

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2012.06.008

# 一种改进的无锁相环单相谐波电流检测方法

何政平, 李圣清, 李永安, 曾黎琳

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

**摘要:** 针对目前单相谐波电流检测方法存在的问题, 对无锁相环谐波电流检测法进行了详细分析, 提出了一种改进的无锁相环单相谐波电流检测方法。采用低通滤波器和均值滤波器串联的形式对原有低通滤波器进行优化, 以提高检测精度和动态响应速度; 采用基波电流反馈形式, 以进一步提高动态响应速度。Matlab/Simulink 下的仿真结果表明: 所提方法确实可行, 大大提高了检测精度和动态响应速度。

**关键词:** 有源电力滤波器; 谐波; 检测; Matlab/Simulink

**中图分类号:** TM71

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2012)06-0030-04

## An Improved Single-Phase Harmonic Current Detection without PLL

He Zhengping, Li Shengqing, Li Yong'an, Zeng Lilin

(School of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of the single phase harmonic current detection method, analyzes the harmonic detection method without phase locked loop (PLL) and proposes an improved single-phase harmonic current detection method without PLL. The method combines low pass filter and mean filter in series form to optimize the original low-pass filter and improve the detection precision and dynamic response speed; and for further accelerating the dynamic response speed, the fundamental wave current feedback form is applied. Matlab/Simulink simulation results show that this method is feasible and greatly improves the detection accuracy and dynamic response speed.

**Keywords:** active power filter; harmonic; detection; Matlab/Simulink

## 0 引言

随着电力电子技术及其装置的发展与广泛应用, 大量非线性电子设备在电网中被广泛地投入使用, 使得由电网谐波引起的电能质量问题日益受到重视, 人们越来越关注有源电力滤波器。有源电力滤波器大多数是三相的, 事实上由单相非线性负载(如电气化铁路)引起的谐波危害也很严重, 其谐波的抑

制也是人们关心的问题<sup>[1-2]</sup>。谐波电流的检测环节是一个直接影响到有源滤波效果的关键环节<sup>[3-4]</sup>, 因此, 要提高有源电力滤波器的性能, 必须研究快速、准确的单相谐波电流检测方法。文献[5]提出了一种采用自适应神经网络来检测谐波电流的方法, 该方法根据自适应噪声对消技术的基本原理, 将基波电流从负载电流中滤除从而得到谐波电流, 但较复杂。文献[6]提出了一种单位功率因数的单相谐波电流检

收稿日期: 2012-09-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51077046), 湖南省重点学科建设基金资助项目(201176), 湖南省研究生科研创新基金资助项目(CX2012B401)

作者简介: 何政平(1987-), 男, 湖南娄底人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为电能质量调节与控制技术,

E-mail: hzp19870602@163.com

测方法,该方法将非线性负载和滤波器并联,使得并联组合的等效阻抗为一纯阻性负载,从而实现单位功率因数,该检测方法简单,计算量较小,但由于检测过程中采用了锁相环(phase locked loop, PLL),当电网频率偏移时,锁相环电路可能因失锁而影响检测的准确性<sup>[7]</sup>。文献[7]提出了一种无锁相环的单相谐波电流检测方法,该方法省去了锁相环电路,避免了电网频率偏移对检测准确性的影响,但是由于低通滤波器(low-pass filter, LPF)的存在,检测精度和响应速度有待进一步提高。文献[8]提出一种基于平均值理论的无锁相环单相电路谐波电流检测方法,采用电流平均值滤波器取代LPF,使延时缩短到半个基波周期,大大改善了算法的动态性能。但文献[9]中研究指出,基波电流的变动导致电流平均值滤波器与瞬时无功电流对应的输出波形波动很大,易受检测信号中的基波电流变动。

基于上述研究,本文提出了一种改进的无锁相环的单相谐波电流检测新方法。该方法通过采用低通滤波器和均值滤波器<sup>[10]</sup>串联的形式对原有低通滤波器进行优化,以提高检测精度和动态响应速度;并通过引入基波电流反馈,进一步提高响应速度。

