第 31 卷第 5 期
2019 年 5 月

强 激 光 与 粒 子 束
HIGH POWER LASER AND PARTICLE BEAMS

Vol. 31, No. 5
May, 2019

基于 ip-iq 理论的改进谐波检测方法*

王振尚[1,2]， 傅 鹏[1,2]， 黄连生[1,2]， 陈晓娇[1]， 王重马[1,2]， 曾思哲[1,2]

(1. 中国科学院 合肥物质科学研究院 等离子体物理研究所，合肥 230031； 2. 中国科学技术大学 研究生院科学岛分院，合肥 230026)

摘 要： 有源电力滤波器(APF)是电力系统中实现电能质量管理的关键设备，谐波检测作为 APF 的关键技术之一，检测的精度和响应速度直接决定了 APF 的整体性能。介绍了传统的基于瞬时无功功率理论的 ip-iq 谐波电流检测算法；针对其检测精度受锁相环输出相位误差影响，以及低通滤波器的存在限制了谐波检测系统的响应速度，提出了应用锁频环技术，产生与电网电压同频的单位正余弦信号的一种改进谐波检测算法；并提出采用滑动平均滤波器(MAF)代替低通滤波器提高其响应速度以及改善谐波检测精度；对改进的检测算法进行了理论分析，通过 MATLAB 进行仿真研究，理论分析和仿真结果都证明了该方法的有效性。

关键词： 有源电力滤波器； 谐波检测； 瞬时无功功率理论； 锁频环； MAF

中图分类号： TM133 **文献标志码：** A **doi**:10.11884/HPLPB201931.180295

Research on improved harmonic detection method based on ip-iq theory

Wang Zhenshang[1,2]， Fu Peng[1,2]， Huang Liansheng[1,2]， Chen Xiaojiao[1]， Wang Zhongma[1,2]， Zeng Sizhe[1,2]

(1. *Institute of Plasma Physics*, *Hefei Institutes of Physical Science*, *Chinese Academy of Sciences*, *Hefei* 230031, *China*;
2. *Science Island Branch of Graduate School*, *University of Science and Technology of China*, *Hefei* 230026, *China*)

Abstract: Active power filter (APF) is the key equipment to realize power quality management in power system. Harmonic detection is one of the key technologies of APF. The detection accuracy and response speed directly determine the overall performance of APF. In this paper, the traditional ip-iq harmonic current detection algorithm based on instantaneous reactive power theory is introduced; and the detection accuracy is affected by the phase error of the phase locked loop output and the response speed of the harmonic detection system is limited by the existence of low-pass filter. An improved harmonic detection algorithm is proposed by frequency-locked loop technology. The algorithm can generate unit sine and cosine signals with the same frequency of grid voltage, and moving average filter (MAF) is used instead of low-pass filter to improve its response speed and harmonic detection accuracy. The algorithm is analyzed theoretically and simulated by MATLAB. The theoretical analysis and simulation results prove the effectiveness of this method.

Key words: active power filter; harmonic detection; instantaneous reactive power theory; frequency locked loop; MAF

PACS: 89.30.Jj; 07.50.Qx; 84.30.Jc

近年来，随着电力电子技术的发展，越来越多的电力电子装置接入电网，使得电网的谐波污染问题越来越严重。有源电力滤波器是抑制谐波污染的有效途径。有源电力滤波器的基本原理是从补偿对象中检测出谐波电流，然后由补偿装置产生与检测出的谐波电流大小相等极性相反的补偿电流与其抵消从而达到抑制谐波的效果。根据连接方式的不同，电力系统补偿方式可以分为并联补偿、串联补偿和串并联混合补偿 3 种，由于并联补偿方式接入和切除都很方便，因此在电力系统中得到了广泛的应用。无论哪种连接方式，有源电力滤波器的性能关键取决于谐波检测的准确性和快速性[1-2]。

