

一种改进的 i_p-i_q 谐波检测方法及数字低通滤波器的优化设计

周柯, 罗安, 夏向阳, 赵伟

(湖南大学电气与信息工程学院, 湖南省长沙市 410082)

An Improved i_p-i_q Harmonic Current Detecting Method and Digital Low-pass Filter's Optimized Design

ZHOU Ke, LUO An, XIA Xiang-yang, ZHAO Wei

(College of Electrical Engineering & Information Technology, Hunan University, Changsha 410082, Hunan Province, China)

ABSTRACT: Harmonic and reactive currents' highly precise and real-time detecting makes important influence on active power filter's performance. In response to the application of active power filter, this paper presents an improved i_p-i_q method on harmonic and reactive currents detection, the improved i_p-i_q method can not only decrease the calculation capacity, but also be directly used in three-phase three-wire, three-phase four-wire and single-phase systems. Due to harmonic and reactive currents are much smaller than fundamental wave current, this paper presents a novel optimization design method for digital low-pass filter, the proposed method adopts average filter to improve ButterWorth filter's characteristics, and then makes the whole detection system obtain better precise and more high response speed.

KEY WORDS: active power filter; harmonic detection; i_p-i_q algorithm; digital low-pass filter; ButterWorth filter; average filter

摘要: 有源电力滤波器的工作性能,很大程度上取决于对谐波和无功电流高精度、实时的检测上。针对有源电力滤波器工程应用的需要,该文提出了对 i_p-i_q 方法在检测谐波和无功电流应用上的改进,不仅减少了计算量,还能直接应用于三相三线制、三相四线制和单相系统谐波和基波无功电流的检测。针对电网中谐波电流相对基波电流较小的特点,该文进一步提出了采用均值滤波器来改善ButterWorth低通滤波器特性的数字低通滤波器优化设计新方法,使其能更好的适应电网谐波和基波无功电流检测的需要,从而使整个检测系统

可以同时获得良好的检测精度和令人满意的动态响应速度。

关键词: 有源电力滤波器; 谐波检测; i_p-i_q 算法; 数字低通滤波器; ButterWorth滤波器; 均值滤波器

0 引言

有源电力滤波器的工作性能,很大程度上取决于对谐波以及无功电流的高精度、实时检测^[1-3]。目前,国内外学者提出的谐波检测方法大部分都是建立在瞬时无功功率理论^[4-7]基础上的。由于 i_p-i_q 算法具有实时性强,实现简单等特点,在很多方面都得到了成功的应用。但由于它是建立在三相电路的基础上,对单相电路的检测要进行必要的扩充之后才能应用,显得比较繁琐;另一方面, i_p-i_q 算法是在 $p-q$ 理论的基础上发展起来的,在用 i_p-i_q 算法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的信息,因此在 i_p-i_q 算法中瞬时有功功率 p 和瞬时无功功率 q 也就失去了原有的意义, i_p-i_q 算法中的三相至两相的坐标变换及其反变换也就显得多余^[8-11]。针对有源电力滤波器工程应用的需要,本文提出了对 i_p-i_q 方法在检测谐波和无功电流应用上的改进,在三相坐标系下同样可以将瞬时电流矢量分解为与电压矢量同步旋转分量和动态旋转分量两部分,这样既可以直接应用于三相三线制、三相四线制和单相系统,又省去了三相至两相及两相至三相的坐标变换,减少了计算量。

同时,由于在基于瞬时无功功率理论的谐波和无功电流的检测方法中,都要用到数字低通滤波器。因此,低通滤波算法的性能直接决定着检测方

基金项目: 国家自然科学基金项目(60474041); 国家 863 计划项目(2004AA001032)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (60474041); The National High Technology Research and Development of China (863 Program) (2004AA001032).

