

Estimation of Harmonics in Power Systems Based on Particle Swarm Optimized Recursive Least Square Model

Shiqi Shuai¹, Hui Jiang¹, Jianchun Peng²

¹College of Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen Guangdong

²College of Mechatronics and Control Engineering, Shenzhen University, Shenzhen Guangdong

Email: 970320894@qq.com, huijiang@szu.edu.cn

Received: Aug. 1st, 2016; accepted: Aug. 21st, 2016; published: Aug. 25th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

This paper presents a method for estimating harmonics in power systems based on particle swarm optimized recursive least square (PSO-RLS) model. The PSO is used to get the optimal initial weights and RLS is used to estimate parameters of harmonic signals. In this way, the method resolves the problem that RLS is sensitive to initial weights. This method is used to analyze both steady-state and dynamic voltage signals. And its performance is revealed by comparing results of difference noise environments. In addition, the dynamic sub harmonic and inter harmonics are analyzed using this method. Simulation results show the performance of the proposed method is better than the VCLMS and GA-RLS ones.

Keywords

Power Quality, Harmonics Estimation, Particle Swarm Optimization, Recursive Least Square

粒子群优化自适应最小二乘法的电网谐波估计

帅士奇¹, 江 辉¹, 彭建春²

¹深圳大学光电工程学院, 广东 深圳

²深圳大学机电与控制工程学院, 广东 深圳

摘要

研究基于粒子群优化自适应最小二乘法的电网谐波估计方法, 针对自适应最小二乘(Recursive Least Square, RLS)算法对初始值敏感的问题, 本文利用粒子群(Particle Swarm Optimization, PSO)算法得到最优化的电网谐波参数即状态向量的权重初始值, 再利用自适应最小二乘法(RLS)对电网谐波参数进行参数估计。对静态和动态的电压信号进行仿真分析, 并比较了不同的噪声环境下参数估计效果, 最后还应用本文所提方法对电网动态子谐波和间谐波进行了仿真分析。仿真结果表明, 与可变约束最小二乘方法(VCLMS), 遗传算法(GA)优化参数估计方法相比, 本文所提方法估计效果更优。

关键词

电能质量, 谐波估计, 粒子群算法, 自适应最小二乘法

1. 引言

随着电力系统中非线性设备及负荷在电力网络中大量增加, 由此而产生的谐波问题也越来越受到人们的重视。有效地治理谐波及其产生的一系列问题, 提供更好更加优质的电能质量, 对谐波的产生和扩散进行监视是十分必要的, 电力系统谐波状态估计可以根据电网部分节点的测量值来估计整个网络的谐波状态, 实现对谐波的有效监视[1]。

传统的电力系统谐波检测和分析方法有傅里叶变换(FT)、快速傅里叶变换(FFT)等。其中, 快速傅里叶变换(FFT)适用于静态谐波分析, 对时变的动态谐波会丢失精度, 而且还会产生混叠、泄露和栅栏现象[2]。除此之外常用的有小波变换、卡尔曼滤波算法(Kalman filter, KF)、以及最小二乘算法等。文献[3]提出了一种基于 Kalman 滤波误差的电能质量扰动检测方法, 采用线性卡尔曼滤波器的误差序列来实时检测电能质量扰动。卡尔曼滤波算法(KF)对有噪声的信号存在估计精度不高的问题, LMS 算法因其具有方法简单, 计算量小, 易于实现且对信号的统计特性具有稳健性等优点[4]。近年来涌现出了很多的智能优化算法, 利用这些智能优化算法结合最小二乘算法可以得到较好的谐波参数。文献[5]-[7]分别提出了先利用遗传算(genetic-algorithm, GA)、粒子群算法(PSO)以及改进的细菌觅食算法(Bacterial Foraging Optimization, BFO)来估计谐波的相位, 然后再结合最小均方算法(LS)来估计谐波的幅值。文献[8]和[9]分别提出利用细菌觅食算法(BFO)、萤火虫算法(Firefly Algorithm, FA)结合自适应最小二乘法(RLS)来估计谐波的幅值和相位。

自适应最小二乘算法(RLS)是最小二乘算法的一类快速算法, 由于采用了在每个时刻对所有已输入信号重估的平方误差和最小准则, 克服了 LMS 算法收敛速度慢和信号非平稳适应性差等缺点。与 LMS 算法相比, RLS 算法具有快速的跟踪能力[4]。由于 RLS 在估计谐波参数时, 会对初始参数比较敏感, 因此本文所提出利用粒子群算法得到最优化的电网谐波参数的初始值, 再利用自适应最小二乘法对电网谐波参数进行估计, 克服 RLS 算法初始参数敏感的问题。

