

基于 FFT 和 WT 结合的电网谐波检测技术研究

张 寒¹, 吴岩松², 赵 森³

(1. 北京南瑞智芯微电子科技有限公司, 北京 100192; 2. 大庆油田有限责任公司第一采油厂, 黑龙江大庆 163001;
3. 大庆油田矿区服务事业部物业管理一公司, 黑龙江大庆 163453)

摘 要: 电网谐波测量在电力系统中具有重要的作用, 对电网谐波含量进行实时测量, 准确掌握电网中谐波信息是十分必要的。本文根据电网谐波的特点, 提出了基于快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)和小波变换(Wavelet Transform, WT)结合的电网谐波检测方法。利用 FFT 检测信号中的稳态谐波成分, 并对信号中的非稳态成分进行小波变换, 确定瞬间突变情况。仿真结果显示, 本算法能够有效的提高检测的实时性和准确性。

关键词: 谐波检测; 快速傅里叶变换; 小波变换; 时频分析

0 引言

近年来, 随着工业和民用用电负荷的迅速增加以及各种电力电子设备的广泛应用, 非线性负载的数量和容量日益增加, 电力系统谐波污染日趋严重, 对电力系统的安全、经济运行造成极大的危害^[1,2]。因此, 谐波问题已成为电力部门普遍重视和关心的问题。谐波检测的研究作为谐波研究的一个重要方向, 为谐波抑制等问题的解决提供可靠的分析数据, 也为电网系统的安全稳定运行提供分析资料, 帮助系统判断故障点, 分析故障类型以便对电网谐波污染进行控制。

当今应用最广泛的方法是基于傅立叶变换的谐波测量。该方法用快速傅立叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)获取各次谐波的幅值、频率和相位。当电网电压畸变严重或者频率摄动较大时, 非同步采样误差比较大, 会产生频谱泄露效应和栅栏效应^[3], 检测精度难以达到要求。于是出现了对基本 FFT 谐波检测方法的改进研究^[3-5]。虽然快速傅里叶变换对稳态谐波检测效果较好, 但由于其只具有频域分辨能力而无法对信号时域特征进行分析, 所以不能准确地对非稳态谐波进行检测。

小波变换(wavelet transform, WT)因具有良好的时频特性和多分辨率性质, 可以聚焦到信号的任何细节, 更适合非平稳信号的检测, 目前广泛应用于谐波检测中。它克服了傅立叶分析在频域完全局

部化而在时域完全无局部化的缺点, 特别适用于突变信号和不平稳信号的分析, 可以准确把握信号的局部细节, 因而通过小波变换, 可以准确地计算出基波电流, 进而求取谐波^[6-9]。

本文首先研究了加窗插值FFT谐波检测方法, 并针对其无法局部性的缺点, 将小波变换引入到谐波检测中。利用小波包分解得到细节分量; 同时, 在非平稳谐波检测中, 利用FFT将基波等稳态分量与谐波分离, 然后采用小波分析获得暂态分量。实验结果表明, 本文所述方法能够正确有效的检测稳态谐波分量和暂态谐波分量。

1 谐波检测基本原理

1.1 加窗插值 FFT

由于电网频率的波动, 在采用FFT进行谐波分析时很难做到整周期截断和同步采样, 所以会出现频谱泄露问题。频谱泄露主要包括长范围泄露和短范围泄露两部分, 长范围泄露是由于信号截断造成的频谱之间的相互干扰, 短范围泄露是由于离散频谱的栅栏效应导致的。通过加窗和插值可以分别减少频谱泄露和栅栏效应带来的误差。另外, 增加采样点数也可以减少频谱泄露带来的误差。

常用的电力系统谐波检测方法是加窗插值FFT算法。

假设信号 $x(t) = A \sin(2\pi f_0 t + \theta)$, A 、 f_0 、 θ 分别是信号的幅值、频率和相位, 窗函数为 $w(n)$, 其

连续频谱为 $W(2\pi f)$ ，然后以 f_s 采样得到 $x(t) = A \sin(2\pi f_0 n / f_s + \theta)$ ，信号加窗后的傅里叶变换为

$$X(f) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x(n)w(n)e^{-j2\pi fn} = \frac{A}{2j} \left[e^{j\theta} W\left(\frac{2\pi(f-f_0)}{f_s}\right) - e^{-j\theta} W\left(\frac{2\pi(f+f_0)}{f_s}\right) \right] \quad (1)$$

