

基于线性约束最小均方的谐波检测算法

李裕杰¹, 赵庆生¹, 王旭平¹, 郭尊²

(1. 太原理工大学电力系统运行与控制山西省重点实验室, 山西 太原 030024;
2. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要: 最小均方(Least Mean Square, LMS)算法因其计算复杂度低、稳定性好的特点已广泛应用于谐波检测领域中。但为了避免权重偏移, 进一步提高收敛速度, 提出了一种基于线性约束最小均方(Linearly Constrained Least Mean Square, LCLMS)的谐波检测算法。该算法在 LMS 算法的基础上, 对权重变量加入了一个线性约束条件, 并应用于不同高斯白噪声环境下谐波、间谐波信号的幅值和相角参数评估。最后又在稳态信号、动态信号和电弧炉算例下检验了该算法的可行性。实验结果表明, 该算法可以快速准确地检测不同环境下谐波的相关信息, 且相比 LMS 算法有较快的收敛速度和较高的抗干扰能力。

关键词: 最小均方; 谐波检测; 权重偏移; 线性约束最小均方; 线性约束

A harmonic detection algorithm based on linearly constrained least mean square

LI Yujie¹, ZHAO Qingsheng¹, WANG Xuping¹, GUO Zun²

(1. Shanxi Key Laboratory of Power System Operation and Control, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: In order to avoid weight offset and improve the convergence speed, this paper presents the harmonic detection algorithm based on linearly constrained least mean square, although the least mean square algorithm has been widely used in the field of harmonic detection because of its low computational complexity and good stability. New algorithm adds a linear constraint condition of the weight variable. The amplitude and phase of a power signal containing harmonics and inter-harmonics are estimated using this algorithm in the presence of white Gaussian noise under simulating environment. Finally, the algorithm is tested under the steady-state signal, the dynamic signal and the arc furnace model. According to experimental results, this algorithm can detect the information of harmonics quickly and accurately in different environments, and it has faster convergence speed and higher anti-interference ability compared with the LMS algorithm.

This work is supported by National Natural Science Foundation for Young Scholars (No. 51505317) and Natural Science Foundation of Shanxi Province (No. 201601D102039).

Key words: least mean square; harmonic detection; weight offset; linearly constrained least mean square; linear constraint

0 引言

由于电力系统中非线性负荷和电力电子器件的增多, 使得电网中电压电流的理想正弦波形遭到破坏, 从而降低了用户侧的用电质量, 其中又以谐波污染^[1-2]问题为主。

为了有效治理谐波污染, 相继提出了一系列谐

波检测算法。目前主要有: 快速傅里叶变换法^[3-5]、神经网络法^[6-7]、瞬时无功功率法^[8]、小波变换法^[9-10]等。这些方法在一定程度上促进了谐波检测技术的进步, 但它们共有的检测系统开环的缺点使其在实际应用中受到了限制。

由于自适应滤波^[11-12]方法是闭环系统, 可根据电网变化自动改变滤波器参数, 具有自适应学习能力, 且对单相和三相系统均适应, 因此该方法得到了众多研究者的关注。美国斯坦福大学的 Widrow 和 Hoff 提出的定步长 LMS(Least Mean Square)法^[13]

公式简单, 参数少, 易于实现, 成为了自适应滤波的标准算法, 但它又难以兼顾算法要求的收敛速度和检测精度。

因此本文引入了基于线性约束最小均方(LCLMS)的谐波检测方法。通过使用变量约束调整技术, 对权重变量增加一个线性约束条件, 在提高检测精度的同时避免了滤波器权重系数的偏移, 从而加快收敛速度。最后, 将该方法应用于仿真证实其有效性。

1 线性约束最小均方算法

用最速下降法^[14]、牛顿法^[15]和最小均方法等在求解最小均方误差的维纳滤波^[16]问题时都没有考虑约束条件, 然而在一些应用中解决优化问题时必须考虑约束。因此有了基于线性约束的最小均方算法。

