

基于 $i_p - i_q$ 运算方式与离散积分均值滤波的 瞬时三相谐波检测方法

刘传林

(广东水利电力职业技术学院电力系, 广东 广州 510635)

摘要: 根据瞬时无功功率理论,在基于三相谐波 $i_p - i_q$ 运算检测方式的基础上,利用三相三线制电网的有功电流 i_p 和无功电流 i_q 只含 $3k$ (k 为整数) 次谐波的特征,设计应用离散积分均值的滤波方法提取基波的直流分量,再从该直流分量重构得到基波及要检测的谐波分量。理论分析和 Matlab 仿真实验表明,该检测算法在谐波检测方面既具有较快的响应优势与数字滤波器的准确性,又可以减少运算过程计算量,具有较高的应用价值。

关键词: 瞬时无功 $i_p - i_q$ 运算方式; 离散积分均值滤波算法; Matlab 仿真

中图分类号: TM930.1 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2004)23-0023-05

0 引言

电力有源滤波器 (APF) 是一种谐波治理和无功补偿的有效技术手段,APF 通过向电网注入与谐波 (或无功) 等值反相的电流,抑制和补偿负载的谐波 (或无功)。技术上信号检测环节的性能直接影响 APF 的补偿特性,特别是其动态响应,对谐波 (或无功) 进行快速跟踪的问题一直被重点关注。

在电力有源滤波器中,控制信号大多由基于瞬时无功功率理论的谐波 (或无功) 电流检测算法产生。三相电路瞬时无功功率理论由赤木泰文首先提出^[1],并进一步发展了三相谐波实时检测的 $i_p - i_q$ 运算方式,被成功地运用到三相电路瞬时谐波 (或无功) 电流的实时检测方面中。基于瞬时无功功率理论的谐波 (或无功) 电流检测运算的延时问题,有必要根据被检测对象中谐波 (或无功) 电流构成的不同,讨论改进数字滤波器的跟随性与实时性。

本文拟在三相瞬时无功功率理论 $i_p - i_q$ 运算方式与硬件发展的基础上,讨论一种适合于数字信号处理器且实时性好的离散积分均值滤波算法,使谐波检测算法具有运行速度快、精度高、算法灵活的特点,有利于改进电力有源滤波器的跟随性能。

1 基于瞬时无功功率理论的运算检测方法

1.1 三相谐波 $i_p - i_q$ 运算检测方法

根据三相电路瞬时无功功率理论可实现三相谐波的检测,本文采用瞬时无功理论 $i_p - i_q$ 运算方式实现三相谐波的检测,原理如图 1 所示。

若三相三线制系统中电流对称但有畸变,即含

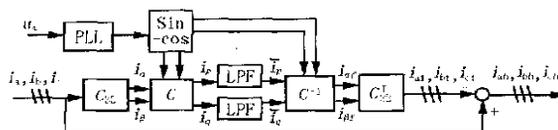


图 1 $i_p - i_q$ 运行方式的谐波检测原理图

Fig. 1 Block diagram of harmonic detecting based on $i_p - i_q$ mode in three-phase circuit

有谐波电流,设三相电流为:

$$\begin{cases} i_a = \sum_{n=1} \sqrt{2} I_n \sin(n t + \varphi_n) \\ i_b = \sum_{n=1} \sqrt{2} I_n \sin[n(t - \frac{2}{3}) + \varphi_n] \\ i_c = \sum_{n=1} \sqrt{2} I_n \sin[n(t + \frac{2}{3}) + \varphi_n] \end{cases} \quad (1)$$

式中: $n = 3k \pm 1$, 其中 k 为正整数,当 $k = 0$ 时 $n = 1$ 。

图 1 中: $C_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$

$C = \begin{bmatrix} \sin t & -\cos t \\ -\cos t & -\sin t \end{bmatrix}$
由原理图 1 可得:

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \end{bmatrix} = CC_{32} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \sqrt{3} \begin{bmatrix} \sum_{n=1} I_n \cos[(n \mp 1)t + \varphi_n] \\ - \sum_{n=1} I_n \sin[(n \mp 1)t + \varphi_n] \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中: $n = 3k + 1$ 时取上符号; $n = 3k - 1$ 时取下符

号。

将 i_p 、 i_q 分解为直流分量与波动分量,得:

