

# The Design and Performance Analysis for Hybrid Active Power Filter of Rectifier Circuit

Junpeng JI<sup>1</sup>, Xu HAN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Xi'an University of Technology, Xi'an, China

<sup>2</sup>Xi'an University of Technology, Xi'an, China

Email: jijunpeng@xaut.edu.cn, 274241501@qq.com

**Abstract:** The rectifier circuit is widely used in industrial production, particularly in the heating, smelting, electrolysis, electroplating. The harmonic of the high-capacity three-phase bridge rectifier equipment seriously affect the power quality and harm the power equipment in industrial application. This paper designs the Hybrid Active Power Filter (HAPF) which combines the advantages of Passive Power Filter (PPF) and Active Power Filter (APF). In the harmonic detection, the paper uses the  $i_p$ - $i_q$  detecting method on the basis of instantaneous reactive power theory. In the aspect of control strategy, the paper adopts hysteresis current control method. Using PSCAD/EMTDC electro-magnetic transient simulation software, three-phase bridge rectifier circuit and the filtering effect of HAPF are simulated and analyzed, the filtering effect of harmonic detection algorithm of two kinds of  $i_p$ - $i_q$  is analyzed by simulation contrast. The simulation results show that the design of HAPF in this paper effectively inhibit the harmonic of three-phase bridge rectifier equipment. The design method in this paper provides theory basis for the realization of high capacity HAPF.

**Keywords:** Harmonic Current; Passive power Filter; Active Power Filter; Hybrid Active Power Filter

## 整流电路的混合有源滤波器设计及性能分析

姬军鹏<sup>1</sup>, 韩旭<sup>2</sup>

<sup>1</sup>西安理工大学, 西安, 中国, 710048

<sup>2</sup>西安理工大学, 西安, 中国, 710048

Email: jijunpeng@xaut.edu.cn, 274241501@qq.com

**摘要:** 整流电路在工业生产中应用范围很广、应用量很大, 特别是在加热、冶炼、电解、电镀等领域。工业实际应用中, 大功率三相桥式整流设备产生的谐波严重影响了电能质量, 危害了电力设备。本文设计了综合无源滤波器和有源滤波器优点的混合有源滤波器电路。在谐波检测方面, 本文采用了基于瞬时无功功率理论  $i_p$ - $i_q$  的检测技术; 在控制策略方面, 本文采用了滞环电流控制方式。文章用 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真软件对三相桥式整流电路的谐波和功率情况、混合有源滤波器的滤波效果进行了仿真分析, 并对两种  $i_p$ - $i_q$  的谐波检测算法的滤波效果进行了仿真对比分析。仿真结果表明, 本论文设计的混合有源滤波器有效的抑制了三相桥式整流设备产生的谐波。本设计方法为大功率混合有源滤波器装置的实现提供了理论依据。

**关键词:** 谐波电流; 无源滤波器; 有源滤波器; 混合有源滤波

### 1. 引言

随着电力电子技术广泛的应用于生产和生活中, 使得电力系统谐波污染问题日益严重。有源滤波器是治理谐波的有效手段, 但是它成本过高, 不利于推广。而无源滤波器虽然成本低, 但是不能有效治理谐波。为了既能有效治理谐波又能大幅降低成本, 本文应用

了无源加有源的滤波方式, 这种混合型有源滤波器综合了无源滤波器和有源滤波器各自的优点, 能有效的抑制谐波电流<sup>[1,2]</sup>。

本文首先分析了无源滤波器的滤波特性, 并应用了无源滤波器参数的计算方法, 仿真分析了无源滤波器各个支路无功工程分配方法的滤波效果。然后介绍了有源滤波器的工作原理, 分析了有源滤波器的两种拓扑结构。在谐波检测方面, 本文采用了基于瞬时无功功率理论的  $i_p$ - $i_q$  检测技术, 搭建了两种控制算法系统。在控制策略方面, 本文采用了滞环电流控制方式。

西安市科技局 2010 年度 创新支撑计划—产学研合作促进工程(项目编号: CXY1017(1))  
陕西省重点学科建设项目

仿真结果表明，这种方式能够有效的抑制系统谐波电流分量<sup>[3]</sup>。

最后利用 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真软件建立了混合有源滤波器系统的仿真平台，对系统的各环节进行了建模和仿真。结果表明，本文设计的混合有源滤波器能很好的抑制整流电路系统的谐波电流。

