

基于前向线性预测理论的混合电力滤波器 谐波电流预测方法

李圣清, 罗晓东, 李永安, 曾黎琳, 何政平

(湖南工业大学电气与信息工程学院, 湖南省 株洲市 412008)

A Harmonic Current Forecasting Method for Hybrid Active Power Filters Based on the Forward Linear Prediction Theory

LI Shengqing, LUO Xiaodong, LI Yongan, ZENG Lilin, HE Zhengping

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412008, Hunan Province, China)

ABSTRACT: It is considered as an effective method to improve the effects of hybrid active power filters on harmonic current prediction. A harmonic current forecasting method for hybrid active power filter based on the forward linear prediction theory was proposed in this paper. The optimal forecasting coefficient canonical equation, minimum forecasting errors and the rank update equation were deduced. As an example for low order filters, the forecasting coefficient and minimum forecasting errors of one-three order filters were given. According to harmonic currents and historical data of the on-line grid structure and loads, this method forecast harmonic currents of the next time, and could realize minimum errors compensation by the adaptive forecasting control. The simulation results show that the method has high forecasting precision, good fast tracking performance and compensation effects.

KEY WORDS: forward linear prediction theory; harmonic current; hybrid active power filter (HAPF); prediction

摘要: 对谐波电流进行预测是提高混合电力滤波器补偿效果的有效方法。提出基于前向线性预测理论的混合电力滤波器谐波电流预测方法。推导出最佳预测系数正则方程、谐波电流最小预测误差和阶更新方程, 给出 1~3 阶滤波器的预测系数和最小预测误差值。该方法能根据当前电网或负载的谐波电流和历史经验数据, 计算出下一时刻的谐波电流, 通过自

适应预测控制策略实现最小误差补偿。仿真和实验结果表明, 该方法具有预测精度高、快速跟踪能力强和补偿效果好等特点。

关键词: 前向线性预测理论; 谐波电流; 混合电力滤波器; 预测

0 引言

由无源滤波器和有源滤波器组成的混合型有源电力滤波器(hybrid active power filter, HAPF), 具有成本低和滤波效果好等诸多优点, 在电能质量调节与控制中起到越来越重要的作用^[1]。它主要由无源滤波器抑制谐波和补偿无功功率, 有源滤波器则只用来改善无源滤波器的滤波效果。实时、准确地检测负载中的谐波电流是提高 HAPF 补偿效果的重要环节^[1-2]。但是, HAPF 数字化控制器中的采样、A/D 转换、信号计算以及控制信号的离散化都会引入较为严重的延时^[3]。这都会造成 HAPF 发出的补偿电流在相位上滞后于电网实际谐波电流, 严重影响 HAPF 的补偿性能。对延时这一问题较好的解决办法是对谐波电流进行跟踪和预测, 然后根据预测值进行补偿^[3-19]。文献[4]内环控制器采用预测电流控制策略, 利用当前采样时刻状态信息, 预测下一个采样周期补偿电流的轨迹, 从而确定逆变器的开关函数, 使补偿电流跟随电流参考值变化, 实现谐波电流预测控制, 但存在计算比较复杂等缺点。文献[5]采用神经网络预测方法, 其优点是跟踪检测能力较强, 缺点是难以实现数字化, 而其模拟电路实现本身也是比较困难的。文献[6]提出了一种改进型

基金项目: 国家自然科学基金项目(51077046); 湖南省自然科学基金项目(09JJ6070); 湖南省教育厅重点科研项目(09A022)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51077046); Project Supported by Hunan Natural Science Foundation of China (09JJ6070); The Research Foundation of Education Department of Hunan Province (09A022).

