

降低逆变器容量的混合有源电力滤波器 控制方式

陈峻岭¹ 李耀华¹ 姜新建² 朱东起²

(1. 中国科学院电工研究所 北京 100190

2. 清华大学电机系 北京 100084)

摘要 针对一种降低逆变器容量的混合有源电力滤波器, 详细介绍了其在三种控制方式下的工作原理、性能特点和等效电路, 搭建了容量为 10kV·A 的混合有源电力滤波器实验样机, 并进行了三种控制方式的实验和分析。实验结果表明, 采用复合控制方式, 该结构中逆变器容量仅为整个滤波器容量的 4.42%, 而该滤波器投入后, 电网电流总谐波畸变率从 26.95% 下降到 4.25%, 补偿效果良好且优于其他两种控制方式。

关键词: 谐波 混合有源电力滤波器 基波谐振支路 控制方式

中图分类号: TM761

Control Methods of Hybrid Active Power Filter Reduced Its Converter Rating

Chen Junling¹ Li Yaohua¹ Jiang Xinjian² Zhu Dongqi²

(1. Chinese Academic of Science Beijing 100190 China

2. Tsinghua University Beijing 100084 China)

Abstract This paper presents three control methods for a hybrid active power filter (HAPF), which is reduced the rating of its converter. Their principles, filtering performances and equivalent circuits of the HAPF are discussed in detail. Experiment waveforms are obtained in a laboratory prototype, rated at 10kVA. Experiment results prove the converter rating accounts for only 4.42% of the HAPF rating while the total harmonic distortion (THD) of the system current is reduced to 4.25% from 26.95% using the combined control method, which is better than the other control methods.

Keywords: Harmonic, hybrid active power filter, fundamental resonance circuit, control method

1 引言

在谐波治理方面, 国内外广泛使用无源电力滤波器 (Passive Power Filter, PPF), 其成本低并且结构简单, 但其滤波效果受电网阻抗和自身参数变化影响较大, 易与电网阻抗发生串、并联谐振。随着大功率可关断器件和控制技术的不断进步, 有源电力滤波器 (Active Power Filter, APF) 作为抑制电网谐波和补偿无功功率的电力电子装置得到迅速发展, 其补偿效果好, 但造价较高。小容量有源滤波

器与大容量无源滤波器相结合的混合型有源电力滤波器 (Hybrid Active Power Filter, HAPF) 既克服了 APF 容量小、成本高的缺点, 又可以使得整个系统获得良好的滤波性能, 成为实际应用研究的热点^[1-11]。

为了降低 HAPF 中有源逆变器的容量, 文献[12]提出了一种由有源逆变器与基波谐振支路并联后与 PPF 串联构成的 HAPF, 整个滤波器与电网并联。针对该 HAPF, 通常采用检测负载谐波电流的控制方式 (方式 I)^[12], 控制简单且稳定性好, 但是其补偿效果受 HAPF 自身参数影响较大, 抗干扰和抗噪声能力差, 环境的变化和元件的参数差异等也会影响控制系统的补偿效果, 同时不能有效抑制由于

电网电压畸变所产生的电网电流谐波。本文重点研究通过检测电网谐波电流控制方式以及通过检测负载谐波电流和电网谐波电流的复合控制方式下该混合有源滤波器的工作原理及其特点，最后在一台容量为 10kV·A 的 HAPF 实验样机进行三种控制方法的实验验证和对比。

2 混合有源电力滤波器的基本原理

图 1 给出了降低有源逆变器容量的 HAPF 主电路结构图。其中， L_s 为电网等效阻抗； L_5 、 C_5 、 L_7 、 C_7 、 L_h 、 C_h 和 R_h 分别构成 5 次和 7 次单调谐滤波器和高通滤波器，组成无源电力滤波器支路； L_1 和 C_1 在基频处调谐构成串联基波谐振支路；三相有源逆变器经过滤波电感 L_f 直接与基波谐振支路并联后与 PPF 串联，整个滤波器与电网并联。工作时有源电力逆变器相当于受控谐波电流源，其补偿参考电流可以通过检测负载谐波电流、电网谐波电流以及二者复合得到。将该补偿电流注入到电网系统中，可以抵销负载的谐波电流以及抑制电网的谐波电流。该 HAPF 利用无源滤波器支路承受了大部分电网电压，在基频处调谐的谐振支路分流基波无功电流，使得流入有源逆变器的电流进一步减小，从而显著地降低了有源逆变器的容量。