法的精确性和动态跟踪速度，并最终影响有源电力滤波器的谐波补偿性能^[12-14]。针对电网中谐波电流相对基波电流较小的特点，本文提出了采用均值滤波器(FIR滤波器)来改善ButterWorth滤波器(IIR滤波器)特性的数字低通滤波器优化设计新方法，并在研究了将ButterWorth低通滤波器和均值滤波器综合应用于基波电流和各次谐波电流检测时的输入输出特性之后，得出结论：综合采用ButterWorth低通滤波器和均值滤波器可以同时获得良好的检测精度和令人满意的动态响应速度。

1 i_p - i_q 谐波和无功电流检测方法的改进

1.1 改进的 i_p - i_q 检测方法

为了使得改进后的检测方法能直接应用于单相系统和三相四线制系统，本文直接对单相电流进行检测。与传统的 i_p - i_q 算法一样，取与单相电压相位相同的单位正弦函数来代替单相电压。设单相瞬时电压和单相瞬时电流分别为

$$u = \cos(\omega_0 t) \quad (1)$$

$$i = \sum_{k=1}^{\infty} \sqrt{2} I_k \cos(k\omega_0 t + \varphi_k) \quad (2)$$

为了降低检测方法的计算量，本文将省去 i_p - i_q 算法中的三相至两相坐标变换，改为直接求三相坐标系下的瞬时有功电流和瞬时无功电流。定义a-b-c三相坐标系下的瞬时有功电流 i'_p 和瞬时无功电流 i'_q 分别为

$$\begin{cases} i'_p = i \cdot \cos(\omega_0 t) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sqrt{2} I_k}{2} \{ \cos[(k+1)\omega_0 t + \varphi_k] + \cos[(k-1)\omega_0 t + \varphi_k] \} \\ i'_q = i \cdot \sin(\omega_0 t) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sqrt{2} I_k}{2} \{ \sin[(k+1)\omega_0 t + \varphi_k] - \sin[(k-1)\omega_0 t + \varphi_k] \} \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{令： } C_1 = \begin{bmatrix} \cos(\omega_0 t) \\ \sin(\omega_0 t) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\text{则式(3)可以写为 } \begin{bmatrix} i'_p \\ i'_q \end{bmatrix} = C_1 i \quad (5)$$

由式(3)可以看出，在单相瞬时电压取为与其同相位的单位正弦函数的情况下，瞬时有功电流 i'_p 的物理意义是单相瞬时电流和单相瞬时电压的乘积，这跟时域下的瞬时有功功率的定义是相同的；瞬时无功电流 i'_q 的物理意义是单相瞬时电流和相位滞后 $\pi/2$ 的单相瞬时电压的乘积，这跟时域下的瞬时无

功率的定义也是相同的。

将式(3)得到的三相坐标系下的瞬时有功电流 i'_p 和瞬时无功电流 i'_q 通过低通滤波器后获得它们的直流分量，分别定义为 \bar{i}'_p 和 \bar{i}'_q ，则有

$$\begin{cases} \bar{i}'_p = \sqrt{2} I_1 \cos \varphi_1 / 2 \\ \bar{i}'_q = -\sqrt{2} I_1 \sin \varphi_1 / 2 \end{cases} \quad (6)$$

由式(6)可以看出，在单相瞬时电压取为与其同相位的单位正弦函数的情况下， \bar{i}'_p 与基波有功功率成正比而 \bar{i}'_q 与基波无功功率成正比，也就是说，通过对 \bar{i}'_p 的控制能精确的控制基波有功功率，而对 \bar{i}'_q 的控制可以精确的控制基波无功功率。另一方面，从式(6)中还可以看出，在 \bar{i}'_p 与 \bar{i}'_q 中包含了基波电流的幅值和相位信息，而且不包含其他各次谐波信息，因此很容易求得基波电流的瞬时值。

由式(2)可知，基波电流的瞬时值为

$$\begin{aligned} i_1 &= \sqrt{2} I_1 \cos(\omega_0 t + \varphi_1) = \\ &2 \left[\frac{\sqrt{2}}{2} I_1 \cos \varphi_1 \cos(\omega_0 t) + \frac{\sqrt{2}}{2} I_1 \sin \varphi_1 \sin(\omega_0 t) \right] = \\ &2 [\bar{i}'_p \cos(\omega_0 t) - \bar{i}'_q \sin(\omega_0 t)] \end{aligned} \quad (7)$$

$$\text{令： } C_2 = [2 \cos(\omega_0 t) \quad -2 \sin(\omega_0 t)] \quad (8)$$

$$\text{则式(7)可以写为： } i_1 = C_2 \begin{bmatrix} \bar{i}'_p \\ \bar{i}'_q \end{bmatrix} \quad (9)$$

