

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201216

电能质量扰动检测的研究综述

王燕

(西南民族大学电气工程学院国家民委重点实验室, 四川 成都 610041)

摘要: 快速、准确、有效的电能质量扰动检测是电网故障分析与治理的前提和基础, 在电力监测、电能质量评估及电网和用户的安全中扮演了重要角色。针对当前国内外相关研究成果进行整合归纳总结。首先, 分析了电能质量扰动检测对象, 归纳电能质量扰动检测的难点问题。其次, 详细综述电能质量扰动检测方法的最新研究进展, 将其分为时域分析、频域分析、时频域分析、参数估计、人工智能五大方面, 并分别对这五个方面的方法进行讨论、对比分析各自利弊等。最后, 指出暂态扰动及其组成的混合扰动检测方面存在的问题, 并对今后的发展趋势进行展望。

关键词: 电能质量; 稳态扰动; 暂态扰动; 检测

Review of research development in power quality disturbance detection

WANG Yan

(Key Laboratory of Electronic Information of State Ethnic Affairs Commission, College of Electrical Engineering, Southwest Minzu University, Chengdu 610041, China)

Abstract: Fast, accurate and effective Power Quality Disturbance (PQD) detection is the requirement and foundation of power grid fault analysis and power quality improvement, and it plays an important role in the safety of the power grid and users, as well as in power quality assessment and power monitoring. The latest domestic and overseas related research results are summarized in this paper. First, the objects of PQD detection are analyzed, and the difficulties of PQD detection are summarized. Second, a detailed review of the latest research progress of PQD detection methods is presented. The research methods are divided into the five major aspects of time domain, frequency domain, and time-frequency domain analysis, parameter estimation and artificial intelligence. The advantages and disadvantages of the five aspects are discussed and compared. Finally, the problems existing in the detection of transients and PQDs are pointed out, and the trend of future development is described.

This work is supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2020QN04).

Key words: power quality; steady-state disturbances; transient disturbances; detection

0 引言

现代电力系统中出现大量非线性、冲击性及波动性等干扰性负荷, 诸如半导体整流器、晶闸管调压及变频调速装置、工业炼钢电弧炉和轧机、家用电器和电气化铁路等, 致使电网发生各种电能质量问题^[1]。除干扰性负荷大量增加外, 电网中敏感性负荷也在不断涌现, 即随着计算机、精加工制造业、电力电子和信息技术等高新技术产业的发展, 用户对电能质量提出越来越高的要求^[1-2]。

电能质量问题会产生诸多危害, 诸如导致设备工作异常、产生废品, 计算机复位、数据丢失, 设备效能降低、寿命缩短、过热、烧毁, 电容器击穿损坏、功率因数下降、设备容量下降, 电力损耗增加、付出更多电费等^[3]。根据多方统计数据, 电能质量问题给企业和国家带来的经济损失是非常巨大的^[3]: 近20年来, 全球范围内因电能质量引起的重大电力事故已多达20多起, 每年因电能质量扰动和电气环境污染引起的国民经济损失高达300亿美元(美国统计数据); 数年前, 国际铜业协会(中国)主持的“中国电能质量行业现状与用户行为调研报告”中, 调查了32个不同行业共92家企业, 其中的49

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2020QN04)

家企业因电能质量问题造成经济损失达 2.5~3.5 亿元。因此改善和提高电能质量具有重要的意义。

对电网电能质量扰动数据进行长期的监测和智能化分析,可以及时发现各种扰动隐患和电能质量问题,这有助于开展针对性的电能质量治理,达到改善电网电能质量的目的^[1,4]。图 1 为电能质量扰动监测和智能分析的基本框架,其中电能质量扰动检测是非常重要的环节。电能质量扰动检测的主要工作是检测扰动是否发生及扰动持续的时间、频率和幅值等特征^[1],因此通过电能质量扰动检测可以快速捕捉各种电能质量扰动,有效地发现扰动过程和特征。近年来国内外学者对电能质量扰动检测的研究投入了极大的热情,论文数量不断增加。

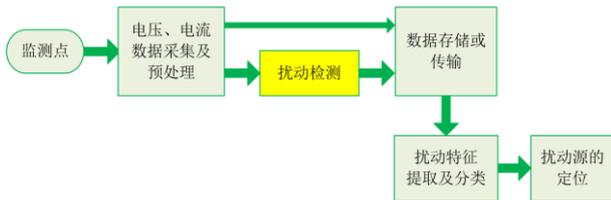


图 1 电能质量扰动监测和智能分析的基本框架

Fig. 1 Basic framework for power quality disturbance monitoring and intelligent analysis

本文结合近些年扰动检测的研究文献,归纳了扰动检测存在的难点,综述了扰动检测方法的研究现状,最后针对现有研究方法的问题,提出相应的研究展望。

1 扰动检测对象及难点分析

电能质量扰动通常可以划分为图 2 所示的稳态扰动和暂态扰动,而各种电能质量扰动产生的主要原因及其特征指标,文献[1,5]中均有详细阐述,此处不再赘述。

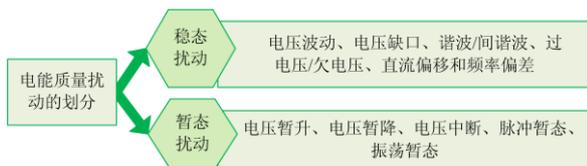


图 2 电能质量扰动的划分

Fig. 2 Classification of power quality disturbances

对于稳态电能质量扰动,其研究时间较长,相关检测和治理方法较为成熟,目前国内外也有严格的标准可依^[6],而暂态电能质量扰动具有持续时间短、随机性、多样性及复杂性等特点,其检测和治理方法还不成熟^[4]。近年来国内外的文献也更多地集中于对暂态电能质量扰动及其与谐波、电压缺口、

电压闪变等组成的混合扰动进行检测研究。因此本节也重点对 5 类暂态电能质量扰动检测的难点进行阐述和分析。

振荡暂态分为高、中、低频三种情况,其高、中频振荡暂态的频率为 5 kHz~5 MHz,且持续时间是微秒级的^[5],这就要求监测设备的采样频率必须达几十至几百 kHz,而如此高的采样频率导致每个工频周期的采样点数过多,运算量巨大,难以满足扰动检测实时性要求。另外,其微秒级的持续时间对算法精度要求极高,本来就难以准确检测。实际电能质量监测设备的采样频率一般不能设置太高(如武汉中元华电的 ZH-5 嵌入式和 ZH-102 便携式电力故障录波分析装置的采样频率最大可设置为 10 kHz,其 ZH-8103 嵌入式电能质量监测分析装置的最大采样频率为 12.8 kHz),因此目前国内外学者也主要针对低频振荡暂态的检测进行研究,但对频率小于 300 Hz 的低频振荡暂态在目前的文献中较少被研究。频率相同或相近的谐波与振荡暂态同时发生时,由于二者存在交叉干扰,振荡暂态的频率、幅值或持续时间等特征往往较难准确检测,目前的文献也较少对这种情况进行研究。噪声干扰环境下,微弱低频振荡暂态的特征往往并不明显,目前要实现对其有效地检测也是个难点。

对于幅值较小的脉冲暂态,在低信噪比环境下其特征往往不明显,也较难被有效检测出。

电压暂降、电压中断和电压暂升最主要的特征均是电压幅值和持续时间,其中电压暂降在实际电力系统中比后两者更常见,也被认为是最严重的暂态电能质量问题之一。目前这三种暂态扰动检测的难点主要表现为:① 低信噪比环境下,当这三种扰动的持续时间较短(通常小于 2 周期)时,较难准确检测其幅值特征,特别是电压暂降和电压中断的幅值接近时,较难准确检测出二者的真实幅值;② 低信噪比环境下,当电压暂降和电压暂升发生在过零时刻,其电压幅值越靠近正常电压,越难以精确定位其起止时刻,这是因为过零点处扰动的突变幅值最小,奇异特征极易被噪声完全淹没。