上式的正频率部分进行采样后的离散频谱是 $\bar{X}(k\Delta f) = Ae^{j\theta} W(2\pi(k\Delta f - f_0)/f_s)/2j$ ，其中 $\Delta f = f_s/N$ ， N 是采样点数， $f_0 = k_0\Delta f$ ，一般 k_0 不是整数。

而双峰谱线插值算法中，假设峰值频率两端最大和次大的谱线分别为 k_1 和 k_2 ，其对应的幅值为 $y_1 = |\bar{X}(k_1\Delta f)|$ 和 $y_2 = |\bar{X}(k_2\Delta f)|$ ，然后引入一个辅助参数 $\alpha = k_0 - k_1 - 0.5$ ，令

$$\beta = \frac{y_2 - y_1}{y_2 + y_1} = \frac{|W(2\pi(-\alpha + 0.5)/N)| - |W(2\pi(-\alpha - 0.5)/N)|}{|W(2\pi(-\alpha + 0.5)/N)| + |W(2\pi(-\alpha - 0.5)/N)|}$$

当 N 足够大时，上式可写为 $\beta = g(\alpha)$ ，它的反函数是 $\alpha = g^{-1}(\beta)$ ，用多项式逼近法得到函数，接着计算窗函数的改进公式。

本文所述方法采用 Blackman-Harris 窗，其改进公式为：

$$\alpha = 2.61979085\beta + 0.2865675\beta^3 + 0.080241\beta^7 \quad (2)$$

$$\theta = \arg[\bar{X}(k, \Delta f)] + \pi/2 - \pi[\alpha - 0.5(-1)^i], i = 1, 2. \quad (3)$$

$$A = \frac{(y_1 + y_2)(3.06539676 + 0.965559979\alpha^2 + 0.163556\alpha^4 + 0.01985\alpha^6)}{N} \quad (4)$$

1.2 小波分析理论

小波分析从定义上来说，就是为匹配待分析信号特征，将信号用具有迅速衰减特性且能力集中的振动波形来表示，并经过平移伸缩后用来适应分析的具体要求，该波形就叫母小波。从其名称上来说，“波”代表其振荡过程具有正负交替性，而“小”体现其能量的集中性，也就是其时域波形的紧支特点。所以小波在概念上是定义在有限间隔且其平均值为零的一种函数。

在小波分析中，主要讨论的函数空间为 $L^2(\mathbf{R})$ ，即在 \mathbf{R} 上平方可积函数构成的函数空间，即

$$\mathbf{f}(\mathbf{t}) \in L^2(\mathbf{R}) \Leftrightarrow \int_{\mathbf{R}} |\mathbf{f}(\mathbf{t})|^2 d\mathbf{t} < +\infty \quad (5)$$

若 $\mathbf{f}(\mathbf{t}) \in L^2(\mathbf{R})$ ，则称 $\mathbf{f}(\mathbf{t})$ 为能量有限的信号。

$L^2(\mathbf{R})$ 也常称为能量有限的信号空间。

如果 $\psi(\mathbf{t}) \in L^2(\mathbf{R})$ ，其傅里叶变换为 $\Psi(\omega)$ 满足

容许性条件 $\mathbf{C}_\psi = \int_{-\infty}^{+\infty} |\omega|^{-1} |\Psi(\omega)|^2 d\omega < \infty$ ，即 \mathbf{C}_ψ

有界，则称 ψ 为一个基小波或母小波 (Mother Wavelet)。将母小波经过伸缩和平移后，就可以得到一个的小波序列。

$$\psi_{a,b}(\mathbf{t}) = |\mathbf{a}|^{-1/2} \psi\left(\frac{\mathbf{x}-\mathbf{b}}{\mathbf{a}}\right) \quad (6)$$

式中， $\mathbf{a}, \mathbf{b} \in \mathbf{R}$ ，且 $\mathbf{a} \neq 0$ 。称 \mathbf{a} 为伸缩因子， \mathbf{b} 为平移因子。定义下式

$$(\mathbf{W}_\psi \mathbf{f})(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = \langle \mathbf{f}, \psi_{a,b} \rangle = |\mathbf{a}|^{-1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} \mathbf{f}(\mathbf{t}) \overline{\psi\left(\frac{\mathbf{x}-\mathbf{b}}{\mathbf{a}}\right)} d\mathbf{t} \quad (7)$$