用 x_n 表示带高斯白噪声^[17]的输入信号, w_n 表示滤波器的权重系数, 则滤波器的输出信号表示为

$$y_n = w_n^T x_n \quad (1)$$

误差信号 e_n 由期望信号 d_n 与滤波器的输出信号 y_n 之差表示。

$$e_n = d_n - w_n^T x_n \quad (2)$$

为了防止权重偏移, 给误差函数加线性约束条件, 如式(3)。

$$\mathbf{c}^T \mathbf{w} = \mathbf{a} \quad (3)$$

式中: \mathbf{a} 是一个常数; \mathbf{c} 是一个固定向量。

根据 Lagrange 乘数法, 可以得到目标函数:

$$J_c = E\{e_n^2\} + \lambda(\mathbf{c}^T \mathbf{w} - \mathbf{a}) \quad (4)$$

式中, λ 是拉格朗日乘子。

因此要求得最优解需同时满足式(5)和式(6)。

$$\nabla_w J_c = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial J_c}{\partial \lambda} = 0 \quad (6)$$

用式(2)替换式(4)中的误差信号 e_n , 得

$$J_c = J_{\min} + \xi^T R_X \xi + \lambda(\mathbf{c}^T \xi - \mathbf{a}') \quad (7)$$

其中:

$$\xi_n = w_n - w^0 \quad (8)$$

$$w^0 = R_X^{-1} P_{dx} \quad (9)$$

$$R_X = E\{x_n x_n^T\} \quad (10)$$

$$P_{dx} = E\{d_n x_n\} \quad (11)$$

$$\mathbf{a}' = \mathbf{a} - \mathbf{c}^T w^0 \quad (12)$$

现在求式(7)的最优解需满足:

$$\nabla_{\xi} J_c = 0 \quad (13)$$

$$\frac{\partial J_c}{\partial \lambda} = 0 \quad (14)$$

根据式(7), 得

$$\nabla_{\xi} J_c = \begin{pmatrix} \frac{\partial J_c}{\partial \xi_1} \\ \vdots \\ \frac{\partial J_c}{\partial \xi_M} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2\xi_1 r_1 + 2\xi_2 r_2 + \cdots + 2\xi_M r_M \\ \vdots \\ 2\xi_1 r_M + 2\xi_2 r_{M-1} + \cdots + 2\xi_M r_1 \end{pmatrix} + \lambda \begin{pmatrix} c_1 \\ \vdots \\ c_M \end{pmatrix} = 0 \quad (15)$$

写成矩阵形式为

$$2R_X \xi_c^0 + \lambda \mathbf{c} = 0 \quad (16)$$

其中 ξ_c^0 是向量 ξ 在约束条件下的最优值, 求解式(14)得

$$\frac{\partial J_c}{\partial \lambda} = \mathbf{c}^T \xi_c^0 - \mathbf{a}' = 0 \quad (17)$$

根据式(16)和式(17)求得 λ 和 ξ_c^0 分别为

$$\lambda = \frac{-2\mathbf{a}'}{\mathbf{c}^T R_X^{-1} \mathbf{c}} \quad (18)$$

$$\xi_c^0 = \frac{\mathbf{a}' R_X^{-1} \mathbf{c}}{\mathbf{c}^T R_X^{-1} \mathbf{c}} \quad (19)$$

替换式(7)中的 λ , 得

$$J_c = J_{\min} + \frac{\mathbf{a}'^2}{\mathbf{c}^T R_X^{-1} \mathbf{c}} \quad (20)$$

式(8)可以改写为

$$w_n = \xi_n + w^0 \quad (21)$$

又根据式(19)得

$$w_c^0 = w^0 + \frac{\mathbf{a}' R_X^{-1} \mathbf{c}}{\mathbf{c}^T R_X^{-1} \mathbf{c}} \quad (22)$$