2. 粒子群算法

粒子群优化(PSO)算法于 1995 年由 Kennedy 和 Eberhart 提出[10]。是从一组随机解出发, 采用迭代

的方法寻找最优解，用适应度来评价解的优劣，并通过追随当前搜索到的群体最优解和个体最优解来寻找全局最优。

在粒子群算法中，种群被称为粒子群，种群中的每一个个体被称为粒子，每个粒子有两个属性，分别是粒子的位置和粒子的速度。

k 时刻 N 个粒子的位置可以表示如下

$$X_i^k = (x_1^k, x_2^k, \dots, x_N^k) \quad (1)$$

其中: $x_n^k \in [l_n, u_n]$, $1 \leq n \leq N$, l_n 和 u_n 分别是粒子搜索的上限和下限。

k 时刻 N 个粒子的速度可以表示如下

$$V_i^k = (v_1^k, v_2^k, \dots, v_N^k) \quad (2)$$

其中: $v_n^k \in [v_{\max}, v_{\min}]$, $1 \leq n \leq N$, v_{\max} 和 v_{\min} 分别是粒子的最大速度和最小速度。

在 PSO 的每次迭代中，粒子群中的粒子的速度和位置更新公式如下：

$$V_i^{k+1} = \omega V_i^k + c_1 r_1 (P_i^k - X_i^k) + c_2 r_2 (P_g^k - X_i^k) \quad (3)$$

$$X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^{k+1} \quad (4)$$

其中: P_i 是第 i 个粒子比较上一时刻的最好位置，通常记为 pbest; P_g 是所有粒子中的最好位置，通常记为 gbest; r_1 和 r_2 是两个均匀的随机数，它们服从如下均匀分布: $r_1 \sim U(0,1)$, $r_2 \sim U(0,1)$; ω 为惯性因子，它的取值范围是 $[0,1]$ ，当 ω 较大时，会促进全局搜索，当 ω 较小时，会促进局部搜索以改变搜索区域。 c_1 和 c_2 为加速常量，用来控制每一步迭代时粒子移动的步长，通常取为 2。

3. 基于 PSO-RLS 算法的谐波估计原理

3.1. 谐波模型

一个含有加性噪声的离散谐波周期信号可表示为如下谐波信号模型[11]:

$$y(t) = \sum_{n=1}^N A_n \sin(n\omega kT + \varphi_n) + A_{dc} \exp(-\beta_{dc} kT) + v(kT) \quad (5)$$

其中: N 为谐波的个数; A_n 为对应次数谐波的幅值; φ_n 为对应次数谐波的相位; $\omega = 2\pi f_0$ 为基波的角频率; T 为采样周期; $A_{dc} \exp(-\beta_{dc} kT)$ 为直流分量; v 为加性的高斯白噪声。

将上式中的直流分量用泰勒公式展开，取前面的两项，忽略后面的高阶项，则直流分量可以近似等于如下：

$$A_{dc} \exp(-\beta_{dc} kT) = A_{dc} - A_{dc} \beta_{dc} kT \quad (6)$$

把(7)式代入(6)式中得：

$$y(t) = \sum_{n=1}^N A_n \sin(n\omega kT + \varphi_n) + A_{dc} - A_{dc} \beta_{dc} kT + v(kT) \quad (7)$$

通过对(5)式做三角函数分解，令：

$$\begin{aligned} w_1(t) &= A_1 \cos \varphi_1 & w_2(t) &= A_1 \sin \varphi_1 \\ w_3(t) &= A_2 \cos \varphi_2 & w_4(t) &= A_2 \sin \varphi_2 \\ &\dots & & \\ w_{2N-1}(t) &= A_N \cos \varphi_N & w_{2N}(t) &= A_N \sin \varphi_N \end{aligned} \quad (8)$$

将这些状态变量写成矩阵的形式:

$$W = (w_1, w_2, \dots, w_{2N-1}, w_{2N})^T \quad (9)$$

对应的, 我们可以写出这些每个谐波的分量表达式如(12)所示:

$$\begin{aligned} x_1(t) &= \sin \omega k T & x_2(t) &= \cos \omega k T \\ x_3(t) &= \sin 2\omega k T & x_4(t) &= \cos 2\omega k T \\ &\dots & & \\ x_{2N-1}(t) &= \sin N\omega k T & x_{2N}(t) &= \cos N\omega k T \end{aligned} \quad (10)$$

将上述表达式写成矩阵形式:

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_{2N-1}, x_{2N})^T \quad (11)$$

考虑到直流分量, 我们将直流分量也分别代入的两个矩阵中去, 则矩阵 W 和 X 分别如下:

$$W = (w_1, w_2, \dots, w_{2N-1}, w_{2N}, w_{2N+1}, w_{2N+2})^T \quad (12)$$

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_{2N-1}, x_{2N}, A_{dc}, A_{dc}\beta_{dc})^T \quad (13)$$

因此我们可以将谐波表达式(5)写成如下的矩阵形式:

$$Y_k = W_k^T X_k + v_k = \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_{2N-1} \\ w_{2N} \\ w_{2N+1} \\ w_{2N+2} \end{pmatrix}_k^T \begin{pmatrix} \sin \omega k T \\ \cos \omega k T \\ \vdots \\ \sin N\omega k T \\ \cos N\omega k T \\ A_{dc} \\ A_{dc}\beta_{dc} \end{pmatrix} + v_k \quad (14)$$

