

基于 CPSO-RLS 的电力系统谐波估计融合算法

易谷¹, 王清蓉²

(1. 重庆工业职业技术学院自动化系, 重庆 401120; 2. 重庆大学自动化学院, 重庆 400044)

摘要: 针对非线性动态负载引起的谐波检测难的问题, 提出了一种新的估计电力系统谐波的算法。该算法首先利用混沌粒子群算法(CPSO)的全局搜索性, 对未知参数进行优化估计, 然后将CPSO算法优化的值作为RLS算法模型的初始权值; 最后借助RLS算法进行谐波的有效提取。通过实验仿真, 与CPSO算法相比, 谐波振幅估计精度最大提高7%, 相角估计精度最大提高1.24%。仿真结果表明, 该算法在保证收敛速度的同时具有更高的估计精度。

关键词: 电力系统; 谐波估计; CPSO; RLS; 融合算法

Fusion algorithm of harmonic estimation based on CPSO-RLS for power system

YI Gu¹, WANG Qing-rong²

(1. Department of Automation, Chongqing Industry Polytechnic College, Chongqing 401120, China;

2. College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Aiming at the difficulty in estimation of harmonics caused by nonlinear dynamic loads, this paper proposes a new method of harmonic estimation. First the algorithm utilizes the global searching capability of the CPSO to optimize the unknown parameters, then the optimized output of CPSO is taken as the initial values of weights for RLS algorithm, and finally the weights are updated using the steps of RLS algorithm. Through the experiment simulation, compared with CPSO algorithm, the maximum estimation accuracy of harmonic amplitude and phase is enhanced about 7% and 1.24% respectively. The simulation results show that the proposed algorithm can ensure convergence speed, and has higher estimation precision.

中图分类号: TM714

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2014)12-0025-05

0 引言

随着电力电子元器件的大量使用以及非线性负载的日益增多, 电力系统的谐波成分也增多, 谐波污染严重影响电力系统的正常运行以及电能的质量。因此谐波的精确检测与分析具有十分重要的工程实际意义^[1-2]。

常用的谐波分析方法有快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)^[3-4]、离散傅里叶变换(Discrete Fourier Transform, DFT)、小波变换(Wavelet Transform, WT)^[5]等, 其计算精度较高, 但均或多或少地存在频谱泄露和栅栏效应, 易受直流元件和噪声的影响, 遗传算法(Generation Algorithm, GA)^[6]、粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)^[7]等人工智能类算法, 由于其对噪声不敏感, 已经被用于电力系统谐波估计, 但其精度不高, 本文在其基础上, 先用CPSO算法估计谐波信号, 然后引入RLS算法使估计值更加趋近于

实际值。

1 谐波估计模型及混沌粒子群算法

1.1 电力系统谐波估计模型

假设基波角频率 ω 已知, 各谐波幅值和相位未知的某电压或电流信号模型为

$$y(t) = A_0 e^{-\lambda t} + \sum_{n=1}^N A_n \sin(\omega_n t + \varphi_n) + u(t) \quad (1)$$

式中: N 为谐波的个数; $\omega_n = 2\pi n f_0$, f_0 为基波频率, 文中为50 Hz; A_n 、 ω_n 、 φ_n 分别为第 n 次谐波的幅值、角频率、相位; $u(t)$ 为高斯白噪声。

式(1)的离散形式表示如下:

$$y(k) = A_0 - \lambda k T_s + \sum_{n=1}^N [A_n \sin(\omega_n k T_s) \cos(\varphi_n) + A_n \cos(\omega_n k T_s) \sin(\varphi_n)] + u(k) \quad (2)$$