为关于基小波 ψ 的连续小波变换。其中， $\bar{\mathbf{X}}$ 表示对 \mathbf{X} 的共轭运算。显然，变换后的函数是二维的，即小波变换把原来的一维信号变换为二维信号，以便分析信号的时频特性。

小波变换的实质在于将 $L^2(\mathbf{R})$ 空间中的任意函数 $\mathbf{f}(\mathbf{t})$ 表示称为其在不同伸缩因子 \mathbf{a} 和平移因子 \mathbf{b} 的 $\psi_{a,b}(\mathbf{t})$ 之上的投影的叠加。与傅里叶变换不同的是，小波变换将一维时域函数映射到二维“时间-尺度”域上，因此 $\mathbf{f}(\mathbf{t})$ 在小波基上的展开具有多分辨率的特性。通过调整伸缩因子 \mathbf{a} 和平移因子 \mathbf{b} ，可以得到具有不同时频宽度的小波以匹配原始信号的任意位置，达到对信号的时频局部化分析的目的。

连续小波变换中的伸缩因子和平移因子都是连续变化的实数，在实际问题的数值计算中常采用离散形式，即离散小波变换。离散小波变换可以通过离散化连续小波变换中的伸缩因子 \mathbf{a} 和平移因子 \mathbf{b} 得到。通常取

$$\mathbf{a} = \mathbf{a}_0^m, \mathbf{b} = n\mathbf{b}_0\mathbf{a}_0^m, m, n \in \mathbf{Z}$$

于是，得到离散小波

$$\psi_{m,n}(\mathbf{t}) = |\mathbf{a}_0|^{-m/2} \psi(\mathbf{a}_0^{-m}\mathbf{t} - n\mathbf{b}_0), m, n \in \mathbf{Z}$$

对应的离散小波变换为

$$(\mathbf{W}_\psi \mathbf{f})(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = \langle \mathbf{f}, \psi_{a,b} \rangle = |\mathbf{a}_0|^{-m/2} \int_{-\infty}^{+\infty} \mathbf{f}(\mathbf{t}) \overline{\psi(\mathbf{a}_0^{-m}\mathbf{t} - n\mathbf{b}_0)} d\mathbf{t} \quad (8)$$

从理论上可以证明, 将连续小波变换离散成离散小波变换, 信号的基本信息并不会丢失。相反, 由于小波基函数的正交性, 使得小波空间中两点之间因冗余度造成的关联得以消除; 同时, 因为正交性, 使得计算的误差更小, 变换结果时-频函数更能反映信号本身的性质。

2 基于FFT和WT的谐波检测方法

基于FFT的谐波检测是针对周期性序列的, 只可以检测基波和整数次谐波, 对于其他动态变化的谐波则无能为力, 而小波变换可以很好的解决这个问题。

小波变换检测法是目前比较热门的时频分析方法, 主要依据小波变换在时域和频域都具有良好的局部化能力来分析谐波。尤其是对于信号中的突变奇异点的检测识别, 更体现了小波变换的优势^[10-11]。

2.1 小波包谐波分析

小波包分析属于线性时频分析法, 为信号分析提供了一种更精细的分解方法。它将频带进行多层次划分, 对在多分辨率分析中没有考虑的高频部分作了进一步细分, 并根据待分析信号特征, 自适应选取相关的频带与信号的频谱相匹配, 具有更好的时-频特性。

在信号处理中, 小波包算法常用来实现信号在各频带的分离提取。在电网谐波分析中, 利用小波包较高的精确性和分辨率, 可以有效的分析出信号中所含有的各谐波分量^[12]。对于小波包理论可以从多角度来理解: 从数据结构角度看, 小波包的一维分解是一个完整的二叉分树结构; 从函数空间分解关系看, 小波包是将正交小波分解的子空间作进一步的细分; 从频域看, 小波包是将频带作了更细的划分。

由小波分解理论可知, 在同一尺度上的所有子空间都是正交的, 因为小波包分解树中可以看到, 各子空间所对应的频带是相互不重叠的。由此可得小波包对高频段作了进一步细分后, 没有影响子空间之间的正交性质, 而使得信号提高了频率分辨率^[13]。

