

基于自适应预测滤波器的谐波检测

戴丽萍¹, 刘开培²

(1. 武汉化工学院 自动化系, 湖北 武汉 430073;

2. 武汉大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 准确、快速地检测电力系统电流中的谐波成分是保证有源电力滤波器具备良好工作性能的关键。提出了基于自适应有限脉冲响应(FIR)预测滤波器的谐波实时检测系统。论述了自适应滤波器谐波检测原理, 利用最小均方算法(LMS)对所需检测信号进行预测。采用 Matlab 进行了 FIR 的预测滤波器实验仿真。仿真说明该方法跟随性能好, 在 3/4 个基频周期内就能跟踪上基波的变化。

关键词: 有源电力滤波器; 谐波检测; 预测

中图分类号: TM 302.1

文献标识码: B

文章编号: 1006-6047(2005)08-0063-03

0 引言

谐波检测是谐波治理的关键问题之一。谐波检测的最重要方法是瞬时无功功率理论^[1], 在这种方法中要用到低通或高通滤波器, 滤波器阶数越高, 检测精度越高, 但是动态过程越长, 即存在检测精度和检测实时性的矛盾。而传统的离散傅里叶变换由于固有的一个周期延迟, 并且计算量大, 被认为不能实时补偿电力系统谐波。

本文提出了基于自适应预测滤波器的谐波检测, 其突出的特点是从负载畸变电流中分离出基波电流, 而不引起基波电流的相移, 从畸变电流中减去基波电流就可得到所需的谐波电流。本方法具有较好的实时性。

1 谐波检测原理

以三相电路的 A 相为例, 自适应预测滤波器的谐波检测原理图如图 1 所示, 滤波部分由前置低通滤波器和自适应预测滤波器所组成。前置低通滤波器滤掉该系统中高次谐波。由于信号的幅值变化较大会对自适应滤波器的稳定性有影响, 因此, 首先对输入信号作规范化处理, 用输入半个周期内最大采样值作为最大估计值。用最大估计值去除输入信号作为滤波部分的输入, 滤波部分的输出再进行反规范化处理。最后, 输出的结果就是基波的正弦信号。

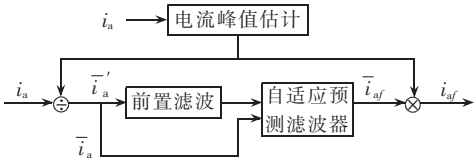


图 1 谐波检测原理图

Fig.1 The principle diagram of harmonic detection

2 谐波检测

2.1 自适应滤波理论

自适应滤波器原理就是用误差信号 $e(k)$ 和输入量 $x(k)$ 更新滤波器系数。记数字滤波器脉冲响应为

$$h(k) = [h_0(k), h_1(k), \dots, h_{n-1}(k)]^T \quad (1)$$

输入采样信号为

$$x(k) = [x(k), x(k-1), \dots, x(k-n+1)] \quad (2)$$

误差信号为

$$e(k) = y(k) - \hat{y}(k) \quad (3)$$

$$e(k) = y(k) - h^T(k)x(k) \quad (4)$$

优化过程就是最小化性能指标 $J(k)$, 它是误差的平方和:

$$J(k) = \sum_{i=1}^k [y(i) - h^T(k)x(i)]^2 \quad (5)$$

然后, 求使 $J(k)$ 最小的系数向量 $h(k)$, 即使 $J(k)$ 对 $h(k)$ 的导数为零, 也就是 $dJ(k)/dh(k) = 0$ 。把 $J(k)$ 的表达式代入, 得:

$$2 \sum_{i=1}^k [y(i) - h^T(k)x(i)]x(i) = 0 \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^k x^T(i)y(i) = h^T(k) \sum_{i=1}^k x(i)x^T(i) \quad (7)$$

由此得出滤波器系数的最优向量为

$$h^T(k) = [\sum_{i=1}^k x^T(i)y(i)] / [\sum_{i=1}^k x(i)x^T(i)] \quad (8)$$

式(8)由输入信号自相关矩阵 $C_{xx}(k)$ 和输入信号与参考信号的相关矩阵 $C_{yx}(k)$ 组成, 如下所示, 维数都为 (n, n) :

$$C_{xx}(k) = \sum_{i=1}^k x(i)x^T(i) \quad (9)$$

$$C_{yx}(k) = \sum_{i=1}^k x^T(i)y(i) \quad (10)$$

系数最优向量也可以写成如下形式:

$$h^T(k)_{opt} = C_{yx}(k)C_{xx}^{-1}(k) \quad (11)$$

推导 1 个系数的递归表达式以便能从 $\mathbf{h}(k-1)$ 向量得到 $\mathbf{h}(k)$, 而 $\mathbf{h}(k-1)$ 也由前一时刻的值得到。