考虑到实际电力系统中,基频不可能永远保持 50 Hz 的正常值,可能会存在一定的频率偏差(又称基频偏移)。对于频率偏差限值也有具体的标准规定,如美国 IEEE Standard 1159^[5]规定频率偏差的限值为 ± 0.1 Hz,我国标准 GB/T 15945-2008^[7]规定电力系统正常运行条件下频率偏差限值为 ± 0.2 Hz,只有当系统容量较小时频率偏差限值可放宽到 ± 0.5 Hz。基频偏移会降低扰动检测的准确性,因此

还有必要提高频率偏差限值范围内扰动检测方法的性能^[8-9]。

实际电能质量扰动往往是含两种及两种以上单一扰动成分的混合电能质量扰动,其特征较为复杂,各种扰动成分之间又存在着相互影响^[1],因此如何有效地检测复杂混合扰动仍是一大难点问题。

2 电能质量扰动检测的方法研究

目前国内外已提出不少电能质量扰动检测方法,根据其分析角度的不同大致可以分为时域分析、频域分析、时频域分析、参数估计、人工智能及其他方法,如图3所示。

2.1 时域分析方法

时域分析方法主要是在时间域检测扰动的存在,定位扰动发生的起止时刻。这些方法中以奇异值分解和数学形态学检测暂态扰动的文献居多。

1) 奇异值分解

文献[10]利用电能质量信号构造 Hankel 矩阵并进行奇异值分解,通过第三层分量信号中的突变点实现扰动时间定位,该方法非常简单,有一定的抗噪性,但对起止时刻发生在工频相位过零点附近的扰动的检测能力较弱。文献[11]利用电能质量信号求取差分 and 信号的绝对值,再进行奇异值分解求取第一层分量信号 P_1 ,通过自适应阈值和 P_1 中的突变点实现暂态扰动时间定位。该方法具有扰动检测效果好、运算量小、抗噪性强及参数少等优点,但对过零时刻发生的电压暂升和电压暂降,当其幅值突变幅度很小时易检测失效^[11]。文献[12]依据波形数据前后半周波的差值设计自适应阈值,再对差值信号采用滑窗的方式进行奇异值分解,实现扰动起止时刻的定位。文献[13]通过滑动窗奇异值分解和奇异值梯度提取信号扰动时刻的奇异性特征,并结合无参自适应阈值完成暂态扰动的检测与定位。

2) 数学形态学

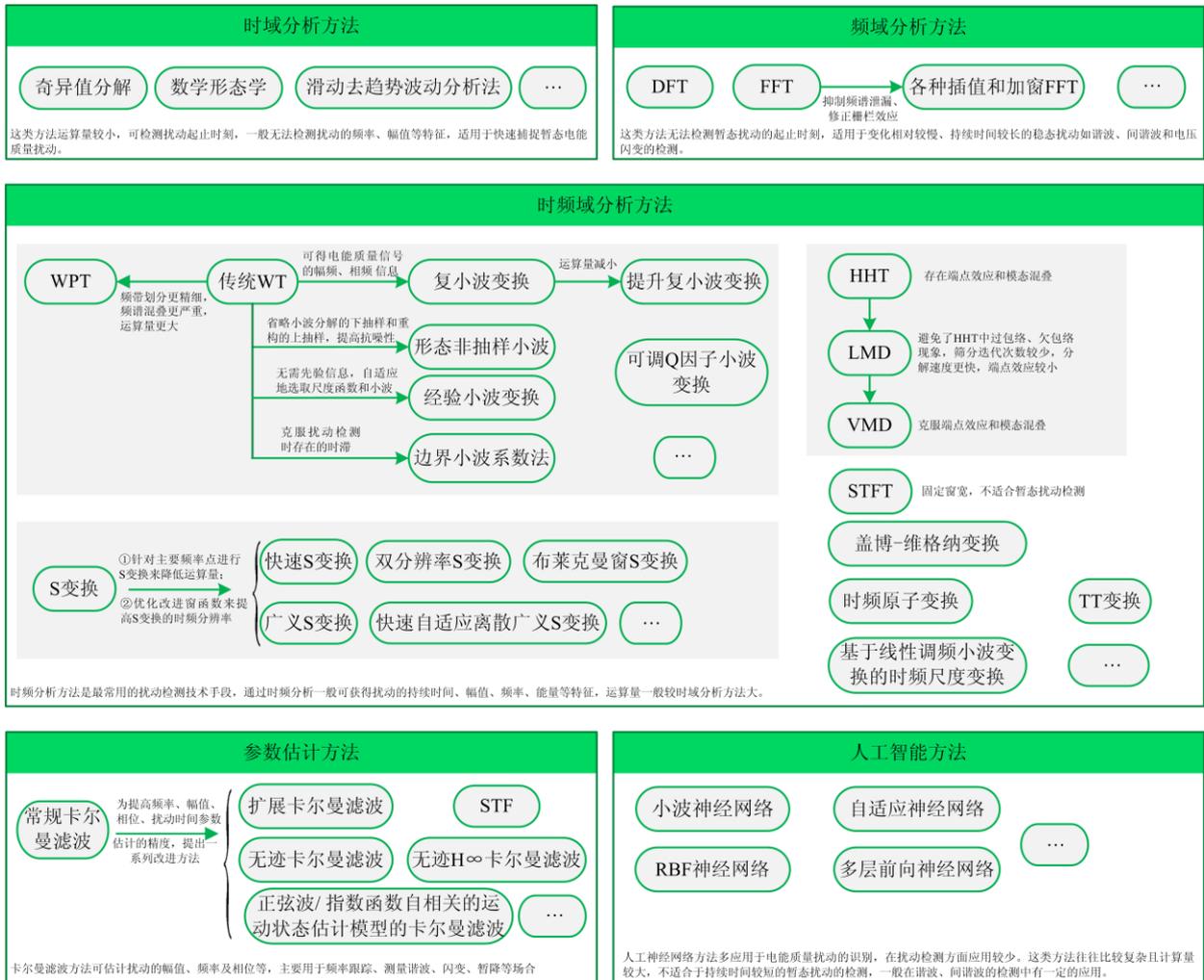


图3 电能质量扰动检测方法的分类

Fig. 3 Classification of power quality disturbance detection methods

早些年关于数学形态学的扰动检测的研究较多,例如文献[14]采用形态边缘检测方法定位暂态扰动的起始和结束时刻,该方法抗噪性较强,但其不足也明显:通过信噪比来自适应选取形态滤波结构元素的大小,但实际信号的信噪比较难准确估计;扁平结构元素的增大或减小,易造成扰动定位结果误检和漏检的情况增多。近些年关于数学形态学的扰动检测方法研究的文献越来越少,主要原因是结构元素的形状和尺寸对扰动定位结果的准确度影响较大,目前结构元素的选取主要是依据技术人员的经验确定,并没有统一的选取准则^[1]。

3) 其他时域分析方法

文献[15]采用连续两个采样点值来估算下一个采样点值,并与实际采样值相减形成偏差,通过判定偏差值落在阈值范围内的情况,快速定位电压扰动起止时刻。文献[16]设计了一种时间域的基于线性预测机制的扰动检测方法,将电能质量信号通过由线性预测机制得到的误差预测滤波器,依据扰动发生时预测信号产生的突变来定位扰动起止时刻。文献[17]提出基于滑动去趋势波动分析的扰动检测方法,利用滑动窗构建波动参数曲线定位暂态扰动的起止时刻,但当扰动持续时间小于滑动窗口长度时,无法定位扰动的结束时刻。

