

一种改进的单相电路 i_p-i_q 谐波检测方法

居茜, 鞠勇

(南京师范大学电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042)

[摘要] 针对单相电路谐波的特点,以瞬时无功理论为基础,分析了单相电路 i_p-i_q 谐波检测法.综合考虑检测的精度及实时性要求,提出一种更适合单相电路谐波检测的改进方法.该检测方法在引入反馈环节、改善检测系统实时性的基础上,采用过渡带衰减速率快、频率特性好的椭圆低通滤波器代替传统的巴特沃斯低通滤波器,减少低通滤波器的延时及对检测精度的影响.利用 MATLAB/Simulink 进行建模和仿真,证明改进算法提高了检测精度和动态响应速度.

[关键词] 单相电路,谐波检测, i_p-i_q 算法,反馈,椭圆低通滤波器

[中图分类号] TM761 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2014)02-0024-06

An Improved i_p-i_q Detecting Method for Harmonics in Single-Phase Circuits

Ju Qian, Ju Yong

(School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

Abstract: In view of the features of harmonics in single-phase circuits, the study makes an analysis on harmonics i_p-i_q detection for single-phase circuits in the way of mathematics based on the instantaneous reactive power theory. Considering accuracy and real-time of the harmonics detection, a much more suitable method for harmonics in single-phase circuits is proposed. In order to improve the performance of the whole detection system, a feedback process is added to the system. With the application of the elliptic low-pass filter featuring high decay rate in transition zone and a good frequency characteristic instead of traditional Butterworth low pass filter, the method can reduce the influence of time delay of low-pass filter on the detection accuracy. The modeling and simulation of MATLAB/Simulink proves that the method improves the accuracy and speed of dynamic response.

Key words: single-phase circuits, detecting method for harmonics, i_p-i_q method, feedback, low-pass elliptic filter

随着电力电子装置及其他非线性负载的广泛应用,电网的电能质量问题日趋严峻.有源滤波器(APF)是一种抑制谐波、补偿无功功率的电力电子装置,而谐波检测算法的精度与实时性直接影响 APF 的性能.

对于三相电路,基于三相电路瞬时无功功率理论的 $p-q$ 法和 i_p-i_q 法是比较成熟的谐波及无功检测算法.在单相电路中运用三相电路瞬时无功功率理论的方法是构造三相电流或直接构造等效两相电流^[1],但这两种构造方法都需要通过延时来实现,降低了算法的实时性.另外,三相电路 i_p-i_q 算法在检测瞬时谐波电流时,由于电压信号被转换为幅值为单位长度的标准正弦波,已经失去了幅值和相位信息,因此瞬时有功功率 p 和瞬时无功功率 q 也就失去了原有的意义,算法中的 $\alpha-\beta$ 与 $p-q$ 坐标变换就显得多余^[2].由此提出单相电路 i_p-i_q 谐波检法,省去坐标变换,并在算法中引入反馈环节,改善检测系统的性能.在此基础上,考虑到检测方法中的低通滤波器(LPF)性能直接影响检测的精度和动态响应速度,采用过渡带衰减速率快、频率特性好的椭圆 LPF 代替传统的巴特沃斯低 LPF.改进的单相电路 i_p-i_q 谐波检法能够同时兼顾检测的准确性和实时性.

1 单相电路 i_p-i_q 谐波检测法

设单相电路的电网电压为:

$$u_s(t) = U_m \sin \omega t. \quad (1)$$

含有谐波的单相非线性周期负载电流为:

$$i_D(t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \varphi_n). \quad (2)$$

对式(2)进行分解,得:

$$\begin{aligned} i_D(t) &= I_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + \sum_{n=2}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \varphi_n) = I_1 \cos \varphi_1 \sin(\omega t) + I_1 \sin \varphi_1 \cos(\omega t) + \sum_{n=2}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \\ &= I_{1p} \sin \omega t + I_{1q} \cos \omega t + \sum_{n=2}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \varphi_n) = i_{1p}(t) + i_{1q}(t) + i_h(t). \end{aligned} \quad (3)$$

