

DOI: 10.7667/PSPC170150

基于 Wiener 级数的交流充电桩电能计量方法研究

房国志, 李昂, 张晓冰

(哈尔滨理工大学测控技术与通信工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 针对矩阵式交流充电桩充电时会产生具有冲击性和强时变性的随机扰动, 导致其在电能计量周期内计量不准确的问题, 提出了基于 Wiener 泛函级数建立的交流充电桩侧的电网电能计量数学模型。利用该模型可以优化输出的电压、电流同步采样值。同时采用小波算法对电压、电流信号分解与重构, 以求得功率潮流分析所需的基波分量与畸变分量, 并结合 IEEE-Std1459-2010 定义, 对电压、电流突变的功率潮流进行分析实验。通过 Matlab 仿真验证了该模型的正确性。实验结果表明, 所用的方法在交流充电桩电能计量时误差达到了 0.001 数量级, 提高了交流充电桩的计量精度, 有效地解决了在随机扰动情况下交流充电桩电能计量不准的问题。

关键词: 交流充电桩; 随机干扰; Wiener 级数; 电能计量

Research on electric energy measurement method of AC charging pile based on Wiener series

FANG Guozhi, LI Ang, ZHANG Xiaobing

(Institute of Measurement, Control Technology and Communication Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: The random disturbance with strong impact and strong time variation, when the matrix AC charging pile is charged, leads to the inaccurate measurement in the electric energy metering period. Therefore, this paper puts forward a mathematical model of power grid energy metering based on Wiener functional series. Using the model can optimize the output voltage and current synchronously. At the same time, it uses the wavelet algorithm to decompose and reconstruct the voltage and current signals to get the fundamental component and the distortion component required by power flow analysis, and carries out experimental analysis on power flow of voltage and current mutation combining with the definition of IEEE-Std1459-2010. The correctness of model is verified through Matlab simulation. The experimental results show that the error of this method in AC charging pile of electric energy metering reaches to 0.001 orders of magnitude, which improves the measurement accuracy of AC charging pile and effectively solves the problem of the inaccurate energy measurement of AC charging pile under the condition of random disturbance.

This work is supported by Science and Talents Program of Education Department of Heilongjiang Province (No. 12541136).

Key words: AC charging pile; random disturbance; Wiener series; electric energy measurement

0 引言

随着全球能源危机的爆发, 发展新能源电动汽车已经势在必行^[1]。但是随着技术的发展, 当前电网中越来越多的非线性、冲击性负载不断地加入其中^[2]。使得电网与负载之间存在着大量的能量交换, 导致电网信号畸变的同时也带来了波形畸变、电压脉冲、随机波动等干扰, 影响电能质量同时也导致电能计量不准^[3-7], 使得用户和企业之间的交易有失

公平、合理。当电动汽车接入电网充电时, 非线性负载消耗电能的同时也将其产生的畸变功率注入到了电网中。对于大功率直流充电桩有专门的谐波治理和无功补偿装置^[8-10], 而对于小型交流充电桩考虑到其体积小、成本高等因素却没有这些装置, 这些非线性负载产生的畸变功率及其消耗的电能应该纳入电能计量当中。而当前交流充电桩的计量方式及相关仪表设备无法准确做到这点。

国内外相关研究人员在这方面做了深入的研究, 提出基波和谐波的电能表技术方案, 并且已经应用到了实际的电能计量当中^[11-13]。但是这种通用

的计量方式在交流充电桩的电能计量方式中却无法适用, 因为像电动汽车这种带有冲击性、强时变性等非线性负载产生的不平稳信号无法用谐波模型来准确描述。文献[14]研究了冲击性负载对电能表电能计量时的影响。文献[15]在研究冲击负荷对电网影响的基础上介绍了新功率理论并在此理论上提出了用于冲击负荷电能计量的算法。文献[16]提出了基于广义 S 变换与 PSO-PNN 的电能质量扰动识别方法。文献[17]在研究 Wiener 泛函级数的基础上建立了非平稳信号条件下通用的电网信号数学模型。但以上的电能测量计算方法都是针对特定的信号或是通用的方法, 没有考虑到电动汽车及交流充电桩侧的冲击性等因素, 因此将以上方法用在交流充电桩的电能计量中存在运算速度慢、计量不精确等缺陷。

本文在研究 Wiener 级数的基础上建立了交流充电桩在强时变性、冲击性等非线性负载条件下的数学模型, 并通过小波分解与重构算法对非线性负载进行功率潮流分析, 给出了在此条件下的电能计量方法, 实验仿真表明基于 Wiener 级数模型上的电能计量方法能够解决交流充电桩在非线性、冲击性负载条件下电能计量不准的问题。为以后相关电能表的开发提供了理论知识, 也为电动汽车的发展提供了坚实的基础。

1 Wiener 级数理论与分析

假设交流充电桩系统是具有因果性的时不变系统, 因果性也就是说在 t_0 时刻的输出值 $y(t_0)$ 只由 $t \leq t_0$ 时间区间内的输入值 $x(t)$ 决定, 而与 $t > t_0$ 以后的 $x(t)$ 无关。时不变也就是说如果它对于输入信号 $x(t)$ 的输出为 $y(t)$, 则对输入信号 $x(t-t_0)$ 的输出为 $y(t-t_0)$ 。此时对于输入 $x(t)$ 的作用可以表示为一个泛函 F :

$$y(0) = F[x(t)|_{-\infty}^0]$$

这里的数值 $y(0)$ 取决于函数 $x(t)$ 从 $t = -\infty$ 到 $t = 0$ 的全部历史, 而不是依赖于函数 $x(t)$ 在某一时刻的瞬时值。

