

# 基于 a-b-c坐标下三相并联有源滤波器的补偿新策略分析

王磊, 张志文, 高红专  
(湖南大学电气与信息工程学院, 湖南长沙 410082)

**摘要:** 并联有源滤波器在消除谐波电流和无功补偿 (包括线性负载和非线性负载的无功补偿) 方面发挥着重要的作用。目前, 电力有源滤波器 (APF) 多采用基于瞬时无功功率理论的谐波和无功电流检测方法。这些方法大多要进行坐标之间的转换, 并且在三相电路、电源都不对称的情况下很难做到对基波无功和高次谐波电流的准确检测。提出一种不需要在进行坐标转换, 直接在坐标系下进行无功和谐波检测的方法。研究和仿真表明这种方法在电压源不对称、畸变和负载不平衡的情况下仍能有效工作, 并且有效简化了并联有源滤波器 (APF) 的控制电路。

**关键词:** 并联有源滤波器 (APF); 谐波电流; 瞬时无功功率理论; 坐标转换

**中图分类号:** TM714.3; TM76 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)02-0058-04

## 0 引言

19世纪70年代末, 并联有源滤波器在消除谐波和无功补偿方面的使用引起了人们越来越大的兴趣。1983年, 日本学者赤木泰文提出了瞬时无功功率理论, 从那时开始瞬时无功功率理论上开始广泛用于有源滤波器的补偿策略并在理论得到进一步的发展 (后来发展的方法包括:  $p-q$ 、 $i_p - i_q$ 、 $d-q$ 法以及基于瞬时无功功率理论的广义瞬时无功功率理论等)<sup>[1]</sup>, 并取得良好的成效。然而当电压源畸变、不平衡和负载不平衡时, 再使用这些方法, 电源的电流便不能保持平衡的正弦曲线状态。

目前的主流补偿策略是按波形补偿, 补偿后要求系统提供三相对称正序基波有功电流。为了达到全补偿的目的, 本文提出一种基于 a-b-c坐标下的波形补偿的新策略。新策略在电压源和负载电流都畸变、不平衡的情况下仍能有效地对无功、负载谐波电流和中性点电流进行补偿。本文首先介绍提出的新策略, 然后对几种常见的方法进行比较分析。最后通过 Matlab 的仿真来比较这几种方法的效果。

## 1 基于 a-b-c坐标下的补偿新策略

新的补偿策略也是波形补偿策略的一种, 所以要求补偿后的源电流是平衡、不畸变并且与电源基波正序电压同相。实用并联有源滤波器要求达到的目的包括: 补偿谐波电流; 中性点电流补偿 (针对与三相四线结构); 补偿无功; 最小化 APF 消耗或提供的平均有功功率。因此, 有源滤波

器必须能够对线性或非线性负载进行全补偿 (包括谐波、中性点电流补偿和无功补偿)。要达到这些目的, 三相源电流的形式如下:

$$i_{sa} = I_s \sin(\omega t + \phi_1^+) \quad (1)$$

$$i_{sb} = I_s \sin(\omega t - 120^\circ + \phi_1^+) \quad (2)$$

$$i_{sc} = I_s \sin(\omega t + 120^\circ + \phi_1^+) \quad (3)$$

则三相基波正序电压形式如下:

$$v_{a1}^+ = V_{m1}^+ \sin(\omega t + \phi_1^+) \quad (4)$$

$$v_{b1}^+ = V_{m1}^+ \sin(\omega t - 120^\circ + \phi_1^+) \quad (5)$$

$$v_{c1}^+ = V_{m1}^+ \sin(\omega t + 120^\circ + \phi_1^+) \quad (6)$$

其中:  $V_{m1}^+$  和  $\phi_1^+$  是电压基波正序分量的电压最大值和初相角。在控制过程中要求负载的平均有功功率完全由电源提供而有源滤波器不消耗或者提供任何平均有功功率, 则下面等式必须成立:

$$P_s = P_1 + P_f \quad (7)$$

$$\bar{P}_s = \frac{1}{T} \int_0^T (v_a i_{sa} + v_b i_{sb} + v_c i_{sc}) dt \quad (8)$$

$$\bar{P}_1 = \frac{1}{T} \int_0^T (v_a i_{a1} + v_b i_{b1} + v_c i_{c1}) dt \quad (9)$$

$$\bar{P}_f = 0 \quad (10)$$

$$\bar{P}_s = \bar{P}_1 \quad (11)$$

利用对称分量法把源电压的各次分量按式

(12)进行相应的分解:

$$\begin{bmatrix} V_h^0 \\ V_h^+ \\ V_h^- \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 2 \\ 1 & 2 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ah} \\ V_{bh} \\ V_{ch} \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中: +、-、0 分别表示正、负、零序分量;  $h = 1, 2, 3 \dots$  代表源电压的各次分量;  $e^{j2\pi/3}$ 。

