

S变换在电能质量扰动分析中的应用综述

易吉良^{1,2}, 彭建春², 谭会生¹

(1. 湖南工业大学电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412008; 2. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 结合国内外采用S变换应用于电能质量扰动分析的现状, 对基于S变换的电能质量扰动检测、识别以及其他方面的应用进行了分类和总结。分析了S变换结合各种人工智能与数学工具在进行电能质量扰动分析时的优势和不足, 介绍了近年来利用广义S变换、改进S变换和双曲S变换等其他形式S变换在电能质量扰动分析中的应用情况。最后对S变换应用于电能质量扰动分析的发展趋势以及值得进一步研究的问题进行了展望。

关键词: 电能质量; S变换; 检测; 分类; 应用

A summary of S-transform applied to power quality disturbances analysis

YI Ji-liang^{1,2}, PENG Jian-chun², TAN Hui-sheng¹

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412008, China;

2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: On the basis of the application status of S-transform in power quality disturbances analysis at home and abroad, the S-transform based power quality disturbance detection, classification and application in other aspects are summarized and classified. The advantages and disadvantages of using S-transform combining with various artificial intelligent and mathematical tools to analyze power quality disturbance are analyzed. The situation of other forms of S-transform in recent years such as generalized S-transform, modified S-transform and hyperbolic S-transform applied to power quality disturbance analysis is introduced. Finally, the developing trend and further issues of using S-transform to analyze power quality disturbance are presented.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50677015).

Key words: power quality; S-transform; detection; classification; application

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)03-0141-07

0 引言

电能质量扰动 (Power Quality Disturbances, PQD) 会导致设备过热、电机停转、保护失灵以及计量不准等严重后果, 因此电能质量问题引起了广泛的关注。有效的PQD分析是治理电能质量的基础, 只有正确识别影响电能质量的诸多因素, 查明相应的起因和来源, 检测、分类并统计扰动现象, 确定扰动范围和幅值, 才能从根本上综合治理并提高系统电能质量。而PQD分析主要包括PQD信号的消噪、特征提取、扰动分类和参数估计等四方面的内容^[1-2]。

PQD类型较多, 可以分为稳态和暂态两大类, 单一的时域或频域方法难以胜任所有类型的PQD

分析, 因此, 时频分析方法成了PQD分析的常用工具。最初, 基于小波变换的方法最受研究者的青睐, 但小波变换不能单独提取任意频次的信号, 而且小波系数受噪声影响较大, 这些缺陷使其无法定量检测含噪或含谐波的扰动信号的幅值特征^[3]。而短时傅里叶变换存在需要选择窗口类型和宽度以及窗口宽度固定等缺陷, 使其在PQD分析中的应用受到了限制。作为小波变换和短时傅里叶变换的继承和发展, S变换采用高斯窗函数且窗宽与频率的倒数成正比, 免去了窗函数的选择和改善了窗宽固定的缺陷, 并且时频表示中各频率分量的相位谱与原始信号保持直接的联系, 使其在PQD分析中可以采用更多的特征量, 同时, S变换提取的特征量对噪声不敏感, 因此, 近年来众多学者纷纷采用S变换并结合其他分析工具应用于PQD的分析, 产生了大量研究成果。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50677015)

1 S 变换在 PQD 分析中的应用

目前，在所有关于 S 变换应用于 PQD 分析的报道中，将 S 变换应用于 PQD 检测和分类的研究成果最多，同时也出现了线路保护和故障源定位等与 PQD 有关的其他方面的应用。

