

动态电能计量算法研究综述

邵方静¹, 宋晓林¹, 刘坚², 雷婧婷¹, 尉怡青², 赵伟²
(1. 国网陕西省电力公司营销服务中心(计量中心), 西安 710199;
2. 清华大学 电机工程与应用电子技术系, 北京 100084)

摘要: 能源互联网背景下, 电网表现出“双高”和“双随机”特征, 致使其电压、频率随机且频繁出现波动变化, 引发新的电能质量问题。动态条件下如何实现电能的准确计量, 以保证其公平公正, 已越来越受到关注。文章从稳态和动态两方面对现有电能计量算法进行梳理和归纳, 总结点积和与快速傅里叶变换等稳态算法的原理、技术特征及对信号动态变化的不适用性; 对估计基波频率类动态算法, 以及短时傅里叶变换、小波变换、希尔伯特-黄变换和 S 变换等时-频分析类动态算法的原理、技术特点、局限性等进行比较和分析; 并重点归纳了小波变换方法的优缺点及应用前景。在此基础上, 对动态电能计量算法的未来研究给出了建议。

关键词: 功率理论; 电能计量; 快速傅里叶变换; 时-频分析; 小波变换

DOI: 10.19753/j.issn1001-1390.2023.04.001

中图分类号: TM93

文献标识码: A

文章编号: 1001-1390(2023)04-0001-10

A review on dynamic energy metering algorithms

Shao Fangjing¹, Song Xiaolin¹, Liu Jian², Lei Jingting¹, Yu Yiqing², Zhao Wei²

(1. Marketing Service Centre (Measurement Centre), State Grid Shaanxi Electric Power Company, Xi'an 710199, China. 2. Department of Electric Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In the context of Energy Internet, the power grid exhibits the characteristics of “double high” and “double random”, causing random, frequent, unpredictable voltage and frequency fluctuations and hence new power quality issues. It has attracted some attention on how to realize the accurate measurement of electric energy under dynamic conditions so as to ensure the fairness and justice of the energy trade. This paper reviews the existing energy metering algorithms from both steady-state and dynamic aspects and summaries their principles, technical characteristics, and inapplicability of the steady-state algorithms, such as dot product sum and fast Fourier transform become unfit to dynamic measurement signals. The principle, technical characteristics, and limitations of dynamic algorithms for estimating fundamental frequency, as well as time-frequency analytical dynamic algorithms including short-time Fourier transform, wavelet transform, Hilbert-Huang transform, and S-transform, are compared. Specifically, the advantages and disadvantages of the wavelet transform method and its application prospects are summarized. Finally, the future research trends of dynamic energy metering algorithms are discussed.

Keywords: power theory, energy metering, FFT, time-frequency analysis, wavelet transform

0 引言

随着我国能源互联网建设的不断深入, 电力系统与天然气网络、热力网络等其它能源系统紧密相连, 形成关键能源枢纽, 使电能成为了最核心、最重要的能源形态。电能计量作为收取电费的依据, 贯穿于电力的生产、传输、使用全过程。在发展和建设能源互联网背

景下, 新型电力系统将呈现出“双高”和“双随机”特点。“双高”, 即高比例可再生能源接入和高比例电力电子设备应用, 如此, 一方面会使电网电压、电流的随机波动变化增强, 整数次谐波和间谐波等含量上升; 另一方面, 也致使电网电压、电流产生大量、复杂的谐波和间谐波等成分, 不再是稳态的正弦波。所谓“双随机”, 即电源侧与负荷侧均表现出随机性, 使电力系统电压、电流的随机时变特性更为显著。“双高”、“双随

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52077112)

机”电网中,电网电压、频率随机频繁波动,电流波形严重畸变,对电能计量设备的准确性造成冲击,导致使用原有电能计量设备的测量误差增大。

目前供用电管理中采用的电能计量方法,仅适用于电压、电流平稳的稳态系统。而对于动态波动、随机变化明显的供电系统,还采用原有方法测算电能,无疑会产生误差,甚至是较大误差,很可能导致少计、错计大量电能,践踏公平、公正的计量准则,伤害供电、输电、用电三方利益。

若能在动态条件下实现对电能的足够准确计量,无疑有益于维护供、输、用电三方的经济利益和保证电能计量的公平公正;同时,也可为以新能源为主体新型电力系统的科学有序建设,提供先进的电能计量方法及技术支持。

文章在现有功率理论基础上,对现有稳态电能计量算法的适用性做简要分析,归纳能源互联网建设背景下,电网电压、电流信号出现的动态(与非稳态相对应)变化特征,指出现有电能计量算法对动态情况的不适用性,对多种动态电能计量算法的性能进行比较和分析,梳理动态电能计量算法的研究现状及面临的问题,进而指出动态电能计量算法未来的研究方向。

1 电能计量方式发展历程和现状

用于电能计量的仪表即电能表,是遵循需要考核的计量指标的定义而设计和制造的。因此,正确阐述功率流的物理机制,建立健全完善的、能够被普遍接受的功率理论,是研究电能计量算法的理论基础^[1-2]。经过很多专家、学者和工程技术人员的长期探索和研究,写入国际标准 IEEE Std. 1459-2010 的功率理论^[3]得以确立。该理论为设计、研发新型电能表提供了理论参考,也是研究非正弦和不平衡条件下电能计量方法的重要依据。此外,IEC 61000-4-7 标准^[4]对谐波测量方法(包括运算点数多少、计算时间窗口大小、谐波成分计算模型确定和选择等)给出了指导性建议。因此,本文基于 IEEE Std. 1459-2010 功率理论和 IEC 61000-4-7 标准,对现有电能计量算法进行比较、分析和评述。

电能表发明至今已有 100 多年历史。随着电力系统发展以及电能表制造技术的不断更新换代,电能表的技术性能日益进步、不断完善^[5]。

1880 年,德国的爱迪生利用电解原理制成了直流电能表。之后,交流电的出现和被利用,促使感应系电能表诞生并应用于实际。1890 年,弗拉里斯基于电磁感应原理发明了感应式电能表^[6]。感应式电能表利用旋转铝盘所受力矩与负载有功功率成正比的物理机

理,通过记录铝盘转数累计负载消耗的电能。但感应式电能表的设计和制造,是针对计量工频正弦波及较低频率范围电压、电流形成的电能的。随后出现的机电式电能表,其与感应式电能表相比,只是计量部分采用了脉冲计数^[7],故仍具有准确度较低、频率适应范围较窄的局限,仅适用于对电能计量准确性要求不高的场合。随着电子技术的发展,20 世纪 60 年代,电子式电能表应运而生。它摒弃了机械旋转运动式测量机构,改为对模拟电压、电流信号实施数字化采集,再由乘法器和积分器完成电能计量功能,其具体计量的,是包括谐波电能在内的所有电能,或称全电能^[8]。随着数字信号处理技术的发展,电能表在功能实现上,尤其是反映不同被测信号特征的电能计量算法,更多利用软件实现,故电子式电能表又有了数字式电能表之称。数字式电能表具有准确度高、体积小、功能易于拓展等特点,近些年推广迅速并已广泛应用^[9]。