借助离散电力系统信号模型式(2), 可估计电力系统谐波的幅值和相位。

1.2 混沌粒子群算法

为了加强搜索能力,可将混沌运动融入 PSO 算法中,第 i 个粒子 j 维搜索空间的位置和速度更新式为

$$V_{ij}^{k+1} = wV_{ij}^k + c_1r_1(P_{ij} - X_{ij}^k) + c_2r_2(P_{gj} - X_{ij}^k) \quad (3)$$

$$X_{ij}^{k+1} = X_{ij}^k + V_{ij}^{k+1}, \quad X_{ij}^{k+1} = \begin{cases} x_{\max}, x_{ij}^{k+1} > x_{\max} \\ -x_{\max}, x_{ij}^{k+1} < -x_{\max} \end{cases} \quad (4)$$

其中: V_{ij}^k 和 X_{ij}^k 为第 k 次迭代粒子 i 的第 j 维的速度和位置; P_{ij} 和 P_{gj} 分别为粒子 i 和群体的第 j 维的最优位置; c_1 和 c_2 为加速因子, r_1 和 r_2 为随机数,取值范围为 $[0,1]$ 。惯性权重 w 一般在 $0.1 \sim 0.9$ 之间取值;本文采用文献[8]中的权值更新公式确定权值。

$$w^k = (w_i - w_f) \left(\frac{I - k}{I} \right) + w_f \quad (5)$$

其中: k 为迭代次数; w_i 和 w_f 分别表示最初和最终的权值。

CPSO 算法利用具有遍历性和伪随机性的混沌序列代替随机序列以实现全局优化。文献[9]比较了几种常见的混沌映射图,相对于其他几种混沌映射,改进的 Logistic 映射混沌搜索更快,因此本文采用改进的 Logistic 映射产生混沌运动,其方程为

$$x^{(n+1)} = 1 - r(x^{(n)})^2 \quad (6)$$

其中: $0 < r < 2$; $x^{(n)} \in (-1,1)$ 。混沌局部搜索 (CLS) 步骤如下:

①确定最大混沌搜索步数 $C_{\max} = 25$; 设定优化区间 $(x_{\min i}, x_{\max i})$, 随机初始化 m 个混沌变量 $x_i \in (-1,1)$, $i=1,2,3,\dots,m$; $X_{\text{best}} = X_g$, $f_{\text{best}} = f_g$; ②根据式 (6) 确定混沌变量的下一次迭代; ④将混沌变量映射到优化区间 $(x_{\min i}, x_{\max i})$ 并确定优化变量

$$x_i^{(n+1)} = \frac{x_{\max i} + x_{\min i}}{2} + \frac{x_{\max i} - x_{\min i}}{2} x_i^n \quad (7)$$

④计算适应度值 f_{n+1} , 若 $f_{n+1} < f_{\text{best}}$, 则 $X_{\text{best}} = X_{n+1}$, $f_{\text{best}} = f_{n+1}$; ⑤若达到迭代上限,则退出该算法,否则转②。

2 CPSO-RLS 融合算法及其在谐波估计中的应用

图 1 是 CPSO-RLS 融合估计的算法结构图。其中,未知参数为未初始化前的权值向量。

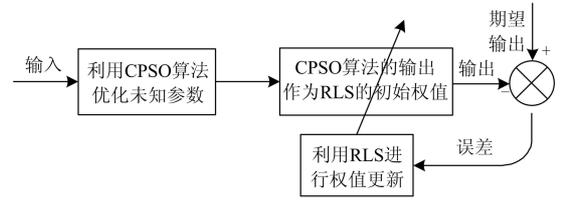


图 1 CPSO-RLS 估计算法结构

Fig. 1 Structure of CPSO-RLS estimation algorithm

为方便起见,将式 (2) 转换为如式 (8) 的矢量形式。

$$y(k) = W(k)x(k) \quad (8)$$

其中

$$x(k) = [\sin(\omega_1 k T_s), \cos(\omega_1 k T_s), \dots, \sin(\omega_N k T_s), \cos(\omega_N k T_s), 1, -k T_s]^T$$

$$W = [A_1 \cos(\varphi_1), A_1 \sin(\varphi_1), \dots, A_n \cos(\varphi_n), A_n \sin(\varphi_n), A_0, A_0 \lambda]^T$$