通过式(9)求得基波电流瞬时值后，用单相电流的瞬时值减去基波电流瞬时值即可以得到瞬时谐波电流。采用改进的 i_p - i_q 方法检测电网谐波电流的检测流程如图1所示。图中的PLL为锁相电路，LPF为低通滤波器。

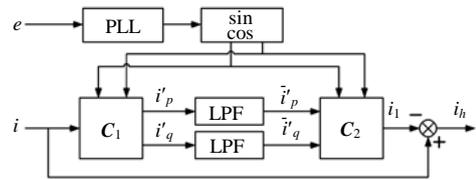


图 1 改进的 i_p - i_q 方法检测电网谐波电流的流程

Fig. 1 Harmonic detection flow with improved i_p - i_q

1.2 改进的 i_p - i_q 方法检测任一次谐波

采用改进的 i_p - i_q 方法检测任一次谐波时，只需要将变换矩阵 C_1 和 C_2 替换为与各次谐波对应的矩阵即可，例如要检测出 n 次谐波电流，令

$$C_1 = \begin{bmatrix} \cos(n\omega_0 t) \\ \sin(n\omega_0 t) \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$C_2 = [2 \cos(n\omega_0 t) \quad -2 \sin(n\omega_0 t)] \quad (11)$$

这时，式(3)变为

$$\begin{cases} i'_p = i \cos(n\omega_0 t) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sqrt{2}I_k}{2} [\cos(k\omega_0 t + n\omega_0 t + \varphi_k) + \cos(k\omega_0 t - n\omega_0 t + \varphi_k)] \\ i'_q = i \sin(n\omega_0 t) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sqrt{2}I_k}{2} [\sin(k\omega_0 t + n\omega_0 t + \varphi_k) - \sin(k\omega_0 t - n\omega_0 t + \varphi_k)] \end{cases} \quad (12)$$

如图1所示,通过低通滤波器后,可以获得相应的直流分量为

$$\begin{cases} \bar{i}'_p = \sqrt{2}I_n \cos \varphi_n / 2 \\ \bar{i}'_q = -\sqrt{2}I_n \sin \varphi_n / 2 \end{cases} \quad (13)$$

由式(13)可以看出,在 \bar{i}'_p 和 \bar{i}'_q 中包含了要检测谐波分量的幅值和相位信息。因此可以求得 n 次谐波电流 i_{hm} 为

$$\begin{aligned} i_{hm} &= \sqrt{2}I_n \cos(n\omega_0 t + \varphi_n) = 2 \left[\frac{\sqrt{2}}{2} I_n \cos \varphi_n \cdot \right. \\ &\quad \left. \cos(n\omega_0 t) + \frac{\sqrt{2}}{2} I_n \sin \varphi_n \sin(n\omega_0 t) \right] = \\ &\quad 2[\bar{i}'_p \cos(n\omega_0 t) - \bar{i}'_q \sin(n\omega_0 t)] = \mathbf{C}_2 \begin{bmatrix} \bar{i}'_p \\ \bar{i}'_q \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (14)$$

综合上述分析可以看出,利用本文提出的这种改进的 i_p - i_q 方法来检测谐波电流具有以下特点:

(1) 可以省去传统 i_p - i_q 算法中的三相到两相的矩阵变换及其反变换过程,使得计算更加简单。

(2) 可以直接获得基波或者各次谐波瞬时电流的大小,特别适应于需要对各次谐波进行分离控制的场合。

(3) 建立在单相电流谐波检测的基础上,因此可以直接应用于单相系统、三相三线制和三相四线制系统。

(4) 应用于三相系统时检测的谐波可以包括所有的零序、正序和负序分量。而改进前的 i_p - i_q 算法中零序分量和负序分量要另外计算。

2 数字低通滤波器的优化设计

2.1 数字低通滤波器

在所有基于瞬时无功功率理论的谐波和基波无功电流的检测方法中,都要用到数字低通滤波器(LPF),用于从总的有功电流和无功电流中获取其直流电流分量。很显然,LPF的性能直接决定着检测方法的精确性和动态跟踪速度,并最终影响有源电力滤波器的谐波补偿性能^[12-14]。因此,LPF的设计是一项很重要的环节。