目前，常用的谐波检测方法主要有基于 Fryze 传统功率定义的谐波电流检测方法，基于傅里叶变换的谐波检测法，基于神经网络的谐波检测法，基于小波变换的谐波检测法以及基于瞬时无功功率理论的谐波检测法[3-4]。傅里叶变换 (FFT) 对稳态谐波的检测精度高，但是对暂态谐波和采样信号不同步的谐波检测会产生

* **收稿日期：**2018-10-30； **修订日期：**2019-02-22
基金项目：国家磁约束聚变能发展研究项目(2014GB105000)
作者简介：王振尚(1996—)，男，博士研究生，从事磁体电源控制及检测技术研究；zswang@ipp.ac.cn。
通信作者：陈晓娇(1989—)，女，博士，从事磁体电源技术研究；chenxj@ipp.ac.cn。

频谱泄露和栅栏效应[5]；基于神经网络和小波分析的谐波检测法，虽然检测精度高、响应速度快，但是相对计算复杂，在应用中还需要进一步完善[5]；基于瞬时无功功率理论的谐波检测法，是传统的谐波检测方法[6-10]，但性能受锁相环输出相位的精度以及低通滤波器(LPF)的限制，因此有很多学者在基于瞬时无功功率的基础上提出各种改进的方法，文献[7]提出引入自适应分析理论，构造自适应滤波器代替 LPF 的方法；文献[10]提出混合谐波检测的方法，利用滑窗迭代(DFT)原理的方法代替 LPF，这两种方法都受到锁相环输出相位的精度影响检测性能，文献[11]提出无锁相环的谐波检测方法，但其精度受到低频信号的影响，且对滤波器的设计的要求较高。

本文在 ip-iq 谐波检测方法的研究基础上，针对锁相环精度的限制和低通滤波器对性能的影响的问题，提出了一种无锁相环的改进的谐波检测方法，并采用滑动平均滤波器(MAF)代替低通滤波器提高对特征次谐波的滤除效果以及加快了动态响应，此方法相对传统的 ip-iq 谐波检测方法检测的精度和响应的速度都有所提升。

1 传统 ip-iq 谐波电流检测方法

传统的 ip-iq 谐波电流检测方法，如图 1 所示，通过锁相环对 A 相电压瞬时信号进行锁相，再利用正余弦发生器产生与 A 相电压同频率、同相位的正余弦同步旋转信号。

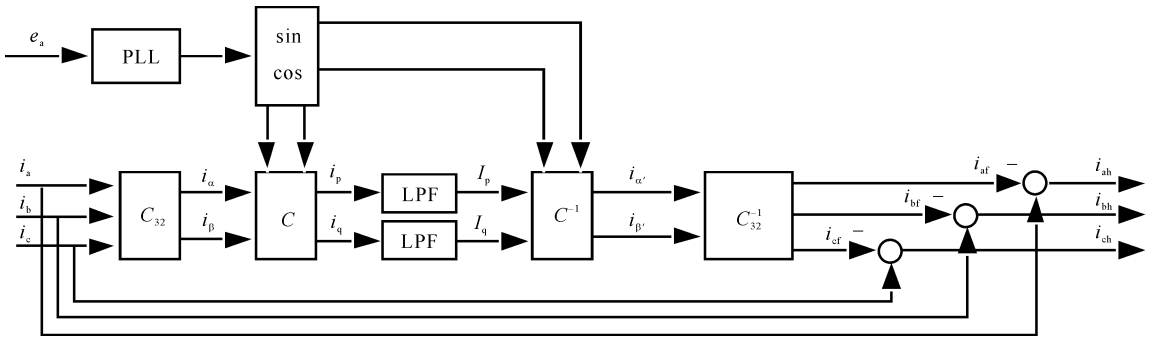

Fig. 1 Schematic diagram of ip-iq harmonic detection

图 1 ip-iq 谐波电流检测方法原理图

图中 i_a，i_b，i_c 为三相三线制负载电流值，为

$$\begin{cases} i_a = \sum_{m=1}^{\infty} I_m \sin(m\omega t + \theta_m) \\ i_b = \sum_{m=1}^{\infty} I_m \sin(m\omega t + \theta_m - 2\pi/3) \\ i_c = \sum_{m=1}^{\infty} I_m \sin(m\omega t + \theta_m + 2\pi/3) \end{cases} \tag{1}$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \boldsymbol{C}_{32} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \tag{2}$$