假设输入 $x(t)$ 满足

$$\|x(t)\| = \left[\int_{-\infty}^0 x^2(t) dt \right]^{\frac{1}{2}} < \infty$$

式中, $\|x(t)\|$ 称为 $x(t)$ 的 L_2 范数。所有定义于 R 且具有 L_2 范数的函数集合称为 L_2 的函数空间, 记为 $L_2(R)$, 其物理意义是信号 $x(t)$ 具有的有限能量。对于泛函 F , 若对于任意两个具有 L_2 范数的函数

$x_1(t)$ 和 $x_2(t)$, 当: $\|x_2 - x_1\| \rightarrow 0$ 时恒有

$$\left| F[x_2(t)|_{-\infty}^0] - F[x_1(t)|_{-\infty}^0] \right| \rightarrow 0$$

则称泛函 F 是连续的。

由非线性动态系统分解定理, 可知非线性动态系统 $F[x(t)|_{-\infty}^0]$ 可以近似地分解为一个线性动态系统 g_1, g_2, \dots, g_N 与一个非线性即时系统 $F_N(a_1, \dots, a_N)$ 。而根据函数逼近理论中的 Weierstrass 定理, 任何一个定义于闭区间的连续函数可以用连续多项式函数任意准确地逼近。该定理同样也适用于多变量与函数, 函数 F_N 是 $R^N \rightarrow R$ 的函数, 因此在一个闭区间内可以近似地展开为

$$F_N(a_1, a_2, \dots, a_N) \approx a + (\beta_1 a_1 + \beta_2 a_2 + \dots + \beta_N a_N) + (\gamma_{11} a_1^2 + \gamma_{12} a_1 a_2 + \dots + \gamma_{NN} a_N^2) + \dots$$

当幂次取得足够高时, 右边的多项式级数可以任意准确地逼近函数 F_N , 而

$$a_i = \int_{-\infty}^{\infty} g_i(\tau) x(t-\tau) d\tau$$

代入上式有

$$y(t) = F[x(t)] \approx F_N(a_1, a_2, \dots, a_N) =$$

$$F_N\left(\int_{-\infty}^{\infty} g_1(\tau) x(t-\tau) d\tau, \dots, \int_{-\infty}^{\infty} g_N(\tau) x(t-\tau) d\tau\right) =$$

$$a + \left[\beta_1 \int_{-\infty}^{\infty} g_1(\tau) x(t-\tau) d\tau + \dots + \beta_N \int_{-\infty}^{\infty} g_N(\tau) x(t-\tau) d\tau \right] +$$

$$\left[\gamma_{11} \int_{-\infty}^{\infty} g_1(\tau_1) x(t-\tau_1) d\tau_1 \cdot \int_{-\infty}^{\infty} g_1(\tau_2) x(t-\tau_2) d\tau_2 + \dots \right] + \dots$$

式中, $h_0 = a$ 称为系统的零阶核。

$$y_1(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h_1(\tau) x(t-\tau) d\tau$$

$$y_2(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h_2(\tau_1, \tau_2) x(t-\tau_1) x(t-\tau_2) d\tau_1 d\tau_2$$

⋮

这里

$$h_1(\tau) = \beta_1 g_1(\tau) + \dots + \beta_N g_N(\tau) = \sum_{i=1}^N \beta_i g_i(\tau)$$

$$h_2(\tau_1, \tau_2) = \gamma_{11} g_1(\tau_1) g_1(\tau_2) + \gamma_{12} g_1(\tau_1) g_2(\tau_2) + \dots +$$

$$\gamma_{NN} g_N(\tau_1) g_N(\tau_2) =$$

$$\sum_{i,j=1}^N \gamma_{ij} g_i(\tau_1) g_j(\tau_2)$$

$$h_3(\tau_1, \tau_2, \tau_3) = \alpha_{11} g_1(\tau_1) g_2(\tau_2) g_3(\tau_3) +$$

$$\alpha_{12} g_1(\tau_1) g_2(\tau_2) g_3(\tau_3) + \dots +$$

$$\alpha_{NN} g_N(\tau_1) g_N(\tau_2) g_N(\tau_3) =$$

$$\sum_{i,j,k=1}^N \alpha_{ijk} g_i(\tau_1) g_j(\tau_2) g_k(\tau_3)$$

⋮

分别称为系统的一阶核、二阶核、三阶核等。由上述可知非线性动态系统对于输入信号 $x(t)$ 的响应可以表示为一个卷积序列之和。

$$y(t) = h_0 + \int_{-\infty}^{\infty} h_1(\tau)x(t-\tau)d\tau + \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h_2(\tau_1, \tau_2) \prod_{i=1}^2 x(t-\tau_i) d\tau_i + \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h_3(\tau_1, \tau_2, \tau_3) \prod_{i=1}^3 x(t-\tau_i) d\tau_i + \dots + \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} h_n(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n) \prod_{i=1}^n x(t-\tau_i) d\tau_i + \dots = \sum_{n=0}^{\infty} y_n(t)$$