自相关和互相关矩阵的递归表达式为

$$\mathbf{C}_{xx}(k) = \mathbf{C}_{xx}(k-1) + \mathbf{x}(k)\mathbf{x}^T(k) \quad (12)$$

$$\mathbf{C}_{yx}(k) = \mathbf{C}_{yx}(k-1) + \mathbf{x}^T(k)\mathbf{y}(k) \quad (13)$$

$\mathbf{C}_{yx}(k)$ 的递归表达式代入系数向量表达式, 得:

$$\mathbf{h}^T(k) = \mathbf{C}_{yx}(k) \mathbf{C}_{xx}^{-1}(k) \quad (14)$$

$$\mathbf{h}^T(k) = [\mathbf{C}_{yx}(k-1) + \mathbf{x}^T(k)\mathbf{y}(k)] \mathbf{C}_{xx}^{-1}(k) \quad (15)$$

$$\mathbf{C}_{yx}(k-1) = \mathbf{h}^T(k-1) \mathbf{C}_{xx}(k-1) \quad (16)$$

$$\mathbf{h}(k) = \mathbf{C}_{xx}^{-1}(k) [\mathbf{C}_{xx}(k-1)\mathbf{h}(k-1) + \mathbf{y}(k)\mathbf{x}(k)] \quad (17)$$

用前面得到的表达式求出 $\mathbf{C}_{xx}(k-1)$, 并代入上式:

$$\mathbf{h}(k) = \mathbf{C}_{xx}^{-1}(k) \{ [\mathbf{C}_{xx}(k) - \mathbf{x}(k)\mathbf{x}^T(k)] \times \mathbf{h}(k-1) + \mathbf{y}(k)\mathbf{x}(k) \} \quad (18)$$

或

$$\mathbf{h}(k) = \mathbf{h}(k-1) + \mathbf{C}_{xx}^{-1}(k) [\mathbf{y}(k) \times \mathbf{x}(k) - \mathbf{x}(k)\mathbf{x}^T(k)\mathbf{h}(k-1)] \quad (19)$$

则滤波器系数的递归关系式为

$$\mathbf{h}(k) = \mathbf{h}(k-1) + \mathbf{C}_{xx}^{-1}(k) [\mathbf{y}(k) \times \mathbf{x}(k) - \mathbf{x}(k)\mathbf{x}^T(k)\mathbf{h}(k-1)] \quad (20)$$

其中

$$\mathbf{y}(k) - \mathbf{x}^T(k)\mathbf{h}(k-1) = \mathbf{e}(k) \quad (21)$$

$\mathbf{e}(k)$ 表示先验误差, 因为它是由前一个采样时刻的系数算出的。在实际中, 由于 $\mathbf{h}(k)$ 计算的复杂性而不能应用于实时控制。用 $\delta, \mathbf{I}$ 代换, 其中 δ 为自适应梯度, $\mathbf{I}$ 为辨识矩阵 (n, n) , 则

$$\mathbf{h}(k) = \mathbf{h}(k-1) + \delta \mathbf{x}(k) \mathbf{e}(k) \quad (22)$$

那么它就不再是一个严格最小二乘准则问题, 而是一个最小均方准则问题。

梯度算法的方程式为

$$\begin{cases} \mathbf{e}(k) = \mathbf{y}(k) - \mathbf{x}^T(k)\mathbf{h}(k-1) \\ \mathbf{h}(k) = \mathbf{h}(k-1) + \delta \mathbf{h}(k) \mathbf{e}(k) \end{cases} \quad (23)$$

如果后验误差小于或等于先验误差, 就认为算法稳定, 即

$$\boldsymbol{\varepsilon}(k) = \mathbf{h}(k) - \mathbf{h}_{\text{opt}} \quad (24)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}(k+1) = \mathbf{h}(k+1) - \mathbf{h}_{\text{opt}} \quad (25)$$

如果系统稳定, 则

$$\mathbf{E}[\boldsymbol{\varepsilon}(k+1)] < \mathbf{E}[\boldsymbol{\varepsilon}(k)] \quad (26)$$

其中:

$$\boldsymbol{\varepsilon}(k+1) = \mathbf{h}(k) + \delta \mathbf{x}(k+1) \mathbf{e}(k+1) - \mathbf{h}_{\text{opt}} \quad (27)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}(k+1) = \mathbf{h}(k) + \delta \mathbf{x}(k+1) [\mathbf{y}(k+1) - \mathbf{h}^T(k)\mathbf{x}(k+1)] - \mathbf{h}_{\text{opt}} \quad (28)$$