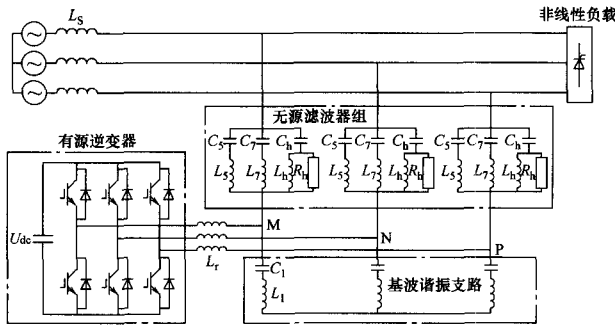


图 1 一种降低逆变器容量的 HAPF 主电路结构

Fig.1 Main circuits of HAPF reduced its converter rating

3 混合有源电力滤波器的控制方式

3.1 检测电网谐波电流的控制方式（方式 II）

工作时有源逆变器补偿参考电流通过检测电网谐波电流得到

$$i_c^* = K_S i_{sh} \quad (1)$$

式中， i_c^* 为有源逆变器参考电流； i_{sh} 为电网谐波电流； K_S 为可控增益。有源逆变器仅输出谐波电流，在这里仅分析谐波域情况。根据该 HAPF 的单相等效电路，在电网谐波电压单独作用下可得

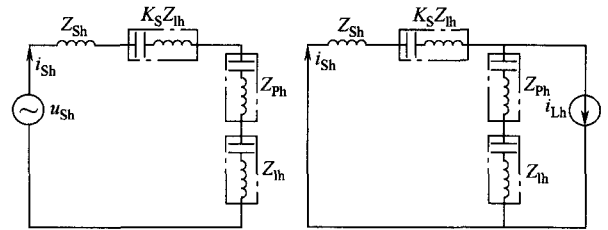
$$i_{sh} = \frac{1}{Z_{sh} + Z_{ph} + (1 + K_S)Z_{1h}} u_{sh} \quad (2)$$

式中， Z_{sh} 、 Z_{ph} 和 Z_{1h} 分别为电网等效阻抗、无源滤波器组等效阻抗和基波谐振支路等效阻抗； u_{sh} 为电网谐波电压。

在负载谐波电流单独作用下可得

$$i_{sh} = \frac{Z_{ph} + Z_{1h}}{Z_{sh} + Z_{ph} + (1 + K_S)Z_{1h}} i_{Lh} \quad (3)$$

式中， i_{Lh} 为负载谐波电流。图 2 给出了在检测电网谐波电流控制方式下该滤波器谐波作用的等效电路。



(a) 对系统谐波电压的单相等效电路图

(b) 对负载谐波电流的单相等效电路图

图 2 检测电网谐波电流控制方式下 HAPF 的谐波域单相等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit in harmonic domain of the HAPF using detecting the source harmonic current

由图 2a 可以看出，在系统谐波电压单独作用下，有源逆变器和基波谐振支路的作用等效于在系统中插入一个 $(1 + K_S)Z_{1h}$ 阻抗，从而起到了抑制系统谐波电压产生谐波电流的作用；由图 2b 可以看出，在负载谐波电流作用下，有源逆变器和基波谐振支路的作用相当于在系统中串入一个 $(1 + K_S)Z_{1h}$ 阻抗，从而迫使谐波电流流入无源电力滤波器，这样 HAPF 一方面可以有效地抑制系统的谐波电压产生谐波电流，另一方面可以强迫大多数负载谐波电流流入无源电力滤波器，起到了改善无源电力滤波器性能的作用。在该种控制方式下， K_S 越大，补偿效果越好，但为了保证控制系统的稳定性， K_S 不能取得过大。

