

8-13-2020

Measuring Principle Research on Fundamental Wave of Grid Based on Curve Fitting Model

Liyun Liu

1. *Department of Electron Information Engineer, Loudi College of Vocational & Technical, Loudi 417000, China;;*

Zhezhaoh Zeng

2. *School of Electric and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410014, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Measuring Principle Research on Fundamental Wave of Grid Based on Curve Fitting Model

Abstract

Abstract: Measuring principle of grid fundamental wave based on algebraic polynomial model is proposed. Its main idea is to optimize parameters of algebraic polynomial model so as to accurately fit the power grid fundamental wave signal to be measured based on the recursive least squares (RLS), and then *the steepest descent method was adopted to iteratively calculate zeros of the fitting polynomial model, and then fundamental frequency was obtained according to time difference of the adjacent two zeros. Fundamental wave amplitude could be obtained according to the fitting model values corresponding to the middle of the adjacent two zero points. Finally, initial phase of the fundamental wave could be obtained by the first sample data.* Simulation results show that the method proposed is an effective detection method, which has very high detection accuracy and strong noise immunity ability.

Keywords

grid fundamental wave, fundamental wave detection, algebra polynomial, curve fitting

Recommended Citation

Liu Liyun, Zeng Zhezhaoh. Measuring Principle Research on Fundamental Wave of Grid Based on Curve Fitting Model[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(11): 2798-2804.

基于曲线拟合模型的电网基波测量原理研究

刘理云¹, 曾喆昭²

(1. 娄底职业技术学院电子信息工程系, 湖南 娄底 417000; 2. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410014)

摘要: 提出了基于代数多项式模型的电网基波测量原理, 其主要思想是根据递推最小二乘法(RLS)优化计算代数多项式模型参数, 使代数多项式模型能高精度拟合待测的电网基波信号, 然后使用最速下降法迭代计算已拟合多项式模型的零点, 并根据相邻两个零点的时间差得到待测基波的频率; 再根据相邻两个零点之间的中点对应的拟合模型值即可获得基波的幅值; 最后由第一个样本数据即可获得基波的初始相位。仿真结果表明, 该测量方法不仅具有很高的基波检测精度, 而且具有很强的噪声免疫能力, 因而是一种行之有效的基波检测方法。

关键词: 电网基波; 基波检测; 代数多项式; 曲线拟合

中图分类号: TM935 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2016) 11-2798-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201611022

Measuring Principle Research on Fundamental Wave of Grid Based on Curve Fitting Model

Liu Liyun¹, Zeng Zhezha²

(1. Department of Electron Information Engineer, Loudi College of Vocational & Technical, Loudi 417000, China;

2. School of Electric and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410014, China)

Abstract: Measuring principle of grid fundamental wave based on algebraic polynomial model is proposed. Its main idea is to optimize parameters of algebraic polynomial model so as to accurately fit the power grid fundamental wave signal to be measured based on the recursive least squares (RLS), and then the steepest descent method was adopted to iteratively calculate zeros of the fitting polynomial model, and then fundamental frequency was obtained according to time difference of the adjacent two zeros. Fundamental wave amplitude could be obtained according to the fitting model values corresponding to the middle of the adjacent two zero points. Finally, initial phase of the fundamental wave could be obtained by the first sample data. Simulation results show that the method proposed is an effective detection method, which has very high detection accuracy and strong noise immunity ability.

Keywords: grid fundamental wave; fundamental wave detection; algebra polynomial; curve fitting

引言

电网基波的测量不仅是电能质量和电能计量评估体系的重要基础, 也是电网谐波分析与治理的关键。特别是有关电力系统基波频率的检测方法已

许多研究成果, 主要分为硬件测量和软件测量两大类^[1-5]。硬件测量技术主要通过滤波整形电路和锁相环来实现, 不仅增加了硬件成本而且占用一定体积, 不利于微机保护装置微型化的发展趋势; 软件测量技术的实现方法灵活, 获得了广泛应用^[1,3-5]。

软件测频方法主要有: 傅里叶方法、解析法、周期法、频谱分析法、最小二乘法、误差最小化方法、正交去调制方法、卡尔曼滤波方法以及牛顿迭代方法等^[4-6]。由于快速傅里叶变换对数据采集要