设 $g_j^n(t) \in U_j^n$, 则 g_j^n 可表示为

$$g_j^n(t) = \sum_l d_l^{j,n} u_n(2^j t - l)。$$

小波包分解算法: 由 $\{d_l^{j+1,n}\}$ 求 $\{d_l^{j,2n}\}$ 与 $\{d_l^{j,2n+1}\}$ 。

$$\{d_l^{j,2n}\} = \sum_k a_{k-2l} d_k^{j+1,n}$$

$$\{d_l^{j,2n+1}\} = \sum_k b_{k-2l} d_k^{j+1,n}$$

小波包重构算法: 由 $\{d_l^{j,2n}\}$ 与 $\{d_l^{j,2n+1}\}$ 求 $\{d_l^{j+1,n}\}$ 。

$$d_l^{j+1,n} = \sum_k [h_{l-2k} d_k^{j,2n} + g_{l-2k} d_k^{j,2n+1}]$$

小波包算法实现电网谐波分析的过程: 信号采样后可获得处于 $[0, \Omega]$ 频带范围的信号, 经小波包分解, 先将频带划分为 $[0, \Omega/2]$ 和 $[\Omega/2, \Omega]$, 即为信号的低频部分和高频部分; 对这两个频带的信号分别再分解后, 低频部分获得频带在 $[0, \Omega/2^2]$ 和 $[\Omega/2^2, \Omega/2]$ 的两个信号, 高频部分获得频带在 $[\Omega/2, 3\Omega/2^2]$ 和 $[3\Omega/2^2, \Omega]$ 的两个信号。依此类推, 根据小波包分解尺度得到相应的分解结果。这样就可以把一个混频信号分解为各个互不重叠的频带区间, 之后经过小波包的重构(选取最优的小波包基, 提取原混频信号更多的特征), 从而分离出各谐波分量。

2.2 FFT 与 WT 结合

从整体状态来看, 电网谐波中既存在稳态谐波分量又存在非稳态谐波分量。结合傅立叶变换和小波变换的理论知识, 应用傅立叶变换可以测量出平稳波形中各次谐波的幅值、频率和相位角等参数; 小波变换可以滤除干扰信号, 并且确定暂态时变信号突变的时刻, 但是无法直接准确方便的分辨出各次谐波并提取相应频域参数。可见, 要提高谐波检测的准确性、确定突变信号的发生时刻, 则小波变换具有较大优势, 但根据谐波检测的标准和计算各次谐波成分含量的实际要求来说, 傅立叶变换的作用也占有很重要的地位。

FFT具有很强的频域局部化能力, 可以准确的分析各次稳态谐波的参数, 但它不能同时具有时域局部化能力, 无法分析非稳态谐波; 而WT则具有

时频局部化能力,比较适合分析非稳态谐波。根据 FFT 与 WT 的优缺点,可将两种方法结合用于谐波检测。实现的步骤如下:

(1) 对信号进行小波分解,得到高频部分和低频部分,高频部分一般含有突变信号等非稳态谐波,低频部分一般包括信号的稳态谐波;

(2) 对高频部分和低频部分分别进行重构,得到重构的基波分量、稳态分量和非稳态分量。对其中的稳态分量采用加窗插值 FFT 得到各次谐波的幅值;对非稳态分量接着进行小波分析来检测信号的突变时间。

2.3 小波函数选取

小波变换时需要选取满足要求的小波函数来实现分析,也就是通常说的小波分析的基选择。这是因为小波函数的唯一性会对信号产生不同的分析效果,所以选择合适的小波函数是一个难点问题。实际选取中主要有以下三个标准:

1) 自相似原则:由于正交小波变换的取样方式是按小波函数来进行取样的,所以对该原则是满足的。而对于小波变换中的二进小波,就需要选择具有与信号相似的小波,可以有效的降低计算量,这是因为它们如果有一定程度的相似,那么经变换后其能量就相对较为集中。

2) 判别函数:就是指对于某种问题,如果有这样一个判别函数,当将各参数代入函数中时,可以获得该问题的最优方案准则,那么就能通过这个判别函数来衡量确定研究方案。而这个判别函数,需要根据问题的关键技术参数来获取。

3) 支集长度:在小波函数的应用中,选择的支集长度大部分都是在 5 到 9 之间,这是由于支集的长度会对信号产生影响。支集长度过长就会产生边界问题,支集太短且小波的消失矩又低,则信号的能量则难于集中。

