

基于复合控制策略的混合有源滤波器谐波治理研究

赵辉^{1,2}, 吕新亚², 王红君², 岳有军²

(1. 天津农学院, 天津 300384; 2. 天津市复杂控制理论与应用重点实验室(天津理工大学), 天津 300384)

摘要: 针对大功率混合有源电力滤波器, 为了有效降低有源部分的容量且提高补偿性能, 首先对一种大容量混合有源滤波器进行改进。通过建立单相等效电路, 对这种拓扑结构下的两种传统的电压源控制策略进行分析, 在此基础上重点研究一种电压源复合控制策略。在分析了复合控制策略下的滤波原理后, 对滤波器谐波检测方法、滤波延时的补偿进行研究, 并设计出完整的复合控制策略电路结构。最后, 对三种控制策略分别进行了仿真实验。通过对比补偿后的系统电流波形和补偿电流的动态跟踪特性, 结果表明复合控制策略下的混合有源滤波器综合性能要优于传统电压源控制策略下混合有源滤波器性能, 具有更强的实用性。

关键词: 混合有源滤波器; 电压源控制策略; 复合控制策略; 谐波补偿; 谐波畸变率; 仿真分析

Study on control strategy based on compound control for hybrid active power filter harmonic governance

ZHAO Hui^{1,2}, LÜ Xinya², WANG Hongjun², YUE Youjun²

(1. Tianjin Agricultural University, Tianjin 300384, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Control Theory & Applications in Complicated System, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

Abstract: For high-power hybrid active power filter, in order to effectively reduce the capacity of the active part and improve the performance of compensation, a new hybrid active power filter is improved firstly. By setting up single phase equivalent circuit, two kinds of traditional voltage-source control strategies are analyzed. On this basis, the paper focuses on studying a voltage-source compound control strategy. After analyzing the filtering principle of the compound control strategy, the paper researches the method of the harmonic detection, the compensation of the filtering delay, and designs a complete circuit structure of the compound control strategy. Finally, simulation experiments are carried out on three control strategies. The compensation current of the system and dynamic tracking performance of the current waveform are compared, the result shows that comprehensive performance of hybrid active filter based on the compound control strategy is superior to the traditional voltage source control strategy with more practicality.

Key words: hybrid active power filter; voltage source control strategy; compound control strategy; harmonic compensation; total harmonic distortion; simulation analysis

中图分类号: TM714

文章编号: 1674-3415(2015)21-0060-07

0 引言

近年来, 大量非线性冲击负荷不断投入电网, 电网中高次谐波、电压闪变、电压波动、三相电压及电流不平衡、功率因数低等问题越来越严重, 电能质量问题已经超过国家规定的标准指标^[1]。随着科技的不断进步, 传统谐波和无功补偿所采用的无

源滤波器(Passive Power Filter, PPF), 由于其存在滤波特性易受电网影响等固有缺点, 逐渐被有源滤波器(Active Power Filter, APF)取代, 使谐波治理手段迈向了新的台阶^[2]。但目前有源滤波器不能大量投入使用的主要原因是由于有源滤波器的容量有限, 很难直接应用于高压大功率的场合^[3]。因此, 以无源滤波器和有源滤波器为基础的混合有源滤波器应运而生。混合有源滤波器的结构很好地兼顾了有源滤波器和无源滤波器的优点, 滤波效果更好, 综合性能更优^[4-5]。

基金项目: 天津市科技支撑计划项目(13ZCZDGX03800); 天津市自然科学基金项目(09JCZDJC23900)

为了进一步提高混合有源滤波器的性能,混合有源滤波器中有源部分的控制策略成为一个关键的问题。文献[6-7]提出将有源部分控制为电流源,即电流源控制策略。在电流源闭环控制策略下^[6],滤波器可以实现自适应调节,同时可以较好地控制系统过载。但这种控制策略的主要问题在于如要保证较好的滤波效果,增益系数 K 要远大于电压源控制策略的 K 值,使得滤波效果和稳定性、暂态特性之间的矛盾更加突出;而文献[7]提出的电流源开环控制策略很好地解决了这个问题,但该控制策略最大的问题是有源部分要承担很大的基波电压,导致有源部分容量增大,无法发挥混合有源滤波器的优势。文献[8-9]基于混合有源滤波器结构下提出了复合控制策略的思路,分析了其补偿特性和谐振抑制性能,并与传统控制策略进行了比较,但研究仅限于单相电路;文献[10]从补偿特性、系统稳定性、实际可行性等方面出发,详细分析了电压源控制策略和电流源控制策略各自的特点,得出电压源控制策略在总体性能上要优于电流源控制策略的结论,但同时也指出传统电压源控制策略的不足之处,有待于进一步改进与完善。

