

并联电感型混合有源滤波器及其控制策略

郑建勇¹, 张愉², 丁祖军³

- (1. 苏州市电气设备与自动化重点实验室, 江苏省 苏州市 215123;
2. 东南大学 电气工程学院, 江苏省 南京市 210096;
3. 淮阴工学院 电子与电气工程学院, 江苏省 淮安市 223003)

A Novel Parallel Inductor Type Hybrid Active Power Filter and Its Control Strategy

ZHENG Jian-yong¹, ZHANG Yu², DING Zu-jun³

- (1. Suzhou Key Laboratory of Electrical Equipment and Automation, Suzhou 215123, Jiangsu Province, China;
2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu Province, China;
3. School of Electronics and Electrical Engineering, Huaiyin Institute of Technology, Huaian 223003, Jiangsu Province, China)

ABSTRACT: A topological structure of a parallel inductor type hybrid active power filter for three-phase circuit is proposed and its working principle is analyzed, meanwhile the comparative research on three control strategies for such a topological structure is carried out. By means of equivalent transformation of circuit, the behaviors of the proposed hybrid active power filter under different control strategies are revealed. Firstly, via coupling transformers, the active parts of this hybrid active power filter are in parallel with additional inductors, then the parallel components are connected in series with passive power filter to compose hybrid active power filter, finally the hybrid active power filter is connected in parallel with power network. The additional inductors provide the path for fundamental current of the filter branch and the active filter is controlled as a harmonic current source, thus the fundamental current will be forced to flow into additional inductor while only harmonic currents pass through active filter, thus the capacity of active filter can be effectively decreased, for this reason it makes the active filter suitable for the occasion of high power. The proposed topology and three kinds of control strategies are validated by experiments and simulation with laboratory prototype of the proposed hybrid active power filter, and simulation and experiment results show that the proposed hybrid active power filter can effectively suppress harmonics, besides, among the three control strategies the compound control can provide the best filtering effect.

KEY WORDS: hybrid active power filter; topological structure; control strategy; compound control; harmonic compensation; circuit transformation

摘要: 提出一种适用于三相电路的并联电感型混合有源滤波器拓扑结构, 对其工作原理进行分析, 并对这种拓扑结构下的3种控制策略进行比较研究, 通过电路的等效变换, 揭示

出各种控制策略下有源滤波器的作用。该混合有源滤波器的有源部分通过单相变压器与附加电感并联后再与无源滤波器串联, 最后并入电网。附加电感提供了基波电流通路, 控制有源滤波器为谐波电流源, 就可以迫使基波电流流入附加电感, 而有源滤波器仅流过谐波电流, 从而有效降低了有源部分的容量, 使之适用于大功率场合。通过仿真和实验, 证明新型混合有源滤波器可以有效抑制谐波, 3种控制策略中以复合控制的滤波效果最好。

关键词: 混合有源滤波器; 拓扑结构; 控制策略; 复合控制; 谐波补偿; 电路变换

0 引言

随着电力电子器件在电力系统中的广泛应用, 电网的谐波污染问题日趋严重^[1]。谐波给电力系统的安全经济运行带来诸多不利影响。目前, 抑制谐波的主要手段有无源滤波器(passive power filter, PPF)、有源滤波器(active power filter, APF)和混合型有源滤波器(hybrid active power filter, HAPF)。无源滤波器结构简单, 成本低廉, 但滤波效果受电网参数的影响较大, 而且容易与电网阻抗和电网中的并联电容器发生串并联谐振。有源滤波器的滤波性能较好, 而且不受电网参数的影响, 可以实现谐波的动态补偿, 但受电力电子器件成本和容量的限制, 很难独立应用在高电压和大功率场合^[2-6]。混合型有源滤波器兼顾了无源滤波器和有源滤波器的优点, 具有较高的性价比, 发展十分迅速, 逐渐成为抑制谐波最有效的手段^[7-15]。

为了减小有源滤波器的容量, 国内外学者已经提出了多种混合型有源滤波器的拓扑结构。无源滤

波器与有源滤波器并联构成的混合有源滤波器利用无源滤波器滤除大部分谐波,从而减小了有源部分的容量,但由于有源部分仍要承受基波电压,因此不适合应用于高压系统^[16]。无源滤波器与有源滤波器串联构成的混合有源滤波器主要由无源部分滤除谐波,有源部分用来改善滤波性能,并起到抑制谐振的作用,综合性能较好,应用较为广泛,但由于有源滤波器仍要流过基波无功电流,因此容量不能进一步减小^[7,10]。串联谐振注入式混合有源滤波器^[17-19]有效降低了有源部分的容量,在实现谐波治理的同时可以进行大容量的无功补偿。文献[20]提出了一种新型混合有源滤波器,文献[21]针对这种拓扑结构提出了复合控制策略,分析了其补偿特性和谐振抑制性能,但研究仅限于单相电路。

本文将文献[21]提出的拓扑结构推广到三相电路中,提出一种并联电感型混合有源滤波器(parallel inductor type HAPF, PITHAPF)。在这种拓扑结构中,与有源部分并联的附加电感提供了基波电流通路,同时降低了有源部分的分压,从而有效降低了有源部分的容量,使之适用于大功率场合。本文对 PITHAPF 的结构和工作原理进行分析,并对其控制策略进行比较研究,通过电路的等效变换,揭示出各种控制策略下有源滤波器所起的作用。仿真和实验表明, PITHAPF 具有良好的补偿性能,具有很强的实用性。

