

# 基于 STFT 变换和 DAGSVMs 的电能质量扰动识别

覃思师, 刘前进

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

**摘要:** 提出了一种基于短时傅里叶变换和 DAG (Directed Acyclic Graph) 支持向量机的电能质量扰动检测和识别方法。将扰动信号通过 Blackman 窗短时傅里叶变换, 得出时域最大幅值向量, 然后把它作为特征向量输入到 DAG 支持向量机来实现电能质量扰动类型的识别。其中, 时域最大幅值向量不仅能反映各种扰动的特征, 还能显示电压突升、电压暂降、电压中断和暂态振荡等扰动的发生时刻和持续时间。仿真测试表明, 该方法能有效识别各种电能质量扰动, 而且识别正确率高, 训练时间短, 实时性能较好。

**关键词:** 短时傅里叶变换; Blackman 窗; 特征提取; 支持向量机; DAG

## Power quality disturbances detection and identification based on STFT transform and DAGSVMs

QIN Si-shi, LIU Qian-jin

(College of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** The paper proposes a new method for power quality (PQ) disturbances detection and identification based on short time Fourier transform and directed acyclic graph support vector machines (DAGSVMs). The time-domain maximum amplitude vector can be obtained by Blackman window short time Fourier transform of disturbance signals. Then the method makes it as the eigenvector and sets it to the DAGSVMs to realize the identification of the power quality disturbance type. Besides, the time-domain maximum amplitude vector not only can reflect the character of each disturbance, but also can show the starting and sustainable time of voltage swell, voltage sag, interruption and oscillatory transients. Simulation results show that the method could detect and classify the PQ disturbance effectively, and the classifier has a good performance on correct ratio, training speed and real-time function.

**Key words:** short time Fourier transform; Blackman window; feature extraction; support vector machines; directed acyclic graph

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)01-0083-04

## 0 引言

电力系统中非线性负荷越来越多, 其所遭受的电能质量污染日益严重。对电能质量进行监测和分析是发现电能质量问题并进行治理和改善的前提条件, 而如何从电能质量扰动信号中提取特征并进行分类是监测和分析电能质量的基础。

目前, 对电能质量扰动信号进行特征向量提取的方法主要有: dq变换<sup>[1]</sup>、数学形态学<sup>[2]</sup>、HHT变换<sup>[3]</sup>、S变换<sup>[4-5]</sup>和小波(包)变换<sup>[6-8]</sup>等。S变换继承和发展了短时傅里叶变换和小波变换的局部化思想, 具有良好的时频特性。小波(包)变换具有强大的时频分析特性, 可以获得扰动信号不同尺度的特征, 但其容易受噪声影响, 而且小波基不易选取、小波包计算复杂。文献[4]用S变换提取扰动特征并取得良好效果, 但分解后信息量大, 没有统一的扰

动特征向量形式, 通用性不强。本文利用Blackman窗的短时傅里叶变换, 得出形式统一的特征向量, 虽然其维数比较高, 但支持向量机能解决高维向量问题, 而且在样本比较少的情况下, 仍能得到很好的分类效果。基于DAG的支持向量机能避免分类重叠、不可分类现象, 比多级支持向量机计算速度更快、分类准确率更高。仿真表明, 该算法能快速、准确地对目前电力系统最为重要的几种电能质量扰动进行检测和识别。

## 1 短时傅里叶变换

短时傅里叶变换是一种时频局部化的方法, 其基本思想是: 把信号分成许多小的时间间隔, 用傅里叶变换分析每一个时间间隔, 以便确定该时间间隔存在的频率。信号  $x(t)$  的STFT变换定义为

$$F_{\text{STFT}x}(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(u)g^*(u-t)e^{-j2\pi fu} du \quad (1)$$

其中:  $g(t)$  为窗函数, 其存在使短时傅里叶变换具有局部特性, 它既是时间函数, 也是频率函数。

对  $F_{\text{STFT}x}(t, f)$  进行离散化处理, 令信号  $x(t)$  的离散形式为  $x(k)$ , 则信号  $x(t)$  进行STFT变换的离散形式为

$$F_{\text{STFT}}(m, n) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k)g^*(k-m)e^{-2\pi nk/N} \quad (2)$$