## 2. 无源滤波器的设计

### 2.1 滤波器结构

本文采用单调谐滤波器与高通滤波器并联的结构。单调谐滤波器设计滤除 5 次、7 次谐波；高通滤波器设计滤除 11 次及以上次数谐波<sup>[4]</sup>。

### 2.2 无功容量分配方法

工业控制中，常有以下三种无功分配方法<sup>[5]</sup>：

方法一：使各个单调谐滤波器的电容器承受谐波电压基本一致，其分配的功率容量与其谐振次数的谐波电流值和谐振次数的比值成正比。

方法二：按照一般工程经验比值分配。

方法三：按照  $l$  次谐波电流占要滤除的所有谐波电流之和的比例进行分配。

根据这三种分配方法的补偿容量计算滤波器各个参数值。

### 2.3 滤波效果及仿真分析

#### 2.3.1 仿真数据

对根据以上三种无功分配方法设计的无源滤波器的滤波效果进行仿真分析，结果如下表 1：

Table 1. THD<sub>i</sub>(%) before and after filtering  
表 1 滤波前后谐波电流总畸变率 (%)

| 谐波电流总畸变率         | 滤波前   | 滤波后   |       |       |
|------------------|-------|-------|-------|-------|
|                  |       | 方法一   | 方法二   | 方法三   |
| THD <sub>i</sub> | 29.2% | 19.4% | 19.3% | 18.9% |

从表 1 的结果可以看出，三种无源滤波器的无功分配方法对谐波的抑制均起到了一定效果，但是 THD<sub>i</sub> 仍然在 18% 以上，滤波效果不理想。

## 3. 有源滤波器的设计

### 3.1 理论基础

瞬时无功功率理论(Instantaneous Reactive Power Theory)亦称为 p-q 法，是日本学者 Akagi H. 于 1984 年提出的，其目的是为了解决其研制的并联型有源滤波

器用于无功功率的快速检测，从而为有源滤波器提供参考电流<sup>[6]</sup>。

### 3.2 APF 的整体结构

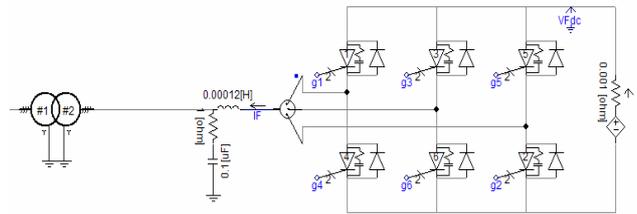


Figure 1. System structure of APF main circuit  
图 1 APF 系统主电路结构图

### 3.3 控制方案设计

基于瞬时无功功率的谐波检测法通常可分为两种：一、直接提取谐波法，二、间接提取谐波法<sup>[7,8]</sup>。

#### 3.3.1 方案一：直接提取谐波法

假设系统为三相平衡工况，三相系统电压为纯基波正序电压，而三相电流中除基波正序电流外还存在谐波电流，则采用 p-q 法计算出的瞬时有功功率和瞬时无功功率中除含有直流分量外还存在谐波分量，即

$$\begin{cases} p = F_{ul} \bullet F_i = \bar{p}_1 + \tilde{p}_1 \\ q = F_{ul} \otimes F_i = \bar{q}_1 + \tilde{q}_1 \end{cases} \quad (1)$$

所以，如果对瞬时有功功率和瞬时无功功率进行高通滤波，滤除其中的基波成分，则得到瞬时有功功率和无功功率的谐波分量。令谐波功率的分量为

$$F_{\tilde{p}_1 \tilde{q}_1} = \begin{bmatrix} \tilde{p}_1 \\ \tilde{q}_1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

利用式(3)可以求出其中代表谐波电流的分量，即

$$\begin{bmatrix} i_{ah} \\ i_{bh} \\ i_{ch} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_\alpha & u_\beta \\ -u_\beta & u_\alpha \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \tilde{p}_1 \\ \tilde{q}_1 \end{bmatrix} = \frac{1}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \begin{bmatrix} u_\alpha & u_\beta \\ -u_\beta & u_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p}_1 \\ \tilde{q}_1 \end{bmatrix} = |F_{ul}|^{-2} \begin{bmatrix} F_{ul} \bullet F_{\tilde{p}_1 \tilde{q}_1} \\ -F_{ul} \otimes F_{\tilde{p}_1 \tilde{q}_1} \end{bmatrix} \quad (3)$$