式中, I_1 、 φ_1 分别为基波电流幅值和相位角; I_n 、 φ_n 分别为 n 次谐波电流幅值和相位角; I_{1p} 、 I_{1q} 分别为基波有功电流和基波无功电流幅值; $i_{1p}(t)$ 、 $i_{1q}(t)$ 、 $i_h(t)$ 分别为基波有功电流分量、基波无功电流分量和谐波电流分量. 若能确定 I_{1p} 和 I_{1q} 值, 就能得到 $i_{1p}(t)$ 和 $i_{1q}(t)$.

为了省去三相电路 i_p-i_q 算法中的坐标变换, 本文直接定义单相电路的瞬时有功电流

$$\begin{aligned} i_p = i_D(t) \sin \omega t &= I_{1p} \sin^2 \omega t + I_{1q} \cos \omega t \sin \omega t + \sum_{n=2}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \sin \omega t \\ &= \frac{I_{1p}}{2} (1 - \cos 2\omega t) + \frac{I_{1q}}{2} \sin 2\omega t + \sum_{n=2}^{\infty} \frac{I_n}{2} \{ \sin[(n+1)\omega t + \varphi_n] + \sin[(n-1)\omega t + \varphi_n] \}. \end{aligned} \quad (4)$$

由式(4), 将 i_p 通过低通滤波器便可得到基波有功电流幅值的一半, 通过 2 倍增益再与 $\sin \omega t$ 相乘, 便可得到 $i_{1p}(t)$.

同理, 定义单相电路的瞬时无功电流分量为

$$\begin{aligned} i_q = i_D(t) \cos \omega t &= I_{1p} \sin \omega t \cos \omega t + I_{1q} \cos^2 \omega t + \sum_{n=2}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \cos \omega t \\ &= \frac{I_{1p}}{2} (1 - \cos 2\omega t) + \frac{I_{1q}}{2} \sin 2\omega t + \sum_{n=2}^{\infty} \frac{I_n}{2} \{ -\cos[(n+1)\omega t + \varphi_n] + \cos[(n-1)\omega t + \varphi_n] \}. \end{aligned} \quad (5)$$

由式(5), 将 i_q 通过低通滤波器便可得到基波无功电流幅值的一半, 通过 2 倍增益再与 $\cos \omega t$ 相乘, 即可得到 $i_{1q}(t)$.

确定了 $i_{1p}(t)$ 和 $i_{1q}(t)$ 后, 便能得到谐波电流 $i_h(t)$:

$$i_h(t) = i_D(t) - i_{1p}(t) - i_{1q}(t). \quad (6)$$

基于上述单相电路 i_p-i_q 谐波检测原理, 单相电路 i_p-i_q 谐波检测法原理框图如图 1 所示. 其中, 信号 $\sin \omega t$ 和 $\cos \omega t$ 由电网电压通过锁相环 (PLL) 得到.

如果对谐波及无功电流同时进行补偿, 则只需分离出基波有功电流作为补偿电流, 断开图 1 中 $i_{1q}(t)$ 所在的通路, 此时的算法更为简单.

理想的电网电压波形应为正弦波, 但实际的电网电压波形由于不同原因, 会存在一定的畸变, 这种畸变在一定程度内是允许的. 根据文献[3]的调查结果, 电力系统电压的总谐波畸变率平均已达 2% ~ 3%, 在畸变严重的时段其值更高. 采用单相电路 i_p-i_q 谐波检测法, 由于电网电压不直接参加运算, 即使电网电压存在畸变或不对称谐波时, 仍能准确得到谐波电流. 且用该方法实现时电路相对简单, 只需要锁相环、乘法器、低通滤波器等器件就可实现.

