

文章编号: 1001-0920(2004)12-1429-04

基于自适应滤波器的电网谐波电流预测法

粟 梅, 王莉娜, 张泰山, 罗 安
(中南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘 要: 提出一种新的基于 LMS 算法自适应滤波器的有源电力滤波器(APF)参考电流的预测方法, 针对传统 LMS 算法的缺陷(如收敛速度慢、对非平稳输入信号的适应性差等)作了 3 点改进, 这些改进措施可有效提高自适应滤波器的综合性能。仿真与实验结果证明, 采用该方法可有效减小延时对 APF 补偿效果的影响。

关键词: 有源电力滤波器; 自适应滤波; 谐波预测

中图分类号: TP13; TM 922

文献标识码: A

Harmonic prediction method based on adaptive filter

SU Mei, WANG Li-na, ZHANG Tai-shan, LUO An

(College of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Correspondent: SU Mei, E-mail: gsm10@163.com

Abstract: A new method based on adaptive filter to predict the reference current of active power filter is presented. To solve the drawbacks of the traditional LMS algorithm, such as slow convergence and poor adaptability to the non-smooth input, three modifying measures are proposed, which effectively improves the comprehensive performance of the adaptive filter. Simulation and experimental results show the effect of the proposed method to alleviate the detrimental influence of time delay inherent in the digital control system on the compensation effect of APF.

Key words: active power filter; adaptive filter; harmonic prediction

1 引 言

目前, 提高电网电能质量的趋势是采用 APF^[1], 而 APF 优良性能得以实现的前提是能即时、准确地获取其控制参考信号。但数字计算过程不可避免地引入延时, 造成 APF 补偿信号的相位滞后, 致使电网中仍残留有部分非期望电量, 影响其优良性能的发挥。

为解决延迟问题, 利用 APF 实现对参考信号的预测控制是一种有效的方法。文献[2]采用了神经网络预测算法, 其优点是任意逼近非线性, 缺点是计算复杂, 运算量大, 不宜于数字化实现, 而其模拟电路实现本身也是一大难题。文献[3]采用了自适应滤

波器法, 该算法简单, 易于数字化实现, 很适于被预测信号用一个通用模型(如多项式)近似表示的场合^[4]。而文献[3]是从总的电网电流中预测其将来采样时刻的基波电流, 并未真正实现 APF 的预测控制, 仍存在相位延迟。

鉴于上述问题, 本文以补偿电网谐波电流为例, 提出一种简单的基于自适应滤波器的 APF 预测控制方法, 从真正意义上实现了 APF 的预测控制, 有效地减小了延时的影响。仿真和实验结果均证明了所提出方法的有效性和可行性。

2 电网谐波预测法

2.1 自适应预测滤波算法

收稿日期: 2003-10-27; 修回日期: 2003-12-24

基金项目: 国家科技攻关项目(2002BA 218C)。

作者简介: 粟梅(1967—), 女, 湖南汉寿人, 副教授, 从事现代电力系统自动化理论和应用的研究; 王莉娜(1977—), 女, 河南郑州人, 博士生, 从事现代电力系统自动化理论和应用的研究。

基于 FIR 结构模型和 LMS 算法的自适应预测滤波器的原理如图 1 所示

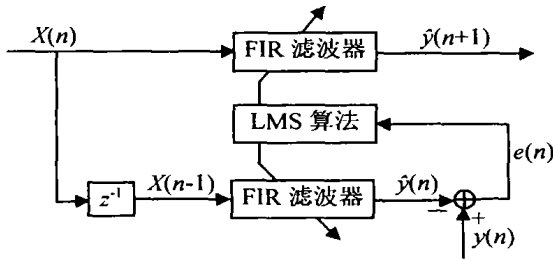


图 1 自适应预测滤波器原理

图中, $X'_N(n) = [x(n), x(n-1), \dots, x(n-N+1)]$ 为输入数据序列, z^{-1} 为单位延迟因子, $y(n)$ 为期望输出, $\hat{y}(n)$ 和 $\hat{y}(n+1)$ 为预测计算结果, 并有^[5]

$$\hat{y}(n+1) = \sum_{k=0}^{N-1} h_k x(n-k) = H'(n)X(n), \quad (1)$$

式中 $H'_N(n) = [h_0(n), h_1(n), \dots, h_{N-1}(n)]$ 为滤波器权系数向量 图 1 中, $e(n)$ 为期望输出与预测计算结果之间的误差, 即

$$e(n) = y(n) - \hat{y}(n). \quad (2)$$

LMS 算法即是根据该误差信号, 对滤波器系数进行反复的在线优化, 滤波器系数的更新迭代算式为^[5]

$$H_N(n+1) = H_N(n) + 2\mu e(n)X(n). \quad (3)$$

式中 μ 为收敛因子, 是影响 LMS 算法的稳定性、权系数的收敛速度、滤波器的动态跟踪性能及预测精度等的关键因素 快的系数收敛速度要求有较大的 μ 值, 而为了保证算法的稳定和一定的预测精度, μ 的取值又不能过大, 具体实现时应折中考虑