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \end{bmatrix} = \boldsymbol{C} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \tag{3}$$

式中：$\boldsymbol{C}_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$；$\boldsymbol{C} = \begin{bmatrix} \sin\omega t & -\cos\omega t \\ -\cos\omega t & -\sin\omega t \end{bmatrix}$；$\omega$ 是三相负载电流信号的角速度；I_m 是三相负载电流信号的幅值；θ_m 是三相负载电流信号 a 相 m 次谐波的初始相位；i_α，i_β 是两相静止坐标系下电流值；i_p，i_q 是两相旋转坐标系下电流值。于是有

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{m=1}^{\infty} \sqrt{\frac{3}{2}} I_m \cos[(m-1)\omega t + \theta_m] \\ -\sum_{m=1}^{\infty} \sqrt{\frac{3}{2}} I_m \sin[(m-1)\omega t + \theta_m] \end{bmatrix} \tag{4}$$

由式(4)可以看出：当 $m=1$ 时，即基波分量变换后得到的是直流分量，所以可以通过 LPF 将高次谐波滤除掉，滤除后再经过 Clarke 和 Park 逆变换得到三相电流的基波分量，将三相电流减去所得到的基波分量就可以得到需要补偿的谐波电流。

通过以上的分析可以知道，传统的 ip-iq 谐波电流检测方法的精度与响应速度主要取决于 LPF 的设计，以及锁相环输出的相位与真实相位的误差大小。其中 LPF 的参数设计有很多学者做了大量的研究。当 LPF 的截止频率越小，对谐波的滤除效果越好，从而谐波电流的检测精度越高，但将会导致动态响应的时间变长，满足不了谐波检测实时性的要求，若要加快响应速度，将会导致部分低次谐波不能滤除影响检测精度。因此，由于 LPF 的存在，很难实现检测精度与响应速度的均衡。

2 改进谐波电流检测新方法

针对上述传统 ip-iq 谐波电流检测方法的不足，本文提出了改进的基于 ip-iq 的谐波电流检测方法，主要包括两个方面的改进：①提出采用锁频环替代锁相环，再由正余弦发生器输出与电网电压信号同频率的旋转信号，这样不仅解决了锁相环在电网电压畸变的情况下得到的相位精度差的问题，同时由于锁频环容易实现且稳定可靠，提高了整个谐波检测系统的鲁棒性和可靠性；②提出采用 MAF 代替 LPF，MAF 的优良的性能不仅加快了系统响应的速度还提升了对谐波滤除的效果，解决了 LPF 参数设计的难题。提出的改进的谐波电流检测原理如图 2 所示。