目前常用的LPF形式有FIR滤波器和IIR滤波器。FIR滤波器的优点是既有恒定的群延迟,又有恒定的相延迟,缺点是其截止频率特性差,要用较高的阶数才能达到指定的设计指标。IIR滤波器的优点是维数不需要很高就可满足一定的指标,缺点是没有控制其相位特性。综合前面阐述的改进的 i_p - i_q 谐波和无功电流检测算法,其LPF的目的是获取a-b-c三相坐标系下的瞬时有功电流 i'_p 和瞬时无功电流 i'_q 中的直流分量,而LPF的相位特性对直流量的检测没有任何影响。因此,在实际工程应用中,通常选用IIR滤波器,而不选用FIR滤波器。与其他的IIR滤波器相比,ButterWorth低通滤波器在线性相位、衰减斜率和加载特性三个方面具有特性均衡的优点^[15-17],因此,在实际应用中,ButterWorth低通滤波器已被列为首选。

2.2 ButterWorth 低通滤波器

ButterWorth 低通滤波器的传递函数可表示为如下形式

$$H_{LPF}(z) = \sum_{k=0}^m b_k z^{-k} / \sum_{k=0}^m a_k z^{-k} \quad (15)$$

其中 m 为ButterWorth低通滤波器的阶数。很容易写成差分形式为

$$y(n) = \frac{1}{a_0} \left[\sum_{k=0}^m b_k x(n-k) - \sum_{k=1}^m a_k y(n-k) \right] \quad (16)$$

因此,ButterWorth低通滤波器采用数字方式实现起来非常简单。

大量研究表明,随着ButterWorth低通滤波器阶数 m 的增大,其稳态误差越小,而动态响应时间越长。为解决ButterWorth低通滤波器稳态误差和动态响应时间之间的矛盾,很多学者进行了研究,其主要的解决方法是通过基因原理^[18-19]或者是神经网络^[20-21]等智能算法来实时修正ButterWorth低通滤波器的系数。这种办法能够比较明显的改善ButterWorth低通滤波器的性能,但是由于算法的实现比较复杂,在有源电力滤波器的实际应用中并不多见。

图2和图3为在改进的 i_p - i_q 算法中仅采用ButterWorth低通滤波器用于基波电流检测时的输出波形,其中,ButterWorth低通滤波器的截止频率设为30 Hz,以下均同。由图2和图3可知:在选用低阶的ButterWorth低通滤波器检测基波有功电流和基波无功电流时,其输出波形中含有较高的交流纹波,这些交流分量会对闭环控制器的性能造成

较大的影响。而选用高阶的ButterWorth低通滤波器时，虽然ButterWorth低通滤波器的输出波形在稳定时基本不含交流分量，但是它的响应速度太慢，如仅选用 5 阶的ButterWorth低通滤波器时就需要经过 0.16 s 左右才能达到稳态。

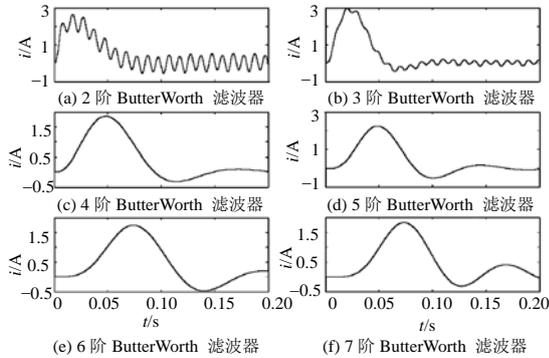


图 2 在改进的 i_p-i_q 算法中仅采用 ButterWorth 低通滤波器进行基波电流检测时与有功电流对应的输出波形
 Fig. 2 Fundamental-wave active current detection results only with ButterWorth low-pass filter based on improved i_p-i_q