再反变换即可得到三相电流中的谐波分量，即

$$\begin{bmatrix} i_{ah} \\ i_{bh} \\ i_{ch} \end{bmatrix} = C_{\alpha\beta}^T \begin{bmatrix} i_{\alpha h} \\ i_{\beta h} \end{bmatrix} = C_{\alpha\beta}^T |F_{ul}|^2 \begin{bmatrix} F_{ul} \bullet F_{\tilde{p}_1 \tilde{q}_1} \\ -F_{ul} \otimes F_{\tilde{p}_1 \tilde{q}_1} \end{bmatrix} \quad (4)$$

当系统三相电压中不含谐波且为基波正序电压时，运用该方法可以迅速、准确的检测出被检电流中的谐波分量和无功分量，克服了传统方法中时延长、精度低、无法单独提取谐波分量和无功分量等缺点。

### 3.3.2 方案二：间接提取谐波法

在  $\alpha - \beta$  坐标系内构造虚拟单位正序电压向量，即

$$F_{ul} = \begin{bmatrix} \sin \omega t \\ -\cos \omega t \end{bmatrix} \quad (5)$$

利用上述电压向量分别于  $\alpha - \beta$  坐标系内电流向量计算瞬时有功功率和瞬时无功功率，即

$$\begin{cases} p_1 = F_{ul} \bullet F_i = \bar{p}_1 + \tilde{p}_1 \\ q_1 = F_{ul} \otimes F_i = \bar{q}_1 + \tilde{q}_1 \end{cases} \quad (6)$$

对式(6)进行低通滤波，得到其直流分量  $\bar{p}_1$ 、 $\bar{q}_1$  定义正序直流功率向量分别为

$$F_{\bar{p}\bar{q}_1} = \begin{bmatrix} \bar{p}_1 \\ -\bar{q}_1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

因此可以求出正序电流基波向量为

$$\begin{bmatrix} i_{af_1} \\ i_{bf_1} \end{bmatrix} = |F_{ul}|^{-2} \begin{bmatrix} F_{ul} \bullet F_{\bar{p}\bar{q}_1} \\ -F_{ul} \otimes F_{\bar{p}\bar{q}_1} \end{bmatrix} \quad (8)$$

反变换可以得到 a、b、c 三相的正序基波电流，即

$$\begin{bmatrix} i_{af_1} \\ i_{bf_1} \\ i_{cf_1} \end{bmatrix} = C_{\alpha\beta}^T \begin{bmatrix} i_{af_1} \\ i_{bf_1} \end{bmatrix} = C_{\alpha\beta}^T |F_{ul}|^2 \begin{bmatrix} \bar{p}_1 \sin \omega t + \bar{q}_1 \cos \omega t \\ -\bar{p}_1 \cos \omega t + \bar{q}_1 \sin \omega t \end{bmatrix} \quad (9)$$

所以得到三相电流中的谐波分量为

$$\begin{bmatrix} i_{ah} \\ i_{bh} \\ i_{ch} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_{af_1} \\ i_{bf_1} \\ i_{cf_1} \end{bmatrix} \quad (10)$$

在这一方案中所需要的虚拟电压向量由锁相环 PLL 产生，这样就可以克服电压畸变所导致的检测精度下降的问题。

### 3.4 滤波效果及仿真分析

Table 2. THD<sub>1</sub>(%) before and after filtering by method 1  
表 2 方案一滤波前后电流谐波总畸变率

| 三相桥触发角度数 $\alpha$ | 30    | 45    | 60    |
|-------------------|-------|-------|-------|
| 滤波前电流谐波总畸变率       | 29.1% | 29.2% | 29.5% |
| 滤波后电流谐波总畸变率       | 18.1% | 18.2% | 15.9% |

Table 3. THD<sub>1</sub>(%) before and after filtering by method 2  
表 3 方案二滤波前后电流谐波总畸变率

| 三相桥触发角度数 $\alpha$ | 30    | 45    | 60    |
|-------------------|-------|-------|-------|
| 滤波前电流谐波总畸变率       | 29.1% | 29.2% | 29.5% |
| 滤波后电流谐波总畸变率       | 4.1%  | 4.9%  | 5.5%  |

从表 2、3 中可以看出谐波电流下降明显，且方案二的总电流谐波畸变率平均下降了 23%左右，表 3 的仿真分析结果表明，采用方案二设计的有源滤波器的

滤波效果明显要好于方案一所设计的有源滤波器的滤波效果。

## 4. 混合有源滤波器的设计

### 4.1 仿真模型

本节主要分析并联型混合有源滤波器(HAPF)的两种不同结构，根据上一节有源滤波器 APF 的两种不同控制系统进行的仿真分析结果不难看出方案二的谐波检测精度更高，滤波效果更好。因此在混合有源滤波器的设计中有源滤波器部分采用方案二所设计的控制系统<sup>[9,10]</sup>。