其中:  $k=0,1,\dots,N-1$ ;  $m,n=0,1,\dots,N-1$ ,  $N$  为总的采样点数。可见, STFT变换可利用FFT变换实现快速计算, 其幅值矩阵可表示为

$$A(m, n) = |F_{\text{STFT}}(m, n)| \quad (3)$$

由式 (5) 得到的信号STFT变换幅值矩阵, 其元素为对应的频谱幅值, 其中频率坐标值  $n$  的取值范围为  $n=0,1,\dots,N/2-1$ , 对应的实际频率等于  $n/NT$ ,  $T$  为时间变量的采样间隔。为方便分析, 定义时域最大幅值向量  $A_{\text{max}}$  为在幅值矩阵  $A$  中出现最大值所对应的行向量。

## 2 基于 STFT 变换的扰动特征向量提取

本文研究的电能质量扰动有: 电压突降、电压突升、电压中断、振荡暂态、电压尖峰、电压闪变、

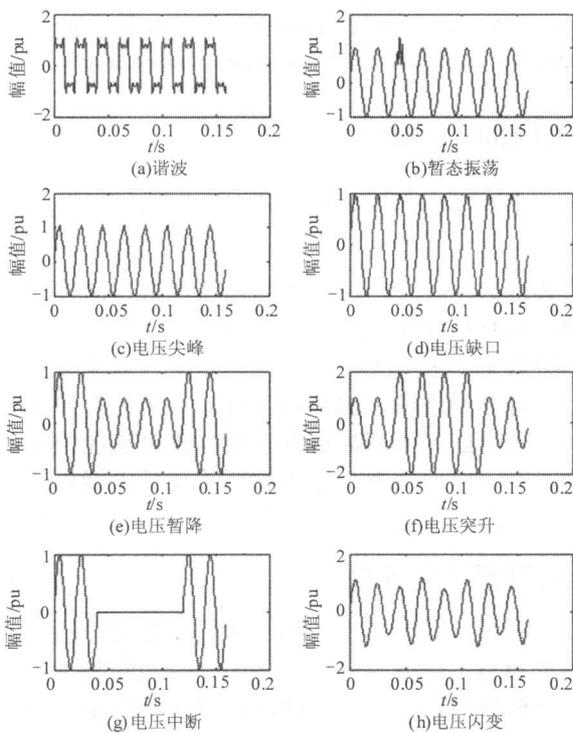


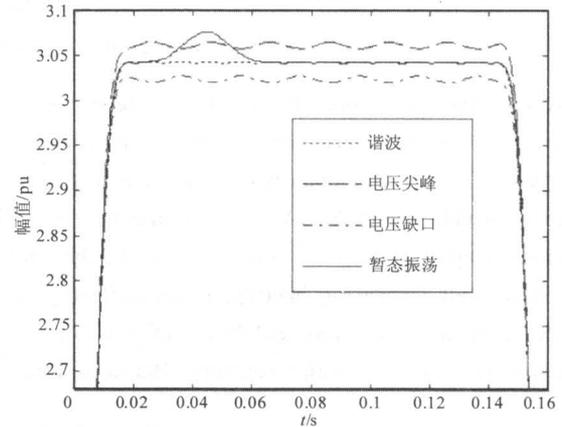
图 1 电压扰动信号

Fig.1 Voltage signals of disturbance

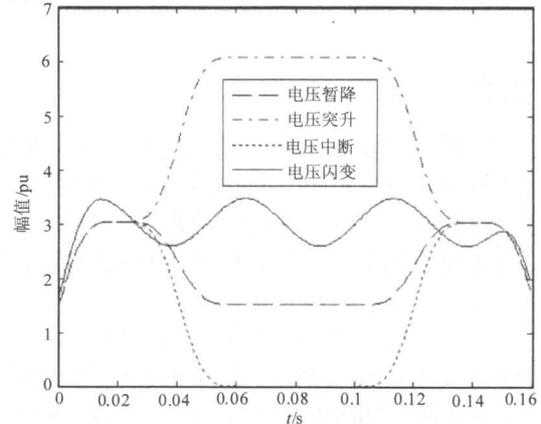
电压缺口和谐波。采用Matlab生成扰动信号, 各种电能质量扰动信号和正弦信号根据文献[4,9-10]的模型仿真产生, 如图1所示。其中, 参数随机产生, 扰动信号的基频频率为50 Hz, 采样频率为1.6 kHz, 采样总点数  $N$  为256, STFT变换所采用的窗函数是Blackman窗, 窗口宽度为65点<sup>[11]</sup>。

将图1显示的各扰动模型经Blackman窗STFT变换后, 得出时域最大幅值向量  $A_{\text{max}}$ 。图2显示了各扰动模型经Blackman窗STFT变换后得出的  $A_{\text{max}}$  二维曲线。

图2清晰地表示出了各种扰动的特征。其中, 对于电压突升、电压暂降、电压中断和暂态振荡,  $A_{\text{max}}$  二维图不仅能显示扰动变化趋势, 还能准确显示扰动的发生时刻和持续时间。由此可将  $A_{\text{max}}$  作为扰动的特征向量, 对各扰动模型进行正确的识别。



(a) 各种扰动经STFT变换的2D图



(b) 各种扰动经STFT变换的2D图

图 2 各种扰动的 STFT 变换结果

Fig.2 The short time Fourier transform results of each disturbance

## 3 基于 DAG 的支持向量机

支持向量机的基本思想为: 首先选择一个非线性