综上,时域分析方法一般运算量较小,可检测扰动的起止时刻,但往往无法检测扰动的频率和幅值等特征,所以一般适用于暂态电能质量扰动的快速检测与捕捉。

2.2 频域分析方法

电能质量中的稳态扰动,如谐波、间谐波和电压闪变等,具有变化相对较慢、持续时间较长等特点,所以通常采用频域分析方法进行检测与分析。

通过提取信号的频率成分,离散傅里叶变换(DFT)已经成功地应用于电力谐波的检测与分析,但由于具有固定的带宽,DFT不能有效地检测短时突变信号^[18]。此外,DFT也无法定位暂态扰动的发生时刻。快速傅里叶变换(FFT)是DFT的一种快速算法,也不适合暂态扰动的检测,它主要应用于谐波的分析。为了抑制FFT频谱泄漏和修正栅栏效应导致的观测误差,提高谐波和间谐波的检测精度,近些年提出不少改进的FFT方法,如改进的Nuttall双窗全相位FFT方法^[19]、自适应Kaiser自卷积窗插值FFT算法^[20]、补零汉宁窗插值FFT^[21]及基于三角自卷积窗的对称插值FFT算法^[22]等。

2.3 时频域分析方法

时频域分析方法可同时在时频两域对电能质量扰动进行分析,是最常用的扰动检测技术手段。通

过时频分析一般可获得扰动的各种特征,如持续时间、幅值、频率、能量等,目前国内外学者已提出不少时频域分析方法。

1) 短时傅里叶变换

短时傅里叶变换(STFT)是经典的线性时频分析方法,可通过选择适宜的窗函数获得较好的检测结果,但实际应用中要选择适宜的窗函数并不容易。STFT由于具有固定窗口宽度^[23]、频谱泄露、栅栏效应及运算量大等缺点,并不适合用于暂态扰动的检测^[18,24],近些年基于STFT的扰动检测研究文献也较少。

2) 小波变换

小波变换(WT)克服了STFT的缺陷,具有良好的时频分辨率,适合于分析非平稳的扰动信号^[24],所以在电能质量扰动检测中得到了广泛的应用,并产生了大量的论文。

尽管WT具有检测长时和短时扰动的能力,但其准确性高度依赖所选择的母小波及分解尺度,且噪声的存在会恶化WT的扰动检测能力^[1,11,23]。为了提升WT的抗噪性,文献[18]依据不同尺度小波系数的相关性,提出基于WT的空间噪声抑制方法;文献[25]将两种标准统计假设检验的去噪方案整合到基于离散WT的监测系统。尽管这些改进小波方法的抗噪性有很大提升,但低信噪比环境下其误检率仍然很高^[1],且这些一维小波变换法对起止时刻发生在工频相位过零点附近的扰动易检测失效^[25]。

相比于一维小波变换,二维小波变换具有显微和极化能力,可以显示出更好的奇异性。当扰动事件发生时,电能质量信号波形会产生突变,文献[26]将电能质量信号分割为合适长度的数据段来构成二维矩阵,通过二维离散小波变换检测暂态扰动的突变点,但该方法较难准确定位电压暂降的起止时刻。文献[27]采用整周期法将每个周期的电能质量信号构成二维矩阵,通过二维离散平稳小波变换得到的水平高频系数、垂直高频系数+斜线高频系数可分别检测过零点、非过零点的扰动。二维小波变换虽然能更加准确地检测发生在过零点的扰动,但运算量也更大。

复小波变换能提供电能质量信号的幅频、相频信息。文献[28]提出形态-复小波综合检测方法,该方法首先结合广义形态滤波器来提高抗噪性,再构造正交紧支对称复小波,通过其提供的复合信息检测和定位暂态扰动。复小波变换得到的相位图特征不够明显,为此文献[29]提出改进相位图,能更好地检测常见暂态扰动。文献[30]通过Euclidean分解算法得到复小波提升方案,将提升复小波变换后的

幅值和相位信息用于扰动检测。目前对复小波的应用大多是利用其复合信息进行扰动检测, 计算量较大^[29], 而提升复小波变换在文献[30]中被证明不仅包含复小波的相位信息, 且运算时间明显更少。

形态非抽样小波省略了小波分解的下抽样和小波重构的上抽样, 从线性领域扩展到非线性领域, 能更好地保护边缘信息。文献[31]结合开闭与闭开混合滤波器及形态梯度, 构造出的形态非抽样小波, 在暂态扰动检测时具有较强的抗噪性, 但易产生统计偏畸现象。

近几年又涌现出一些新的小波扰动检测方法, 如文献[32-36]。小波方法的扰动检测性能随着母小波选择的不同会发生实质性的变化, 且选择长母小波进行扰动检测时存在时滞, 为了克服此缺陷, 文献[32]提出利用单周期滑动窗边界畸变的小波系数能量法(即边界小波系数能量), 而文献[33]通过扩展边界小波系数能量的概念, 将单周期滑动窗的边界畸变效应直接计入小波系数中, 提出边界小波系数法。文献[32-33]所提方法的扰动检测性能均不受母小波选择的影响, 且对紧凑和长母小波也不存在时滞。另外文献[33]中方法在有阻尼暂态的情况下也具有较可靠的检测结果, 运算量与常规小波系数相当。文献[34]提出基于经验小波变换的时频分析技术, 该方法无需信号的先验信息, 可自适应地选取尺度函数和小波, 能有效地从失真的电能质量信号中提取单分量信号。文献[35]将可调 Q 的小波变换用于扰动检测中, 该方法通过调节 Q 因子和冗余度使设计的滤波器能准确地从扰动信号中提取基频分量。文献[36]研究了小波函数、小波分解层次、冗余算法、事件类型和扰动强度、扰动起止时刻五个关键因素对电能质量扰动定位精度的影响, 提出基于多影响因子的小波分析方法, 但其抗噪性有待提高。

3) 小波包变换

小波包变换(WPT)建立在小波变换的基础上, 能更加精细地划分信号的频带, 聚焦任意频率, 适合于暂态扰动的检测与分析。例如文献[37]利用小波包系数尺度间和尺度内的关系检测去除噪声的电能质量扰动, 并提出了四个决策融合准则, 用于检测三个尺度间和四个尺度内相关输出的峰值位置。WPT 也适合于谐波的分析, 如文献[38]提出 Tsallis 小波包奇异熵, 能表征复杂的电力谐波, 结合功率谱分析能量化暂态谐波的频率及功率。WPT 由于过渡带长度的不同, 其离散方法在不同频带上存在不同的频谱泄漏, 为了克服离散 WPT 的能量泄漏问题, 文献[39]提出一种希尔伯特频移小波分

解方法, 结果表明其估计的频率成分的参数比离散 WPT 更准确。文献[40]提出了基于非抽取 WPT 的快速算法, 可较精确地估计平稳和时变电力信号的基波和谐波分量的幅值。

尽管 WPT 较 WT 具有更高的时频分辨率, 但其频谱混叠现象较严重, 且计算量也增大了, 在电能质量扰动检测中的应用不如 WT 广泛。

4) S 变换

S 变换采用可移动和伸缩的定位高斯窗, 可看作是 WT 和 STFT 的继承和发展^[41-42], 它是一种新型时频分析方法, 也是当下最流行的一种扰动检测方法。近年来众多学者纷纷采用 S 变换来检测与分析电能质量扰动, 也产生了大量的研究成果。

文献[42]利用 S 变换模矩阵的等值线检测扰动的发生, 并尝试利用时频曲线的标准差检测电压暂降、暂升和中断的幅值。文献[43]中, S 变换模矩阵的时间幅值向量可用于测量电能质量扰动的有效值、总谐波畸变率、波顶因素及形状因子等指标。文献[44]证明 S 变换具有较强的抗噪性, 对各种扰动检测的能力优于小波变换。尽管 S 变换能检测含噪电能质量扰动, 但是其缺陷明显: (1) S 变换对所有频率点的 FFT 值进行运算, 当信号采样点数较多时, 其运算量很大; (2) S 变换的离散化及高斯窗函数的不灵活, 会影响时频的精确定位, 降低扰动检测结果的准确性, 如易将持续时间很短的电压中断的幅值检测为电压暂降^[1,8]; (3) S 变换不适合谐波分析, 特别是高次谐波^[1,39]; (4) S 变换不能有效检测振荡暂态、脉冲暂态等暂态扰动的幅值^[41]。