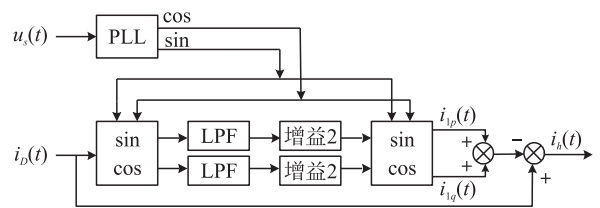


图 1 单相电路 i_p-i_q 谐波检测法原理框图

Fig. 1 The principle of single-phase circuit i_p-i_q harmonic detection method

2 改进的单相电路 i_p-i_q 谐波检测法

2.1 低通滤波器的选择

单相电路 i_p-i_q 谐波检测法中低通滤波器(LPF)的作用是提取 i_p 和 i_q 的直流分量,进而得到电流的基波分量.因此要求低通滤波器滤除直流以外的部分,需要满足截止频率低、动态响应快、延时尽可能小等要求.所以在设计数字低通滤波器时,对滤波器类型的选择及参数的精度都有很严格的要求,同时还要考虑该算法在有源滤波器主控制器 DSP 中的实现问题.

低通滤波器可以分为巴特沃斯(Butterworth)滤波、切比雪夫(Chebyshev)滤波和椭圆(elliptic)滤波等^[4].巴特沃斯滤波器有较好的幅度特性和瞬态特性,但是它的过渡带过于平缓^[5];切比雪夫滤波器的通带是等波纹抖动的,阻带是平坦的,过渡带比巴特沃斯稍陡,但瞬态特性差;椭圆滤波器的幅值响应在通带和阻带内都是等波纹的,对于给定的阶数和给定的波纹要求,椭圆滤波器的过渡带很窄,且其过渡带下降迅速.讨论的滤波器都是全极点网络,它们仅在无限大阻带处衰减为无限大.而椭圆函数滤波器在有限频率上既有零点又有极点,极零点在通带内产生等波纹,这类似于切比雪夫滤波器.阻带内的有限传输零点减小,则过渡区可获得极为陡峭的衰减特性曲线^[6].引入这些传输零点后,使可能对一定数目的极点得到理论上的最优衰减速率.如表 1 所示,在相同的设计指标下对 3 种滤波器进行比较.显然,椭圆函数滤波器与其他滤波器相比,在过渡区内具有快得多的衰减速率;且设计的阶数比前 2 种低,频率特性较好,过渡带较窄,因此椭圆滤波器是最优的选择^[7].

本文利用 MATLAB 仿真软件提供的滤波器设计工具 Fdatool 设计所需的椭圆 LPF,该工具使用图形用户接口(GUI)进行 FIR 和 IIR 滤波器的设计^[8].

综合考虑 LPF 滤波效果和延时因素,滤波器采样频率定为 5 000 Hz,阶数为 3 阶,截止频率为 20 Hz.设计完成的椭圆 LPF 的通带特性如图 2 所示,经 MATLAB/Simulink 仿真证明该椭圆 LPF 能够达到谐波检测的要求,且优于传统的 2 阶巴特沃斯 LPF.

表 1 3 种滤波器的性能比较

Table 1 The compare between 3 kinds of filter

滤波器类型	阶数	阻带衰减/dB
巴特沃斯	6	15
切比雪夫	4	25
椭圆函数	3	27

将 Fdatool 设计得到的椭圆滤波器导入 workplace,获取该 LPF 的传递函数参数为:

$$H(z) = \frac{0.0002168 - 0.0002128z^{-1} - 0.0002128z^{-2} + 0.0002168z^{-3}}{1 - 2.9748z^{-1} + 2.9503z^{-2} - 0.9755z^{-3}}. \quad (7)$$

Fdatool 工具可对设计所得的滤波器系数进行量化,进而可得滤波器量化后的差分方程,能够利用 DSP 方便地实现所设计的数字滤波器.