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \end{bmatrix} = \sqrt{3} \begin{bmatrix} I_1 \cos(\omega t - \varphi) + \sum_{n=2}^{N_1-1} I_n \cos[(n+1)\omega t + \varphi] \\ I_1 \sin(\omega t - \varphi) - \sum_{n=2}^{N_1-1} I_n \sin[(n+1)\omega t + \varphi] \end{bmatrix} \quad (3)$$

由式(3)将 i_p 、 i_q 表达式展开后,分析可知与电流 i_a 、 i_b 、 i_c 基波分量对应的 i_p 分量为直流量 $\bar{i}_p = \sqrt{3} I_1 \cos \varphi$, 对应的 i_q 分量为直流量 $\bar{i}_q = \sqrt{3} I_1 \sin \varphi$, i_p 和 i_q 中其余波动部分只含 $3k$ 次谐波^[4]。

若有功及无功电流信号 i_p 、 i_q 经(LPF)低通滤波器滤去波动分量,则得:

$$\begin{bmatrix} \bar{i}_p \\ \bar{i}_q \end{bmatrix} = \sqrt{3} \begin{bmatrix} I_1 \cos(\varphi) \\ I_1 \sin(\varphi) \end{bmatrix} \quad (4)$$

将 \bar{i}_p 和 \bar{i}_q 通过反变换,得三相电流的基波分量:

$$\begin{bmatrix} i_{af} \\ i_{bf} \\ i_{cf} \end{bmatrix} = C_{32}^T C^{-1} \begin{bmatrix} \bar{i}_p \\ \bar{i}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{2} I_1 \sin(\omega t + \varphi) \\ \sqrt{2} I_1 \sin(\omega t - \frac{2}{3}\omega t + \varphi) \\ \sqrt{2} I_1 \sin(\omega t + \frac{2}{3}\omega t + \varphi) \end{bmatrix} \quad (5)$$

在检测系统中,由于通过一个锁相环(PLL)和一个正、余弦发生电路提取与 A 相电压 u_a 同相位的正弦信号和余弦信号,从而减少电压的畸变对检测结果的影响^[3]。可见, i_p - i_q 运算方式可以准确地计算出 i_{af} 、 i_{bf} 、 i_{cf} , 从而计算出三相谐波分量 i_{ah} 、 i_{bh} 、 i_{ch} 。

1.2 i_p - i_q 检测运算中的积分均值计算方法

首先从数学上考虑检测信号的离散数据的数字处理方法。根据复化求积分的数学思想^[5], 设将区间 $[a, b]$ 等分分成 N 个小区间, 小区间的长度为 $h = \frac{b-a}{N}$, 在每个小区间上用低阶求积的公式计算, 然后将每个小区间的计算结果加起来得到区间 $[a, b]$ 上的积分; 若使用复化梯形公式, 则得到求积分关系式为:

$$T_N = \frac{b-a}{2N} \left[f(a) + f(b) + 2 \sum_{k=1}^{N-1} f(a+kh) \right] \quad (6)$$

则在区间 $[a, b]$ 上的平均值为:

$$\bar{T}_N = \frac{b-a}{2N^2} \left[f(a) + f(b) + 2 \sum_{k=1}^{N-1} f(a+kh) \right] \quad (7)$$

如图 1 滤波环节(LPF)中,根据瞬时无功功率理论转换计算出电流为 i_p 和 i_q , 经过离散复化积分均值低通滤波计算, 得到 i_p 和 i_q 的直流分量为 \bar{i}_p 和 \bar{i}_q 。设算法每一输出点依据的采样数据为 N_1 , 即步长取为 1, 计算分步区间为 $[1, N_1]$, 相应采样数据区间分别为 $[i_p(n-N_1), i_p(n)]$ 与 $[i_q(n-N_1), i_q(n)]$, 根据复化梯形积分公式计算直流分量 \bar{i}_p 和 \bar{i}_q 如下:

$$\begin{bmatrix} \bar{i}_p \\ \bar{i}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2N_1} \left\{ i_p(n-N_1) + i_p(n) + 2 \sum_{k=1}^{N_1-1} i_p(n-N_1+k) \right\} \\ \frac{1}{2N_1} \left\{ i_q(n-N_1) + i_q(n) + 2 \sum_{k=1}^{N_1-1} i_q(n-N_1+k) \right\} \end{bmatrix} \quad (8)$$