1 系统结构及工作原理

PITHAPF 的系统结构如图 1 所示。图中: U_S 为电网电压; Z_S 为电网的等效阻抗; I_S 、 I_L 、 I_F 分别为电网侧电流、负载侧电流和滤波支路电流; L_a 为附加电感; T 为耦合变压器; L 为滤波电感; U_{dc} 为直流侧储能电容。

有源滤波器通过耦合变压器与附加电感并联,再与无源滤波器串联,然后并入电网。无源滤波器

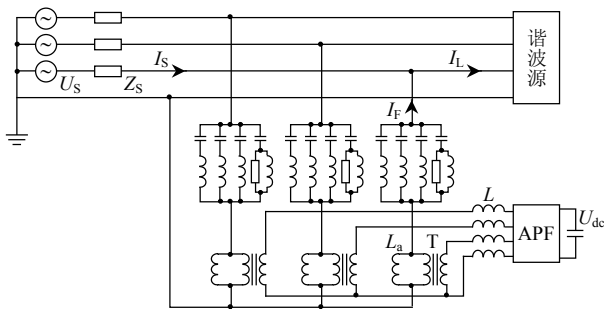


图 1 PITHAPF 的系统结构
Fig. 1 System structure of PITHAPF

由多条单调谐 LC 滤波支路和高通滤波支路并联组成,用来滤除负载电流的主要谐波成分,同时对系统中的无功功率进行补偿。而有源滤波器的作用是优化无源滤波器的滤波特性,同时抑制电网与无源滤波器可能发生的谐振。

APF 被控制为一个谐波电流源,因此,基波无功电流被强迫流过附加电感 L_a , APF 中只流过谐波电流。附加电感 L_a 与无源滤波器相比基波阻抗很小,所以 APF 承受的基波电压很小。因此,这种新型混合有源滤波器可以有效降低有源部分的容量,适用于大功率场合。

PITHAPF 的参数配置比较简单,无源滤波器设计成纯调谐,附加电感可以使滤波器承受一定的频偏,避免谐振。当 APF 过流或故障时,借助快速熔断器, APF 可以迅速脱离整个滤波系统,而无源滤波器和附加电感 L_a 组成的滤波系统还可以正常工作,不至于对电网造成大的冲击。因此,这种新型混合有源滤波器具有很强的实用性。

2 新型混合有源滤波器的控制策略

2.1 单相等效电路

PITHAPF 的单相等效电路如图 2 所示。非线性负载可以看作一个电流源 I_L ; APF 被控制为一个谐波电流源 I_C ; Z_S 、 Z_F 、 Z_a 分别为电网等效阻抗、无源滤波器的阻抗和附加电感的阻抗; U_S 和 U_T 分别为电网电压和滤波器接入点的电压; I_S 和 I_F 分别为电网侧电流和滤波器支路电流。

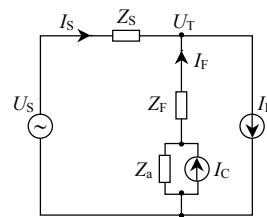


图 2 PITHAPF 的单相等效电路
Fig. 2 Single-phase equivalent circuit of PITHAPF

下文下标 f 和 h 分别表示相应电压或电流的基波分量和谐波分量,对阻抗而言,则分别表示其基波阻抗和谐波阻抗。当仅考虑谐波分量时,系统的单相等效电路如图 3 所示。

根据基尔霍夫电压和电流定律,有

$$\begin{cases} U_{Sh} = I_{Sh} Z_{Sh} + U_{Th} \\ U_{Th} = -I_{Fh} Z_{Fh} + (I_C - I_{Fh}) Z_{ah} \\ I_{Sh} = I_{Lh} - I_{Fh} \end{cases} \quad (1)$$

由式(1)可解出

$$U_{Sh} = (Z_{Sh} + Z_{Fh} + Z_{ah}) I_{Sh} - (Z_{Fh} + Z_{ah}) I_{Lh} + Z_{ah} I_C \quad (2)$$

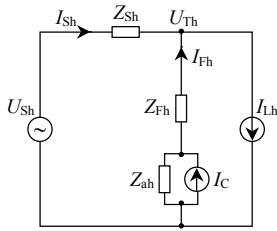


图3 仅考虑谐波分量时的单相等效电路
Fig. 3 Single-phase equivalent circuit only considering harmonic component

2.2 控制策略

本文研究的混合有源滤波器的基本控制策略有3种，即检测负载侧电流的控制策略、检测电网侧电流的控制策略和复合控制策略。下面将在分析系统单相等效电路的基础上，对这3种控制策略进行比较研究。

1) 检测负载侧电流的控制策略。

在这种控制策略下，设 $I_C = K_L I_{Lh}$ ，将其代入式(2)，可得

$$I_{Sh} = \frac{1}{Z_{Sh} + Z_{Fh} + Z_{ah}} U_{Sh} + \frac{Z_{Fh} + (1 - K_L)Z_{ah}}{Z_{Sh} + Z_{Fh} + Z_{ah}} I_{Lh} \quad (3)$$

由于无源滤波器配置为纯调谐， $Z_{Fh} \approx 0$ 。通常情况下将 K_L 控制为1，非线性负载产生的谐波绝大部分都会流入滤波器支路，因此电网电流中的谐波电流将很小。

