



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 106908663 A

(43)申请公布日 2017.06.30

(21)申请号 201710130921.3

(22)申请日 2017.03.07

(71)申请人 国网江苏省电力公司电力科学研究院

地址 211103 江苏省南京市江宁区帕威尔路1号

申请人 国家电网公司 东南大学

(72)发明人 刘建 徐晴 黄奇峰 田正其  
祝宇楠 周超 欧阳曾恺 龚丹  
穆小星 王立辉

(74)专利代理机构 南京纵横知识产权代理有限公司 32224

代理人 耿英 董建林

(51)Int.Cl.

G01R 23/16(2006.01)

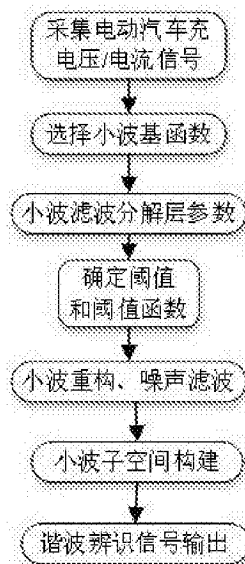
权利要求书2页 说明书5页 附图1页

(54)发明名称

一种基于小波变换的电动汽车充电谐波辨识方法

(57)摘要

本发明公开了一种基于小波变换的电动汽车充电谐波辨识方法,首先对充电电压/电流信号进行小波特征分析、信号分层,由阈值特征函数求取阈值参数,噪声滤波,在此基础上,根据电动汽车充电运行时电压/电流信号的时间逼近参数、空间局部特征参数,在时域和频域同时对电动汽车充电运行的信号波形进行局部化分析,建立高分辨率的谐波辨识算法。本发明能克服FFT方法会把电动汽车充电过程中局部谐波信号滤波平滑掉的缺点,反映信号的细节特征,解决傅里叶变换在电动汽车充电谐波辨识方面能力不足的问题,提高电动汽车充电电能质量、电能计量的准确度。



1. 一种基于小波变换的电动汽车充电谐波辨识方法,其特征在于,包括以下步骤:

步骤1,采集电动汽车充电电压/电流信号 $F(t)$ ;

步骤2,选取电压/电流信号 $F(t)$ 小波滤波分解层参数;

步骤3,建立电压/电流信号 $F(t)$ 小波滤波分解阈值和阈值函数,得到待处理充电电压/电流信号 $f(t)$ ;

步骤4:把待处理充电电压/电流信号 $f(t)$ 分解为小波子空间;

步骤5:对小波子空间进行信息重构,得到电动汽车充电过程中谐波的电压信号和谐波的电流信号。

2. 根据权利要求1中所述的基于小波变换的电动汽车充电谐波辨识方法,其特征在于,步骤2中,对电动汽车充电过程中采集的含噪电压/电流信号进行等间隔抽样,然后对抽样序列进行离散小波变换:选择分解层数 $J$ ,对电压/电流信号 $F(t)$ 进行正交小波变换,得到各层的尺度系数 $c_{j,n}$ 和小波系数 $d_{j,n}$ 。

3. 根据权利要求2中所述的基于小波变换的电动汽车充电谐波辨识方法,其特征在于,步骤2中,得到的各层的尺度系数 $c_{j,n}$ 和小波系数 $d_{j,n}$ 如下:

$$\begin{cases} c_{j,n} = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} c_{j-1,i} h_{i-2n} \\ d_{j,n} = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} c_{j-1,i} g_{i-2n} \end{cases} \quad (1)$$

其中, $n=0,1,\dots,N-1$ , $N$ 为信号采样点数, $j=0,1,\dots,J$ , $J$ 为分解层数, $c_{j-1,i}$ 为 $j-1$ 层尺度系数, $h_{i-2n}$ 和 $g_{i-2n}$ 互为正交滤波器组合。