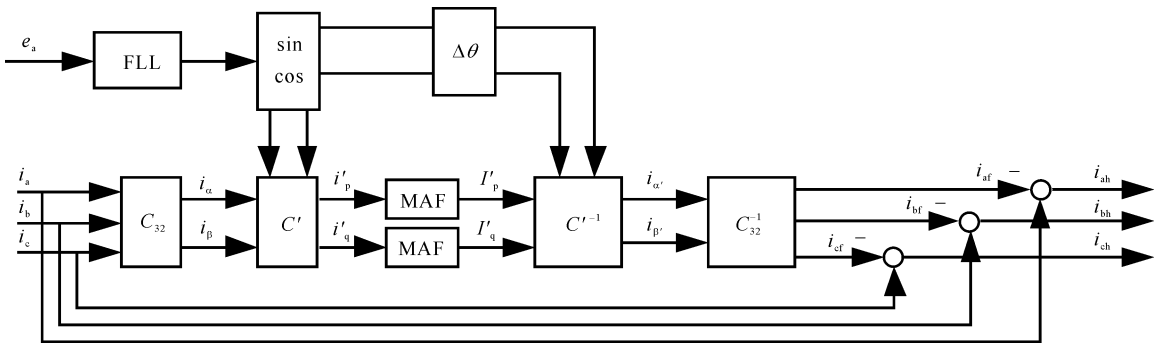

Fig. 2 Schematic diagram of improved new harmonic detection

图 2 改进的谐波电流检测新方法原理图

2.1 锁频环

基于如前面所述锁相环输出的相位精度受到电网电压信号畸变影响时会常常产生误差，影响最终的谐波检测的结果，因此提出采用 SOGI-FLL 锁频环代替锁相环输出与电压相位同频率的旋转信号。根据现实中电网频率的变化不大，锁频环具有稳定时间短、稳态精度高的特点，既加快了响应速度也提高了精度[12]。根据锁频环的输出，其中变换矩阵 $\boldsymbol{C}'$ 可写成如下形式

$$\boldsymbol{C}'=\begin{bmatrix}\sin(\omega t+\varphi) & -\cos(\omega t+\varphi)\\ -\cos(\omega t+\varphi) & -\sin(\omega t+\varphi)\end{bmatrix} \tag{5}$$

矩阵中的初始相角 φ 是任意的，并不与三相负载电压相位 θ_m 一致。由此经过坐标变换后得到

$$\begin{bmatrix}i'_p\\ i'_q\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\sum_{m=1}^{\infty}\sqrt{\frac{3}{2}}I_m\cos[(m-1)\omega t+\theta_m-\varphi]\\ -\sum_{m=1}^{\infty}\sqrt{\frac{3}{2}}I_m\sin[(m-1)\omega t+\theta_m-\varphi]\end{bmatrix} \tag{6}$$

根据式(6)，当 $m=1$ 时，即基波分量变换后得到的仍然是直流分量，只不过得到的不再是真正意义上的有功电流 i_p 和无功电流 i_q，但依旧可以通过设计滤波器将直流分量滤出。在此提出采用 MAF 滤除谐波，MAF 除了高效的滤波效果外，还有个优点就是其固定时延，因此我们可以很容易对锁频环输入相角时延补偿，补偿角 $\Delta\theta=\omega\Delta T$，其中 ΔT 为 MAF 的固定时延。由此变换矩阵 $\boldsymbol{C}'^{-1}$ 可写成如下形式

$$\boldsymbol{C}'^{-1}=\begin{bmatrix}\sin(\omega t+\varphi+\Delta\theta) & -\cos(\omega t+\varphi+\Delta\theta)\\ -\cos(\omega t+\varphi+\Delta\theta) & -\sin(\omega t+\varphi+\Delta\theta)\end{bmatrix} \tag{7}$$

经过时延补偿后，旋转变换 $\boldsymbol{C}'$ 和逆旋转变换 $\boldsymbol{C}'^{-1}$ 将是恒等变换，对提高谐波检测系统的精度有十分重要

的意义。

2.2 滑动平均滤波器(MAF)

MAF 本质上是一种线性相位有限冲击响应滤波器,由于其结构简单,可有效滤除特征高次谐波,并且易于数字实现,因此在滤除谐波领域应用十分广泛[14-15]。其在连续域下的表达式为

$$y(t)=\frac{1}{T_\omega}\int_{t-T_\omega}^{t}x(\tau)\mathrm{d}\tau \tag{8}$$

式中:输入为 $x(t)$;输出为 $y(t)$;T_ω 为积分的窗口宽度。由式(8)可得到 MAF 在 s 域的传递函数为

$$G_{\mathrm{MAF}}(s)=\frac{y(s)}{x(s)}=\frac{1-\mathrm{e}^{-T_\omega s}}{T_\omega s} \tag{9}$$

