

## 基于傅立叶级数的自适应谐波检测算法\*

马立新 周磊 王亮 张海兵

(上海理工大学光电信息与计算机工程学院 上海 200093)

**摘要:**传统的自适应谐波检测都是采用含有积分器的噪声对消原理,而对含有交流分量的信号积分导致得到的直流信号存在脉动。针对这一问题,本文在自适应算法的基础上,提出了基于傅立叶级数的自适应谐波检测算法。运用傅立叶级数的分解原理,通过自适应算法快速修正傅立叶级数的各次系数值,分解出基波有功和无功电流的幅值,再将基波有功和无功电流的幅值分别与锁相环所得的与电压同相位的单位正余弦信号相乘得到基波有功和无功电流。仿真结果表明本文提出的方法能快速准确地得到稳定的基波有功和无功电流的幅值,抑制了直流信号的脉动。

**关键词:**谐波检测;自适应算法;傅立叶级数;有源电力滤波器

**中图分类号:** TM935 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

## Adaptive harmonic detection algorithm based on fourier series

Ma Lixin Zhou Lei Wang Liang Zhang Haibing

(University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** Noise cancellation is used in the traditional adaptive harmonic detection algorithm containing integrator, but the direct signal which is gained from integrating the original signal containing active components will fluctuate. In order to handle this issue, this paper proposes an adaptive harmonic detection algorithm based on Fourier series. Applying the decomposition principle of Fourier series, the adaptive algorithm is used to correct the coefficients of every order's Fourier series, and then the fundamental active and reactive current amplitudes are gained. The fundamental active and reactive current can be calculated by multiplying the fundamental active and reactive current amplitudes respectively with the unit sin and cos signals which are output by PLL. The simulation proves that the method proposed in this paper can fast detect the fundamental active and reactive current amplitudes steady and depress the ripple of DC signal.

**Keywords:** harmonic detection; adaptive algorithm; Fourier series; APF

## 1 引言

生产生活中大量电力电子设备、电弧炉等非线性负载向电网中注入了大量的谐波,谐波不仅增加了输配电线路的附加损耗,还会对附近的通信系统以及精密加工设备产生干扰和影响,有时还有可能造成电网发生局部谐振,甚至造成严重事故,而分布式间歇性电源的接入电网又进一步增加了电网的谐波含量和谐波环境的复杂性<sup>[1-3]</sup>。APF(有源电力滤波器)作为一种快速以及高度可控的谐波和无功补偿设备,得到了更加广泛的应用,而谐波电流检测的精度和速度是 APF 高效滤除谐波的基础和前提<sup>[4-5]</sup>。

基于瞬时无功功率理论的谐波电流检测方法,因为低通滤波器的使用降低了谐波检测的精度和动态跟踪速度<sup>[6]</sup>。神经网络和遗传算法虽然有些方面的优异性,但

是其不仅设计和实现比较复杂而且需要大量的数据进行训练<sup>[7]</sup>。自适应具有良好的学习能力,传统的自适应谐波检测算法大多是基于噪声对消原理,国内外很多学者在此基础上提出了很多改进方法来提高算法的收敛速度,然后很少有人关注该算法检测的基波电流幅值存在波动,以至于得到的基波电流还存在谐波<sup>[8-13]</sup>。本文将傅立叶级数理论与自适应算法相结合,提出了基于傅立叶级数的自适应谐波检测算法。

## 2 自适应谐波检测原理

## 2.1 噪声对消自适应谐波检测算法

假设电网电压  $u_s(t) = U_s \sin \omega t$ , 负载电流  $i_L(t) = I_1 \sin(\omega t + \theta_1) + \sum_{n=2}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \theta_n)$ , 以图 1 上支路检测基波

收稿日期:2015-08

\* 基金项目:上海市张江国家自主创新重点项目(201310-PI-B2-008)、沪江基金(C14002)

有功电流  $i_p(t)$  为例,刚开始图1检测算法输出  $i_h(t)$  中含有基波和谐波的混合量,将  $\sin\omega t$  与  $i_h(t)$  相乘,得:

$$\begin{aligned} i_h(t) \cdot u(t) &= i_h(t) \cdot \sin\omega t = (i_p + i_q + i_h) \sin\omega t = \\ &= (I_1 \cos\theta_1 \sin\omega t + I_1 \sin\theta_1 \cos\omega t + i_h) \sin\omega t = \\ &= 0.5(I_p - I_p \cos 2\omega t + I_p \sin 2\omega t) + i_h \sin\omega t \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $I_p = I_1 \cos\theta_1$ 。