## 1 无锁相环单相谐波检测方法

假设电网电压畸变,基波频率偏移,则根据傅里叶级数电网,电压 $u_s$ 可展开为

$$u_s = u_1 + u_h = U_1 \sin(\omega't + \phi_1) + u_h, \quad (1)$$

式中: $u_1$ 为基波电压; $u_h$ 为谐波电压; $\omega'$ 为电网实际角速度; $U_1$ 为基波电压幅值; $\phi_1$ 为基波电压初相角。

同理,根据傅里叶级数电网,电流 $i_s$ 可展开为

$$\begin{aligned} i_s &= i_1 + i_h = I_1 \sin(\omega't + \phi_1) + i_h = \\ &I_1 \cos(\phi_1 - \phi_1) \sin(\omega't + \phi_1) + \\ &I_1 \sin(\phi_1 - \phi_1) \cos(\omega't + \phi_1) + i_h = \\ &i_{1p} + i_{1q} + i_h. \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $i_1$ 为基波电流; $i_{1q}$ 为基波无功电流; $i_{1p}$ 为基波有功电流; $i_h$ 为谐波电流; $I_1$ 为基波电流幅值; $\phi_1$ 为基波电流初相角。

将式(1)两边同乘以 $\sin(\omega t + \theta)$ ,经过低通滤波器滤波,并乘以2可得 $U_1 \cos[(\omega' - \omega)t + \phi_1 - \theta]$ 。同理将式(1)两边同乘以 $\cos(\omega t + \theta)$ ,经过低通滤波器滤波,并乘以2可得 $U_1 \sin[(\omega' - \omega)t + \phi_1 - \theta]$ 。

据此可以得

$$\begin{aligned} u_1 &= U_1 \sin(\omega't + \phi_1) = \\ &U_1 \cos[(\omega' - \omega)t + \phi_1 - \theta] \sin(\omega t + \theta) + \\ &U_1 \sin[(\omega' - \omega)t + \phi_1 - \theta] \cos(\omega t + \theta). \end{aligned} \quad (3)$$

同理可得

$$\begin{aligned} i_1 &= I_1 \sin(\omega't + \phi_1) = \\ &I_1 \cos[(\omega' - \omega)t + \phi_1 - \theta] \sin(\omega t + \theta) + \\ &I_1 \sin[(\omega' - \omega)t + \phi_1 - \theta] \cos(\omega t + \theta). \end{aligned} \quad (4)$$

根据式(2),欲得出基波有功电流 $i_{1p}$ 和基波无功电流 $i_{1q}$ ,需要先得出 $\cos(\phi_1 - \phi_1)$ 。

$$\begin{aligned} \cos(\phi_1 - \phi_1) &= \\ &\cos[(\omega't + \phi_1 - \omega t - \theta) - (\omega't + \phi_1 - \omega t - \theta)] = \\ &\cos[(\omega' - \omega)t + \phi_1 - \theta] \cos[(\omega' - \omega)t + \phi_1 - \theta] + \\ &\sin[(\omega' - \omega)t + \phi_1 - \theta] \sin[(\omega' - \omega)t + \phi_1 - \theta] = \\ &\frac{BD + CE}{U_1 I_1}, \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $B = U_1 \cos[(\omega' - \omega)t + \phi_1 - \theta]$ ;

$$C = U_1 \sin[(\omega' - \omega)t + \phi_1 - \theta];$$

$$D = I_1 \cos[(\omega' - \omega)t + \phi_1 - \theta];$$

$$E = I_1 \sin[(\omega' - \omega)t + \phi_1 - \theta].$$

结合式(2),(3)和(5)可得

$$\begin{aligned} i_{1p} &= I_1 \cos(\phi_1 - \phi_1) \sin(\omega't + \phi_1) = \\ &I_1 \frac{u_1}{U_1} \cos(\phi_1 - \phi_1) = \frac{BD + CE}{B^2 + C^2} u_1; \end{aligned} \quad (6)$$