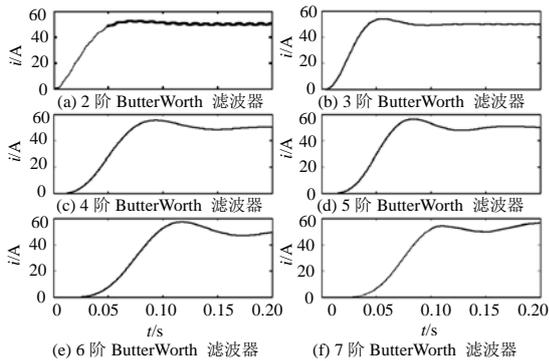


图 3 在改进的 i_p-i_q 算法中仅采用 ButterWorth 低通滤波器进行基波电流检测时与无功电流对应的输出波形
 Fig. 3 Fundamental-wave reactive current detection results only with ButterWorth low-pass filter based on improved i_p-i_q

2.3 均值低通滤波器

在数字信号处理中，常常用到均值低通滤波器来滤除信号中的交流分量^[22]。由于电网的交流分量具有周期性，所以采用一个工频周期内的数据作为均值滤波器的输入。本文选用的 A/D 采样频率为 6.4 kHz，即 1 个工频周期采样 128 点，因此本文采用了 128 个相邻的采样值作为均值滤波器的输入，其传递函数可表示为

$$y(k) = \frac{1}{128} \sum_{m=0}^{127} x(k-m) \quad (17)$$

可以看出它实际上是一种 128 阶的 FIR 滤波器，将其写成差分形式得

$$y(k) = y(k-1) + [x(k) - x(k-128)]/128 \quad (18)$$

图 4 为均值滤波器的单位阶跃响应。由图可知该滤波器具有很好的动态跟踪性能和稳态精度。

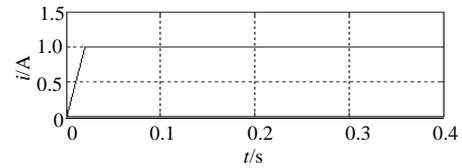


图 4 均值滤波器的单位阶跃响应
 Fig. 4 Unit step responses of average filter

图 5 为在改进的 i_p-i_q 算法中采用均值滤波器充当低通滤波器时对基波电流的检测结果。其检测信号为 $x(t)=4+100\sin(2\pi 50t)+2\sin(2\pi 100t)$ ，在 $t=0.2\text{s}$ 时刻，检测信号中的基波电流突然减半，检测信号变为： $x(t)=4+50\sin(2\pi 50t)+2\sin(2\pi 100t)$ 。由图 5(a) 可知，采用均值滤波器能够比较精确地检测出基波电流，动态响应速度也很好；但从图 5(b) 和 5(c) 可知，在基波电流突变的情况下，均值滤波器的输出会有一段时间含有较大的交流分量，这不利于对基波无功进行闭环控制。

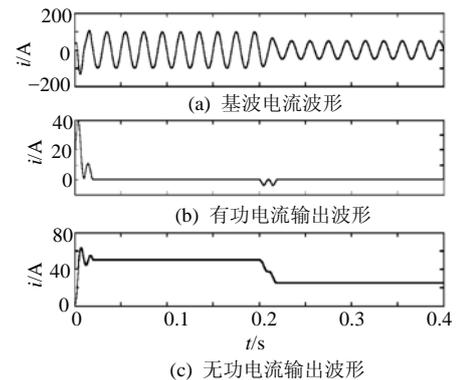


图 5 在改进的 i_p-i_q 算法中仅采用均值滤波器时的基波电流检测结果
 Fig. 5 Fundamental-wave current detection results only with average filter based on improved i_p-i_q

2.4 优化的数字低通滤波器

由以上分析可知，在运用改进的 i_p-i_q 算法对谐波和基波无功电流进行检测时，如果仅采用 ButterWorth 滤波器充当低通滤波器，很难同时满足检测精度和动态响应速度的要求；而仅仅采用均值滤波器时，虽然在基波电流不变的情况下具有理想的检测精度和动态响应速度，但是基波电流的变动对检测结果有很大的影响。综合考虑这 2 种滤波器的优缺点，本文采用了 ButterWorth 低通滤波器和均值滤波器串联的形式作为改进的 i_p-i_q 算法瞬时谐波电流检测的低通滤波器。为了加快检测系统的动态响应速度，本文选用了 2 阶的 ButterWorth 低通滤波器。