其中

$$y_n(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} h_n(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n) \prod_{i=1}^n x(t-\tau_i) d\tau_i$$

本质上讲它是利用一个正交泛函序列来逼近一个连续泛函。相比于冲击性负载信号模型只能用于电机、大功率电阻性负载的描述和随机波动性信号模型描述的只适用于随机波动性负载的描述, 任何能求 Wiener 核的任意非线性负载都用泛函模型来进行描述。

2 交流充电桩非线性负载条件下信号建模

当电动汽车接入交流充电桩充电时, 由于大功率电机的影响, 会产生冲击性电流注入交流充电桩侧电网中。其强度和发生时间的不确定性以及可能在整个电能计量中反复出现, 同时电动汽车及交流充电桩都存在大量非线性器件, 产生的信号类型也是复杂多变。传统的基波、谐波电能表都是针对一种特定情况进行计量, 无法对每一种类型进行单独测量。而 Wiener 级数是用正交序列来对非线性系统进行建模且描述精度高, 所以提出运用维纳级数来对交流充电桩电网信号建模, 过程如下。

2.1 获取 Wiener 核

设系统输入信号为 $U_i(t)$, 输出信号为 $U_o(t)$, 当交流充电桩系统用 Wiener 级数展开后, 由 Wiener 级数性质可得如下公式。

零阶核可以表示为

$$k_0 = E[U_o(t)] \quad (1)$$

式中, 输出响应函数 $U_o(t)$ 取其数学期望即是 Wiener 零阶核 k_0 。

一阶核可以表示为

$$k_1(\tau) = \frac{1}{A} R_{U_i U_{o(0)}} \quad (2)$$

式中: A 为输入信号 $U_i(t)$ 的功率谱密度; $U_{o(0)}(t) = U_o(t) - k_0$; $R_{U_i U_{o(0)}}(\tau)$ 为输入输出信号之间的互相关函数。

二阶核可以表示为

$$k_2(\tau_1, \tau_2) = \frac{1}{2A^2} E[U_{o(1)}(t)U_i(t-\tau_1)U_i(t-\tau_2)]$$

式中, $U_{o(1)}(t) = U_o(t) - G_0[k_0; U_i(t)] - G_1[k_1; U_i(t)]$,

其中 $G_0[k_0; U_i(t)]$, $G_1[k_1; U_i(t)]$ 为 Wiener 级数的项。

三阶核可以表示为

$$k_3(\tau_1, \tau_2, \tau_3) = \frac{1}{6A^3} E[U_{o(2)}(t)U_i(t-\tau_1)U_i(t-\tau_2)U_i(t-\tau_3)] \quad (3)$$

式中,

$$U_{o(2)}(t) = U_o(t) - G_0[k_0; U_i(t)] - G_1[k_1; U_i(t)] - G_2[k_2; U_i(t)]$$

由以上一阶核、二阶核、三阶核的表达式可由数学归纳法推导出其 n 阶核的表达式为

$$k_n(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n) = \frac{1}{n!A^n} E[U_{o(n-1)}(t)U_i(t-\tau_1)U_i(t-\tau_2)\dots U_i(t-\tau_n)]$$

式中, $U_{o(n-1)}(t) = U_o(t) - \sum_{i=0}^{n-1} G_i(t)$ 。

由以上的推理过程可知, 不同阶相关函数展开便是 Wiener 级数, 求出 Wiener 核的关键是求出各阶相关函数, 但由于在实际中求得各阶相关函数非常复杂且计算量极大, 所以本文采用时间相关函数的方法来间接估计各阶相关函数。

假设输入输出函数以等间隔 T 采样得到的 N 点时间采样序列为

$$\langle U_o \rangle: U_{o(0)}, U_{o(1)}, U_{o(2)}, \dots, U_{o(N-1)}$$

$$\langle U_i \rangle: U_{i(0)}, U_{i(1)}, U_{i(2)}, \dots, U_{i(N-1)}$$

此时各阶相关函数便可以采用时间相关函数来间接估计, 即

$$R_{U_i U_o}(m) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} U_{o(n)} U_{i(n-m)} \quad (4)$$

$$R_{U_i U_i}(m_1, m_2) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} U_{o(n)} U_{i(n-m_1)} U_{i(n-m_2)} \quad (5)$$

$$R_{U_i \dots U_i U_o}(m_1, m_2, \dots, m_n) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} U_{o(n)} U_{i(n-m_1)} U_{i(n-m_2)} \dots U_{i(n-m_n)} \quad (6)$$

$(m_i \leq n \leq N-1, 1 \leq i \leq f)$

按照式(5)展开可得

$$\begin{aligned} NR_{U_i \dots U_i U_o}(m_1, m_2, \dots, m_n) = & U_{o(0)} U_{i(0)} U_{i(0)}, \dots, U_{i(0)} + \\ & U_{o(1)} U_{i(1)} U_{i(1)}, \dots, U_{i(1)} + \\ & U_{o(2)} U_{i(2)} U_{i(2)}, \dots, U_{i(2)} + \dots + \\ & U_{o(n)} U_{i(n-m_1)} U_{i(n-m_2)}, \dots, U_{i(n-m_n)} \end{aligned}$$