计算得:

$$\boldsymbol{\varepsilon}(k+1) = \boldsymbol{\varepsilon}(k) - \delta \mathbf{x}(k+1) \mathbf{x}^T(k+1) \boldsymbol{\varepsilon}(k) \quad (29)$$

满足 $\mathbf{E}[\boldsymbol{\varepsilon}(k+1)] < \mathbf{E}[\boldsymbol{\varepsilon}(k)]$ 的条件为

$$|\mathbf{E}[1 - \delta \mathbf{x}^2(k+1)]| < 1 \quad (30)$$

对于一个均值为零的信号为

$$\mathbf{E}[\mathbf{x}^2(k+1)] = n \sigma_x^2 \quad (31)$$

可得自适应梯度表示的稳定性条件为

$$0 < \delta < \frac{2}{n \delta^2} \quad (32)$$

有效地选择 δ 由自适应度与残差的折中产生, δ 越大越好, 并且残差和 δ 成比例。

2.2 自适应预测滤波器设计

本文采用基于自适应有限脉冲响应(FIR)预测滤波器。当 FIR 滤波器和 1 个单位的滞后单元串联时, 工作于预测状态, 自动调整参数, 提前一个采样周期预测信号。对于电流发生突变的情况, 由于自适应预测的作用, 预测精度也能够得到保证。

基于自适应 FIR 的预测滤波器结构如图 2 所示。

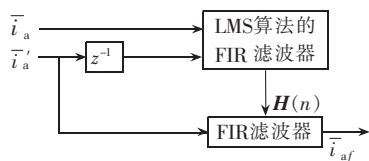


图 2 基于自适应预测滤波器结构

Fig.2 The structure of adaptive predictive filter

图中 $\bar{i}_a$ 是已规范化的 A 相电流信号, $\bar{i}_a'$ 是经过前置滤波器滤除了 $\bar{i}_a$ 中不希望的谐波和干扰信号, $\mathbf{H}(n)$ 是滤波器系数向量, $\bar{i}_{af}$ 是自适应滤波器的输出结果。

该滤波器系数是采用 Widrow-hoff 最小均方算法(LMS)实现的, 即

$$\mathbf{H}(n+1) = \mathbf{H}(n) + 2\mu \bar{\mathbf{e}}(n) \bar{\mathbf{i}}_a'(n-1) \quad (33)$$

$$\bar{\mathbf{e}}(n) = \bar{\mathbf{i}}_a(n) - \mathbf{H}^T(n) \bar{\mathbf{i}}_a'(n-1) \quad (34)$$

其中, 滤波器系数向量 $\mathbf{H}(n) = [\mathbf{h}(n), \dots, \mathbf{h}(N-1)]^T$ 。

由于收敛因子 μ 的取值对收敛速度有影响, 而其取值的大小又影响 LMS 算法的稳定性, 所以在自适应算法中, μ 的选取很重要。在实际应用时, 要根据对预测精度和速度的要求, 进行适当的调整。

自适应预测滤波器的输出为

$$\bar{\mathbf{i}}_{af} = \mathbf{H}^T(n) \bar{\mathbf{i}}_a'(n) \quad (35)$$

3 预测滤波器实验仿真

实验仿真输入信号为 50 Hz 正弦基波, 以含有 5, 7, 11 次谐波之和为例, 设输入 A 相电流信号为 $i(t) = 100 \sin \omega t + 50 \sin(5 \omega t + \pi/4) + 30 \sin(7 \omega t + \pi/6) + 10 \sin(11 \omega t + \pi/3)$ 。

