

Research on the Impact of Low Pass Filter LPF on Harmonics Detection Circuit

Xiang Rui

Dangtu Power Supply Company, Ma'anshan
Email: ruixiang112233@163.com

Received: Nov. 28th, 2011; revised: Dec. 20th, 2011; accepted: Jan. 18th, 2012

Abstract: This paper has researched the harmonics current detection method based on instantaneous reactive power theory, and the impact which low pass filter has on harmonics current detecting has been simulated by MAT-LAB/SIMULINK. The simulation results show that the dynamic response and the detection precision can be greatly influenced by the cut-off frequency, order and type of the low pass filter in the harmonics detection circuit. Thus this can provide guidance for the selection of LPF in harmonics detection circuit.

Keywords: Instantaneous Reactive Power Theory; Harmonics Detection; Low Pass Filter

低通滤波器 LPF 对谐波检测电路影响的研究

芮翔

当涂供电公司, 马鞍山
Email: ruixiang112233@163.com

收稿日期: 2011 年 11 月 28 日; 修回日期: 2011 年 12 月 20 日; 录用日期: 2012 年 1 月 18 日

摘要: 本文对基于瞬时无功功率理论的谐波电流检测法进行了研究, 并利用 MATLAB/SIMULINK 就其中的低通滤波器对谐波电流检测效果的影响进行了仿真实验。结果表明 LPF 的截止频率、阶数和类型对检测电路的动态响应过程、检测精度都有很大影响, 从而为谐波检测电路中 LPF 的选取提供了指导。

关键词: 瞬时无功功率理论; 谐波检测; 低通滤波器

1. 引言

随着现代工业技术、电力电子技术的飞速发展, 各种变频器、变流器、开关电源和电抗器的应用日益增多, 随之产生的谐波污染也日益严重, 造成电网电压严重畸变, 影响仪器仪表正常工作, 增加了电力元件损耗, 危及电力系统安全运行。目前, 谐波已经成为污染电力系统的严重公害之一, 解决电力系统谐波问题显得尤为迫切。有源电力滤波器 APF^[1]是目前进行谐波治理的有效装置, 为了提高有源电力滤波器的工作性能, 对电网谐波电流的快速、准确检测显得至关重要。目前 APF 常用的谐波和基波无功分量的检测

方法主要有瞬时无功功率法、傅立叶变换法、小波变换法、神经网络法、自适应预测算法。傅立叶变换法是基于对周期数据的分析, 计算量大, 不适宜于快速实时控制。随着人工智能技术的发展, 小波变换、神经网络和自适应预测算法毫无疑问可以提高检测精度, 但是计算量巨大, 实际工程应用中难以实现。基于瞬时无功功率理论谐波检测法是现阶段应用较为广泛的谐波检测方法^[2]。

本文通过对基于瞬时无功功率理论的谐波电流检测法的研究, 根据所推出的谐波电流检测电路模型, 发现低通滤波器 LPF 是影响检测电路检测效果的重要因素。因此利用 MATLAB 仿真软件对 LPF 进行

全面的仿真研究, 结果表明 LPF 的类型、阶数、截止频率的选取, 对谐波检测电路的动态响应过程和检测精度有很大的影响, 从而能为一些谐波检测电路的实际设计提供指导。

2. 基于瞬时无功功率理论的 $i_p - i_q$ 谐波电流检测算法

三相电路瞬时无功功率理论^[3]首先于 1983 年由赤木泰文提出, 假设三相电网电压对称无畸变, 电路各相电压和电流的瞬时值分别为 e_a 、 e_b 、 e_c 和 i_a 、 i_b 、 i_c , 通过三相到两相的坐标变换, 把它们变换到 α - β 两相正交的坐标系中得到 α - β 坐标系中的电压、电流矢量(如图 1 所示), 三相到两相的坐标变换为:

$$\begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = C_{32} \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = C_{32} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

由图 1 可知

$$i_p = i \cos \varphi, \quad i_q = i \sin \varphi, \quad \varphi = \varphi_e - \varphi_i \quad (3)$$