由式(9)可以看出,MAF 存在一个与窗口长度 T_ω 相等的时间延迟 ΔT,因此窗口长度越长,时间响应越慢。将 $s=\mathrm{j}\omega$ 代入式(9),进行数学运算后可得到 MAF 的幅相表达式

$$G_{\mathrm{MAF}}(\mathrm{j}\omega)=\left|\frac{\sin(\omega T_\omega/2)}{\omega T_\omega/2}\right|\angle(-\omega T_\omega/2) \tag{10}$$

由式(10)可画出其伯德图如图 3 所示。定义 $f_k=k/T_\omega(k=1,2,3,\cdots)$为 MAF 的陷波频率,由式(10)可知,当输入频率等于 0 时,MAF 的增益为 1;当输入频率等于陷波频率时,MAF 的增益为 0。MAF 可以完全滤除频率为陷波频率的交流分量,可以通过直流分量,且对其他频率的信号没什么影响,是一个理想的低通滤波器。从 MAF 传递函数的伯德图也可以看出此特性。假设当窗口长度取为 0.01 s 时,MAF 可以完全滤除频率为 100 Hz 整数倍的所有谐波分量,因此通过适当地选取窗口长度,使用一个 MAF 就可滤除锁相环系统中所有特征谐波成分,其窗口长度决定了 MAF 能够滤除的最低次谐波,也决定了 MAF 的动态响应时间。在电力系统中负载电流中普遍富含−5 次、+7 次、−11 次、+13 次等 $6k\pm1$ 次谐波,所以可将窗口长度设置为 0.003 3 s,能有效滤除所有特征次谐波。采用 MAF 代替了传统的 LPF,既解决了 LPF 参数设计困难的问题,又拥有较快的系统响应,并且 MAF 产生固定的时延便于时延补偿,因而提高了谐波检测系统的整体性能。

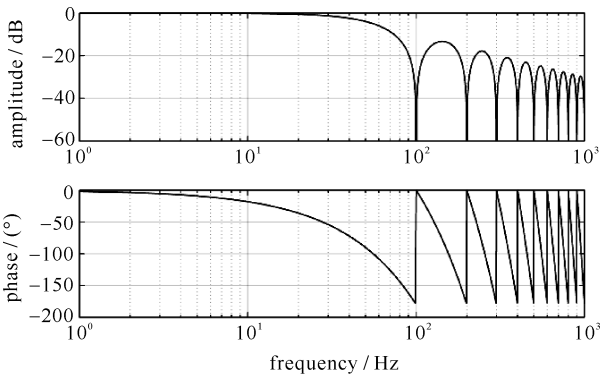

Fig. 3 Bode plots of MAF

图 3 MAF 伯德图

3 仿真结果与分析

利用 MATLAB 对所提的改进谐波电流检测算法进行仿真验证。将 MAF 的时间常数设置为 0.01 s,补偿角 $\Delta\theta$ 取为 π,分别设计两种不同的电网谐波情况进行仿真分析,对比改进后的谐波电流检测方法与传统 ip-iq 谐波检测方法进行对比,其中 LPF 选择 $k=1$,$\omega_c=2\pi\times30$ rad/s 的二阶 Butterworth 低通滤波器。

情况一:电网电压频率为工频 50 Hz,在 0.10 s 时向三相电网电流注入 30%的 3 次谐波、20%的 5 次谐波、10%的 7 次谐波、10%的 11 次谐波以及 5%的 13 次谐波,如图 4 所示。

情况二:电网电压初始频率为工频 50 Hz,在 0.10 s 时向三相电网电流注入情况一相同的谐波,且电网电流出现不平衡扰动,B 相电流基波跳变为原来 1.2 倍,C 相电流基波跳变为原来 1.3 倍,如图 5 所示。