于是三相瞬时电压就可以表示为如下形式:

$$v_a = \sum_1^+ V_{ah}^+ + \sum_1^- V_{ah}^- + \sum_1^0 V_{ah}^0 \quad (13)$$

$$v_b = \sum_1^+ V_{bh}^+ + \sum_1^- V_{bh}^- + \sum_1^0 V_{bh}^0 \quad (14)$$

$$v_c = \sum_1^+ V_{ch}^+ + \sum_1^- V_{ch}^- + \sum_1^0 V_{ch}^0 \quad (15)$$

源电压中的各次谐波电压可用如下形式表示:

$$V_{ah}^+ = V_{mh}^+ \sin(h t + \phi_h^+) \quad (16)$$

$$V_{bh}^+ = V_{mk}^+ \sin(h(t - 120^\circ) + \phi_h^+) \quad (17)$$

$$V_{ch}^+ = V_{mk}^+ \sin(h(t + 120^\circ) + \phi_h^+) \quad (18)$$

$$V_{ah}^- = V_{mk}^- \sin(h t + \phi_h^-) \quad (19)$$

$$V_{bh}^- = V_{mk}^- \sin(h(t + 120^\circ) + \phi_h^-) \quad (20)$$

$$V_{ch}^- = V_{mk}^- \sin(h(t - 120^\circ) + \phi_h^-) \quad (21)$$

$$V_{ah}^0 = V_{bh}^0 = V_{ch}^0 = V_{mh}^0 \sin(h t + \phi_h^0) \quad (22)$$

我们要做的工作是要利用上面所列的式子求取式(1)~(3)中的电流极值  $I_s$ 。通过对称分解,电源的平均有功功率为各次分量的正、负、零序有功功率之和,可表示为:

$$\bar{P}_s = P_{s1}^+ + P_{s1}^- + P_{s1}^0 + P_{sh}^+ + P_{sh}^- + P_{sh}^0 \quad (23)$$

其中:

$$P_{s1}^+ = \frac{1}{T} \int_0^T (v_{a1}^+ i_{sa}^+ + v_{b1}^+ i_{sb}^+ + v_{c1}^+ i_{sc}^+) dt \quad (24)$$

把式(1)~(6)带入式(24)中,可以得到如下结果:

$$P_{s1}^+ = \frac{3V_{m1}^+ I_s}{2} \quad (25)$$

同样通过带入运算,可得到如下结果:

$$P_{s1}^- = P_{s1}^0 = P_{sh}^+ = P_{sh}^- = P_{sh}^0 = 0 \quad (26)$$

由式(11)、(23)、(26)可以推出:

$$\bar{P} = \bar{P}_1 = P_{s1}^+ \quad (27)$$

于是可得到  $I_s$  的表达式:

$$I_s = \frac{2\bar{P}_1}{3V_{m1}^+} \quad (28)$$

根据式(1)~(3)和(4)~(6)的对应关系:

$$i_{sk}^+ = I_s \frac{v_{k1}^+}{V_{m1}^+} = \frac{2\bar{P}_1}{3(V_{m1}^+)^2} v_{k1}^+, \quad k = a, b, c \quad (29)$$

那么要求有源滤波器在联接点注入的补偿电流就等于负载电流减去从负载电流中提取出来的想要的源电流,如下式:

$$i_{sk} = i_{lk} - \frac{2\bar{P}_1}{3(V_{m1}^+)^2} v_{k1}^+, \quad k = a, b, c \quad (30)$$

得到这个结果后,可以验证有源滤波器消耗或提供的平均有功功率等于零。这种补偿策略使得电

网提供的基波有功功率与负荷吸收的有功功率相平衡,而有源滤波器在吸收了电网提供的有功功率后,再以负序和谐波功率的形式实时地提供给负荷,完成补偿过程。补偿电流的检测框图见图 1<sup>[2,3]</sup>。