三相瞬时无功功率 q 和瞬时有功功率 p 分别为电压矢量 e 的模与三相瞬时无功电流 i_q 和三相瞬时有功电流 i_p 的乘积。即

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = e \begin{bmatrix} i_p \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_\alpha & e_\beta \\ e_\beta & -e_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (4)$$

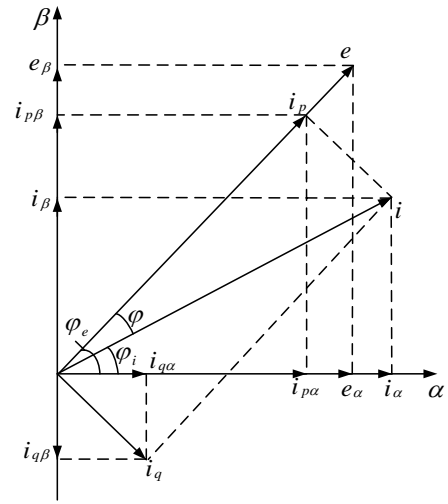


Figure 1. Voltage, current vector in the α - β coordinate system
图 1. α - β 坐标系中的电压、电流矢量

根据图 2 所示三相电流检测原理可知三相瞬时无功电流 i_q 和三相瞬时有功电流 i_p 为

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \sin \omega t & -\cos \omega t \\ -\cos \omega t & -\sin \omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \sin \omega t & \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\cos \omega t & -\cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & -\cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = C_{abc-pq} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (5)$$

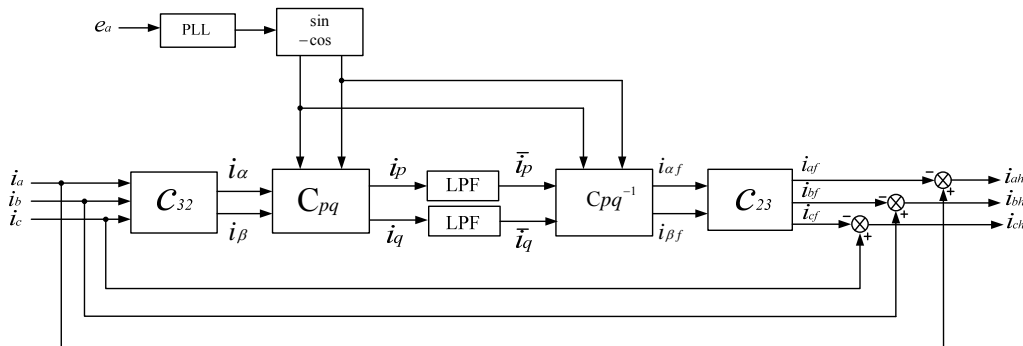


Figure 2. Harmonic current detection schematic
图 2. 谐波电流检测原理图

将 i_p , i_q 分解为直流分量和交流分量有

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{i}_p \\ \tilde{i}_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{i}_p \\ \bar{i}_q \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中在三相电压对称无畸变的情况下, \bar{i}_p 对应于基波正序有功电流, \bar{i}_q 对应于基波正序无功电流, \tilde{i}_p 和 \tilde{i}_q 则对应于负序和谐波电流。所得电流通过数字低通滤波器(LPF)处理后得直流电流 \bar{i}_p 和 \bar{i}_q ^[4,5]。所以基波电流为

$$\begin{bmatrix} i_{af} \\ i_{bf} \\ i_{cf} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin \omega t & -\cos \omega t \\ -\cos \omega t & -\sin \omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{i}_p \\ \bar{i}_q \end{bmatrix}$$

$$= \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \sin \omega t & -\cos \omega t \\ \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & -\cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) & -\cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{i}_p \\ \bar{i}_q \end{bmatrix} = C_{pq-abc} \begin{bmatrix} \bar{i}_p \\ \bar{i}_q \end{bmatrix} \quad (7)$$

于是通过减法器可获得谐波电流分别为

$$i_{ah} = i_a - i_{af}, \quad i_{bh} = i_b - i_{bf}, \quad i_{ch} = i_c - i_{cf} \quad (8)$$