1.3 i_p - i_q 运算的数字信号处理方法

因为 i_p - i_q 运算方式主要通过提取基波的有功与无功分量的方法来进行三相谐波检测, 故考虑一个工频周期数据内检测信号的数字处理方法^[6]。为计算 i_p 、 i_q 的有功与无功分量 \bar{i}_p 、 \bar{i}_q , 取两列存放 N_1 个 i_p 、 i_q 数据的存储单元, 在每一周期按计数值 n 依次更新并存放经采样后的输入序列 $x(n)$ ($n = 0, 1, \dots, N_1 - 1$), N_1 的数值由以下讨论中式(9)确定。

设工频周期为 T , 在检测系统中三相电流经采样变换后的信号为 i_p 和 i_q , 其中波动部分为只含 $3k$ 次谐波的信号, 其最小的公共周期为 T_0 , k_0 为所有 i_p 、 i_q 的 $3k$ 次谐波的最小公约数, 则 $\frac{T_0}{T} = \frac{1}{3k_0}$ (其中

$k = 1, 2, 3, \dots, k$ 为正整数)。根据傅里叶级数理论, i_p 、 i_q 可分解为各次谐波正弦(余弦)函数之和, 数学上可证明, 在每个公共的周期内这些正弦(余弦)函数的积分平均值为零, 其各次谐波正弦(余弦)函数

积分平均值之和也等于零。即: $\frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} I_n \cos(3k\omega t + \varphi) dt = 0$, $\frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} I_n \sin(3k\omega t + \varphi) dt = 0$, 其中, n 取

$n = 2$ 的正整数。若被检测 i_p 和 i_q 中谐波分量有最小公共周期 T_0 , 则取 $N_1 = N \frac{T_0}{T}$ (T 为工频周期, N 为每个周期采样数据), 为满足滤去波动分量从而计算 i_p 和 i_q 直流分量的要求, 计算直流分量 \bar{i}_p 和 \bar{i}_q 的式(8)中 N_1 取值为:

$$N_1 = N \cdot \frac{1}{3 K_0} \quad (9)$$

例如,三相三线制电网中 i_p, i_q 只含 3、6、9 次谐波,则据此取最小公约数 $k_0 = 1$,对应则有:

$$N_{1\min} = \frac{N}{3}$$

考虑在满足滤去波动分量计算 i_p 和 i_q 直流分量的采样条件下,数字信号处理的快速递推算法:设与当前计数值 $x(n)$ 对应的输出均值记为 $y(n)$,则此前计数值 $x(n-1)$ 对应的输出均值为 $y(n-1)$,与此对应取计算此序列平均值的滤波方法。对经采样后的输入存储单元序列 $x(n-1)$ ($n=0, 1, \dots, N_1-1$),经离散积分运算后的输出均值为序列 $y(n-1)$ ($k=0, 1, \dots, N_1-1$),其计算关系式为:

$$y(n-1) = \frac{1}{2N_1} [x(n-1-N_1) + x(n-1) + 2 \sum_{k=1}^{N_1-1} x(n-1-N_1+k)] \quad (10)$$

按时间顺序后移一采样点,输入序列为 $x(n)$ ($n=0, 1, \dots, N_1-1$),对应输出均值序列为 $y(n)$ ($k=0, 1, \dots, N_1$),经离散积分运算后的均值输出为:

$$y(n) = \frac{1}{2N_1} [x(n-N_1) + x(n) + 2 \sum_{k=1}^{N_1-1} x(n-N_1+k)] \quad (11)$$

经推导得离散复化梯形积分均值滤波输出均值序列 $y(n)$ 递推计算公式为:

$$y(n) = y(n-1) + \frac{1}{2N_1} [x(n) - x(n+1-N_1) + x(n-1) - x(n-N_1)] \quad (12)$$

由式(10)和式(11)可推得式(12),由于利用了采样序列相邻点的复化梯形积分均值运算已有的计算数据去构造递推算法,每采样一次新数据,只需要进行 3 次加法、2 次减法运算和一次乘法运算,其计算量是很小的。应用中将 $x(n)$ 、 $y(n)$ 相应换成 i_p 、 i_q 即可。