性映射, 将输入向量映射到高维特征空间, 并利用原空间的核函数取代高维特征空间中的点积运算, 从而降低了计算的复杂性。在高维特征空间中, 根据结构风险最小化原则, 构造出最优决策函数。具体算法如下。

假定给定训练样本  $\{x_i, y_i\} (i=1, 2, \dots, n)$ ,  $n$  为样本总数,  $x_i \in R^d$ ,  $y_i \in \{-1, 1\}$ , 用非线性映射  $\varphi(\cdot)$  将样本从原空间  $R^d$  映射到高维特征空间, 并在此高维空间构造如式 (4) 最优线性决策函数:

$$f(\mathbf{x}) = \text{sgn}[\mathbf{w}^T \cdot \varphi(\mathbf{x}) + b] \quad (4)$$

式中:  $\mathbf{w}$  为权向量,  $\mathbf{w} \in R$ ;  $b$  为实常数。

对于线性不可分情况, SVM引入松弛因子和惩罚因子, 根据结构风险最小化准则, 得出目标函数。

$$\min \frac{1}{2} \|\mathbf{w}\|^2 + c \sum_{i=1}^n \xi_i \quad (5)$$

$$\text{s.t. } y_i [\mathbf{w}^T \cdot \varphi(\mathbf{x}) + b] \geq 1 - \xi_i \quad (6)$$

式中:  $i=1, 2, \dots, n$ ;  $\xi_i$  为松弛因子,  $\xi_i \geq 0$ ;  $c$  为惩罚因子,  $c > 0$ , 它控制对错分样本惩罚的程度。

根据Merce条件, 定义如式 (7) 核函数:

$$K(x_i, x_j) = \varphi(x_i)^T \varphi(x_j) \quad (7)$$

通过引入拉格朗日函数及根据KKT (Karush-Kuhn-Tucker) 优化条件, 其中  $\alpha_i$  为拉格朗日乘子, 并求解其对偶二次规划问题, 得出线性分类器为

$$f(\mathbf{x}) = \text{sgn}[\sum_{i=1}^n \alpha_i y_i K(\mathbf{x}, x_i) + b] \quad (8)$$

由于支持向量机是一个求解凸二次规划问题, 其解只依赖于所谓的“支持向量”, 所以不仅能保证所得极值解就是全局最优解, 而且需要的样本数很少, 从而较好地解决了小样本、非线性、高维数和局部极小点等实际问题。支持向量机只能解决两值分类问题, 若将其推广到多分类问题, 需要构造多分类器, 而且要给不同类别赋予不同的标签值, 表1给出本文不同扰动类型的标签值。