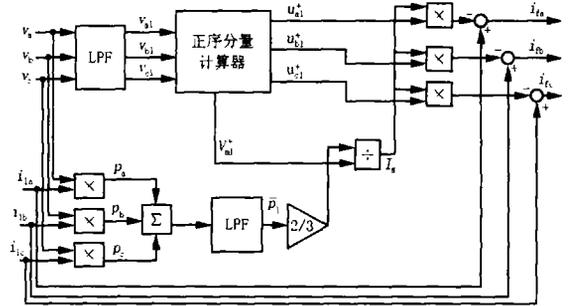


图 1 补偿电流的检测框图

Fig 1 Detecting block diagram of compensation current

## 2 不同 APF补偿策略的比较

以下我们对几种常见的补偿策略分两种情况进行分析比较,几种方法分别为广义瞬时无功功率法(GPR)<sup>[4]</sup>、同步旋转坐标系法(SRF)<sup>[5]</sup>和本文所提出的新方法<sup>[6,7]</sup>。

1) 理想电压源的情况:上述三种方法不同的补偿策略中,补偿电流都是负载电流减去理想的源电流得到的。当是理想电压时,分析三种不同策略求理想源电流的公式发现第一种和第三种补偿策略中最后的理想电流只与平均有功功率以及源电压有关,在理想电压源情况下两种补偿策略等价并且与负载情况无关,补偿后都能得到平衡的、正弦曲线的源电流;而第二种方法中理想源电流属于直接从负载电流中提取出的,与负载有关系,当负载不平衡时通过第二种方法求得的源电流也不能保持平衡,而该方法的无功补偿目的也只能在基波负载电流平衡的情况下才能达到。

2) 非理想电压源的情况:当电压源畸变、不平衡时第一种方法求得的源电流就不再保持正弦、平衡的状态;方法三中我们发现求取理想源电流时我们用到电压成分是源电压的基波正序分量,这样在非理想电压源的情况下也不会对源电流的求取造成影响,所以源电流依然保持正弦、平衡的状态;而第二种方法中根据不同角速度的选取又可分为不同方法(如  $p-q$ 、 $i_p-i_q$ )。  $p-q$ 法由于与电压源的各项电压有关,所以只能适用于电网电压对称、无畸变的情况;  $i_p-i_q$ 法适用与电压畸变和不对称的情况但需要保证负载三相平衡。

考虑到要求 APF 不提供或消耗任何平均有功功率,发现只有方法三提出的新补偿策略能达到该目的。

### 3 设计实例与仿真结果比较

在系统电压畸变、不平衡和非线性负载与不平

衡线性负载并联的情况下对一个三相四线制系统在 Matlab 的仿真环境下进行仿真比较,实验系统结构框图如图 2 所示。仿真目的是为了表明 APF 控制新策略的有效性。仿真表明,新补偿策略在上述情况下能获得很好的补偿效果。说明了该新策略的有效性。

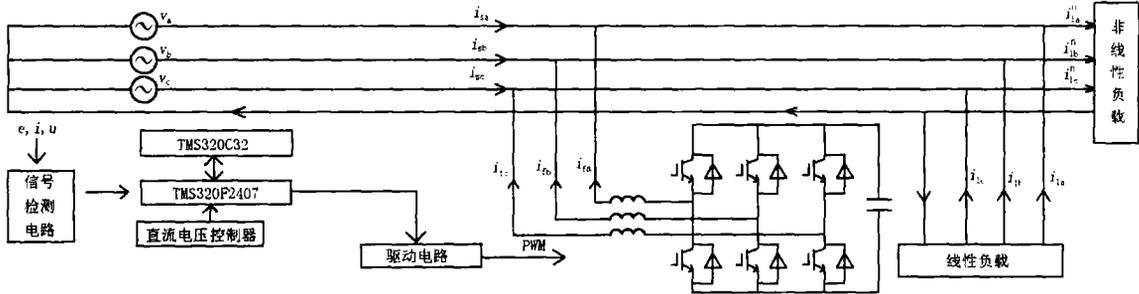


图 2 实验系统主电路图

Fig 2 Power circuit configuration of system

系统由 IGBT 三相变流器、信号检测电路、双 DSP 的控制电路、驱动电路构成,其中双 DSP 控制电路中浮点型 DSP - TMS320C32 完成电流检测算法和控制算法;定点型 DSP - TMS320F2407 完成 A/D 采样、PWM 控制和直流电压控制。