当采样频率为 10 kHz 时, 仿真波形如图 3 所示。图 4 为输入的基波电流预测信号的误差。

从图 3 可看出, 基于自适应 FIR 的预测滤波器跟随性能非常好, 在 3/4 个基频周期内就能跟踪上基波变化, 是一种实时的谐波检测。对于基波分量

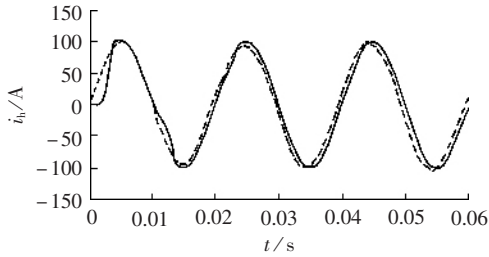


图 3 输入的基波电流信号及其预测信号

Fig.3 The input fundamental current and its predictive signal

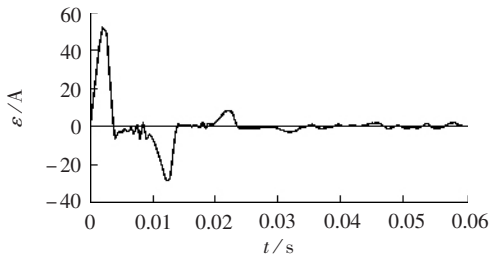


图 4 输入的基波电流预测信号的误差

Fig.4 The predictive error of input fundamental current

不变化时的仿真,时延只有 $3/4$ 个基频周期;在基波分量变化时,该预测滤波器同样具有良好的跟随性。

为了保证 LMS 算法的稳定性,收敛因子 μ 的取值应足够小, μ 的取值对收敛速度也有影响。仿真时,经过多次试验,所用预测滤波器的 $N=200$, $\mu=0.000\ 05$ 。这种取值对于预测滤波器的实时性较好,但是计算速度较慢。在实际应用时,要根据对预测精度和速度的要求,进行适当的调整。

4 结论

本文提出了一种预测型谐波检测方法,利用自适应 FIR 的预测滤波器对电网中的谐波进行检测。理论研究和仿真结果表明,该方法是一种实时的谐波检测,在 $3/4$ 个基频周期后,就可以跟踪上基波信号。在实际应用时,还要根据对预测精度和速度的要求,对收敛因子 μ 进行适当的调整。

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,1998.

[2] 孙云莲,易仕军,陈允平. 信号预测法及其在电力系统谐波抑制中的应用研究[J]. 武汉水利电力大学学报,2000,(3):77-79.

SUN Yun-lian, YI Shi-jun, CHEN Yun-ping. Study of signals predicted method and application in electric power pool[J]. **Journal of Wuhan University of Water Resources and Electric Power**, 2000, (3): 77-79.

[3] MOKHTARI M, MARIE M. Matlab 与 Simulink 工程应用[M]. 北京:电子工业出版社,2002.

[4] 程佩青. 数字信号处理教程[M]. 北京:清华大学出版社,2001.

[5] 刘开培,张俊敏. 基于 DFT 的瞬时谐波检测方法[J]. 电力自动化设备,2003,23(3):8-10.

LIU Kai-pei, ZHANG Jun-min. Instantaneous harmonic detecting based on DFT[J]. **Electric Power Automation Equipment**, 2003, 23(3): 8-10.

[6] AMIRAZODI J, YAZ E E, OLEJNICZAK K J. Adaptive prediction and control of harmonic signals in electric power systems[J]. **IEEE International Symposium on Circuits and Systems**, 1996, 13(1): 677-680.

[7] 钟 庆,吴 捷,杨金明,等. 现代控制理论在有源电力滤波器中的应用[J]. 电力自动化设备,2004,24(3):88-94.

ZHONG Qing, WU jie, YANG Jin-ming, et al. Overview of modern control theories in active power filters [J]. **Electric Power Automation Equipment**, 2004, 24(3): 88-94.

[8] 曹国剑,黄 纯,武艳华,等. 基于相位差校正的谐波测量算法研究[J]. 电力自动化设备,2004,24(10):11-15.

CAO Guo-jian, HUANG Chun, WU Yan-hua, et al. Research of harmonic measuring algorithm based on phase difference correction [J]. **Electric Power Automation Equipment**, 2004, 24(10): 11-15.

(责任编辑:汪仪珍)

作者简介:

戴丽萍(1975-),女,湖北黄冈人,讲师,硕士,主要从事电力电子、电子学教学方面研究(E-mail:dlp_y@sohu.com);

刘开培(1962-),男,湖北荆门人,教授,博士,博士研究生导师,主要从事电力传动智能控制、信号检测与处理、电能质量分析与控制等方面的研究。

Harmonic detection based on adaptively predictive filter

DAI Li-ping¹, LIU Kai-pei²

(1. Wuhan Institute of Chemical Technology, Wuhan 430073, China;

2. Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Precise and quick detection of current harmonic in power system is important for APF (Active Power Filter) performance. A real-time harmonic detection system based on adaptive FIR predictive filter is presented. The harmonic detection principle is discussed, and the least mean square algorithm is used to predict the signals to be detected. The FIR predictive filter is tested with Matlab. Results show its good performance, which can follow the fundamental variation within $3/4$ period.

Key words: active power filter; harmonic detection; prediction