图6为采用这种优化的数字低通滤波器对基波电流的检测结果。检测信号最初为： $x(t)=4+100\sin(2\pi 50t)+2\sin(2\pi 100t)$ ，在 $t=0.2s$ 时刻，基波电流减半，检测信号变为： $x(t)=4+50\sin(2\pi 50t)+2\sin(2\pi 100t)$ 。由图可知，与仅仅采用 ButterWorth 低通滤波器时的情况相比，优化后的数字低通滤波器输出波形中的交流纹波大大降低，同时也保持了较好的动态响应速度；而与仅仅采用均值滤波器时的情况相比，虽然动态响应速度不如均值滤波器快，但在基波电流变动时的输出信号波动也已经大大降低。

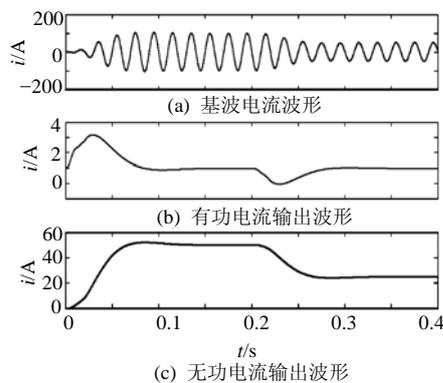


图6 在改进的 i_p-i_q 算法中采用优化的低通滤波器在基波电流突变下的基波电流检测结果

Fig. 6 Fundamental-wave current detection results with optimized low-pass filter under fundamental-wave break based on improved i_p-i_q

在有源电力滤波器的应用中，许多场合都需要检测出各次谐波电流并分别进行控制。由于2次谐波离基波最近，其检测难度也最大，因此本文以2次谐波电流的检测为例来探讨。图7是在基波电流突变的情况下，采用优化的数字低通滤波器对2次谐波电流的检测结果。从图中可以看出，与仅仅采用 ButterWorth 低通滤波器时的情况相比，优化后的数字低通滤波器输出波形中的交流纹波大大降低，基本上趋近为零，检测精度大大提高；而与仅仅采用均值滤波器时的情况相比，虽然动态响应速度不如均值滤波器快，但是在基波突变时的输出信号波动已经大大降低。

图8是在2次谐波电流突变的情况下采用优化的数字低通滤波器对2次谐波电流的检测结果。由图可知，在这种情况下，信号检测结果和低通滤波器的输出波形都比较理想。

综合考虑上面的仿真结果，得出结论：即使是在谐波信号很弱、基波电流变化很快的情况下，采用 ButterWorth 滤波器和均值滤波器串联的形式作

为改进的 i_p-i_q 算法瞬时谐波和无功电流检测的低通滤波器也可以使得各次谐波和无功电流的检测都具有良好的性能。

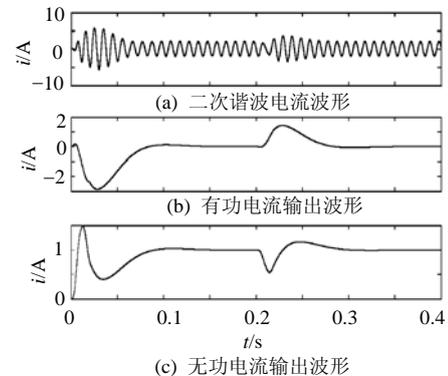


图7 在改进的 i_p-i_q 算法中采用优化的低通滤波器在基波电流突变下的2次谐波电流的检测结果

Fig. 7 2 order harmonic current detection results with optimized low-pass filter under fundamental-wave break based on improved i_p-i_q

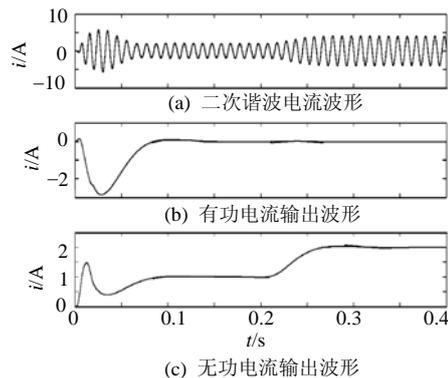


图8 在改进的 i_p-i_q 算法中采用优化的低通滤波器在2次谐波电流突变下的2次谐波电流的检测结果

Fig. 8 2 order harmonic current detection results with optimized low-pass filter under 2 order harmonic-wave break based on improved i_p-i_q