由 Wiener 级数的对称性可知, 计算时只需计算满足 $N-1 \geq m_1 \geq m_2 \geq \dots \geq m_n \geq 0$ 的各项系数即可

求得全部项, 通过以上计算, 便可获得交流充电桩的非线性负荷的 Wiener 核。

2.2 Wiener-G 泛函表示交流充电桩在冲击性、强时变性等非线性负载条件下的电参量

交流充电桩在冲击性、强时变性等非线性负载条件下, 非线性负荷输入和输出可以用如下正交级数描述, 即

$$\begin{cases} U_o(t) = \sum_{n=0}^{\infty} L_n[h_n(\tau_1, \tau_2, \tau_3, \dots, \tau_n); U_o(t)] \\ i(t) = \sum_{n=0}^{\infty} G_n[k_n(\tau_1, \tau_2, \tau_3, \dots, \tau_n); U_i(t)] \end{cases} \quad (7)$$

以 $i(t)$ 为例, 式中 G_n 是输入 $U_i(t)$ 与 Wiener 核 k_n 的函数, 其各项由以上推论及 Wiener 函数性质可描述为

$$\begin{aligned} G_0[k_0; U_i(t)] &= k_0 \\ G_1[k_1; U_i(t)] &= \int_{-\infty}^{\infty} k_1(\tau) U_i(t-\tau) d\tau \\ G_2[k_2; U_i(t)] &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} k_2(\tau_1, \tau_2) U_i(t-\tau_1) U_i(t-\tau_2) d\tau_1 d\tau_2 - \\ &\quad A \int_{-\infty}^{\infty} k_2(\tau, \tau) d\tau \\ G_3[k_3; U_i(t)] &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} k_3(\tau_1, \tau_2, \tau_3) \prod_{i=1}^3 U_i(t-\tau_i) d\tau_1 d\tau_2 d\tau_3 - \\ &\quad 3A \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} k_3(\tau_1, \tau_1, \tau) U_i(t-\tau) d\tau_1 d\tau \\ G_n[k_n; U_i(t)] &= \sum_{i=0}^{\frac{n}{2}} \frac{(-1)^i n! A^i}{2^i (n-2i)! i!} \times \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} k_n(\sigma_1, \dots, \sigma_{n-2i}, \dots, \tau_i, \tau_i) \times \\ &\quad \prod_{r=1}^{n-2i} U_i(t-\sigma_r) d\sigma_1 d\sigma_2 \dots d\sigma_{n-2i} \end{aligned} \quad (8)$$

同理可知 L_n 前几项可描述为

$$\begin{aligned} L_0[h_0; U_i(t)] &= h_0 \\ L_1[h_1; U_i(t)] &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h_1(\sigma_1) k_1(\tau_1 - \sigma_1) U_i(t-\tau_1) d\sigma d\tau_1 \\ L_2[h_2; U_i(t)] &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h_2(\sigma_1, \sigma_2) k_1(\tau_1 - \sigma_1) k_1(\tau_2 - \\ &\quad \sigma_2) U_i(t-\tau_1) U_i(t-\tau_2) d\sigma_1 d\sigma_2 d\tau_1 d\tau_2 \end{aligned} \quad (9)$$

其中:

$$\begin{aligned} h_n(\sigma_1, \dots, \sigma_n) &= \frac{(2\pi)^n}{n!} E[U_o(t) U_i(t-\sigma_1), \dots, U_i(t-\sigma_n)] \\ U_o(t) &= \int_0^{\infty} k_1(\sigma) U_i(t-\sigma) d\sigma \\ k_1(t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{U_i(t) e^{j\omega t}} e^{j\omega t} d\omega \end{aligned}$$

结合上述获得的 Wiener 核及 IEEE-Std1459-2010^[18] 的相关定义, 即可算出由 Wiener-G 泛函表示的交流充电桩在非线性和冲击性、强时变条件下输出电压、电流的值。

2.3 交流充电桩的输出电流 Wiener 级数展开及仿真

为模拟实际电网冲击、时变等情况, 由 Matlab 软件建立其仿真系统, 仿真中畸变信号采用由随机模块产生的均值为 0, 方差为 1 的高斯白噪声。采用时域法计算 Wiener 核, 由于零阶核表示负荷输出期望, 一阶核多用于表示线性因素, 所以本仿真采用二阶核拟合输出。仿真结果如图 1。

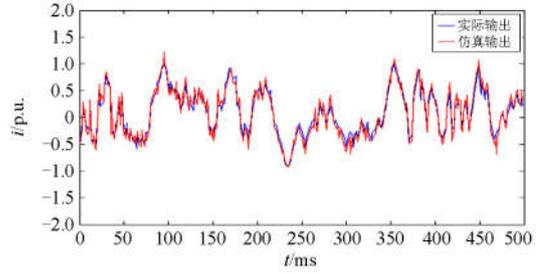


图 1 输入高斯白噪声的二阶拟合

Fig. 1 Two-order fitting with Gauss white noise

由仿真结果可见, Wiener 模型理论输出与实际输出拟合效果近乎真实, 说明采用 Wiener 级数构建的模型可以准确地描述在冲击性等负载影响下的实际输出。

3 信号的小波分解与重构

在连续小波中, 考虑函数

$$\psi_{a,b}(t) = |a|^{-\frac{1}{2}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (10)$$

