

基于 RLS 自适应算法的 APF 电流检测

李 萍, 刘小河

(北京机械工业学院 计算机与自动化系, 北京 100085)

摘要: 有源电力滤波器(APF)电流检测算法使用低通滤波器(LPF)提取基波有功直流分量, 直流分量的提取精度直接影响着指令电流信号的计算精度。提出一种应用数字递推最小二乘法(RLS)替代模拟 LPF 的电流检测新方法。RLS 自适应滤波算法是在采样周期内对整体采样序列进行滤波器权系数最优化搜索, 即对权系数迭代中的步长寻优, 从而准确地跟踪输入信号的直流分量。新方法以瞬时无功功率理论为电流检测依据, 利用坐标、三角变换矩阵根据电网三相瞬时电流计算出电流瞬时有功、无功交/直流分量。应用 Matlab 软件编写 RLS 自适应滤波算法程序进行仿真, 结果表明 APF 电流检测中采用数字 RLS 自适应滤波提取直流分量的方法是可行、有效的。

关键词: 有源电力滤波器; 电流检测; 递推最小二乘法; 自适应滤波

中图分类号: TM 930.12

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)07-0046-03

各种电力电子设备的非线性、冲击性负载在容量和数量上不断增加, 使电力系统受到谐波、无功的干扰, 不但危害着电力系统中用电设备, 而且还影响供电系统的供电质量^[1]。研究者们不断地将新技术、新方法应用于有源电力滤波器(APF)的各个组成部分, 以提高它的精确性、快速性、稳定性。其中, 电流检测算法在传统瞬时无功功率理论^[2]基础上提出改进的同步检测法^[3-4]、基于同步坐标变换的改进方法^[5-6]、最佳及灵活控制方法^[7]、改进同步参考坐标法^[8]、改进的 $p-q-r$ 理论谐波检测法^[9]以及在非理想电源电压下的电流检测方法^[10-11]等, 目的都是要通过坐标、三角变换获取瞬时与电网基频正序电压同步的基频有功电流的幅值。这就需要交直流分离的低通滤波器(LPF), 实际应用中模拟 LPF 要提高滤波精度就需增加阶数, 而较高的阶数难以实现, 并且存在着参数易受环境影响出现漂移, 降低 APF 的滤波精度的问题。提出基于递推最小二乘法(RLS)自适应滤波算法的直流分量检测方法来替代模拟 LPF, 并给出仿真结果。

1 自适应滤波原理

自适应滤波器具有自学习、自调整、自适应能力, 能够根据某种预先确定的最优准则, 以迭代的方式自动调整自身的参数来适应变化的环境, 实现最优准则下的滤波。自适应滤波器原理如图 1 所示。

采样输入信号 $X(k)$ 在数字滤波器的作用下, 输出信号 $\hat{y}(k)$, 该信号与参考信号 $y(k)$ 比较得误差信

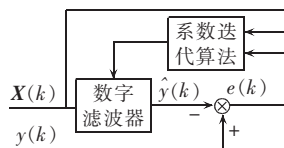


图 1 自适应滤波器原理图

Fig.1 Principle diagram of adaptive filter

号 $e(k)$, 将误差信号与输入信号代入迭代算式更新数字滤波器的权系数, 以适应不断变化的采样输入信号, 使误差达到最小。常用的自适应算法有最小二乘法(LMS)、RLS^[12], LMS 算法简洁, 但不适用于解决从谐波信号中提取直流分量的问题。

RLS 自适应滤波算法中 n 阶数字滤波器第 k 次采样滤波算法的采样输入信号为

$$X(k) = [x(k) \quad x(k-1) \quad \cdots \quad x(k-n+1)]$$

数字滤波器脉冲响应为

$$H(k) = [h_0(k) \quad h_1(k) \quad \cdots \quad h_{n-1}(k)]$$

即数字滤波器权系数。

误差信号为

$$e(k) = y(k) - \hat{y}(k)$$

$$e(k) = y(k) - X(k)H^T(k)$$

优化的最小化性能指标是误差平方和

$$J(k) = \sum_{i=1}^k [y(i) - X(i)H^T(i)]^2 \quad (1)$$

滤波器权系数的最优向量

$$H(k) = \frac{\sum_{i=1}^k X(i)y(i)}{\sum_{i=1}^k X^T(i)X(i)} = \frac{C_{yx}(k)}{C_{xx}(k)} \quad (2)$$

滤波器权系数的递归关系式

$$H^T(k) = H^T(k-1) + C_{xx}^{-1}(k) [y(k)X^T(k) - X^T(k)X(k)H^T(k-1)] \quad (3)$$

