

递归最小二乘法追踪电压闪变包络线

陈雪松, 杨洪耕

(四川大学 电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 应用常规递归最小二乘法(RLS)同时估计 2 个或 2 个以上变量时容易产生较大误差,改进 RLS 根据情况选择遗忘因子的个数;利用前一次估计的结果,把误差分散到不同参数,然后各自选用合适的遗忘因子,使各参数以不同的比率变化,优化追踪结果。通过 Matlab 仿真,分别用常规 RLS 和改进 RLS 追踪电压闪变的包络线和初相角,用改进 RLS 追踪单频、多频闪变及其加噪后的包络线幅值,并对包络线进行了快速傅里叶变换分析。结果证实该方法提高了准确性。

关键词: 电压闪变; 递归最小二乘法; 遗忘因子; 包络线追踪

中图分类号: TM 933.2

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2006)06-0030-03

电压闪变是由于电压幅值变动所致,电压幅值变动可能使某些重要的电子仪器、控制系统或保护装置误动作^[1]。已有许多文献提出了多种估算、测量电压闪变的方案^[2-7]。本文介绍一种追踪电压闪变包络线的改进递归最小二乘法。该方法具有追踪结果比较准确和计算量小的特点,可以用来对电压闪变进行实时追踪然后加以补偿,起到改善电能质量的作用。

1 电压闪变模型

在任何进行闪变包络线追踪之前,建立一个精确的电压闪变模型是关键。在分布式系统中电压扰动的模型可以是一个变幅正弦波形。

$$u(t) = A(t) \sin(\omega_1 t + \phi_1)$$

式中 $A(t)$ 为扰动下的电压幅值; ω_1 为角频率; ϕ_1 为基频初相角。

$A(t)$ 的波形依赖产生扰动的负载。它可以用阶梯函数表示大负荷的投切,或者可以用具有变频方波表示。 $A(t)$ 也可以是具有比基波低频的正弦数:

$$A(t) = A_0 + A_f(t) \sin(\omega_f t + \phi_f)$$

式中 A_0 为基波电压幅值; A_f 为闪变幅值; ω_f 为闪变角频率; ϕ_f 为相角。

为了能够运用追踪技术,测量电压波形 $u(t)$ 可用如下方式表达:

$$u(t) = A(t) (\sin \omega_1 t \cos \phi_1 + \cos \omega_1 t \sin \phi_1)$$

用矢量的方式表达如下:

$$u(t) = [\sin \omega_1 t \quad \cos \omega_1 t] \begin{bmatrix} A(t) \cos \phi_1 \\ A(t) \sin \phi_1 \end{bmatrix} = \mathbf{X}(t)^T \mathbf{W}(t) \quad (1)$$

最后,包络线的表达式如下:

$$U_{en} = A(t) = \sqrt{w_1^2 + w_2^2}$$

$$w_1 = A(t) \cos \phi_1, \quad w_2 = A(t) \sin \phi_1$$

初相角 ϕ_1 也可计算出:

$$\phi_1 = \arctan(w_2 / w_1)$$

2 常规递归最小二乘法

递归最小二乘法是一种常规最小二乘法多约束线性系统解决技术的迭代再形成方法。为避免前次结果对后次影响过大和加快方程收敛,对递归最小二乘法进行修正。随着时间的增加,前面的输入对后面输出的影响逐渐减少。为了更好地追踪包络线,修正的方程里加入一个遗忘因子,并且可以加快迭代方程的收敛速度。加入遗忘因子的原则如下:

$$J = \sum_{k=1}^l \lambda^2(k) [y(k) - \boldsymbol{\varphi}^T(k) \boldsymbol{\theta}]^2 \quad (2)$$

得到的估计方程和修正方程如下:

$$\boldsymbol{\theta}(k) = \boldsymbol{\theta}(k-1) + \mathbf{P}(k-1) \boldsymbol{\varphi}(k) [y(k) - \boldsymbol{\varphi}^T(k) \boldsymbol{\theta}(k-1)] \quad (3)$$

$$\mathbf{P}(k) = \frac{1}{\lambda} \left[\mathbf{P}(k-1) - \frac{\mathbf{P}(k-1) \boldsymbol{\varphi}^T(k) \boldsymbol{\varphi}(k) \mathbf{P}(k-1)}{\lambda + \boldsymbol{\varphi}(k) \mathbf{P}(k-1) \boldsymbol{\varphi}^T(k)} \right] \quad (4)$$

给出 $\boldsymbol{\theta}(k_0)$ 和 $\mathbf{P}(k_0)$ 的初始条件,这里 $\mathbf{P}(k_0) = a\mathbf{I}$, $a \leq 1$, $\mathbf{I}$ 是单位矩阵。 λ 用来加快收敛速度和准确性。迭代方程式(3)和(4)用来追踪包络线,其中式(3)和(4)中的 $\boldsymbol{\varphi}(k)$ 和 $\boldsymbol{\theta}(k)$ 分别用来代替式(1)中的 $\mathbf{X}(k)$ 和 $\mathbf{W}(k)$ 。因为递归最小二乘是基于最小二乘误差优化的,所以收敛条件为