3.2. PSO-RLS 算法

RLS 采用了在每时刻对所有已输入信号重估的平方误差和最小准则, 在最小均方算法(LMS)的基础上加入了指数加权因子 λ , 其值的范围为 $0 \ll \lambda \leq 1$ 。其特点是时间越久, 其数据信息对系数更新的贡献也越小[12]。用自适应最小二乘算法(RLS)来更新权重, 更新公式如下[13] [14]:

$$e_n = y_n - W_n^T X_n \quad (15)$$

$$K_n = \frac{P_{n-1} W_n}{\lambda + W_n^T P_{n-1} W_n} \quad (16)$$

$$P_n = \frac{1}{\lambda} [I - K_n W_n^T] P_{n-1} \quad (17)$$

$$W_n = W_{n-1} + K_n e_n \quad (18)$$

其中: K 为增益因子; λ 为遗忘因子; P 为误差协方差, $P_0 = (X_0 - X)(X_0 - X)^T$; I 为单位矩阵。

从(12)式中可以看出, W 中包含的 $2N + 2$ 个状态量即为这 N 个谐波信号的权值以及直流分量的权值, 也就是谐波信号的参量。我们可以计算出对应谐波的幅值和相角, 计算公式如下:

$$A_n = \sqrt{w_{2n-1}^2 + w_{2n}^2} \quad (19)$$

$$\varphi_n = \tan^{-1} \left(\frac{w_{2n}}{w_{2n-1}} \right) \quad (20)$$

$$A_{dc} = w_{2n+1} \quad (21)$$

$$\beta_{dc} = \frac{w_{2n+2}}{w_{2n+1}} \quad (22)$$

以上就是 RLS 的权重更新公式，接下来我们通过 PSO 算法来寻找出最优化的初始权值 W_0 。

PSO-RLS 算法的具体的步骤流程图如图 1。

4. 仿真分析

4.1. 性能指标

为了比较出每个算法的优劣，我们采用均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)来衡量估计值与理论值之间的偏差，以便评估每个算法的性能。性能指标——均方根误差公式由下式给出：

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [d(k) - y(k)]^2} \quad (23)$$

其中： $d(k)$ 为 k 时刻的期望信号， $y(k)$ 为 k 时刻的信号的估计值。性能指标函数计算从 $k = 1$ 的起始时刻到 $k = N$ 时刻的平方误差的平均值，表现出了整体的平均估计效果，在同等条件下，RMSE 的值越小，算法的估计效果更好。

4.2. 稳态信号的谐波估计

考虑形如(24)的含直流衰减的稳态信号：

$$y(t) = 1.5 \sin(2\pi f_1 t + 80^\circ) + 0.5 \sin(2\pi f_3 t + 60^\circ) + 0.2 \sin(2\pi f_5 t + 45^\circ) + 0.15 \sin(2\pi f_7 t + 36^\circ) + 0.1 \sin(2\pi f_{11} t + 30^\circ) + 0.5 \exp(-5t) + v(t) \quad (24)$$

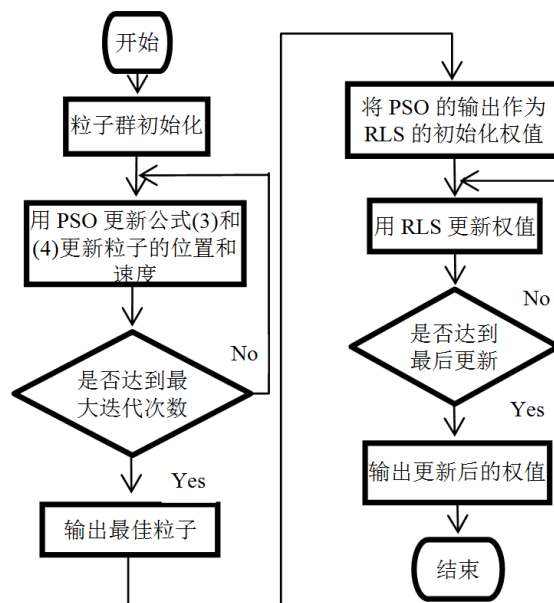


Figure 1. Flow chart of proposed PSO-RLS algorithm

图 1. PSO-RLS 算法流程图

其中: $f_1 = 50 \text{ Hz}$, $f_3 = 150 \text{ Hz}$, $f_5 = 250 \text{ Hz}$, $f_7 = 350 \text{ Hz}$, $f_{11} = 550 \text{ Hz}$, $v(t)$ 为高斯白噪声。

我们给出了信噪比为 10 dB 和 40 dB 的条件下本文提出的算法的谐波信号估计效果以及与 GA-RLS、VCLMS 算法在信噪比为 40 dB 的性能比较。

从图2和图3中我们可以看出随着信噪比的升高,算法的估计效果会变好。图4和图5分别是 PSO-RLS、GA-RLS、VCLMS 三种算法在信噪比为 40 dB 时对谐波幅值的估计误差和基波相位的估计误差比较图,从图中可以看出 PSO-RLS 的估计效果要优于其他两种算法。