现阶段普遍采用的电能计量方式,可分为全电能计量、基波电能计量和谐波电能计量三种方式。早期,数字式电能表采用最简单的点积和电能计量算法,所实现的,就是对全电能的计量。然而,由于投入电网的电力电子化非线性负荷越来越多,电网电压、电流中出现大量谐波,甚至还有间谐波以及直流衰减等成分。电网电压、电流中出现的谐波源,有些是由非线性负荷产生的,会向电网注入谐波电流,其方向与基波电流相反,产生的谐波有功功率会抵消部分基波有功功率;而线性负荷用电户则受到谐波的危害,消耗基波电能的同时,还会消耗谐波电能。如此,全电能计量方式下,非线性负荷产生谐波、污染电网的同时,在它上计量到的有功电能,反而会比其实际消耗的电能少,会少计电费;而线性负荷,则不仅受到谐波污染,还要多交电费。可见,当电网中存在非线性负荷时,采用全电能计量方式测算电能不尽合理。

若采用基波电能计量方式,虽然能避免线性负荷用电户承担额外的谐波有功电费,但非线性负荷用电户却仍仍需支付基波有功电费,而其产生谐波仍未受到处罚,即采用这种电能计量方式,仍未能引导非线性负荷用电户采取措施、减少向电网注入谐波等污染。所以说,针对电网中谐波等污染越来越严重的情况,基波电能计量方式也不适用^[10]。

而谐波电能计量方式,是一种能对基波电能和谐波电能分别进行计量的方式,能够克服前述两种电能计量方式的不足和缺陷,更合理地实施对电能的计量。基于这种电能计量方式研发电能计量算法,具有十分

重要的现实意义。

2 稳态电能计量算法

截至目前,按适用范围,电能计量算法可分为稳态电能计量算法和动态(非稳态)电能计量算法。稳态电能计量算法主要有两种,即点积和电能计量算法和快速傅里叶变换电能计量算法。

2.1 点积和电能计量算法

点积和电能计量算法利用模数转换器(ADC),对电网电压、电流进行采样,并将各采样点的电压、电流对应相乘,得到瞬时功率,该瞬时功率在工频周期内的算术平均数即为平均功率,再结合工频周期,进一步可得到工频周期内的电能。

该算法原理简单,便于设计,在数字式电能表中易于实现;原理上,其计量电能的准确度可达到足够高;但也存在如下缺陷:(1)计量准确度受采样间隔即采样频率影响,采样频率越高,准确度越高,但采样频率增高会带来硬件成本增加;(2)如此测算得到的是全电能,即未对基波电能与谐波电能加以区分,难以保证电能计量的公平公正。

2.2 快速傅里叶变换(FFT)电能计量算法

对采样所得的电压、电流信号进行 FFT 变换,得到电压、电流信号中各次谐波成分的幅值、相位和频率,然后,分别计算出基波和各次谐波成分的有功功率;若将基波有功功率和各次谐波有功功率求代数和,还可得到总有功功率。相应的功率累计一定时间,便得到相应的电能。

FFT 算法是将时域电压、电流信号转换为频域信息,分别计算出基波电能和谐波电能。在电网稳态条件下,因容易做到整周期采样,故可能使电能计量的准确度达到很高,与理论值基本无偏差。该算法的缺陷在于缺少时域信息,且若做不到整周期采样,就会产生频谱泄漏和栅栏效应,其计量电能的准确度就会降低。而实际中,受多种现场因素的影响,常不易做到严格的整周期采样。

综上所述,目前主要采用的稳态电能计量算法中,点积和电能算法是时域算法,未利用被测信号的频域信息,即便在高采样率条件下拥有较高的准确度,但仍无法区分基波电能与谐波电能,难以实现电能计量的公平公正;而 FFT 电能计量算法从频域切入,提取基波和各次谐波成分的幅值、相位等信息,若能做到整周期采样,能达到足够高的准确度,但在非整周期采样下,其准确度会下降。

3 动态(非稳态)电能计量算法

由第 2 节可知,时域算法缺少频域信息,无法区分基波电能与谐波电能,因此不适用于计量谐波电能。

而电网电压、电流信号动态条件下,其谐波成分及含量更多,情况也更为复杂,故采用谐波计量方式更为必要。因此人们从频域以及时-频域角度出发,研究提出了多种动态电能计量算法。

研究发现,将稳态电能计量算法应用于非稳态情况,会面临两个考验:(1)IEEE Std. 1459-2010 给出的功率理论中,未对间谐波功率的计算给出定义,即对间谐波造成的电功率缺少计及标准,有待进一步探索;(2)IEC 61000-4-7 标准规定,采用 FFT 算法进行谐波参数测算,测量时间窗为 10 个工频周期(200 ms)。但光伏和风力等新能源发电的接入,使电力系统频率出现偏移较为常见。而频率的偏移,会导致采样环节出现对相关电参量的非整周期采样。此情况下,若继续采用 FFT 算法,产生的伪谐波成分就可能导致电能计量出现较大误差。

针对考验(1),人们基于 IEEE Std. 1459-2010 功率理论,将谐波次数由正整数推广到分数或无理数,即将有功功率中的谐波功率扩展到间谐波功率,再根据实际信号进行测算。文献[11]在此基础上,将含谐波和间谐波的功率定义成有方向的,即,当谐波和间谐波功率注入电网时,取为正;而当谐波和间谐波功率注入用电户时,取为负。如此,可有效避免发生非线性负荷用电户发出谐波和间谐波却少计量电能,而线性负荷受到谐波和间谐波危害却还要多交电费的情况。文献[12]推导并证明了非整周期采样条件下,不同次间谐波之间、间谐波与谐波或与基波之间相作用产生的电能不一定为零。因此,在未对间谐波的相关电功率制定标准之前,将谐波功率扩展到间谐波功率并不一定合理。针对考验(1),较合理的解决方案是放弃一部分频域信息,并补充一部分时域信息,即改为采用时-频分析的方法,对一个合适的频段的电能采用点积和电能算法实施计量,得到具有理论意义的结果。