小波函数的其他性质:研究表明,小波函数对应的滤波器其正交性、紧支性、对称性、正则性、消失矩等性质,对信号的分析也具有显著的影响。正交性是指小波函数的内积为零;紧支性是指小波滤波器的长度有限;对称性用来保持原信号的相位不变;正则性是指小波函数的光滑程度,用来提高信号的精度;消失矩则表明小波函数的收敛程度,消失矩阶数越大则小波变换的能量集中效果就越好。

结合小波变换的应用理论,对于采用正交小波在分析谐波时,希望它有有限的支集,以便可以使用 Mallat 算法减少计算量。目前提出的正交小波大致可分为四种,即 Daubechies 小波,对称小波,Coiflets 小波和 Meyer 小波。其中 Daubechies 小波简称 db 小波,是工程上应用较多的小波函数,其中的 N 表示 db 小波的阶次,不同的 N 值形成了 Daubechies 小波系列,并具有在时频域局部化方面不同的表现,有如下的变化特点:

① 支集性:一般情况, Daubechies 小波尺度函数的支集为 $[0, N]$, 正交小波函数 $\phi(t)$ 的支集为 $[-N + 1, N]$;

② 对称性:在 Daubechies 小波中,小波函数和尺度函数具有连续性,正交性和紧致性,但不具备对称性(除 Haar 小波外);

③ 光滑性及衰减性:当 N 值增大时, $\psi(t)$ 和 $\phi(t)$ 的支集也相应的增大,同时随着其衰减性的降低,光滑性增高;

④ 消失矩: Daubechies 小波随着其支集长度的增加而变得越光滑,并且消失矩也越高,其大小为 $(N+1)/2$;

⑤ 分频特性: Daubechies 正交小波的分频特性,有随着 N 值增大也将增强的变化规律。

在比较和研究各种小波函数特性的基础上,结合电网谐波的特点,将采用 Daubechies 小波来实现谐波检测分析。

对待分析信号的存在频带范围进行合理划分的过程,也就是对小波分解尺度的选择。为了能够把信号中的各次谐波分量准确的检测出来,一般所遵守的原则是尽量保证信号的基频位于最低频带的中心位置处,因此在选择小波变换的分解尺度时,可以根据下式来选取。设基频为 f_b , 采样频率为 f_s ,

则有 $p = \log_2 \left(f_s / f_b \sqrt{1/8} \right) + 0.5$ 。对 p 值求整就得到了采样所需频带划分的数目,根据频带划分数目就可以确定分解层次,即是小波变换的尺度大小。

3 实验结果

3.1 仿真实验方法

电力系统中电流的基波频率是 50Hz,谐波频率为基波频率的整数倍,谐波检测的目的就是实现基

波和谐波的分离。由上可知,确定了采样频率,可以确定小波分解的尺度大小。另一方面是对采样频率的基本要求,即采样频率的大小要满足采样定律,得到各次谐波频谱的同时,还可以避免 FFT 谐波分析时所产生的频谱混叠、频谱泄漏、栅栏效应等现象。另外,采样频率还与所要分析的谐波最高次数、硬件要求等有关。

假设采样最高频率为 f_h , 采样频率为 f_s , 根据奈奎斯特采样定理, 必须满足 $f_s > 2f_h$, 在实际工作中, 一般取 $f_s = (2.5 \sim 3.0)f_h$, 就可以达到基本要求了。频带划分的原则是保证信号的基频处于最低频带的中心位置, 结合频带划分与分解层数, 以及采样频率的关系有: 基波频率应处于 $0 \sim f_s / 2^{j+1}$ 频带内(j 是基波所处的分解层数)。

在电力谐波测量仪器中规定, A 级测量标准应达到能分析 50 次谐波。理想情况下, 电网中的电流基波是 50Hz, 那么所要采样的最高频率为 2.5 kHz, 结合考虑系统测量的精度, 若每周期采样 256 个点, 则采样频率为 12.8 kHz。这个采样频率的大小也同时满足奈奎斯特采样定理的要求, 且相邻的采样间隔时间为 $78 \mu s$, 可以有效的保证系统处理数据的实时问题。

为了对本文所述方法进行验证, 分别对理想状态下进行小波分解谐波检测和含有干扰情况下进行小波分析谐波检测, 同时还对瞬态变化的谐波信号进行检测。仿真实验采用 Matlab 工具, 这是因为 Matlab 在矩阵运算能力、绘图功能和可视化等方面具有优势, 已经成为科研和工程技术人员有力的开发工具。而实验中采用的谐波信号分量与实际电网中的情况类似, 因此可以通过仿真的方法模拟实际情况。