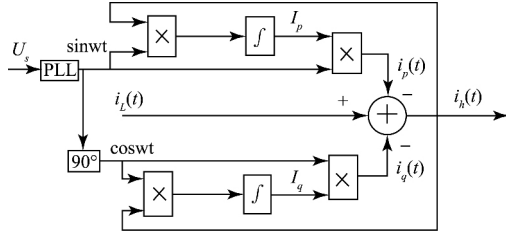


图1 噪声对消自适应谐波检测算法原理图

从式(1)的结果中可看出,算法检测输出的信号  $i_h(t)$  与  $\sin\omega t$  相乘后得到的结果有直流分量也有正余弦交流分量,并且直流分量仅仅与基波电流的有功分量相关。由于对正余弦交流分量积分一个周期后积分结果为0,而直流分量经过积分器后得到直流量  $I_p$ ,  $I_p$  与  $\sin\omega t$  相乘,得出的结果  $i_p = I_p \sin\omega t$  与  $\sin\omega t$  相位相同,负载电流  $i_L(t)$  减去  $i_p$  即可消除部分有功基波电流。检测过程中,  $I_p$  不断地增大或减小,直到系统最终输出不含电流的基波有功电流分量,实际情况是正余弦交流分量积分只有刚好达到一个周期时,其输出结果才为0,而没达到一个周期时积分结果不为0,如同一个小信号叠加在  $I_p$  上,使  $I_p$  产生波动。同理,获得  $I_q$  和  $i_q$ 。

## 2.2 基于傅立叶级数的自适应谐波检测算法

设电网电压  $u_s(t) = U_s \sin\omega t$ , 负载电流:

$$\begin{aligned} i_L(mT) &= I_1 \sin(\omega t_m + \theta_1) + \sum_{n=2}^{\infty} I_n \sin(n\omega mT + \theta_n) = \\ &= I_p \sin(\omega t_m) + I_q \cos(\omega t_m) + \\ &= \sum_{n=2}^{\infty} (I_{np} \sin(n\omega mT) + I_{nq} \cos(n\omega mT)) \end{aligned} \quad (2)$$

因为电网中电压和电流是半波对称的,所以傅立叶级数中没有偶次谐波分量,并且在平衡的三相三线制系统中,没有3的整数倍谐波,而且随着谐波次数的增加谐波幅值逐渐减小,并受到电流传感器的检测精度以及采样频率的限制对于23次以上的谐波可以忽略不计,所以,检测的电流可以近似于只含有基波电流以及5、7、13、17、19、23次谐波电流,令:

$$H_m = [\sin(\omega t_m) \quad \cos(\omega t_m) \quad \sin(5\omega mT) \quad \cos(5\omega mT) \quad \cdots \quad \sin(23\omega mT) \quad \cos(23\omega mT)]^T_{1 \times 14} \quad (3)$$

$$Z_m = [I_p \quad I_q \quad I_{5p} \quad I_{5q} \quad \cdots \quad I_{23p} \quad I_{23q}]^T_{1 \times 14} \quad (4)$$

那么:

$$i_L(mT) \approx Z_m H_m \quad (5)$$

将  $Z_m$  作为在线训练的权值,以误差的平方作为目标函

数,即:

$$E = (i_m - Z_m H_m)^2 = e^2 \quad (6)$$

当  $e^2$  小于设定的误差值时  $Z_m$  不作调整,当  $e^2$  大于设定的误差值时  $Z_m$  采用梯度下降法调整,其中  $\eta$  是自适应算法的调整步长:

$$Z_m = Z_{m-1} - \eta \nabla E(Z_m) \quad (7)$$

$$\nabla E(Z_m) = -2e \cdot H_m \quad (8)$$

基波有功电流  $i_p$  可表示为:

$$i_p = I_p \cdot \sin(\omega t_m) \quad (9)$$

基波无功电流  $i_q$  可表示为:

$$i_q = I_q \cdot \cos(\omega t_m) \quad (10)$$

图2是基于傅立叶级数自适应算法的流程图,在本文仿真中取自适应算法的步长  $\eta = 0.01$ ,基波频率为50 Hz。整个计算过程如图2所示,与传统的自适应谐波检测算法一样,本算法中的与电压基波同相位的单位正余弦信号也由 PLL 锁相环获得。