目前常见的多分类器构造方法是通过组合多个两类分类器。这类方法目前主要有两种分支算法: 1对多算法和一对一算法。一对多算法对于  $N$  类问题需要构造  $N$  个两类分类器, 并将第  $i$  个SVM用第  $i$  类中的训练样本作为正的训练样本, 而将其他的样本作为负的训练样本进行分类<sup>[12]</sup>。其缺点是有可能出现分类重叠、不可分类现象, 而且需要每次分类都要考虑所有样本, 训练时间长。本文多分类器采用一对一算法, 虽然需要构造  $N(N-1)/2$  个分类器, 但其组织形式按DAG进行, 如图3所示。采用此方法可

以避免分类重叠、不可分类现象, 而且调用的样本数少, 分类速度比一对多的快, 缺点是如果第一次出现分类错误, 就会有错误积累, 故本文将特征向量相似度最小的扰动模型1和8 (标签值) 作为第一个分类器, 将特征向量相似度最大的扰动模型4和5以及5和6放在最后分类, 以减少错误积累。

表1 各种扰动的标签值

Tab.1 Labels of each disturbance	
电能质量扰动类型	标签值
电压突升	1
暂态振荡	2
电压暂降	3
电压尖峰	4
谐波	5
电压缺口	6
电压闪变	7
电压中断	8

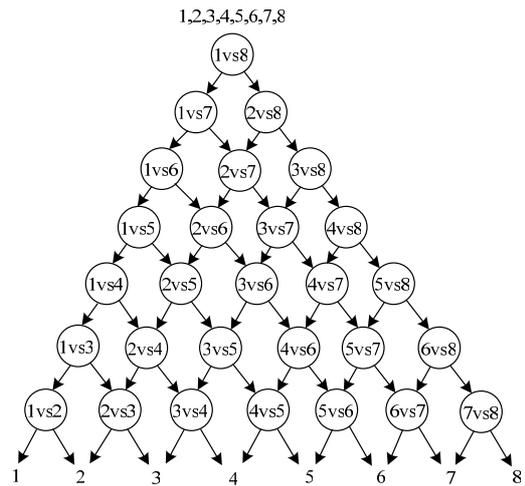


图3 基于DAG的多分类器

Fig.3 Multiclass classification based on directed acyclic graph

## 4 仿真实例

各种电能质量扰动信号根据前面第二节如图1仿真产生, 另外分别是在无噪声、信噪比为40 dB和30 dB这三种情况下, 每种情况的各种扰动均产生100组样本, 其中30组用于训练, 70组用于检测。具体仿真步骤如下: ①将各种扰动信号的前30组样本进行Blackman窗STFT变换, 提取出时域最大幅值矩阵  $A_{\max}$ ; ②将  $A_{\max}$  作为特征向量输入到DAGSVMs中, 其中DAGSVMs分类器的组合按图4进行, 其核函数选取高斯径向核函数  $K(x_i, x_j) = \exp(-\gamma \|x_i - x_j\|^2)$ , 其中参数  $C$ 、 $\gamma$  的取值范围分别是  $(0, 100)$ ,  $(0.1,$

10)。通过枚举搜索法得出最优参数，并用交叉验证（Cross Validation）来检验分类器性能；③将各种扰动信号的后70组样本进行Blackman窗STFT变换并提取出时域最大幅值矩阵  $A_{t,max}$ ，然后输入到在②获得最优参数的DAGSVMs中，由此得出分类正确率。表2给出具体测试结果。

表2 扰动识别测试结果

Tab.2 Result of disturbance recognition tests

电能质量扰动类型	无噪声		信噪比 40 dB		信噪比 30 dB	
	检测	错分	检测	错分	检测	错分
	样本数	数	样本数	数	样本数	数
电压突升	70	0	70	0	70	0
暂态振荡	70	0	70	0	70	0
电压暂降	70	0	70	0	70	0
电压尖峰	70	0	70	0	70	1
谐波	70	0	70	3	70	6
电压缺口	70	0	70	0	70	2
电压闪变	70	0	70	0	70	2
电压中断	70	0	70	0	70	0
正确率/%	100		99.46		98.04	