2.2 反馈环节

考虑到检测方法中 LPF 的固有延时将会对检测结果产生影响,为进一步提高动态响应速度,引入谐波及无功电流的反馈^[9-11].如图 3 所示,以检测谐波电流和无功电流为例,当基波有功电流增大时,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.这样,输出的谐波及无功电流中含有与系统基波有功电流同相位的成分,反馈到输入端,将使得检测出的基波有功分量有所增大,从而补偿了过渡过程中的检测误差,加快了动态响应速度.同样,当基波有功电流减小时,过渡

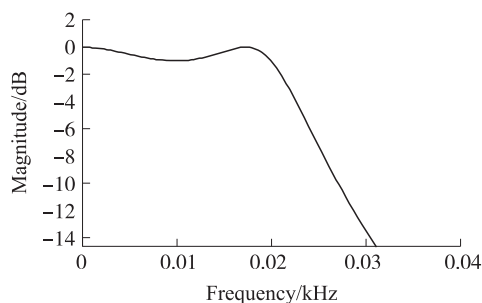


图 2 椭圆 LPF 的通带特性

Fig. 2 Characteristics of elliptic LPF

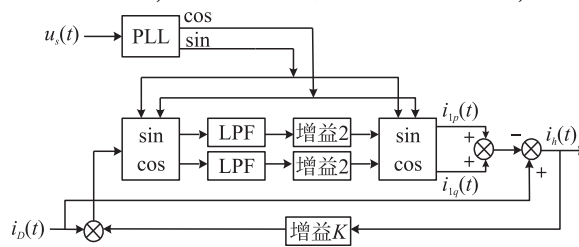


图 3 含反馈环节的单相电路 i_p-i_q 谐波检测法原理框图

Fig. 3 The principle of single-phase circuit i_p-i_q harmonic detection with feedback function

过程中输出的谐波及无功电流中含有与系统基波有功电流反相位的成分,使检测出的基波有功分量迅速衰减,补偿了低通滤波器的延时。

在稳态情况下,反馈量 $i_h(t)$ 含有谐波电流和无功电流分量,由于这些成分与电压作用所产生的的是高频交流分量,可被低通滤波器滤除,因此不会影响测量精度。在暂态过程中,反馈量 $i_h(t)$ 除了含有谐波分量与无功分量以外,还含有部分基波有功分量。这部分基波分量与电压作用后通过低通滤波器后不会被滤除,而是得到一个附加直流量,从而使检测结果更接近变化后的实际值,加快了响应速度。反馈系数的选取与负载电流 $i_D(t)$ 的变化范围有关,为避免检测结果振荡,反馈系数不宜取得过大,在 $i_D(t)$ 最大变化倍数的 0.1~0.2 范围内即可取得较好的检测实时性与稳定性。

3 仿真研究

本文仿真软件采用 MATLAB 2010b。根据图 3 所示的含反馈环节的单相电路 i_p-i_q 谐波检测法原理框图,利用 MATLAB/Simulink 模块库,得到如图 4 所示的仿真模型,其中 LPF 为本文设计的 3 阶椭圆 LPF,反馈系数取 0.15。