在最小均方算法的基础上, 为了获得约束条件下的迭代关系, 需要遵循下面两步。

第一步

$$w'_n = w_n + 2\mu e_n x_n \quad (23)$$

第二步

$$w_{n+1} = w'_n + \eta_n \quad (24)$$

其中 η_n 的选择需满足:

$$\mathbf{c}^T w_{n+1} = \mathbf{a} \quad (25)$$

即要求 $\eta_n^T \eta_n$ 最小, 选择向量 η_n 使迭代第二步后仍满足式(3), 且 η_n 的波动最小化, 用 Lagrange 乘数法解得

$$\eta_n = \frac{\mathbf{a} - \mathbf{c}^T w'_n}{\mathbf{c}^T \mathbf{c}} \mathbf{c} \quad (26)$$

因此获得方程最后形式:

$$w_{n+1} = w'_n + \frac{\mathbf{a} - \mathbf{c}^T w'_n}{\mathbf{c}^T \mathbf{c}} \mathbf{c} \quad (27)$$

约束算法的计算步骤如下:

输入	初始权重向量 $w(0) = 0$ 输入向量 $x(n)$ 期望输出向量 $d(n)$ 常数向量 \mathbf{c} 约束常数 \mathbf{a}
输出	滤波器输出向量 $y(n)$
步骤	$y(n) = w^T(n)x(n)$ $e(n) = d(n) - y(n)$ $w'(n) = w(n) + 2\mu e(n)x(n)$ $w(n+1) = w'(n) + \frac{\mathbf{a} - \mathbf{c}^T w'(n)}{\mathbf{c}^T \mathbf{c}} \mathbf{c}$

2 谐波信号的幅值和相角参数评估模型

根据文献[18], 谐波信号 $x(t)$ 的参数模型可以表示为

$$x(t) = \sum_{k=1}^n a_k \sin(w_k t + \varphi_k) + z(t) \quad (28)$$

式中: w_k 为信号角频率值; a_k 和 φ_k 分别为相应的幅值和相角; $z(t)$ 为高斯白噪声。

为了应用本文算法进行参数评估, 信号可以改写为参数形式:

$$x(t) = [\sin w_k t \quad \cos w_k t][w_\alpha \quad w_\beta]^T + z(t) \quad (29)$$

简化为

$$x(t) = \mathbf{x}_n \times [\mathbf{w}_n]^T + z(t) \quad (30)$$

式中: \mathbf{x}_n 为信号的输入向量矩阵 $[\sin w_k t \quad \cos w_k t]$; \mathbf{w}_n 为权重向量矩阵, \mathbf{w}_n 中 w_α 和 w_β 又分别为

$$\begin{cases} w_\alpha = a_k \cos \varphi_k \\ w_\beta = a_k \sin \varphi_k \end{cases} \quad (31)$$

因此实际需要的幅值、相角参数计算为

$$a_k = \sqrt{w_\alpha^2 + w_\beta^2} \quad (32)$$

$$\varphi_k = \tan^{-1}\left(\frac{w_\beta}{w_\alpha}\right) \quad (33)$$

均方误差 (Mean-Square-Error, MSE) 反映估计值与预期值的差异程度, 计算公式为

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (d_n - y_n)^2 \quad (34)$$

式中: d_n 为预期的信号值; y_n 为评估的信号值; N 为迭代的样本数。

3 算法仿真

为了检验本文算法的适用性, 分别针对稳态、

动态信号和电弧炉算例三种情况进行验证。并将本文算法与 LMS 算法进行对比, 所选采样频率为 2 500 Hz, 测试样本为 10 个周期, \mathbf{c} 按 1:2 的比例取值, 具体值根据信号适当改变, \mathbf{a} 取 0.8。