## 5 结论

短时傅里叶变换可以用来提取扰动信号的特征向量，而且可以利用FFT实现快速运算。经过Blackman窗短时傅里叶变换得出的时域最大幅值向量  $A_{t,max}$  作为扰动特征向量，不仅信息量小、形式统一，而且能正确表明各扰动的区别。将其输入到DAGSVMs，即使在小样本和噪声的情况下，仍能快速、准确地获得分类结果。

## 参考文献

[1] 徐永海, 肖湘宁, 杨以涵, 等. 基于dq变换和ANN的电能质量扰动辨识[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(14): 24-28.  
XU Yong-hai, XIAO Xiang-ning, YANG Yi-han, et al. Power quality disturbance identification using dq conversion-based neural classifier[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(14): 24-28.

[2] 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.  
YUE Wei, LIU Pei. Detection of power quality disturbances based on mathematical morphology(MM) filter[J]. Automation of Electronic Power Systems, 2002, 26(7): 13-17.

[3] 李天云, 赵妍, 李楠, 等. 基于HHT的电能质量检测新方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(17): 52-56.  
LI Tian-yun, ZHAO Yan, LI Nan, et al. A new method for power quality detection based on HHT

[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(17): 52-56.

[4] 占勇, 程浩忠, 丁屹峰, 等. 基于S变换的电能质量扰动支持向量机分类识别[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 51-56.  
ZHAN Yong, CHENG Hao-zhong, DING Yi-feng, et al. S-transform-based classification of power quality disturbance signals by support vector machines[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4), 51-56.

[5] 付娟, 周汉勇, 姜勤. 基于S变换的暂态电能质量扰动检测与仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(21): 86-89.  
FU Juan, ZHOU Han-yong, JIANG Qin. Power quality detection and simulation using S-transform[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(21): 86-89.

[6] 张全明, 刘会金. 最小二乘支持向量机在电能质量扰动分类中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(1): 106-110.  
ZHANG Quan-ming, LIU Hui-jin. Application of LS-SVM in classification of power quality disturbances[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(1): 106-110.

[7] 赵凤展, 杨仁刚. 基于时域、小波变换和FFT的电能质量扰动识别[J]. 继电器, 2006, 34(8): 50-55.  
ZHAO Feng-zhan, YANG Ren-gang. Power quality disturbances classification based on time-domain, wavelet transform and FFT[J]. Relay, 2006, 34(8): 50-55.

[8] 胡为兵, 李开成. 基于小波与多维分形的电能质量扰动分类[J]. 继电器, 2008, 36(5): 45-48.  
HU Wei-bing, LI Kai-cheng. Power quality disturbances classification based on wavelet transform and multifractal analysis[J]. Relay, 2008, 36(5): 45-48.

[9] Youssef A M, Abdel Galil TK, El Saadany E F, et al. Disturbance classification utilizing dynamic time warping classifier[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19(1): 272-278.

[10] 全惠敏, 戴瑜兴. 基于S变换模矩阵的电能质量扰动信号检测与定位[J]. 电工技术学报, 2007, 22(8): 119-125.  
QUAN Hui-min, DAI Yu-xing. Detection and localization of power quality disturbances based on S-transform module matrixes [J]. Transactions of China Electrontechnical Society, 2007, 22(8): 119-125.

[11] 赵凤展, 杨仁刚. 基于短时傅里叶变换的电压暂降扰动检测[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(10): 28-34.  
ZHAO Feng-zhan, YANG Ren-gang. Voltage sag disturbance detection based on short time fourier transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(10): 28-34.

[12] 吕干云, 程浩忠, 郑金菊, 等. 基于S变换和多级SVM的电能质量扰动检测识别[J]. 电工技术学报, 2006, 21(1): 121-126.