此时, $a \in R^+$, $a \neq 0$, $b \in R$, 这样相容条件变为

$$C_{\psi} = \int_0^{+\infty} \frac{|\psi(\omega)|}{\omega} d\omega < \infty \quad (11)$$

在实际应用中连续的小波必须加以离散化, 通常把连续小波变换中尺度参数 a 、平移参数 b 的离散化公式分别取作 $a = a_0^j$, $b = ka_0^j b_0$, 这里 $j \in z$, 扩展步长 $a_0 \neq 1$ 是固定的。对应的离散小波函数 $\psi_{j,k}(t)$ 可以写作

$$\psi_{j,k}(t) = a_0^{-\frac{j}{2}} \psi\left(\frac{t - ka_0^j b_0}{a_0^j}\right) \quad (12)$$

离散小波变换系数可以表示为

$$C_{j,k} = \int f(t) \psi_{j,k}(t) dt = \langle f, \psi_{j,k} \rangle \quad (13)$$

则重构公式为

$$f(t) = C \sum_{-\infty}^{\infty} \sum_{-\infty}^{\infty} C_{j,k} \psi_{j,k}(t) \quad (14)$$

式中, C 为一个与信号无关的常数。

由多分辨率分析理论^[19]可知, $u(t)$ 、 $i(t)$ 可表示为

$$u(t) = \sum_k C_j(k)\varphi(t-k) + \sum_k \sum_{j=0}^{j-1} d_j(k)2^{\frac{j}{2}}\psi(2^j t - k) \quad (15)$$

$$i(t) = \sum_k C'_j(k)\varphi(t-k) + \sum_k \sum_{j=0}^{j-1} d'_j(k)2^{\frac{j}{2}}\psi(2^j t - k) \quad (16)$$

式中: j 表示分解层数; $C_j(k)$ 、 $C'_j(k)$ 为尺度系数; $d_j(k)$ 、 $d'_j(k)$ 为小波系数。

$u(t)$ 、 $i(t)$ 的小波系数矩阵形式为

$$\begin{cases} \mathbf{C}_{\text{signal}} = [C_{0,k}, d_{0,k}, \dots, d_{j-1,k}] \\ \mathbf{C}'_{\text{signal}} = [C'_{0,k}, d'_{0,k}, \dots, d'_{j-1,k}] \end{cases} \quad (17)$$

基波信号 $u_i(t)$ 、 $i_i(t)$ 的小波系数矩阵可表示为

$$\begin{cases} \mathbf{B}_{\text{basis}} = [C_{0,b}, d_{0,b}, d_{1,b}, \dots, d_{j-1,b}] \\ \mathbf{B}'_{\text{basis}} = [C'_{0,b}, d'_{0,b}, d'_{1,b}, \dots, d'_{j-1,b}] \end{cases} \quad (18)$$

畸变信号 $u_s(t)$ 、 $i_s(t)$ 的小波系数矩阵可表示为

$$\begin{cases} \mathbf{C}_{\text{rand}} = \mathbf{C}_{\text{signal}} - \mathbf{C}_{\text{basis}} = [C_{0,r}, d_{0,r}, d_{1,r}, \dots, d_{j-1,r}] \\ \mathbf{C}'_{\text{rand}} = \mathbf{C}'_{\text{signal}} - \mathbf{C}'_{\text{basis}} = [C'_{0,r}, d'_{0,r}, d'_{1,r}, \dots, d'_{j-1,r}] \end{cases} \quad (19)$$

把不需要的小波系数归零处理, 既可得到重构畸变信号的小波系数矩阵为

$$\begin{cases} \mathbf{C}_{\text{rand}}^u = [C_{0,r}^u, d_{0,r}^u, d_{1,r}^u, \dots, d_{j-1,r}^u] \\ \mathbf{C}'_{\text{rand}}^i = [C'_{0,r}^i, d'_{0,r}^i, d'_{1,r}^i, \dots, d'_{j-1,r}^i] \end{cases} \quad (20)$$

将式(20)代入重构方程, 即可得到电压、电流的畸变分量, 得

$$\begin{cases} u'_s(t) = \sum_k c_0^u \varphi(t-k) + \sum_k \sum_{j=0}^{j-1} d_j^u(k)2^{\frac{j}{2}}\psi(2^j t - k) \\ i'_s(t) = \sum_k c_0^i \varphi(t-k) + \sum_k \sum_{j=0}^{j-1} d_j^i(k)2^{\frac{j}{2}}\psi(2^j t - k) \end{cases}$$

则畸变功率为

$$P_s = \frac{1}{T} \int_0^T u'_s(t)i'_s(t)dt \quad (21)$$

同样方法得到电压、电流的基波分量。

4 电能计量方法

设在非线性负载情况下电压、电流表达式为

$$u_a(t) = u_i(t) + u_s(t) \quad (22)$$

$$i_a(t) = i_i(t) + i_s(t) \quad (23)$$

式中: u_i 、 i_i 为基波分量; u_s 、 i_s 为畸变分量。

设 a 点瞬时功率 $P_a = u(t)i(t)$, 将式(22)、式(23)代入有

$$P_a = [u_i(t) + u_s(t)][i_i(t) + i_s(t)] =$$

$$u_i(t)i_i(t) + u_i(t)i_s(t) + u_s(t)i_i(t) + u_s(t)i_s(t) =$$

$$P_i(t) + P_{is}(t) + P_{si}(t) + P_s(t)$$

则其 a 点平均功率为

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T P_a(t)dt = \frac{1}{T} \int_0^T [P_i(t) + P_{is}(t) + P_{si}(t) + P_s(t)]dt =$$

$$\frac{1}{T} \int_0^T P_i(t)dt + \frac{1}{T} \int_0^T P_{is}(t)dt + \frac{1}{T} \int_0^T P_{si}(t)dt +$$

$$\frac{1}{T} \int_0^T P_s(t)dt = P_i + P_{is} + P_{si} + P_s$$

(24)