$$i_{1q} = i_1 - i_{1p}; \quad (7)$$

$$i_h = i - i_{1q}. \quad (8)$$

由此可得该检测方法的原理框图如图1所示。

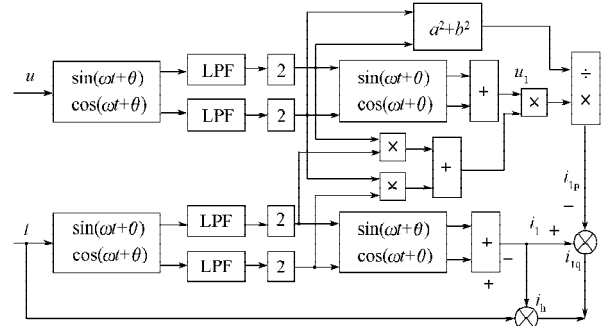


图1 无锁相环单相谐波电流检测方法

Fig. 1 Single-phase harmonic current detection method without PLL

由式(3),(4),(6),(7)和(8)可以看出,参与运算的正余弦信号 $\sin(\omega t + \theta)$ 和 $\cos(\omega t + \theta)$ 不是以实际的基波角速度 $\omega'$ 为基准的,而是建立在给定正余弦函数的基础上。 $\omega$ 在坐标变换中仅起过渡作用,且实际电网规定的偏差值比较小,可以直接取标准的工频50 Hz, $\theta$ 可任意取值,对最后结果的准确性将不产生影响。由于无需锁相环,简化了系统。此外,该方法除能检测谐波电流外,还可以进一步检测基波有功和无功电流。

## 2 改进的无锁相环单相谐波电流检测方法

上述检测方法由于低通滤波器对检测方法的检测精度和动态响应速度影响很大，其检测精度和动态响应速度有待进一步提高。为此，本文做如下改进：1) 采用低通滤波器和均值滤波器串联的形式对原有低通滤波器进行优化，以提高检测精度和动态响应速度，如图2所示；2) 引入基波电流反馈，以进一步提高响应速度，如图3所示。

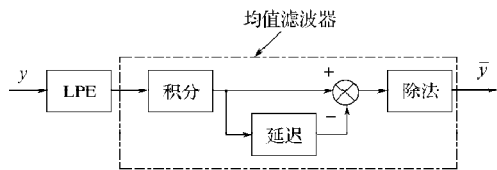


图2 优化滤波器的结构

Fig. 2 The structure of optimized filter

如图3，当基波电流增大时，由于低通滤波器的延时作用，检测出的基波电流不能迅速跟踪实际值，在一段时间内，基波的检测结果要比实际值小，通过基波电流反馈，使得输入端的基波和谐波电流增大，但由于谐波电流在经过优化滤波器时被滤除，因而对检测过程无影响，最终实现基波电流闭环反馈，补偿过渡过程中的检测误差，加快动态响应速度。

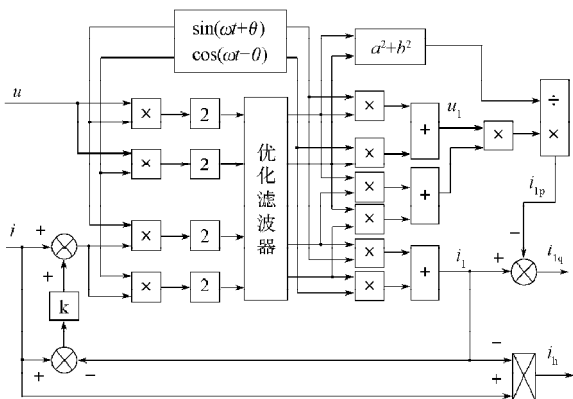


图3 改进的无锁相环单相谐波电流检测方法

Fig. 3 The improved single-phase harmonic current detection method without PLL

同理，当基波电流减小时，输出端基波电流由于低通滤波器的延时不能及时跟踪实际值，检测结果比实际值大，通过反馈使得输入端基波电流减小，最终实现补偿检测误差，加快动态过程的目的。

## 3 仿真分析

采用 Matlab/Simulink 仿真软件进行仿真，单相谐波检测仿真主电路如图4所示，负载为非线性负载，由带阻感负载的不可控整流桥组成。主电路参数为：

系统电压 $U_s=220\text{ V}$ ；系统电压基波频率 $f_s=50\text{ Hz}$ ；系统等效电阻 $R_1=0.2\ \Omega$ ；系统等效电感 $L_1=0.1\text{ mH}$ ；整流桥直流侧电阻 $R_2=1.0\ \Omega$ ；整流桥直流侧电感 $L_2=5\text{ mH}$ 。