1.1 基于 S 变换的 PQD 检测

PQD 检测包括扰动起止时刻的定位、扰动持续时间和扰动幅值的测量等方面的内容。文献[4]首次提出采用 S 变换模矩阵的等值线检测扰动的发生，并发现时频曲线的标准差与扰动幅值存在一一对应关系，可以用来测量扰动幅值，但该文对 S 变换应用于 PQD 检测仅是探索性的，并未形成一套完整可行的方法。文献[5]同样采用 S 变换模矩阵等值线标准差检测是否有扰动，然后采用卡尔曼滤波技术测量扰动幅值、频率、谐波含量等，测量误差小于 0.5%。文献[6]举例说明了 S 变换在检测 PQD 方面有优于小波方法的抗噪能力，但并未给出具体的检测内容和方法。文献[7]利用 S 变换模时频矩阵的时间幅值向量测量 PQD 的 4 项指标，即：有效值、总谐波畸变率、波顶因素、形状因子。分别采用仿真波形和实验装置产生的实际波形验证了所提方法的准确性，算例中考虑了谐波和振荡暂态情况，但没有扰动频率的确定方法和振荡衰减因子的求解方法，也没有考虑噪声因素。文献[8]利用 S 变换模时频矩阵提取 2 倍基频幅值曲线、幅频特性曲线和 1/2 基频幅值曲线，用以检测 PQD 起止时刻、持续时间、扰动频率、扰动幅度等电能质量参数，有较高的检测精度，但定位复合扰动起止时刻采用 1/2 基频幅值曲线包络，该包络线对起止时刻并没有明确的刻画能力。文献[9]根据 S 变换模矩阵的等值线在扰动起止时刻的尖峰凸起实现对扰动起止时刻和持续时间的确定，同时利用 S 变换幅值包络实现扰动幅值的检测，方法简单且精度高，但考虑的扰动类型有限。文献[10]采用 S 变换模矩阵的时间幅值平方和均值能够更有效地定位扰动起止时刻，但未考虑噪声和起止时刻发生在过零点的影响，有鉴于此，文献[11]利用时间基频幅值差分向量定位扰动起止时刻克服了上述不足。

目前 S 变换应用于 PQD 检测主要集中于扰动频率与幅值、扰动起止时刻与持续时间这些常规参数的检测，而且只是考虑了稳态或存在稳定段的扰动幅值检测，对不存在稳定段的暂态扰动如振荡暂态、脉冲暂态等幅值的检测并没有提出有效的方法，同时对于 S 变换应用于振荡暂态衰减因子、电压切口深度及宽度等参数的检测尚未见文献报道。

1.2 基于 S 变换的 PQD 分类

PQD 的识别实际就是一个模式分类问题^[12]，其关键思想是针对 PQD 特征选定一个较优的分类器进行模式识别。目前，基于 S 变换的 PQD 识别方法一般是从待分析的 PQD 信号的 S 变换模矩阵中提取特征，然后借助人工智能分类器实现分类，分类算法的简要过程见图 1。

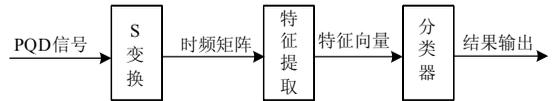


图 1 基于 S 变换的 PQD 检测和分类算法框图

Fig.1 Block diagram of S-transform-based PQD detection and classification

1.2.1 基于 S 变换和人工神经网络的 PQD 分类

在所有基于 S 变换的 PQD 分类方法中，由于人工神经网络 (Artificial Neural Network, ANN) 具有自组织、自学习、容错能力较强和并行处理的优点，S 变换结合 ANN 的模式分类是至今为止使用最多的一种 PQD 分类方法。

文献[13]将 PQD 信号进行 S 变换后，提取了 3 个特征量，分别借助前向神经网络和概率神经网络实现了 8 种单一扰动和 2 种复合扰动的识别，该方法提取的特征量较少，但需要增加 ANN 的前处理和后处理环节。文献[14]将 S 变换提取的特征矢量输入扩张 ANN，采用子网结构实现了 6 种单一 PQD 和 6 种复合 PQD 的分类，分类器结构简单，训练快速，分类效果好，易于扩展和修改，但文中采用特征的特征矢量维数较高，增加了算法的复杂性。文献[15]从 S 变换提取了 11 个特征量，然后利用概率 ANN 实现了 4 种单扰动和 2 种复合扰动的识别，分类准确率很高，但提取的特征量较多而考虑的扰动类型有限。文献[16]提出了基于 S 变换的径向基函数 ANN 分类器的 PQD 识别方法，采用 S 变换系数的极值作为特征向量，分类器采用两个 ANN 模块，其中离线模块用于训练，在线模块用于测试，ANN 采用 8 个子网，每个子网用于识别一种 PQD，其好处是当有新的 PQD 类型加入，只要增加相应的子网即可，不需要重新训练已有的子网，但会使得整个网络的规模越来越庞大。文献[17]详细讨论了 S 变换特征量的选取问题，分别将 14 种特征量的各种组合分别输入 ANN 进行识别准确性测试，最终确定了最有效的由 4 个特征量组成的特征向量，在不损失分类准确率的基础上降低了特征空间的维数，进而减少了存储器空间，降低了处理难度和 ANN 的规模，提高了计算的速度。