式中: P_i 为负载消耗的基波功率; P_{is} 为负载基波电压与畸变电流产生的功率; P_{si} 为负载畸变电压与基波电流产生的功率; P_s 为负载畸变电压与畸变电流产生的功率。式中第二项和第三项在谐波条件下为零, 但在冲击信号下不为零。以冲击信号为例, 假设

$$u_i(t) = \sqrt{2}U \sin(\omega_0 t)$$

$$i_s(t) = \sqrt{2}I \sin(2\omega_0 t + \varphi_0) + A\delta(t - t_0)$$

其中: $t_0 \in [0, T]$, $T = \frac{2\pi}{\omega_0}$ 为工频正弦波的周期; $\delta(t)$

为冲激函数; A 为 $\delta(t)$ 的强度, 则有

$$P_{is} = \frac{1}{T} \int_0^T u_i(t)i_s(t)dt = \frac{1}{T} \int_0^T \sqrt{2}U \sin(\omega_0 t) \times \sqrt{2}I \sin(2\omega_0 t + \varphi_0)dt +$$

$$\frac{1}{T} \int_0^T \sqrt{2}U \sin(\omega_0 t) \times A\delta(t - t_0)dt =$$

$$\frac{1}{T} \int_0^T \sqrt{2}U \sin(\omega_0 t) \times A\delta(t - t_0)dt = \frac{\sqrt{2}AU}{T} \sin(\omega_0 t_0)$$

当 $A = 0$, 即没有尖峰脉冲时, $P_{is} = 0$ 。

当 $A \neq 0$ 时, $P_{is} = \frac{\sqrt{2}AU}{T} \sin(\omega_0 t_0)$ 是 t_0 的函数。

一般情况下, $t_0 \neq 0$, 即 $P_{is} \neq 0$, 同理, P_{si} 也不一定为零。

由功率潮流方向分析^[20]可知合理的功率计量为

$$P = P_a - P_s \quad (25)$$

5 实验仿真

1) 以暂升信号为例, 假设电压信号在第四至第五周期, 电流信号在第三至第四周期发生暂升突变。电压电流为

$$U(t) = 220 \sin(2\pi f_0 t)(1 + 0.3t_1)$$

$$t_1 = \begin{cases} 1 & 0.06 \leq t \leq 0.1 \\ 0 & t < 0.06, t > 0.1 \end{cases}$$

$$i(t) = 110\sqrt{2} \sin(2\pi f_0 t + \frac{\pi}{3})(1 + 0.4t_2)$$

$$t_2 = \begin{cases} 1 & 0.0375 \leq t \leq 0.0775 \\ 0 & t < 0.0375, t > 0.0775 \end{cases}$$

取采样点数 2 048, 采样频率为 4 800 Hz, 则得到的重构电压、电流波形如图 2。

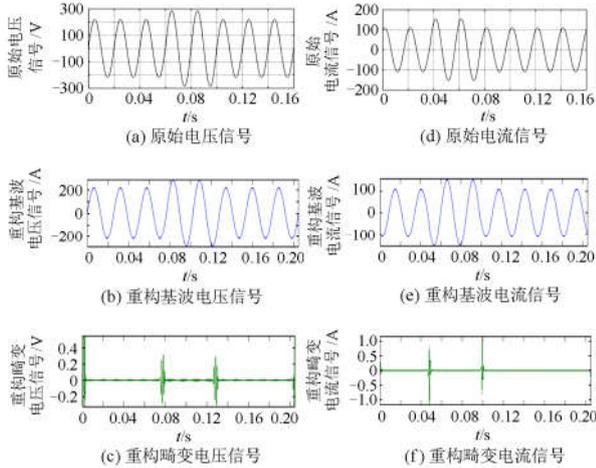


图 2 重构电压、电流波形

Fig. 2 Reconstruction of voltage and current waveforms

将分解的电压、电流小波系数代入式(21)得到电压、电流突变时的功率计量结果, 如表 1。由表 1 可知理论值为 13 204 W, 实验值为 13 275 W, 理论与实际测量的误差在 0.001 量级, 说明本文所采用的 Wiener 级数建模方法可以适用交流充电桩在电压、电流信号发生突变时的电能计量。

表 1 仿真结果

Table 1 Simulation result

功率	理论值/W	实测值/W	误差%
P_a	12 612	12 652	0.32
P_i	12 100	12 115	0.12
P_{is}	1 342	1 330	0.89
P_{si}	-1 422	-1 410	0.84
P_v	-592	-623	-5.23