2.2 对传统 LMS 算法的几点改进

1) 规范化 LMS 算法

该项改进措施的目的是改善 LMS 算法对非平稳输入信号的适应性, 即用移动数据窗内输入数据绝对值的最大估计去除数据窗内所有的数据 此时, 滤波器系数滚动优化迭代算式变为

$$H(n+1) = H(n) + 2 \frac{\mu}{|\hat{x}_{\max}(n)|} e(n)X(n), \quad (4)$$

式中 $|\hat{x}_{\max}(n)|$ 即为当前数据窗内输入数据绝对值的最大估计 由式(4)可知, 从某种意义上来说, 规范化 LMS 算法相当于对收敛因子实现了在线自适应调整, 即根据输入数据的大小, 自动地取较大或较小的收敛因子

文献[5]采用的规范化 LMS 算法是用输入数据的能量来对数据窗内的数据进行规范化处理, 即

$$H(n+1) = H(n) + 2 \frac{\mu}{\|X(n)\|^2} e(n)X(n), \quad (5)$$

式中 $\|X(n)\|^2$ 为输入数据的能量 比较文献[5]中的规范化方法和本文提出的规范化方法, 在绝大多数情况下有

$$\frac{\mu}{|\hat{x}_{\max}(n)|} > \frac{\mu}{\|X(n)\|^2}, \quad (6)$$

因而文献[5]方法系数收敛的快速性不如本文方法

2) 收敛因子 μ 的在线自适应调整

由以上可知, 系数的收敛速度和滤波器的预测误差对 μ 的要求是不可调和的 为缓解这个矛盾, 借鉴系数的滚动优化思想和 RLS 算法调整精细性的优点, 对 μ 的取值进行在线滚动优化, 使得 μ 的取值能根据实时预测误差状况进行在线自适应调整, 从而使自适应预测滤波器在系数的收敛速度和预测精度两方面取得良好的性能

由于 μ 不断地进行滚动优化, 可记为 $\mu(n)$. $\mu(n)$ 的滚动优化目标是使函数

$$J(n) = \frac{1}{2} E[|e(n)|^2] \quad (7)$$

最小 式中

$$e(n) = y(n) - H'(n)X(n). \quad (8)$$

$J(n)$ 对 μ 求偏导, 得

$$\nabla_{\mu}(n) = \frac{\partial J(n)}{\partial \mu} = E\left[\frac{\partial e(n)}{\partial \mu} e(n)\right] \quad (9)$$

由式(8)得

$$\frac{\partial e(n)}{\partial \mu} = \frac{\partial H'(n)}{\partial \mu} X(n) = -\psi'(n)X(n), \quad (10)$$

式中

$$\psi'(n) = \frac{\partial H'(n)}{\partial \mu},$$

$$\nabla_{\mu}(n) = -E[\psi'(n)X(n)e(n)] \quad (11)$$

根据下式:

$$\mu(n+1) = \mu(n) + \alpha \nabla_{\mu}(n) \quad (12)$$

对 $\mu(n)$ 进行滚动优化 式中: α 为一个很小的正数 ($0 < \alpha < 1$), $\nabla_{\mu}(n)$ 可取其估计值 $\hat{\nabla}_{\mu}(n)$, 即

$$\hat{\nabla}_{\mu}(n) = -\psi'(n)X(n)e(n). \quad (13)$$

具体应用时要对 $\mu(n)$ 的取值范围加以限制 其中: $\mu_{\min}$ 的大小影响不大, 可取为一个很小的正实数或直接取为 0; 而 $\mu_{\max}$ 的取值很关键, 理论上其最优值为 $(\mu_{\max})_{\text{opt}} = (2/\lambda_{\max})^{0-}$, 但在动态情况下, $\lambda_{\max}$ 也

会出现波动, 一旦出现 $\mu(n) > 2/\lambda_{\max}$ 的情况, 就可能引发系统不稳定 因此, $\mu_{\max}$ 上限值的设置应格外注意, 不能过于冒险, 也不能过于保守, 具体应用时要反复通过实验来决定 其中 $\lambda_{\max}$ 为输入自相关阵的最大特征根

3) 增加各采样周期滤波器系数的更新迭代次数

通常情况下, 滤波器系数在每一采样周期进行一次更新迭代计算 在稳态情况下, 滤波器系数的 Wiener 最优解固定, 随着滚动优化过程的不断推进, LM S 算法逐步收敛至其最优解 显然, 若提高采样频率, 或固定采样频率而增加各采样周期内滤波器系数更新迭代的次数, 那么滤波器系数将会更快地收敛至其最优解