3 结论

本文首先提出了对传统的 i_p-i_q 谐波和基波无功电流检测方法的改进措施。与改进前的 i_p-i_q 方法相比，省去了三相至两相坐标变换及其逆变换，因此计算量更少。另外，由于这种改进的方法直接对a-b-c三相坐标系下的单相电流进行分解，因此可以直接应用于三相三线制、三相四线制以及单相系统。

在利用改进的 i_p-i_q 算法进行谐波和无功电流检测的基础上，针对电网中谐波电流相对基波电流较小的特点，本文提出了采用均值滤波器(FIR滤波器)来改善ButterWorth低通滤波器(IIR滤波器)特性的

数字低通滤波器优化设计新方法。仿真结果表明: 综合采用 ButterWorth 低通滤波器加均值低通滤波器的优化数字低通滤波器更加符合电网谐波和基波无功电流检测的需要, 既能取得较好的检测精度, 又能获得令人满意的动态响应速度。

参考文献

- [1] 王兆安, 杨君, 刘进军. 谐波抑制与无功功率补偿[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [2] 唐欣, 罗安, 涂春鸣. 基于递推积分 PI 的混合型有源电力滤波器电流控制[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10): 38-41.
Tang Xin, Luo An, Tu Chunming. Recursive integral PI for current control of hybrid active power filter [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10): 38-41(in Chinese).
- [3] 周卫平, 吴正国, 夏立. 基波相位和频率的高精度检测及在有源电力滤波器中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 91-96.
Zhou Weiping, Wu Zhengguo, Xia Li. Harmonic and reactive current detection in apf based on high-accuracy phase and frequency detection [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 91-96(in Chinese).
- [4] Akagi H, Kanazawa Y, Nabae A. Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components [J]. IEEE Trans on Ind Appl, 1984, 20(3): 625-630.
- [5] Furuhashi T, Okuma S, Uchikawa Y. A study on the theory of instantaneous reactive power[J]. IEEE Trans. on I. E., 1990, 37(2): 86-90.
- [6] 李圣清, 朱英浩, 周有庆, 等. 基于瞬时无功功率理论的四相输电谐波电流检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 12-17.
Li Shengqing, Zhu Yinghao, Zhou Youqing, et al. Four-phase transmission harmonic current detection method based on instantaneous reactive power theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 12-17(in Chinese).
- [7] 王建良, 崔桂梅, 洪晓英. 有源电力滤波器谐波及无功电流的检测[J]. 控制工程, 2003, 10(1): 91-93.
Wang Jianliang, Cui Guimei, Hong Xiaoying. Detecting method for harmonics and reactive currents in active power filter[J]. Control Engineering of China, 2003, 10(1): 91-93(in Chinese).
- [8] Fazal Ahmed Talukdar, Sumana Choudhuri, Sujit K Biswas. An instantaneous three-phase four-wire shunt active filter strategy[J]. Proceedings of IEEE Power Electronics and Drive Systems, 2001, 2: 835-840.
- [9] 张波, 黄朝凯, 王昊, 等. 基波电流和任意次谐波电流检测新方法[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2000, 28(1): 70-75.
Zhang Bo, Huang Chaokai, Wang Hao, et al. A novel detective method for fundamental current and any term frequency harmonic current [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science), 2000, 28(1): 70-75(in Chinese).
- [10] Enslin J, Van Wyk J D. Measurement and compensation of fictitious power under nonsinusoidal voltage and current conditions[J]. IEEE Trans. Instrum. Meas., 1998, 37(3): 403-408.
- [11] 余健明, 同向前. 基于鉴相原理的瞬时谐波电流检测方法研究[J]. 西安理工大学学报, 1999, 15(1): 61-63.
Yu Jianming, Tong Xiangqian. Research on the instantaneous harmonic current detecting method based on phase distinguishing technology [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 1999, 15(1): 61-63(in Chinese).