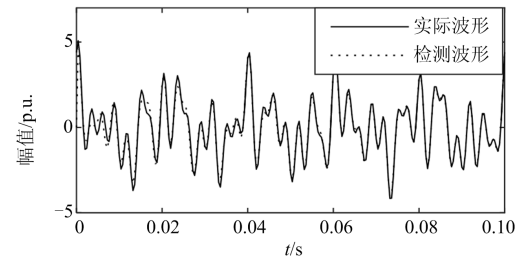
3.1 稳态信号测试

含有谐波的稳态信号可表示为

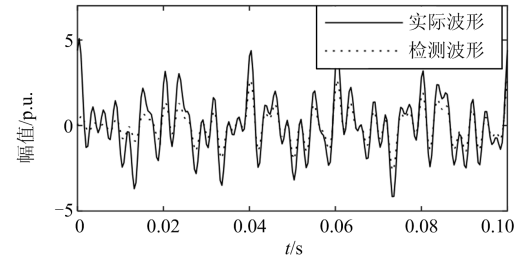
$$f(t) = 1.05 \sin(2\pi 50t + 60^\circ) + 1.05 \sin(2\pi 130t + 70^\circ) + 0.95 \sin(2\pi 200t + 65^\circ) + 0.97 \sin(2\pi 250t + 80^\circ) + 1.25 \sin(2\pi 350t + 33^\circ) + n(t) \quad (35)$$

式中, $n(t)$ 表示信噪比为 40 dB 的高斯白噪声。

图 1 为两种方法在加 40 dB 白噪声环境下对上式稳态信号的跟踪图。对比可以看出, 本文算法在 0.01 s 时实现了对实际波形的跟踪, 而 LMS 算法初始收敛时间过长, 需要 0.03 s。图 2 是两种方法对上述波形幅值均方误差对比图, 显然本文算法的动态响应性能优异, 检测误差更为平稳, 准确度和收敛速度都优于最小均方法。



(a) LCLMS算法输出波形



(b) LMS算法输出波形

图 1 各算法输出波形

Fig. 1 Output waveforms of each algorithm

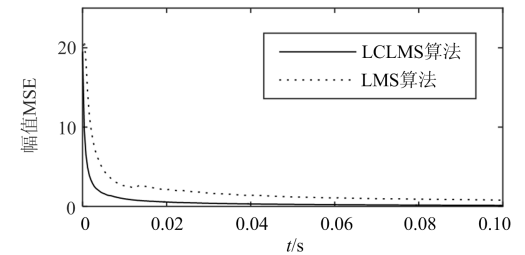


图 2 稳态信号幅值 MSE 评估

Fig. 2 Estimation of amplitude MSE of the stationary signal

表 1 为两种方法对包含基波和间谐波、四次、五次和七次谐波信号的振幅和相位参数评估结果, 同时也展示了相应参数的 MSE 值和两种方法的计算时间。从表中可以看出, 本文方法的准确度更高, 计算时间更短, 且满足国家标准《电能质量公用电

网谐波》中规定的谐波检测装置的幅值测量误差在 5% 以内, 相角测量误差不大于 1°。

表 2 为两种方法在无噪声、10 dB、20 dB、40 dB 四种不同环境下的均方误差比较, 容易看出加约束后的方法受噪声的影响更小。

表 1 稳态信号分析结果

Table 1 Analysis results of the stationary signal

算法	参数	基波	间谐波	4 次谐波	5 次谐波	7 次谐波	计算时间/s
仿真信号	频率/Hz	50	130	200	250	350	
	幅值/V	1.05	1.05	0.95	0.97	1.25	
	相角/(°)	60	70	65	80	33	
LMS 算法	幅值/V	1.048 2	1.031 2	0.943 2	0.958	1.231	0.03
	均方误差	0.001 8	0.018 8	0.007 8	0.012	0.019	
	相角/(°)	60.063	69.772	65.042	80.045	33.054	
	均方误差	0.063	0.228	0.042	0.045	0.054	
LCLMS 算法	幅值/V	1.049 6	1.046 2	0.965 5	0.968 8	1.249	0.02
	均方误差	0.000 4	0.003 8	0.004 5	0.001 2	0.001	
	相角/(°)	60.013	69.943	65.051	80.018	33.030	
	均方误差	0.013	0.057	0.051	0.018	0.030	