针对传统控制策略的不足,本文重点研究一种电压源复合控制策略。首先对大功率混合有源滤波器结构下两种传统的电压源控制策略进行了对比,总结各自的优缺点。在此基础上,详细分析了复合控制策略下混合有源滤波器的滤波特性。并对滤波器谐波检测方法、滤波延时的补偿进行了研究,设计出完整的复合控制策略电路结构。最后,对三种控制策略分别进行了仿真实验,通过对比三种控制策略下混合有源滤波器的滤波性能和补偿电流的动态跟踪特性,结果表明复合控制策略下的混合有源滤波器综合性能要优于基于传统电压源控制策略的混合有源滤波器,具有更强的实用性。

1 系统结构及工作原理

本文在文献[11]的基础上,改进一种大功率混合有源滤波器—串联谐振注入式混合有源滤波器 SRITHAPF(Series Resonant Injection Type Hybrid Active Power Filter, SRITHAPF),其结构如图1所示。通过在无源滤波器部分并联一组高通滤波器,用以滤除复杂谐波环境下含量较少的高次谐波。注入支路由电容 C_1 、电感 L_1 和电容 C_G 构成,整体作为一条无源滤波支路。

在 SRITHAPF 中,注入支路与其他无源滤波支路并联构成无源滤波器组,进而提高系统的滤波性能。无源滤波器由多条单调谐 LC 滤波支路和一组高通滤波支路并联组成,单调谐滤波支路的具体参

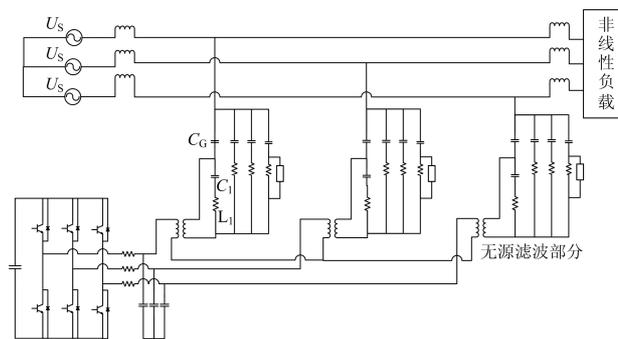


图1 SRITHAPF 系统结构图

Fig. 1 System structure of SRITHAPF

数根据实际应用出发,用来滤除负载中的主要谐波成分,同时对系统中的无功功率进行补偿。

有源滤波器通过耦合变压器与基波串联谐振支路并联。当基波电流流进注入支路时,此时的基波串联谐振支路阻抗很小,基波电流强制流入基波谐振阻抗支路,因此有源部分几乎不承担基波电流,这进一步降低了有源滤波部分的容量要求。因此相对于传统的混合有源滤波器结构而言,改进后的新型混合有源滤波器更适用于大功率工况条件下谐波治理的要求。

2 传统电压源控制策略的滤波特性分析

为有效提高混合有源滤波器的性能,本文将对混合有源滤波器的控制策略进行研究。下面将在分析系统单相等效电路的基础上,对基于电压源控制方式下的两种传统的控制策略,即检测负载测电流的控制策略、检测电网测电流的控制策略,进行比较研究。

2.1 单相等效电路分析

串联谐振注入式混合有源滤波器的单相等效电路如图2所示。谐波负载被看作一个谐波电流源 i_L , U_S 为系统电源电压, i_S 、 i_L 、 i_P 、 i_C 、 i_R 、 i_G 、 i_F 分别为电网支路电流、负载支路电流、SRITHAPF 并联无源支路电流、SRITHAPF 有源部分输出的电流、SRITHAPF 的基波串联谐振电路电流、SRITHAPF 注入支路电流、SRITHAPF 输出的补偿电流, Z_S 、 Z_P 、 Z_G 、 Z_R 分别为电网阻抗、无源支路阻抗、注入支路阻抗、基波串联谐振阻抗。