- [12] 史伟伟, 蒋全, 胡敏强, 等. 串联型电力有源滤波器中低通滤波器的设计及参数优化[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(11): 74-78.
Shi Weiwei, Jiang Quan, Hu Minqiang, et al. Design and optimization of passive low-pass filters for series active power filters [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(11): 74-78(in Chinese).
- [13] 王群, 姚为正, 王兆安. 低通滤波器对谐波检测电路的影响[J]. 西安交通大学学报, 1999, 33(4): 5-8.
Wang Qun, Yao Weizheng, Wang Zhaoan. Effect of low pass filter on harmonics detection circuit[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1999, 33(4): 5-8(in Chinese).
- [14] 王群, 姚为正, 王兆安. 高通和低通滤波器对谐波检测电路检测效果的影响研究[J]. 电工技术学报, 1999, 14(5): 22-26.
Wang Qun, Yao Weizheng, Wang Zhaoan. A study about influence of high and low pass filters on detecting effect of harmonics detection circuits [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1999, 14(5): 22-26(in Chinese).
- [15] 李钟慎. 基于 MATLAB 设计巴特沃斯低通滤波器[J]. 信息技术, 2003, 17(3): 49-52.
Li Zhongshen. The design of butterworth lowpass filter based on MATLAB[J]. Information Technology, 2003, 17(3): 49-52(in Chinese).
- [16] 方培本. 利用双线性变换法设计 IIR Butterworth 数字滤波器[J]. 天津理工学院学报, 1999, 15(5): 41-43.
Fang Peiben. Apply bilinear transformation to design iir butterworth digital filter [J]. Journal of Tianjin Institute of Technology, 1999, 15(5): 41-43(in Chinese).
- [17] 柳春锋. 用 MATLAB 语言实现 IIR 滤波器的设计[J]. 齐齐哈尔大学学报, 2001, 17(4): 51-54.
Liu Chunfeng. Designing IIR filter with MATLAB[J]. Journal of Qiqihar University (Natural Science Edition), 2001, 17(4): 51-54(in Chinese).
- [18] 朱幼莲, 孟志浩, 何世春, 等. 基于进化规划的自适应 IIR 滤波[J]. 数据采集与处理, 1997, 12(3): 167-170.
Zhu Youlian, Meng Zhihao, He Shichun, et al. Adaptive IIR filtering based on evolutionary programming[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 1997, 12(3): 167-170(in Chinese).
- [19] 乔双. 模拟进型 Butterworth 滤波器[J]. 电子器件, 2002, 25(2): 143-146.
Qiao Shuang. The analogue evolvable butterworth filter[J]. Journal of Electron Devices, 2002, 25(2): 143-146(in Chinese).
- [20] 卢建军, 韩晓冰, 刘少亭. 基于神经网络的自适应 IIR 滤波器[J]. 西安公路交通大学学报, 2000, 20(3): 117-119.
Lu Jianjun, Han Xiaobing, Liu Shaoting. Adaptive IIR filtering based on the energy function of neural network[J]. Journal of Xi'an Highway University, 2000, 20(3): 117-119(in Chinese).
- [21] 黄晓霞, 罗胜钦, 陆明达. 一种人工神经网络自适应 IIR 滤波器[J]. 电路与系统学报, 1996, 1(2): 39-45.
Huang Xiaoxia, Luo Shengqin, Lu Mingda. An artificial neural network adaptive IIR filter[J]. Journal of Circuits And Systems, 1996, 1(2): 39-45(in Chinese).
- [22] 刘开培, 张俊敏, 宣扬. 基于重采样理论和均值滤波的三相电路谐波检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(9): 78-82.
Liu Kaipei, Zhang Junmin, Xuan Yang. Harmonics detection for three-phase circuits based on resampling theory and mean filtering [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(9): 78-82(in Chinese).

收稿日期: 2007-04-20.

作者简介:

周 柯(1979—), 男, 博士研究生, 主要从事电力系统谐波抑制及无功功率补偿等方面的研究, zkwolf@163.com;

罗 安(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电气工程和科学工程等方面的教学和科研工作。

(编辑 王彦骏)