ANN 具有简单的结构和很强的问题求解能力, 且可较好地处理噪声数据, 是分类识别的重要方法, 但是它自身有几个比较大的缺陷, 如算法存在局部最优问题, 收敛性较差, 训练时间较长, 易过拟合, 可靠性有限等^[18]。因此, 将其与其他智能技术(如模糊理论、专家系统)相结合是未来 PQD 分类方法的发展趋势。

1.2.2 基于 S 变换和支持向量机的 PQD 分类

支持向量机(Support Vector Machine, SVM)克服了 ANN 诸如局部最优、过学习和难以选择网络结构等缺陷, 因而也常用于 PQD 的分类, 近几年结合 S 变换也出现了一些研究成果。

文献[19]将 S 变换和 SVM 相结合, 通过组合多个二叉树形成 SVM 分类树, 实现了 7 种单一类型 PQD 的识别。文献[20]通过 S 变换对 3 种最常见的 PQD 信号进行时频特征提取, 通过 3 级 SVM 分类器实现电能质量扰动信号的分类识别, 与 SVM 分类树相比, 该方法容易实现, 但生成的分类器模型太多, 当扰动样本类别较多时使得训练速度非常慢。上述两种方法能有效识别参数大范围内随机变化的各种 PQD, 识别正确率高, 训练时间短, 但提取的特征量较多, 且考虑的扰动类型较少。文献[21]提出了基于 S 变换和 SVM 的三相电力系统的 PQD 分类方法, 其算法由 S 变换提取的特征量较多(9 个), 不过考虑了 20 种扰动类型, 其中包括 14 种复合扰动, 识别的准确率较高, 但未考虑噪声的影响。文献[22]从 PQD 信号的 S 变换结果中提取特征向量, 使用最小输出编码的最小二乘 SVM 对扰动信号进行训练, 实现电能质量扰动信号的识别, 准确率很高, 但考虑的扰动类型较少。由于最小二乘 SVM 优化指标采用平方项, 并用等式约束代替标准 SVM 的不等式约束, 降低了问题的复杂度, 从而加快了求解速度, 提高了实时性。

SVM 对小样本分类的训练时间短, 误识率低, 但当样本数量增加且样本间存在相互混叠时, 支持向量数目迅速增加, 使训练难度增大, SVM 的性能明显下降, 而此时神经网络则表现出良好的分类效果^[12]。针对不同样本情形, 确定从 S 变换提取特征量的最优组合, 以及控制特征向量维数, 是基于 S 变换和 SVM 的 PQD 识别需要重点解决的问题。

1.2.3 基于 S 变换和规则判别的 PQD 分类

规则判别方法是借助于简单的“IF-THEN”规则实现模式分类, 涉及的具体方法有: 专家系统、模糊逻辑、决策树等方法, 由于这些方法原理简单和容易理解, 不需要像神经网络那样当出现新的扰动类型时需重新构建网络, 进行大量的训练, 因此,