根据以上两种情况的谐波检测仿真结果波形可以得到如表 1 的对比结果,改进后的谐波检测在半个工频周期 0.01 s 内就能够基本达到稳定,而传统的 ip-iq 谐波检测方法需要一个半工频周期 0.03 s 左右才能够逐渐稳定。同时从仿真波形可以看出,传统的 ip-iq 的谐波检测方法存在固定的谐波检测误差,情况一下最大固定检测误差为 0.025 A,情况二为 0.03 A,情况二检测误差较大,主要是由于 LPF 三相不平衡产生的负序谐波分量不能够很好地得到滤除,采用 MAF 滤波器改进后的谐波检测结果与真实谐波波形基本完全重合,表明改进后的谐波检测方法能够很好地消除由三相不平衡引起的谐波检测误差。两种情况下的仿真结果均表明了改进后的谐波检测方法较传统的 ip-iq 谐波检测方法性能大有提升,不论是响应速度还是最终检测谐波的精确性都有改善。

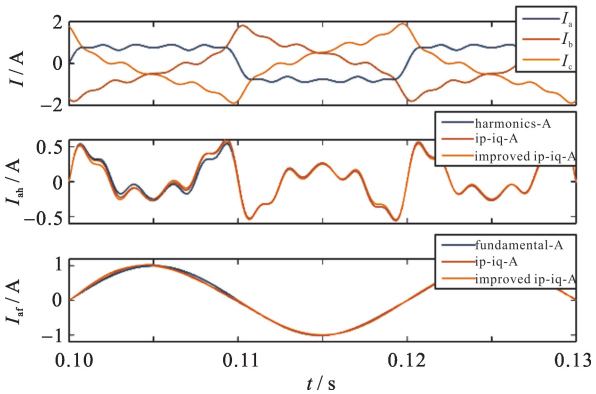

Fig. 4　Phase A fundamental and harmonic wave simulation waveforms detected by the two methods after 0.10 s with injected harmonic

图 4　在 0.10 s 注入谐波后两种方法检测的 A 相基波、谐波仿真波形

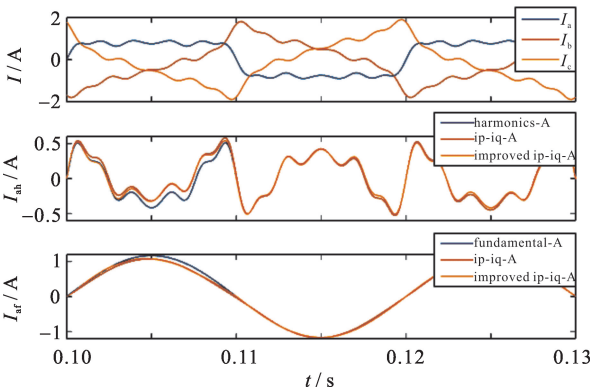

Fig. 5　Phase A fundamental and harmonic wave simulation waveforms detected by the two methods under three phase imbalance

图 5　在三相不平衡时两种方法检测的 A 相基波、谐波仿真波形

表 1　不同情况下两种方法谐波检测结果

Table 1　Harmonic detection results of two methods under different conditions

case	harmonic detection method	time required for stable result/s	maximum fixed detection error after stabilization/A
case 1	traditional ip-iq method	0.03	0.025
	improved ip-iq method	0.01	0
case 2	traditional ip-iq method	0.03	0.03
	improved ip-iq method	0.01	0

4　结　论

本文从 APF 的关键环节谐波检测入手，旨在提高 APF 谐波检测的响应速度和检测精度。通过对传统 ip-iq 谐波电流检测方法的理论分析，提出了采用锁频环代替锁相环以及采用 MAF 代替 LPF 的改进方法，理论分析了锁频环产生与电网电压同频率的旋转信号的方法可行性和锁频环稳定可靠的优点，阐述了 MAF 的特点，最后实验仿真的结果也表明了改进后的谐波检测方法的有效性，该方法具有理论研究及工程应用价值。

参考文献：

[1]　陈国柱，吕征宇，钱照明. 有源电力滤波器的一般原理及应用[J]. 中国电机工程学报，2000，20(9)：17-21.（Chen Guozhu，Lü Zhengyu，Qian Zhaoming. The general principle of active power filter and its application. Proceedings of the CSEE，2000，20(9)：17-21）

[2]　刘进军，刘波，王兆安. 基于瞬时无功功率理论的串联混合型单相电力有源滤波器[J]. 中国电机工程学报，1997，17(1)：37-41.（Liu Jinjun，Liu Bo，Wang Zhaoan. Hybrid type series active power filter used in single-phase circuit based on instantaneous reactive power theory. Proceedings of the CSEE，1997，17(1)：37-41）

[3]　Wang Y F，Li Y W. An overview of grid fundamental and harmonic components detection techniques[C]//IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. 2013：5185-5192.