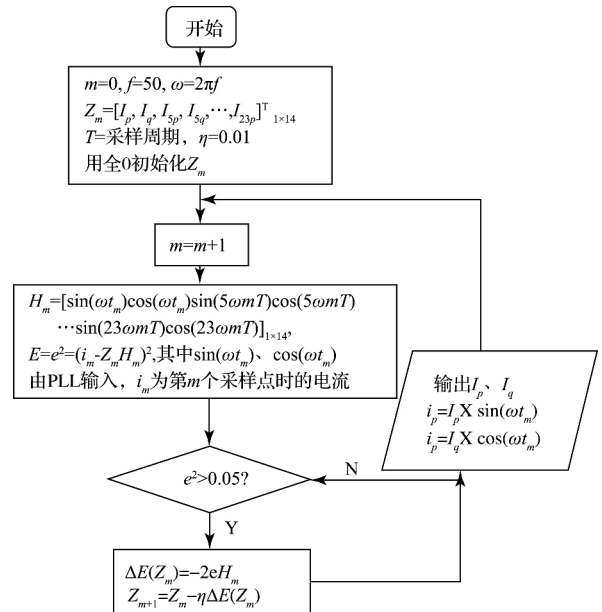


图2 基于傅立叶级数的自适应谐波检测算法流程图

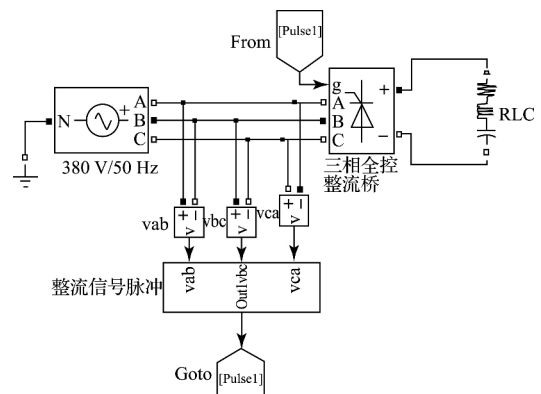
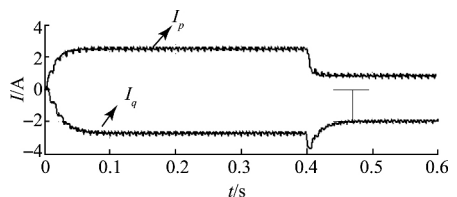


图3 电路仿真图

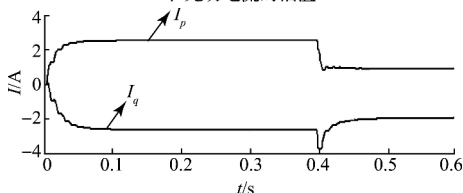
### 3 仿真验证

在 MATLAB/Simulink 下建立如图 3 带有非线性负载的电路。其中电源电压为 380 V, 频率为 50 Hz, 电路负载为晶闸管控制的三相全控桥整流电路, 负载直流侧为阻感容负载, 其中电阻  $R = 100 \Omega$ , 电感  $L = 2 \text{ H}$ , 电容  $C = 1 \text{ F}$ ,  $0 \sim 0.4 \text{ s}$  时晶闸管的触发角始终为  $0^\circ$ , 在  $0.4 \sim 0.6 \text{ s}$  晶闸管的触发角为  $30^\circ$ 。