上述数学推导采用满足 i_p, i_q 公共周期要求的滑动时间窗,是在周期信号的基础上进行的,因为谐波不同于暂态现象,是周期性和不变的。基于周期信息实时地检测 i_p, i_q 的瞬时值,符合 IEEE 关于谐波频率为基波频率的整数倍的定义标准。因此,上述检测算法中可以在 i_p, i_q 波动分量的一个最小公共周期内跟踪上电流 i_p, i_q 的瞬时值,实现对三相谐波的精确实时检测。

2 仿真分析与研究

根据上述理论推导,通过 Matlab 对三相谐波检测系统进行仿真,分析研究滤波算法对谐波检测的动态响应与精确性。设在某时刻开始通过前置模拟滤波器滤波后三相电路 A 相电流的波形如图 2、4、6、8 中的 i_a 所示。设第 1 次采样的频率设为 6 000 Hz,1 个周期采样 120 个点,分析该三相电流通过两个不同数字滤波算法系统分离直流分量后的检测结果。

2.1 基于有限长 FIR 均值滤波与离散积分均值滤波的稳态谐波检测

下面是分别应用有限长 FIR 均值滤波器与离散积分均值滤波算法进行稳态谐波检测的算例。当电网污染电流含有稳态谐波分量时,由于采用基于离散积分均值滤波算法只需要使用 1/3 个工频周期的数据,可以更快地跟踪谐波的变化,改善检测系统的跟随性能。

算例 1: 选用一种 FIR 有限长均值滤波器分离 i_p, i_q 的直流分量,为满足滤波器截止频率特性,需用较高的阶数才能达到设计指标,取 $N=120$ 阶,其特点是卷积运算量大。设数字滤波器转移函数为:

$$H(z) = \sum_{n=0}^{N-1} h(n) z^{-n}$$

则分离后得到的 A 相基波与谐波电流如图 2、3 所示。

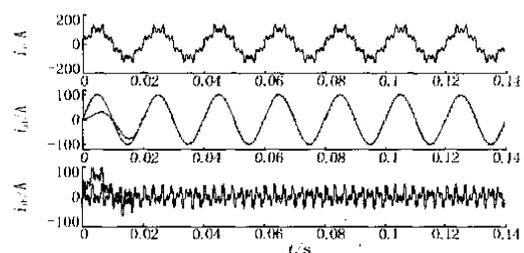


图 2 基于有限长 FIR 均值滤波器的稳态谐波检测

Fig. 2 Steady state harmonic detection based on discrete FIR average filter

系统需经过一个工频周期的变化时间方可跟踪上实际谐波波形,显示系统的跟随性相对比较差。

算例 2: 采用经本文设计的离散梯形积分均值滤波器后分离的 A 相基波与谐波电流,三相电流经变换后的 i_p, i_q 含有 3、6 次谐波,与公共周期相对应的公约为 $K_0 = 1$,因此据式(9)取 $N_1 = 40$,使用离散梯形积分均值滤波方法,分离后得到的 A 相基波与谐波电流如图 4、5 所示。

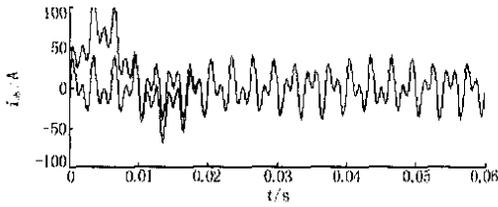


图 3 基于有限长 FIR 均值滤波器的稳态谐波检测(局部)

Fig. 3 Steady state harmonic detection based on discrete FIR average filter(detail)

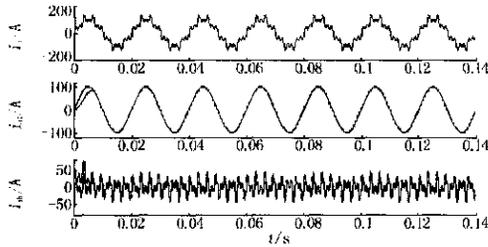


图 4 基于离散积分均值滤波算法的稳态谐波检测

Fig. 4 Steady state harmonic detection based on discrete integral average filter algorithm