自适应谐波电流预测方法，利用自适应算法和内插值算法相结合来实现有源电力滤波器谐波电流的预测，具有较高的精度和较强的自适应调整能力。本文基于前向线性预测理论，准确预测出下一个采样周期的补偿电流，实现谐波电流的最小误差补偿，大大提高了 HAPF 的谐波电流补偿效果。

1 前向线性谐波电流预测方法

1.1 最佳线性预测系数及最小预测误差

设谐波电流信号 $x(t)$ 在 $t=0, T, \dots, nT, \dots$ 的采样值分别为 $x(0), x(1), \dots, x(n-m), \dots, x(n-1), x(n), \dots$ ，其中 T 为采样周期。若已知其中的 $x(n-1), \dots, x(n-m)$ 等 m 个值，则谐波电流线性预测值和预测误差值^[3]分别为

$$\hat{x}(n) = \sum_{k=1}^m a_{mk} x(n-k) \quad (1)$$

$$e_m(n) = x(n) - \hat{x}(n) = x(n) - \sum_{k=1}^m a_{mk} x(n-k) \quad (2)$$

式中： $x(n)$ 为其真值； a_{mk} 为线性预测系数。

对式(2)进行 z 变换，可得

$$E_m(z) = X(z) - \sum_{k=1}^m a_{mk} z^{-k} X(z) \quad (3)$$

式中 $E_m(z)$ 、 $X(z)$ 分别为 $e_m(n)$ 、 $x(n)$ 的 z 变换。

由式(3)可知传输函数为

$$H_m(z) = 1 - \sum_{k=1}^m a_{mk} z^{-k} \quad (4)$$

不同的线性预测系数得到不同的预测误差，使误差 $e_m(n)$ 均方值最小的预测系数称为最佳预测系数。令 $E\{[e_m(n)]^2\}$ 对 a_{mk} 的偏导数为 0，并代入式(2)，可得

$$E\{e_m(n)x(n-k)\} = 0 \quad (5)$$

式中 $1 \leq k \leq m$ 。

由式(2)、(5)可得

$$E\{x(n)x(n-k)\} - \sum_{i=1}^m a_{mi} E\{x(n-i)x(n-k)\} = 0 \quad (6)$$

因为对实平稳过程 $x(n)$ 的相关函数为 $r(n) = E\{x(n)x(n-k)\}$ 。且有 $r(-k) = r(k)$ 。因此，最佳预测系数必须满足的正则方程以及预测系数的阶更新方程分别为

$$r(k) - \sum_{i=1}^m a_{mi} r(k-i) = 0 \quad (7)$$

$$a_{mk} = a_{m-1,k} + k_m a_{m-1,m-k}^* \quad (8)$$

式中： k_m 为反射系数； $k_m a_{m-1,m-k}^*$ 为 k_m 与 $a_{m-1,m-k}$ 内积的标量形式。

由式(5)–(7)可求得对应于最佳 a_{mk} 的谐波电流最小预测误差以及预测误差的阶更新方程：

$$\varepsilon_m = E\{e_m^f[x(n) - \sum_{i=1}^m a_{mi} x(n-i)]\} = r(0) + \sum_{i=1}^m a_{mi} r(i) \quad (9)$$

$$\varepsilon_m = \varepsilon_{m-1} (1 - |k_m|^2) \quad (10)$$

由 Levinson-Durbin 算法^[3]可求出低阶预测滤波器的最佳预测系数和最小预测误差值，分别为：

1) 1 阶预测滤波器， $a_{10} = 1$ ， $a_{11} = k_1$ ， $\varepsilon_1 = \varepsilon_0 (1 - |k_1|^2)$ ；

2) 2 阶预测滤波器， $a_{20} = 1$ ， $a_{21} = k_1 + k_2 k_1^*$ ， $a_{22} = k_2$ ， $\varepsilon_2 = \varepsilon_1 (1 - |k_2|^2)$ ；

3) 3 阶预测滤波器， $a_{30} = 1$ ， $a_{31} = a_{21} + k_3 k_2^*$ ， $a_{32} = k_2 + k_3 a_{21}^*$ ， $a_{33} = k_3$ ， $\varepsilon_3 = \varepsilon_2 (1 - |k_3|^2)$ 。