表 1 为三种算法对静态谐波的幅值和相位误差估计及误差对比,从表中的数据可以看出,对于基波,实际的幅值和相位分别 1.5 p.u.和 80° , VCLMS、GA-RLS 和 PSO-RLS 的幅值及相位估计误差分别为 1.9967%、0.8267%、0.2467%和 0.8076° 、 0.6720° 、 0.5371° 。可见 PSO-RLS 对幅值和相位的估计误差都要小于其他两种方法。

4.3. 动态信号

实际上,在大多数情况下谐波信号是随时间变化的动态信号。一个给定的动态信号由式(25)给出:

$$y(t) = \{0.15 + a_1(t)\} \sin(\omega t + 65^\circ) + \{0.5 + a_3(t)\} \sin(3\omega t + 60^\circ) + \{0.25 + a_5(t)\} \sin(5\omega t + 42^\circ) \quad (25)$$

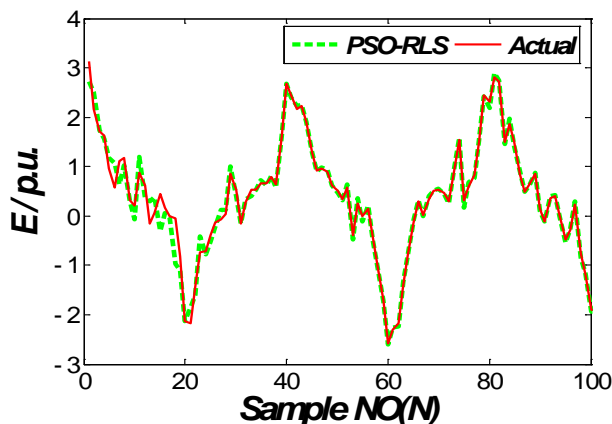


Figure 2. Actual vs. estimated output plot at 10 dB SNR
图 2. 在信噪比为 10 dB 下的实际曲线和估计曲线

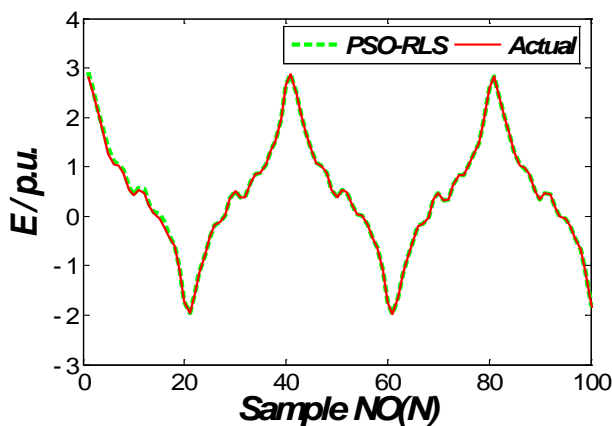


Figure 3. Actual vs. estimated output plot at 40 dB SNR
图 3. 在信噪比为 40 dB 下的实际曲线和估计曲线

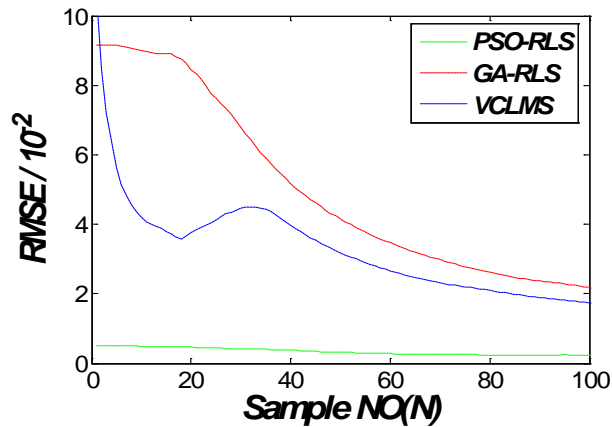


Figure 4. Amplitude RMSE plot at 40 dB SNR

图 4. 信噪比为 40dB 下幅值 RMSE 比较

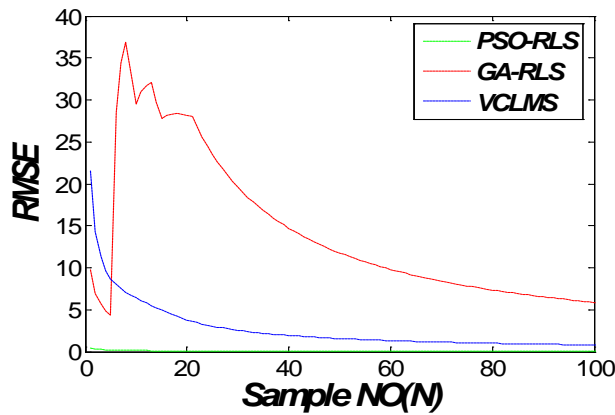


Figure 5. Phase RMSE plot at 40 dB SNR

图 5. 信噪比为 40 dB 下基波相位的 RMSE 比较

$$\begin{cases} a_1(t) = 0.15 \sin(2\pi f_1 t) + 0.05 \sin(2\pi f_5 t) \\ a_3(t) = 0.05 \sin(2\pi f_3 t) + 0.03 \sin(2\pi f_5 t) \\ a_5(t) = 0.03 \sin(2\pi f_1 t) + 0.005 \sin(2\pi f_5 t) \end{cases} \quad (26)$$