收稿日期: 2015-11-03 修回日期: 2016-03-01;
基金项目: 湖南省科技计划(2014SK3227);
作者简介: 刘理云(1975-), 男, 湖南娄底, 硕士, 副教授, 研究方向为应用电子技术、仪器仪表; 曾喆昭(1963-), 男, 湖南蓝山, 博士, 教授, 研究方向为智能信息处理与智能控制。

<http://www.china-simulation.com>

• 2798 •

求较高, 在发生频率偏移时会存在非同步采样误差, 因此频率测量精度会受到较大影响, 而且存在频谱泄露和栅栏效应^[7-8]; 解析法涉及到复杂的数学推导, 而且总体而言精度不高; 周期测频法原理简单而且易于实现, 但对噪声和谐波的抗干扰性能差^[6,9]; 正交去调制方法需要精细的滤波技术^[10]。文献[11]使用微分和拉格朗日插值方法对电力系统频率进行测量, 精度较高、实时性好, 然而该方法没有考虑谐波和噪声等扰动的影响; 文献[12]使用希尔伯特-黄变换来测量电网电压信号的瞬时频率, 测量效果良好, 然而在出现瞬时脉冲、暂态振荡等扰动时, 获得的瞬时频率会发生较大的波动, 因而无法准确获得基波频率, 而且该方法存在模态混叠和边界效应等问题。

为了提高检测算法的抗扰动能力, 文献[13]提出了基于前馈神经网络的电网基波高精度检测方法, 该方法不仅具有较强的抗干扰能力, 而且基波频率检测精度可达 10^{-4} 级, 然而该方法利用梯度下降法来训练神经网络权值, 尽管对初始点的选择不敏感, 但是在到达最小点的时候其收敛速度变慢, 难以获得全局最优权值系数; 文献[14]提出一种迭代变权最小二乘支持向量机检测的基波检测算法, 该方法可以避免不必要的谐波检测, 加快了检测速度, 计算量小、抗干扰能力强的特点, 然而, 该方法只适合于检测基波的幅值系数(检测精度达 10^{-4} 级), 无法检测基波的频率。此外, 该方法的仿真结果是在基波频率为 50 Hz、采样频率为 2 kHz 的同步采样情况下获得的, 在非同步采样情况下难以表明该方法的有效性。在空间谱估计算法中, 具有代表性的方法之一是基于旋转矢量不变技术的信号参数估计(Estimation of Signal Parameters Via Rotational Invariance Techniques, ESPRIT)算法, 而 TLS-ESPRIT 则是 ESPRIT 的改进算法, 其最大的优点是无需谱峰搜索, 运算速度快、计算量小, 可高精度估计信号的频率等参数。TLS-ESPRIT 方法在阵列信号处理和电力系统谐波检测等领域已获得了许多研究成果^[15-18], 然而由于其本身算法的局

限性, 在对频率成分较多的电网信号进行处理时, TLS-ESPRIT 算法存在难以准确定阶、出现伪谱等局限性^[19]。此外, 一种基于矩阵分解和变换方法的奇异值分解(Singular Value Decomposition, SVD)常用来进行信号的消噪处理。文献[20]指出, 通过对监测信号相空间重构矩阵的奇异值分解, 能够反映信号和能量集中的情况。根据奇异值有效秩的阶次选择就可以有效削弱噪声信号, 提取有用信号; 文献[21]提出了基于奇异熵增量及其微分的模态定阶方法; 文献[22]借鉴了上述文献的研究成果, 提出了基于奇异熵增量及其微分来对电网信号中的基波信号进行定阶, 利用奇异值分解的逆过程来提取电网基波信号, 最后再通过 TLS-ESPRIT 算法来对电网基波信号的频率进行估计。在存在噪声和扰动情况下, 该方法能有效提取电网基波信号, 且频率的检测精度可达 10^{-5} 级, 然而该方法计算量大、实时性欠佳。文献[23]提出了一种幅值调制的电力系统正弦频率测量方法, 该方法通过对混频干扰的深度抑制, 提高了正弦频率测量准确度, 然而, 该方法计算量较大, 窗口时间需要 0.25 s 以上, 即需要 12 个以上基波周期的采样数据。