规则判别方法在 PQD 分类中获得了广泛应用。

文献[23-24]首先从 PQD 信号的 S 变换矩阵提取特征量, 然后分别利用专家系统和简单的决策流程实现电压凹陷的分类, 两种方法全面考虑了多种电压凹陷, 用到的判别规则简单明确, 分类准确率高, 但没有考虑多种原因共同导致电压凹陷的识别问题。文献[25]从 S 变换提取 9 个特征量, 然后采用两级规则分类器实现对实际 PQD 的分类, 两级分类器分别包含 2 条和 9 条规则, 分类准确率为 100%, 但考虑的样本相对较少, 所提取的特征量较多, 并且是针对特定实际场合, 推广到其他场合的稳健性有待考察。文献[26]从 S 变换得到 PQD 的 5 个特征量后, 采用分类树实现了 8 种单一扰动和 2 种复合扰动的识别, 但电压凹陷和中断的区分仍需时域方式实现。文献[27-28]利用 S 变换提取了 5 个特征量后, 分别采用 12 条和 14 条模糊规则实现 PQD 的分类, 前者分类准确率很高, 且对噪声具有鲁棒性, 而后的分类准确率受噪声的影响较大, 其关键原因是前者采用了自适应群粒子技术对隶属度函数进行了优化, 说明这类方法的分类性能对隶属度函数的依赖性很大。

规则分类方法的最显著特点是当有新的扰动类型加入时, 只需增加相应的规则即可实现有效识别, 不用对以前的规则做彻底修改。但随着扰动的增多, 系统的容错能力和复杂程度将会限制其分类性能。利用 S 变换提供的丰富的 PQD 时频特征, 针对不同应用场合, 提取重叠度很低的特征量, 为有效分类规则的制定提供良好基础是基于 S 变换和规则判别方法的 PQD 分类的研究重点。

1.2.4 其他基于 S 变换的 PQD 分类方法

除上述几种常用的基于 S 变换的分类算法外, 还有利用矩阵相似度和贝叶斯作为分类器构成的 PQD 分类方法。文献[29-30]通过计算 PQD 信号的 S 变换矩阵与各类扰动标准模板之间的相似度, 按照相似度最大的原则将 PQD 信号进行分类, 这种方法分类过程简单, 不需要借助额外的分类器而直接实现分类, 但由于各种扰动的持续时间和扰动幅值存在不确定性, 很难针对每种扰动建立统一的标准模板。同时, 由于需要使用 S 变换的所有元素, 该方法的计算量较大。文献[18]从 PQD 信号的 S 变换矩阵提取 8 个特征量, 然后借助于朴素贝叶斯分类器实现了 8 种扰动的分类, 这种分类器结构简单, 但它假设一个特征属性对给定类的影响独立于其他特征属性, 而实际上 PQD 的特征属性之间存在依赖性, 同时, 贝叶斯算法需要知道各类的先验概率, 这通常难以获得, 只能假设为等概率, 但这又不符

合实际情况。

综上所述, 基于 S 变换的 PQD 分类虽然方法众多, 但各有长短, 没有一种方法是万能的, 应结合具体应用场合, 选择最有效的方法。同时, 结合各方法的长处开发新的 PQD 分类方法, 值得进一步研究, 而前提是从 S 变换提取有效的特征量。

除检测和分类之外, S 变换近来也出现在线路故障源定位^[31-32]、变压器和雷击故障的识别和保护策略的制定^[33-34]、以及电信号去噪^[35]等与 PQD 有关的应用中。S 变换在 PQD 相关领域的应用越来越广, 结合应用实际, 将其应用到如 PQD 信号的去噪、扰动源的定位以及治理 PQD 的控制策略等方面值得做进一步的研究。

2 其他形式的 S 变换在 PQD 分析中的应用

S 变换的高斯窗宽虽然随频率变化, 但其与频率呈反比的特性使其仍然是“相对固定”的, 为了针对不同情况获得最优的时频分辨率, 一些学者提出了时频分辨率可调的其他形式的 S 变换。