在给出的动态信号中，我们加入了三个不同的频率 f_1 、 f_3 、 f_5 ，他们分别为 3 Hz、2 Hz、7 Hz。从式中我们可以看出动态信号的幅值不是固定的，而是随着时间的变化而改变着的。

下面给出了 PSO-RLS 算法的谐波幅值估计图，如图 6；并在高斯噪声和非高斯噪声环境下用三种算法对谐波信号进行了仿真分析，结果如图 7~图 10 所示。

图 6 是 PSO-RLS 算法对动态信号的估计曲线和实际信号曲线的对比图；图 7~图 10 展示了两种不同噪声下的估计误差曲线图，图 7 和图 8 分别为高斯噪声下的幅值估计误差和基波相位误差；图 9 和图 10 分别为伽马噪声下的幅值估计误差和基波相位误差。从估计误差中我们可以看出不论是在高斯噪声还是在非高斯噪声下 PSO-RLS 的估计误差都要低于其他两种算法。

4.4. 动态子谐波和间谐波

4.4.1. 动态子谐波

在真正的的谐波信号中，不单单只有常规上的奇数次的谐波，还有小于基波频率的子谐波和非整数

Table 1. Performance of VCLMS, GA-RLS, PSO-RLS for harmonics parameter estimation
表 1. 三种算法的估计性能表

| 算法 | 参数 | 基波 | 三次谐波 | 五次谐波 | 七次谐波 | 十一次谐波 |
|---------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 实际值 | 频率(Hz) | 50 | 150 | 250 | 350 | 550 |
| | 幅值(p.u.) | 1.5 | 0.5 | 0.2 | 0.15 | 0.1 |
| | 相位(°) | 80 | 60 | 45 | 36 | 30 |
| VCLMS | 幅值(p.u.) | 1.4705 | 0.5048 | 0.1796 | 0.1329 | 0.0930 |
| | 误差(%) | 1.9667 | 0.9600 | 10.2000 | 11.4000 | 7.0000 |
| | 相位 | 80.8076 | 61.4135 | 43.6830 | 33.2560 | 27.7366 |
| GA-RLS | 误差(°) | 0.8076 | 1.4135 | 1.317 | 2.744 | 2.2634 |
| | 幅值(p.u.) | 1.4876 | 0.4852 | 0.1823 | 0.1569 | 0.0943 |
| | 误差(%) | 0.8267 | 2.9600 | 8.8500 | 4.6000 | 5.7000 |
| PSO-RLS | 相位 | 79.3280 | 61.2374 | 47.0352 | 34.3547 | 26.7385 |
| | 误差(°) | 0.6720 | 1.2374 | 2.0352 | 1.6453 | 3.2615 |
| | 幅值(p.u.) | 1.4963 | 0.5017 | 0.1991 | 0.1496 | 0.1017 |
| PSO-RLS | 误差(%) | 0.2467 | 0.3400 | 0.4500 | 0.2667 | 1.7000 |
| | 相位 | 80.5371 | 59.3401 | 46.0502 | 37.8950 | 31.7283 |
| | 误差(°) | 0.5371 | 0.6599 | 1.0502 | 1.895 | 1.7283 |