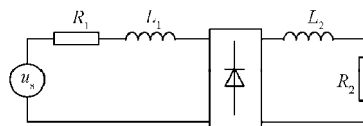


图4 主电路图

Fig. 4 The main circuit diagram

仿真过程中，在0.05 s使系统电压增大1倍，如图5a所示，以检验系统不稳定时检测方法的动态跟踪性能。此时系统电流波形如图5b所示，可以看出电流严重畸变。

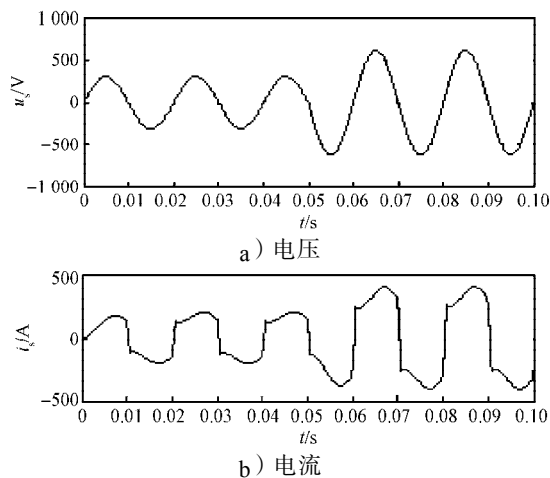


图5 系统电压和电流

Fig. 5 The system voltage and current

图6a给出了无锁相环单相谐波电流检测方法下基波有功电流 $i_{1p}$ 和无功电流 $i_{1q}$ 经低通滤波器后的输出波形，可以看出，低通滤波器输出波形需经历约1.5周期才能稳定，且含有较高的交流分量，纹波较大（以下简称无反馈无优化情况）。

图6b给出了无锁相环单相谐波电流检测方法下基波有功电流 $i_{1p}$ 和无功电流 $i_{1q}$ 经优化滤波器后的输出波形，可以看出，输出波形达到稳定需经历约1个周期，和图6a相比，优化滤波器输出波形中纹波含量大大降低，同时保持较好的动态响应速度（以下简称无反馈优化情况）。

图6c给出了改进的无锁相环单相谐波电流检测方法下基波有功电流 $i_{1p}$ 和无功电流 $i_{1q}$ 经优化滤波器后的输出波形，可以看出，输出波形达到稳定只需约1/2个周期，和图6b相比，此时拥有更快的动态响应速度（以下简称带反馈优化情况）。