为了减少计算量, 并进一步提高任意基波频率的检测精度和抗干扰能力, 本文提出了基于代数多项式模型的基波检测新方法。该方法首先利用代数多项式模型对待测电网基波信号进行曲线拟合, 然后对拟合的代数多项式模型的零点进行自适应求解, 根据相邻两个零点的时间差即为基波信号的半个周期, 从而获得待测基波信号的频率; 然后根据相邻两个零点的中间时间对应的多项式模型函数值即可获得待测基波的幅值; 最后根据第一个样本数据和获得的待测频率与幅值, 即可获得待测基波的初始相位。

1 电网待测基波信号拟合原理

1.1 代数多项式模型

设 n 阶代数多项式模型为:

$$p_n(x) = \sum_{j=0}^n c_j x^j \quad (1)$$

其中, $x \in [-1, 1]$ 。设某电网信号经过滤波器滤除谐波后, 得到的待测基波信号为:

$$s(t) = A \cos(2\pi f_0 t + \phi) \quad (2)$$

式中: f_0 , A 和 ϕ 分别为基波的频率、幅值和相位。由于电网基波频率通常为 50 Hz 左右, 因此其周期为 0.02 s 左右。为此, 需要将式(2)的时间变量映射为式(1)的自变量取值范围, 即

$$x = (2t - a - b) / (b - a) \quad (3)$$

$$\text{或 } t = [(b - a)x + a + b] / 2 \quad (4)$$

很显然, 变量 x 和 t 存在以下映射关系:

$$x \in [-1, 1] \Leftrightarrow t \in [a, b]$$

不失一般性, 以 $t=0$ 时刻为待测电网基波信号的观测时刻, 设观测窗口时间为 T_w , 则有: $a=0$, $b=T_w$ 。因此, 式(3)或式(4)改写为:

$$x = 2t / T_w - 1 \quad (5)$$

$$\text{或 } t = 0.5(x + 1)T_w \quad (6)$$

1.2 代数多项式模型参数的自学习算法

目前智能变电站中最常用的采样频率为 4 kHz, 国标 GB/T15945-2008 规定的小系统允许的频率偏差范围: 50±0.5 Hz, 因此设电网待测信号的采样频率为 $f_s = 4$ kHz, 则采样间隔为: $t_s = 2.5 \times 10^{-4}$ s。设窗口时间为 $T_w \leq 0.02$ s, 则在窗口时间内采样数据个数为 $M = T_w / t_s \leq 80$ 个。由于 $t_k = kt_s$, 且 $k = 0, 1, \dots, M$, 因此, $x_k = 100t_k - 1$ 。显然, 在第 k 时刻, 式(1)表示为:

$$p_n(x_k) = \sum_{j=0}^n c_j x_k^j, (k=0, 1, \dots, M) \quad (7)$$

为了便于分析, 分别设:

$$\mathbf{P} = [p_n(x_0), p_n(x_1), \dots, p_n(x_{79})]^T,$$

$$\mathbf{C} = [c_0, c_1, \dots, c_n]^T, \text{ 且 } n \leq 79;$$

$$\mathbf{S} = [s(t_0), s(t_1), \dots, s(t_{79})]^T, \text{ 以及}$$

$$\mathbf{X}(k, :) = [1, x_k, \dots, x_k^n] \in R^{1 \times (n+1)}$$

因此, 式(7)可改写为:

$$\mathbf{P}(k, :) = \mathbf{X}(k, :) \mathbf{C} \quad (8)$$

其中, $\mathbf{P}(k, :) = p_n(x_k)$ 。为了确定代数多项式模型式(1)或式(7)的参数 $c_j (j=0, 1, \dots, n)$, 本文使用递推最小二乘法(Recursive least squares method, RLS)来自学习训练模型参数。设训练误差为:

$$e_1(k) = s(t_k) - p_n(x_k) \quad (9)$$

定义性能指标:

$$J_1(k) = 0.5 \sum_{k=0}^{79} e_1^2(k) \quad (10)$$

为了使性能指标 J_1 最小, 则 RLS 算法如下^[24-25]:

$$\mathbf{Q}^k = \frac{\mathbf{P}^k \mathbf{X}^T(k, :)}{\lambda + \mathbf{X}(k, :) \mathbf{P} \mathbf{X}^T(k, :)} \quad (11)$$

$$\mathbf{C}^{k+1} = \mathbf{C}^k + \mathbf{Q}^k e_1(k) \quad (12)$$

$$\mathbf{P}^{k+1} = \frac{1}{\lambda} [\mathbf{I} - \mathbf{Q}^k \mathbf{X}(k, :)] \mathbf{P}^k \quad (13)$$

其中, 初始协方差阵 $\mathbf{P}^0 = \alpha \mathbf{I} \in R^{(n+1) \times (n+1)}$, $\alpha = 10^3 \sim 10^{10}$ 。 λ 是遗忘因子, 通常取 $0.90 \leq \lambda \leq 1$ 。当参数变化快时, λ 取小点; 变化慢时, 取大点。当 $\lambda=1$ 时, 该估计公式成为基本递推最小二乘法。

根据式(9)~(13)对所有样本数据进行训练后, 可以获得一组最优的多项式模型参数, 使式(1)所示的代数多项式模型逼近式(2)所示的待测电网基波信号。

2 待测电网基波检测原理

设某待测电网基波信号如 1 所示。其中黑点表示待测基波信号的样本数据, 实线表示基于代数多项式模型拟合的曲线。图 1 中的 A、B 表示拟合曲线的两个过零点。显然, 如果能够准确求出拟合曲线的两个过零点, 则两个过零点的时间差即为待测基波信号的半个周期, 即 $T = 2(t_B - t_A)$, 因此, 待测基波信号的频率为:

$$f_0 = 0.5 / (t_B - t_A) \quad (14)$$

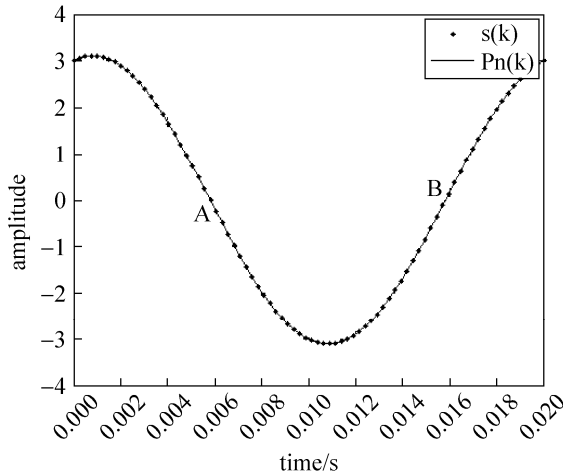


图 1 待测基波信号

2.1 基于最速下降法的过零点迭代算法

为了准确获得代数多项式拟合曲线的两个过零点时刻 t_A 和 t_B , 本文采用最速下降法来获取, 方法如下:

在 A、B 两点附近分别给定两个初始时刻, 如 $t_A(0)=0.006$ 和 $t_B(0)=0.016$ 。根据式(5)分别可得两个初始值如下所示:

$$x_A(0) = 100t_A(0) - 1 \text{ 和 } x_B(0) = 100t_B(0) - 1$$

以 $p_n(x) = 0$ 作为训练目标, 分别定义两个误差函数为:

$$e_A(m) = -p_n(x_A(m)) \quad (15)$$

$$e_B(m) = -p_n(x_B(m)) \quad (16)$$

根据两个误差函数可得性能指标为:

$$J_2(m) = 0.5[e_A^2(m) + e_B^2(m)] \quad (17)$$

为了使 $J_2(m)$ 最小, 即 $J_2(m) = \min$, 从初始值开始, 采用最速下降法进行迭代计算, 调整量分别为:

$$\begin{aligned} \Delta x_A(m) &= -\mu_A \frac{\partial J_2}{\partial x_A} = \\ &= -\mu_A \frac{\partial J_2}{\partial e_A} \frac{\partial e_A}{\partial p_n} \frac{\partial p_n}{\partial x_A} = \mu_A e_A \frac{\partial p_n}{\partial x_A} \end{aligned} \quad (18)$$