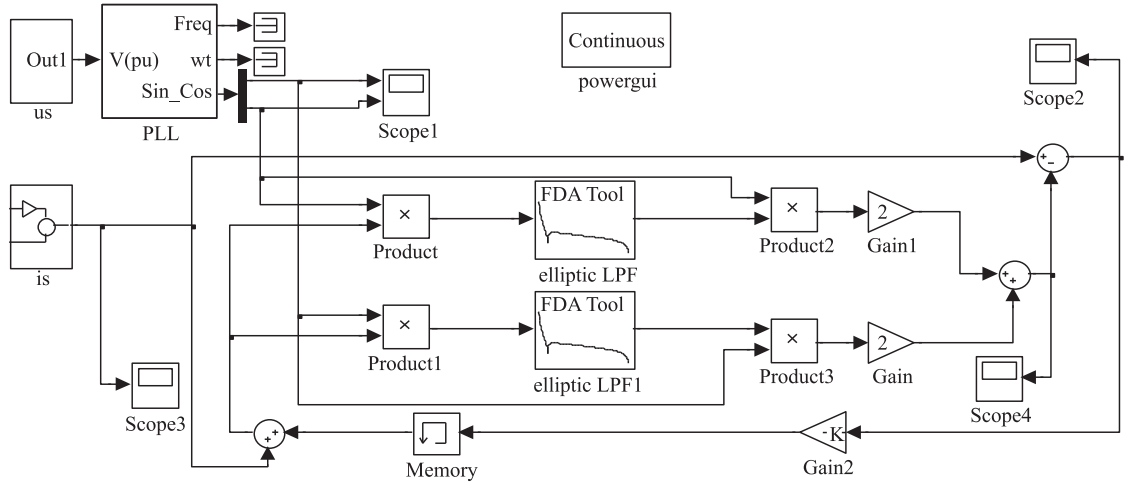


图 4 改进的单相电路 i_p-i_q 谐波检测法仿真模型

Fig. 4 The simulation model of improved single-phase circuit i_p-i_q harmonic detection method

仿真模型中含有谐波的负载电流 $i_D(t)$ 由多个 Sine Wave 模块叠加得到,其中含有 3、5、7、9 次谐波,波形如图 5 所示。负载电流在 0.1 s 时突变,幅值增大至原来的 2 倍,以此检验谐波检测法跟踪谐波电流的能力。

首先采用传统的单相电路 i_p-i_q 谐波检法来检测谐波。得到的仿真结果如图所示,其中图 6 为检测的基波电流波形,图 7 为检测的谐波电流波形,图 8 为传统检测方法所得基波电流的谐波含量图。

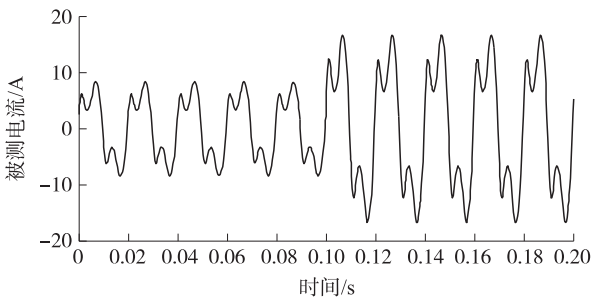


图 5 含有谐波的负载电流 $i_D(t)$

Fig. 5 Load current $i_D(t)$ contains harmonic

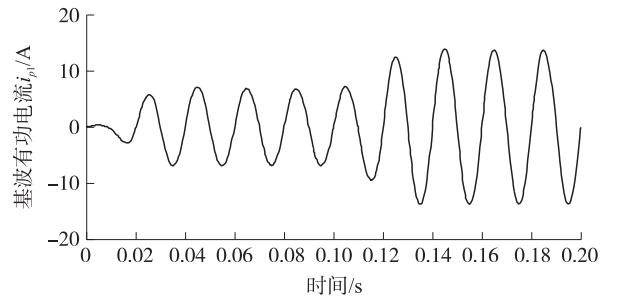


图 6 传统单相电路 i_p-i_q 谐波检法检测的基波电流

Fig. 6 The base wave current detected by the traditional single-phase circuit i_p-i_q harmonic detection

由仿真结果可以看出,传统的单相电路 i_p-i_q 谐波检法检测得到的基波电流接近正弦波,FFT analysis 所得总谐波畸变率 THD 为 1.00%,说明测量精度较高。动态响应方面,从开始检测的 0 s 和负载电流突变的 0.1 s 可以发现,经过一个周期,即 0.02 s 之后,该算法才能检测得到正确的结果。