广义 S 变换通过增加高斯窗函数的窗宽调整因子非常方便地实现了时频分辨率调整^[36], 文献[37-39]利用广义 S 变换提取 PQD 信号的特征量, 然后分别采用决策树、人工免疫系统以及模糊分类器实现了 PQD 的识别, 分类效果较好, 但由于 PQD 的类型较多, 各种类型时频分布有较大差异, 因此上述文献在确定窗宽因子时尚缺乏明确的理论依据。文献[40]提出了伪高斯窗函数的双曲 S 变换用于 PQD 的识别, 双曲 S 变换的思想是不仅窗函数宽度随频率变化, 窗函数的形状也是不对称的, 这样可以保证在加窗部分也与频率存在关联性, 以获得更优的时频分辨率。文中采用基于遗传算法的模糊 C 均值的聚类方法实现 PQD 的识别, 分类效果好, 但算法的实时性较差。改进 S 变换在广义 S 变换的基础上, 使窗宽与频率平方根的倒数成正比, 改善了白噪声的 S 变换功率谱随频率增高而线性增大的缺点, 更适合分析含噪信号^[41]。文献[42]提出利用改进 S 变换估计 PQD 信号噪声水平的方法, 其窗宽因子通过改进 S 变换模矩阵能量聚集度确定, 在采样率达到一定程度时估计的噪声方差有很高的可信度, 该方法有望用于 PQD 信号的去噪。文献[11]提出的不完全 S 变换通过分析 S 变换的计算过程, 只针对 FFT 的主要频率点进行 S 变换的后续计算, 在保证 PQD 检测精度的基础上大大减少了运算时间, 便于实时应用。

由上述可知, 其他形式的 S 变换也主要是应用在 PQD 的识别和检测方面, 在发掘窗宽因子确定的

理论依据以及发展新的 S 变换形式等方面值得进一步的研究。

3 总结

PQD 的多样性和不稳定性表现为时频分布上宽泛性, 对 PQD 分析需要合适的时频工具, S 变换优良的时频特性为精确分析 PQD 信号提供了可能, 但其目前在 PQD 应用主要还是检测和分类, 其他方面的应用尚处于起步阶段, 结合本文分析, S 变换应用于 PQD 分析至少需要在以下几方面做进一步的研究。

(1) S 变换的结果是二维复矩阵, 能够提供丰富的时频信息, 其相位与原始信号保持直接的联系, 而目前对 S 变换相位信息的利用很少, PQD 的某些应用如扰动源的定位利用相位信息比幅值信息应该更有效。

(2) 由于 S 变换的运算量很大, 在实际应用时对计算环境会有很高的要求, 因此, 对 S 变换算法或计算过程进行改进, 在保证 PQD 分析精度的基础上提高其运算实时性, 是其现实广泛应用的前提。同时, S 变换在 PQD 分析的应用尚处于算法仿真阶段, 其在具体硬件环境中的实现及实际应用效果的评价鲜见报道。

(3) 对 PQD 最精确和全面的检测应该是将描述其数学模型的所有参量进行准确的估计, 而目前 S 变换应用于 PQD 检测主要集中于稳态扰动的参数检测, 对暂态扰动如振荡暂态的最大幅值和衰减因子等参量的检测并没有提出有效的方法。

(4) S 变换作为 PQD 信号的特征提取工具, 如何针对具体应用情况从 S 变换提取最有效的特征量尚缺乏全面和系统的研究。

(5) 除检测和分类之外, S 变换在 PQD 其他方面的应用如信号去噪、扰动源定位尚不多见, 同时, 开发新形式的 S 变换为 PQD 分析提供更适宜的时频分辨率, 研究确定最优时频分辨率的理论依据也值得进一步研究。

可以预见的是, 随着 S 变换理论不断发展及其在 PQD 分析中的应用不断深入, S 变换必将在 PQD 分析领域发挥更大的作用。

参考文献

- [1] 王晶, 束洪春, 陈学允. 人工智能和数学变换用于电能质量的研究综述[J]. 继电器, 2004, 32 (2): 34-40. WANG Jing, SHU Hong-chun, CHEN Xue-yun. A summary of AI & mathematics transform applied to power quality study[J]. Relay, 2004, 32 (2): 34-40.
- [2] 冯宇, 唐轶, 吴夕科. 采用电量参数分析方法的电能