同理,

$$\Delta x_B(m) = -\mu_B \frac{\partial J_2}{\partial x_B} = \mu_B e_B \frac{\partial p_n}{\partial x_B} \quad (19)$$

因此, 两个过零点的迭代公式分别为:

$$x_A(m+1) = x_A(m) + \mu_A e_A \frac{\partial p_n}{\partial x_A} \quad (20)$$

$$x_B(m+1) = x_B(m) + \mu_B e_B \frac{\partial p_n}{\partial x_B} \quad (21)$$

式中, $m=0,1,\dots$, 学习步长为 $0 < \mu_q < 1$, $q=A,B$ 。根据式(1)有:

$$\frac{\partial p_n}{\partial x_A} = \sum_{j=1}^n j c_j x_A^{j-1} \quad (22)$$

$$\frac{\partial p_n}{\partial x_B} = \sum_{j=1}^n j c_j x_B^{j-1} \quad (23)$$

2.2 待测基波测量原理

2.2.1 待测基波频率测量

通过式(15)~(21)的迭代训练后, 即可根据给定的任意小性能指标 $J_2(m)$ 获得精度可控的两个过零点 $x_A(m)$ 和 $x_B(m)$, 再根据式(6)即可获得两个过零时刻, 即: $t_A(m) = 0.01x_A(m) + 0.01$ 和 $t_B(m) = 0.01x_B(m) + 0.01$ 。因此待测基波信号的周期为:

$$T \approx 2[t_B(m) - t_A(m)] = 0.02[x_B(m) - x_A(m)] \quad (24)$$

从而得到待测基波信号的频率为:

$$f_0 = 1/T \approx \frac{50}{x_B(m) - x_A(m)} \quad (25)$$

2.2.2 待测基波幅值测量

获得两个过零点 $x_A(m)$ 和 $x_B(m)$ 后, 可得两个零点之间的中点为:

$$x_M = 0.5[x_A(m) + x_B(m)] \quad (26)$$

根据式(7)可得待测基波的幅值为:

$$A \approx p_n(x_M) = \sum_{j=0}^n c_j x_M^j \quad (27)$$

2.2.3 待测基波相位测量

根据式(25)和式(27)分别获得待测基波的频率和幅值以后, 根据式(2)可知, 对任一 k 时刻的样本数据, 有: $s(t_k) = A \cos(2\pi f_0 t_s k + \phi)$, 因此, 待测基波的相位为:

$$\phi \approx \arccos[s(t_k) / A] - 2\pi f_0 k t_s \quad (28)$$

2.3 过零点迭代算法的收敛性分析

为了保证过零点迭代算法的收敛性, 需要合

理选择学习步长的大小。下面给出并证明迭代算法的收敛性定理，为学习步长的合理选择提供理论依据。

定理 1. 仅当学习步长满足： $0 < \mu_q < 2 / \left(\frac{\partial p_n(x_q)}{\partial x_q(m)} \right)^2$ 时，过零点迭代算法是收敛的。

通常取自适应学习步长为： $\mu_q = 1.2 / \left(\frac{\partial p_n(x_q)}{\partial x_q(m)} \right)^2$ 时，过零点迭代算法收敛最快。其中， $q=A, B$ 。

证明：设误差： $e_q(m) = -p_n(x_q(m))$ ，且 Lyapunov 函数为： $V(m) = 0.5e_q^2(m)$ ，则有

$$\Delta V(m) = 0.5[e_q^2(m+1) - e_q^2(m)] \quad (29)$$

因为： $e_q(m+1) = e_q(m) + \Delta e_q(m)$ ，代入式(29)，整理得

$$\Delta V(m) = \Delta e_q(m)[e_q(m) + 0.5\Delta e_q(m)] \quad (30)$$

又因为：

$$\Delta e_q(m) = \frac{\partial e_q(m)}{\partial x_q(m)} \Delta x_q(m) =$$

$$\frac{\partial e_q(m)}{\partial p_n(x_q)} \frac{\partial p_n(x_q)}{\partial x_q(m)} \Delta x_q(m) = -\frac{\partial p_n(x_q)}{\partial x_q(m)} \Delta x_q(m)$$