表 2 算法在不同噪声环境下的 MSE 对比

Table 2 Comparison of MSE in different noise environment

SNR	无噪声	10 dB	20 dB	40 dB
LMS	0.157 3	0.589	0.765 4	0.053
LCLMS	0.025 7	0.115	0.039 2	0.009

3.2 动态信号测试

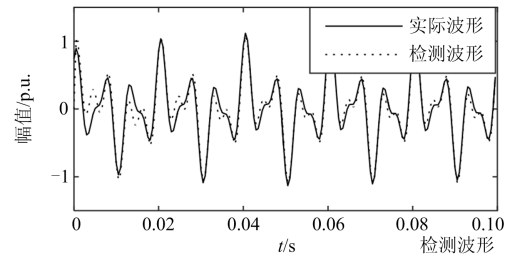
含有谐波的动态信号可表示为

$$f(t) = \{0.15 + a_1(t)\} \sin(2\pi 50t + 65^\circ) + \{0.5 + a_3(t)\} \sin(2\pi 150t + 60^\circ) + \{0.25 + a_5(t)\} \sin(2\pi 250t + 42^\circ) \quad (36)$$

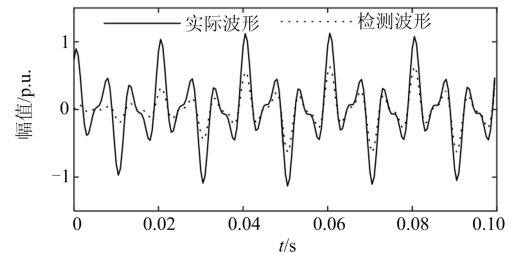
其中 $a_1(t)$ 、 $a_3(t)$ 、 $a_5(t)$ 如式(37)所示, 构成一个在 3 Hz、2 Hz 和 7 Hz 等不同调制频率下的幅值动态信号。

$$\begin{cases} a_1 = 0.15 \sin 2\pi f_1 t + 0.05 \sin 2\pi f_5 t \\ a_3 = 0.05 \sin 2\pi f_3 t + 0.03 \sin 2\pi f_5 t \\ a_5 = 0.03 \sin 2\pi f_1 t + 0.005 \sin 2\pi f_5 t \\ f_1 = 3.0 \text{ Hz} \\ f_3 = 2.0 \text{ Hz} \\ f_5 = 7.0 \text{ Hz} \end{cases} \quad (37)$$

图 3 为两种算法对上式动态信号的检测图, 图 3(a)的跟踪速度和精度明显优于图 3(b)。图 4 为相应的幅值 MSE 曲线图。综合两图可以看出, 本文的 LCLMS 方法在评估准确度和收敛速度方面都好于 LMS 算法。



(a) LCLMS算法输出波形



(b) LMS算法输出波形

图 3 各算法输出波形

Fig. 3 Output waveforms of each algorithm

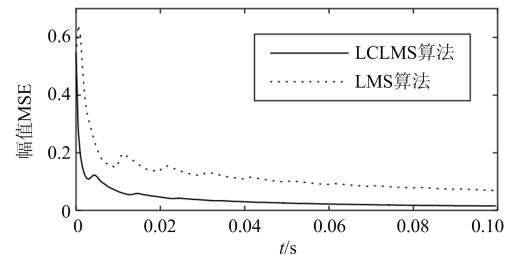


图 4 动态信号幅值 MSE 评估

Fig. 4 Estimation of amplitude MSE of the dynamic signal

3.3 电弧炉算例分析

本文对文献[19]的电弧炉模拟系统仿真算例进行分析, 实验中加入 30 dB 的白噪声。采样间隔为 0.5 ms, 采样点数为 300 个。其具体信号参数如表 3 所示, 原始波形见图 5。