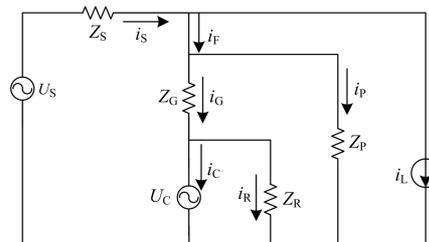


图2 SRITHAPF 的单相等效电路

Fig. 2 Single phase equivalent circuit of SRITHAPF

在电压源控制策略下, 混合有源滤波器中的有源部分被控制为一个电压源, 设为 U_C 。根据基尔霍夫电压和电流定律, 有

$$\begin{cases} i_s = i_G + i_L + i_p \\ U_s = i_s Z_s + i_G Z_G + U_C \\ U_s = i_s Z_s + i_p Z_p \end{cases} \quad (1)$$

下标 h 表示相应电压或电流的谐波分量, 当仅考虑电网中的谐波分量时, 则通过式(1), 可以解得电网侧谐波电流 i_{Sh} 与负载侧谐波电流 i_{Lh} 、电网侧谐波电压 U_{Sh} 关系为

$$i_{Sh} = \frac{(Z_{Gh} + Z_{Ph}) \cdot U_{Sh} - Z_{Ph} U_C}{Z_{Gh} Z_{Ph} + Z_{Sh} Z_{Gh} + Z_{Sh} Z_{Ph}} + \frac{Z_{Gh} Z_{Ph} \cdot i_{Lh}}{Z_{Gh} Z_{Ph} + Z_{Sh} Z_{Gh} + Z_{Sh} Z_{Ph}} \quad (2)$$

2.2 两种传统单控制策略的原理分析

2.2.1 基于检验电网侧谐波电流的控制策略

在这种控制策略下, 有源滤波器部分输出为 $U_C = K i_{Sh}$, 将 $U_C = K i_{Sh}$ 代入式(2), 可得

$$i_{Sh} = \frac{Z_{Gh} Z_{Ph}}{Z_{Gh} Z_{Ph} + Z_{Sh} Z_{Gh} + Z_{Sh} Z_{Ph} + K Z_{Ph}} \cdot i_{Lh} + \frac{Z_{Ph} + Z_{Gh}}{Z_{Sh} Z_{Ph} + Z_{Gh} Z_{Ph} + Z_{Sh} Z_{Gh} + K Z_{Ph}} \cdot U_{Sh} \quad (3)$$

通过式(3)可以看到, 当 K 足够大时, 可以保证 $i_{Sh} \approx 0$, 即电网电流中不包含谐波电流分量。因此, 这种控制策略既可以补偿负载谐波电流引起的电网侧谐波畸变, 还能补偿电网电压畸变引起的电网侧电流畸变; 另外, 由于增益系数 K 的存在, 可以有效防止谐振阻抗之间的串并联谐振, 保证滤波效果。但这种控制策略下的混合有源滤波器滤波性能过于依赖参数 K , K 越大则补偿效果越好, 但 K 取值越大同样会使滤波系统稳定性变差, 滤波效果和稳定性之间存在着矛盾, 这是该控制策略的主要不足之处。

2.2.2 基于检验电网侧谐波电流的控制策略

在这种控制策略下, 有源滤波器部分输出为 $U_C = K i_{Lh}$, 将其代入式(2), 可得

$$i_{Sh} = \frac{Z_{Gh} Z_{Ph} - K Z_{Ph}}{Z_{Gh} Z_{Ph} + Z_{Sh} Z_{Gh} + Z_{Sh} Z_{Ph}} \cdot i_{Lh} + \frac{Z_{Ph} + Z_{Gh}}{Z_{Gh} Z_{Ph} + Z_{Sh} Z_{Gh} + Z_{Sh} Z_{Ph}} \cdot U_{Sh} \quad (4)$$

与基于检验电网侧谐波电流的控制策略的滤波特性恰好相反, 这种控制策略中增益 K 对系统滤波性能的作用就非常小。只要 $Z_{Gh} = K$ 时, 就能达到良好的滤波效果, 但 Z_{Gh} 为复数, 因此在实际工程中很难实现。并且由式(4)可以看出, 由于分母中没有增益 K , 使得这种控制策略不能有效防止电网谐波