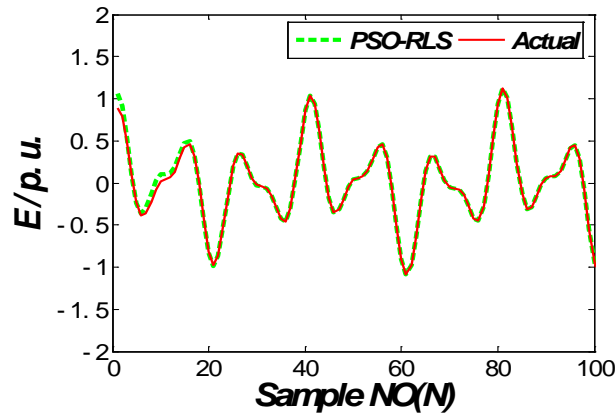


Figure 6. Actual vs. estimated output plot
图 6. 动态谐波实际曲线和估计曲线

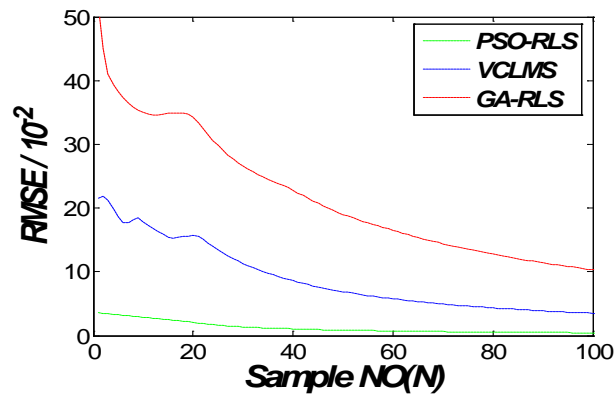


Figure 7. Amplitude RMSE plot at Gaussian noise
图 7. 高斯噪声下的幅值估计的 RMSE 比较

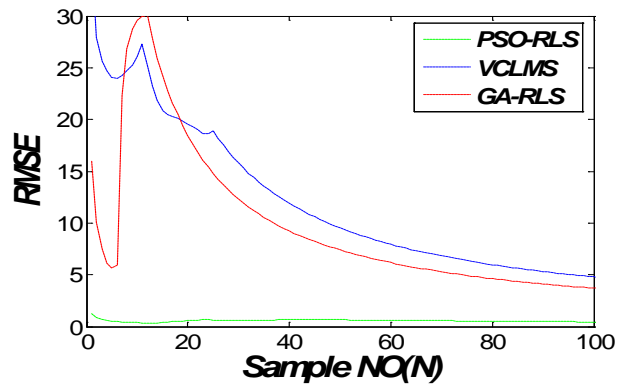


Figure 8. Phase RMSE plot at Gaussian noise
图 8. 高斯噪声下的基波的相位 RMSE 比较

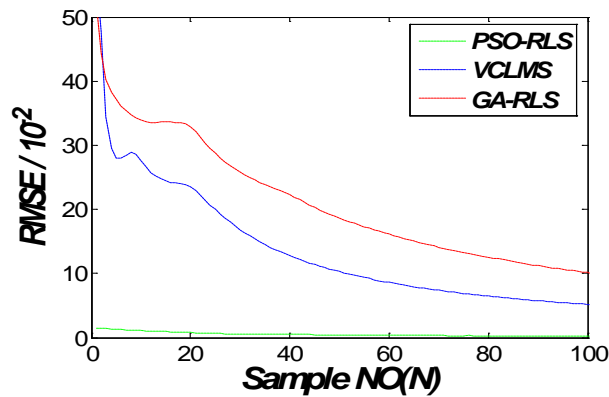


Figure 9. Amplitude RMSE plot at Gamma noise
图 9. 伽马噪声下的幅值估计的 RMSE 比较

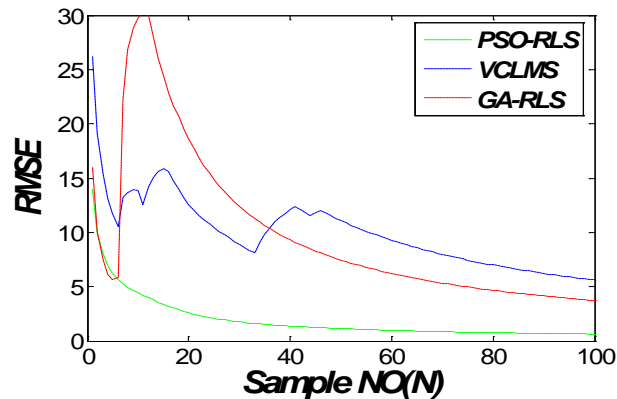


Figure 10. Phase RMSE plot at Gamma noise
图 10. 伽马噪声下的基波相位估计的 RMSE 比较

倍的间谐波。为了测试我们的算法，我们给定如下的子谐波信号，其谐波频率 $f = 30$ HZ，并在其中加入均值为零，信噪比为 40 dB 的高斯白噪声。并用三种算法对其进行仿真分析，仿真结果如图 11~图 13。

$$y(t) = \{0.75 + a_5(t)\} \sin(2\pi ft + 45^\circ) + v(t) \quad (27)$$

$$a_5(t) = 0.03 \sin(2\pi f_1 t) + 0.005 \sin(2\pi f_5 t) \quad (28)$$

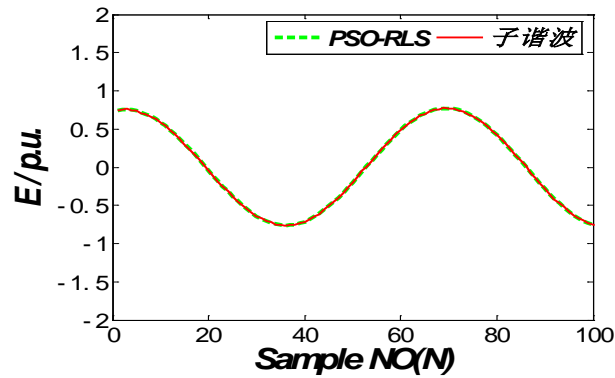


Figure 11. Dynamic sub harmonic ($f = 30\text{Hz}$) signal vs. estimated output plot