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \Gamma_{\min} \left[\sum_{j=k_0}^k \boldsymbol{\varphi}(j) \boldsymbol{\varphi}^T(j) \right] = \infty \quad (5)$$

式中 $\Gamma_{\min}$ 为矩阵最小特征值。

解出矩阵,对其根取极限可见随时间趋于 ∞ ,可得 $\Gamma_{1,2} \rightarrow \infty$ 。该算法满足收敛条件^[8]。

3 改进递归最小二乘法

当对大量的数据和 2 个及 2 个以上参数进行连续追踪并要保证追踪质量时,常规递归最小二乘方的单一的遗忘因子,对追踪结果不是很准确的原因是由下列事实造成:在标准方法中假定参数随近似的比率而变;损耗函数式(2)和递归算法的误差是由于所有参数都依靠一个遗忘因子。因此,这种常规的递归最小二乘法不能准确地解决当误差来源是由于

2 个或者 2 个以上参数的时候。如果仍用一个遗忘因子,就容易产生迭代上的误差,并且误差积累后对结果的准确性产生很大影响。可以利用前一次估计的结果,把误差分散到不同的参数。这样分散误差到每一个参数,然后各自用合适的遗忘因子。所以,得到改进的递归最小二乘法如下:

$$U(\hat{\theta}_1(k), \hat{\theta}_2(k), k) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k \lambda_1^{k-i} (y(i) - \phi_1(i) \hat{\theta}_1(k) - \phi_2(i) \hat{\theta}_2(i))^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k \lambda_2^{k-i} (y(i) - \phi_1(i) \hat{\theta}_1(k) - \phi_2(i) \hat{\theta}_2(i))^2$$

式中 λ_1 和 λ_2 分别为第 1 和第 2 参数的遗忘因子。相应的遗忘因子提供更多自由度调整估计值,这样各自的参数可以以不同的比率变化,也可以得到更加准确的追踪结果。这种优化估计减小了估计结果的损失。这可以从下面的公式中看出:

$$\frac{\partial U}{\partial \hat{\theta}_1(k)} = 0 \Rightarrow \sum_{i=1}^k \lambda_1^{k-i} (-\phi_1(i)) (y(i) - \phi_1(i) \hat{\theta}_1(k) - \phi_2(i) \hat{\theta}_2(i)) = 0$$

对上式重新组合可得:

$$\hat{\theta}_1(k) = \left(\sum_{i=1}^k \lambda_1^{k-i} \phi_1(i)^2 \right)^{-1} \left(\sum_{i=1}^k \lambda_1^{k-i} (y(i) - \phi_2(i) \hat{\theta}_2(i)) \phi_1(i) \right)$$

同样可以得到 $\hat{\theta}_2(k)$ 如下:

$$\hat{\theta}_2(k) = \left(\sum_{i=1}^k \lambda_2^{k-i} \phi_2(i)^2 \right)^{-1} \left(\sum_{i=1}^k \lambda_2^{k-i} (y(i) - \phi_1(i) \hat{\theta}_1(i)) \phi_2(i) \right)$$

上两式可以进一步推导得到如下等式:

$$\begin{aligned} \hat{\theta}_1(k) &= \hat{\theta}_1(k-1) + L_1(k) (y(k) - \phi_1(k-1) \hat{\theta}_1(k-1) - \phi_2(k) \hat{\theta}_2(k)) \\ L_1(k) &= P_1(k-1) \phi_1(k) (\lambda_1 + \phi_1^T(k) P_1(k-1) \phi_1(k))^{-1} \\ P_1(k) &= (I - L_1(k) \phi_1^T(k)) P_1(k-1) / \lambda_1 \end{aligned}$$

同样可对 $\hat{\theta}_2(k)$ 加以变化。

$$\begin{aligned} \hat{\theta}_2(k) &= \hat{\theta}_2(k-1) + L_2(k) (y(k) - \phi_1(k-1) \hat{\theta}_1(k-1) - \phi_2(k) \hat{\theta}_2(k)) \\ L_2(k) &= P_2(k-1) \phi_2(k) (\lambda_2 + \phi_2^T(k) P_2(k-1) \phi_2(k))^{-1} \\ P_2(k) &= (I - L_2(k) \phi_2^T(k)) P_2(k-1) / \lambda_2 \end{aligned}$$