$C_{xx}^{-1}(k)$ 是输入信号自相关矩阵的逆, 它的求取可由 $C_{xx}(k) = C_{xx}(k-1) + X^T(k)X(k)$ 式导出该矩阵逆的递推公式:

$$C_{xx}^{-1}(k) = C_{xx}^{-1}(k-1) - g^T(k)X(k)C_{xx}^{-1}(k-1) \quad (4)$$

其中 $g(k)$ 为自适应增益向量

$$g^T(k) = \frac{C_{xx}^{-1}(k-1)X^T(k)}{1 + X(k)C_{xx}^{-1}(k-1)X^T(k)} \quad (5)$$

由于式(3)中

$$[y(k)X^T(k) - X^T(k)X(k)H^T(k-1)]$$

可简化为

$$\mathbf{X}^T(k)[\mathbf{y}(k) - \mathbf{X}(k)\mathbf{H}^T(k-1)] = \mathbf{X}^T(k)\mathbf{e}(k)$$

代入原方程式得:

$$\mathbf{H}^T(k) = \mathbf{H}^T(k-1) + \mathbf{C}_{xx}^{-1}(k)\mathbf{X}^T(k)\mathbf{e}(k)$$

其中 $\mathbf{C}_{xx}^{-1}(k)\mathbf{X}^T(k)$ 可通过式(4)(5)推导

$$\mathbf{C}_{xx}^{-1}(k)\mathbf{X}^T(k) = \mathbf{g}^T(k)$$

滤波器权系数递推公式为

$$\mathbf{H}^T(k) = \mathbf{H}^T(k-1) + \mathbf{g}^T(k)\mathbf{e}(k) \quad (6)$$

误差应由 $\mathbf{H}^T(k-1)$ 迭代而得,与前述误差公式相比可称其为先验误差公式:

$$\mathbf{e}(k) = \mathbf{y}(k) - \mathbf{X}(k)\mathbf{H}^T(k-1) \quad (7)$$

该算法是每处理一次采样信号就在整体采样序列中对滤波器权系数作最优化搜索,即对权系数迭代公式的步长寻优。权系数迭代步长向量由先验误差和自适应增益决定,在迭代算式中若先验误差含有参考信号中的谐波分量,由于自适应增益能消除先验误差中与直流分量不相关的谐波信号,因此,可使滤波器的权系数平稳变化,输出期望的直流分量。

2 基于 RLS 自适应算法的 APF 电流检测方法

图 2 为并联有源电力滤波器(SAPF)基本结构。

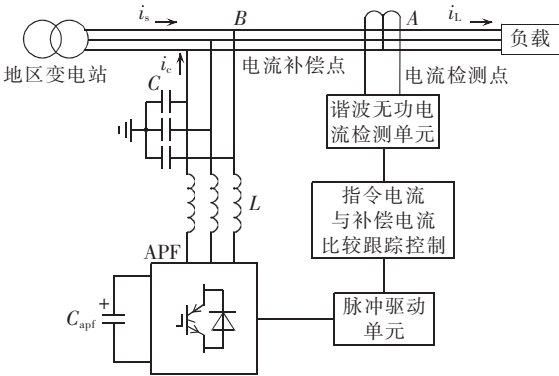


图 2 并联有源电力滤波器结构图

Fig.2 Frame of shunt active power filter

图中, A 为三相电流检测点, B 为 APF 电流补偿点, i_s 为地区变电站输出电流, i_L 为流入负载的电流, i_c 为 APF 注入电网的补偿电流。对于三相三线制电力系统,检测点电流包含正序、负序电流分量,无零序分量。以瞬时无功功率理论为电流检测依据。电流互感器从电网检测点检测到三相瞬时电流,利用坐标变换矩阵 $\mathbf{c}_{\alpha\beta/abc}$ 将三相电流变为 $\alpha-\beta$ 坐标中两相,通过锁相环电路(PLL)跟踪三相电网电压基波分量构成 $\mathbf{c}_{\sin-\cos}$ 阵,计算 $\alpha-\beta$ 坐标平面的瞬时无功、有

功交直流分量,公式如下:

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \end{bmatrix} = \mathbf{c}_{\sin-\cos} \mathbf{c}_{\alpha\beta/abc} \begin{bmatrix} i_{La}^+ + i_{La}^- \\ i_{Lb}^+ + i_{Lb}^- \\ i_{Lc}^+ + i_{Lc}^- \end{bmatrix} = \sum_{n=1}^{\infty} \begin{bmatrix} I_n^+ \cos[(n-1)\omega t + \phi_n^+] + I_n^- \cos[(n+1)\omega t + \phi_n^-] \\ I_n^+ \sin[(n-1)\omega t + \phi_n^+] + I_n^- \sin[(n+1)\omega t + \phi_n^-] \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\mathbf{c}_{\alpha\beta/abc} = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{c}_{\sin-\cos} = \begin{bmatrix} \sin(\omega t + \theta) & -\cos(\omega t + \theta) \\ -\cos(\omega t + \theta) & -\sin(\omega t + \theta) \end{bmatrix}$$