针对考验(2),有人沿着时-频分析途径研究并提出了多种电能计量算法,如离散小波变换(Discrete Wavelet Transform, DWT)^[13-16]、稳态小波变换(Stationary Wavelet Transform, SWT)^[17]及小波包变换(Wavelet Packet Transform, WPT)等算法^[18-19]。另有人则仍基于以往知识及前沿理论开展研究,力图更准确估计基波频率,以实现整周期采样的条件。

综上所述,动态(非稳态)电能计量算法主要从两方面设法提高准确性:(1)如何更准确地估计基波频率;(2)如何完善时-频分析策略,使其更好地应用于动态(非稳态)电能计量算法的构建。

3.1 估计基波频率

当电力系统频率发生变化时,可通过使采样频率与电力系统频率同步,即调整采样频率为实际基波频率的整数倍来创造整周期采样条件,进而再基于 IEEE Std. 1459-2010 功率理论求取相关电参量,以达到准确计量电能的目的。同步技术可分为两类,即重采样和插值重构。

在重采样方面,首先要对电力系统的基波频率进行估计,然后根据基波频率估计结果控制 ADC,以对分析后的信息进行重采样。这一过程采用 IEC 61000-4-7 标准的同步机制,如图 1 所示。

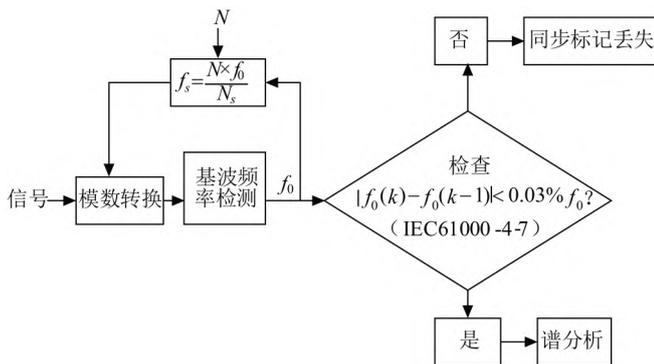


图 1 IEC 61000-4-7 标准同步机制

Fig. 1 Mechanism of synchronization provided by the IEC standard 61000-4-7

图 1 中,同步阶段需要采用过零检测、频域插值、Chirp-Z 变换、锁相环原理等数值计算方法^[20],以防止出现频谱泄漏,以尽可能准确地估计基波频率。若发生同步标记丢失,则需要通过加窗和参数化方法加以补偿。常用窗函数有 Hanning 窗、Hamming 窗、Blackman 窗和 Gauss 窗等,均可用来减少频谱泄漏^[21-23]。但加窗方法通常只能减少谐波分析的估计误差。常用的参数化方法,包括 ESPRIT(旋转因子不变法)、Prony 法、SVD(奇异值分解法)和特征值分析法,等等,它们可提供更高的频率分辨率(见图 2)。

重采样方法可以得到同步采样频率。然而,一些低成本模数转换器,其采样频率无法做到灵活调整。若发生该种情况,可根据得到的新采样频率,再采用某种插值方法对采样数据做校正,可减小重构误差和防止干扰,例如采用牛顿法、多项式拟合、三次样条插值以及径向基神经网络方法等^[24]。插值过程虽然不会出现同步损失,但会增加计算量。

通过采用重采样和插值重构等方法,能实现准确度更高的基波频率估计。基于此,相应地调整采样频率,使其对被分析信号做到整周期采样,防止频率泄

漏,尽可能减少由频率泄漏产生的间谐波成分,能在 IEEE Std. 1459-2010 功率理论前提下,实现对电能足够准确的计量。但由于整周期采样后,处理采样数据所采用的,还是以 FFT 为基础的改进算法,仍缺乏时域信息,故只能从频域角度计量基波电能和谐波电能。考虑到复杂动态电网中的电压、电流信号本身含有一定量的间谐波,因此,有人从时-频分析角度对电能计量方法做了进一步探究。

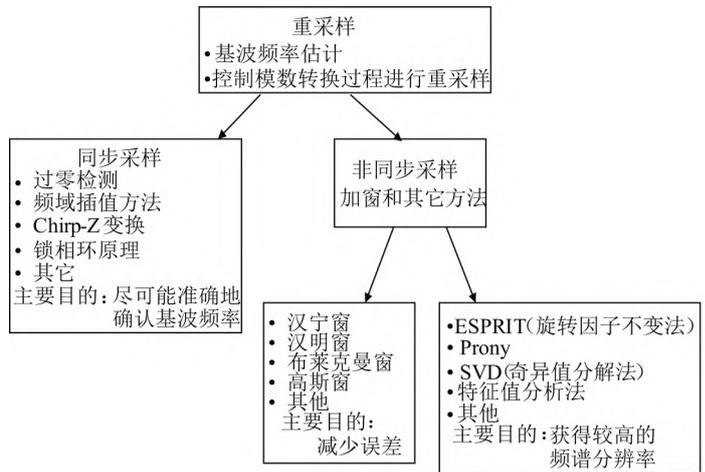


图 2 重采样方法分类图

Fig. 2 Classification diagram of synchronization of resampling

3.2 改进的 FFT 算法

FFT 算法虽有缺少时域信息的本征缺陷,但计算速度快,易于在数字式电能表中实现,故许多人仍不愿彻底放弃它,而是在为克服它的缺陷上开展了不少修补性研究和尝试,以使其也可用于动态条件下的电能计量。

为削弱频谱泄漏带来的影响,有人提出了加窗 FFT 算法,且根据窗函数的频域特性(主要包括主瓣宽度、旁瓣峰值、旁瓣衰减速率以及主瓣旁瓣能量比等)和时域特性(时间窗边界的连续性),提出了多种不同类型的窗函数。常用的窗函数有矩形窗、Hanning 窗、Rife-Vincent 窗、Dolph-Chebyshev 窗及 Kaiser 窗等^[25-29]。

针对加窗 FFT 算法对实际频率和初相位的关注不够,有学者又提出了若干种加窗 FFT 插值算法。这些算法的基本原理是,利用被测信号中某频率成分的真实频率附近的峰值谱线,通过插值,求得近似频点,再根据近似频点以及峰值谱线信息,求得近似的幅值和初相位。不同加窗 FFT 插值算法之间的区别,主要是窗函数不同,以及插值方法不同。此外,IEC 61000-4-7 规定,应采用快速傅里叶变换(FFT)的谐波分“组”和