根据式(3)可得到如图4所示的简化电路。对于 I_{Sh} 而言，该电路与图3等效。

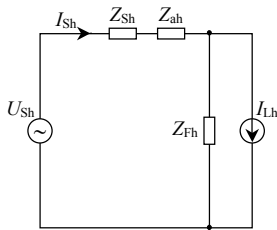


图4 检测负载侧电流控制策略的简化等效电路
Fig. 4 Simplified equivalent circuit with load current detection control strategy

由图4可以看出，有源滤波器的作用相当于将附加电感从滤波支路“转移”到电网侧，从而减小了滤波支路的阻抗，增加了电网的等效阻抗，优化了无源滤波器的滤波性能。

从式(3)也可以看出，检测负载侧电流控制策略无法对电网电压畸变引起的谐波进行有效的抑制。当电网频率发生偏移、电网等效阻抗发生波动或滤波器参数发生变化时，滤波器仍可能与电网的等效阻抗发生谐振，这就要求设计附加电感的参数时要尽量避开系统的谐振点。

2) 检测电网侧电流的控制策略。

在这种控制策略下，设 $I_C = K_S I_{Sh}$ ，将其代入式(2)，可得

$$I_{Sh} = \frac{1}{Z_{Sh} + Z_{Fh} + (1 + K_S)Z_{ah}} U_{Sh} + \frac{Z_{Fh} + Z_{ah}}{Z_{Sh} + Z_{Fh} + (1 + K_S)Z_{ah}} I_{Lh} \quad (4)$$

根据式(4)可得到如图5所示的简化电路。对于 I_{Sh} 而言，该电路与图3等效。

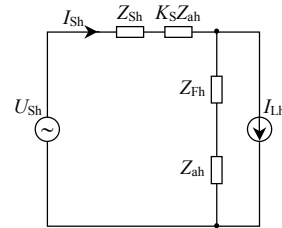


图5 检测电网侧电流控制策略的简化等效电路
Fig. 5 Simplified equivalent circuit with source current detection control strategy

从图5可以看出，有源滤波器的作用相当于在电网侧增加一个电阻(当 K_S 为负虚数时)，或者增加一个电感(当 K_S 为正实数时)，从而增加了电网的等效阻抗，优化了无源滤波器的滤波性能。

从式(4)也可以看出，当 K_S 足够大时，可以保证 $I_{Sh} \ll I_{Lh}$ ，非线性负载引起的谐波得到了有效抑制。混合有源滤波器的补偿效果取决于 K_S ， K_S 越大，补偿效果越好。这种控制策略也可以对电网电压畸变引起的谐波进行有效的抑制。由于 K_S 改变了电网阻抗，这种控制策略可以很好地抑制电网阻抗与滤波器之间可能发生的谐振。但对于 I_{Sh} 而言，这种控制策略属于闭环控制，存在稳定性问题， K_S 取值不能过大。另外，当 K_S 变大时，有源滤波器的输出电流增大，必然导致其容量增加。

3) 复合控制策略。

在这种控制策略下，需要同时检测负载侧电流和电网侧电流。设 $I_C = K_S I_{Sh} + K_L I_{Lh}$ ，将其代入式(2)，可得

$$I_{Sh} = \frac{1}{Z_{Sh} + Z_{Fh} + (1 + K_S)Z_{ah}} U_{Sh} + \frac{Z_{Fh} + (1 - K_L)Z_{ah}}{Z_{Sh} + Z_{Fh} + (1 + K_S)Z_{ah}} I_{Lh} \quad (5)$$

通常情况下将 K_L 控制为1。根据式(5)可得到如图6所示的简化电路。对于 I_{Sh} 而言，该电路与图3等效。

从图6可以看出，有源滤波器的作用相当于在电网侧增加一个电阻(当 K_S 为负虚数时)，或者增加

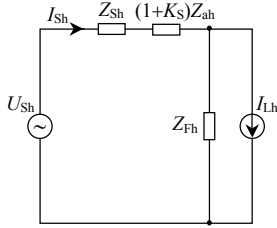


图 6 复合控制策略的简化等效电路
Fig. 6 Simplified equivalent circuit with compound control strategy

一个电感(当 K_S 为正实数时), 同时将附加电感从滤波器支路“转移”到电网侧, 从而增加了电网的等效阻抗, 减小了滤波支路的阻抗, 优化了无源滤波器的滤波性能。

在这种控制策略下, 检测负载侧电流用来抑制谐波, 检测电网侧电流可以进一步优化滤波效果, 同时抑制可能发生的谐振, 并对电网电压畸变引起的谐波有一定的抑制作用。因此, K_S 不必取很大就可以达到良好的滤波效果, 这样可以保证系统的稳定性, 有源滤波器的容量也不会增加很多。

由此可见, 复合控制策略综合了前 2 种控制策略的优点, 滤波效果更好, 又可以有效抑制谐振, 是一种比较理想的控制策略。

3 各种控制策略的实现方法

新型混合有源滤波器的控制电路主要包括谐波检测电路、指令电流的计算及脉宽调制(pulse width modulation, PWM)跟踪控制电路。

谐波检测采用基于瞬时无功率理论的 i_p - i_q 法^[1], 得到负载侧和电网侧电流的谐波成分。根据上述 3 种控制策略, 可计算出各种控制方式下的指令电流。然后采用定时控制的瞬时值比较方法, 控