为了克服 S 变换的缺陷, 许多改进的 S 变换方法被提出。文献[45]通过在高斯窗加入调节因子 λ 来提高 S 变换的时频分辨率, 而文献[46]采用广义 S 变换对扰动进行分析, 通过在高斯窗加入频率尺度拉伸调节因子 β 和幅度拉伸调节因子 α 来提高算法时频分辨率, 但这些最优调节因子均需要依据经验设定。文献[47]提出一种快速自适应离散广义 S 变换方法, 通过对每个频率窗函数的形状进行优化, 以提高时频分布的能量集中度, 并用折叠窗函数最小化因离散化导致的混叠影响。文献[48]用布莱克曼窗口代替高斯窗口, 提出布莱克曼窗 S 变换, 其时频分辨率较多分辨率广义 S 变换更优。文献[49]提出的改进 S 变换中引入了一个单信号相关窗口, 通过能量集中最大化来选择最优的窗口参数, 从而实现各扰动事件的精确时频定位, 且能量更集中。文献[50]提出基于分段改进的 S 变换, 一定程度上克服了 S 变换调节因子不能同时兼顾时域和频域分辨率的缺点。不完全 S 变换只针对特定频率点进行

S 变换,降低了运算量,但窗函数仍然缺乏灵活性^[51]。文献[52]提出快速 S 变换,该方法可将 S 变换的二维时频矩阵压缩成一维向量,去除了 S 变换中的大量冗余计算,使其运算速度比不完全 S 变换更快,但其反映的时频信息不如 S 变换的连贯和平滑^[53]。文献[54]通过极大值和阈值判定方法确定电压闪变的频率点,消除 S 变换中不必要的频率点计算,降低了运算量。文献[8]提出双分辨率 S 变换,通过对主要频率点(整数倍基频)及其附近 2~4 个频率点进行 S 变换,降低了运算量,并通过参数 λ_1 和 λ_2 灵活调节算法的时间和频率分辨率,但参数最优值的确定没有明确的表达式,也无法检测非整数倍基频的扰动。文献[55]中基于高斯自适应优化窗的改进 S 变换,通过包络极值算法确定扰动的特征频率点,再对确定频率点作 S 变换,降低了运算量,并通过引入新的窗宽调节尺度因子,克服了传统高斯窗主瓣较宽、频率分辨率低的局限,但窗宽调节尺度因子需依据经验设定。

综上,这些改进 S 变换方法,其改进原理大体上还是从以下两方面入手:(1) 只针对主要频率点进行 S 变换来降低运算量;(2) 优化改进窗函数来提高 S 变换的时频分辨率。

5) 希尔伯特-黄变换

希尔伯特-黄变换(HHT)是一种自适应时频分析方法,适合于分析非平稳和突变信号^[56]。经验模态分解(EMD)是 HHT 的核心部分。文献[28]对电压暂降、电压尖峰和电压缺口 EMD 后得到的第 1 个固有模态分量(IMF)进行 Hilbert 变换求解瞬时幅值,并与 S 变换的结果进行对比,验证了 HHT 方法对扰动检测的有效性。与 WT 恒定的多分辨率分析不同, HHT 不仅具有自适应多分辨率分析的优势,且不需要选择基函数^[56]。HHT 也存在一定缺陷^[11,56]:(1) 存在严重的端点效应;(2) 容易产生模态混叠问题;(3) 筛分停止准则的确定较困难;(4) 易受噪声影响。

为弥补 HHT 的缺陷,近年来涌现出许多改进的 HHT 方法。文献[57]利用基于 FFT 的掩码信号增强 EMD 的分解过程,通过解调增强了 Hilbert 谱分析获得 IMF 的瞬时频率和幅值。基于掩码信号的 EMD 不一定总能产生真正的单分量 IMF,但是比传统 EMD 能更好地识别微弱高频信号。文献[58]利用 EMD 对含有电能质量扰动的电网电压进行分解,再对第 1 个 IMF 求取一阶导数并进行阈值处理,可对多种扰动的起止时刻进行定位。文献[59]将 EMD 应用于谐波检测,在分解中采用三次样条插值求包络曲线,并通过在信号两端添加极值点的方式来减轻

边界效应的影响。文献[60]提出基于聚类经验模态分解(EEMD)的 HHT 扰动检测方法,可有效克服 EMD 存在的过零失效和模态混叠问题,但 EEMD 不能普遍用于各种扰动,且分解后无效 IMF 分量较多,会出现过分解。为弥补 EEMD 计算耗时长和分解自适应性不足的缺点,文献[61]提出自适应快速互补 EEMD,并通过稳态和暂态扰动检测结果验证了其有效性,但该方法并未对 EMD 的实质问题进行改进。文献[62]提出基于 HF-EMD 频率选取原则的 HHT,对暂态振荡进行检测和分析能有效消除 EMD 分解时产生的模态混叠,但该频率选取原则是依据经验而设定的。文献[63]提出 RBF-点对称延拓方法对 HHT 的端点效应问题进行抑制和改善,并提出使用 50 Hz 陷波滤波器对信号进行预处理,克服在谐波信号基波频率能量很大时出现的模态混叠现象。HHT 较难分解含有相近频率成分的电能质量扰动信号,为克服此缺陷,文献[64]提出迭代 HHT 方法。为弥补传统 HHT 的模态混叠和端点效应问题,文献[65]提出具有自适应波形匹配扩展的改进 HHT,其波形匹配扩展方法不仅考虑了波形的深度,还考虑了上升时间和下降时间。

6) 局部均值分解、变分模态分解及希尔伯特振动分解

局部均值分解(LMD)是近年来才提出的一种新的自适应时频分析方法,目前在电能质量扰动检测方面的研究还比较少。LMD 采用滑动平均方法拟合包络函数,避免了 HHT 中过包络、欠包络现象,且筛分迭代次数较少,分解速度更快,端点效应较小^[66-67],但和 HHT 一样仍存在端点效应和模态混叠等问题。文献[68]将 LMD 与 Teager 能量算子结合,在扰动定位能力和端部失真方面较原 LMD 有所改善。文献[69]用 3 次 B 样条插值法代替原 LMD 滑动平均法,用支持向量机和镜像延拓相结合的方法来改善 LMD 端点效应。文献[70]在四点波形曲率延拓、三次样条插值及自适应筛分停止准则 3 方面对 LMD 进行改进,减小了端点效应和模态混叠的影响。文献[71]从加噪辅助分解层面出发,提出改进的 LMD,改善了模态混叠和端点效应。

变分模态分解(VMD)是一种新型的完全非递归模态变分方法,与 EMD 和 LMD 不同的是,它将信号分解从递归筛分模式转换为非递归模式,以消除端点效应和模态混叠。VMD 是 DRAGOMIRETSKIY K 等人^[72]在 2014 年提出的,目前在电能质量扰动检测中应用的文献非常少。文献[73]将 VMD 用于扰动检测,通过与 HHT 和 LMD 的对比分析,表明 VMD 提取扰动的误差较小,抗噪性较强,在频率

相近信号的模态分离和重构方面具有优异的性能。文献[74]利用 VMD 初始化滑动去趋势波动分析算法,以提高扰动检测精度、降低计算复杂度。VMD 也存在不足:其分解精度受分解层数 K 和惩罚因子的影响, K 值过大或过小依然会出现过分解或分解不足的情况,所以 K 值需要得到优化^[75];对于频率相差很大的信号难以分解^[70]。

希尔伯特振动分解(HVD)^[76]因最初应用于振动信号而得名,虽然避免了 HHT 复杂的 EMD 过程,但仍存在边界效应。文献[77]采用改进的 HVD 检测非整数次谐波,通过 Savitzky-Golay 滤波替代平滑滤波以消除快速变化的不对称振荡高频值,并采用新的波形特征匹配边界延拓方法消除边界效应。