这正是 APF 所需要的谐波电流指令信号。

通过上面的分析, 便可得到基于瞬时无功功率理

论的谐波电流检测方法。其相应的电路原理如图 2 所示。其中 PLL 是锁相环电路, 通过电压 e_a , 它能产生与电源电压同步的正弦和余弦信号^[6,7]。当 APF 同时补偿谐波和无功功率时, 只需断开图 2 中的 i_q 通路即可, 此时, 被检测电流中的谐波和无功电流能被同时检测出来。很显然, 在所建立的谐波电流检测电路中, LPF 的性能对最终得到的谐波电流指令信号有影响^[8]。

3. 低通滤波器对谐波检测电路的影响

在 SIMULINK 环境下, 结合加法、乘法、积分、常数和传递函数等模块, 通过菜单中的 Group 命令, 把图 2 所示的各部分单元电路定义成相应的子系统模块, 再把它们给合在一起, 就能形成具体的 MATLAB 谐波电流检测电路模型, 如图 3 所示, 图中低通滤波器 LPF 采用 Butterworth 型滤波器。

- 1) 阶数 n 为二阶
- 2) 截止频率 $f_c = 20$ Hz

当 LPF 的阶数为二阶, 截止频率为 5 Hz 时, i_a 中的基波电流 i_{af} 通过 SIM-ULINK 中的 Scope 显示后, 如图 4 所示。可见, 要经过大约 4 个周期检测波形才能跟踪实际波形的变化, 动态响应过程是比较慢的。这说明 f_c 取得太小, 应该增大 f_c , 图 6 是当 f_c 为 60 Hz 时 i_{af} 的波形。尽管此时动态响应过程比较快, 只需要大约 1 个周期, 但是已经出现了明显的失真, 影响了

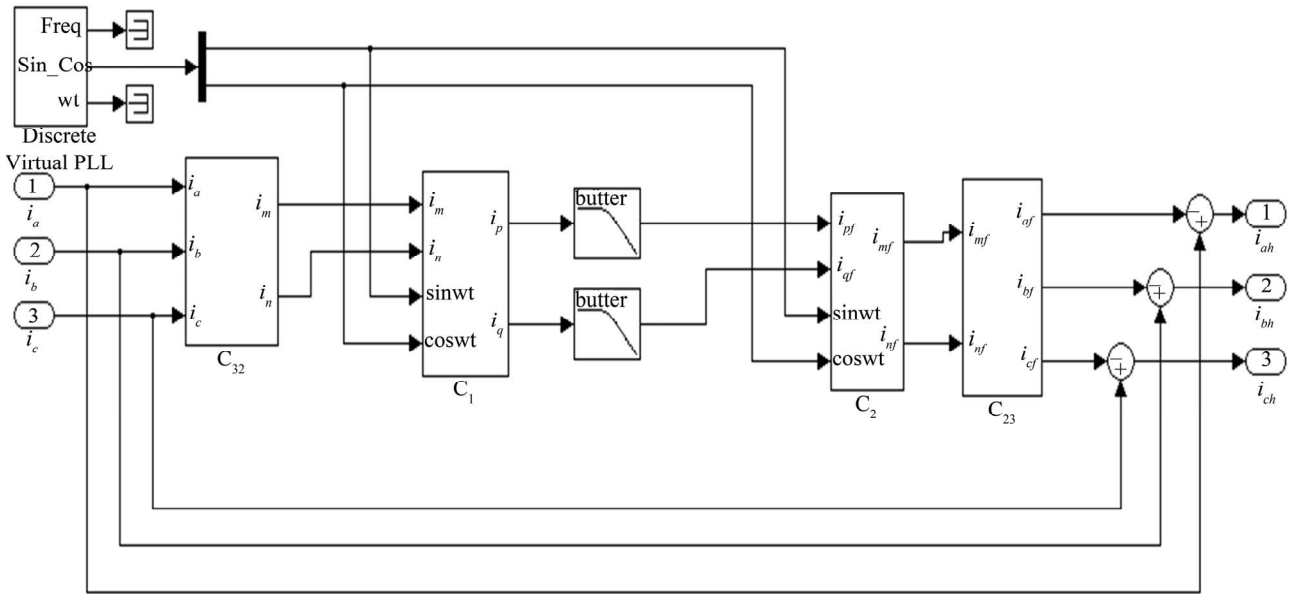


Figure 3. Harmonic detection model
图 3. 谐波检测模型

检测精度。这说明 f_c 取得太大，部分靠近 f_c 的低次谐波没有被 LPF 衰减掉。所以，应该减小 f_c 。当 f_c 取为 20 Hz 时，检测得出的 i_{af} 波形如图 5 所示。可见，大约经过不到 2 个周期，检测波形就能跟踪实际波形的变化，不但有一定的动态响应速度，而且有良好的谐波电流检测精度。