综上所述，该模型给出了最佳预测系数、最小预测误差值以及预测系数和预测误差的及时更新，从而确保了该方法预测电力谐波的高精确度和快速跟踪能力。

1.2 谐波电流预测

基于前向线性预测理论的 HAPF 谐波电流预测方法如图 1 所示。它由谐波电流检测、预测、控制和补偿模块组成。

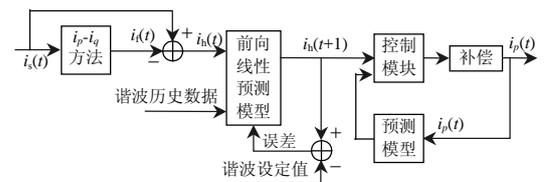


图 1 谐波电流预测方法

Fig. 1 Harmonic current forecasting method

谐波电流检测模块采用 i_p-i_q 算法，计算出 t 时刻电网或负载的基波电流，与电网或负载电流叠加后得到 t 时刻谐波电流，并将其送入预测模块。预测模块采用前向线性预测方法，根据 t 时刻电网或负载的谐波电流和历史经验数据，计算出 $t+1$ 时刻的谐波电流。具体而言，从当前时刻开始，从电网或负载过去 2 个周期的谐波电流数据中等间隔地抽取 $i_h(t-7)$ ， $i_h(t-6)$ ， \dots ， $i_h(t)$ 等 8 个数据，建立线性预测模型。根据这些历史谐波数据，采用该方法预测从当前采样周期开始第 k 个采样周期电网或负载的

谐波电流。该算法每 k 个采样周期执行 1 次，并完成滤波器预测系数的自适应调整，确保下个采样周期到来之前，新的滤波器预测系数准备就绪。其优点是滤波器预测系数的自适应调整不影响预测功能程序的执行，并确保有充裕的时间完成预测系数的自适应调整运算。为了提高预测精度，将线性预测模型输出的部分谐波值与谐波设定值相比较，得出模型的预测误差，再利用该误差来校正预测值，得到更为准确的谐波电流预测值，确保实现最小误差补偿。

控制模块采用自适应模糊控制算法，计算出下一时刻脉宽调制信号，实现对 HAPF 主电路的控制作用。这里的模型预测加反馈校正的过程，使得该方法具有较强的抗干扰和克服系统不稳定性的能力，且鲁棒性好。

2 仿真与实验

2.1 仿真

在仿真软件 Matlab 中建立 HAPF 仿真模型。HAPF 为 380V/100kVA 滤波系统，交流侧串联等效阻抗为 0.02Ω ，并联等效阻抗为 460Ω ，电抗器电感值为 1.8mH ，直流侧电容为 $300 \mu\text{F}$ ，电压为 550V ，三角载波频率为 3000Hz 。

1) 三相负载电流幅度不平衡情况。

图 2(a)为补偿前三相不平衡负载电流波形，在

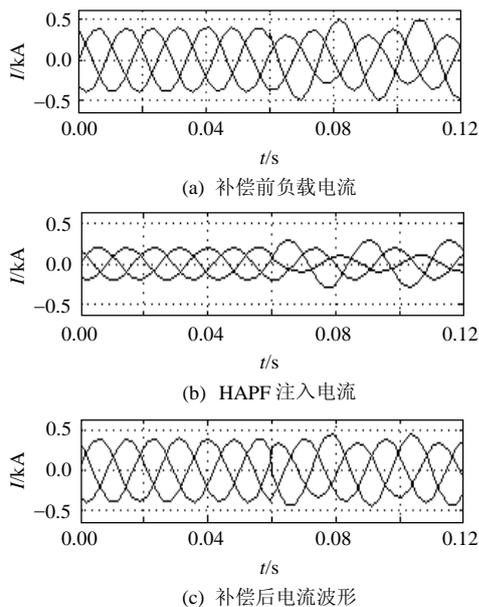


图 2 LMS 方法的 HAPF 三相电流幅度补偿
Fig. 2 Three-phase current amplitude compensation waveform of LMS method