制逆变器的输出电流跟踪指令电流的变化。

新型混合有源滤波器的控制电路如图 7 所示。

图中: i_{La} 、 i_{Lb} 、 i_{Lc} 、 i_{Sa} 、 i_{Sb} 、 i_{Sc} 分别表示负载侧和电网侧三相电流的瞬时值; $i_{L\alpha}$ 、 $i_{L\beta}$ 、 $i_{S\alpha}$ 、 $i_{S\beta}$ 分别表示静止两相坐标系 α - β 下负载侧和电网侧电流的瞬时值; i_{Lp} 、 i_{Lq} 、 i_{Sp} 、 i_{Sq} 分别表示同步旋转两相坐标系 p-q 下负载侧和电网侧电流的瞬时值; \bar{i}_{Lp} 、 \bar{i}_{Lq} 、 \bar{i}_{Sp} 、 \bar{i}_{Sq} 分别表示同步旋转两相坐标系 p-q 下负载侧和电网侧电流直流分量的瞬时值; $i_{L\alpha f}$ 、 $i_{L\beta f}$ 、 $i_{S\alpha f}$ 、 $i_{S\beta f}$ 分别表示静止两相坐标系 α - β 下负载侧和电网侧电流基波分量的瞬时值; $i_{L\alpha f}$ 、 $i_{L\beta f}$ 、 i_{Lcf} 、 $i_{S\alpha f}$ 、 $i_{S\beta f}$ 、 i_{Scf} 分别表示负载侧和电网侧三相电流基波分量的瞬时值; i_{Lah} 、 i_{Lbh} 、 i_{Lch} 、 i_{Sah} 、 i_{Sbh} 、 i_{Sch} 分别表示负载侧和电网侧三相电流谐波分量的瞬时值; i_{Ca}^* 、 i_{Cb}^* 、 i_{Cc}^* 、 i_{Ca} 、 i_{Cb} 、 i_{Cc} 分别表示有源滤波器三相输出电流的指令瞬时值和实际瞬时值; e_a 表示 A 相电网电压的瞬时值; \sin 和 $-\cos$ 分别表示由锁相环得到的与 e_a 同相的正弦和余弦信号。

图 7 中转换矩阵 C 、 C_{32} 和 C_{23} 分别为

$$C = \begin{bmatrix} \sin \omega t & -\cos \omega t \\ -\cos \omega t & -\sin \omega t \end{bmatrix}$$

$$C_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}, \quad C_{23} = C_{32}^T$$

针对不同的控制策略, 只需调整图 7 中的参数 K_S 和 K_L 即可。在检测负载侧电流的控制策略下, 可以设 $K_S=0$; 在检测电网侧电流的控制策略下, 可以设 $K_L=0$ 。

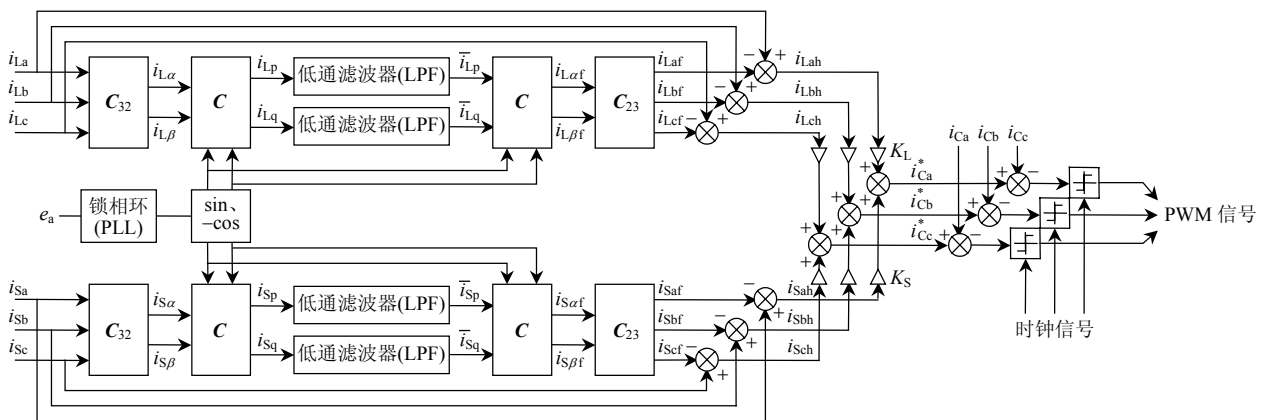


图 7 PITHAPF 的控制电路
Fig. 7 Control circuit of PITHAPF

4 仿真研究

根据上述混合有源滤波器的结构和工作原理,

利用软件 PSCAD/EMTDC V4.2 进行了仿真研究。三相电源线电压为 380 V, 频率为 50 Hz, 电网等效

阻抗为感性， $L_S=0.5\text{ mH}$ ，负载为二极管构成的三相不控整流桥，直流负载电阻 $R=7.5\ \Omega$ ， $L=20\text{ mH}$ 。无源滤波器由 5、7 和 11 次单调谐 LC 滤波支路并联构成，附加电感 $L_a=0.05\text{ mH}$ ，耦合变压器的变比为 1:1，滤波电感 $L=5\text{ mH}$ 。无源滤波器参数如表 1 所示，表中 Q 为单调谐滤波器的品质因数。