4. 根据权利要求2中所述的基于小波变换的电动汽车充电谐波辨识方法,其特征在于,步骤3中,对各层小波系数 $d_{j,n}$ 、尺度系数 $c_{j,n}$ 进行阈值量化处理,对充电电压/电流信号 $F(t)$ 进行高频噪声及白噪声降噪,得到待处理充电电压/电流信号 $f(t)$ ;

对得到的待处理充电电压/电流信号 $f(t)$ 进行小波系数阈值处理,

$$d_{j,n} = \begin{cases} cd_{j,n}, & |d_{j,n}| \geq th \\ 0, & |d_{j,n}| < th \end{cases} \quad (2)$$

其中, $th$ 为阈值, $c$ 为放缩系数。

5. 根据权利要求4中所述的基于小波变换的电动汽车充电谐波辨识方法,其特征在于,步骤4中,建立小波基 $\psi$ 小波基函数,并设计 $J$ 层的小波子空间;

对电动汽车充电电压/电流 $f(t)$ ,进行正交小波分解

$$P_{j-1}f(t) = P_j f(t) + D_j f(t) \quad (3)$$

$$\text{其中 } P_j f(t) = \sum_k x_k^{(j)} \phi_{j,k}(t), \quad D_j f(t) = \sum_k d_k^{(j)} \psi_{j,k}(t), \quad x_k^{(j)} = \sum_n h_{0(n-2k)} x_k^{(j-1)}, \quad d_k^{(j)} = \sum_n h_{1(n-2k)} d_k^{(j-1)}$$

$j$ 表示层数, $P_j$ 、 $P_{j-1}$ 分别是 $f(t)$ 为 $j$ 层和 $j-1$ 层尺度系数, $D_j$ 为 $f(t)$ 为 $j$ 层小波系数, $k$ 为谐波序号, $x_k^{(j)}$ 、 $x_k^{(j-1)}$ 为 $j$ 层和 $j-1$ 层尺度分解系数, $d_k^{(j)}$ 、 $d_k^{(j-1)}$ 为 $j$ 层和 $j-1$ 层小波分解系数, $\phi_{j,k}(t)$ 为尺度函数, $\psi_{j,k}(t)$ 为小波基函数, $h_{0(n-2k)}$ 为小波包的低通滤波单元, $h_{1(n-2k)}$ 为小波包的高通滤波单元。

6. 根据权利要求5中所述的基于小波变换的电动汽车充电谐波辨识方法,其特征在于,步骤5中,小波包系数的重构是由 $d_k^{(j+1,2n)}$ 和 $h_{1(l-2k)}d_k^{(j+1,2n+1)}$ 的组合信息获取得到 $d_l^{(j,n)}$ ,即

$$\begin{aligned} d_l^{(j,n)} &= \sum_k \left[ h_{0(l-2k)} d_k^{(j+1,2n)} + h_{1(l-2k)} d_k^{(j+1,2n+1)} \right] \\ &= \sum_k \left[ g_{0(l-2k)} d_k^{(j+1,2n)} \right] + \sum_k \left[ g_{1(l-2k)} d_k^{(j+1,2n+1)} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

其中, $d_k^{(j+1,2n)}$ 和 $d_k^{(j+1,2n+1)}$ 为小波分解系数、 $d_l^{(j,n)}$ 为小波重构系数, $g_{0(l-2k)}$ 为小波包重构的低通滤波单元, $g_{1(l-2k)}$ 为小波包重构的高通滤波单元, $l$ 为重构后的谐波序号。

电动汽车充电过程中,谐波的电压信号表示为

$$\begin{aligned} u(t) &= \sum_{i=0}^{2^j-1} \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} d_{ij}^{(2i)}(k) \psi_{j,k}^{2i}(t) + \sum_{i=0}^{2^j-1} \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} d_{ij}^{(2i+1)}(k) \psi_{j,k}^{(2i+1)}(t) \\ &= \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} d_{ij}^{(0)}(k) \varphi_{j,k}(t) + \sum_{i=0}^{2^j-1} \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} d_{ij}^{(2i)}(k) \psi_{j,k}^{(i)}(t) \end{aligned} \quad (5)$$