图7给出3种情况下谐波电流 $i_h$ 和基波电流 $i_1$ 波形，从图中可以进一步看出，带反馈优化的情况下拥有最好的检测精度和动态响应速度，无反馈优化

的情况下检测精度和动态响应次之, 无反馈无优化的情况下检测精度最低, 动态响应最慢。

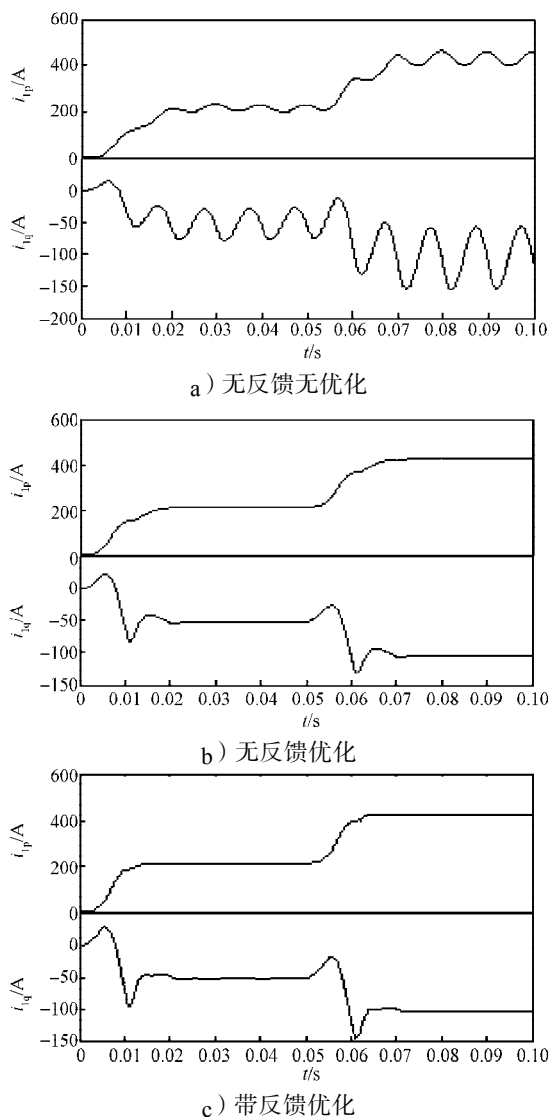


图6 3种情况下输出基波有功无功电流幅值  
Fig. 6 The amplitudes of output fundamental active and reactive currents in three cases

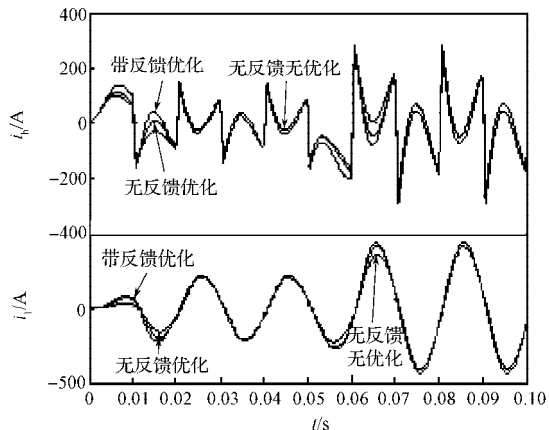


图7 3种情况下谐波和基波电流波形  
Fig. 7 The waveforms of harmonic and fundamental currents in three cases

图8为改进的无锁相环单相谐波电流检测方法检测得到的基波有功电流、基波无功电流、谐波电流和基波电流波形, 可以看出, 该方法不但能快速准确地检测谐波和基波电流, 还能检测基波有功电流和基波无功电流。

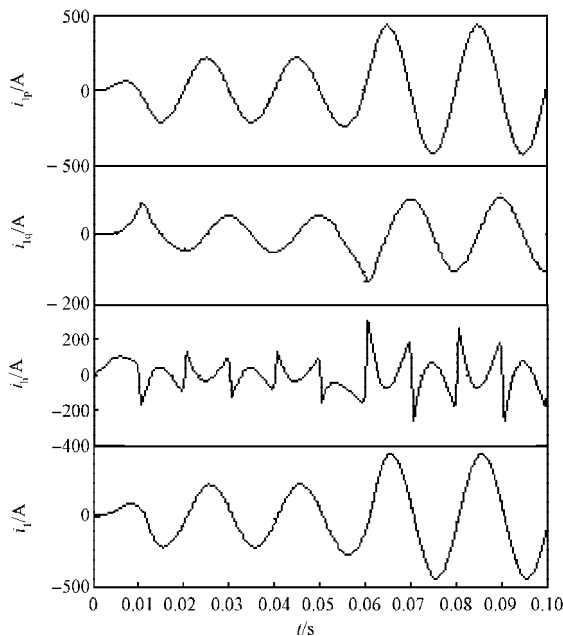


图8 带反馈优化的检测波形  
Fig. 8 The detection waveforms under feedback and optimization

### 4 结语

本文针对目前单相谐波电流检测方法存在的问题, 提出了一种改进的无锁相环单相谐波电流检测新方法。通过采用低通滤波器和均值滤波器串联的形式对原有低通滤波器进行优化, 大大提高了检测精度和动态响应速度; 通过采用基波电流反馈, 进一步加快了响应速度; 无需锁相环, 简化了系统, 此外该方法除能检测谐波电流外, 还可以进一步检测基波有功和无功电流。理论分析和仿真结果表明, 改进的无锁相环单相谐波电流检测方法能够快速准确地检测出谐波、无功、基波有功和基波无功电流, 并且相对于传统的方法具有高的检测精度和更快的动态性能。

### 参考文献:

[1] 孙曙光, 王景芹, 师顺泉. 单相电路谐波及无功电流实时检测的研究[J]. 电测与仪表, 2008(1): 4-7.  
Sun Shuguang, Wang Jingqin, Shi Shunquan. Study on Real-Time Detection of Harmonics and Reactive Currents in Single (下转第 104 页)