7) 其他时频分析方法

盖博-维格纳变换(GWT)是一种基于盖博变换和维格纳分布函数的组合方法,兼具二者的优势。文献[78]将 GWT 应用于电能质量扰动检测中,但该方法不仅运算量很大,而且必须满足同步采样^[2]。文献[79]指出时频原子变换能准确监测单一或混合扰动中各个稳态和暂态分量的频率、幅值等,但其动态响应时间为 2 个周波,无法准确检出持续时间小于 2 周期的瞬时电压暂升、暂降和中断等的幅值。文献[80]提出的稀疏信号分解技术,可将电能质量信号分解为细节信号和近似信号,通过计算二者的 RMS 包络用于检测单一扰动及多种混合扰动,结果表明该方法具有较强的抗噪性和扰动检测能力。文献[81]提出基于线性调频小波变换的时频尺度变换(TFST)用于电能质量扰动的分析。TFST 可以看作窗口缩放的 STFT 或具有改进分辨率的 S 变换,另外 Hann 窗的应用和移位隔离缩放的使用还增强了其分辨率和抗噪性。文献[9]中希尔伯特变换结合滑移奇异值分解噪声抑制技术的方法,具有较强的抗噪性,能有效检测单一及多种混合扰动,但在基频偏移较大时存在边界影响。文献[82]指出 HS 变换比传统 S 变换对畸变幅值小、持续时间短的暂态扰动有更好的定位能力,但较难检测强噪声环境下畸变程度较小的扰动,且需要确定的参数较多。文献[83]针对含量较小的高频谐波及间谐波难以检测的问题,利用 TT 变换结合加窗插值方法来提高测量精度,并通过 TT 变换与 S 变换结合检测和定位各频率分量的起止时间,该方法运算量相对较大。另外,文献[84]提出了基于自适应滑窗-旋转不变子空间算法的时频分析方法检测暂态电能质量扰动。

2.4 参数估计方法

卡尔曼滤波是目前最流行的参数估计方法,可估计扰动的幅值、频率及相位等,主要用于频率跟

踪、测量谐波、闪变、暂降等场合^[85]。

文献[85]详细综述了应用于电能质量检测与分析的各种卡尔曼滤波方法的利弊,文献[86]又详细综述了卡尔曼滤波在电力系统电能质量分析及其他多个方面的应用现状。对于扩展卡尔曼滤波、无迹卡尔曼滤波,其在电能质量幅值和频率估计方面的计算精度相似,但后者的计算量更小^[85]。近几年文献[87-88]采用线性卡尔曼滤波对电力高次谐波、电能质量扰动、电网故障信号进行检测和估计。文献[89]采用无迹 H_{∞} 卡尔曼滤波检测电能质量扰动和跟踪高次谐波。卡尔曼滤波不能准确地指示暂态扰动的发生时刻,且卡尔曼跟踪还存在一定的延时,若模型不匹配、初始参数设置不合理还会导致滤波器发散或测量不准确^[1,11]。为此,文献[90]提出一种基于卡尔曼滤波的增强算法(STF),可通过衰减因子准确指示暂态扰动的突变,并且该方法比卡尔曼滤波的响应速度更快。传统卡尔曼滤波采用余弦展开式进行状态空间建模,而文献[91]采用正弦波/指数函数自相关的运动状态估计模型,通过微电网电能质量扰动的检测结果表明该方法比传统卡尔曼滤波具有较好的抗干扰性和跟踪敏感性,较高的跟踪精度,对电压与电流跳变的跟踪性能也有所提高。文献[92]将卡尔曼滤波与最大似然法结合,具有较强的抗噪性,性能优于传统卡尔曼滤波方法。

另外,其他方法也可实现扰动的参数估计,如文献[93]利用改进不完全 S 变换对最常见电能质量扰动的参数进行估计;文献[94]采用快速原子分解可检测电能质量扰动的起止时刻、幅值、频率、相位等特征参数,但该方法的运算量非常大。

2.5 人工智能方法

人工智能方法可以利用智能算法经由学习提取电能质量扰动的特征。目前这类方法多应用于电能质量扰动的识别,而在扰动检测方面应用较少,主要还是用于电力谐波、间谐波的检测,如文献[95-99]。其中,文献[95]使用小波神经网络对谐波进行检测;文献[96]用自适应训练的人工神经网络对时变谐波估计,该方法通过旋转不变性技术(ESPRIT)获得信号参数的高分辨率估计,辅助神经网络参数的更新。文献[97]将基函数参数可调的神经网络模型与粒子群优化算法(PSO)相结合,用于间谐波的检测,且对频率相近的间谐波也能较好地分离;文献[98]对比分析了 RBF 神经网络、BP 神经网络的收敛速度及对谐波幅值和相位的检测精度,指出 RBF 神经网络在谐波检测方面具有更优越的性能。

尽管人工神经网络方法在谐波、间谐波检测中

有一定的应用,但这类方法往往比较复杂且计算量很大,因此并不适合用于持续时间较短的暂态扰动的检测与分析。

3 结论及展望

对于稳态扰动,相关检测和治理方法较为成熟,但随着电网的快速发展,暂态电能质量问题越来越突出。暂态扰动因持续时间长、多样性及复杂性等特点,对检测方法要求较高,目前其检测和治理方法还不成熟。尽管目前已提出不少电能质量扰动检测方法,也取得了一些理论成果,但应用于暂态扰动及其组成的混合扰动检测时仍存在一些亟待解决或突破的问题:

1) 或是对稳态扰动检测效果较好,但不适用于暂态扰动的检测与分析;

2) 或是抗噪性较差;

3) 或是算法参数较多且大都依据经验设置,不利于操作;

4) 暂态扰动因持续时间长,对检测算法的实时性要求较稳态扰动高得多,而当前扰动检测算法中大多运算量较大,不能很好地满足实时性要求;

5) 或是对过零时刻发生的扰动检测和定位效果较差;

6) 实际电能质量扰动通常是较复杂的混合扰动,而目前方法往往对复杂混合扰动检测效果较差。

因此还需要研究更为有效的暂态扰动检测方法,同时兼具较强的抗噪性、较小的运算量、较少的参数且参数可智能选取,可准确地检测发生在过零点的扰动、复杂的混合扰动及微弱的暂态扰动等优点,将具有重要的理论和工程意义。

参考文献

- [1] 王燕. 暂态电能质量扰动检测与识别方法的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
WANG Yan. Study on detection and recognition of transient power quality disturbance[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [2] 林海雪. 电能质量指标的完善化及其展望[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5073-5079.
LIN Haixue. Perfecting power quality indices and prospect[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5073-5079.
- [3] 南德电气资讯中心-电能质量造成的经济损失巨大[EB/OL]. http://www.zjnad.com/nddt/dnzldzjjs_1.html.
- [4] 黄南天. 基于 S 变换与模式识别的电能质量暂态信号分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
HUANG Nantian. Power quality disturbances analysis based on S-transform and pattern recognition[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [5] Transmission and Distribution Committee of the IEEE Power & Energy Society. IEEE recommended practice for monitoring electric power quality: IEEE Std.1159—2009[S]. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 2009.
- [6] 吴兆刚. 基于小波变换的电能质量检测与仿真分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.
WU Zhaogang. Power quality detection and simulation analysis based on wavelet transform[D]. Changsha: Hunan University, 2014.
- [7] 电能质量电力系统频率偏差: GB/T 15945—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [8] LI J M, TENG Z S, TANG Q, et al. Detection and classification of power quality disturbances using double resolution S-transform and DAG-SVMs[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2016, 65(10): 2302-2312.
- [9] WANG Y, LI Q Z, ZHOU F L, et al. A new method with Hilbert transform and slip-SVD-based noise-suppression algorithm for noisy power quality monitoring[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 68(4): 987-1001.
- [10] 徐永海, 赵燕. 基于短时傅里叶变换的电能质量扰动识别与采用奇异值分解的扰动时间定位[J]. 电网技术, 2011, 35(8): 174-180.
XU Yonghai, ZHAO Yan. Identification of power quality disturbance based on short-term Fourier transform and disturbance time orientation by singular value decomposition[J]. Power System Technology, 2011, 35(8): 174-180.
- [11] 王燕, 李群湛, 周福林. 一种暂态电能质量扰动检测的新方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(24): 7121-7132.
WANG Yan, LI Qunzhan, ZHOU Fulin. A novel algorithm for transient power quality disturbances detection[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(24): 7121-7132.
- [12] 杨晓梅, 罗月婉, 肖先勇, 等. 基于自适应阈值和奇异值分解的电能质量扰动检测新方法[J]. 电网技术, 2018, 42(7): 2286-2294.
YANG Xiaomei, LUO Yuewan, XIAO Xianyong, et al. A new detection approach of power quality disturbances based on adaptive threshold and singular value decomposition[J]. Power System Technology, 2018, 42(7): 2286-2294.
- [13] 杨晓梅, 郭朝云, 樊博, 等. 采用奇异值梯度信息的暂态电能质量扰动自适应检测方法[J]. 电力自动化设备,