其中, $k=0, i=0$ 仅表示求和计算的初值为0。

电动汽车充电过程中,谐波的电流信号表示为

$$\begin{aligned} i(t) &= \sum_{i=0}^{2^j-1} \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} d_{ij}^{(2i)}(k) \psi_{j,k}^{2i}(t) + \sum_{i=0}^{2^j-1} \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} d_{ij}^{(2i+1)}(k) \psi_{j,k}^{(2i+1)}(t) \\ &= \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} d_{ij}^{(0)}(k) \varphi_{j,k}(t) + \sum_{i=0}^{2^j-1} \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} d_{ij}^{(2i)}(k) \psi_{j,k}^{(i)}(t) \end{aligned} \quad (6)$$

其中, $\varphi_{j,k}(t)$ 为尺度空间函数; $\psi_{j,k}^{(i)}(t)$ 、 $\psi_{j,k}^{2i}(t)$ 、 $\psi_{j,k}^{(2i+1)}(t)$ 为小波母函数; $d_{ij}^{(0)}(k)$ 表示重构电压信号中刻度函数的系数; $d_{ij}^{(0)}(k)$ 表示重构电流信号中刻度函数的系数; $d_{ij}^{(i)}(k)$ 、 $d_{ij}^{(2i)}(k)$ 、 $d_{ij}^{(2i+1)}(k)$ 表示重构电压信号中的小波包变换系数; $d_{ij}^{(i)}(k)$ 、 $d_{ij}^{(2i)}(k)$ 、 $d_{ij}^{(2i+1)}(k)$ 表示重构电流信号中的小波包变换系数。

## 一种基于小波变换的电动汽车充电谐波辨识方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及电动汽车充电电能计量、电能质量监测系统,特别是涉及一种基于小波变换的电动汽车充电谐波辨识方法。

### 背景技术

[0002] 电动汽车充电过程中,谐波信号是实时变化,谐波的复杂性不断增加,如出现瞬时突变,白噪声干扰等情况。快速傅里叶变换(FFT)算法适用于周期性谐波分析领域,将周期性信号按照傅立叶级数的方式分解为不同频率分量的叠加形式,然后利用分离后的信号进行电能相关参数的计算,适合用来进行稳态谐波的检测。FFT具有较好的频域分辨率、较高的测量精度。但是,FFT算法不能在时域和频域同时以任意精度逼近被测信号,不能精确获取各次谐波信号的幅值、频率和相位,不具备局部化分析能力,不适用于非平稳信号,对于谐波检测存在很大的局限性。在FFT变换的基础上,所提出的短时傅里叶变换,通过窗函数在时域上的滑动,来得到对信号的时频局部化分析,仍然在时频分辨率方面存在不足,信号的时域波形和频谱不能同时获得高的分辨率,且其观测窗固化,局部观测特性不够详细。

### 发明内容

[0003] 发明目的:本发明提供一种基于小波变换的电动汽车充电谐波辨识方法,该方法首先对充电信号进行小波特征分析、阈值函数建立、滤波,再根据电动汽车充电运行时电压/电流信号的时间逼近参数、空间局部特征参数,在时域和频域同时对电动汽车充电运行的信号波形进行局部化分析,建立高分辨率的谐波辨识算法。本发明主要目的在于克服FFT方法会把电动汽车充电过程中局部谐波信号滤波平滑掉的缺点,反映信号的细节特征,解决傅里叶变换在电动汽车充电谐波辨识方面能力不足的问题,提高电动汽车充电电能质量、电能计量的准确度。

[0004] 为达到此目的,本发明采用以下技术方案:

[0005] 一种基于小波变换的电动汽车充电谐波辨识方法,其特征在于,包括以下步骤:

[0006] 步骤1,采集电动汽车充电电压/电流信号 $F(t)$ ;

[0007] 步骤2,选取电压/电流信号 $F(t)$ 小波滤波分解层参数;

[0008] 步骤3,建立电压/电流信号 $F(t)$ 小波滤波分解阈值和阈值函数,得到待处理充电电压/电流信号 $f(t)$ ;

[0009] 步骤4:把待处理充电电压/电流信号 $f(t)$ 分解为小波子空间;

[0010] 步骤5:对小波子空间进行信息重构,得到电动汽车充电过程中谐波的电压信号和谐波的电流信号。

[0011] 步骤2中,对电动汽车充电过程中采集的含噪电压/电流信号进行等间隔抽样,然后对抽样序列进行离散小波变换:选择分解层数 $J$ ,对电压/电流信号 $F(t)$ 进行正交小波变换,得到各层的尺度系数 $c_{j,n}$ 和小波系数 $d_{j,n}$ 。

[0012] 得到的各层的尺度系数 $c_{j,n}$ 和小波系数 $d_{j,n}$ 如下:

$$[0013] \quad \begin{cases} c_{j,n} = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} c_{j-1,i} h_{i-2n} \\ d_{j,n} = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} c_{j-1,i} g_{i-2n} \end{cases} \quad (1)$$

[0014] 其中,  $n=0,1,\dots,N-1$ ,  $N$ 为信号采样点数,  $j=0,1,\dots,J$ ,  $J$ 为分解层数,  $c_{j-1,i}$ 为  $j-1$ 层尺度系数,  $h_{i-2n}$ 和  $g_{i-2n}$ 互为正交滤波器组合。

[0015] 步骤3中, 对各层小波系数  $d_{j,n}$ 、尺度系数  $c_{j,n}$  进行阈值量化处理, 对充电电压/电流信号  $F(t)$  进行高频噪声及白噪声降噪, 得到待处理充电电压/电流  $f(t)$ ;

[0016] 对得到的待处理充电电压/电流  $f(t)$  进行小波系数阈值处理,

$$[0017] \quad d_{j,n} = \begin{cases} cd_{j,n}, & |d_{j,n}| \geq th \\ 0, & |d_{j,n}| < th \end{cases} \quad (2)$$

[0018] 其中,  $th$ 为阈值,  $c$ 为放缩系数。

[0019] 步骤4中, 建立小波基db小波基函数, 并设计  $J$ 层的小波子空间;

[0020] 对电动汽车充电电压/电流  $f(t)$ , 进行正交小波分解

$$[0021] \quad P_{j-1}f(t) = P_j f(t) + D_j f(t) \quad (3)$$

$$[0022] \quad \text{其中 } Pf(t) = \sum_k x_k^{(j)} \phi_{j,k}(t), \quad Df(t) = \sum_k d_k^{(j)} \psi_{j,k}(t), \quad x_k^{(j)} = \sum_n h_{0(n-2k)} x_k^{(j-1)}, \quad d_k^{(j)} = \sum_n h_{1(n-2k)} d_k^{(j-1)},$$

$j$ 表示层数,  $P_j, P_{j-1}$ 分别是  $f(t)$  为  $j$ 层和  $j-1$ 层尺度系数,  $D_j$ 为  $f(t)$  为  $j$ 层小波系数,  $k$ 为谐波序号,  $x_k^{(j)}, x_k^{(j-1)}$ 为  $j$ 层和  $j-1$ 层尺度分解系数,  $d_k^{(j)}, d_k^{(j-1)}$ 为  $j$ 层和  $j-1$ 层小波分解系数,  $\phi_{j,k}(t)$ 为尺度函数,  $\psi_{j,k}(t)$ 为小波基函数,  $h_{0(n-2k)}$ 为小波包的低通滤波单元,  $h_{1(n-2k)}$ 为小波包的高通滤波单元。