分“子组”测算谐波和间谐波,并指定分析用的时间窗为 10 个基波周期^[30]。其中,“谐波组”是指时间窗内,在对信号进行 FFT 后的频谱图中,挑选出谐波的幅值谱线以及与它左、右相邻的各 5 根谱线进行整合的组别。而“谐波子组”,则指时间窗内,在对信号进行 FFT 后的频谱图中,挑选出谐波的幅值谱线以及与它左、右相邻的各 1 根谱线进行整合的组别。谐波分组算法用于电能计量过程中,涵盖了由基波和谐波频谱泄漏产生的间谐波成分,能在一定程度上提高电能计量的准确度。加窗 FFT 算法、加窗 FFT 插值算法及谐波分组算法,都是对 FFT 算法的改进,可使测量结果的准确度在非整周期采样条件下有所提高^[31]。文献[32]对上述三类算法,基于不同窗函数以及不同插值算法排列组合形成的 621 种算法的计算准确性、计算开销等进行了比较和分析,进而针对不同应用场景和不同电力用户需求给出了推荐算法建议。但上述算法,仍仅专注于对频域信息的处理和改进,而仍未关注被测信号的时域信息,且在未对间谐波功率形成国际性标准之前,其理论基础是不足的。鉴于此,有人又研究提出了若干种基于时-频分析的电能计量算法。

3.3 时-频分析方法

3.3.1 短时傅里叶变换法

短时傅里叶变换(Short Time Fourier Transform, STFT)是 1946 年 Gabor 提出的一种“时域局域化”方法^[33],其基本思想是:以傅里叶变换作为频域分析的基本工具,为能关注时域上某个局域部分的变化特性,在对信号做傅里叶变换前,先乘上一个时间有限的窗函数,并假定非平稳信号在分析窗长内是平稳的;通过让该窗函数在时间轴上移动,使被关注信号逐点进入被分析状态,这样就可得到被关注信号的一组“局域”频谱,进而从不同时刻“局域”频谱的差异上去获得信号的时域信息。具体地,时间信号 $x(t)$ 的短时傅里叶变换被定义为:

$$\text{STFT}(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) h(\tau - t) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (1)$$

式中 $h(\tau - t)$ 为分析窗函数。

STFT 将时间与频率联合起来,在时-频平面内进行分析。这种方法的优势在于基本算法仍是傅里叶变换,物理意义易于理解,且易于在硬件端实现。但该方法仍存在缺陷:(1)当电压、电流信号非平稳时,由于该方法不能同时获得更好的频率分辨率和时间分辨率,故利用其分析非平稳电压、电流信号的效果会变差;(2)当电网电压、电流信号发生频率偏移和频率波动,或存在间谐波成分时,该方法不可避免地会产生频谱泄漏和栅栏效

应,从而产生测算误差;(3)一般而言,对快变信号,人们总希望有足够高的时间分辨率,以观察其快变部分,即希望观察的时间宽度要小,而此时由于时宽-带宽积的影响,该信号的频域分辨率会下降。故对快变信号即高频信号,希望有足够高时间分辨率之同时,要降低其高频端的频率分辨率;反之,对慢变信号即低频信号,需要降低它的时间分辨率,以期在低频处获得足够高的频率分辨率。但该方法的窗函数宽度固定不变,缺乏自适应性,故难以满足准确分析非平稳信号频率变化的需求^[34]。

3.3.2 小波变换

与傅里叶变换相类似,小波变换也是将信号用一组函数即小波基函数的线性组合来表征。小波基函数是母小波 ψ 经过平移和伸缩所产生的一组函数。小波基函数的定义如下:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2)$$

式中 a 为尺度因子; b 是时移因子; ψ 是在某一时间间隔内积分为零的小波函数。小波变换可以定义为:

$$WT_x(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int x(t) \psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt = \int x(t) \psi_{a,b}^*(t) dt = \langle x(t) | \psi_{a,b}(t) \rangle \quad (3)$$

式中 a 、 b 和 t 均为连续变量。因此,式(3)又称连续小波变换。

基于泛函空间的小波变换(WT)方法,作为一种时-频分析技术,对快变信号可提供足够高的时间分辨率;且对慢变信号,也能提供足够高的频率分辨率;同时,还能克服 STFT 方法窗长固定、缺乏自适应性之不足,可对被测信号进行多分辨率分析。

实际应用中,小波变换也有多种具体方法。目前在电能计量领域采用较多的小波变换方法,主要包括离散小波变换(DWT)、稳态小波变换(SWT)和小波包变换(WPT)等^[35-36]。其中,DWT 是一种非冗余变换,其固有缺陷是:经过它变换得到的信号系数,并非是原始信号相应系数的时移。而 SWT 采用冗余变换,有助于识别与非平稳信号相关的某些属性。但 DWT 和 SWT 方法所提供的,都是对数化、不均匀的频率分辨率,不能准确获取被测算电压、电流信号中各次谐波成分的信息。因此,基于 DWT 和 SWT 方法形成的电能计量算法,仅可实现对全电能和基波电能足够准确的计量,但却不能足够准确地分别计量各次谐波电能。

小波包变换即 WPT,是将被测时域信号分解为多个时-频带,进而观察该信号特定频带内的特征。对非

平稳信号进行 WPT,通常是使用一组低通和高通滤波器即 $H_0(z)$ 和 $H_1(z)$ 并配合进行二抽取,以实现信号的分解。其中,低通滤波器被称为尺度滤波器,高通滤波器被称为小波滤波器。WPT 方法的每一级,都同时对被测信号的低频成分和高频成分进行分解,且随着分解级别的增加,频带不断变窄。三级分解的小波包分解树,如图 3 所示。

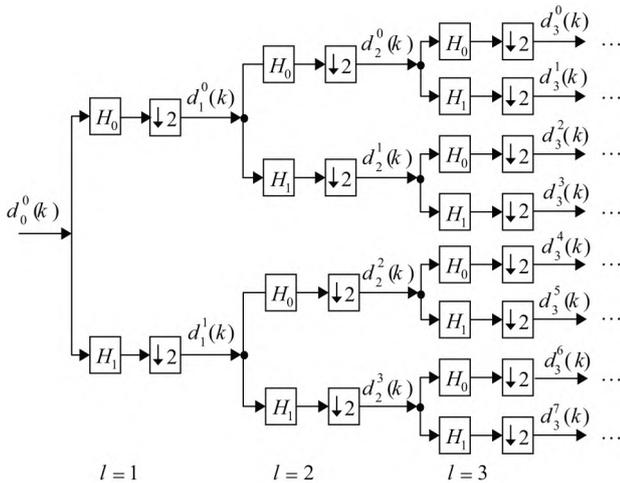


图 3 包含三级分解的小波包分解树

Fig. 3 Three-level WPT decomposition tree

图 3 中,一般情况下, $d_0^0(k) = x(k)$,即是对原信号的抽样; $d_j^p(k)$ 代表在第 j 级分解中,结点 p 处的小波包系数。

通常,电网电压信号 $u(t)$ 和电流信号 $i(t)$ 均是平方可积的时间函数,因此,可对动态电压、电流信号进行小波包分解。分解中,对电网电压、电流信号使用相同的小波函数和尺度函数,则在小波包分解树的任意结点 (j, p) 处,会得到:

$$\begin{cases} d_{j,\mu}^p(k) = \langle u(t) \psi_{j,k}^p(t) \rangle, \\ d_{j,i}^p(k) = \langle i(t) \psi_{j,k}^p(t) \rangle, \\ p = 0, 1, \dots, 2^{j-1} - 1 \end{cases} \quad (4)$$