[4]　帅定新，谢运祥，王晓刚. 电网谐波电流检测方法综述[J]. 电气传动，2008，38(8)：17-23.（Shuai Dingxin，Xie Yunxiang，Wang Xiaogang，Review of harmonic current detecting methods in power system. Electric Drive，2008，38(8)：17-23）

[5]　房国志，杨超，赵洪. 基于 FFT 和小波包变换的电力系统谐波检测方法[J]. 电力系统保护与控制，2012，40(5)：75-79.（Fang Guozhi，Yang Chao，Zhao Hong. Detection of harmonic in power system based on FFT and wavelet packet. Power System Protection and Control，2012，40(5)：75-79）

[6]　王丽，刘会金，王陈. 瞬时无功功率理论的研究综述[J]. 高电压技术，2006，32(2)：98-100，103.（Wang Li，Liu Huijin，Wang Chen. Summary of the instantaneous reactive power theory. High Voltage Engineering，2006，32(2)：98-100，103）

[7]　吴雷，郜亚洲. 基于自适应分析的瞬时无功功率谐波检测法[J]. 电力电子技术，2015，49(5)：87-89.（Wu Lei，Gao Yazhou. Instantaneous reactive power for harmonic detection method based on adaptive analysis. Power Electronics，2015，49(5)：87-89）

[8]　唐蕾，陈维荣. 瞬时无功功率理论坐标变换的推导及谐波电流检测原理分析[J]. 电网技术，2008，32(5)：66-69，86.（Tang Lei，Chen Weirong. Deduction of coordinate transform for instantaneous reactive power theory and analysis on the principle of harmonic current detection method. Power System Technology，2008，32(5)：66-69，86）

[9]　何英杰，刘进军，王兆安，等. 一种基于瞬时无功功率理论的数字谐波检测[J]. 电工技术学报，2010，25(8)：185-192.（He Yingjie，Liu Jinjun，Wang Zhaoan，et al. A digital method for detecting harmonic currents based on instantaneous reactive power theory. Transactions of

China Electrotechnical Society, 2010, 25(8):185-192)

[10] 黄海宏,江念涛,毕楠夏,等.一种混合谐波检测法在 APF 中的应用[J].电子测量与仪器学报, 2016, 30(2):297-303.(Huang Haihong, Jiang Niantao, Bi Nanxia, et al. Application of hybrid harmonic detection method in APF. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(2):297-303)

[11] 杨欢,赵荣祥,程方斌.无锁相环同步坐标变换检测法的硬件延时补偿[J].中国电机工程学报, 2008, 28(27):78-83.(Yang Huan, Zhao Rongxiang, Cheng Fangbin. Delay compensation for harmonics detection based on synchronous reference frame without phase lock loop. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(27):78-83)

[12] 雷芸,肖岚,郑昕昕.不理想电网下基于二阶广义积分的锁频环[J].电力电子技术, 2016, 50(8):89-93.(Lei Yun, Xiao Lan, Zheng Xinxin. A frequency-locked loop technology based on second order generalized integrator under non-ideal voltage conditions. Power Electronics, 2016, 50(8):89-93)

[13] Wang J Y, Liang J, Gao F, et al. A method to improve the dynamic performance of moving average filter-based PLL[J]. IEEE Trans Power Electronics, 2015, 30(10):5978-5990.

[14] Golestan S, Guerrero J M, Abusorrah A. MAF-PLL with phase-lead compensator[J]. IEEE Trans Industrial Electronics, 2014, 62(6):3691-3695.