[0023] 步骤5中, 小波包系数的重构是由  $d_k^{(j+1,2n)}$  和  $h_{l(l-2k)} d_k^{(j+1,2n+1)}$  的组合信息获取得到  $d_l^{(j,n)}$ , 即

$$[0024] \quad \begin{aligned} d_l^{(j,n)} &= \sum_k [h_{0(l-2k)} d_k^{(j+1,2n)} + h_{1(l-2k)} d_k^{(j+1,2n+1)}] \\ &= \sum_k [g_{0(l-2k)} d_k^{(j+1,2n)}] + \sum_k [g_{1(l-2k)} d_k^{(j+1,2n+1)}] \end{aligned} \quad (4)$$

[0025] 其中,  $d_k^{(j+1,2n)}$  和  $d_k^{(j+1,2n+1)}$  为小波分解系数,  $d_l^{(j,n)}$  为小波重构系数,  $g_{0(l-2k)}$  为小波包重构的低通滤波单元,  $g_{1(l-2k)}$  为小波包重构的高通滤波单元,  $l$  为重构后的谐波序号, 与  $k$  取值不一定相同。

[0026] 电动汽车充电过程中, 谐波的电压信号表示为

$$[0027] \quad \begin{aligned} u(t) &= \sum_{i=0}^{2^j-1} \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} d_{ij}^{(2i)}(k) \psi_{j,k}^{2i}(t) + \sum_{i=0}^{2^j-1} \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} d_{ij}^{(2i+1)}(k) \psi_{j,k}^{(2i+1)}(t) \\ &= \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} d_{ij}^{(0)}(k) \phi_{j,k}(t) + \sum_{i=0}^{2^j-1} \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} d_{ij}^{(2i)}(k) \psi_{j,k}^{(i)}(t) \end{aligned} \quad (5)$$

[0028] 其中,  $k=0, i=0$  仅表示求和计算的初值为0。

[0029] 电动汽车充电过程中, 谐波的电流信号表示为

$$\begin{aligned}
 [0030] \quad i(t) &= \sum_{i=0}^{2^j-1} \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} d_{ij}^{(2i)}(k) \psi_{j,k}^{2i}(t) + \sum_{i=0}^{2^j-1} \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} d_{ij}^{(2i+1)}(k) \psi_{j,k}^{(2i+1)}(t) \\
 &= \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} d_{ij}^{(0)}(k) \varphi_{j,k}(t) + \sum_{i=0}^{2^j-1} \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} d_{ij}^{(2i)}(k) \psi_{j,k}^{(i)}(t)
 \end{aligned} \tag{6}$$

[0031] 其中,  $\varphi_{j,k}(t)$  为尺度空间函数;  $\psi_{j,k}^{(i)}(t)$ 、 $\psi_{j,k}^{2i}(t)$ 、 $\psi_{j,k}^{(2i+1)}(t)$  为小波母函数;  $d_{ij}^{(0)}(k)$  表示重构电压信号中刻度函数的系数;  $d_{ij}^{(0)}(k)$  表示重构电流信号中刻度函数的系数;  $d_{ij}^{(i)}(k)$ 、 $d_{ij}^{(2i)}(k)$ 、 $d_{ij}^{(2i+1)}(k)$  表示重构电压信号中的小波包变换系数;  $d_{ij}^{(i)}(k)$ 、 $d_{ij}^{(2i)}(k)$ 、 $d_{ij}^{(2i+1)}(k)$  表示重构电流信号中的小波包变换系数。

[0032] 本发明所述的一种基于小波变换的电动汽车充电谐波识别方法,该方法根据电动汽车充电运行时电压、电流信号的时间逼近参数、空间局部特征参数,能够在时域和频域同时对电动汽车充电运行的信号波形进行局部化分析,建立高分辨率的谐波识别方法。本专利能克服FFT方法会把局部谐波信号滤波平滑掉的缺点,能反映信号的细节特征,解决傅里叶变换在电动汽车充电谐波辨识方面能力不足的问题,提高电动汽车充电电能质量、电能计量的准确度。

