各取一个周波的信号长度,令:

$$\mathbf{X}_1=[x_{k-n}, x_2, x_3, \dots, x_{k-1}] \quad (10)$$

$$\mathbf{X}_2=[x_k, x_2, x_3, \dots, x_{k+n-1}] \quad (11)$$

其中: n 为信号的周波采样点数。利用 FFT 分别计算 \mathbf{X}_1 、 \mathbf{X}_2 基波幅值。根据 IEEE 标准^[10],若 \mathbf{X}_2 基波幅值介于 \mathbf{X}_1 基波幅值的 10%~90%, 则说明该电压扰动为电压暂降;若 \mathbf{X}_2 基波幅值小于 \mathbf{X}_1 基波幅值的 10%, 则说明该电压扰动为电压短时中断;若 \mathbf{X}_2 基波幅值大于 \mathbf{X}_1 基波幅值的 110%, 则说明该电压扰动为电压暂升。电压扰动信号持续时间可以根据起始和结束时刻的索引值之差乘以采用间隔得到。

3 测量实例分析

为测试本文所提出的方法在实际工程应用中的有效性,搭建了如图 3 所示的实验电路, K 为固态开关,通过控制开关 K 的导通与断开可以模拟电压暂降或电压暂升。

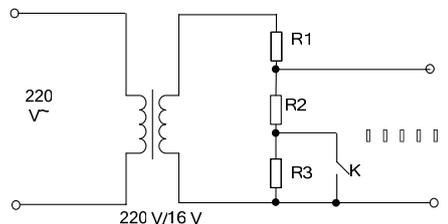


图 3 短时电压扰动模拟装置

Fig.3 Simulator of transient voltage disturbance

基于 LabVIEW 虚拟仪器检测平台,搭建完整数据采集与处理系统。系统的采样频率为 6 400 Hz,并对采样信号进行归一化处理。利用本文所提方法对信号进行 6 层分解,得到分解层信号 P_1 ~ P_6 。图 4 为某次实验获得的电压波形图,图 5 为该信号的分解结果。

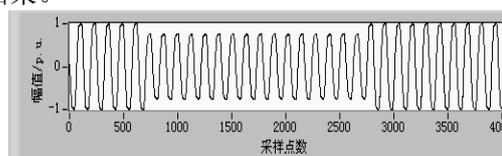
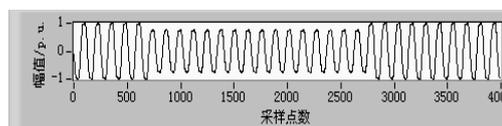
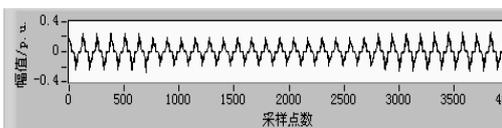


图 4 采集到电压波形

Fig.4 Waveform of voltage by sampling



(a) 分解层 P_1



(b) 分解层 P_2

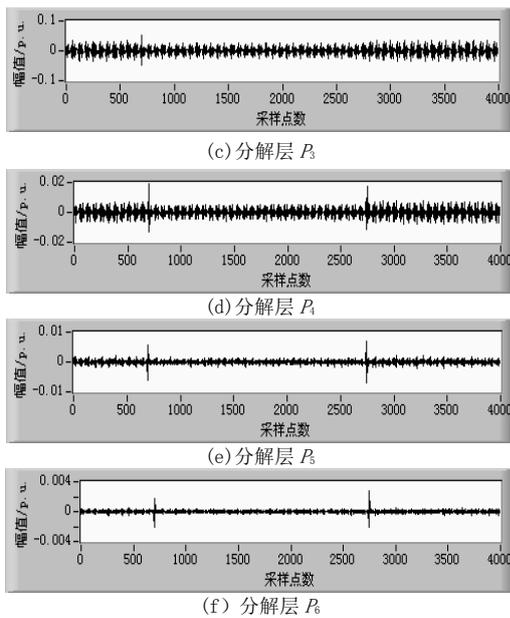


图 5 信号的 SVD 分解结果

Fig.5 Decomposition result gotten by SVD

从图 5 中的 P_4 、 P_5 和 P_6 分解层可以得到电压扰动的起点和终点的时间定位信息。根据电压扰动的起点定位，在原信号中扰动起点两侧各取一个周波信号进行 FFT 变换，得到该电压扰动基波电压的幅值分别为 1.12 p.u. 和 0.846 p.u.，因而断定该电压扰动为电压暂降，电压暂降剩余电压为 75.5%。