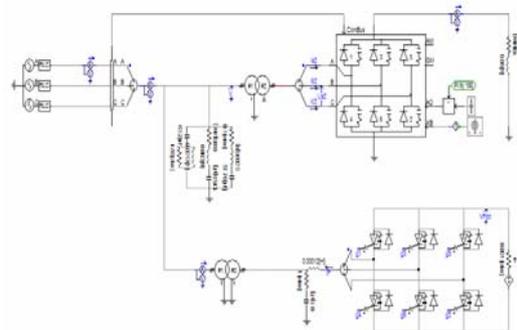


Figure 2. Simulation model of Shunt-HAPF-1 System  
图 2 并联混合有源滤波器 1 系统仿真模型

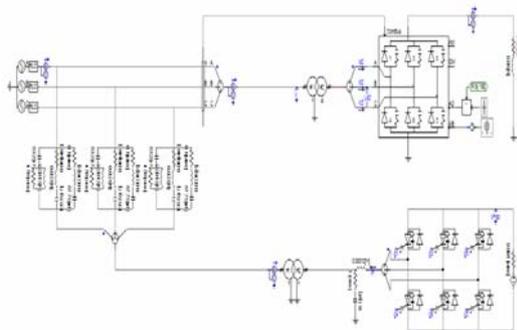


Figure 3. Simulation model of Shunt-HAPF-2 System  
图 3 并联混合有源滤波器 2 系统仿真模型

### 4.2 仿真分析

Table 4. THD<sub>1</sub>(%) before and after filtering by method 1  
表 4 方案一滤波前后电流谐波总畸变率 THD<sub>1</sub>

| 三相桥触发角度数 $\alpha$ | 0     | 30    | 45    |
|-------------------|-------|-------|-------|
| 滤波前电流谐波总畸变率       | 28.4% | 29.1% | 29.2% |
| 滤波后电流谐波总畸变率       | 1.6%  | 3.2%  | 4.5%  |

Table 5. THD<sub>1</sub>(%) before and after filtering by method 2  
表 5 方案二滤波前后电流谐波总畸变率 THD<sub>1</sub>

| 三相桥触发角度数 $\alpha$ | 0     | 30    | 45    |
|-------------------|-------|-------|-------|
| 滤波前电流谐波总畸变率       | 28.4% | 29.1% | 29.2% |
| 滤波后电流谐波总畸变率       | 1.4%  | 4.5%  | 4.8%  |

从表 4、5 中可以看出谐波电流明显下降，总电流

谐波畸变率有效控制在 5% 以下, 在负载改变的情况下滤波器仍然可以有效地抑制谐波电流的产生。

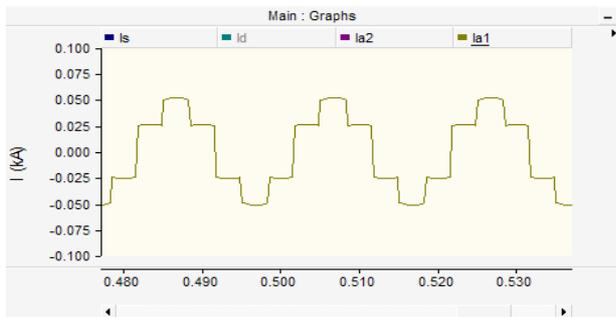


Figure 4. Current waveform of A phase before filtering ( $\alpha=45^\circ$ )  
图 4  $\alpha=45^\circ$  时滤波前网侧 A 相电流波形

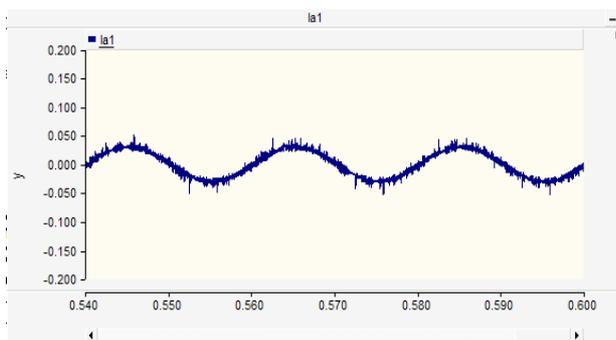


Figure 5. current waveform of A phase after filtering by method 1 ( $\alpha=45^\circ$ )  
图 5  $\alpha=45^\circ$  时网侧 A 相电流 (方案一)