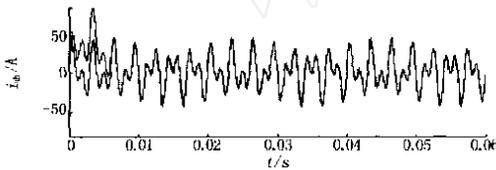


图 5 基于离散积分均值滤波算法的稳态谐波检测(局部)

Fig. 5 Steady state harmonic detection based on discrete integral average filter algorithm(detail)

算例 2 显示了算法的跟随性与准确性比较好。系统具有经过 1/3 个工频周期的时间就可以跟踪上实际波形变化的特点,响应速度快。

2.2 基于有限长 FIR 均值滤波与离散积分均值滤波的暂态谐波检测

下面是分别应用有限长 FIR 均值滤波器与离散积分均值滤波算法的暂态谐波检测算例。当电网污染电流含有暂态变化分量时,由于只需要使用 1/3 个周期的数据,采用基于离散积分均值滤波算法可以更好地反映暂态过程的变化,改善检测系统的跟随性能。

算例 3: 在电网中,设在某时刻开始测得通过前置模拟滤波器滤波后的三相电网 A 相电流如图 6 中 i_a 所示,该电流含有暂态基波变化与暂态谐波分量,通过基于算例 1 的有限长 FIR 均值滤波器后得到基波与谐波如图 6 中所示。

算例 4: 在电网中,设在某时刻开始测得通过前

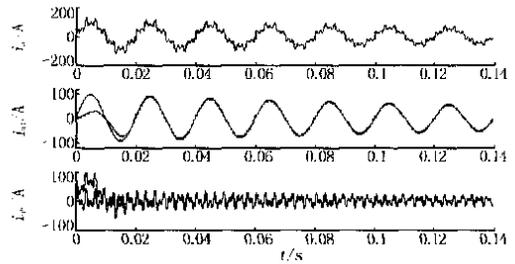


图 6 基于有限长 FIR 均值滤波器的暂态谐波检测

Fig. 6 Transient harmonic detection based on discrete FIR average filter

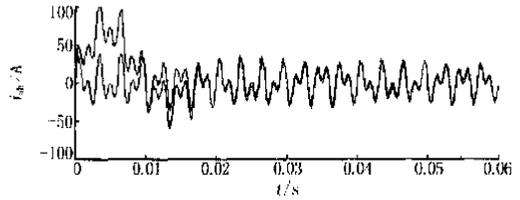


图 7 基于有限长 FIR 均值滤波器的暂态谐波检测(局部)

Fig. 7 Transient harmonic detection based on discrete FIR average filter(detail)

置模拟滤波器滤波后的三相电路的 A 相电流如图 8 中 i_a 所示,该电流含有暂态基波变化与暂态谐波分量,通过基于算例 2 中离散积分均值滤波算法滤波后得到的基波与谐波如图 8 中所示。

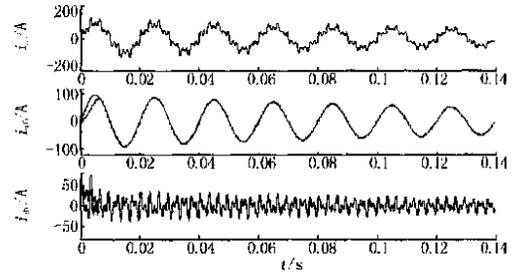


图 8 基于离散积分均值滤波器的暂态谐波检测

Fig. 8 Transient harmonic detection based on discrete integral average filter algorithm

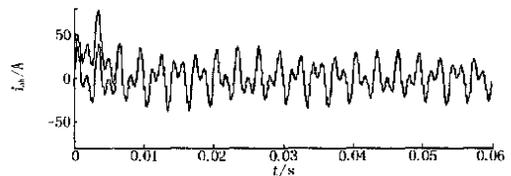


图 9 基于离散积分均值滤波器的暂态谐波检测(局部)

Fig. 9 Transient harmonic detection based on discrete integral average filter algorithm(detail)