在动态情况下, 若动态变化相对于采样周期而言比较缓慢, 那么在一个采样周期之内, 系统可看成处于近似稳定状态, 滤波器系数的 Wiener 最优解固定 对于这种局部稳态, 类似于上述稳态情况, 增加 LM S 算法的迭代计算次数, 无疑将加快滤波器系数收敛至其局部最优解的速度 由于动态变化比较缓慢, 相邻两个采样周期滤波器系数的 Wiener 最优解变化不大, 前一采样周期的滤波器系数的收敛进程, 将有益于当前采样周期系数的收敛 对于系统从一个稳态突变至另一个稳态的情况, 同样有增加 LM S 算法的迭代计算次数, 将增加滤波器系数的收敛速度 而对于动态变化剧烈、且毫无规律可寻的情况, LM S 算法的自适应性将显著降低, 这是任何信号预测算法所无法解决的

综上可知, 在稳态情况下, 或对于平稳变化的信号, 增加各采样周期系数的更新迭代次数, 将加快权系数的收敛速度

3 仿真和实验结果

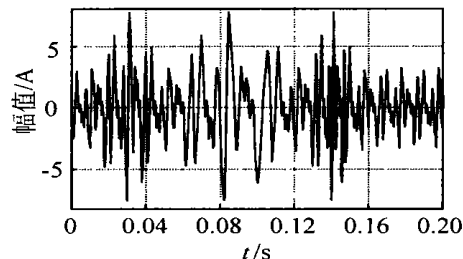
假设原始信号为

$$i_s(n) = 10\sin(\omega_1 n) + 0.8\sin(2\omega_1 n) + 1.6\sin(5\omega_1 n) + 1.2\sin(7\omega_1 n) + 0.5\sin(13\omega_1 n) + 0.2\sin(17\omega_1 n),$$

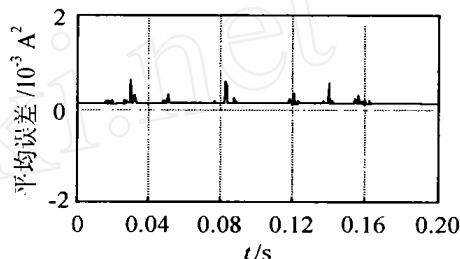
其中 $\omega_1 (= 2\pi \times 50 \text{ rad/s})$ 为信号基波角频率

采用上述 3 项改进措施后, 自适应预测滤波器的动态跟踪性能仿真结果如图 2 所示, 其中取 $N = 200$, 收敛因子的初值 $\mu(0) = 0.03$, $\mu_{\min} = 0$, $\mu_{\max} = 0.05$ 输入信号的基波频率从 0.03 s 时刻开始, 以 $20 \text{ Hz}/0.02 \text{ s}$ 的频率从 50 Hz 降为 30 Hz , 然后又上升到 50 Hz 输入信号的幅值从 0.02 s 时刻开始, 以

$1.5 \text{ A}/0.02 \text{ s}$ 的频率渐增又渐降 1.5 倍, 这样反复升降了 3 次



(a) 预测输出波形(虚线)和期望信号波形(实线)



(b) 预测平方误差

图 2 采用 3 项改进措施动态仿真曲线

由仿真结果可知, 在动态跟踪过程中, 其最大平方误差仅为 0.54853×10^{-3} 。这表明, 采用本文所述改进措施, 自适应预测滤波器的动态跟踪性能大幅度提高, 完全可用于预测电网谐波的情况

本文还对所提出方法进行了实验验证, 实验波形和实验数据均采用本实验室研制的湖南省重点新产品——“智能型电网谐波监视、分析、保护一体化装置”采样显示和分析的结果 补偿前电源支路的电流和电压的波形如图 3(a) 所示, 图 3(b) 为电流的傅立叶分析结果, 这里只显示了谐波状况 补偿前, 电网电流含有 4 种成分, 基波电流、五次、七次和九次谐波电流, 基波电流几乎超前电网电压 90° , 亦为待补偿内容, 因此补偿后电网电流应为 0 假设系统的平均延时为 $70 \mu\text{s}$, 采用常规的 APF 控制方法时的补偿结果如图 4 所示 由图可知, 由于延时的存在, 造成被补偿分量的不完全补偿 当采用本文所提出的预测控制方法时, 补偿结果如图 5 所示, 补偿效果较前者有明显提高, 可见 APF 的预测控制能有效地缓解延时影响