0.06s 时改变负载使得 A、B 两相幅度变化；图 2(b)、(c)为基于最小均方(least mean square, LMS)预测方法的 HAPF 注入电流和补偿后电流波形。由图可见，三相幅度不平衡现象虽然得到了改善，但是 A 相电流幅度仍然明显高于其他两相。图 3 为基于前向线性预测方法的 HAPF 注入电流和补偿后电流波形(补偿前三相不平衡负载电流同图 2(a))，三相幅度不平衡问题基本得到解决，三相电流的幅度大小几乎相等，而且响应速度快，表现出良好的幅度跟踪效果。

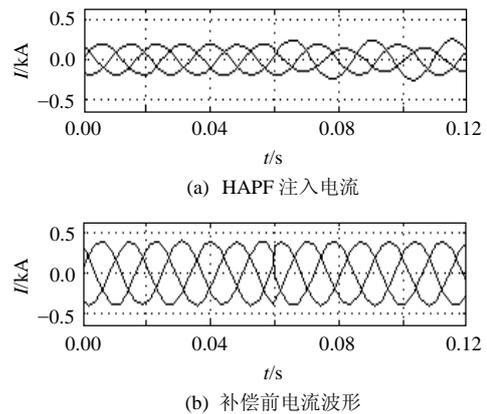


图 3 前向线性预测方法的 HAPF 三相电流幅度补偿
Fig. 3 Three-phase current amplitude compensation waveform of optimal linear prediction

2) 三相负载电流相位不平衡情况。

图 4(a)为补偿前三相相位不平衡负载电流波形，仍然在 0.06s 时改变负载使得三相相位失真。

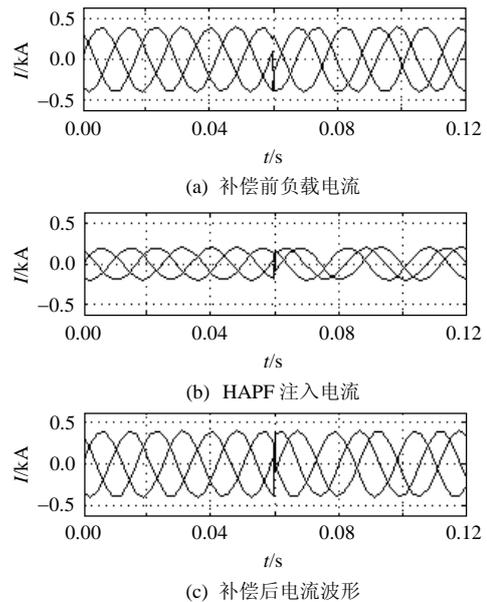


图 4 LMS 方法的 HAPF 三相电流相位补偿
Fig. 4 Three-phase current phase compensation waveform of LMS method

图 4(b)、(c)为基于 LMS 预测方法的 HAPF 注入电流和补偿后电流波形，补偿后的相位失真得到一些改善，但仍有比较严重的相位失真。图 5 为基于前向线性预测理论的 HAPF 注入电流和补偿后电流波形(补偿前三相不平衡负载电流同图 5(a))，补偿后的三相负载电流相位基本对称，其相位补偿效果明显高于 LMS 方法，而且表现出良好的相位跟踪效果。

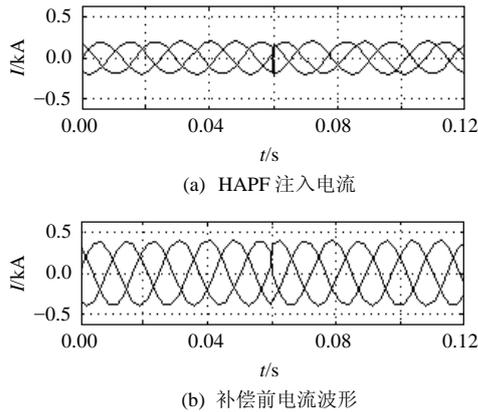


图 5 前向线性预测方法的 HAPF 三相电流相位补偿
Fig. 5 Three-phase current phase compensation waveform of optimal linear prediction