- 质量扰动参数估计[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29 (16): 100-107.
- FENG Yu, TANG Yi, WU Xi-ke. Parameter estimation method of power quality disturbances based on electrical parameters analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29 (16): 100-107.
- [3] 赵凤展, 杨仁刚. 时频分析方法在电能质量扰动检测与识别中的应用[J]. 华北电力大学学报, 2006, 33 (5): 33-37.
- ZHAO Feng-zhan, YANG Ren-gang. Application of time-frequency transform to detection and recognition of power quality disturbance[J]. Journal of North China Electric Power University, 2006, 33 (5): 33-37.
- [4] Dash P K, Panigrahi B K, Panda G. Power quality analysis using S-transform[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2003, 18 (2): 406-411.
- [5] Dash P K, Panigrahi B K, Sahoo. Power quality disturbance data compression, detection, and classification using integrated spline wavelet and S-transform[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2003, 28 (2): 595-600.
- [6] Mishra S, Bhende C N, Panigrahi B K. Detection and classification of power quality disturbances using S-transform and probabilistic neural network[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2008, 23 (1): 280-287.
- [7] Gargoom Ameen, Ertugrul Nesimi, Soong W L. Power quality indices measurement using the S-transform[J]. International Journal of Power and Energy Conversion, 2009, 1 (1): 31-48.
- [8] 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.
- [9] 刘守亮, 肖先勇, 杨洪耕. 基于 S 变换时频等值线图与幅值包络线的短时电能质量扰动检测与分类[J]. 继电器, 2005, 33 (22): 49-52.
- LIU Shou-liang, XIAO Xian-yong, YANG Hong-geng. Detection and classification of short duration power quality disturbances based on time-frequency contour and amplitude envelope of S transform[J]. Relay, 2005, 33 (22): 49-52.
- [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 Electrotechnical Society, 2007, 22 (8): 119-125.
- [11] 易吉良, 彭建春, 谭会生. 采用不完全 S 变换的电能质量扰动检测方法[J]. 高电压技术, 2009, 35 (10): 2562-2567.
- YI Ji-liang, PENG Jian-chun, TAN Hui-sheng. Detection method of power quality disturbances using incomplete S-transform[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35 (10): 2562-2567.
- [12] 方群会, 刘强, 周林, 等. 模式分类方法在电能质量扰动信号分类中的应用综述[J]. 电网技术, 2009, 33 (1): 31-36.
- FANG Qun-hui, LIU Qiang, ZHOU Lin, et al. A survey on application of pattern classification in power quality disturbance signals classification[J]. Power System Technology, 2009, 33 (1): 31-36.
- [13] Lee I W C, Dash P K. S-transform-based intelligent system for classification of power quality disturbance signals[J]. IEEE Transaction on Industrial Electronics, 2003, 50 (4): 800-805.
- [14] 何为, 杨洪耕. 基于 S 变换和扩张神经网络的电能质量扰动分类[J]. 继电器, 2007, 35 (5): 63-68.
- HE Wei, YANG Hong-geng. Power quality disturbances classification based on S-transform and extension neural network[J]. Relay, 2007, 35 (5): 63-68.
- [15] 唐求, 王耀南, 郭斯羽, 等. 基于 S 变换与 PNN 的电能质量多扰动检测[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30 (8): 1668-1673.
- TANG Qiu, WANG Yao-nan, GUO Si-yu, et al. Power quality disturbance detection based on S-transform and PNN[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30 (8): 1668-1673.
- [16] Tong Wei-ming, Song Xue-lei. A parallel RBFNN classifier based on S-transform for recognition of power quality disturbances[C]. //proceeding of the 4th international symposium on neural networks: part II -advances in neural network. Nanjing(China): 2007: 746-755.
- [17] Murat Uyar, Selcuk Yildirim, Muhsin Tunay Gencoglu. An expert system based on S-transform and neural network for automatic classification of power quality disturbances[J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36 (3): 5962-5975.
- [18] 舒泓. 电能质量扰动检测和分类问题的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
- SHU Hong. Research of power quality disturbances' detection and classification[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008.
- [19] 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.
- [20] 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.
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.
- [21] Faisal M F, Mohamed A, Hussain A, et al. Support vector regression based S-transform for prediction of single and multiple power quality disturbances[J]. European Journal of Scientific Research, 2009, 34 (2): 237-251.
- [22] 王学伟, 张宏财. 基于 S 变换和最小二乘支持向量机的电能质量扰动识别[J]. 电测与仪表, 2009, 46 (8): 1-5.
WANG Xue-wei, ZHANG Hong-cai. Power quality disturbances identification based on S-transform and LS-SVM[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2009, 46 (8): 1-5.
- [23] 杨洪耕, 刘守亮, 肖先勇, 等. 基于 S 变换的电压凹陷分类专家系统[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(1): 98-104.
YANG Hong-geng, LIU Shou-liang, XIAO Xian-yong, et al. S-transform-based expert system for classification of voltage dips[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27 (1): 98-104.
- [24] 杨洪耕, 刘守亮, 肖先勇. 利用 S 变换时频等值线图与幅值包络向量实现电压凹陷的分类[J]. 电工技术学报, 2006, 21 (8): 75-80.
YANG Hong-geng, LIU Shou-liang, XIAO Xian-yong. Classification of voltage dips using time-frequency contour and amplitude envelope vectors by S-transform [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21 (8): 75-80.
- [25] Faisal M F, Mohamed A. Identification of multiple power quality disturbance using S-transform and rule based classification technique[J]. Journal of Applied Sciences, 2009, 9 (15): 2688-2700.
- [26] ZHAO Feng-zhan, YANG Ren-gang. Power quality disturbance recognition using S-transform[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22 (2): 944-950.
- [27] Behera H S, Dash P K. Power quality time series data mining using S-transform and fuzzy expert system[J]. Applied Soft Computing, 2009, 9 (10): 1-11.
- [28] Chilukuri M V, Dash P K. Multiresolution S-transform based fuzzy recognition system for power quality events[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19 (1): 323-330.
- [29] 刘守亮, 肖先勇, 杨洪耕. 基于 S 变换模时频矩阵相似度的短时电能质量扰动分类[J]. 电网技术, 2006, 30 (5): 67-71.
LIU Shou-liang, XIAO Xian-yong, YANG Hong-geng. Classification of short duration power quality disturbance based on module time-frequency matrixes similarity by S-transform[J]. Power System Technology, 2006, 30(5): 67-71.
- [30] 刘鑫, 杨洪耕, 赵俊. 基于 S 变换模时频矩阵局部相似度的短时电能质量扰动分类[J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (8): 62-66.
LIU Xin, YANG Hong-geng, ZHAO Jun. Classification for short duration power quality disturbance based on S-transform with module time-frequency matrix partial similarity[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33 (8): 62-66.
- [31] Samantaray S R, Dash P K. Transmission line distance relaying using a variable window short-time fourier transform[J]. Electric Power Systems Research, 2008, 78 (4): 595-604.
- [32] Samantaray S R, Tripathy L N, Dash P K, et al. S-transform based directional bus-bar protection[C]. // IEEE Region 10 Conference, TENCON. 2008: 1-6.
- [33] Samantaray S R, Panigrahi B K, Dash P K, et al. Power transformer protection using S-transform with complex window and pattern recognition approach[J]. IET Generation Transmission and Distribution, 2007, 1 (2): 278-286.
- [34] 肖先勇, 李逢, 邓武军. 雷击与短路故障的 S 变换特征量识别方法[J]. 高电压技术, 2009, 35 (4): 817-822.
XIAO Xian-yong, LI Feng, DENG Wu-jun. Identification method of lightning stroke and short-circuit faults using S-transformed characteristics[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35 (4): 817-822.
- [35] Chien Chunhuang, Sheng Fuliang, Ming Shing Young, et al. A novel application of the S-transform in removing powerline interference from biomedical signals[J]. Physiological Measurement, 2009, 30 (1): 13-27.
- [36] 高静怀, 满蔚仕, 陈树民. 广义 S 变换域有色噪声与信号识别方法[J]. 地球物理学报, 2004, 22 (5): 869-875.
GAO Jing-huai, MAN Wei-shi, CHEN Shu-min. Recognition of signal from colored noise background in generalized S-transform domain[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2004, 22 (5): 869-875.
- [37] 全惠敏, 戴瑜兴. 电能质量扰动的广义 S 变换分析和决策树算法分类[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2009, 36 (4): 43-47.