算例 4 显示了基于算例 2 的离散积分均值算法更好地适用具有暂态分量的电流的检测。

3 结论

本文以瞬时无功功率 $i_p - i_q$ 运算检测方式理论为基础,根据数字信号处理运算芯片计算的特点,讨论了利用取两列存储单元存放数据和具有滑动时窗特点的积分平均值算法计算谐波电流,用复化离散梯形积分计算均值的滤波算法取代传统的低通滤波方法,该方法对三相谐波电流检测的理论动态响应时间是 $1/3 K_0$ 工频周期。基于 Matlab 的仿真结果表明:该算法能正确地检测基波分量及谐波分量,具有运算量适中、比传统低通滤波器的响应速度更快、算法应用灵活等特点,其检测结果稳定,可靠地实现对三相谐波电流补偿信号的实时检测,提高 APF 控制信号的动态响应特性,而且适用于含有暂态分量的谐波检测。

参考文献:

- [1] 王兆安,杨君,刘进军(WANG Zhao-an, YANG Jun, LIU Jir-jun). 谐波抑制和无功功率补偿(Harmonic Suppression and Reactive Power Compensation) [M]. 北京:机械工业出版社(Beijing:China Machine Press), 1998.
- [2] 王兆安,李民,卓放(WANG Zhao-an, LI Min, ZHUO Fang). 三相电路瞬时无功功率理论的研究(Study Theory of Instantaneous Reactive Power in Three-phase Circuits) [J]. 电工技术学报(Transaction of China Electrotechnical Society), 1992, 7(3): 55-59.
- [3] 杨君,王兆安(YANG Jun, WANG Zhao-an). 三相电路谐波电流两种检测方法的对比研究(A Study on Comparison of Two Methods Used to Detect the Harmonic Currents of Three-phase Circuits) [J]. 电工技术学报(Transaction of China Electrotechnical Society), 1995, 10(2): 43-48.
- [4] 王群,姚为正,王兆安(WANG Qun, YAO Weizheng, WANG Zhao-an). 低通滤波器对谐波检测电路的影响(Effect of Low Pass Filter on Harmonics Detection Circuit) [J]. 西安:西安交通大学学报(Xi'an:Journal of Xi'an Jiaotong University), 1999, 33(4): 5-8.
- [5] 于寅(YU Yin). 高等工程数学(第二版)(Advanced Engineering Mathematics, Second Edition) [M]. 武汉:华中理工大学出版(Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press), 1995. 332-333.
- [6] 何益宏,卓放,等(HE Yi-hong, ZHUO Fang, et al). 一种基于瞬时无功功率理论谐波检测的离散滤波方法(A Discrete Filtering Method for Harmonics Detection Based on Instantaneous Reactive Power Theory) [J]. 电工电能新技术(Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2002, 21(4): 13-50.
- [7] 楼顺天,李博菡(LOU Shun-tian, LI Bo-han). 基于 MATLAB 的系统分析与设计信号处理(Analysis and Design of System Based on MATLAB Signal Processing) [M]. 西安:西安电子科技大学出版社(Xi'an: Xidian University Press), 1998.
- [8] 梁虹,梁浩,等(LIANG Hong, LIANG Hao, et al). 信号与系统分析及 MATLAB 实现(Analysis and Design of System Based on MATLAB) [M]. 北京:电子工业出版社(Beijing: Publishing House of Electronics Industry), 2002.

收稿日期: 2004-03-31; 修回日期: 2004-07-11

作者简介:

刘传林(1965 -),男,硕士,副教授,从事电能质量分析与控制方面研究及电路教学。E-mail: liucl@gdsdx.edu.cn

Instantaneous harmonics detecting for three-phase circuits based on $i_p - i_q$ calculating mode and discrete integral average filter algorithm

LIU Chuan-lin

(Guangdong Technical College of Water Resources and Electric Engineering, Guangzhou 510635, China)

Abstract: This paper discusses harmonic detection of three-phase circuits based on $i_p - i_q$ calculating mode instantaneous detecting method. With the $i_p(i_q)$ containing only $3k$ harmonics (k is integer), the filter can be designed as a moving average filter. This paper proposes a filtering algorithm to obtain direct component of foundational current by using discrete integral average calculation. The foundational current can be reconstructed by transforms, and harmonic currents can be gained by reducing. This filter algorithm is lesser in calculation. Theoretical analysis and simulation show that the detecting method has an advantage of dynamic performance of digital filtering in harmonic detecting system and it can be used in harmonic detection of three-phase circuits.

Key words: Instantaneous $i_p - i_q$ calculating mode; discrete integral average filter algorithm; Matlab simulation