2.2 实验

为了进一步验证本文所提预测控制方法的正确性，在为某企业设计的 HAPF 上进行了实验，HAPF 的拓扑结构如图 6 所示。其中无源滤波器主要由 3、5、7、9、11 次滤波器组成，有源滤波器主要由谐波检测、预测、控制和补偿电路等组成，其主要参数见文献[8-9]。

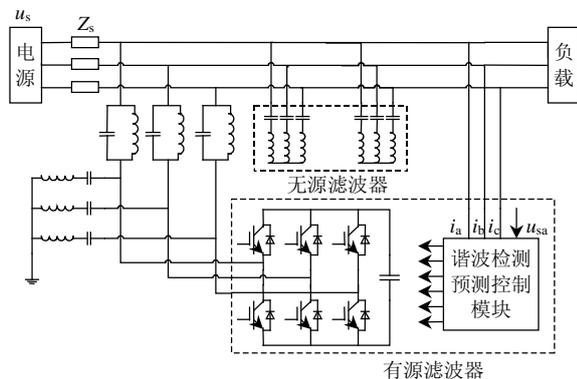


图 6 HAPF 拓扑结构
Fig. 6 Topology of HAPF

HAPF 投运前网侧电流波形如图 7(a)所示，波形畸变比较严重。HAPF 投运后，采用 LMS 方法及前向线性预测方法的网侧电流波形如图 7(b)、(c)所

示。对比图 7 中的 3 个电流波形可见，基于前向线性预测方法的 HAPF 谐波畸变率大大减小，其波形十分接近正弦波。

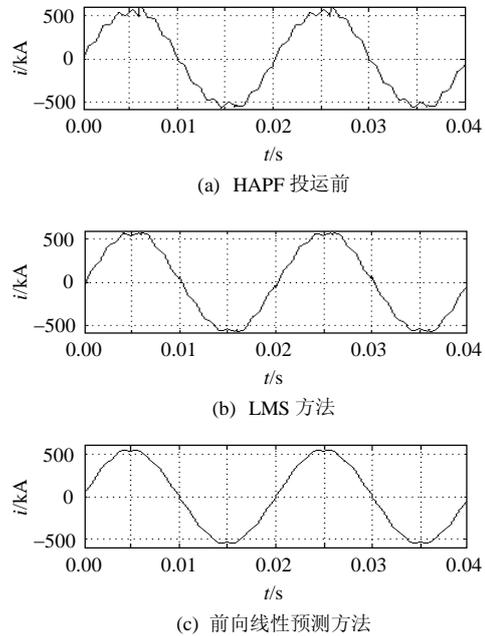


图 7 网侧电流波形

Fig. 7 Waveforms of system currents

网侧电流中 3、5、7、9、11 次谐波畸变率及谐波总畸变率如表 1 所示。分析表 1 中的各次谐波畸变率，不难得出本文提出的线性预测控制策略大大提高了混合型有源滤波器的滤波效果。

表 1 网侧电流中主要谐波的畸变率

Tab. 1 Harmonic η_{THD} of system currents

预测方法	主要谐波畸变率/%					谐波总畸变率/%
	3 次	5 次	7 次	9 次	11 次	
滤波前	19.12	18.82	9.20	15.04	11.52	28.6
LMS 方法	2.75	2.05	0.82	2.12	1.29	4.1
本文预测方法	1.02	0.97	0.82	0.90	0.96	1.6

3 结论

本文提出了基于前向线性预测理论的 HAPF 谐波电流预测方法，并成功用于 HAPF 谐波电流预测中。仿真和实验结果表明：该方法能准确预测下一时刻的谐波电流，通过自适应模糊控制策略，实现谐波电流最小误差补偿。当三相负载幅度和相位不对称时，该方法均能对快速变换的各次谐波电流进行准确的预测和补偿，相比 LMS 方法其具有预测精度高、快速跟踪能力强和补偿效果好等优点。