(下转第 103 页 continued on page 103)

- [3] 安德洪, 韩文秀, 岳毅宏. 组合预测法的改进及其在负荷预测中的应用[J]. 系统工程与电子技术, 2006, 26 (6) : 842-844.  
AN De-hong, HAN Wen-xiu, YUE Yi-hong. Improved combination forecast method and its application in short-term load forecasting of a power system[J]. Systems Engineering and Electrons, 2006, 26 (6) : 842-844.
- [4] 牛东晓, 贾建荣. 改进 GM (1, 1) 模型在电力负荷预测中的应用[J]. 电力科学与工程, 2008, 24 (4): 28-30.  
NIU Dong-xiao, JIA Jian-rong. Application of improved GM (1, 1) model in load forecasting[J]. Electric Power Science and Engineering, 2008, 24 (4): 28-30.
- [5] 王成山, 杨军, 张崇见. 灰色系统理论在城市年用电量预测中的应用——不同预测方法的分析比较[J]. 电网技术, 1999, 23 (2): 15-18.  
WANG Cheng-shan, YANG Jun, ZHANG Chong-jian. Application of grey system theory in city electricity demand forecasting[J]. Power System Technology, 1999, 23 (2) : 15-18.
- [6] 王吉权, 赵玉林. 组合预测法在电力预测中的应用[J]. 电力自动化设备, 2004, 24 (8) : 92-94.  
WANG Ji-quan, ZHAO Yu-lin. Application of combination forecasting method in power load forecast[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24 (8) : 92-94.
- [7] 李元诚, 方廷健, 于尔铿. 短期负荷预测的支持向量机方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (6) : 55-59.  
LI Yuan-cheng, FANG Ting-jian, YU Er-keng. Study of support vector machines for short-term load forecasting[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (6) : 55-59.
- [8] 张伏生, 刘芳, 赵文彬, 等. 灰色 Verhulst 模型在中长期负荷预测中的应用[J]. 电网技术, 2003, 27 (5): 37-39.  
ZHANG Fu-sheng, LIU Fang, ZHAO Wen-bin, et al. Application of grey verhulst model in middle and long term load forecasting[J]. Power System Technology, 2003, 27 (5) : 37-39.
- [9] 吴景龙, 杨淑霞, 刘承水. 基于遗传算法优化参数的支持向量机短期负荷预测方法[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2009, 40 (1) : 180-184.  
WU Jing-long, YANG Shu-xia, LIU Cheng-shui. Parameter selection for support vector machines based on genetic algorithms to short-term power load forecasting[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2009, 40 (1): 180-184.
- [10] 牛东晓. 电力负荷预测技术及其应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.  
NIU Dong-xiao. Power load forecasting technology and its applications[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1998.
- [11] 杨桂元. 残差绝对值之和最小准则下回归方程的求解[J]. 运筹与管理, 2001, 10 (1) : 20-23.  
YANG Gui-yuan. Solution to regression equations on the rule of minimum sum of absolute errors[J]. Operations Research and Management Science, 2001, 10 (1) : 20-23.
- [12] Denning P J. Genetic algorithms[J]. Journal of Parallel and Computing, 1992, 80 (1) : 354-360.
- [13] 康重庆, 夏青, 沈瑜, 等. 电力系统负荷预测的综合模型[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 1999, 39 (1) : 8-11.  
KANG Chong-qing, XIA Qing, SHEN Yu, et al. Integrated model of power system load forecasting[J]. Tsinghua Univ: Sci & Tech, 1999, 39 (1) : 8-11.

收稿日期: 2010-01-04; 修回日期: 2010-04-06

作者简介:

周德强 (1974-), 男, 硕士, 讲师, 现主要从事机器学习、模式识别、系统工程理论方面的研究。E-mail: zdqmfk@yahoo.com.cn

(上接第 86 页 continued from page 86)

Lü Gan-yun, CHENG Hao-zhong, ZHENG Jin-ju, et al. Power quality disturbances detection and identification based on S-transform and multi-layer SVMs[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(1): 121-126.

收稿日期: 2010-01-13

作者简介:

覃思师 (1987-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电能质量分析; E-mail: jas7442003@163.com  
刘前进 (1967-), 男, 副教授, 主要研究方向为继电保护、电能质量分析。