4 与小波变换方法的比较

利用 db4 小波对图 6 所示电压扰动信号进行 5 层分解，得到各分解信号 a5、d1~d5，如图 6 所示。因获取的电压信号有噪声干扰，可以看出，在 d1 分解层尚可以得到信号的时间定位信息，但在其他层，信号的突变点被噪声干扰所淹没，造成电压暂降的起点和终点信息仅能根据一个分解层判断，其性能不如本文提出的方法优越。

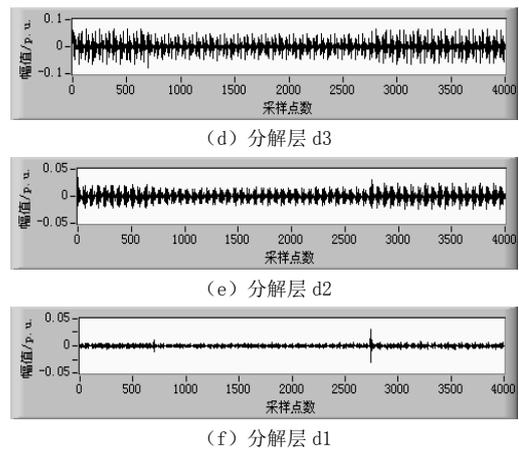
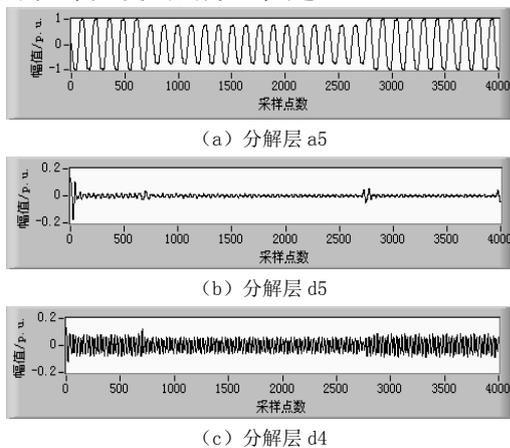


图 6 信号的小波变换的分解结果

Fig.6 Decomposition result gotten by wavelet

5 结论

本文给出了基于奇异值分解技术的短时电压扰动检测方法。首先通过电压采样序列构建 Hankel 矩阵，并在计算该矩阵奇异值分解的基础上，计算信号的线性分解，利用信号在分解层上的突变特性得到扰动发生的起点和终点时刻。在原采样序列中起点两侧各取一个周波信号进行 FFT 运算得到扰动发生前后的基波幅值，根据这两个基波幅值关系可以确定扰动类型及计算指标。通过搭建基于 LabVIEW 虚拟仪器检测技术平台的实验系统，证明本文所提方法的正确性，并与小波变换方法进行比较，说明本文所提方法比小波变换优越。

参考文献

- [1] Santoso S, Powers E J, et al. Power Quality Assessment via Wavelet Transform Analysis[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11 (2): 924-930.
- [2] 胡铭, 陈珩. 基于小波变化模极大值的电能质量扰动检测与定位[J]. 电网技术, 2001, 25 (3): 12-16.
HU Ming, CHEN Heng. Detection and Location of Power Quality Disturbances Using Wavelet Transform Modulus Maxima[J]. Power System Technology, 2001, 25 (3): 12-16.
- [3] 刘连光, 贾文双, 肖湘宁, 等. 用小波变换和有效值算法实现电压凹陷的准确测量[J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (11): 30-33.
LIU Lian-guang, JIA Wen-shuang, XIAO Xiang-ning, et al. Measurement method of Voltage Sag by Wavelet Transform and RMS Method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (11): 30-33.
- [4] 张秀娟, 徐永海, 肖湘宁. 基于 dq 变换与小波变换的电能质量扰动检测与识别方法[J]. 电力自动化设备, 2005, 25 (7): 1-5.

(下转第 30 页 continued on page 30)

参考文献

[1] 赵争鸣, 刘建政, 等. 太阳能光伏发电及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
ZHAO Zheng-ming, LIU Jian-zheng, et al. Solar Photovoltaic Power Generation and its Application[M]. Beijing: Science Press, 2005.

[2] 林渭勋. 现代电力电子技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
LIN Wei-xun. Modern Power Electronics[M]. Beijing: China Machine Press, 2006.

[3] 刘凤君. 现代逆变技术及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
LIU Feng-jun. Modern Inverter Technology and Its Application[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006.