$\hat{\theta}_1(k)$ 和 $\hat{\theta}_2(k)$ 分别用来追踪包络线的幅值和初相角,然后根据具体的要求选择各自适合的 λ 。

4 仿真结果

首先,假设一个具有电压闪变的电压波形。为了能明显看出闪变效果,假设波形在某一个时刻具有跳变。波形如图 1 所示。

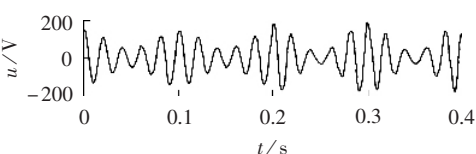


图 1 原始电压信号
Fig.1 Original voltage signal

包络线和初相角追踪结果如图 2 和图 3 所示。

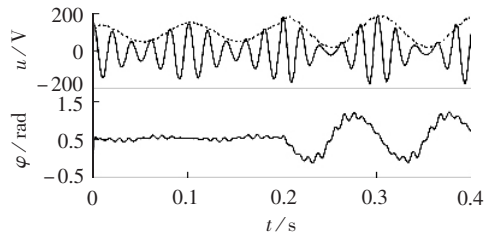


图 2 常规最小二乘法追踪结果
Fig.2 Tracking results by using routine RLS

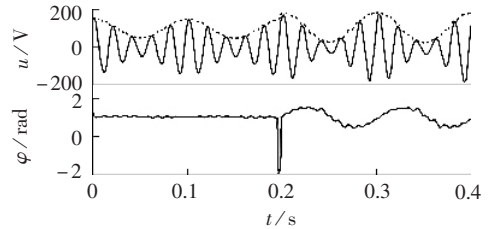


图 3 改进最小二乘法追踪结果
Fig.3 Tracking results by using improved RLS

用改进后递归最小二乘算法对单频闪变和多频闪变包络线的幅值分别进行追踪,如图 4 和图 5 所示(虚线为实际包络,实线为包络追踪结果)。

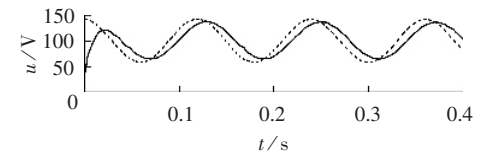


图 4 单频实际包络和追踪包络的比较
Fig.4 Comparison between practical and tracked envelopes of single-frequency signal

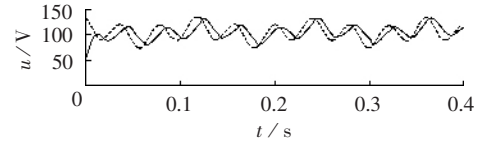


图 5 多频实际包络和追踪包络的比较
Fig.5 Comparison between practical and tracked envelopes of multi-frequency signal

对加入噪声后的单频和多频闪变包络分别进行追踪,如图 6 所示(虚线为单频,实线为多频),可以看出,加入噪声后对包络的追踪并无影响。

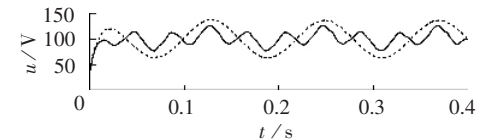


图 6 单频和多频加噪后的追踪结果
Fig.6 Tracking results of single- and multi-frequency signals with noise

为进一步检验此算法对闪变值求取时的影响,分别对单频和多频信号进行快速傅里叶变换(FFT)。通过对信号的包络提取前后作 FFT 变换,然后同真实包络的信号 FFT 变换后的结果进行比较,如图 7 所示(图中 A 为傅里叶变化后的幅度, f 为频率),可以很直观地看出,用提取包络的结果进行 FFT 变换比对原始信号进行 FFT 变换所得结果要准确。

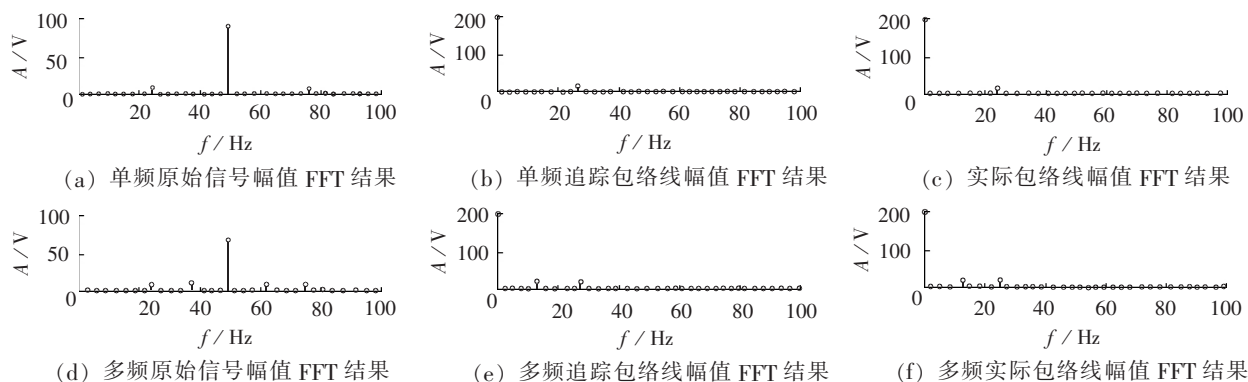


图 7 单频、多频与实际包络作 FFT 比较

Fig.7 Comparison between practical and tracked envelopes of single- or multi-frequency signal after FFT