表 1 无源滤波器参数
Tab. 1 Parameters of PPF

谐波次数	L/mH	$C/\mu\text{F}$	Q
5	4	100	30
7	2	100	30
11	0.8374	100	30

仿真中，无源滤波器在 0.5 s 时投入，2.4 s 时切

除，有源滤波器在 1.0 s 时投入，2.0 s 时切除。图 8(a)(b) 分别给出了滤波器不投入和仅无源滤波器投入时的电网侧电流波形。图 8(c)(d)(e) 为投入混合有源滤波器并分别采用 3 种不同的控制策略时电网侧电流波形，其中 $K_L=1$ ， $K_S=5$ 。

无源滤波器投入前后以及 3 种控制策略下混合有源滤波器投入前后电网侧电流的变化过程如图 9 所示。

在各种控制方式下，无源滤波器及混合有源滤波器投入前后，负载侧电流和电网侧电流的总畸变率(total harmonic distortion, THD)如图 10 所示。

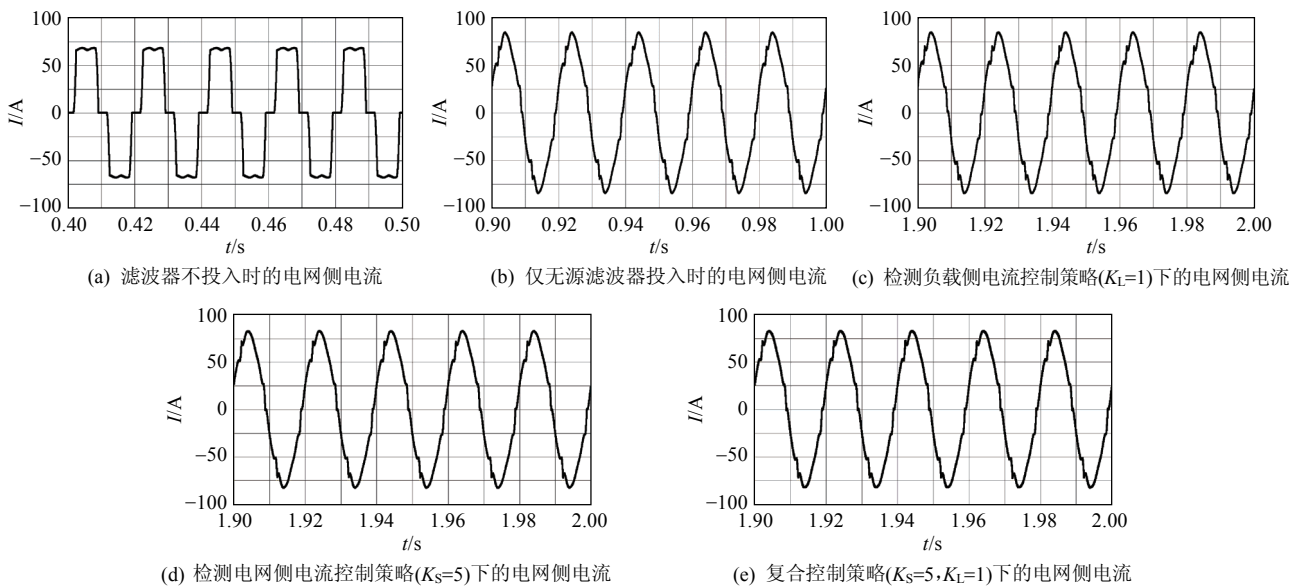


图 8 电网侧电流波形

Fig. 8 Source current waveforms

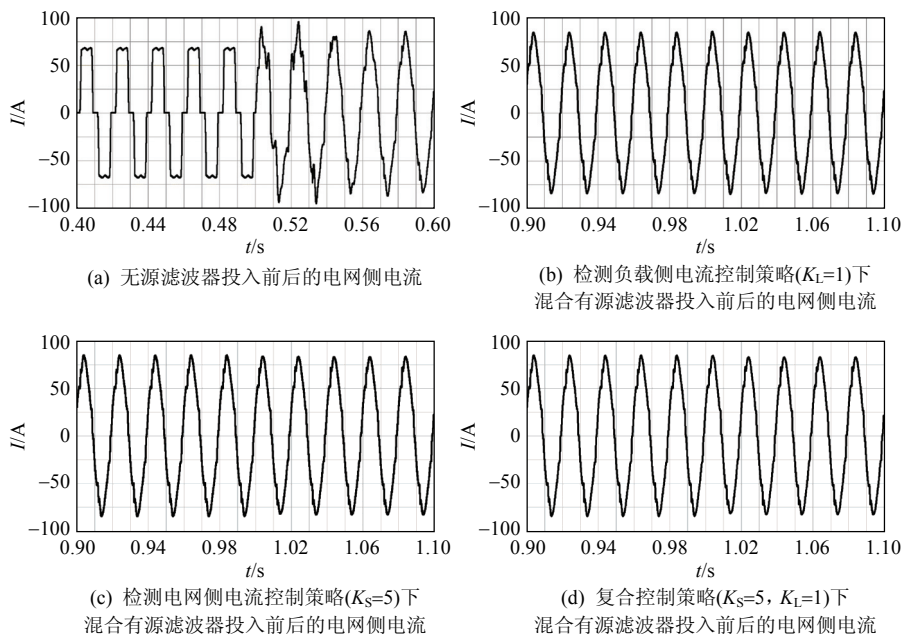
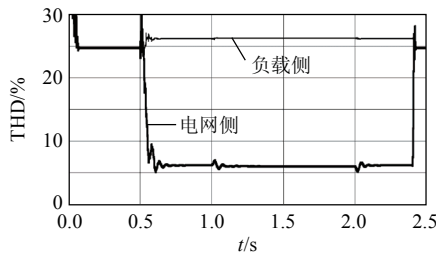
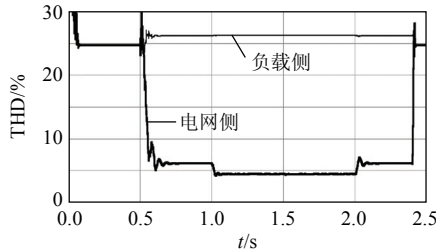