[4] Soeren Baekhoej Kjaer. A Review of Single-Phase Grid-Connected Inverters for Photovoltaic Modules[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2005, 41(5): 1292-1306.

[5] Gabriela Rață, Richard Marschalko. Development of Hysteresis Modulation Methods for PWM AC – to – DC Converters Based on Dead – Beat Control[J]. IEEE, 2006: 1-7.

[6] Lock A S. Improved Hysteresis Current Control of a Single Phase, Three Level, Double PFC Converter[J]. IEEE, 2007: 1326-1330.

[7] Bode G H, Holmes G D. Implementation of Three Level Hysteresis Current Control for a Single Phase Voltage Source Inverter[J]. IEEE, 2000: 33-38.

[8] Soeren Baekhoej Kjaer. Power Inverter Topologies for Photovoltaic Modules – a Review[J]. IEEE, 2002: 782-788.

[9] Tutorial on How to Use the Simcoupler Module, PSIM User Manuals, Powersim Inc[EB/OL]. <http://www.powersimtech.com>.1-14.

[10] Ortiz-Rivera E I, Peng F Z. Analytical Model for a Photovoltaic Module Using the Electrical Characteristics Provided by the Manufacturer Data Sheet[J]. IEEE, 2005: 1-5.

[11] Altas I H, Sharaf A M. A Photovoltaic Array Simulation Model for Matlab-Simulink GUI Environment[J]. IEEE, 2007: 1-6.

[12] Bowes S R, Grewal S. Novel Adaptive Hysteresis Band Modulation Strategy for Three-phase Inverters[J]. IEE Proc Electr Power Appl, 2001, 148(1): 51-61.

[13] Krismadinata. Implementation of Hysteresis Current Control for Single-Phase Grid Connected Inverter[J]. PEDS, 2007: 1097-1101.

[14] Murat Kale, Engin Ozdemir. A Novel Adaptive Hysteresis Band Current Controller for Shunt Active Power Filter[J]. IEEE, 2003: 1118-1123.

[15] Djarallah M. Energy Transfer Mechanism for a Grid-connected Residential PV System Within the Matlab/simulink Environment[J]. UPEC, 2007: 763- 770.

收稿日期: 2009-02-21; 修回日期: 2009-04-17

作者简介:

戴训江(1974-), 男, 博士研究生, 研究方向为光伏并网发电技术与电能质量统一控制; E-mail: xinjiang_wolf@yahoo.com.cn

晁勤(1959-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事并网型风力发电系统的研究与控制方面的工作。

(上接第 24 页 continued from page 24)

ZHANG Xiu-juan, XU Yong-hai, XIAO Xiang-ning. Power Quality Disturbance Detection and Identification Based on dq Conversion and Wavelet Transform[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25 (7): 1-5.

[5] Abdelgalil T. Automated Recognition System for Power Quality Disturbances[D]. Ontario: The University of Waterloo, 2003.

[6] 王波, 杨洪耕. 基于 EMD 和 TEO 的电力系统短期扰动检测新方法[J]. 继电器, 2006, 34 (8): 56-61.
WANG Bo, YANG Hong-geng. A New Method Based on Empirical Mode Decomposition and Teager Energy Operator for Detection of Short-term Power System Disturbance[J]. Relay, 2006, 34 (8): 56-61.

[7] 田立军, 秦英林, 孙晓明. 变压器空载合闸导致电能质量问题研究[J]. 电力自动化设备, 2005, 25 (3): 41-43.
TIAN Li-jun, QIN Ying-lin, SUN Xiao-ming. Study of Power Quality Problems Caused by No-load Transformer Commission[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25 (3): 41-43.

[8] 赵学智, 叶邦彦, 陈统坚. 矩阵构造对奇异值分解信

号处理效果的影响[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2008, 36(9): 86-93.

ZHAO Xue-zhi, YE Bang-yan, CHEN Tong-jian. Influence of Matrix Creation Way on Signal Processing Effect of Singular Value Decomposition[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2008, 36(9): 86-93.

[9] He Haibo, Starzyk JA. A Self-organizing Learning Array sSystem for Power Quality Classification Based on Wavelet Transform[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(1): 286-295.

[10] IEEE Std.1159-1995. IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality[M]. New York (USA): 1995.

收稿日期: 2009-08-25; 修回日期: 2009-10-15

作者简介:

秦英林(1976-), 男, 博士研究生, 研究方向为电能质量分析与控制、信息处理技术在电力系统中的应用研究; E-mail: sdulaq@126.com

田立军(1964-), 男, 博士, 教授, 主要从事电力系统分析与控制、电能质量分析与控制研究。