未知参数的矢量更新形式表示为

$$W(k) = [W_1(k), W_2(k), \dots, W_{2N-1}(k), W_{2N}(k), W_{2N+1}(k), W_{2N+2}(k)]^T \quad (9)$$

由递推最小二乘公式可得最终更新的参数向量,基波与谐波的幅值和相位可由式 (10)~式 (13) 求得。

$$A_n = \sqrt{W_{2n}^2 + W_{2n-1}^2} \quad (10)$$

$$\varphi_n = \tan^{-1} \left(\frac{W_{2n}}{W_{2n-1}} \right) \quad (11)$$

$$\lambda = W_{2n+1} \quad (12)$$

$$A_0 = \frac{W_{2n+2}}{W_{2n+1}} \quad (13)$$

谐波估计的目标函数为均方误差函数为

$$J = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y}_i)^2}{N} \quad (14)$$

其中: y_i 为第 i 次采样的测量值; \bar{y}_i 为第 i 次采样的估计值。

采用 CPSO-RLS 融合算法对谐波信号进行估计的步骤如下:

①对谐波信号进行采样,采样频率 $f_s = 1620$ Hz;

②确定混沌粒子群规模,即粒子的个数 N 和维数 D 。③随机初始化粒子位置 X_i 和速度 V_i ,且要满足 $X_i \in [-X_{\max}, X_{\max}]$; ④根据式 (14) 计算粒子适应度,初始化 $P_i = X_i$,取最小适应度对应的全局极值为 P_g ; ⑤按式 (3)、式 (4) 更新粒子速度和位置,按式 (5) 更新权重 w ,重新计算粒子的适应度,并更新 P_i 和 P_g ; ⑥利用 CLS 算法对最优的 20% 粒子进行混沌搜索,比较搜索所得的粒子适

应度 f_{cls} 与 f_g , 若 $f_{cls} < f_g$, 则将 f_g 对应的粒子由 f_{cls} 对应的粒子取代; ⑦ 判断是否满足终止条件, 满足则转至步骤⑨; 若不满足则进行下一步; ⑧ 减小混沌搜索空间, 并建立新的粒子群 (以最优的 $N/5$ 粒子 + $4N/5$ 的随机粒子), 转至⑤; ⑨ 输出最优位置 P_g , 并将其作为 RLS 的初始权值, 按式 (10) 与式 (11) 分别计算各次谐波的幅值和相位。具体的算法流程图如图 2 所示。