式中 $d_{j,\mu}^p(k)$ 、 $d_{j,i}^p(k)$ 分别为 $u(t)$ 、 $i(t)$ 在该结点处的小波包系数,它们是 $u(t)$ 、 $i(t)$ 分别与基函数做内积的结果。利用小波包分解方法,可得到电网电压、电流信号在各频率子带的时-频分析结果。

基于上述分析,电网电压、电流信号可由分解得到的小波包系数来表征,具体有:

$$\begin{cases} u(t) = \sum_{p=0}^{2^j-1} \sum_k d_{j,\mu}^p(k) \psi_{j,k}^p(t) \\ i(t) = \sum_{p=0}^{2^j-1} \sum_k d_{j,i}^p(k) \psi_{j,k}^p(t) \end{cases} \quad (5)$$

当使用的小波函数是正交小波时,WPT 各个子空间的基函数都是空间内的标准正交基,因此,各个子空间的基函数具有如下性质:

$$\begin{cases} \langle \psi_{j,k}^p, \psi_{j,k}^p \rangle = 1 \\ \langle \psi_{j,k}^p, \psi_{j,k}^{p'} \rangle = 0, p \neq p' \end{cases} \quad (6)$$

根据上述性质,由小波包系数计算的有功电能可表征为:

$$W = \int u(t) i(t) dt = \sum_{p=0}^{2^j-1} \sum_k d_{j,\mu}^p(k) d_{j,i}^p(k) \quad (7)$$

利用动态电压、电流信号在各频率子带的分解结果,可分别计算基波和各次谐波成分的有功电能。

小波包变换从时-频域切入,在提供均匀的频率分辨率之同时,保留了相关时域信息,使所实现的电能计量可概括为“某一频段中电压、电流的点积和”,规避了 IEEE Std. 1459-2010 功率理论未对间谐波功率进行定义的缺陷,具有理论意义,且对实际电网动态条件下电能计量的准确度较高。但该方法仍存在缺陷:(1)随着分解层数的增加,所需内存增大,且易受噪声影响;(2)在所构建算法的每一级中,相同滤波器的使用,可能使某些偶数次谐波成分会受到通带纹波的影响,导致电能计量误差加大;(3)在动态电压、电流信号中存在间谐波成分情况下,对电压、电流信号实施小波包分解,会产生频谱泄漏和频谱混叠,因而需要综合考虑小波滤波器的性能指标要求,设计频率响应特性更理想的滤波器组;(4)对最优小波正交基的选取,需进行多次尝试;(5)小波变换本质上也是加窗后的傅里叶变换,仍会受到不定原理的制约,即时间分辨率与频率分辨率无法同时达到最优。

文献[37]尝试克服 WPT 方法的缺陷(1)和缺陷(2),提出了相应的算法。文献[38]瞄准克服 WPT 方法的缺陷(3)和缺陷(4)进行探索,基于共轭正交滤波器组设计出一组窄过渡带的小波滤波器和尺度滤波器,可很好地从被测信号中分离出间谐波成分。可以说,在间谐波功率尚未明确被国际标准规定之前,将小波包变换应用于复杂动态电网的电能计量,有理论优势,但如何应用到实际场合,还有待进一步探究。

3.3.3 希尔伯特-黄变换(HHT)

非平稳信号分析的主要难点,是对瞬时频率分量的分析。1998年,黄锷等人提出一种经验模态分解(EMD)方法。该方法引入了 Hilbert 谱的概念和分析方法,又称 HHT 方法。HHT 方法首先对非平稳信号自适应地进行“筛选”,使其分解为一系列经过 Hilbert 变换

后满足均值为 0、局部对称条件,且具有物理意义的固有模态函数;然后,对分解得到的成分进行转换,得到对应的 Hilbert 谱,由 Hilbert 谱就可得到每个频率成分的时-频特性;最后,将所有的 Hilbert 谱综合在一起,就可得到原始非平稳信号的时-频特性。定义非平稳信号 $x(t)$ 的 HHT 变换为:

$$\tilde{x}(t) = \frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (8)$$

其逆变换为:

$$x(t) = \frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\tilde{x}(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (9)$$

当 $x(t)$ 与 $\tilde{x}(t)$ 为一对复共轭时,可生成一个解析信号,即:

$$y(t) = x(t) + j\tilde{x}(t) = a(t) e^{j\phi(t)} \quad (10)$$

式中 $a(t)$ 为非平稳信号 $x(t)$ 的时变振幅; $\phi(t)$ 是 $x(t)$ 的时变相位,相应的数学模型分别是:

$$a(t) = \sqrt{x^2(t) + \tilde{x}^2(t)} \quad (11)$$

$$\phi(t) = \arctan \frac{\tilde{x}(t)}{x(t)} \quad (12)$$

HHT 变换中,可用式(13)定义 $x(t)$ 的瞬时频率:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi(t)}{dt} \quad (13)$$

文献[39]将 HHT 应用于电力系统暂态特性研究,对故障信号进行谐波分析,提取相关参数。文献[40]将 HHT 与小波变换的谐波分析性能相比较,发现 HHT 虽计算速度快,具有较好的时频分辨率,但存在端点效应和模态混叠问题。文献[41]将 HHT 与数学形态学相结合,使 HHT 获得了很好的抗噪性能,并且提高了谐波与间谐波成分的估计准确度;文献[42-43]将 HHT 应用于非稳态信号分析,并针对特定场景给出了改进方法;文献[44]分别采用支持向量回归机、镜像延拓和自适应波形方法,对 HHT 中的端点效应问题加以改进,提高了获取谐波相关参数的准确度。文献[45]提出一种基于傅里叶同步挤压变换和希尔伯特变换的谐波、间谐波检测方法,能削弱模态混叠和噪声干扰。目前对 HHT 在电力系统领域应用的研究,主要集中在信号检测方面,而将其应用于电能计量的研究尚处于起步阶段。

希尔伯特-黄变换(HHT)方法的优势在于:它既吸取了小波变换具有的多分辨率优势,又克服了小波变换中需要选择小波基的困难。其缺点是:(1)瞬时频率这一概念从物理角度理解较困难,难以建立精准的数