4 结 语

本文针对数字化控制系统延时对 APF 补偿效果的影响, 提出了基于自适应滤波器的电网谐波电流预测法, 所提出方法算法简单, 便于数字化实现

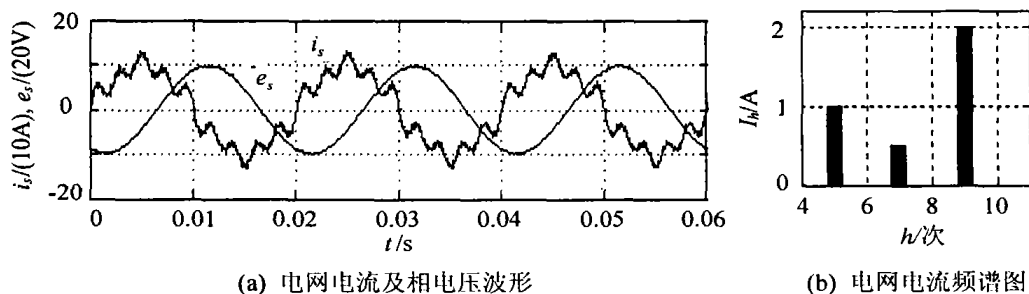


图3 补偿前电网电流、相电压波形及电网电流频谱图

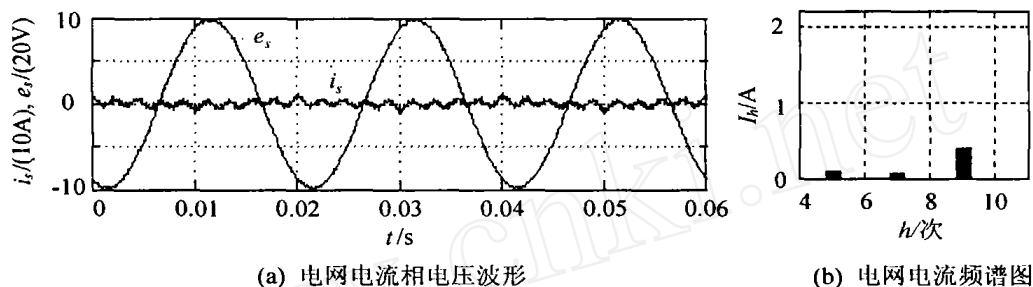
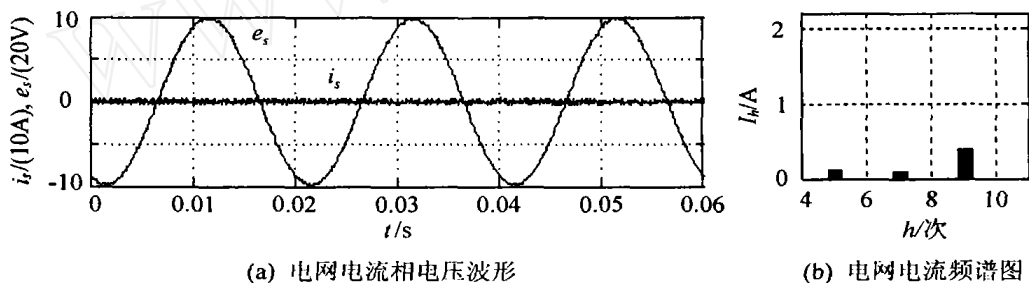
图4 平均延时为 70 μ s 时电网电流、相电压波形及电网电流频谱图

图5 采用 APF 参考电流预测方法时电网电流、相电压波形及电网电流频谱图

针对传统 LMS 算法的缺陷,文中做了 3 点改进,可有效提高 LMS 算法的综合性能。仿真和实验结果均验证了所提出方法的有效性。

参考文献(References):

- [1] Peng F Z. Applications issues of active power filters[J]. *IEEE Ind Appl Mag*, 1998, 4(5): 21-30.
- [2] John H Marks, Time C Green. Predictive transient-following control of shunt and series active power filters[J]. *IEEE Trans on Power Electron*, 2002, 17(4): 574-584.
- [3] Shoji Fukuda, Shun-ichi Sugawa. Adaptive signal processing based control of active power filters[A]. *IEEE IAS Annual Meeting*[C]. San Diego, 1996. 886-890.
- [4] Sami V, Seppo J, Jorma K. Adaptive signal processing system for accurate zero-crossing detection of cycloconverter phase currents[A]. *IEEE IAS Annual Meeting*[C]. New Orleans, 1997. 467-472.
- [5] Nagumo J I, Noda A. A learning method for system identification[J]. *IEEE Trans on Automat Control*, 1994, 39(2): 282-287.

本刊启事

由于目前来稿过多过滥,以及一稿多投、网上病毒等原因,本刊暂不接收网上稿件。以后投稿请寄纸稿(一式二份),写作格式参见本刊,并附作者简介及作者电话、手机和 E-mail,以便联系。

为适应国际检索系统的要求,本刊所有非英文书写的参考文献都要译成英文,附于原文献下。