图 4(a)、(b) 分别为两种算法得到的基波有功和无功电流的幅值, 从图 4(a) 可以看出, 用传统的噪声对消自适应算法检测的基波有功、无功电流幅值一直在波动, 从图 4(b) 可以看出本文提出的基于傅立叶级数的自适应算法检测的基波有功、无功电流幅值基本上不存在波动, 而基波电流由基波有功、无功电流的幅值与电压同相位的单位正弦和余弦信号相乘后叠加得到, 由于传统算法中检测的基波幅值在不停地波动, 就造成了基波电流发生畸变, 以至于得到的基波电流中仍含有谐波。图 5(a)、(b) 为  $0.2 \sim 0.3 \text{ s}$  间两种算法得到基波电流的波形, 从图 5(a) 可以明显地看出传统自适应算法产生的信号仍是畸变的。对于同一个畸变的负载电流, 从图 5(b) 可以看出以本文算法得到基波电流基本上不存在畸变。图 6(a)、(b) 分别为两种算法检测的基波电流信号的频谱分析图, 从图中可以明显地看出本文算法检测基波信号的畸变率为 0, 而传统噪声对消自适应算法检测的基波信号畸变率高达 3.98%。晶闸管的触发角在  $0.4 \text{ s}$  时发现变化, 负载电流也随之发生改变, 通过图 4 可以看出两种算法对负载电流变化都作出了较快的响应, 响应速度相当。

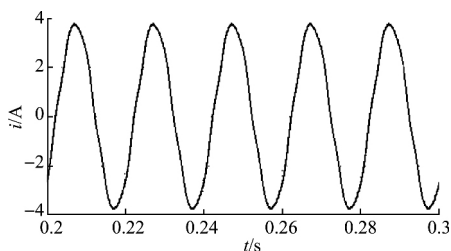


(a) 传统的噪声对消自适应检测的基波有功和无功电流的幅值

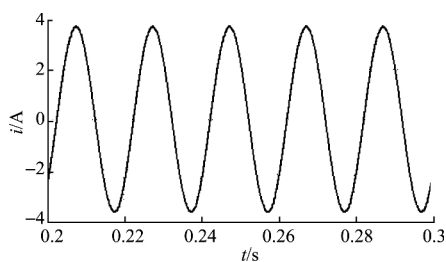


(b) 本文提出算法检测的基波有功和无功电流的幅值

图 4 两种算法检测的基波有功和无功电流的幅值

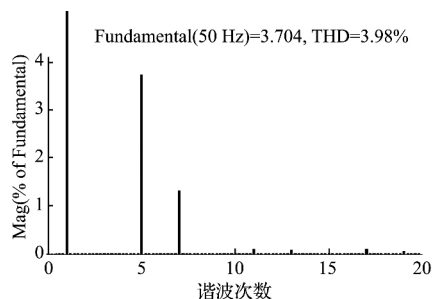


(a) 传统的噪声对消自适应得到的基波电流波形

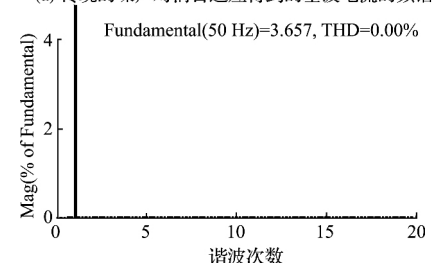


(b) 本文提出算法得到的基波电流波形

图 5 两种算法得到的基波电流波形



(a) 传统的噪声对消自适应得到的基波电流的频谱



(b) 本文提出算法得到的基波电流的频谱

图 6 两种算法得到的基波电流的频谱

### 4 结论

积分器的噪声对消原理常用于传统的自适应谐波检测, 但其对含有交流分量的信号积分时得到的电流会存在脉动, 使得检测结果不准确。本文提出了基于傅立叶级数的自适应检测算法, 和传统的噪声对消自适应检测算法相比, 基于傅立叶级数的自适应算法检测的基波有功、无功电流幅值基本不存在波动, 基波电流波形没有畸形, 基波电流的检测精度显著提高。

在 MATLAB/Simulink 下的仿真结果表明本文算法在不牺牲响应时间的基础上, 提高了基波电流的检测精度, 为 APF 提供可靠、精确的实时谐波指令信号, 提高了 APF 的补偿性能。

### 参考文献

- [1] 林海雪. 电能质量指标的完善化及其展望[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5073-5079.
- [2] 张艳军, 杨晟飞, 张荣. 一种无谐波检测的并联型电能质量调节器[J]. 电力电子技术, 2015, 49(1): 85-87.
- [3] 肖助力, 龚仁喜, 陈双, 等. 基于改进 S 变化的电力系统谐波检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43