仿真试验时假设为理想状况,设系统畸变、不平衡三相电压表达式为:

$$\begin{aligned} v_a &= 250 \sin(\omega t) + 31 \sin(3\omega t - 21^\circ) \\ v_b &= 250 \sin(\omega t - 45^\circ) + 30 \sin(3\omega t - 123^\circ) \\ v_c &= 300 \sin(\omega t + 60^\circ) + 27 \sin(3\omega t - 48^\circ) \\ (\omega &= 100) \end{aligned}$$

系统电压在 abc 坐标系下波形如图 3 所示。

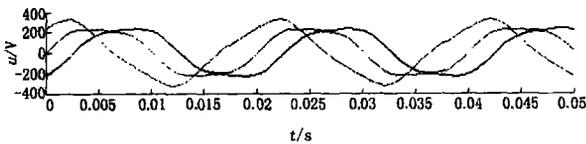


图 3 畸变、不平衡的三相电压源

Fig 3 Three-phase source voltages

各相不平衡线性负载的参数如下:

$$\begin{aligned} Z_a: R_a &= 14.3, L_a = 12.1 \text{ mH} \\ Z_b: R_b &= 14.7, L_b = 31 \text{ mH} \\ Z_c: R_c &= 7.4, L_c = 23.8 \text{ mH} \end{aligned}$$

各相非线性负载电流的表达式如下:

$$\begin{aligned} i_{ia}^n &= 14 \sin(\omega t - 15^\circ) + 3 \sin(5\omega t - 60^\circ) + 2 \sin(7\omega t + 30^\circ) \\ i_{ib}^n &= 10 \sin(\omega t - 90^\circ) + 3 \sin(5\omega t + 55^\circ) + 2 \sin(7\omega t + 77^\circ) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} i_{ic}^n &= 11 \sin(\omega t - 17^\circ) + 3 \sin(5\omega t - 72^\circ) + 2 \sin(7\omega t + 93^\circ) \end{aligned}$$

总负载电流包括不平衡线性负载电流和非线性负载电流,表示为:

$$\begin{aligned} i_a &= \left(\frac{V_{a1}}{Z_{a1}}\right) + \left(\frac{V_{a3}}{Z_{a3}}\right) + i_{ia}^n; \quad i_b = \left(\frac{V_{b1}}{Z_{b1}}\right) + \left(\frac{V_{b3}}{Z_{b3}}\right) + i_{ib}^n; \\ i_c &= \left(\frac{V_{c1}}{Z_{c1}}\right) + \left(\frac{V_{c3}}{Z_{c3}}\right) + i_{ic}^n \end{aligned}$$

总负载电流在 abc 坐标系下波形如图 4 所示。

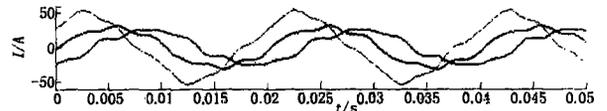


图 4 总负载电流波形

Fig 4 Total load currents

图 5、图 6、图 7 是通过使用上述三种不同的补偿策略进行补偿后的结果。

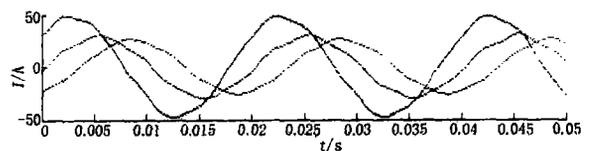


图 5 第一种方法 (GIPR) 补偿后的电流波形

Fig 5 Source currents after compensation based on the first method (GIPR)

由图 5、6、7 可见,在仿真系统的环境下在三种方法中只有经过第三种方法(新补偿策略)补偿后的系统电流波形得到了最大程度的改善,达到平衡、无畸变、与系统基波正序电压同相的满意结果。

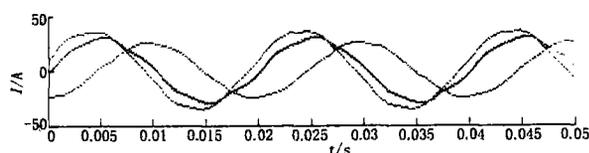


图6 第二种方法(SRF)补偿后的电流波形

Fig 6 Source currents after compensation based on the second method (SRF)