以上仿真研究说明，LPF 截止频率 f_c 的选取对电路的谐波电流检测效果有很大影响。从理论分析上看， f_c 越小，谐波电流检测精度越高，但动态响应过程太慢， f_c 越大，尽管可以加快检测电路的动态响应过程，但由于有部分低次谐波不能被 LPF 衰减掉，容易造成检测波形失真，影响谐波电流检测精度^[9]。

因此， f_c 既不能选得太小，也不能选得太大。要兼顾谐波电流检测电路的动态响应过程，也应考虑检测精度。

仿真研究还发现，LPF 阶数的选取对谐波电流检测电路的检测效果影响也很大。当 f_c 为 20 Hz，而 LPF 的阶数为 5 阶时，检测得出的 i_{af} 波形如图 7 所示。与图 5 相比，虽然 f_c 是一样的，但动态响应过程明显变慢。所以，阶数选得高，尽管理论上讲能提高检测精度，但由于相应的时延加大，使得动态响应过程减慢，况且高阶数的 LPF 会增加滤波器的元件数目，进而增加实现费用。所以，选取 LPF 阶数时，既要考虑谐波电流检测精度，又要兼顾动态响应过程和可实现性。实际中，有时选 2 阶滤波器就能满足要求。

低通滤波器的类型也会影响谐波电流的检测。常用的滤波器有 Butterworth、Chebychev、Bessel 和 Elliptic 滤波器等^[10]。经研究发现，同样阶数的滤波器，当截止频率选得较低时，Butterworth 滤波器的检测精

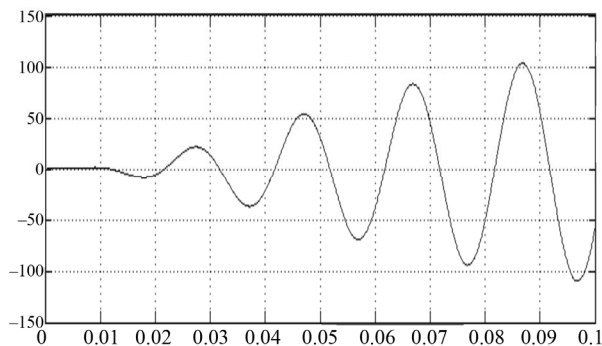


Figure 4. Fundamental current ($f_c = 5$ Hz)
图 4. 基波电流($f_c = 5$ Hz)

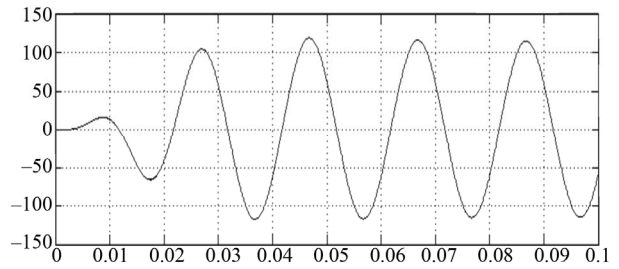


Figure 5. Fundamental current ($f_c = 20$ Hz)
图 5. 基波电流 ($f_c = 20$ Hz)

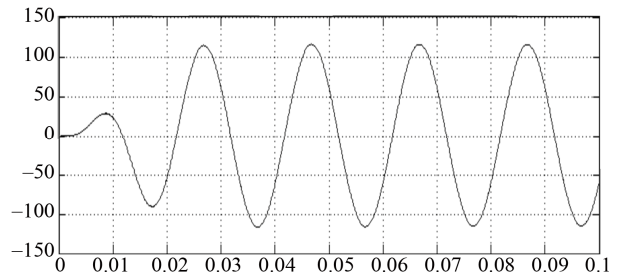


Figure 6. Fundamental current ($f_c = 60$ Hz)
图 6. 基波电流 ($f_c = 60$ Hz)