根据式(18)或式(19)可知： $\Delta x_q(m) = \mu_q e_q \frac{\partial p_n(x_q)}{\partial x_q(m)}$ ，

因此可得：

$$\Delta e_q(m) = -\mu_q e_q(m) \left(\frac{\partial p_n(x_q)}{\partial x_q(m)} \right)^2 \quad (31)$$

将式(31)代入式(30)，整理得：

$$\Delta V(m) = -\mu_q e_q^2(m) \left(\frac{\partial p_n(x_q)}{\partial x_q(m)} \right)^2 \left[1 - 0.5\mu_q \left(\frac{\partial p_n(x_q)}{\partial x_q(m)} \right)^2 \right] \quad (32)$$

因为 $\mu_q > 0$ ，为了保证过零迭代算法收敛，根据式(32)，必有下列不等式成立：

$$1 - 0.5\mu_q \left(\frac{\partial p_n(x_q)}{\partial x_q(m)} \right)^2 > 0$$

即 $0 < \mu_q < 2 / \left(\frac{\partial p_n(x_q)}{\partial x_q(m)} \right)^2$ (33)

其中， $\frac{\partial p_n(x_q)}{\partial x_q(m)} = \sum_{j=1}^n j c_j x_q^{j-1}$ ，证毕。

3 仿真结果与分析

在下列所有仿真实验中，设采样频率为 $f_s = 4 \text{ kHz}$ ，观测窗口时间为： $T_w = 0.018 \text{ s}$ ，即不足一个标准基波周期，样本个数为： $M = T_w / t_s = 72$ 。设待测基波信号为：

$$s(t) = \cos(2\pi f_0 t + \pi / 4) \quad (34)$$

初始时刻分别给定为： $t_A(0) = 0.002$ 和 $t_B(0) = 0.012$ 。在 $50 \pm 0.5 \text{ Hz}$ 范围内选择 6 个待测基波频率，自适应学习步长由定理 1 确定，即

$\mu_q = 1.2 / \left(\frac{\partial p_n(x_q)}{\partial x_q(m)} \right)^2$ ， $q = A, B$ 。检测精度定义如下：

设某物理量为 y_d ，其测量值为 y ，则测量精度定义为： $\frac{|y_d - y|}{|y_d|}$ 。

3.1 基波检测实验

仿真 1. 根据式(34)所示的未知待测基波信号，在仿真实验中，设 $\lambda = 0.99$ ， $\alpha = 1e+10$ ， $n = 14$ ，使用本文方法获得的基波检测结果如表 1 所示。

表 1 基波检测结果

实际频率/Hz					
49.50	49.51	49.85	50.02	50.35	50.50
频率测量值/Hz 与测量精度					
49.50	49.51	49.85	50.02	50.35	50.50
2.6e-9	2.6e-9	2.7e-9	2.6e-9	2.6e-9	2.6e-9
幅值测量值/v 与测量精度					
1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2.9e-9	2.9e-9	3.7e-9	4.5e-9	4.8e-9	5.1e-9
相位测量值/rad 与测量精度					
0.785	0.785	0.785	0.785	0.785	0.786
3.7e-9	3.7e-9	4.7e-9	5.7e-9	6.1e-9	6.5e-9

由表 1 可知，利用本文方法检测待测基波信号，其频率、幅值和相位的检测精度均达到 10^{-9}

级, 如此高的基波检测精度表明本文方法在基波检测领域是完全有效的。

3.2 随机噪声对基波检测精度的影响

仿真 2. 在式(34)的基础上, 加入信噪比为 60dB 的随机白噪声, 则待测基波信号为:

$$s(t) = \cos(2\pi f_0 t + \pi / 4) + n(t) \quad (35)$$

在 50±0.5 Hz 范围内选择 6 个待测基波频率, 如表 2 所示。在仿真实验中, 各仿真参数同仿真 1, 使用本文方法获得的基波检测结果如表 2 所示。

表 2 随机噪声对基波检测精度的影响

实际频率/Hz					
49.50	49.51	49.85	50.02	50.35	50.50
频率测量值/Hz 与测量精度					
49.50	49.51	49.85	50.02	50.35	50.50
1.5e-5	6.4e-6	4.6e-6	4.2e-6	1.7e-6	5.2e-6
幅值测量值/v 与测量精度					
1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
3.0e-5	5.4e-5	2.1e-5	4.5e-5	5.4e-5	2.8e-5
相位测量值/rad 与测量精度					
0.785	0.785	0.785	0.785	0.785	0.786
3.9e-5	6.8e-5	2.6e-5	5.7e-5	6.9e-5	3.5e-5