表 3 信号参数

Table 3 Signal parameters

频率/Hz	幅值/A	相角/(°)
25	64.933	45
50	100	0
125	74.813	0

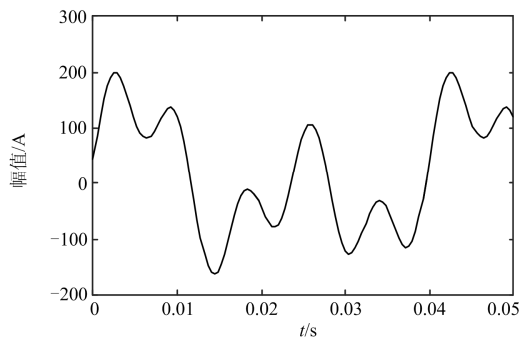


图 5 电弧炉电流波形

Fig. 5 Waveform of the arc furnace

对该仿真波形用本文加约束算法和最小均方方法进行分析, 测量结果如表 4 所示。信号中含有较大噪声时, 本文方法的幅值和相角评估精度高于最小均方方法, 且满足相关标准要求。

表 4 电弧炉数据分析结果

Table 4 Data analysis results of the arc furnace

f_k/Hz	LCLMS		LMS	
	a_k	$\varphi_k/(^\circ)$	a_k	$\varphi_k/(^\circ)$
25	65.005 7	44.304 8	65.253 8	45.853 4
50	99.650 8	0.078 9	100.390 2	0.329 5
125	75.070 8	-0.030 1	74.456 1	0.582 5

4 结论

(1) 为了提高 LMS 算法在谐波检测时兼顾计算速度与检测精度的能力, 提出基于线性约束最小均方的谐波检测算法。通过对权重变量增加一个线性约束条件, 在提高检测精度的同时避免了滤波器权重系数的偏移, 从而加快了收敛速度。

(2) 分别用 LMS 算法和 LCLMS 算法对含谐波的稳态仿真信号在不同噪声环境下进行测试, 本文算法的准确度和收敛速度都优于 LMS 算法, 且受噪声的影响更小。

(3) 对含谐波的动态信号进行仿真测试, 本文算

法的跟踪速度和精度明显优于 LMS 算法。

(4) 对电弧炉仿真算例进行分析, 本文算法可以有效估计谐波的幅值和相角, 且相比 LMS 算法精度更高。

参考文献

- [1] 惠锦, 杨洪耕, 叶茂清. 多谐波源条件下的谐波污染责任划分研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(13): 48-54.
HUI Jin, YANG Honggeng, YE Maoqing. Research on the responsibility partition of harmonic pollution of multiple harmonic sources[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(13): 48-54.
- [2] 高赐威, 张亮. 电动汽车充电对电网影响的综述[J]. 电网技术, 2011, 35(2): 127-131.
GAO Ciwei, ZHANG Liang. A survey of influence of electric vehicle charging on power grid[J]. Power System Technology, 2011, 35(2): 127-131.
- [3] 刘涛, 庄双勇, 陈晓伟, 等. 基于 Hanning 自乘-卷积窗 FFT 三峰插值修正的电能计量新算法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(22): 9-15.
LIU Tao, ZHUANG Shuangyong, CHEN Xiaowei, et al. A new algorithm for electric energy measurement based on Hanning self multiplication-convolution window triple-spectrum-line interpolation FFT[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(22): 9-15.
- [4] 康维, 李宁, 张建文, 等. 一种改进 FFT 多谱线插值谐波分析方法[J]. 电测与仪表, 2016, 53(10): 8-15.
KANG Wei, LI Ning, ZHANG Jianwen, et al. An improved harmonic analysis algorithm of multi-spectrum-line interpolation FFT[J]. Electrical Measurement Instrumentation, 2016, 53(10): 8-15.
- [5] 张俊敏, 刘开培, 汪立, 等. 基于四谱线插值 FFT 的谐波分析快速算法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 139-145.
ZHANG Junmin, LIU Kaipei, WANG Li, et al. A rapid algorithm for harmonic analysis based on four-spectrum-line interpolation FFT[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 139-145.
- [6] 张文嘉, 卢惠辉, 苏成悦, 等. 基于神经网络的电力谐波检测方法[J]. 陕西电力, 2015, 43(6): 67-70.
ZHANG Wenjia, LU Huihui, SU Chengyue, et al. Power harmonic detection approach based on neural network[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(6): 67-70.
- [7] CHANG G W, CHEN C I, TENG Y F. Radial-basis-function-based neural network for harmonic detection[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(6): 2171-2179.