5 结论

本文介绍了一种改进递归最小二乘法追踪闪变包络线和初相角。通过对常规最小二乘法在追踪包络线时对单一遗忘因子过分依赖问题加以改进,然后分别对闪变包络线和初相角的追踪结果比较,以及对单频闪变和多频闪变的包络线追踪结果,和对包络线作 FFT 变换可以看出此方法准确度高。另外算法计算量小,且收敛速度快,可用于实时追踪闪变包络线。把估计值与实际需求相比较然后加以补偿可以减缓电压波动,从而改善电压波形。

参考文献:

- [1] 杨洪耕,肖先勇,刘俊勇. 电能质量问题的研究与技术进展(四) 电压波动与闪变的测量分析[J]. 电力自动化设备,2004,24(1): 1-4.
YANG Hong-geng,XIAO Xian-yong,LIU Jun-yong. Issues and technology assessment on power quality. Part 4: measurement and analysis of voltage fluctuation and flicker[J]. Electric Power Automation Equipment,2004,24(1):1-4.
- [2] GIRGIS A A,MOSE B D,MAKRAN E B. Reactive power compensation and voltage flicker control of an arc furnace load [C]//IEEE ICHQPIX. Las Vegas, USA: IEEE/PES,1996: 242-247.
- [3] STRINVASAN K. Digital measurement of voltage flicker[J]. IEEE Trans on Power Delivery,1991,6(4):1593-1598.
- [4] TOIVONEN L,MORSKY J. Digital multirate algorithms for measurement of voltage, current, power and flicker[J]. IEEE Trans on Power Delivery,1995,10(1):116-126.
- [5] ZHENG T,MAKRAN E B. Wavelet representation of voltage flicker[J]. Electric Power System Research,1998,48(5):133-140.
- [6] MELIPOULOS A P S. Wavelet-based algorithm for voltage flicker analysis [C]//IEEE ICHQPIX. Orlando, USA: IEEE/PES,2000: 732-737.
- [7] 张宇辉,陈晓东,王鸿懿. 基于连续小波变换的电能质量测量与分类[J]. 电力自动化设备,2004,24(3):17-21.
ZHANG Yu-hui,CHEN Xiao-dong,WANG Hong-yi. Continuous wavelet-based measuring and classification of short duration power quality disturbances[J]. Electric Power Automation Equipment,2004,24(3):17-21.
- [8] SALAMA M A. Envelope tracking techniques for flicker mitigation and voltage regulation[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004,19(4):1854-1861.
- [9] 陈祥训. 实时跟踪电压闪变幅度的移动不变小波分析方法[J]. 中国电机工程学报,2004,24(10):1-7.
CHEN Xiang-xun. A shift-invariant wavelet-based method for tracking voltage flicker level[J]. Proceedings of the CSEE,2004, 24(10):1-7.
- [10] 马玉龙,刘连光,张建华,等. IEC 闪变测量原理的数字化实现方法[J]. 中国电机工程学报,2001,21(11):92-95.
MA Yu-long,LIU Lian-guang,ZHANG Jian-hua,et al. Research of digital flickermeter based on IEC standard [J]. Proceedings of the CSEE,2001,21(11):92-95.

(责任编辑:李育燕)

作者简介:

陈雪松(1976-),男,四川遂宁人,硕士研究生,研究方向为电压闪变分析与控制(E-mail:cedar119@tom.com);
杨洪耕(1949-),男,四川成都人,教授,长期从事电能质量、电力谐波分析与控制方面的研究与教学工作。

Flicker envelope tracking using recursive least square method

CHEN Xue-song, YANG Hong-geng

(Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Using the routine RLS (Recursive Least Square) to track two or more parameters may generate serious error. It is improved by selecting the quantity of forgetting factors in light of the situation. Based on the previous estimation, errors are distributed to different parameters and each is given an appropriate forgetting factor to change in different rate for optimizing tracking results. With Matlab simulation, the envelope of voltage flicker and the initial phase angle are tracked by the routine RLS and the improved RLS, and envelope amplitudes of single- and multi-frequency signals with and without noise are tracked by the improved RLS and further analyzed with the fast Fourier transform. Results show that the improved RLS enhances the precision.

Key words: voltage flicker; recursive least square; forgetting factor; envelope tracking