2) 为更具普遍性, 以半导体整流器为例进行仿真, 采样点数与采样频率如仿真结果, 高斯白噪声由均值为 0, 方差为 1 的随机数模块模拟产生。零阶核为 0.198 8, 小波分解如图 3 所示, 仿真结果如表 2 所示。

3) 以电网中典型的非线性负载 SS1 型电力机车为例, 采样点数与采样频率与实验仿真结果相同。小波分解如图 4 所示, 仿真结果如表 3 所示。

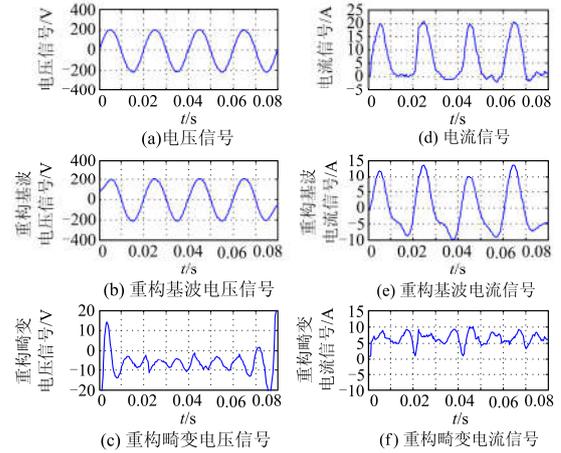


图 3 半导体整流器件电流电压信号及分解

Fig 3 Current and voltage of semiconductor rectifier and decomposition

表 2 仿真结果

Table 2 Simulation result

功率	理论值/W	实测值/W	误差%
P_a	909.234	879.918	-3.2
P_i	957.476	923.060	-3.6
P_{is}	0	1.340	—
P_{si}	0	1.635	—
P_v	-48.242	-46.117	4.4

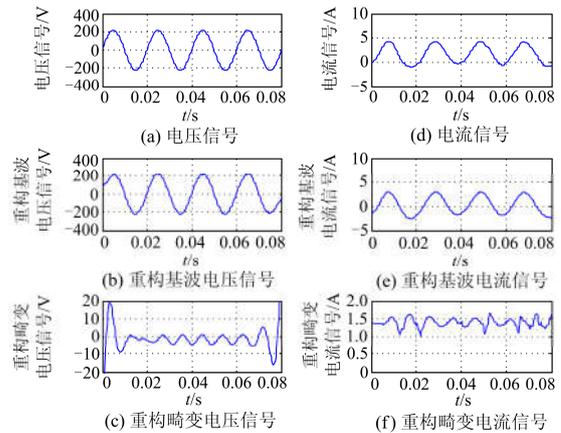


图 4 SS1 型电力机车负载电流电压及分解

Fig. 4 Current and voltage of SS1 electric locomotive and decomposition

表 3 仿真结果

Table 3 Simulation result

功率	理论值/W	实测值/W	误差%
P_a	135.66	134.921	-0.54
P_i	139.176	138.038	-0.82
P_{is}	0.701	0.757	8
P_{si}	-0.3	-0.324	-8
P_v	-3.743	-3.55	5.2

6 误差分析

由以上仿真结果可知, 仿真结果与理论值存在误差, 分析误差主要原因有以下几点。

1) Wiener 级数估计系统输出时, 随着 Wiener 核阶数的增加, 其矩阵规模也会增加, 而在实际应用中是截取有限项逼近, 必然会产生误差。

2) 在进行 Wiener 核估计时不同的输入功率等级也会产生误差。

3) Wiener 泛函级数求取的电参量由于模型的误差, 在后续计算时也会产生误差。

7 结论

本文提出将 Wiener 级数建模思想运用到交流充电桩电能计量中, 通过理论分析与实验验证得出以下结论。

1) 测量精度可以达到 0.001 V, 功率潮流方向仿真结果与理论情况一致, 说明本文所构建的 Wiener 泛函级数模型计量方法适用于交流电动汽车这类强时变非线性负载的电能计量。