3.2 理想状态下小波分解

电网中的基波频率为 50Hz, 谐波电流的频率是基波频率的整数倍, 其中主要以奇次谐波的影响较大, 谐波检测就是将电网中的基波和谐波实现分离, 以下建立一个含有基波和 3、5、7、11 次谐波的信号模型, 函数表达式为:

$$\begin{aligned} x(t) = & \sin(2\pi f_0 t) + 0.25 \sin(3 \times 2\pi f_0 t) \\ & + 0.15 \sin(5 \times 2\pi f_0 t) + 0.1 \sin(7 \times 2\pi f_0 t) \\ & + 0.05 \sin(11 \times 2\pi f_0 t) \end{aligned}$$

其波形如图 1 所示。分析图中的谐波含量, 进行 FFT 分析, 结果如图 2 所示。

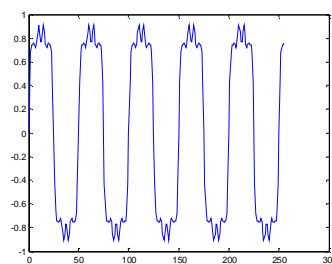


图1 谐波信号1波形图

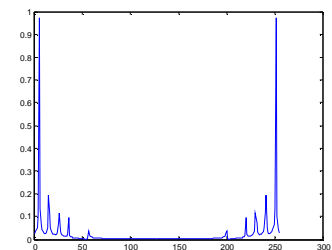


图2 谐波信号1FFT分析结果

用 db20 小波进行 5 尺度的分解, 可以得到原始信号的低频逼近部分和高频细节部分, 分别如图 3 和图 4 所示。从低频部分可以看出, 重构信号中的 a4 是基波分量, d4 中包含了 3 次谐波分量, d3 中体现了 5 次谐波成分, 而 11 次谐波部分在 d1 中表现明显, 从而就实现了各次谐波成分的有效分离。然后用总电流减去基波电流部分, 就可以得到信号中的总谐波电流成分。

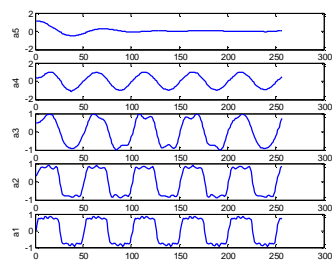


图3 谐波信号1低频逼近部分

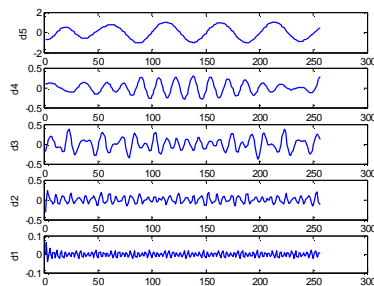


图4 谐波信号1高频细节部分

3.3 含有干扰的小波分解及瞬态信号分析

分析中建立的是一种常规的谐波信号模型，它主要表现的是谐波的普遍特点，即谐波中含有基波和各次谐波，谐波中奇次谐波对波形的影响较大，且高次谐波的含量较低。这种情况可以看作是系统在不考虑任何干扰或突变，在比较平稳的状态下的谐波信号。对于仿真检测算法的可行性是较为有利的，所以用该模型验证了本文所要提出的算法。除此之外，实际电网中还有一些瞬态变化的谐波信号，如噪声、机器故障以及各种干扰等所引起的突变，这些谐波源的情况可以用以下的几个典型信号来描述。

第一种含白噪声的正弦波。这是指在原信号中混入了一种具有正态分布的随机噪声信号，可以用数学表达式描述：

$$s(t) = x(t) + \sigma \cdot e(t)$$

其中， $x(t)$ 为原信号， $e(t)$ 为噪声， σ 为噪声的幅度倍数，则 $s(t)$ 为含有噪声的信号，通常认为 $e(t)$ 是一个平稳的随机信号即包噪声。

第二种含衰减谐波成分的信号。这是指信号中的某个谐波成分随着时间的变化，呈指数衰减趋势。用数学表达式可以描述：

$$s(t) = x(t) + A \sin[n \times 2\pi f_0(t - t_1)]e^{-bt},$$

其中， $t_1 > NT, 0 < A < 1, b$ 为整数， A 表示该衰减谐波的幅值， n 为谐波的次数， t_1 为衰减开始的时刻， b 为该次谐波随时间衰减的速度。在实际中信号可能会由于受到外来的干扰，而只对信号中的某些频率的谐波产生影响，使得这些谐波呈现快速衰减的现象。小波变换可以观察该次谐波的变化情况，并将其分离出来，所以小波变换对检测这种衰减谐波信号也是有效的。