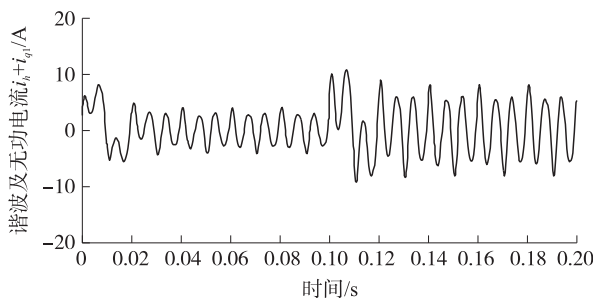
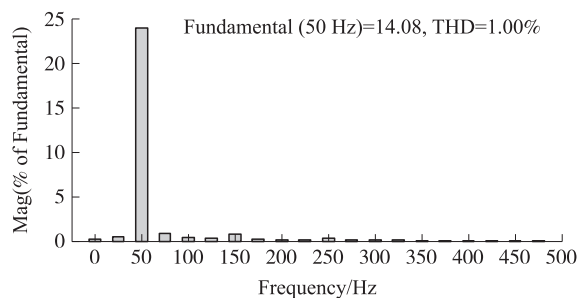
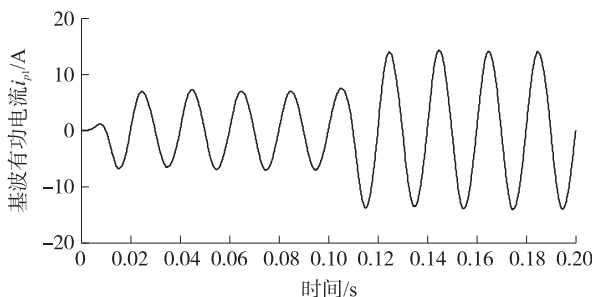
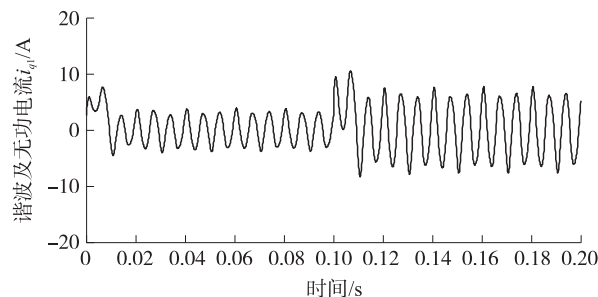
图 7 传统单相电路 i_p-i_q 谐波检法检测的谐波电流Fig. 7 The fundamental current detected by the traditional method single-phase circuit i_p-i_q harmonic detection method

图 8 传统检测方法所得基波电流谐波含量图

Fig. 8 The harmonic content for the base wave current detected by the traditional detection method

采用本文提出的改进的单相电路 i_p-i_q 谐波检法检测谐波,得到的仿真结果如图所示,其中图 9 为检测的基波电流波形,图 10 为检测的谐波电流波形,图 11 为检测所得基波电流的谐波含量图。

图 9 改进单相电路 i_p-i_q 谐波检法检测的基波电流Fig. 9 The base wave current detected by the improved single-phase circuit i_p-i_q harmonic detection method图 10 改进单相电路 i_p-i_q 谐波检法检测的谐波电流Fig. 10 The fundamental current detected by the improved single-phase circuit i_p-i_q harmonic detection method

从仿真结果结果可以看出,改进的单相电路 i_p-i_q 谐波检法检测精度更高,FFT analysis 所得总谐波畸变率 THD 为 0.63%,且动态响应时间短于传统的 i_p-i_q 谐波检法,在 3/4 个周期之内便能够检测得到正确的结果。

以上仿真表明,传统的单相电路 i_p-i_q 谐波检法和本文提出的改进单相电路 i_p-i_q 谐波检法都能准确检测出基波电流和谐波电流,而改进的谐波检测法检测精度更高,动态响应速度更快。

4 结语

本文针对目前单相谐波电流及无功电流检测方法所存在的问题,对单相电流进行了分析,提出了一种改进的单相电路 i_p-i_q 谐波检测方法。在引入谐波及无功电流的反馈量,提高检测实时性的基础上,用椭圆 LPF 代替传统的巴特沃斯 LPF,进一步提高检测精度与动态响应速度。该方法电路结构简单,所需元件少。理论分析和仿真结果表明,改进的单相电路 i_p-i_q 谐波检测方法能实时准确地检测出电网中的谐波。