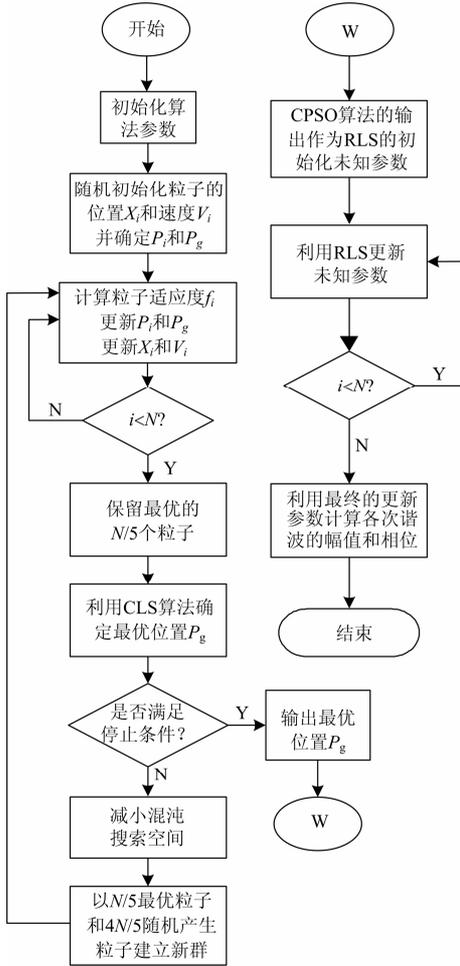


图 2 CPSO-RLS 算法流程图

Fig. 2 Flowchart of CPSO-RLS algorithm

3 仿真与验证

考虑电力系统信号的随机噪声和直流衰减成分, 采用文献[10]中的验证模型, 其具体表达式为

$$y(t) = 1.5 \sin(\omega t + 80^\circ) + 0.5 \sin(3\omega t + 60^\circ) + 0.2 \sin(5\omega t + 45^\circ) + 0.15 \sin(7\omega t + 36^\circ) + 0.1 \sin(11\omega t + 30^\circ) + 0.5 e^{-5t} + u(t) \quad (15)$$

其中, 本文选取 $u(t) = 0.01 \text{rand}(t)$ 为零均值白噪声信号干扰, 基于 Matlab 仿真实验平台, 选取种群规模

$N = 50$; 加速因子 c_1 和 c_2 均选取为 2; 最初权值 w_i 取 0.9, 最终的权值 w_j 取 0.4, 按式 (5) 迭代计算; 最大迭代次数 I 取 200; 图 3 是 CPSO 和 CPSO-RLS 算法在 40 dB 情况下的收敛性比较。

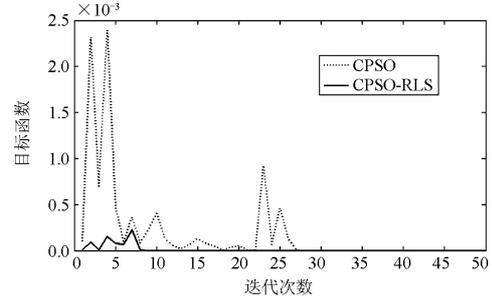


图 3 CPSO 和 CPSO-RLS 算法的收敛性比较

Fig. 3 Convergence comparison between CPSO and CPSO-RLS

从图 3 可以看出, CPSO-RLS 算法的收敛性能明显优于 CPSO。图 4(a)、4(b)、4(c)分别为 CPSO 算法在信噪比为 40 dB、20 dB、10 dB 情况下的估计值与实际值的仿真结果图。