第三种含间断点的信号。这是指信号在某点突然发生了间断，是由于信号瞬态变化所造成的。用数学表达式可以描述：

$$s(t) = \begin{cases} \sin(n_1 \times 2\pi f_0 t) & 0 \leq t \leq t_1 \\ \sin(n_2 \times 2\pi f_0 t) & 0 \leq t \leq t_2 \end{cases}$$

其中， n 表示谐波的次数， t_1 为信号突变的时刻。

采用小波变换与 FFT 相结合的算法思想，对原始信号先进行小波变换，分解出稳态信号分量和非稳态信号分量。然后对稳态部分应用 FFT 分析信号中的各次谐波信息，对非稳态部分应用小波变换分析信号的瞬间变化等信号突变问题，从而达到对待测信号中所包含的各次谐波成分的分析，实现了电网谐波的实时检测。

根据电网谐波检测的要求和算法的应用条件，需要确定各个分析参数。在这里以建立的仿真信号函数表达式为待检测信号的要求，应用小波变换与 FFT 联合算法来分析。在实际电网中，除了基波和各次谐波以外，还有一些突变信号和噪声干扰的影响。因此建立公式来描述电网信号：它包含有 1、3、5、7 和 15 次谐波信号，以及从某一时刻开始按照指数规律衰减的次谐波分量，另外信号中还包含有随机的噪声干扰。其波形如图 5 所示。

$$s(t) = 10 \sin(2\pi f_0 t) + 5 \sin(3 \times 2\pi f_0 t) + 3 \sin(5 \times 2\pi f_0 t) + 1 \sin(7 \times 2\pi f_0 t) + 3 \sin[15 \times 2\pi f_0 (t - 0.02)]e^{-20t} + randn(1, 1280)$$

取基波频率为 50Hz，如果待检测信号要分析到 15 次谐波，那么检测的最高频率为 750Hz，结合考虑 FFT 的应用要求，即需要满足采样定理，选取采样频率为 5000Hz，并取每个基波采样 256 个点。

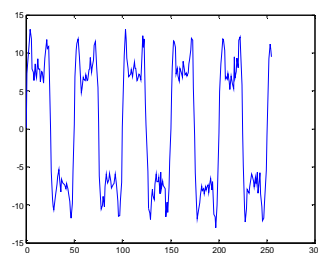


图5 谐波信号2波形图

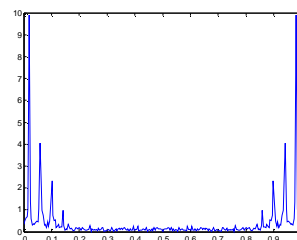


图6 谐波信号2FFT分析结果

对原始信号首先应用 db20 小波进行 5 层分解，得到各层的分解情况，如图 7 所示。

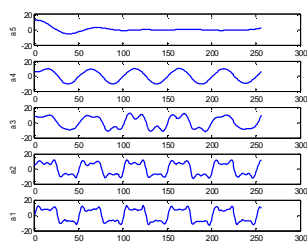


图7 谐波信号2波形图

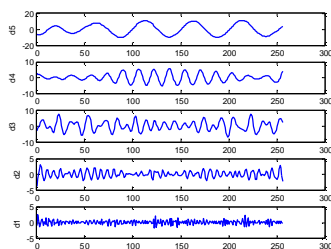


图8 谐波信号2FFT分析结果

从图中可以看出, 分解后的第一层中信号的随机干扰噪声被滤除, 在第二层中所含有的噪声和衰减信号已经被滤除, 在第三层中已经可以看到, 是比较平稳的周期性的谐波信号, 经过四层分解得到的 a_4 也更加的光滑。这与小波变换的理论分析是一致的, 在此所取的采样频率是 5000Hz, 经过小波四层分解后, 低频系数 a_4 所占的频带范围是 0~312.5Hz, 可见信号中的 1、3、5 次谐波成分都在这个频段上, 如果对 a_4 进行重构并用 FFT 分析其频谱见图 8 所示。频谱图中可以清晰的看到在这个频带内包含的这 3 个频率的谐波信号, 这是由于在 a_4 重构信号中, 已经不存在突变信号和高频噪声的干扰成分, 这样使得谐波检测可以得到更高的精度。然后应用介绍的过程, 对原信号中所包含的稳态信号分量, 选取适当的小波函数实现基波与各次谐波的分离。