- 2019, 39(6): 138-145.
- YANG Xiaomei, GUO Chaoyun, FAN Bo, et al. Adaptive detection method of transient power quality disturbance based on singular value gradient information[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2019, 39(6): 138-145.
- [14] 欧阳森, 黄润鸿. 基于形态边缘检测的电能质量暂态扰动定位方法[J]. *电网技术*, 2012, 36(4): 63-67.
- OUYANG Sen, HUANG Runhong. A method of locating transient disturbance of power quality based on morphological edge detection[J]. *Power System Technology*, 2012, 36(4): 63-67.
- [15] 董继民. 基于采样值估算的电压扰动快速定位方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2010, 38(9): 92-95.
- DONG Jimin. Fast sample-extrapolation-based detection method of voltage transient disturbances[J]. *Power System Protection and Control*, 2010, 38(9): 92-95.
- [16] 李加升, 戴瑜兴, 柴世杰. 基于预测机制的电能质量扰动检测方法研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2010, 38(17): 96-100.
- LI Jiasheng, DAI Yuxing, CHAI Shijie. Research of the power quality disturbance detection method based on forecasting mechanism[J]. *Power System Protection and Control*, 2010, 38(17): 96-100.
- [17] 张淑清, 翟欣沛, 刘永富, 等. 滑动去趋势波动分析在电能质量暂态扰动检测中的应用[J]. *电力系统自动化*, 2012, 36(8): 52-57.
- ZHANG Shuqing, ZHAI Xinpei, LIU Yongfu, et al. Application of sliding detrended fluctuation analysis in detection of transient power quality disturbance[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2012, 36(8): 52-57.
- [18] LIAO C C, YANG H T, CHANG H H. Denoising techniques with a spatial noise-suppression method for wavelet-based power quality monitoring[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2011, 60(6): 1986-1996.
- [19] SU T X, YANG M F, JIN T, et al. Power harmonic and interharmonic detection method in renewable power based on Nuttall double-window all-phase FFT algorithm[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2018, 12(8): 953-961.
- [20] YAO W X, TENG Z S, TANG Q, et al. Measurement of power system harmonic based on adaptive Kaiser self-convolution window[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2016, 10(2): 390-398.
- [21] 翟晓军, 周波. 一种改进的插值 FFT 谐波分析算法[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(11): 2952-2958.
- ZHAI Xiaojun, ZHOU Bo. An improved interpolated FFT algorithm for harmonic analysis[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(11): 2952-2958.
- [22] WEN H, ZHANG J H, MENG Z, et al. Harmonic estimation using symmetrical interpolation FFT based on triangular self-convolution window[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2015, 11(1): 16-26.
- [23] ZHAO W J, SHANG L Q, SUN J F. Power quality disturbance classification based on time-frequency domain multi-feature and decision tree[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2019, 4:27. DOI: 10.1186/s41601-019-0139-z.
- [24] SHUKLA S, MISHRA S, SINGH B. Empirical-mode decomposition with Hilbert transform for power-quality assessment[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2009, 24(4): 2159-2165.
- [25] DWIVEDI U D, SINGH S N. Denoising techniques with change-point approach for wavelet-based power-quality monitoring[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2009, 24(3): 1719-1727.
- [26] ECE D G, GEREK O N. Power quality event detection using joint 2-D-wavelet subspaces[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2004, 53(4): 1040-1046.
- [27] 李霖, 杨洪耕, 赵艳粉. 基于二维离散平稳小波变换的短时电能质量扰动检测方法[J]. *电网技术*, 2007, 31(11): 49-53.
- LI Lin, YANG Honggeng, ZHAO Yanfen. Short duration power quality disturbance signal detection method based on two dimensional discrete static wavelet transform[J]. *Power System Technology*, 2007, 31(11): 49-53.
- [28] 崔雪, 刘会金, 张全明, 等. 基于形态-复小波暂态电能质量扰动检测及定位[J]. *高电压技术*, 2008, 34(5): 989-994.
- CUI Xue, LIU Huijin, ZHANG Quanming, et al. Detection and location of transient power quality disturbances based on morphology-complex wavelet[J]. *High Voltage Engineering*, 2008, 34(5): 989-994.
- [29] 冯浩, 周雅维, 刘毅. 基于复小波变换的暂态电能质量扰动检测与分类[J]. *电网技术*, 2010, 34(3): 91-95.
- FENG Hao, ZHOU Luwei, LIU Yi. Detection and classification of transient power quality disturbances based on complex wavelet transform[J]. *Power System Technology*, 2010, 34(3): 91-95.
- [30] 李涛, 夏浪, 张宇, 等. 基于提升复小波的暂态电能质量扰动的检测与定位[J]. *中国电机工程学报*, 2011, 31(25): 66-72.
- LI Tao, XIA Lang, ZHANG Yu, et al. Detection and localization of power quality transient disturbances based