[0033] 小波包分解实现了  $f(t)$  的频带分解,但分解尺度大的情况下,由于信号压缩,波形存在台阶化倾向,导致在频域内体现为更高次谐波误差。该专利,一方面通过第2、第3步骤中的小波滤波,可以滤除极高频信号以及白噪声的影响,另一方,通过第5步骤中的信号的重构,可以消除由于数据压缩造成的台阶化效应。经过重构,由小波包分解系数重构出各子频带内的时域信号,实现各个频带内的电力谐波参数的测量,跟踪、观测各频带内的谐波变化。

[0034] 有益效果

[0035] 小波变换采用时间尺度分析方法,具有时域和频域局部化、方向选择性、可变的时频域分辨率的特点,克服了FFT方法会把局部信号在整个域里平滑掉的缺点,能反映信号的细节特征。

[0036] 所提出的适用于电动汽车谐波分析的小波变换算法,其时窗和频窗的宽度可以调节,依据信号的频率成分,自动调节采样密度来处理突变信号,可以精确检测波动谐波和快速变化谐波等非平稳信号的特性,适合反映信号的突发变化和时变跟踪,能实现波动谐波、快速变化谐波、突变信号和非平稳信号的分析,适用于电动汽车充电过程中电能计量、电能质量监测。

[0037] 小波变换设计自适应变动的时-频率窗,能够在时域和频域同时对信号进行局部化分析。当分析高频信号时,时间窗会自动变窄,当观察低频信号时,时间窗会自动变宽,具有局部时频特性。小波变换还能表征信号的奇异性,在不同的尺度上模极大值能很好的分辨谐波信号的畸变情况,而且,可以在多尺度下对信号进行观察分析,即具有高分辨分析能力。

[0038] 本发明公开了一种基于小波变换的电动汽车充电谐波辨识方法,首先对充电电压/电流信号进行小波特征分析、信号分层,由阈值特征函数求取阈值参数,噪声滤波,在此基础上,根据电动汽车充电运行时电压/电流信号的时间逼近参数、空间局部特征参数,在

时域和频域同时对电动汽车充电运行的信号波形进行局部化分析,建立高分辨率的谐波辨识算法。本发明能克服FFT方法会把电动汽车充电过程中局部谐波信号滤波平滑掉的缺点,反映信号的细节特征,解决傅里叶变换在电动汽车充电谐波辨识方面能力不足的问题,提高电动汽车充电电能质量、电能计量的准确度。

## 附图说明

[0039] 图1是电动汽车充电谐波辨识流程图。

## 具体实施方式

[0040] 下面结合具体实施方式对本发明的技术方案作进一步的介绍。

[0041] 如图1所示,本发明根据电动汽车充电电能计量、电能质量监测技术发展要求,公开了一种基于小波变换的电动汽车充电谐波辨识方法,包括以下步骤:

[0042] 步骤1,采集电动汽车充电电压/电流信号 $F(t)$ 。

[0043] 步骤2,选取信号 $F(t)$ 小波滤波分解层参数。

[0044] 对电动汽车充电过程中采集的含噪电压/电流信号进行等间隔抽样,然后对抽样序列进行离散小波变换:选择合适的分解层数 $J$ ,对 $F(t)$ 信号进行正交小波变换,得到各层的尺度系数 $c_{j,n}$ 和小波系数 $d_{j,n}$ 。

$$[0045] \quad \begin{cases} c_{j,n} = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} c_{j-1,i} h_{i-2n} \\ d_{j,n} = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} c_{j-1,i} g_{i-2n} \end{cases} \quad (1)$$

[0046] 其中, $n=0,1,\dots,N-1$ , $N$ 为信号采样点数, $j=0,1,\dots,J$ , $J$ 为分解层数, $c_{j-1,i}$ 为 $j-1$ 层尺度系数, $h_{i-2n}$ 和 $g_{i-2n}$ 互为正交滤波器组合。