经 LPF 滤波后,得基波正序有功直流分量,该分量再经过反变换可得到三相基波正序有功交流分量,与检测点瞬时采样电流相减便得出包含谐波、无功、负序电流的指令电流信号,APF 通过电流闭环反馈控制,驱动逆变器产生跟踪指令电流信号变化的补偿电流^[13],并注入电网以达到消除电网谐波、无功、负序电流的目的。

在提取基波正序有功直流分量的过程中,数字 RLS 自适应滤波算法体现出其滤波的优越性。

利用仿真软件 Matlab 编写代码程序^[14]对 RLS 自适应滤波算法进行了仿真。滤波器参考信号为 $\alpha-\beta$ 坐标平面内瞬时有功直流分量以及谐波分量。输入信号是与直流分量相关的任意幅值直流信号。定义滤波器阶数,初始化自相关逆矩阵、自适应增益、先验误差、自适应滤波器权系数、自适应滤波器输出等向量。

3 仿真结果

建立 SAPF 滤除非线性负载的电力系统仿真模型^[15],负载电流经检测环节的坐标、三角变换,得到含基波有功直流分量的谐波电流,作为数字 RLS 滤波器的参考信号,见图 3(a)(图中 n 为采样数,下同)。输入信号可采用任意幅值的直流信号,实验幅值为 10 A。滤波器的采样周期为 0.4 ms(基频信号每周期有 50 个采样点),滤波阶数为 7 阶,初始化自相关逆矩阵为 $10\,000\mathbf{I}$, $\mathbf{I}$ 为单位矩阵,其他向量初始值均设为 0。输入信号经 RLS 自适应迭代运算后输出 $\hat{y}(k)$,即为跟踪到参考信号中的直流分量,见图 3(b)。误差信号为参考信号中的谐波分量,图 3(c)中误差信号 $\mathbf{e}(k)$ 在基频信号的第 2 周期与不含直流分量的参考信号 $\mathbf{y}'(k)$ 相吻合。图 3(d)(e)为滤波器权系数 K_f 、自适应增益 K_d 的变化趋势图,反映了 RLS

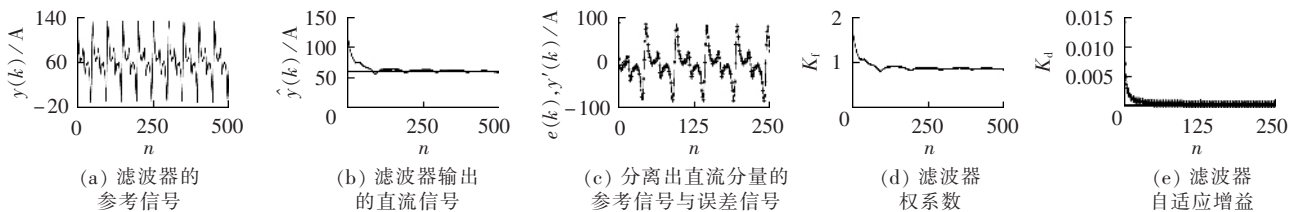


图 3 数字 RLS 滤波的仿真结果

Fig.3 Simulative results of digital RLS filter

算法具有较快的搜索速度和稳定性。虽然自适应滤波存在一定的延时,但对于稳定吸收电网有功的负载,可得到恒定的有功直流分量,该分量与 PLL 锁相环实时跟踪的电压基频正余弦分量进行反变换运算,能够实时求出三相补偿指令电流信号。

4 结论

通过对数字 RLS 自适应滤波器滤除 $\alpha-\beta$ 坐标平面内交流分量的仿真,结果表明应用数字 RLS 自适应方案提取直流分量是可行的,能够克服模拟 LPF 滤波的不利因素,具有控制灵活、稳定性好、抗干扰能力强的特点,有利于提高电网畸变电流的补偿率。

参考文献:

- [1] 王兆安,杨君,刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京:机械工业出版社,2002.
- [2] AKAGI H,KANAZAWA Y,NABAE A. Theory of the instantaneous reactive power in three phase circuits[C]//IEEE & JIEE Proceedings IPEC. Tokyo:IPEC,1983:1375-1386.
- [3] 丁洪发,段献忠,何仰赞. 同步检测法的改进及其在三相不对称无功补偿中的应用[J]. 中国电机工程学报,2000,20(6):17-20. DING Hong-fa,DUAN Xian-zhong,HE Yang-zan. Improvement of synchronous detection method and application for var compensation of unbalanced three-phase systems[J]. Proceedings of the CSEE,2000,20(6):17-20.
- [4] HAO R X,CHENG Z G,YOU X J. A novel currents detection method based on rotating $d-q$ reference frame for active power filter[C]//2004 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conf. Aachen:IEEE,2004:3034-3038.
- [5] 马莉,周景海,吕征宇,等. 一种基于 $d-q$ 变换的改进型谐波检测方案的研究[J]. 中国电机工程学报,2000,20(10):55-58. MA Li,ZHOU Jing-hai,LÜ Zheng-yu,et al. An improved harmonic detecting approach based on $d-q$ rotating coordination transformation[J]. Proceedings of the CSEE,2000,20(10):55-58.
- [6] 孙驰,魏光辉,毕增军. 同步坐标变换的三相不对称系统的无功与谐波电流的检测[J]. 中国电机工程学报,2003,23(12):43-48. SUN Chi,WEI Guang-hui,BI Zeng-jun. Detection for reactive and harmonics currents of unbalanced three-phase systems based on synchronous reference frame transformation[J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(12):43-48.
- [7] RAFIEI S M R,TOLIJAT H A,GHAZI R,et al. An optimal and flexible control strategy for active filtering and power factor correction under non-sinusoidal line voltage[J]. IEEE Trans on PD,2001,16(2):297-305.
- [8] 陈东华,谢少军,周波. 用于有源电力滤波器谐波和无功电流检测的一种改进同步参考坐标法[J]. 中国电机工程学报,2005,25(20):62-67. CHEN Dong-hua,XIE Shao-jun,ZHOU Bo. An improved synchronous reference frame method for harmonics and reactive current detection of active power filters[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(20):62-67.
- [9] 顾炜,陈明凯. 一种改进的 $p-q-r$ 理论在电力系统谐波检测中的应用[J]. 华北电力大学学报,2005,32(5):11-14. GU Wei,CHEN Ming-kai. Improved $p-q-r$ theory for harmonic detection in power system[J]. Journal of North China Electric Power University,2005,32(5):11-14.
- [10] 游小杰,李永东,郝瑞祥,等. 并联型有源电力滤波器在非理想电源电压下的控制[J]. 中国电机工程学报,2004,24(2):55-60. YOU Xiao-jie,LI Yong-dong,HAO Rui-xiang,et al. The control of parallel active power filter under unperfect source voltage[J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(2):55-60.
- [11] 陈维荣,唐蕾. 非理想电压下有源电力滤波器的电流检测[J]. 西南交通大学学报,2006,41(1):31-36. CHEN Wei-rong,TANG Lei. Current detection control of active power filter under non-ideal voltage source[J]. Journal of Southwest Jiaotong University,2006,41(1):31-36.
- [12] 王宏禹,邱天爽. 自适应噪声抵消与时间延时估计[M]. 大连:大连理工大学出版社,1999.
- [13] 李爱文,张承慧. 现代逆变技术及其应用[M]. 北京:科技出版社,2000.
- [14] 钟麟,王峰. Matlab 仿真技术与应用教程[M]. 北京:国防工业出版社,2004.
- [15] 沈辉. 精通 Simulink 系统仿真与控制[M]. 北京:北京大学出版社,2002.

(责任编辑:汪仪珍)

作者简介:

李萍(1971-),女,河北柏乡人,工程师,硕士,主要从事现代电力电子技术应用及控制理论方面的研究(E-mail:liping921@hotmail.com)。

APF current detection based on RLS adaptive algorithm

LI Ping,LIU Xiao-he

(Department of Computer and Automation,Beijing Institute of Machinery,Beijing 100085,China)

Abstract: The DC component of fundamental active power is extracted with LPF(Low Pass Filter) in the current detection of APF(Active Power Filter) and the extraction precision influences directly the calculation precision of reference current. A current detection method using digital RLS(Recursive Least Squares) to replace LPF simulation is presented. In the adaptive RLS filtering algorithm,the weight factor of filter is optimized to precisely follow the DC component of input signal for whole sampling sequences within the sampling period,namely the step length optimization of weight factor iteration. The new current detection algorithm is based on instantaneous reactive power theory,and the AC or DC component of active power and reactive power is calculated from the three-phase instantaneous currents using coordinate transformation and trigonometric function transformation. Simulations with Matlab demonstrate that,the proposed filtering scheme is feasible and valid for APF.

This project is supported by the National Natural Science Foundation of China(50277032).

Key words: active power filter; current detection; RLS; adaptive filtering