- QUAN Hui-min, DAI Yu-xing. Power quality disturbances classification based on generalized S-transform and decision tree[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2009, 36 (4): 43-47.
- [38] 全惠敏, 王炼红, 戴瑜兴. 采用广义 S 变换的电能质量扰动免疫分类算法[J]. 高电压技术, 2009, 35 (9): 2880-2885.
- QUAN Hui-min, WANG Lian-hong, DAI Yu-xing. Power quality disturbances classification using generalized S-transform and artificial immune[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35 (9): 2880-2885.
- [39] 易吉良, 彭建春. 基于广义 S 变换的短时电能质量扰动的模糊模式识别[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36 (22): 20-25.
- YI Ji-liang, PENG Jian-chun. Short duration power quality disturbances fuzzy pattern recognition using generalized S-transform[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36 (22): 20-25.
- [40] Biswal B, Dash P K, Panigrahi B K. Non-stationary power signal processing for pattern recognition using HS-transform[J]. Applied Soft Computing, 2009, 9 (1): 107-117.
- [41] Pinnegar C R, Mansiha L. Time-local spectral analysis for non-stationary time series: the S-transform for noise signal[J]. Fluctuation and Noise Letters, 2003, 3 (3): 357-364.
- [42] 易吉良, 彭建春, 谭会生. 基于改进 S 变换估计电能质量信号的噪声水平[J]. 电网技术, 2009, 33 (20): 71-75.
- YI Ji-liang, PENG Jian-chun, TAN Hui-sheng. Noise estimation of power quality signal based on modified S-transform[J]. Power System Technology, 2009, 33 (20): 71-75.