- [8] 王继东, 刘琨, 高彦静. 基于瞬时无功功率理论的电压波动检测和闪变计算[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(2): 145-150.
WANG Jidong, LIU Kun, GAO Yanjing. Detection for voltage fluctuation and flicker calculation based on the instantaneous reactive power theory[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(2): 145-150.
- [9] 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 Ruijiang, YANG Zhenbin, LIU Huichao. A method of power system harmonic detection based on wavelet transform[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(15): 35-39.
- [10] 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.
- [11] 齐郑, 李志, 张首魁, 等. 基于复合结构元素的新型自适应形态滤波器设计[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(14): 121-127.
QI Zheng, LI Zhi, ZHANG Shoukui, et al. Design of a new adaptive morphological filter based on composite structure elements[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(14): 121-127.
- [12] 乔宗超, 唐露新, 刘海. 自适应滤波算法消除泥浆脉冲信号中的泵冲噪声[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(7): 1477-1484.
QIAO Zongchao, TANG Luxin, LIU Hai. Adaptive filtering algorithm for cancelling the pump noise in the mud pulse signal[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(7): 1477-1484.
- [13] 赵彤, 梁家碧, 夏天翔, 等. 基于 LMS 自适应滤波算法的电力变压器有源降噪系统[J]. 高电压技术, 2016, 42(7): 2299-2307.
ZHAO Tong, LIANG Jiabi, XIA Tianxiang, et al. Active noise control system based on LMS adaptive filter algorithm for transformer power noise reduction[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(7): 2299-2307.
- [14] 张宇, 徐伟强, 陈积明, 等. 基于最速下降法的车载网络功率控制研究[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(10): 2536-2540.
ZHANG Yu, XU Weiqiang, CHEN Jiming, et al. Steepest descent method based transmission power control in vehicular networks[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(10): 2536-2540.
- [15] 陈刚, 杨毅, 杨晓梅, 等. 基于分布式牛顿法的微电网群分布式优化调度方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(21): 156-162.
CHEN Gang, YANG Yi, YANG Xiaomei, et al. Distributed optimization scheduling method for microgrid cluster based on distributed Newton method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(21): 156-162.
- [16] 张明, 李开成, 胡益胜. 基于 Bayes 估计的双小波维纳滤波电能质量信号去噪算法[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(4): 52-57.
ZHANG Ming, LI Kaicheng, HU Yisheng. Power quality signals denoising via double-wavelet Wiener filtering based on Bayes estimation[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(4): 52-57.
- [17] 潘晴, 冉福星, 李雅昆. 基于 EMD 的前后置滤波语音增强算法[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2018, 46(3): 33-39.
PAN Qing, RAN Fuxing, LI Yakun. Speech enhancement algorithm based on EMD for pre and post filter[J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition), 2018, 46(3): 33-39.
- [18] SINGH S K, GOSWAMI A K, SINHA N. Power system harmonic parameter estimation using bilinear recursive least square (BRLS) algorithm[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015, 67: 1-10.
- [19] 丁屹峰, 程浩忠, 吕干云, 等. 基于 Prony 算法的谐波和间谐波频谱估计[J]. 电工技术学报, 2005, 20(10): 94-97.
DING Yifeng, CHENG Haozhong, LÜ Ganyun, et al. Spectrum estimation of harmonics and interharmonics based on Prony algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(10): 94-97.

收稿日期: 2018-07-12; 修回日期: 2018-09-19

作者简介:

李裕杰(1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统建模与仿真; E-mail: 786535971@qq.com

赵庆生(1969—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统运行与控制、电力系统建模与仿真。E-mail: zhaoqs1996@163.com

(编辑 魏小丽)