学模型;(2)经验模态分解需要复杂的迭代递归,计算时间长;(3)存在端点效应和模态混叠问题;(4)分析频率成分较简单信号较快,而处理较高频率谐波时,可能出现较大偏差。故仍需要进一步深入研究,HHT 方法才可能用于准确计量电能。

3.3.4 S 变换(Stockwell Transform)

S 变换是由 Stockwell 于 1996 年提出的一种时-频分析方法,其主要特点是将短时傅里叶变换中的窗函数替换成高斯窗函数。高斯窗函数的窗宽与频率的倒数成正比^[46],即其窗宽可随频率增高而变窄。因此,低频时,高斯窗的频率分辨率高;高频时,时间分辨率高,如此,利用它可对被测信号进行合适的多分辨率分析。S 变换的时域表达式为:

$$\begin{cases} S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) w(t, \sigma, \tau) e^{-j2\pi ft} dt \\ w(t, \sigma, \tau) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\tau)^2}{2\sigma^2}} \\ \sigma = \frac{1}{|f|} \end{cases} \quad (14)$$

式中 $w(t, \sigma, \tau)$ 为高斯窗函数; $x(t)$ 代表被分析信号; τ 是时间平移因子; σ 表示窗函数宽度的尺度因子。 σ 将窗宽与频率联系起来,使窗宽不再固定。

之后,有学者对窗宽尺度因子 σ 又进行了调整改进研究,进而提出了广义 S 变换:文献[47-49]在 $\sigma = mf, mf + k, \frac{1}{|f|^q}, mf^q + k$ 等条件下,分别给出了广义 S

变换的适用场合。文献[50-51]采取 $\sigma = \frac{1}{a|f|^b}$ 型窗宽尺度因子对电网信号进行谐波分析后,按特征差异进行扰动分类,建立了一种电能质量综合评估指标。文献[52]提出一种基于广义 S 变换的谐波快速检测方法,能准确、快速提取谐波幅值和相位信息,具有良好的抗噪性和实时性。文献[53]对电力系统谐波检测方法进行评定,在不同测量条件下,将 S 变换和传统方法的测算结果进行对比分析,证明了 S 变换的优越性。文献[54]针对电网非稳态信号的典型特征,相应改进了高斯窗宽尺度因子 σ ,并利用改进的 S 变换具有的优秀时频分辨率特性,分别在冲击性负荷、波动性负荷和变频负荷下,对基波电能和畸变电能进行了分解重构,实现了准确合理的电能计量。

S 变换的结果中包含大量时频信息,意味着需要大量的运算,故其实时性较差。广义 S 变换源于 S 变换,同样存在运算量大、实时性差的问题。针对于此,文献

[55]采用二次极值法,并结合阈值控制提取信号的特征频率点,对广义S变换进行预处理,如此,不仅可减小运算量和计算时间,也能削弱噪声影响。文献[56]提出一种包络极值算法,用频率-幅值包络极大值确定时频矩阵中的频率点,且仅针对这些特征频率点进行S变换的后续计算,结果在可保证时频分析准确性之同时,能大大减小计算量。

S变换是小波变换与短时傅里叶变换相结合形成的一种时-频分析方法,继承发展了小波变换和短时傅里叶变换的局部化思想,能克服短时傅里叶变换窗口宽度固定不变的缺陷,还规避了IEEE Std. 1459-2010功率理论未对间谐波功率进行定义的不足,具有理论意义;且与小波变换相比,其用于部分非线性负荷信号下的电能测算表现出足够高的准确性。S变换的缺点也较明显:(1)需要根据不同的信号特征选择相应的尺度因子,耗时较长;(2)计算过程受到不定原理制约,即时间分辨率与频率分辨率无法同时达到最优;(3)无法对信号中衰减的直流成分进行时-频分析;(4) N 点的S变换,需要进行1次FFT、 N 次IFFT及 N 次复数乘加法运算,计算量较大,实时性较差。现有研究主要倾向于通过提取信号特征频率点来减少IFFT运算次数,以期达到减少计算量、提高实时性的目的。但具体所采用提取信号特征频率点方法的不同,可能导致少计、漏计部分谐波电能,造成电能计量准确度下降。

现有的主要时-频分析算法中,基于加窗FFT的STFT法易于更新,便于构建,应用较广,但其忽略了IEEE Std. 1459-2010功率理论未对间谐波功率进行定义这一缺陷,使得采用它所计量的部分电能并无理论意义,还难以严格保证电能计量的公平性。小波变换方法近年来发展较快,且其中的小波包变换法,很好地为谐波及间谐波电能计量提供了理论支撑,但在某些细节方面仍存在不足,如频带划分不尽合理,以及滤波器频率响应特性不尽理想。希尔伯特-黄变换(HHT)法的物理和数学意义不够严谨,虽然在检测方面有一些实践成果,但仍有待进一步探究,才可能应用于电能的准确计量。S变换在准确度方面展示出美好前景,但在改进尺度因子、提取特征频率点、减少运算量以及提高计算速度等方面均有待进一步提高。此外,上述四种方法的联合使用,如STFT与WPT、STFT与HHT等方法相结合,优势互补后,都可能改进、优化算法性能,展现出更广阔的应用前景。而人工神经网络、支持向量回归机、遗传算法和粒子群优化等方法与上述四种方法的结合,也可能使得相应算法中待求解参数的

确定更为准确,也十分值得进一步探究。

4 结束语

在构建能源互联网背景下,电网信号动态变化的特征更为明显。应该在动态条件下实现对电能足够高准确度的计量,以维护供、输、用电三方的经济利益,保证电能计量的公平公正;同时,实现新能源为主条件下更合理地计量电能,这无疑有益于以新能源为主体新型电力系统即能源互联网的加快建设和技术进步。

文章首先介绍了现有电能计量算法所依照的IEEE Std. 1459-2010功率理论和IEC 61000-4-7标准,然后简述了电能表的发展历史,并基于目前普及使用的数字式电能表,分析了现有电能计量方式存在的问题,论述了应选择最合理的谐波电能计量方式实施电能计量。随后,分别就稳态电能计量与动态电能计量,对已有电能计量算法进行了归纳、分析和评述。具体到稳态电能计量算法,阐述了点积和与FFT方法原理,分析了它们的优缺点,指出了两者的适用范围。而对动态电能计量算法,以“双高”和“双随机”电网中电压、电流信号的新特征为切入点,归纳其相应特征,并指出在现有功率理论和标准下动态电能计量算法面对的考验。进而针对问题,梳理归纳了对应的解决方案:(1)估计基波频率和(2)时频分析方法。针对现有功率理论不尽完善,文中简要评述了几种估计基波频率方法,着重归纳总结了时-频分析算法的发展历程、适用范围、优势及缺陷,在此基础上,指出了后续相关研究工作的努力方向。