收稿日期: 2010-02-12; 修回日期: 2010-04-05

作者简介:

易吉良 (1972-), 男, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为电能质量分析和信号处理; E-mail: jiliang-yi@sina.com

彭建春 (1964-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统及其自动化专业的教学和研究工作;

谭会生 (1966-), 男, 硕士, 副教授, 主要从事电子信息 and 计算机应用专业的教学和研究工作。

(上接第 104 页 continued from page 104)

- TIAN Zhi-guo, YI Yong-hui, LIU Chong-xin, et al. Application of FPGA graphic oriented programming in protective relay[J]. Relay, 2006, 34(1): 15-17, 45.
- [8] IEC 61131-1 programmable controllers, part 1: general information[S]. 1992.
- [9] IEC 61131-3 programmable controllers, part 3: programming languages[S]. 2003.
- [10] IEC 61131-8 programmable controllers, part 8: guidelines for the application and implementation of programming languages[S]. 2000.
- [11] Lbrosse J J. 嵌入式实时操作系统 μ C/OS-II [M]. 2 版. 邵贝贝, 译. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003.
- Lbrosse J J. MicroC/OS-II the real-time kernel [M]. Second edition. SHAO Bei-bei, trans. Beijing: Publishing House of Beihang University, 2003.
- [12] 鲁炜, 靳希. 基于实时操作系统的继电保护软件设计[J]. 继电器, 2003, 31 (11): 48-51.
- LU Wei, JIN Xi. Protection relay software designing based on real-time operation system[J]. Relay, 2003, 31 (11): 48-51.
- [13] 徐天奇, 游大海, 李程, 等. 基于 μ C/OS-II 实时操作系统的发电机微机继电保护装置[J]. 电网技术, 2005, 29 (16): 71-75.
- XU Tian-qi, YOU Da-hai, LI Cheng, et al. A micro-computer based relaying protection device for generator based on μ C/OS-II[J]. Power System Technology, 2005, 29 (16): 71-75.
- [14] 王义刚, 许云峰, 张迎春. 基于实时多任务操作系统的微机线路保护装置的研究[J]. 继电器, 2004, 32(8): 56-59.
- WANG Yi-gang, XU Yun-feng, ZHANG Ying-chun. Microcomputer-based line protection development based on real-time operation system[J]. Relay, 2004, 32(8): 56-59.

收稿日期: 2010-02-02; 修回日期: 2010-03-30

作者简介:

仲伟 (1978-), 男, 硕士, 主要研究方向为电力系统继电保护; E-mail: flyeagle@gmail.com

丁宁 (1978-), 男, 硕士, 主要研究方向为电力系统继电保护;

吴参林 (1980-), 男, 硕士, 主要研究方向为电力系统继电保护。