阻抗与滤波器阻抗之间的串并联谐振, 这是该种控制策略的主要不足之处。

3 新型电压源复合控制策略的研究

3.1 电压源复合控制策略的原理分析

根据对两种传统的电压源控制策略各自优缺点的分析的基础上, 本文重点研究一种电压源复合控制策略, 即 $U_C = K_S i_{Sh} + K_L i_{Lh}$ 。其中 K_S 、 K_L 分别为两种传统的电压源控制策略的增益系数, 两个系数之间并无关联, 是相互独立的。因此, 可以对两个系数分别设置。将 U_C 代入式(2), 可得:

$$i_{Sh} = \frac{(Z_{Gh} - K_L) Z_{Ph}}{Z_{Gh} Z_{Ph} + Z_{Sh} Z_{Gh} + Z_{Sh} Z_{Ph} + K_S Z_{Ph}} \cdot i_{Lh} + \frac{Z_{Ph} + Z_{Gh}}{Z_{Sh} Z_{Ph} + Z_{Gh} Z_{Ph} + Z_{Sh} Z_{Gh} + K_S Z_{Ph}} \cdot U_{Sh} \quad (5)$$

分析式(5), 由于 K_S 和 K_L 可以独立设置, 因此在设计参数时, 应依据分子足够小, 整体足够小的原则。式中可以看出, 有源滤波器的作用相当于在电网侧增加一个阻抗, 减小了滤波支路的阻抗。上半部分中, 将 K_L 设计成为 $|Z_{Gh}|$, K_S 只要取很小的值, 就能保证分母的值远大于分子, 因而使电网中几乎不含负载谐波电流引起的电网侧谐波畸变电流; 同样的原理, 下半部分中, 电网侧增加了阻抗 $K_S Z_{Ph}$, 使得滤波支路阻抗 $Z_{Ph} + Z_{Gh}$ 相对减小。因此, K_S 不必取很大的值, 就保证电网中几乎不含电网电压畸变引起的电网侧电流畸变。并且由于增益系数 K_S 的存在, 可以有效防止谐振阻抗之间的串并联谐振, 保证滤波效果。

综上分析, 电压源复合控制策略理论上继承了两种传统电压源控制策略的优点, 并很好地弥补了各自的缺点。既保证了滤波器的谐波补偿能力, 也保证了滤波装置的稳定性, 是较为理想的控制方法, 相对与两种传统的电压源控制策略而言, 其综合性能更好。

3.2 电压源复合控制策略的电路分析

大容量混合有源滤波器 SRITHAPF 的控制电路主要包括谐波检测电路模块、指令电流计算模块以及脉宽调制(PWM)跟踪控制电路模块。

3.2.1 基于检验电网侧谐波电流的控制策略

谐波检测是谐波抑制中的关键技术, 工业上广泛采用基于瞬时无功功率理论的谐波检测方法^[2]。目前, 在复杂工况条件下谐波检测运用较好的是 i_p - i_q 法和 d - q 法, 这两种方法都适用于电网电压畸变和不对称情况, 实时性好, 可检测基波电流有功分量、无功分量和谐波分量^[12]。相比较而言, d - q

法的检测电路更加简单, 因此实时性更好, 利于数字化电路的实现, 更适用于 APF 对谐波的动态检测, 因此本文选择 $d-q$ 谐波检测法作为 SRITHAPF 的谐波检测方法。

3.2.2 控制延时的补偿

根据前面的分析, 电压源复合控制策略具有较好的性能, 但由于复合控制策略的引入, 使得系统中存在较多的数字信号处理器模块, 例如电流互感器、A/D 采样、逆变器等。这些数字化控制器在滤波的每一个环节均不可避免的产生延时^[13], 随着补偿次数的升高, 系统延时也将越来越大, 严重影响 APF 的谐波治理的实时性。