2) P_{is} 、 P_{si} 不为零说明此部分畸变功率在交流充电桩电能计费时不可忽略。

3) 通过 Wiener 级数模型的交流充电桩电能计量方法能够有效地解决交流充电桩在非线性、强时变等非线性负载条件下计量不准的问题。

参考文献

- [1] 李升, 姜程程, 赵之瑜, 等. 分布式光伏电站接入低压配电网系统暂态电压稳定性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(8): 67-72.
LI Sheng, JIANG Chengcheng, ZHAO Zhiyu. Study of transient voltage stability for distributed photovoltaic power plant integration into low voltage distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(8): 67-72.
- [2] 刘书铭, 李琼林, 陈栋新, 等. 中高压配电网非线性用户的电能质量特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(15): 150-155.
LIU Shuming, LI Qionglin, CHEN Dongxin, et al. Study of power quality characteristics of nonlinear electric user in medium-high voltage distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(15): 150-155.
- [3] 冷华, 董莹, 李欣然, 等. 配电网运行状态综合评估方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 53-59.
LENG Hua, TONG Ying, LI Xinran, et al. Comprehensive evaluation method research of the operation state in distributed network[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 53-59.
- [4] 孙浩然, 徐玉明. 非线性及不平衡负荷对电压质量影响分析[J]. 江苏电机工程, 2011, 30(3): 35-37.
SUN Haoran, XU Yuming. Analysis and improvement for scheme of self-demand system in substation[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2011, 30(3): 35-37.
- [5] 陈刚, 潘心斌, 肖伸平. 非线性负荷对配电网电能质量的影响研究[J]. 湖南工业大学学报, 2016, 30(4): 16-20.
CHEN Gang, PAN Xinbin, XIAO Shenping. A research on the influence of nonlinear loads on the power quality of distribution networks[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2016, 30(4): 16-20.
- [6] 胡泽春, 宋永华, 徐智威, 等. 电动汽车接入电网的影响与利用[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4): 1-10, 25.
HU Zechun, SONG Yonghua, XU Zhiwei, et al. Impacts and utilization of electric vehicles integration into power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 1-10, 25.
- [7] 秦鹏, 崔国柱, 郭昌林, 等. 光伏接入对配电网电能质量的影响及最大接入容量分析[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(11): 145-150.
QIN Peng, CUI Guozhu, GUO Changlin, et al. Influence of photovoltaic access on distribution network power quality and analysis of maximum access capacity[J]. Power System & Clean Energy, 2016, 32(11): 145-150.
- [8] 张允, 陆佳政, 李波. 利用有源滤波功能的新型电动汽车交流充电桩[J]. 高电压技术, 2011, 37(1): 150-156.
ZHANG Yun, LU Jiazheng, LI Bo. New electric vehicle AC charge spots using active power filter[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(1): 150-156.
- [9] 季斌炜, 陈潇一. 基于粒子群算法的配电网无功补偿方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(3): 111-114.
JI Binwei, Chen Xiaoyi. Study on Reactive Power Compensation Method of Distribution Network Based on Particle Swarm Optimization[J]. Power System and Cleaning Energy 2016, 32(3): 111-114.
- [10] WANG Huicai, ZHU Bin, LIU Yongxiang, et al. Field inspection technology and application of AC charging pile based on industrial computer[C]// Information Science and Control Engineering, July 21-23, 2017, Changsha, China: 1510-1513.
- [11] 高云鹏, 滕召胜, 卿柏元. 基于 Kaiser 窗双谱线插值 FFT 的谐波分析方法[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(2): 287-292.

- GAO Yunpeng, TENG Zhaosheng, QING Baiyuan. Harmonic analysis based on Kaiser window double spectrum line interpolation FFT[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(2): 287-292.
- [12] DONG Wenjie, ZHANG He. Design of multi-channel electric energy metering and charge-monitoring system[C]//International Conference on Control Science and Systems Engineering, August 17-19, 2017, Beijing, China: 391-395.
- [13] ZIMMERLING I M, TSEKMES I A, MORSHUIS P H F. Space charge analysis of modified and unmodified XLPE model-cables under different electric fields and temperatures[C]//Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, October 18-21, 2015, Ann Arbor, MI, USA: 134-137.
- [14] 谭志强, 彭楚宁. 冲击负荷对电能计量的影响[J]. 电测与仪表, 2003, 40(1): 41-43.
TAN Zhiqiang, PENG Chuning. The influence on electric energy measurement under the condition of impulse load[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2003, 40(1): 41-43.
- [15] 粟时平, 王长城, 金维宇. 冲击负荷电能计量理论与算法研究[J]. 电测与仪表, 2004, 41(10): 1-4, 46.
SU Shiping, WANG Changcheng, JIN Weiyu. Study on theory and arithmetic of electric energy measurement for impact load[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2004, 41(10): 1-4, 46.
- [16] 覃星福, 龚仁喜. 基于广义 S 变换与 PSO-PNN 的电能质量扰动识别[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(15): 10-17.
QIN Xingfu, GONG Renxi. Power quality disturbances classification based on generalized S-transform and PSO-PNN[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(15): 10-17.
- [17] 张晓冰, 李云辉, 房国志. 非平稳畸变信号条件下电网信号建模[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2721-2728.
ZHANG Xiaobin, LI Yunhui, FANG Guozhi. Modeling for power grid signals under the condition of non-stationary distortion signals[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2721-2728.
- [18] Power System Instrumentation and Measurements Committee. IEEE standard definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, non-sinusoidal, balanced, or unbalanced conditions: 1459—2010[S]. New York: IEEE, 2010.
- [19] 任子晖, 刘昊岳, 徐进霞. 基于小波变换和改进 Prony 方法的电能质量扰动分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(9): 122-128.
REN Zihui, LIU Haoyue, XU Jinxia. Power quality disturbance analysis based on wavelet transform and improved Prony method[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(9): 122-128.
- [20] 张晓冰, 李云辉, 曹伟. 基于功率潮流分析的电能计量新方法[J]. 电机与控制学报, 2016, 20(6): 87-93.
ZHANG Xiaobin, LI Yunhui, CAO Wei. Method of active power measurement under condition of distortion signal[J]. Electric Machines and Control, 2016, 20(6): 87-93.

收稿日期: 2017-02-07; 修回日期: 2017-11-29

作者简介:

房国志(1963—), 男, 教授, 从事电力系统继电保护与电能质量检测研究工作;

李昂(1991—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电气测量技术及仪器; E-mail: 594717378@qq.com

张晓冰(1962—), 女, 工学博士, 教授, 主要从事电气测量技术及仪器、工业自动化仪表等方面的研究工作。

(编辑 周金梅)