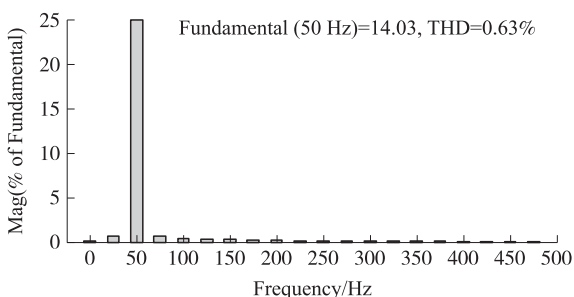


图 11 改进检测算法所得基波电流谐波含量图

Fig. 11 The harmonic content for the base wave current detected by the improved detection method

[参考文献] (References)

- [1] 王兆安,杨军,刘进军,等. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京:机械工业出版社,1998.
Wang Zhaoan, Yang Jun, Liu Jinjun. Harmonic Suppression and Reactive Power Compensation[M]. Beijing: China Machine Press, 1998. (in Chinese)

- [2] 张庆,曾正,杨吟野,等. 有源电力滤波器谐波检测方法综述[J]. 化工自动化及仪表,2011(3):245-251.
Zhang Qing, Zeng Zheng, Yang Yinye, et al. Harmonic extraction techniques for active power filters [J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2011(3):245-251. (in Chinese)
- [3] 方红兴. 基于 DSP 控制的并联有源电力滤波器的研究[D]. 杭州:浙江大学电气工程学院,2012.
Fang Hongxing. Research of the harmonic detection method of the hybrid active power filter based on injection circuit [D]. Hangzhou: School of Electrical Engineering, Zhejiang University, 2012. (in Chinese)
- [4] 李春剑,吉望西,刘达伦. 基于 DDS 椭圆型低通滤波器的设计[J]. 国外电子测量技术,2009,28(1):36-38.
Li Chunjian, Ji Wangxi, Liu Dalun. Design of low-pass elliptic filter based on direct digital synthesizer [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2009, 28(1):36-38. (in Chinese)
- [5] 孟冀,邓北星. 基于巴特沃思滤波器的有源电力滤波研究[J]. 电测与仪表,2007,44(502):12-15.
Meng Ji, Deng Beixing. The study of Butterworth adaptive filter based payload current filter [J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2007, 44(502):12-15. (in Chinese)
- [6] 刘抒珍,童子权,任丽军. DDS 波形合成技术中低通椭圆滤波器的设计[J]. 哈尔滨理工大学学报,2004,9(5):22-24.
Liu Shuzheng, Tong Ziquan, Ren Lijun. Design of Low-pass elliptic filter on DDS [J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2004, 9(5):22-24. (in Chinese)
- [7] 韩其国,陈林,章坚民. 基于实测谐波数据的无源滤波器设计及仿真[J]. 机电工程,2010(9):92-95.
Han Qiguo, Chen Lin, Zhang Jianmin. Design and simulation of passive filter based on actual harmonic data [J]. Journal of Mechanical and Electrical Engineering, 2010(9):92-95. (in Chinese)
- [8] Rulph Chassaing. DSP 原理及其 C 编程开发技术[M]. 北京:电子工业出版社,2005.
Rulph Chassaing. DSP Principle and C-source Programming Development Techniques [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2005. (in Chinese)
- [9] 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,2008,45(1):4-7.
Sun Shuguang, Wang Jingqin, Shi Shunquan. Study on real-time detection of harmonics and reactive currents in single phase circuit [J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2008, 45(1):4-7. (in Chinese)
- [10] 宋寿鹏. 数字滤波器设计及工程应用[M]. 镇江:江苏大学出版社,2009.
Song Shoupeng. Digital Filter Design and Its Application in Engineering [M]. Zhenjiang: Jiangsu University Press, 2009. (in Chinese)
- [11] 李芳华,胡建军. 一种单相电流谐波及基波电流检测方法[J]. 电测与仪表,2005,42:9-11.
Li Huafang, Hu Jianjun. A detection method for harmonic and fundamental currents in single-phase circuit [J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2005, 42:9-11. (in Chinese)

[责任编辑:严海琳]