图 11. 动态子谐波 ($f = 30\text{ Hz}$) 和估计曲线

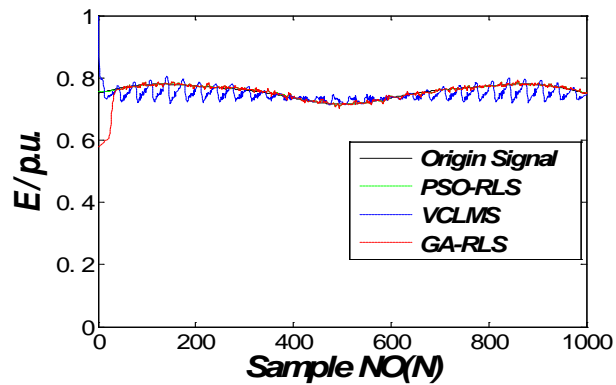


Figure 12. Estimated amplitude plot of dynamic sub harmonic ($f = 30\text{Hz}$) signal

图 12. 动态子谐波 ($f = 30\text{ Hz}$) 的幅值跟踪图

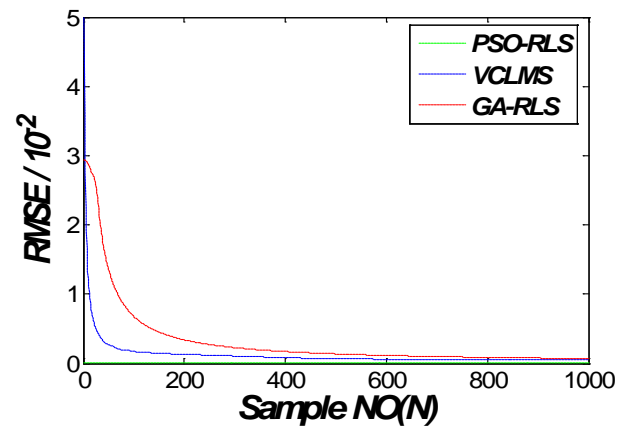


Figure 13. Amplitude RMSE plot of dynamic sub harmonic ($f = 30\text{ Hz}$) signal

图 13. 动态子谐波 ($f = 30\text{ Hz}$) 的幅值估计 RMSE 比较

其中: $f_1 = 3\text{ Hz}$, $f_5 = 7\text{ Hz}$ 。

图 11~图 13 为动态子谐波的仿真图,图 11 是 PSO-RLS 对动态子谐波的估计曲线和实际曲线对比图;图 12 是三种算法对动态子谐波的幅值跟踪图;图 13 是三种算法的幅值估计误差图,可以看出,对于子

谐波在三种算法中 PSO-RLS 具有最小的估计误差。可见对于动态子谐波 PSO-RLS 算法要优于其他的两种算法。

4.4.2. 动态间谐波

本节测试本文所提出算法对间谐波的估计性能。其动态间谐波波形如式(29)，间谐波频率 $f = 190$ HZ，并在其中加入均值为零，信噪比为 40 dB 的高斯白噪声。用三种算法对其进行仿真分析，仿真结果如图 14~图 16。

$$y(t) = \{1.15 + a_1(t)\} \sin(2\pi ft + 75^\circ) + v(t) \tag{29}$$

$$a_1(t) = 0.15 \sin(2\pi f_1 t) + 0.05 \sin(2\pi f_5 t) \tag{30}$$

其中： $f_1 = 3$ HZ, $f_5 = 7$ HZ。

图 14 是 PSO-RLS 对动态间谐波的估计曲线和实际曲线对比图；图 15 是三种算法对动态子谐波的幅值跟踪图；图 16 是三种算法的幅值估计误差图，可以看出，对于间谐波 PSO-RLS 同样具有最小的估计

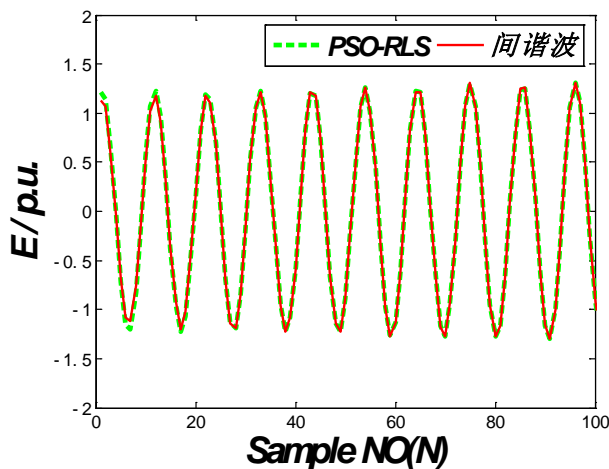


Figure 14. Dynamic inter harmonic ($f = 190$ Hz) signal vs. estimated output plot

图 14. 动态间谐波($f = 190$ HZ)和估计曲线

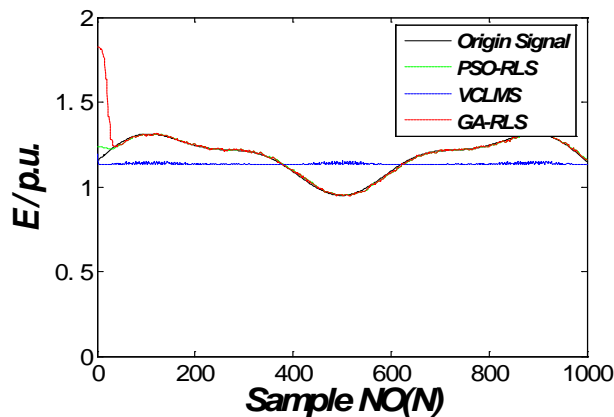


Figure 15. Estimated amplitude plot of dynamic inter harmonic ($f = 190$ Hz) signal