图 9 无源滤波器投入前后以及 3 种控制策略下混合有源滤波器投入前后电网侧电流的变化过程

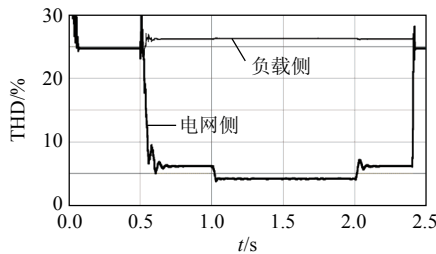
Fig. 9 Variation process of source current before and after PF and HAPF are switched on with three control strategies



(a) 检测负载侧电流控制策略($K_L=1$)下负载侧及电网侧电流的畸变率



(b) 检测电网侧电流控制策略($K_S=5$)下负载侧及电网侧电流的畸变率



(c) 复合控制策略($K_S=5, K_L=1$)下负载侧及电网侧电流的畸变率

图 10 $K_S=5$ 时负载侧及电网侧电流的畸变率

Fig. 10 THD of load and source current when $K_S=5$

在各种控制方式下,无源滤波器及混合有源滤波器投入前后,电网侧电流的总畸变率如表 2 所示。

表 2 电网侧电流畸变率

Tab. 2 THD of source current

控制方式	THD/%
滤波器投入前	24.64
无源滤波器投入后	6.08
检测负载侧电流控制策略	5.95
检测电网侧电流控制策略	4.41
复合控制策略	4.09

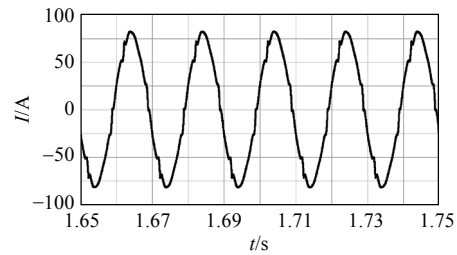
从图 8、图 10 和表 2 可以看出,无源滤波器投入后,电网侧电流波形有了明显改善。有源滤波器投入后,电网侧电流的总畸变率进一步下降,波形接近于正弦。在复合控制策略下电网侧电流的改善最为明显。

图 11(a)(b)分别给出了检测电网侧电流控制策略($K_S=10$)下和复合控制策略($K_S=10, K_L=1$)下电网侧电流的波形。

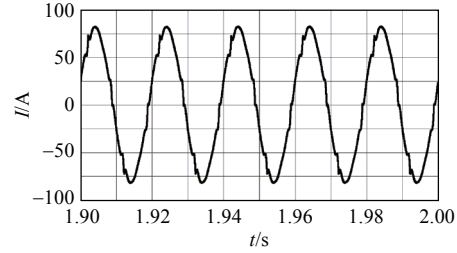
检测电网侧电流控制策略($K_S=10$)和复合控制策略($K_S=10, K_L=1$)下,无源滤波器及混合有源滤波器投入前后,负载侧电流和电网侧电流的总畸变率如图 12 所示。

检测电网侧电流控制策略($K_S=10$)和复合控制

策略($K_S=10, K_L=1$)下电网侧电流的总畸变率如表 3 所示。



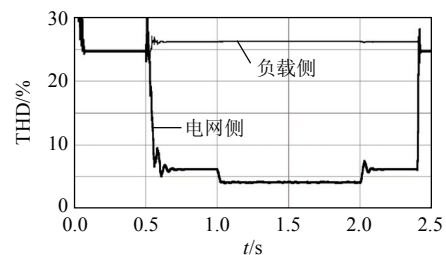
(a) 检测电网侧电流控制策略($K_S=10$)下的电网侧电流



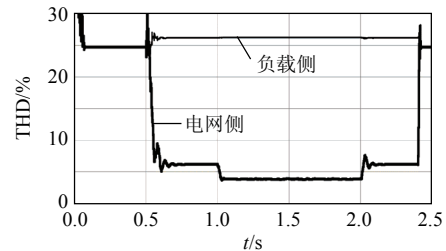
(b) 复合控制策略($K_S=10, K_L=1$)下的电网侧电流

图 11 $K_S=10$ 时电网侧电流波形

Fig. 11 Source current waveforms when $K_S=10$



(a) 检测电网侧电流控制策略($K_S=10$)下负载侧及电网侧电流的畸变率



(b) 复合控制策略($K_S=10, K_L=1$)下负载侧及电网侧电流的畸变率

图 12 $K_S=10$ 时负载侧及电网侧电流的畸变率

Fig. 12 THD of load and source currents when $K_S=10$

表 3 $K_S=10$ 时电网侧电流畸变率

Tab. 3 THD of source current when $K_S=10$

控制方式	THD/%
检测电网侧电流控制策略	4.05
复合控制策略	3.77

将图 11(a)(b)与图 8(d)(e)比较可以看出,当 K_S 增大时,电网侧电流波形可以得到进一步改善。比较图 10、12 和表 2、3 可以看出:当 K_S 增大时,电网侧电流的总畸变率下降;当 K_S 相同时,复合控制的补偿效果总是比闭环控制更好。