3.2 复合控制方式（方式 III）

工作时有源逆变器补偿参考电流通过检测电网谐波电流和检测负载谐波电流复合方式得到

$$i_c^* = K_S i_{sh} + i_{Lh} \quad (4)$$

根据该 HAPF 的单相等效电路，在电网谐波电压单独作用下可得

$$i_{sh} = \frac{1}{Z_{Sh} + Z_{Ph} + (1 + K_S)Z_{Lh}} u_{Sh} \quad (5)$$

在负载谐波电流单独作用下可得

$$i_{sh} = \frac{Z_{Ph}}{Z_{Sh} + Z_{Ph} + (1 + K_S)Z_{Lh}} i_{Lh} \quad (6)$$

图3给出了在复合控制方式下该滤波器谐波作用的等效电路。由图2和图3对比可知，该控制方式与检测电网谐波电流的控制方式补偿机理类似，但在相同 K_S 情况下，具有更好的补偿特性。另外当 $K_S=0$ 时，即为通常采用检测负载谐波电流的控制方式，可以看出其补偿效果受 HAPF 自身参数影响较大，对环境的变化和元件参数差异等均会影响整个系统的补偿效果。而采用复合控制方式可以通过调整 K_S 来改善滤波器的滤波效果，因而该方式优于采用检测负载谐波电流的控制方式。

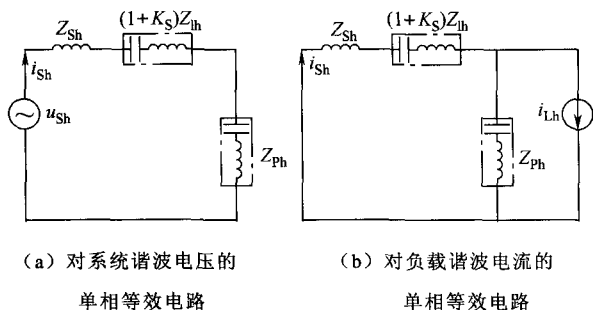


图3 复合控制方式下 HAPF 的谐波域单相等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit in harmonic domain of the HAPF using the combined control method

4 实验结果

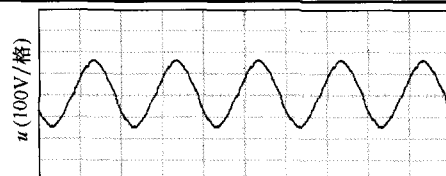
为了进一步验证和对比三种控制方式下该 HAPF 的滤波原理、滤波性能和滤波效果，搭建一台容量为 10kV·A 的 HAPF 实验样机，电网线电压为 190V，有源逆变器直流环电压为 43V，该直流电压是通过额外的三相二极管桥式整流电路得到的，系统所用 PWM 的载波频率为 4.8kHz，负载为三相可控整流负载，下表给出了该滤波器系统参数。

图4给出未投入该 HAPF 时电网电压和电网电流波形及频谱，在此仅给出三相系统中 A 相相关的波形及其频谱。图5给出投入该 HAPF 稳定后，三种控制方式下实验结果对比，其中图的左侧为方式 I 下的实验波形，图的中间为方式 II 下的实验波形，图的右侧为方式 III 下的实验波形，三种控制方式下所用电流跟踪控制器为比例调节器且参数相同，另

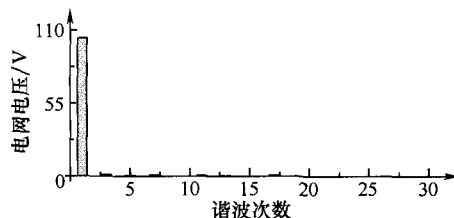
外在方式 II 和方式 III 中 K_S 设定相同。

表 实验系统参数

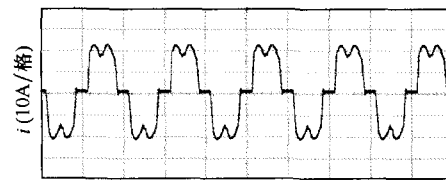
系统参数	L/mH	C/μF	R/Ω
系统等效电感	0.2		
有源逆变器滤波电感	0.2		
5次单调谐滤波器	16.2	25	
7次单调谐滤波器	13.8	15	
高通滤波器	0.6	150	2
基波谐振支路	19.3	525	