基于对已有动态电能计量算法进行的归纳和梳理,笔者认为,在动态电能计量方面待解决的问题主要有两点:一是尽快确立相关功率理论,对如何计及间谐波电能做出明确规定,使对间谐波电能的计量有标准可依;二是在现有功率理论和标准下,加大对时-频分析方法的研究力度,尤其是对小波变换类和S变换类方法的深入探索,应对结合两者的已有方法或相应理论再进行优化和改进,使之能有效应用于动态电网条件下更准确计量电能的实际中去。

参考文献

- [1] Emanuel, A E, 车延博. 功率定义及功率流的物理机制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014: 1-191.
Emanuel, Alexander Eigeles, Che Yanbo. Power definitions and the physical mechanism of power flow[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2014: 1-191.
- [2] 肖湘宁, 罗超, 陶顺. 电气系统功率理论的发展与面临的挑战[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 1-10.
Xiao Xiangning, Luo Chao, Tao Shun. Development and challenges of

- power theory in electrical power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 1-10.
- [3] Power System Instrumentation and Measurements Committee of the IEEE Power Engineering Society, IEEE Std 1459-2010, IEEE standard definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, non-sinusoidal balanced, or unbalanced conditions[S]: 1-44.
- [4] Electromagnetic Compatibility (EMC) -Part 4-7: Testing and Measurement Techniques-General Guide on Harmonics and Interharmonics Measurements and Instrumentation for Power Supply Systems and Equipment Connected Thereto, Standard IEC 61000-4-7, 2009.
- [5] 何学农. 现代电能质量测量技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014: 6-13.
- [6] 王兆安, 杨君, 刘进军, 等. 谐波抑制和无功功率补偿(第2版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 30-31.
- [7] 顾国栋, 黄奇峰, 丁晓, 等. 电力用户功率因数考核方法优化方案研究[J]. 电网技术, 2016, 40(8): 2477-2483.
Gu Guodong, Huang Qifeng, Ding Xiao, et al. Optimization scheme of assessment method for customer-side power factor[J]. Power System Technology, 2016, 40(8): 2477-2483.
- [8] 王思彤, 周晖, 袁瑞铭, 等. 智能电表的概念及应用[J]. 电网技术, 2010, 34(4): 17-23.
Wang Sitong, Zhou Hui, Yuan Ruiming, et al. Concept and application of smart meter[J]. Power System Technology, 2010, 34(4): 17-23.
- [9] 赵伟. 电子式电能表及其在现代用电管理中的应用[M]. 中国电力出版社, 1999.
- [10] 李斌勤, 陈伟根, 李刚. 谐波对电网中有功计量装置的影响[J]. 电网技术, 2010, 34(6): 154-159.
Li Binqin, Chen Weigen, Li Gang. Analysis on affects of harmonics on active energy metering devices[J]. Power System Technology, 2010, 34(6): 154-159.
- [11] 朱彩虹, 黄清秀, 黄纯. 间谐波存在时的电能计量方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 15-20.
Zhu Caihong, Huang Qingxiu, Huang Chun. Study of electric energy metering method while inter-harmonic exists[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 15-20.
- [12] 徐文佳, 赵伟, 黄洪涛, 等. 计及间谐波的电能计量方法[J]. 电网技术, 2016, 40(2): 656-662.
Xu Wenjia, Zhao Wei, Huang Hongtao, et al. A method for electrical energy measurement in consideration of inter-harmonics[J]. Power System Technology, 2016, 40(2): 656-662.
- [13] Yoon W K, Devaney M J. Power measurement using the wavelet transform[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1998, 47(5): 1205-1210.
- [14] Yoon W K, Devaney M J. Reactive power measurement using the wavelet transform[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2000, 49(2): 246-252.
- [15] 王闰羿, 李玉平, 张玮, 等. 考虑复杂谐波的电网功率计算方法研究与实现[J]. 浙江电力, 2022, 41(2): 40-46.
- [16] 张鹏. 基于离散小波法的非线性负荷电能计量的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [17] Morsi W G, El-Hawary M E. A new perspective for the IEEE Standard 1459-2000 via stationary wavelet transform in the presence of nonstationary power quality disturbance[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(4): 2356-2365.
- [18] Morsi W G, El-Hawary M E. Wavelet packet transform-based power quality indices for balanced and unbalanced three-phase systems under stationary or nonstationary operating conditions[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(4): 2300-2310.
- [19] 王燕. 电能质量扰动检测的研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(13): 174-186.
- [20] C. Chen and Y. Chen. Comparative Study of Harmonic and Interharmonic Estimation Methods for Stationary and Time-Varying Signals[J]. in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 61, no. 1, pp. 397-404, Jan. 2014, doi: 10.1109/TIE.2013.2242419
- [21] 陈砚圃, 杨蕾, 张介秋. 基于组合余弦窗加权的高精度电力谐波分析[J]. 高压电器, 2021, 57(8): 127-135.
- [22] H. Wen, Z. Teng, and Y. Wang. Simple Interpolated FFT Algorithm Based on Minimize Sidelobe Windows for Power-Harmonic Analysis[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 26, no. 9, pp. 2570-2579, Sept. 2011, doi: 10.1109/TPEL.2011.2111388.
- [23] A. Testa, D. Gallo and R. Langella. On the Processing of harmonics and interharmonics: using Hanning window in standard framework[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 19, no. 1, pp. 28-34, Jan. 2004, doi: 10.1109/TPWRD.2003.820437.
- [24] W. Chang, C.-I Chen, and Y. J. Liu. Measuring power system harmonics and interharmonics by an improved fast Fourier transform based algorithm[J]. IET Gener, Transmiss. Distrib, vol. 2, no. 2, pp. 193-201, Mar. 2008.
- [25] Jain Vijay K, Collins William L, Davis David C. High-Accuracy Analog Measurements via Interpolated FFT[J]. IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, 1979, 28(2): 113-122.
- [26] T. Grandke. Interpolation Algorithms for Discrete Fourier Transforms of Weighted Signals[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1983, 32(2): 350-355.
- [27] G. Andria, M. Savino, A. Trotta. Windows and interpolation algorithms to improve electrical measurement accuracy[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1989, 38(4): 856-863.
- [28] D. Belega, D. Dallet. Estimation of the Multi-frequency Signal Parameters by Interpolated DFT Method with Maximum Sidelobe Decay[J]. 2007 4th IEEE Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications, Dortmund, 2007: 294-299.
- [29] K. Duda. DFT Interpolation Algorithm for Kaiser-Bessel and Dolph-Chebyshev Windows[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2011, 60(3): 784-790.
- [30] Alfredo Testa, Daniele Gallo, Roberto Langella. On the Processing of Harmonics and Interharmonics: Using Hanning Window in Standard Framework[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(1): 28-34.
- [31] 陈垒, 赵伟, 肖勇, 等. 非整周期采样条件下有功电能计量的新算法[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(4): 861-869.
- [32] 彭丽, 赵伟, 陈垒, 等. 电网信号谐波分析算法计算性能比较研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(1): 1-20.