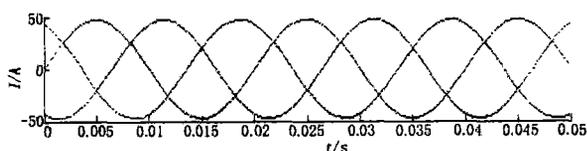


图7 第三种方法(新补偿策略)补偿后的电流波形

Fig 7 Source currents after compensation based on the third method (the proposed method)

## 4 结论

本文通过比较几种常见的有源滤波器补偿策略和方法提出一种无须经过坐标转换,基于 abc 坐标下的补偿新策略。通过仿真比较表明该策略的有效性和优越性。

## 参考文献:

- [1] 王兆安,李明,卓放. 三相电路瞬时无功功率理论的研究[J]. 电工技术学报, 1992, (3).  
WANG Zhao-an, LIMing, ZHUO Fang A Study on the Theory of Instantaneous Reactive Power of Three-Phase Circuits[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1992, (3).
- [2] 杨君,王兆安,邱关源. 不对称三相电路中谐波及基波负序电流的实时检测[J]. 西安交通大学学报, 1996, 30(3): 94-100.  
YANG Jun, WANG Zhao-an, QIU Guan-yuan A Study on the Real-time Detection for Harmonics and Negative-sequence Fundamental Currents of Unbalanced Three-phase Systems[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1996, 30(3): 94-100.

- [3] 杨杰,赖声礼,李心广,等. 三相电压不对称时谐波与基波有功、无功电流的精确检测方法研究[J]. 继电器, 2003, 31(4): 6-9.  
YANG Jie, LAI Sheng-li, LI Xin-guang, et al The Study on the Precision Detection for Harmonics and Active, Reactive Fundamental Currents of Unbalanced Three-phase Systems[J]. Relay, 2003, 31(4): 6-9.
- [4] 张波. 三相电路的广义瞬时无功功率理论[J]. 电力系统及其自动化学报, 1998, 10(4): 55-59.  
ZHANG Ba The General Theory of Instantaneous Reactive Power for Three-Phase Circuits[J]. Proceedings of the EPSA, 1998, 10(4): 55-59.
- [5] 孙驰,魏光辉,毕增军. 基于同步坐标变换的三相不对称系统的无功和谐波电流的检测[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 43-48.  
SUN Chi, WEI Guang-hui, BI Zeng-jun Detection for Reactive and Harmonics Currents of Unbalanced Three-phase Systems Based on Synchronous Reference Frame Transformation[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 43-48.
- [6] Fang Z P, Ott G W, Adams D J. Harmonic and Reactive Power Compensation Based on the Generalized Instantaneous Reactive Power Theory for Three-phase Fourwire Systems[J]. IEEE Trans on Power Electron, 1996, 13: 293-297.
- [7] Chang G W, Shee Tai-chang A Novel Reference Compensation Current Strategy for Shunt Active Power Filter Control[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19(4).

收稿日期: 2005-06-06; 修回日期: 2005-07-15

## 作者简介:

王磊(1982-),男,硕士研究生,研究方向为电力系统谐波抑制、混合有源滤波器的应用等; E-mail: wayj82rf@yahoo.com.cn

张志文(1963-),男,副教授,研究方向为电力电子技术、电力系统谐波抑制等;

高红专(1978-),男,硕士研究生,研究方向为电力电子技术、多电平逆变器。

## New compensation strategy for three-phase shunt APF based on a-b-c coordinate

WANG Lei, ZHANG Zhi-wen, GAO Hong-zhuan

(Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 100082, China)

**Abstract:** The shunt active power filter has proved to be a useful device to eliminate harmonic currents and to compensate reactive power for and linear/nonlinear loads. At present, detecting methods of reactive and harmonic currents based on the instantaneous reactive power theory are main streams. This paper presents a novel approach to determine reference compensation currents. The proposed approach needn't coordinate conversion. Simulation and experiment results show that the proposed approach can work well under source voltage asymmetry, non sine and unbalanced loads. In addition, the proposed approach yields a simpler design of the shunt APF controller.

**Key words:** shunt active power filter; harmonic currents; instantaneous reactive power theory; coordinate conversion