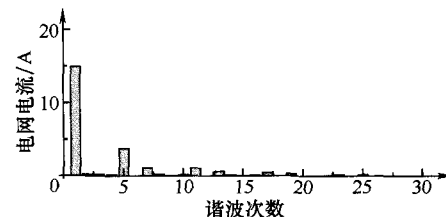
(a) 电网电压波形



(b) 电网电压频谱



(c) 电网电流波形



(d) 电网电流频谱

图4 投入 HAPF 之前电网电压和电网电流波形及其频谱

Fig.4 The waveforms and their spectrums of the source voltage and the source current before the HAPF run

采用检测负载谐波电流控制方式，投入 HAPF 稳定后，电网电流总谐波畸变率从 26.95% 下降到 9.84%，流过无源电力滤波器支路电流和有源逆变器输出电流和有源逆变器输出电压的有效值分别为 6.61A、3.00A 和 13.36V。有源逆变器的电流和电压

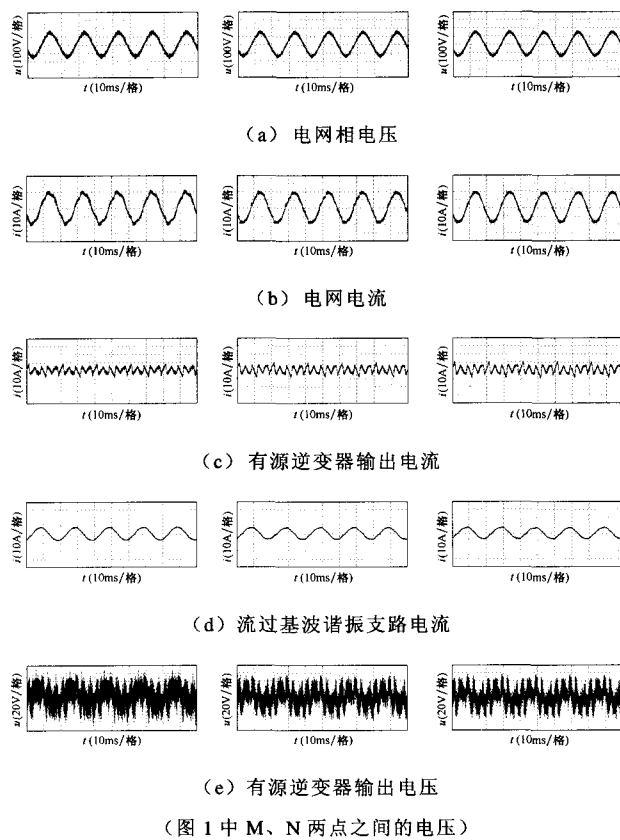


图 5 投入 HAPF 之后三种控制方式波形对比

Fig.5 The waveform comparisons using three control methods after the HAPF run

仅为整个 HAPF 的 45.4% 和 7.03%，其容量仅为整个滤波器容量的 3.19%，为负载容量的 1.36%；采用检测电网谐波电流控制方式，电网电流总谐波畸变率从 26.95% 下降到 7.54%，流过无源电力滤波器支路电流、有源逆变器输出电流和有源逆变器输出电压的有效值分别为 6.89A、3.70A 和 13.92V。有源逆变器的电流和电压仅为整个 HAPF 的 53.7% 和 7.33%，其容量仅为整个滤波器容量的 3.94%，为负载容量的 1.75%；而采用复合控制方式，电网电流总谐波畸变率从 26.95% 下降到 4.25%，流过无源电力滤波器支路电流、有源逆变器输出电流和有源逆变器输出电压的有效值分别为 7.08A、4.08A 和 14.59V。有源逆变器的电流和电压仅为整个 HAPF 的 57.6% 和 7.68%，其容量仅为整个滤波器容量的 4.42%，为负载容量的 2.02%。在本实验系统中，方式 I 补偿效果受系统本身参数影响较大，导致采用该控制方式效果不理想；方式 II 的补偿性能受到系统稳定性的制约，其可控增益 K_S 不能取得太大；而方式 III 兼有方式 I 和方式 II 两种控制方式的优点，克服了检测负载谐波电流控制方式受系统参数的制