- Peng Li, Zhao Wei, Chen Lei, et al. Research on the performance comparison of harmonic analysis algorithms for power grid signals [J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2020, 57(1): 1-20.
- [33] Ziyang W U, Yuxia L I, Liu H, et al. Application of short-time Fourier transform in the vibration analysis of the large hydroelectric machine [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2005.
- [34] 胡广书. 现代信号处理教程 [M]. 第 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2015.
- [35] 蔡华龙, 肖坤. 小波包改进重构算法在非线性负荷电能计量中的应用 [J]. *系统仿真学报*, 2015, 27(11): 2822-2828.
- Cai Hualong, Xiao Kun. Application of wavelet packet improved reconstruction algorithm to energy measurement of non-linear loads [J]. *Journal of System Simulation*, 2015, 27(11): 2822-2828.
- [36] 肖晓辉. 基于准同步采样的谐波测量算法研究及其 VLSI 实现 [D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
- [37] 尉怡青, 赵伟, 陈垒, 等. 计及间谐波的重分组小波包变换功率电能测算新方法 [J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(22): 7480-7490.
- [38] Y. Yu, W. Zhao, S. Li and S. Huang, "A Two-Stage Wavelet Decomposition Method for Instantaneous Power Quality Indices Estimation Considering Interharmonics and Transient Disturbances," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 70, pp. 1-3, 2021, Art no. 9001813, doi: 10.1109/TIM.2021.3052554.
- [39] 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(17): 52-56.
- [40] 王正洪, 朱正伟, 蒋建明. 希尔伯特-黄变换和小波变换用于谐波分析的比较研究 [J]. *现代电子技术*, 2007(19): 118-120, 123.
- Wang Zhenghong, Zhu Zhengwei, Jiang Jianming. A comparison study of HHT and WT for harmonic analysis [J]. *Modern Electronics Technique*, 2007(19): 118-120, 123.
- [41] 张宇辉, 贺健伟, 李天云, 等. 基于数学形态学和 HHT 的谐波和间谐波检测方法 [J]. *电网技术*, 2008(17): 46-51.
- [42] 苏玉香, 刘志刚, 李科亮, 等. Hilbert-Huang 变换在电气化铁路谐波检测中的应用 [J]. *电网技术*, 2008(18): 30-35.
- Su Yuxiang, Liu Zhigang, Li Keliang, et al. Application of Hilbert-Huang transform in harmonic detection of electrified railway [J]. *Power System Technology*, 2008(18): 30-35.
- [43] 李妍妍, 王义军, 金华锋, 等. 基于改进希尔伯特-黄变换的电力系统谐波检测方法 [J]. *东北电力大学学报*, 2021, 41(2): 119-123.
- [44] 顾小兴, 金涛, 郭艳威. 改进 EMD 端点效应电力系统 HHT 谐波检测研究 [J]. *中国测试*, 2015, 41(3): 99-102, 107.
- Gu Xiaoxing, Jin Tao, Guo Yanwei. Power system harmonic HHT detection based on improved EMD method [J]. *China Measurement & Test*, 2015, 41(3): 99-102, 107.
- [45] 童涛, 张新燕, 刘博文, 等. 基于傅里叶同步挤压变换和希尔伯特变换的谐波间谐波检测分析 [J]. *电网技术*, 2019, 43(11): 4200-4208.
- [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.
- [47] Sahu S S, Panda G, George. An improved S-transform for time-frequency analysis [J]. 2009 IEEE Int. Advance Computing Conf, Patiala, India, 2009, pp. 315-319.
- [48] Assous, S, Boashash, B. Evaluation of the modified s-transform for time-frequency synchrony analysis and source localization [J]. *EURASIP J. Adv. Signal Process*, 2012, (1), pp. 49-67.
- [49] Sejdić, E, Djurović, I, Jiang, J. "A window width optimized s-transform", *EURASIP J. Adv. Signal Process*. 2008, (1), pp. 672941.
- [50] 金智, 尹柏强. 基于广义 S 变换的高斯领域时频滤波方法 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2015, 29(1): 124-131.
- Jin Zhi, Yin Baiqiang. Novel Gaussian neighborhood time-frequency filtering method based on generalized S-transform [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2015, 29(1): 124-131.
- [51] 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, 15.
- 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, 15.
- [52] L. Wu, G. Liu and L. Tian. Rapid harmonic detection based on generalized HS-transform [J]. 2014 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC), 2014, pp. 142-146, doi: 10.1109/ICSPCC.2014.6986170.
- [53] K. Thangaraj, J. Muruganandham and S. Selvaumar, et al. Analysis of harmonics using S-Transform [J]. 2016 International Conference on Emerging Trends in Engineering, Technology and Science (ICETETS), 2016, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICETETS.2016.7603074.
- [54] 倪伟伦, 顾丹珍, 曹依烈, 等. 基于改进 S 变换的非稳态信号的电能计量方法研究 [J/OL]. *电测与仪表*: 1-9 [2021-06-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20210420.1345.004.html>.
- [55] 向世强. 电气化铁路牵引负荷电能计量方法研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2018.
- [56] 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.

作者简介:



邵方静(1988—),女,湖南郴州人,工程师,硕士,主要从事电测计量技术研究。Email: 871082749@qq.com

宋晓林(1973—),男,陕西西安人,教授级高级工程师,硕士,主要从事电测计量技术研究。Email: sxlgoodluck@163.com

刘坚(1997—),男,湖南永州人,硕士研究生,主要从事现代电磁测量技术和方法研究。Email: liujian20@mails.tsinghua.edu.cn

雷婧婷(1990—),女,陕西西安人,工程师,硕士,主要从事电能计量、用电信息采集研究。Email: lvn_lei@163.com

尉怡青(1995—),女,山西临汾人,博士研究生,主要从事电能计量、功率理论方面的研究工作。Email: wyq16@mails.tsinghua.edu.cn

赵伟(1956—),男,北京人,教授,博士,主要从事现代电磁测量理论及方法研究。Email: zhaowei@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2021-08-20; 修回日期: 2022-12-24

(杜景飞 编发)