参考文献

- [1] Mattavelli P, Marafao F P. Reactive-based control for selective harmonic compensation in active powerfilters [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2004, 51(5): 1018-1024.
- [2] Sensarma P S, Padiyar K R, Ramanarayanan V. Analysis and performance evaluation of a distribution station for compensating voltage fluctuations[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2001, 16(2): 259-264.
- [3] Haykin S. Adaptive filter theory[M]. 4th ed.. USA: Pearson Education, 2002: 183-187.
- [4] Yu K K C, Watson N R, Arrillaga J. An adaptive Kalman filter for dynamic harmonic state estimation and harmonic injection tracking[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 1577-1584.
- [5] Marks J H, Green T C. Predictive transient-following control of shunt and series active power filters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2002, 17(4): 574-584.
- [6] 漆铭钧, 罗安, 刘定国, 等. 有源电力滤波器参考电流的预测方法及其实现[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(7): 128-134.
- Qi Mingjun, Luo An, Liu Dingguo, et al. Prediction of the reference current of active power filter and its realization[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(7): 128-134(in Chinese).
- [7] Han B, Bae B, Kim H, et al. Combined operation of unified power quality conditioner with distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(1): 330-338.
- [8] 李圣清, 周有庆, 朱英浩, 等. 基于加权一阶局域理论的综合电力滤波器谐波电流预测方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 19-23.
- Li Shengqing, Zhou Youqing, Zhu Yinghao, et al. Harmonic current prediction method of combined power filter system based on weighted first-order local area theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 19-23(in Chinese).
- [9] 李圣清, 朱英浩, 周有庆, 等. 基于交互式多目标遗传算法的无源滤波器优化设计[J]. 电工技术学报, 2003, 18(6): 1-6.
- Li Shengqing, Zhu Yinghao, Zhou Youqing, et al. Optimal design of passive power filters based on interaction multi-modal genetic algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2003, 18(6): 1-6(in Chinese).
- [10] Karimi H, Karimi-Ghartemani M, Reza Iravani M, et al. An adaptive filter for synchronous extraction of harmonics and distortions[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(4): 1350-1356.
- [11] Fukuda S, Sugawa S. Adaptive signal processing based control of active power filters[C]//IEEE IAS Annual Meeting, San Diego: IEEE, 1996: 50-54.
- [12] Wang Qun, Wu Ning, Wang Zhaoan. A neuron adaptive detecting approach of harmonic current for APF and its realization of analog circuits[J]. IEEE Transactions on Instrumentation Measurement, 2001, 50(1): 77-84.
- [13] Cutri R, Matakas L J. A new instantaneous method for harmonics, positive and negative sequence detection for compensation of distorted currents with static converters using pulse width modulation[C]//International Conference on Harmonics and Quality of Power, New York: IEEE, 2005: 33-36.
- [14] Soares V, Verdelho P, Marques G D. Instantaneous active and reactive current component method for active filters [J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2000, 15(4): 660-669.
- [15] Mohamed Y R, El-Saadany E F. Robust high bandwidth discrete-time predictive current control with predictive internal model: a unified approach for voltage-source PWM converters[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2008, 23(1): 126-136.
- [16] Wakileh G J. Power systems harmonics fundamentals, analysis and filter design[M]. Berlin: Germany Springer Press, 2001: 87-88.
- [17] Mastromauro R A, Liserre M, Kerekes T, et al. A single-phase voltage-controlled grid-connected photovoltaic system with power quality conditioner functionality [J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2009, 56(11): 4436-4444.
- [18] Cheng Zhongyuan, Wu Bin. A novel switching sequence design for five-level NPC/H-bridge inverters with improved output voltage spectrum and minimized device switching frequency[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(6): 2138-2145.
- [19] Singh B N, Singh B, Chandra A, et al. An improved control algorithm for active filters[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(1): 1009-1020.



李圣清

收稿日期: 2011-07-28。

作者简介:

李圣清(1961), 男, 博士, 教授, 主要从事电力系统谐波的分析与治理、电能质量调节与控制等方面的研究工作, lsq1961@sohu.com;

罗晓东(1984), 男, 硕士研究生, 主要研究电能质量调节与控制技术。

(责任编辑 谷子)