5 实验研究

在仿真的基础上笔者研制了一套 PITHAPF 装

置进行实验研究。实验参数为：电网线电压 380 V，谐波源为二极管构成的不控整流电路，直流负载电阻 7.5 Ω ，电感 20 mH。无源滤波器参数与仿真中一致，如表 1 所示。

图 13 为复合控制策略($K_S=5$, $K_L=1$)下补偿前后电网侧电流和滤波支路电流波形。图 14 给出了补偿前后电网侧电流的畸变率。

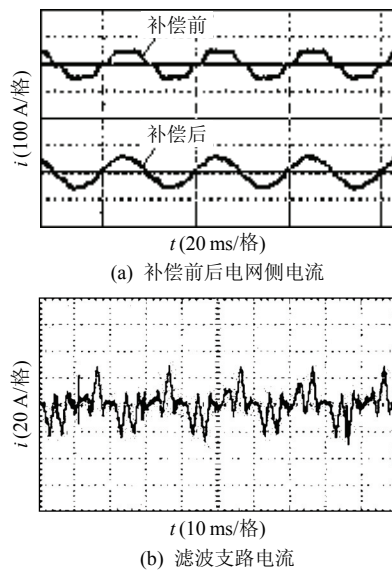


图 13 补偿前后电网侧电流和滤波支路电流
Fig. 13 Source current and filter branch current before and after compensation

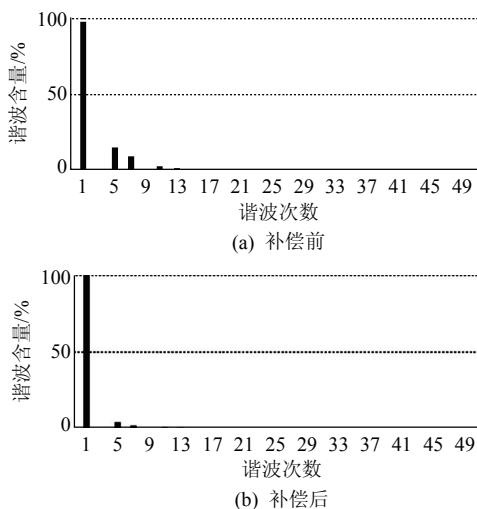


图 14 补偿前后电网侧电流的畸变率
Fig. 14 THD of source current before and after compensation

从图 14 可以看出，补偿前电网侧的电流波形有很大的畸变，5、7、11 和 13 次谐波含量都很高。混合有源滤波器投入后，各次谐波含量均有了明显下降，补偿后的电网电流波形近似为正弦，总畸变率也从 25.0% 降到 4.3%。实验结果表明，本文提出的新型混合有源滤波器可以有效地抑制谐波。

6 结论

- 1) 新型混合有源滤波器可以有效抑制谐波，防止非线性负载引起的谐波对系统造成的影响。
- 2) 新型混合有源滤波器可以有效降低有源部分的容量，而且配置灵活，具有很强的实用性。
- 3) 可以采用检测负载侧电流、检测电网侧电流和复合控制 3 种策略进行谐波补偿，其中以复合控制的补偿效果最好。

致谢

本文研究得到 2008 年苏州第五批科技发展计划(工业攻关)项目“钢铁行业大功率电网无功补偿及谐波抑制综合节能装置”(SG0839)的支持，特此致谢!

参考文献

- [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: 220-385.
- [2] 陈国柱, 吕征宇, 钱照明. 有源电力滤波器的一般原理及应用[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(9): 17-21.
Chen Guozhu, Lü Zhengyu, Qian Zhaoming. The general principle of active filter and its application[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(9): 17-21(in Chinese).
- [3] Akagi H. New trends in active filters for power conditioning[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1996, 32(6): 1312-1322.
- [4] El-Habrouk M, Darwish M K, Mehta P. Active power filter: a review[J]. IEE Proceedings of Electric Power Application, 2000, 147(5): 403-413.
Li Zhanying, Ren Zhen, Yang Zeming. Survey on active power filter devices and their application study[J]. Power System Technology, 2004, 28(22): 40-43(in Chinese).
- [5] 李战鹰, 任震, 杨泽明. 有源滤波装置及其应用研究综述[J]. 电网技术, 2004, 28(22): 40-43.
Fu Qing, Yang Geng, Guo Xizheng. Control method for active power filter considering harmonic voltage in power source[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(3): 47-51(in Chinese).
- [6] 付青, 杨耕, 郭希铮. 考虑电源电压畸变时的有源电力滤波器控制方法[J]. 电工技术学报, 2006, 21(3): 47-51.
Tang Zhuoyao, Ren Zhen. Hybrid filter connected in series APF with PF and compensating characteristic analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(5): 25-29(in Chinese).
- [7] 唐卓尧, 任震. 并联型混合滤波器及其滤波特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(5): 25-29.
Tang Zhuoyao, Ren Zhen. Hybrid filter connected in series APF with PF and compensating characteristic analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(5): 25-29(in Chinese).
- [8] Fujita H, Akagi H. A practical approach to harmonic compensation in power systems-series connection of passive and active filters[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1991, 27(6): 1020-1025.
- [9] Detjen D, Jacobs J, De Doncker R W, et al. A new hybrid filter to dampen resonances and compensate harmonic currents in industrial power systems with power factor correction equipment[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2001, 16(6): 821-827.
- [10] 肖湘宁, 徐永海, 刘昊, 等. 混合型有源电力补偿技术与实验研究[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(5): 39-44.
Xiao Xiangning, Xu Yonghai, Liu Hao, et al. Analysis of hybrid