- (3):84-90.
- [4] 李达义,孙玉鸿,熊博,等.一种并联型有源电力滤波器的新型控制方法[J].电力系统及其自动化,2014,38(15):112-117.
- [5] 王俊杰,姚钢,郑益慧,等.有源电力滤波器多重因子自适应谐波检测法[J].电力电子技术,2011,45(1):45-47.
- [6] 张达,金立军.基于频谱细化与插值法的特征谐波分析研究[J].电子测量与仪器学报,2013,27(4):298-304.
- [7] 陈淑华,付青,马桂龙,等.基于神经网络自适应预测算法的谐波[J].电工技术学报,2011,26(1):200-206.
- [8] 韩伟,王立志,刘宝成.基于复合预测的无差拍谐波电流跟踪控制[J].仪器仪表学报,2014,35(6):1425-1432.
- [9] 施焯,吴在军,窦晓波,等.基于自适应原理的改进型FBD谐波电流检测算法[J].电网技术,2014,38(4):1051-1058.
- [10] 刘国海,张懿.一种新的变步长 MLMS 谐波电流检测法[J].电气传动,2009,39(2):44-47.
- [11] 魏学良,程婷.谐波治理设备在供电系统中的应用[J].国外电子测量技术,2015,34(1):80-83.
- [12] 李自成,任明炜,诸德宏,等.自适应谐波电流检测算法[J].电力电子技术,2011,45(7):50-51,91.

### 作者简介

马立新,工学博士,教授,研究方向为电力系统分析与优化运行,智能电网与智能科学,电气设备状态监测与诊断方法,电能质量监控与能效测评技术,风光发电智能控制系统。

E-mail:malx\_ajii@sina.com

周磊,硕士研究生,研究方向为电力能效测评技术,有源滤波器。

E-mail:15216703220@163.com

(上接第33页)

### 参考文献

- [1] 夏敦柱,周百令,王寿荣.实时小波滤波方法在硅微陀螺仪中的应用研究[J].中国惯性技术学报,2007,15(1):92-95.
- [2] ERDINC T, SAID E A, TAYFUNA. Quadrature-error compensation and corresponding effects on the performance of fully decoupled MEMS gyroscopes[J]. Journal of Micro-electromechanical Systems, 2012, 21(3): 656-667.
- [3] 赵世峰,张海,范耀祖. MEMS 陀螺随机漂移多尺度滤波方法[J].中国惯性技术学报,2007,15(2):229-232.
- [4] 席绪奇,姚志成,何志昆,等.基于多项式模型和BP神经网络的光纤陀螺温度补偿[J].计算机应用与软件,2013,30(11):54-56.
- [5] 张智永,范大鹏,李凯,等.微机电陀螺零点漂移数据滤波方法的研究[J].中国惯性技术学报,2006,14(4):67-69.
- [6] 李舜酩,郭海东,李殿荣.振动信号处理方法综述[J].仪器仪表学报,2013,34(8):1907-1915.
- [7] 徐丽娜,邓正隆.小波分析用于陀螺仪漂移测试信号分析的研究[J].中国惯性技术学报,2003,11(1):49-52,61.
- [8] 张冉,赵成龙. ARIMA 模型在网络流量预测中的应用研究[J].计算机仿真,2011,28(2):171-174.
- [9] 杨叔子,吴雅,轩建平,等.时间序列分析的工程应用[M].武汉:华中理工大学出版社,2007:175-184.
- [10] 金光明,张国良,陈林鹏,等. MEMS 陀螺仪静态漂移模型与滤波方法研究[J].传感器与微系统,2007,26(11):48-50.
- [11] 韩萍,干浩亮,何炜琨,等.基于迭代中心差分卡尔曼滤波的飞机姿态估计[J].仪器仪表学报,2015,36(1):187-193.

### 作者简介

杨金显,副教授,博士,研究方向为微惯性及组合导航系统。

E-mail:1312109085@qq.com

陈超(通讯作者),硕士研究生,研究方向为微惯性及组合导航系统、数据处理。

E-mail:906234428@qq.com

李志鹏,硕士研究生,研究方向为控制工程。

E-mail:15225815285@163.com