约，在 K_S 相同时，方式 III 的滤波效果优于方式 II 的滤波效果。另外，为增强系统的稳定性，方式 III 可以使 K_S 取得相对较小，又保证了良好的滤波效果。

5 结论

本文研究了一种混合型有源电力滤波器在检测负载谐波电流控制方式、检测电网谐波电流控制方式、两者复合控制方式下的工作原理及其滤波特点，同时搭建了一台容量为 10kV·A 的 HAPF 实验样机，进一步验证和对比三种控制方式下该 HAPF 的滤波原理、滤波性能和滤波效果。实验结果表明：①该混合型滤波器中有源逆变器容量不足整个滤波器容量的 5%；②复合控制方式不仅可以有效抑制电网谐波电压产生的谐波电流，而且还可以阻止负载侧谐波电流流入电网，同时滤波效果良好，优于检测电网谐波电流和检测负载谐波电流两种控制方式。

参考文献

- [1] 王兆安, 杨君, 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, 2006.
- [2] Peng F Z. Harmonic sources and filtering approaches [J]. IEEE Industry Applications Magazine, 2001(7/8): 18-25.
- [3] Hirofumi Akagi. Active harmonic filters[J]. Proceedings of the IEEE, 2005, 93 (12): 2128-2141.
- [4] Wang Yue, Wang Zhaoan, Yang Jun, et al. A new hybrid parallel active filter[C]. Conf. Rec. IEEE/PESC, 2003: 1049-1054.
- [5] Anucha Harirak, Somboon Sangwongwanich. A novel source-current detection type active filter equivalent to load-current detection type[C]. Conf. Rec. IEEE/IAS, 2005: 1205-1212.
- [6] Hurng Liahng Jou, Jinn-Chang Wu, Yao Jen Chang, et al. A novel active power filter for harmonic suppression[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20 (2): 1507-1513.
- [7] Rubén Inzunza, Hirofumi Akagi. A 6.6kV transformerless shunt hybrid active filter for installation on a power distribution system [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2005, 20 (4): 893-900.
- [8] Brij N Singh, Bhim Singh, Ambrish Chandra, et al. An improved control algorithm for active filters[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22 (2): 1009-1020.

- [9] Lucian Asiminoaei, Cristian Lascu, Frede Blaabjerg, et al. Performance improvement of shunt active power filter with dual parallel topology [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22 (1) : 247-259.
- [10] Reyes S Herrera, Patricio Salmerón, Hyosung Kim. Instantaneous reactive power theory applied to active power filter compensation: different approaches, assessment, and experimental results[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 55 (1) : 184-196.
- [11] Shigenori Inoue, Toshihisa Shimizu, Keiji Wada. Control methods and compensation characteristics of a series active filter for a neutral conductor[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54 (1) : 433-440.
- [12] 邓占锋, 朱东起, 姜新建. 降低有源部分容量的混合电力滤波器[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2003, 43 (3) : 293-295.
- Deng Zhanfeng, Zhu Dongqi, Jiang Xinjian. Reduced rating of active filter in hybrid power filter[J]. J.Tsinghua Univ. (Sci & Tech), 2003, 43 (3) : 293-295.

作者简介

陈峻岭 男, 1976年生, 博士, 硕士生导师, 副研究员, 主要研究方向为无功功率补偿和谐波抑制。

李耀华 男, 1966年生, 博士, 博士生导师, 研究员, 主要研究方向为轨道交通供电系统及牵引控制、大容量电力电子交流传动。