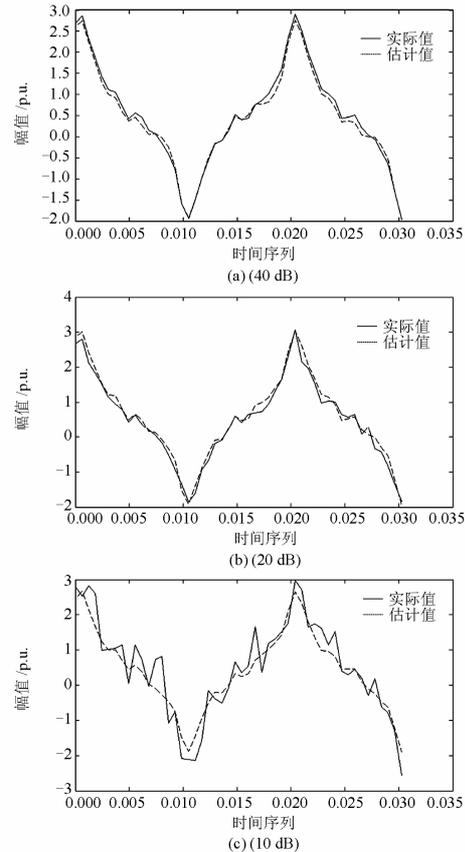


图 4 CPSO 算法估计信号与实际信号的对比图

Fig. 4 Actual vs. estimated signal using CPSO

图 5 中的 5(a)、5(b)、5(c)分别为 CPSO-RLS 算法在信噪比为 40 dB、20 dB、10 dB 的情况下的估计值与实际值的仿真结果图。

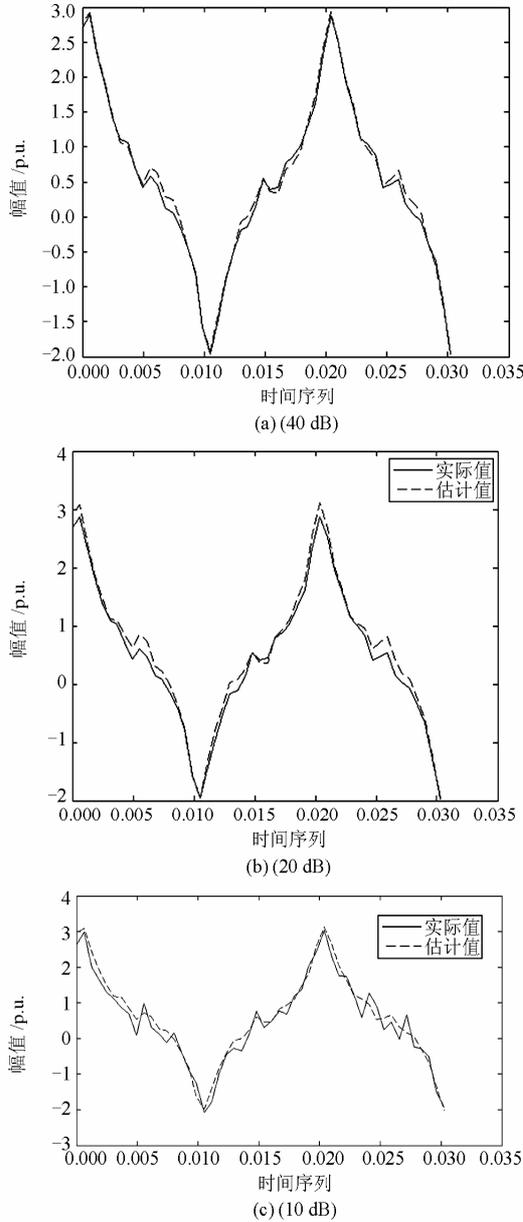


图 5 CPSO-RLS 算法估计与实际信号的对比图
Fig. 5 Actual vs. estimated signal using CPSO-RLS

从图 4、图 5 可知，在存在随机噪声和直流偏移的情况下，当信噪比为 40 dB 时，CPSO 算法和 CPSO-RLS 算法的估计值均很接近实际值，但随着信噪比的降低，估计值的偏离越来越大，说明信噪比变低，谐波估计精度会降低，但在同一噪声比情况下，本文算法的估计效果明显优于 CPSO 算法。表 1 和表 2 对比了两种算法的仿真结果。

表 1 谐波幅值估计的对比评估

Table 1 Comparison of harmonic estimation of amplitude

方法	实际值		CPSO		CPSO-RLS	
参数	A/V	A/V	偏差/%	A/V	偏差/%	
基波	1.5	1.477 3	1.5	1.495 6	0.29	
3次谐波	0.5	0.478 5	4.3	0.488 6	2.2	
5次谐波	0.2	0.178 0	2.2	0.251 8	2.5	
7次谐波	0.15	0.140 4	6.4	0.142 6	4.9	
11次谐波	0.1	0.090 5	9.5	0.097 5	2.5	

表 2 谐波相位估计的对比评估

Table 2 Comparison of harmonic estimation of phase

方法	实际值		CPSO		CPSO-RLS	
参数	$\phi /(^{\circ})$	$\phi /(^{\circ})$	偏差/%	$\phi /(^{\circ})$	偏差/%	
基波	80	79.827 5	0.17	80.132 9	0.13	
3次谐波	60	63.292 2	3.29	62.206 0	2.2	
5次谐波	45	44.289 7	0.71	46.517 7	1.5	
7次谐波	36	33.051 3	2.94	34.332 9	1.66	
11次谐波	30	30.312 3	0.31	29.469 4	0.53	

从表 1、表 2 可知，所提算法对 7 次谐波的幅值估计偏差为 4.9%，是估计参数中的最大振幅偏差，最大相角差为估计 3 次谐波时的 2.2°。与 CPSO 算法相比，谐波振幅估计精度最大提高 7%，相角估计精度最大提高 1.24%。