图 15. 动态间谐波($f = 190$ HZ)的幅值跟踪图

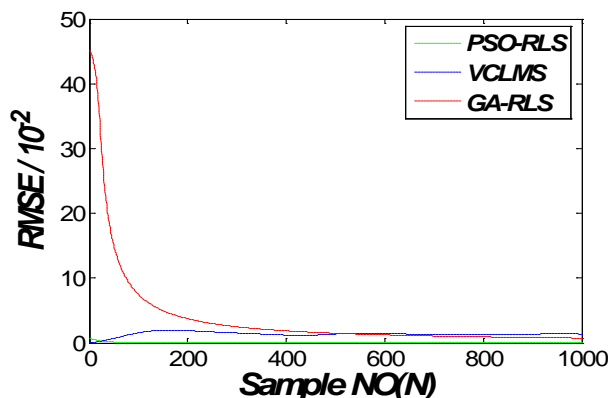


Figure 16. Amplitude RMSE plot of dynamic inter harmonic (f = 190 Hz) signal

图 16. 动态间谐波(f = 190 HZ)的幅值估计 RMSE 比较

误差。可见对于动态间谐波 PSO-RLS 算法也要优于其他的两种算法。

5. 结论

针对自适应最小二乘(RLS)算法在谐波估计时对初始权重敏感的问题,本文提出了基于粒子群优化自适应最小二乘法的谐波估计方法。分别对稳态和动态谐波以及子谐波和间谐波进行仿真分析并与其它两种方法比较。从对比中可以看出,不论是静态或动态或者在不同的噪声下 PSO-RLS 对谐波的估计误差都是三者中最小的,所提出的方法在总体的估计性能上要优于其他两种方法。

基金项目

国家自然科学基金资助(编号 51477104); 深圳市基础研究计划资助(编号 JCYJ20140418193546100、JCYJ20150525092941041)。

参考文献 (References)

- [1] 牛胜锁, 张达, 梁志瑞, 霍晓娣. 基于抗差总体最小二乘法的电力系统谐波状态估计[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 28(4): 68-72.
- [2] Zhu, T.X. (2007) Exact Harmonics/Interharmonics Calculation Using Adaptive Window Width. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **22**, 2279-2288. <http://dx.doi.org/10.1109/TPWRD.2007.899526>
- [3] 张静, 徐政. 基于卡尔曼误差的电能质量扰动检测[J]. 电力系统及自动化学报, 2006, 18(5): 25-30.
- [4] 耿妍, 张瑞金. 自适应滤波算法综述[J]. 信息与电子工程, 2008, 6(4): 315-320.
- [5] Bettayeb, M. and Qidwai, U. (2003) A Hybrid Least Squares GA Based Algorithm for Harmonic Estimation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **18**, 377-382. <http://dx.doi.org/10.1109/TPWRD.2002.807458>
- [6] Lu, Z., Ji, T.Y., Tang, W.H. and Wu, Q.H. (2008) Optimalharmonic Estimation Using a Particleswarm Optimizer. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **23**, 1166-1174. <http://dx.doi.org/10.1109/TPWRD.2008.917656>
- [7] Mishra, S. (2005) A Hybrid Least Square-Fuzzy Bacterial Foraging Strategy for Harmonic Estimation. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, **16**, 61-73. <http://dx.doi.org/10.1109/TEVC.2004.840144>
- [8] Ray, P.K. and Subudhi, B. (2012) BFO Optimized RLS Algorithm for Power System Harmonics Estimation. *Applied Soft Computing*, **12**, 1965-1977. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asoc.2012.03.008>
- [9] Singh, S. K., Sinha, N., Goswami, A.K. and Sinha, N. (2016) Robust Estimation of Power System Harmonics Using a Hybrid Firefly Based Recursive Least Square Algorithm. *Electrical Power and Energy Systems*, **80**, 287-296. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijepes.2016.01.046>
- [10] Kennedy, J. and Eberhart, R. (1995) Particle Swarm Optimization. *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*, **4**, 1942-1948.

-
- [11] 付丽华, 边家文, 李志明, 等, 著. 谐波信号分析与处理[M]. 武汉: 中国地质大学出版社有限责任公司, 2013.
- [12] Paulo S.R. Diniz, 著. 自适应滤波算法与实现[M]. 第四版. 刘郁林, 等, 译. 北京: 电子工业出版社, 2014.
- [13] 刘国海, 吕汉闻, 刘颖, 陈兆岭, 刘慧. 基于改进 RLS 算法的谐波电流检测方法[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(10): 46-49.
- [14] Bettayeb, M. and Qidwai. U. (1998) Recursive Estimation of Power System Harmonics. *Electric Power Systems Research*, **47**, 143-152. [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7796\(98\)00063-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7796(98)00063-7)

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>