- power compensator and its experimental study[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(5): 39-44(in Chinese).
- [11] 邹祖冰, 蔡丽娟, 贺佳兵. 并联混合电力有源滤波器的非线性控制算法[J]. 电网技术, 2004, 28(20): 43-47.
Zou Zubing, Cai Lijuan, He Jiabing. Nonlinear control algorithm of active power filter for AC/DC hybrid power grid[J]. Power System Technology, 2004, 28(20): 43-47(in Chinese).
- [12] 王成, 肖先勇. 基于控制延迟补偿的混合有源滤波器的研究[J]. 电网技术, 2006, 30(7): 59-63.
Wang Cheng, Xiao Xianyong. A hybrid active power filter with control delay compensation[J]. Power System Technology, 2006, 30(7): 59-63(in Chinese).
- [13] 常永亮, 蒋外文, 涂春明. 基于谐振阻抗型混合有源滤波器谐波分析与治理装置[J]. 电网技术, 2005, 29(17): 76-81.
Chang Yongliang, Jiang Waiwen, Tu Chunming. Harmonic analysis and eliminating device based on resonant impedance type hybrid active filter[J]. Power System Technology, 2005, 29(17): 76-81(in Chinese).
- [14] 汤赐, 姚舜, 帅智康, 等. 新型注入式混合有源滤波器的稳定性研究[J]. 电网技术, 2006, 30(20): 56-60.
Tang Ci, Yao Shun, Shuai Zhikang, et al. Research on stability of new injection type hybrid active power filter[J]. Power System Technology, 2006, 30(20): 56-60(in Chinese).
- [15] 曾令全, 曾德俊, 吴杰, 等. 用于有源滤波器谐波检测的一种新的自适应算法[J]. 电网技术, 2008, 32(13): 40-44.
Zeng Lingquan, Zeng Dejun, Wu Jie, et al. A novel adaptive algorithm applied in harmonic detection of active power filter[J]. Power System Technology, 2008, 32(13): 40-44(in Chinese).
- [16] 颜晓庆, 杨君, 王兆安. 并联混合型电力有源滤波器的研究[J]. 电力电子技术, 1998(4): 4-6.
Yan Xiaoqing, Yang Jun, Wang Zhaoan. The study on hybrid shunt active power filter[J]. Power Electronics, 1998(4): 4-6(in Chinese).
- [17] 谭甜源, 罗安, 唐欣, 等. 大功率并联混合型有源电力滤波器的研制[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 41-45.
Tan Tianyuan, Luo An, Tang Xin, et al. Development of high-capacity hybrid power filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 41-45(in Chinese).
- [18] 范瑞祥, 罗安, 李欣然. 并联混合型有源电力滤波器的系统参数设计及应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(2): 106-111.
Fan Ruixiang, Luo An, Li Xinran. Parameter design and application research of shunt hybrid active power filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(2): 106-111(in Chinese).
- [19] 唐欣, 罗安, 涂春明. 新型注入式混合有源滤波器的研究[J]. 电工技术学报, 2004, 19(11): 50-55.
Tang Xin, Luo An, Tu Chunming. Study of new injection type hybrid active power filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(11): 50-55(in Chinese).
- [20] 王跃, 杨君, 王兆安, 等. 电气化铁路用有源电力滤波器的控制系统[J]. 电力电子技术, 2003, 37(1): 1-3.
Wang Yue, Yang Jun, Wang Zhaoan, et al. Control system of active power filter for electrified railways[J]. Power Electronics, 2003, 37(1): 1-3(in Chinese).
- [21] 王跃, 王兆安. 复合控制的新型并联 HAPF 的稳态特性研究[J]. 电力电子技术, 2004, 38(6): 13-15.
Wang Yue, Wang Zhaoan. Steady state characteristics of a novel shunt hybrid active power filter adopting the combined control approach[J]. Power Electronics, 2004, 38(6): 13-15(in Chinese).



郑建勇

收稿日期: 2009-07-30。

作者简介:

郑建勇(1966—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力电子与电力传动, E-mail: jy_zheng@seu.edu.cn。

张愉(1984—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统谐波抑制及无功补偿, E-mail: fisherb13@163.com。

丁祖军(1979—), 男, 讲师, 研究方向为电力系统谐波抑制及无功补偿。

(责任编辑 沈杰)