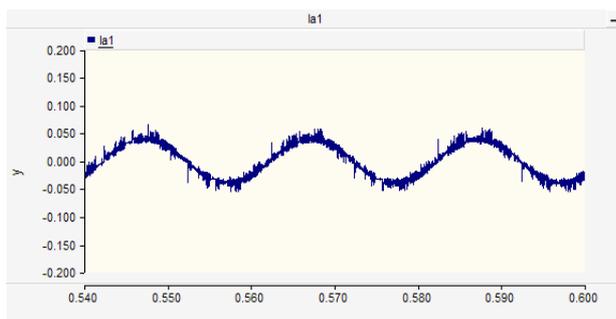


Figure 6. Current waveform of A phase after filtering by method 2 ( $\alpha=45^\circ$ )  
图 6  $\alpha=45^\circ$  时网侧 A 相电流 (方案二)

从图 5、6 也可以看出两种不同结构的并联型 HAPF 都能够有效地抑制谐波电流, 使网侧电流波形接近于正弦。

## 5. 结论

本文首先对无源滤波器的工程无功分配方法进行了仿真分析, 然后介绍了有源滤波器的设计方法, 最后设计了并联型 HAPF, 并对 HAPF 两种不同结构进行了仿真对比分析。从实验结果中可以看出,

Shunt-HAPF-1 具有更好的性能, 但是这种结构并没有从根本上解决有源滤波器容量有限的情况, APF 仍然承担者电网全部的电压。而 Shunt-HAPF-2 虽然没有前者的性能优越, 但是这种结构解决了 APF 容量有限的问题。理论分析和仿真结果表明, 并联型 HAPF 的电路结构充分发挥了无源滤波器和有源滤波器的优点, 能够降低了有源部分容量, 节约了投资, 使谐波治理和补偿达到了理想效果。

通过以上仿真分析可以看出并联型 HAPF 对电网谐波的抑制有很好的效果, 能够稳定的将总电流的谐波畸变率控制在 5% 以下, 电压畸变率控制在 1% 以下, 达到了国家技术监督局于 1993 颁布的《电能质量公用电网谐波》规定的谐波电压畸变率为小于 5% 的要求, 这说明该 HAPF 在投入后消除了谐波并达到了补偿效果。

## References (参考文献)

- [1] Jiang Qirong, Zhao Dongyuan, Chen Jianye. Structure, Principle & Control for Active Power Filter [M]. Beijing: Science Press, 2005.  
姜齐荣, 赵东元, 陈建业. 有源电力滤波器—结构·原理·控制 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [2] Wang Zhaoan, Yang Jun, Liu Jinjun. Harmonic suppression & reactive power compensation [M]. Beijing: China Machine Press 2002.  
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, 2002.
- [3] J. A. Pomilio and S. M. Deckmann, "Characterization and compensation of harmonics and reactive power of residential and commercial loads," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 22, no. 2, pp. 1049–1055, Apr. 2007.
- [4] JAIN S.K., AGRAWAL P., GUPTA H.O.: 'Designsimulationand experimental investigations on a shunt active filter for harmonics and reactive power compensation', *Electr. Power Compt. Syst.*, 2003, 31, (7), pp. 671–692.
- [5] SINGH B., VERMA V., CHANDRA A., AL-HADDAD K.: 'Hybrid filters for power quality improvement', *IEE Proc., Gener. Transm. Distrib.*, 2005, 152, (3), pp. 365–378.
- [6] Huayun Yang and Shiyun Ren. A Practical Series-Shunt Hybrid Active Power Filter Based on Fundamental Magnetic Potential Self-Balance. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, VOL. 23, NO. 4, OCTOBER 2008.
- [7] Z. Wang, Q. Wang, W. Z. Yao, and J. J. Liu, "A series active power filter adopting hybrid control approach," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 16, no. 3, pp. 301–310, May 2001.
- [8] W. Longhui, Z. Fang, Z. Pengbo, L. Hongyu, and Z. Wang, "Study on the influence of supply-voltage fluctuation on shunt active power filter," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 22, no. 3, pp. 1743–1749, Jul. 2007.
- [9] K. Sozanski, "The Shunt Active Power Filter with Better Dynamic Performance," *Power Tech 2007 Conference*, Lausanne, Switzerland, 2007.
- [10] Wei-Fu Su, chin E. Lin, Ching-Lien Huang, Hybrid filter application for power quality improvement, *Electr. Power Syst. Res.* 47, (1998) 165-171. *Appl.*, vol. IA-20, no. 3, pp. 625-630, May/jun. 1984.