由表 2 的检测结果表明, 在随机噪声影响下, 待测电网基波频率的检测精度可达 10^{-6} 级, 基波幅值和相位的检测精度可达 10^{-5} 级, 进一步表明本文方法在基波检测中的有效性。

4 结论

本文提出的电网基波参数检测方法, 在没有随机噪声的情况下, 其频率、幅值和相位的检测精度可达 10^{-9} 级, 表明本文提出的基波参数检测方法是十分有效的; 在随机噪声影响情况下, 基波频率的检测精度可达 10^{-6} 级、幅值和相位的检测精度可达 10^{-5} 级, 表明该方法具有很强的抗干扰能力。与文献[14]相比, 计算精度至少提高了一个数量级; 与文献[22]相比, 频率计算精度提高了

一个数量级。此外, 与现有各种方法相比, 本文方法不要求同步采样, 而且观测窗口时间小于一个标准基波周期, 而现有频率检测方法则至少需要 4 个标准基波周期的观测窗口时间, 因此本文涉及的样本数据少, 因而有效减小了计算量、有利于提高基波检测的实时性。

参考文献:

- [1] 谢小荣, 韩英铎. 电力系统频率测量综述 [J]. 电力系统自动化, 1999, 23(3): 54-58.
- [2] 卞星明, 文远芳, 雷琴. 电力系统测频算法比较 [J]. 高电压技术, 2006, 32(5): 111-114.
- [3] 邱海锋, 周浩. 非同步采样下电网谐波分析方法的探讨 [J]. 继电器, 2008, 36(1): 57-62.
- [4] 胡铭, 陈珩. 电能质量及其分析方法综述 [J]. 电网技术, 2000, 24(2): 36-38.
- [5] 薛蕙, 杨仁刚. 基于FFT的高精度谐波检测算法 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(12): 106-110.
- [6] 林海雪. 现代电能质量的基本问题 [J]. 电网技术, 2001, 25(10): 5-12.
- [7] Thomasdwp W. Evaluation of frequency tracking methods [J]. IEEE Trans. On Power Delivery (S0885-8977), 2001, 16(3): 367-371.
- [8] 磨少清, 李啸骢. 一种高精度的改进傅里叶测频算法 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27(12): 48-49, 54.
- [9] Aghazadehr L. New technique for frequency and amplitude estimation of power system signals [J]. Proceedings of the IEEE (S0018-9219), 2005, 152(3): 435-440.
- [10] Pradhanak R B. Power system frequency estimation using least mean square technique [J]. IEEE Trans. on Power Delivery (S0885-8977), 2005, 20(3): 1812-1816.
- [11] 吴杰康, 龙军, 王辑祥. 基于数值微分算法的系统频率快速准确测量 [J]. 电工技术学报, 2004, 19(4): 93-97.
- [12] 李天云, 赵妍, 李楠, 等. 基于HHT的电能质量检查新方法 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(17): 52-56.
- [13] 王勇, 付志红, 张淮清, 等. 基于前馈神经网络的电网基波高精度检测 [J]. 电网技术, 2011, 35(8): 124-128.
- [14] 王允建, 谢贝贝, 胡治国. 电力谐波检测迭代变权最小二乘快速基波提取方法 [J]. 系统仿真学报, 2014, 26(12): 2991-2995. (Wang Yunjian, Xie Beibei, Hu Zhiguo. Rapidly FundamentalWave Detection of Electric Power Harmonic Detection Based on Iteration VariableWeight Least Square Algorithm [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2014, 26(12): 2991-2995.)

(下转第 2812 页)

<http://www.china-simulation.com>

• 2803 •