综合前面的分析，CPSO-RLS 算法的收敛速度提高程度较多，收敛精度提高较多，保留着 CPSO 算法的避免陷入局部最优的能力。

4 结论

本文所提算法与 CPSO 算法相比，估计的精度更高，将该方法用于电力系统谐波估计，全局寻优能力强，收敛速度快，估计幅值、相位精度高；归纳出的 CPSO-RLS 算法的优化性能对实际应用问题有一定的借鉴作用；为使估计精度进一步趋于理论最优值，可从寻找更好的低信噪比条件下的估计方法方面展开研究。

参考文献

- [1] 梁志瑞, 叶慧强, 赵飞. 电力系统谐波状态估计研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(15): 157-159.
LIANG Zhi-rui, YE Hui-qiang, ZHAO Fei. Overview on

- power system harmonic state estimation[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(15): 157-159.
- [2] 宁志毫, 罗隆福, 李勇, 等. 大功率整流系统谐波功率特性及其对电能计量的影响和节能分析[J]. 电工技术学报, 2012, 27(11): 248-255.
NING Zhi-hao, LUO Long-fu, LI Yong, et al. Analysis of energy saving and harmonic power characteristics and its effects on electric energy measurement in high power rectifier system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(11): 248-255.
- [3] 王刘旺, 黄建才, 孙建新, 等. 基于加汉宁窗的 FFT 高精度谐波检测改进算法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(24): 28-33.
WANG Liu-wang, HUANG Jian-cai, SUN Jian-xin, et al. An improved precise algorithm for harmonic analysis based on hanning-windowed FFT[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(24): 28-33.
- [4] 曾博, 滕召胜, 高云鹏, 等. 基于 Rife-Vincent 窗的高准确度电力谐波相量计算方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(8): 154-159.
ZENG Bo, TENG Zhao-sheng, GAO Yun-peng, et al. An accurate approach for power harmonic phasor calculation based on rife-vincent window[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(8): 154-159.
- [5] 曾瑞江, 杨震斌, 柳慧超. 基于小波变换的电力系统谐波检测方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(15): 35-39.
ZENG Rui-jiang, YANG Zhen-bin, LIU Hui-chao. A method of power system harmonic detection based on wavelet transform[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(15): 35-39.
- [6] 徐斌, 姚纓英. 自适应对偶种群遗传算法及其在电磁场优化设计中的应用[J]. 电工技术学报, 2013, 28(3): 183-187.
XU Bin, YAO Ying-ying. Adaptive dual-subpopulation genetic algorithm and its application for electromagnetic devices optimization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(3): 183-187.
- [7] RABELO R, LEMOS M, BARBOSA D. Power system harmonics estimation using particle swarm optimization[C] // IEEE World Congress on Computational Intelligence, 2012: 1-6.
- [8] AL-OTHMAN A, ABDELHAMID T. Elimination of harmonics in multilevel inverters with non-equal dc sources using PSO[J]. Energy Conversion and Management, 2009, 50(3): 756-764.
- [9] HE Yao-yao, ZHOU Jian-zhong, XIANG Xiu-qiao, et al. Comparison of different chaotic maps in particle swarm optimization algorithm for long-term cascaded hydroelectric system scheduling[J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2009, 42(5): 3169-3176.
- [10] DASH P, SWAIN D, ROUTRAY A, et al. Harmonic estimation in a power system using adaptive perceptrons[J]. IEE Proc-Gener, Transm, and Distrib, 1996, 143(6): 565-574.

收稿日期: 2013-09-11; 修回日期: 2013-10-21

作者简介:

易谷 (1962-), 男, 博士, 教授级高级工程师, 从事机电设备自动控制系统等方面的研究; E-mail: 853760343@qq.com

王清蓉 (1989-), 女, 硕士研究生, 从事电力系统保护与控制方面的研究。