[0047] 步骤3,建立信号 $F(t)$ 小波滤波分解阈值和阈值函数。

[0048] 对各层小波系数 $d_{j,n}$ 、尺度系数 $c_{j,n}$ 进行阈值量化处理,对充电电压/电流信号 $F(t)$ 进行高频噪声及白噪声降噪,得到待处理充电电压/电流信号 $f(t)$ 。

[0049] 对分解得到的 $f(t)$ 进行小波系数阈值处理,

$$[0050] \quad d_{j,n} = \begin{cases} cd_{j,n}, & |d_{j,n}| \geq th \\ 0, & |d_{j,n}| < th \end{cases} \quad (2)$$

[0051] 其中, $th$ 为阈值, $c$ 为放缩系数。

[0052] 小波阈值对于滤除电动汽车充电过程中采集的含噪电压/电流信号起到决定性的作用,直接影响去噪效果。

[0053] 步骤4:把信号 $f(t)$ 分解为小波子空间。

[0054] 建立小波基 $db$ 小波基函数,并设计 $J$ 层( $J>4$ )的小波子空间。

[0055] 对电动汽车充电电压/电流 $f(t)$ ,进行正交小波分解

[0056]  $P_{j-1}f(t) = P_j f(t) + D_j f(t) \quad (3)$

[0057] 其中  $P_j f(t) = \sum_k x_k^{(j)} \phi_{j,k}(t)$ ,  $D_j f(t) = \sum_k d_k^{(j)} \psi_{j,k}(t)$ ,  $x_k^{(j)} = \sum_n h_{0(n-2k)} x_k^{(j-1)}$ ,

$d_k^{(j)} = \sum_n h_{n(n-2k)} d_k^{(j-1)}$   $j$ 表示层数,  $P_j, P_{j-1}$ 分别是  $f(t)$  为  $j$ 层和  $j-1$ 层尺度系数,  $D_j$ 为  $f(t)$  为  $j$ 层小波系数,  $k$ 为谐波序号,  $x_k^{(j)}, x_k^{(j-1)}$ 为  $j$ 层和  $j-1$ 层尺度分解系数,  $d_k^{(j)}, d_k^{(j-1)}$ 为  $j$ 层和  $j-1$ 层小波分解系数,  $\phi_{j,k}(t)$ 为尺度函数,  $\psi_{j,k}(t)$ 为小波基函数,  $h_{0(n-2k)}$ 为小波包的低通滤波单元,  $h_{1(n-2k)}$ 为小波包的高通滤波单元。

[0058] 步骤5:对小波子空间进行信息重构。

[0059] 小波包系数的重构是由  $d_k^{(j+1,2n)}$  和  $h_{1(l-2k)} d_k^{(j+1,2n+1)}$  的组合信息获取得到  $d_l^{(j,n)}$ , 即

$$\begin{aligned} d_l^{(j,n)} &= \sum_k \left[ h_{0(l-2k)} d_k^{(j+1,2n)} + h_{1(l-2k)} d_k^{(j+1,2n+1)} \right] \\ [0060] \quad &= \sum_k \left[ g_{0(l-2k)} d_k^{(j+1,2n)} \right] + \sum_k \left[ g_{1(l-2k)} d_k^{(j+1,2n+1)} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

[0061] 其中,  $d_k^{(j+1,2n)}$  和  $d_k^{(j+1,2n+1)}$  为小波分解系数,  $d_l^{(j,n)}$  为小波重构系数,  $g_{0(l-2k)}$  为小波包重构的低通滤波单元,  $g_{1(l-2k)}$  为小波包重构的高通滤波单元,  $l$  为重构后的谐波序号。