在对原信号小波分解后, 高频细节分量各层所对应的频率范围是: d_2 所占频带为 312.5Hz~625Hz; d_1 所占频带为 625Hz~1250Hz。将信号的 d_1 和 d_2 重构后, 并相加便可以得到原信号中的非平稳信号分量。

从频谱图中可以明显的看到, 信号中包含了奇次谐波成分和很强的随机干扰噪声。对这部分信号可以利用小波包分解去噪后, 得到如图所示的信号。从图 9 中观察到, 信号在 0.020 时刻出现了突变, 并且该信号随着时间逐渐的衰减至零, 这正是信号

中所含有的衰减谐波成分所表现出来的特性。

由此可见, 采用小波变换和 FFT 相结合的方法, 可以实现各次谐波的检测, 得到稳态谐波信号的特性, 又能提取非稳态谐波的相关信息。

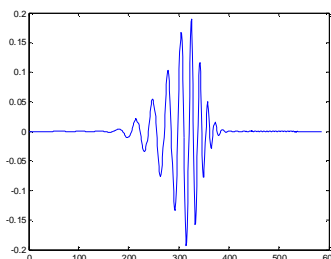


图9 瞬态信号分析结果

4 结论

本文研究了 FFT 和 WT 在谐波检测中的应用, 结合两者的优点可以有效的检测电网中的稳态分量和瞬态分量。通过仿真实验验证了算法的准确性, 该方法具有一定的适应性和应用价值。

参考文献:

- [1] 郭永基. 电力系统可靠性分析[M]. 北京:清华大学出版社.2003.
- [2] Gritli Y, Zarri L, Rossi C, et al. Advanced Diagnosis of Electrical Faults in Wound Rotor Induction Machines[J]. IEEE Transaction on Industrial Electronics, 2013,60(9):4012-4024.
- [3] 蒋毅, 古天祥. 一种修正的FFT 高精度谐波分析方法[J].电子测量与仪器学报, 2006, 20(1): 19-21.
- [4] 庞浩, 李东霞, 俎云霄, 等. 应用 FFT 进行电力系统谐波分析的改进型算法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 50-54.
- [5] F. S. Zhang, Z. X. Geng, W. Yuan. The algorithm of interpolating windowed FFT for harmonic analysis of electric power system [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16(2): 160-164.
- [6] 李威, 王建骥, 冉启文, 等. 一种新的电力系统暂态波形检测方法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(5): 45-47.
- [7] E. R. Zheng, Z. Y. Liu, L. K. Ma. Study on harmonic detection method based on FFT and wavelet transform [C], In: Proceedings of International Conference on Signal Processing Systems, 2010, 3: 413-416.
- [8] 王晶晶, 杨勇. 基于小波变换和加Hanning窗FFT的谐波

- 检测新方法[J]. 电力系统自动化, 2010.3(4):63-66.
- [9] X. M. Ye, X. H. Liu. The harmonic detection based on wavelet transform and FFT for electric ARC furnaces [C]. In: Proceedings of International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition , 2009.7: 408-412.
- [10] Barros J, Diego R I, de Apráiz M. Applications of Wavelet Transform for Analysis of Harmonic Distortion in Power Systems: A Review[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2012, 61(10):2604-2611.
- [11] Vanga S, Ganesh S N V. Comparison of Fourier Transform and Wavelet Packet Transform for quantification of power quality[C]//Advances in Power Conversion and Energy Technologies (APCET), 2012 International Conference on. IEEE, 2012: 1-6.
- [12] 徐长发, 李国宽.实用小波方法(第二版)[M]. 武汉:华中科技大学出版社.2004.
- [13] 任震.小波分析及其在电力系统中的应用[M].北京:中国电力出版社,2003.

作者简介:

张 寒(1982-), 女, 黑龙江哈尔滨人, 硕士, 工程师,
研究方向: 电网规划、电网数据检测与分析;
吴岩松(1987-), 男, 黑龙江大庆人, 硕士, 工程师, 研
究方向: 油田电网安全;
赵 森(1983-), 男, 黑龙江大庆人, 研究方向: 电网质
量分析。