- on lifting complex wavelet[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(25): 66-72.
- [31] 赵静, 何正友, 贾勇, 等. 利用形态非抽样小波的电能质量扰动定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(31): 109-114.
ZHAO Jing, HE Zhengyou, JIA Yong, et al. Power quality disturbance location method utilizing morphological undecimated wavelet[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(31): 109-114.
- [32] COSTA F B. Fault-induced transient detection based on real-time analysis of the wavelet coefficient energy[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(1): 140-153.
- [33] COSTA F B. Boundary wavelet coefficients for real-time detection of transients induced by faults and power-quality disturbances[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(6): 2674-2687.
- [34] THIRUMALA K, UMARIKAR A C, JAIN T. Estimation of single-phase and three-phase power-quality indices using empirical wavelet transform[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(1): 445-454.
- [35] THIRUMALA K, PRASAD S, JAIN T, et al. Tunable-Q wavelet transform and dual multiclass SVM for online automatic detection of power quality disturbances[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(4): 3018-3028.
- [36] YANG Z J, HUA H C, CAO J W. A novel multiple impact factors based accuracy analysis approach for power quality disturbance detection[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2020, 6: 1-12.
- [37] BHUIYAN S M A, KHAN J, MURPHY G. WPD for detecting disturbances in presence of noise in smart grid for PQ monitoring[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(1): 702-711.
- [38] 陈继开, 李浩昱, 杨世彦, 等. Tsallis 小波包奇异熵与功率谱分析在电力谐波检测的应用[J]. 电工技术学报, 2010, 25(8): 193-199.
CHEN Jikai, LI Haoyu, YANG Shiyan, et al. Application of wavelet packet singularity entropy and PSD in power harmonics detection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 193-199.
- [39] TSE N C F, CHAN J Y C, LAU W H, et al. Hybrid wavelet and Hilbert transform with frequency-shifting decomposition for power quality analysis[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2012, 61(12): 3225-3233.
- [40] TIWARI V K, UMARIKAR A C, JAIN T. Fast amplitude estimation of harmonics using undecimated wavelet packet transform and its hardware implementation[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2018, 67(1): 65-77.
- [41] 易吉良, 彭建春, 谭会生. S 变换在电能质量扰动分析中的应用综述[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(3): 141-147.
YI Jiliang, PENG Jianchun, TAN Huisheng. A summary of S-transform applied to power quality disturbances analysis[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(3): 141-147.
- [42] DASH P K, PANIGRAHI B K, PANDA G. Power quality analysis using S-transform[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(2): 406-411.
- [43] AMEEN G, NESIMI E, SOONG W L. Power quality indices measurement using the S-transform[J]. International Journal of Power and Energy Conversion, 2009, 1(1): 31-48.
- [44] RAY P K, KISHOR N, MOHANTY S R. Islanding and power quality disturbance detection in grid-connected hybrid power system using wavelet and S-transform[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(3): 1082-1094.
- [45] 徐方维, 杨洪耕, 叶茂清, 等. 基于改进 S 变换的电能质量扰动分类[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4): 77-84.
XU Fangwei, YANG Honggeng, YE Maoqing, et al. Classification for power quality short duration disturbances based on generalized S-transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 77-84.
- [46] 尹柏强, 何怡刚, 朱彦卿. 一种广义 S 变换及模糊 SOM 网络的电能质量多扰动检测和识别方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(4): 866-872.
YIN Baiqiang, HE Yigang, ZHU Yanqing. Detection and classification of Power quality multi-disturbances based on generalized S-transform and fuzzy SOM neural network[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(4): 866-872.
- [47] BISWAL M, DASH P K. Estimation of time-varying power quality indices with an adaptive window-based fast generalised S-transform[J]. IET Science, Measurement & Technology, 2012, 6(4): 189-197.
- [48] 李建文, 秦刚, 李永刚, 等. 基于布莱克曼窗 S 变换与数据库查询电能质量扰动识别与分类新方法[J]. 电网技术, 2020, 44(12): 4734-4743.
LI Jianwen, QIN Gang, LI Yongang, et al. A new method for recognition and classification of power quality disturbances based on Blackman window S transform and database query[J]. Power System Technology, 2020, 44(12): 4734-4743.

- [49] REDDY M V, SODHI R. A modified S-Transform and random forests-based power quality assessment framework[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2018, 67(1): 78-89.
- [50] 杨剑锋, 姜爽, 石戈戈. 基于分段改进 S 变换的复合电能质量扰动识别[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(9): 64-71.
YANG Jianfeng, JIANG Shuang, SHI Gege. Classification of composite power quality disturbances based on piecewise-modified S transform[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(9): 64-71.
- [51] 许立武, 李开成, 罗奕, 等. 基于不完全 S 变换与梯度提升树的电能质量复合扰动识别[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(6): 24-31.
XU Liwu, LI Kaicheng, LUO Yi, et al. Classification of complex power quality disturbances based on incomplete S-transform and gradient boosting decision tree[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(6): 24-31.
- [52] BROWN R A, LAUZON M L, FRAYNE R. A general description of linear time-frequency transforms and formulation of a fast, invertible transform that samples the continuous S-transform spectrum nonredundantly[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(1): 281-290.
- [53] 张志禹, 满蔚仕, 郝垒, 等. 快速 S 变换在电能质量分析中的应用[J]. 电网技术, 2013, 37(5): 1285-1290.
ZHANG Zhiyu, MAN Weishi, XI Lei, et al. Application of fast S-transform in power quality analysis[J]. Power System Technology, 2013, 37(5): 1285-1290.
- [54] YAO W X, TANG Q, TENG Z S, et al. Fast S-transform for time-varying voltage flicker analysis[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2014, 63(1): 72-79.
- [55] 吴禹, 唐求, 滕召胜, 等. 基于改进 S 变换的电能质量扰动信号特征提取方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(10): 2682-2689.
WU Yu, TANG Qiu, TENG Zhaosheng, et al. Feature extraction method of power quality disturbance signals based on modified S-transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(10): 2682-2689.
- [56] 刘志刚, 李文帆, 孙婉璐. Hilbert-Huang 变换及其在电力系统中的应用[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(4): 109-116.
LIU Zhigang, LI Wenfan, SUN Wanlu. Hilbert-Huang transform and its applications in power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(4): 109-116.
- [57] SENROY N, SURYANARAYANAN S, RIBEIRO P F. An improved Hilbert-Huang method for analysis of time-varying waveforms in power quality[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(4): 1843-1850.
- [58] 黄奂, 吴杰康. 基于经验模态分解的电能质量扰动信号定位方法[J]. 电网技术, 2010, 34(5): 41-45.
HUANG Huan, WU Jiekang. A method to locate power quality disturbing signal based on empirical mode decomposition[J]. Power System Technology, 2010, 34(5): 41-45.
- [59] 杨晓萍, 刘普森, 钟彦儒. 基于经验模式分解的有源滤波器谐波检测[J]. 电工技术学报, 2009, 24(5): 197-202.
YANG Xiaoping, LIU Pusen, ZHONG Yanru. Harmonic detection of active power filter based on empirical mode decomposition[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(5): 197-202.
- [60] 张杨, 刘志刚. EEMD 在电能质量扰动检测中的应用[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(12): 86-91.
ZHANG Yang, LIU Zhigang. Application of EEMD in power quality disturbance detection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(12): 86-91.
- [61] 吴新忠, 邢强, 陈明, 等. 采用改进互补集总经验模态分解的电能质量扰动检测方法[J]. 浙江大学学报, 2017, 51(9): 1834-1843.
WU Xinzhong, XING Qiang, CHEN Ming, et al. Power quality disturbance detection method using improved complementary ensemble empirical mode decomposition[J]. Journal of Zhejiang University, 2017, 51(9): 1834-1843.
- [62] 崔艳, 刘志刚, 戴晨曦. HF-EMD 频率选取原则及在暂态扰动检测中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(21): 47-53.
CUI Yan, LIU Zhigang, DAI Chenxi. Frequency selection principle of HF-EMD and its application in transient disturbance detection[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(21): 47-53.
- [63] 刘德利, 曲延滨. 改进的希尔伯特-黄变换在电力谐波中的应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(6): 69-73.
LIU Deli, QU Yanbin. Application of improved HHT approach to harmonic analysis in power system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(6): 69-73.
- [64] AFRONI M J, SUTANTO D, STIRLING D. Analysis of nonstationary power-quality waveforms using iterative Hilbert Huang transform and SAX algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(4): 2134-2144.
- [65] LI P, GAO J, XU D, et al. Hilbert-Huang transform with adaptive waveform matching extension and its application in power quality disturbance detection for microgrid[J]. Journal of Modern Power Systems and