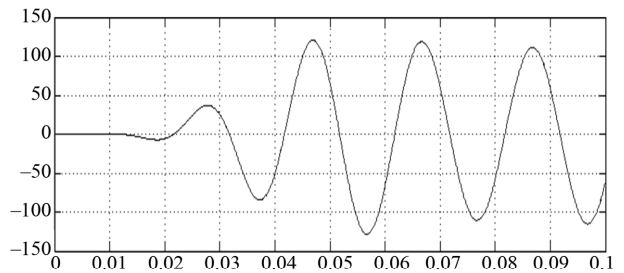


Figure 7. Fundamental current (order $n = 5$)
图 7. 基波电流(阶数 $n = 5$)

度最高，这是因为它的频率特性在零点附近最好。如果要求截止频率大一些，则用 Elliptic 滤波器的检测精度最好^[11]，Chebychev 滤波器次之，Butterworth 稍差一些，Bessel 滤波器最差，这是由滤波器阻带的衰减特性决定的。而用 Bessel 滤波器时动态响应过程最快，依次为 Butterworth、Chebychev 和 Elliptic 滤波器，因为 Bessel 滤波器的时延特性最好^[12]。实际应用时应视具体要求和场合选择不同类型的低通滤波器。考虑到综合效果，在谐波电流检测电路中，一般选 Butterworth 滤波器较好。

4. 结论

目前有源电力滤波器所采用的谐波电流检测方法中，基于瞬时无功率理论的谐波电流检测法是最

成熟和最有效的方法^[13]。所以,进一步广泛和深入地研究它们,对提高 APF 的谐波补偿效果和实际应用具有重要意义。本文通过所推导的基于瞬时无功功率理论的谐波电流检测法,利用 MATLAB 仿真软件就检测电路中的低通滤波器对检测效果的影响作了仿真研究。结果发现,低通滤波器的截止频率、阶数和类型对检测电路的动态响应过程、检测精度都有很大影响^[14]。实际应用中应该视具体情况来选择低通滤波器的类型和参数。本文的结论能为谐波检测电路的设计提供指导。

参考文献 (References)

- [1] 王兆安, 杨君, 刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [2] 黄玲, 刘骥, 曹滨, 朱东柏. 基于瞬时无功功率理论无功和谐波电流检测法[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2001, 6(4): 103-106.
- [3] 罗安. 电网谐波治理和无功补偿技术及装备[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [4] H. Akagi, Y. Kanazawa and A. Nabae. Instantaneous reactive power compensator comprising switching device without energy storage components. IEEE Transactions on Industry Applications, 1984, 20(3): 625-630.
- [5] H. Akagi, Y. Kanazawa and A. Nabae. Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits. Tokyo: Proceedings IPEC, 1983: 1375-1386.
- [6] 何英杰, 邹云屏, 黄柱等. 基于瞬时无功功率理论的改进谐波检测算法[J]. 电网技术, 2007, 31(6): 79-83.
- [7] 周林, 甘元兴, 雷鹏等. 基于瞬时无功功率理论的谐波检测新方法[J]. 高电压技术, 2005, 31(10): 67-70.
- [8] 关彬, 崔玉龙, 王圆月. 基于瞬时无功功率理论的谐波检测方法研究[J]. 电测与仪表, 2007, 10: 1-4.
- [9] 姜齐荣, 赵东元, 陈建业. 有源电力滤波器的结构, 原理, 控制[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [10] 谢磊, 姜新建, 朱东起. 综合电力滤波器中谐波检测系统的研究[J]. 电工电能新技术, 1998, 3: 17-21.
- [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.
- [12] M. El-Habrouk, M. K. Darwish and P. Mehta. Active power filter: A review. IEEE Proceedings Electric Power Applications, 2000, 147(5): 403-413.
- [13] M. El-Habrouk, M. K. Darwish and P. Mehta. A Survey of active filters and reactive power compensation techniques. Power Electronics and V.S.D. Conference Publication, 2000, CP475: 7-12.
- [14] 许德志, 刘跃, 杨勇. 基于 $i_p - i_q$ 法谐波、无功电流检测的仿真研究[J]. 贵州电力技术, 2005, 29(10): 3-6.