[0062] 小波包重构后,在不同的频带内,包含了多次谐波量值,实现了电动汽车充电过程中电压/电流信号谐波的辨识与分离。

[0063] 电动汽车充电过程中,谐波的电压信号可以表示为

$$\begin{aligned} u(t) &= \sum_{i=0}^{2^j-1} \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} d_{ij}^{(2i)}(k) \psi_{j,k}^{2i}(t) + \sum_{i=0}^{2^j-1} \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} d_{ij}^{(2i+1)}(k) \psi_{j,k}^{(2i+1)}(t) \\ [0064] \quad &= \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} d_{ij}^{(0)}(k) \varphi_{j,k}(t) + \sum_{i=0}^{2^j-1} \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} d_{ij}^{(2i)}(k) \psi_{j,k}^{(i)}(t) \end{aligned} \quad (5)$$

[0065] 其中,  $i=0$  仅表示求和计算的初值为0。

[0066] 电动汽车充电过程中,谐波的电流信号可以表示为

$$\begin{aligned} i(t) &= \sum_{i=0}^{2^j-1} \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} d_{ij}^{(2i)}(k) \psi_{j,k}^{2i}(t) + \sum_{i=0}^{2^j-1} \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} d_{ij}^{(2i+1)}(k) \psi_{j,k}^{(2i+1)}(t) \\ [0067] \quad &= \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} d_{ij}^{(0)}(k) \varphi_{j,k}(t) + \sum_{i=0}^{2^j-1} \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} d_{ij}^{(2i)}(k) \psi_{j,k}^{(i)}(t) \end{aligned} \quad (6)$$

[0068] 其中,  $\varphi_{j,k}(t)$  为尺度空间函数;  $\psi_{j,k}^{(i)}(t)$ 、 $\psi_{j,k}^{2i}(t)$ 、 $\psi_{j,k}^{(2i+1)}(t)$  为小波母函数;  $d_{ij}^{(0)}(k)$  表示重构电压信号中刻度函数的系数;  $d_{ij}^{(0)}(k)$  表示重构电流信号中刻度函数的系数;  $d_{ij}^{(i)}(k)$ 、 $d_{ij}^{(2i)}(k)$ 、 $d_{ij}^{(2i+1)}(k)$  表示重构电压信号中的小波包变换系数;  $d_{ij}^{(i)}(k)$ 、 $d_{ij}^{(2i)}(k)$ 、 $d_{ij}^{(2i+1)}(k)$  表示重构电流信号中的小波包变换系数。

[0069] 小波包分解实现了  $f(t)$  的频带分解,但分解尺度大的情况下,由于信号压缩,波形存在台阶化倾向,导致在频域内体现为更高次谐波误差。该专利,一方面通过第2、第3步骤中的小波滤波,可以滤除极高频信号以及白噪声的影响,另一方,通过第5步骤中的信号的重构,可以消除由于数据压缩造成的台阶化效应。经过重构,由小波包分解系数重构出各子频带内的时域信号,实现各个频带内的电力谐波参数的测量,跟踪、观测各频带内的谐波变化。

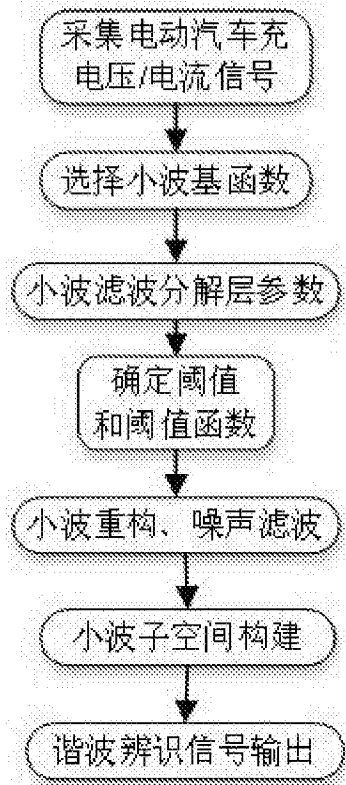


图1