- Clean Energy, 2016, 4(1): 19-27.
- [66] 黄传金, 曹文思, 陈铁军, 等. 局部均值分解在电力系统间谐波和谐波失真信号检测中的应用[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(9): 68-73.
HUANG Chuanjin, CAO Wensi, CHEN Tiejun, et al. Application of local mean decomposition in power quality disturbance detection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(9): 68-73.
- [67] 宋海军, 黄传金, 刘宏超, 等. 基于改进 LMD 的电能质量扰动检测新方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(10): 1700-1708.
SONG Haijun, HUANG Chuanjin, LIU Hongchao, et al. A new power quality disturbance detection method based on the improved LMD[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(10): 1700-1708.
- [68] 周超, 黄纯. 基于 LMD 和 TEO 的电能质量扰动检测分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(9): 14-19.
ZHOU Chao, HUANG Chun. Detection and analysis of power quality disturbances based on LMD and TEO[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2016, 28(9): 14-19.
- [69] 杜培伟, 黄纯, 王美, 等. 基于改进 LMD 的谐波扰动检测新方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(8): 74-78.
DU Peiwei, HUANG Chun, WANG Mei, et al. New method of harmonic disturbance detection based on improved LMD[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2016, 28(8): 74-78.
- [70] 徐艳春, 高永康, 李振兴, 等. 改进 LMD 算法在微网电能质量扰动信号检测中的应用[J]. 电网技术, 2019, 43(1): 332-339.
XU Yanchun, GAO Yongkang, LI Zhenxing, et al. Application of improved LMD algorithm in signal detection of power quality disturbance in microgrid[J]. Power System Technology, 2019, 43(1): 332-339.
- [71] 郑文光, 张加岭, 邢强. 基于改进 LMD 方法的电压骤降检测与分析[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(11): 119-127.
ZHENG Wenguang, ZHANG Jialing, XING Qiang. Voltage sag detection and analysis based on a modified LMD method[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(11): 119-127.
- [72] DRAGOMIRETSKIY K, ZOSSO D. Variational mode decomposition[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(3): 531-544.
- [73] 黄传金, 周桐. 基于变分模态分解的电能质量扰动检测新方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(3): 116-123.
HUANG Chuanjin, ZHOU Tong. A new detection method of power quality disturbance based on VMD[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(3): 116-123.
- [74] XU Y C, GAO Y K, LI Z H, et al. Detection and classification of power quality disturbances in distribution networks based on VMD and DFA[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2020, 6(1): 122-130.
- [75] 李文耀, 杨文刚. 自适应变分模态分解的齿轮箱故障诊断研究[J]. 机械传动, 2019, 43(4): 27-31.
LI Wenyao, YANG Wengang. Fault feature extraction of gearbox based on adaptive VMD[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2019, 43(4): 27-31.
- [76] FELDMAN M. Time-varying vibration decomposition and analysis based on the Hilbert transform[J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 295(3): 518-530.
- [77] 刘慧, 刘国海, 沈跃. 采用希尔伯特振动分解的非整数次谐波检测新方法[J]. 高电压技术, 2009, 35(7): 1758-1764.
LIU Hui, LIU Guohai, SHEN Yue. Novel method for non-integer harmonics measurement using Hilbert vibration decomposition[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(7): 1758-1764.
- [78] CHO S H, JANG G, KWON S H. Time-frequency analysis of power-quality disturbances via the Gabor-Wigner transform[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(1): 494-499.
- [79] 曹健, 林涛, 徐遐龄, 等. 一种电能质量扰动监测与识别新方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(31): 125-133.
CAO Jian, LIN Tao, XU Xialing, et al. A new method for measurement and classification of power quality disturbance[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(31): 125-133.
- [80] MANIKANDAN M S, SAMANTARAY S R, KAMWA I. Detection and classification of power quality disturbances using sparse signal decomposition on hybrid dictionaries[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2015, 64(1): 27-38.
- [81] SINGH U, SINGH S N. Time-frequency-scale transform for analysis of PQ disturbances[J]. IET Science, Measurement & Technology, 2017, 11(3): 305-314.
- [82] 黄南天, 徐殿国, 刘晓胜, 等. 电能质量暂态扰动的 HS 变换检测方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2013, 45(8): 66-72.
HUANG Nantian, XU Dianguo, LIU Xiaosheng, et al. Detection of power quality disturbances utilizing HS transform[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2013, 45(8): 66-72.
- [83] 黄纯, 朱智军, 曹一家, 等. 一种电网谐波与间谐波分析新方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 32-39.

- HUANG Chun, ZHU Zhijun, CAO Yijia, et al. A novel power system harmonic and interharmonic analysis method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 32-39.
- [84] 程志友, 王家琦, 左靖坤. 基于 ASW-ESPRIT 的电能质量扰动分析[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 132-137.
- CHENG Zhiyou, WANG Jiaqi, ZUO Jingkun. Power quality disturbance analysis based on ASW-ESPRIT[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 132-137.
- [85] 于静文, 薛蕙, 温渤婴. 基于卡尔曼滤波的电能质量分析方法综述[J]. 电网技术, 2010, 34(4): 97-103.
- YU Jingwen, XUE Hui, WEN Boying. A survey on Kalman filtering based methods for power quality analysis[J]. Power System Technology, 2010, 34(4): 97-103.
- [86] 李江, 王义伟, 魏超, 等. 卡尔曼滤波理论在电力系统中的应用综述[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(6): 135-144.
- LI Jiang, WANG Yiwei, WEI Chao, et al. A survey on the application of Kalman filtering method in power system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(6): 135-144.
- [87] SINGH S K, SINHA N, GOSWAMI A K, et al. Several variants of Kalman filter algorithm for power system harmonic estimation[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2016, 78: 793-800.
- [88] RAY P K, PUHAN P S, PANDA G. Real time harmonics estimation of distorted power system signal[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2016, 75: 91-98.
- [89] SAHOO H K, DASH P K. Robust estimation of power quality disturbances using unscented H_{∞} filter[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015, 73: 438-447.
- [90] HE S F, LI K C, ZHANG M. A new transient power quality disturbances detection using strong trace filter[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2014, 63(2): 2863-2871.
- [91] 聂晓华. 一种基于卡尔曼滤波的电能质量扰动检测新方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(22): 6649-6658.
- NIE Xiaohua. A new method of power quality disturbance detection based on Kalman filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(22): 6649-6658.
- [92] 崔永林, 席燕辉, 张小东. 基于自适应卡尔曼滤波残差分析的谐波检测[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(24): 92-100.
- CUI Yonglin, XI Yanhui, ZHANG Xiaodong. Detection of harmonic based on residual analysis using adaptive Kalman filter[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(24): 92-100.
- [93] 李立, 易吉良, 朱建林. 采用改进不完全 S 变换估计电能质量扰动参数[J]. 电工技术学报, 2011, 26(6): 187-193.
- LI Li, YI Jiliang, ZHU Jianlin. Parameter estimation of power quality disturbances using modified incomplete S-transform[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(6): 187-193.
- [94] 于浩明, 黄纯, 江亚群, 等. 采用快速原子分解的电能质量扰动信号参数辨识[J]. 电网技术, 2014, 38(8): 2237-2243.
- YU Haoming, HUANG Chun, JIANG Yaqun, et al. Parameter identification of power quality disturbance signal using fast atomic decomposition method[J]. Power System Technology, 2014, 38(8): 2237-2243.
- [95] 边海龙, 陈光禹, 杜天军. 基于小波神经网络的时变谐波信号检测[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(7): 104-109.
- BIAN Hailong, CHEN Guangyu, DU Tianjun. A method of time-varying harmonic detection based on the wavelet neural network[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(7): 104-109.
- [96] JAIN S K, SINGH S N. ESPRIT assisted artificial neural network for harmonics detection of time-varying signals[C] // 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 22-26, 2012, San Diego, CA, USA: 22-26.
- [97] 覃思师, 刘前进. 基于粒子群与神经网络的间谐波测量算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(2): 18-22.
- QIN Sishi, LIU Qianjin. Hybrid algorithm for interharmonics measurement based on particle swarm optimization and neural network[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(2): 18-22.
- [98] 肖建平, 李生虎, 吴可汗, 等. 一种新的基于神经网络的电力系统谐波检测方法研究[J]. 电工技术学报, 2013, 28(增刊 2): 345-348.
- XIAO Jianping, LI Shenghu, WU Kehan, et al. A novel approach of harmonic detection in power system based on neural network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(S2): 345-348.

收稿日期: 2020-10-10; 修回日期: 2020-12-20

作者简介:

王 燕(1985—), 女, 通信作者, 博士, 讲师, 研究方向为电能质量分析与控制。E-mail: yanyanjtdx@126.com

(编辑 许威)