因此, 本文采用一种延时预估补偿的方法^[14], 即在完成 APF 各模块硬件设计后, 对各模块的延时进

行统计, 根据文献[14]的统计方法, 复合控制策略下有源滤波器一个周期内的时间延时约为 120~140 μs 。统计出 APF 在 n 次谐波下各环节产生的延时 t_d 后, 通过公式 $\Delta\theta=2\pi fnt_d$ 得到延时相位角。因此, 在谐波检测环节注入正弦信号之前, 将正弦信号预先减去延时偏角 $\Delta\theta$, 即正弦输入信号 $\sin(\omega t)$ 变为 $\sin(\omega t-\Delta\theta)$, 从而得到经相位补偿后的控制信号。

3.2.3 SRITHAPF 的复合控制策略电路

根据前面的分析, 本文采用基于瞬时无功功率理论的 $d-q$ 法, 并对混合有源滤波器控制电路进行了延时补偿。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。根据文献[7,15]的设计方式, 新型混合有源滤波器的复合控制策略结构电路框图如图 3 所示。

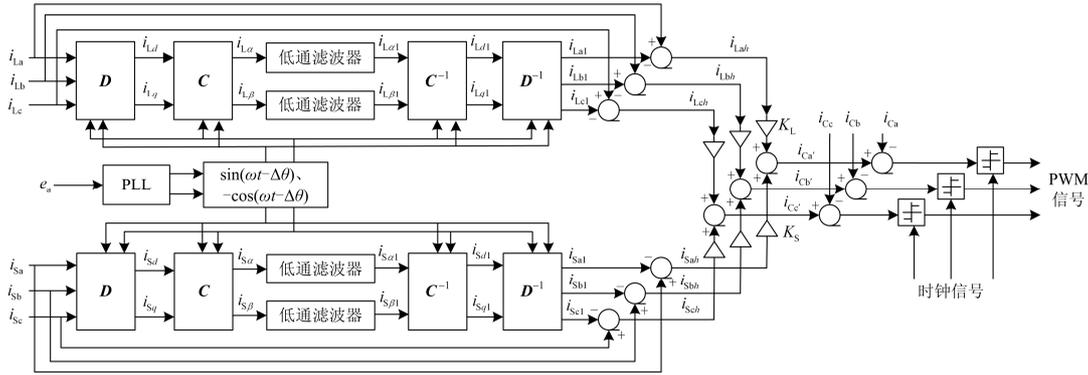


图 3 新型电压源复合控制流程框图

Fig. 3 Novel voltage source compound control flow chart

从图中可以看出, 复合控制策略由两个单控制策略组成, 上下部分共用一个锁相环电路。 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, $i_{Ca'}$ 、 $i_{Cb'}$ 、 $i_{Cc'}$ 、 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。其余过程和参数都是按照 $d-q$ 检测法逐步推出。图中转换矩阵 D 、 C 分别为

$$D = \begin{bmatrix} -\sin \omega t & -\sin\left(\omega t - \frac{2}{3}t\right) & -\sin\left(\omega t + \frac{2}{3}t\right) \\ \cos \omega t & \cos\left(\omega t - \frac{2}{3}t\right) & \cos\left(\omega t + \frac{2}{3}t\right) \end{bmatrix}$$

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

因此具体仿真中, 在控制框图中设置合理的 K_S 和 K_L 参数值即可。

4 仿真研究与分析

为了进一步验证电压源复合控制策略下的新型

混合有源滤波器的综合性能, 根据上述混合有源滤波器的结构和工作原理, 本文利用 Matlab/Simulink 软件进行了整体的仿真, 图 1 中 SRITHAPF 的无源滤波器由基波谐振支路, 5 次、7 次单调谐滤波支路以及高通滤波器之路组成, 具体的参数如表 1 所示。新型混合有源滤波器的系统仿真模型如图 4 所示。其中三相电压设为 380 V, 频率为 50 Hz, 电网等效电阻 $R=0.013 \Omega$, $L=7.7 \text{ mH}$; 电网谐波源是具有代表性的直流侧带感性负载的不可控二极管整流桥, 这类负载的特点是产生的谐波含量大, 应用较为广泛。本文设定负载电阻为 5 Ω , 负载电感为 2.5 mH。

表 1 无源滤波器参数

Table 1 Passive filter parameters

滤波器	电感 L/mH	电容 $C/\mu\text{F}$
5 次单调谐滤波器	17	24.226
7 次单调谐滤波器	14	14.164
基波谐振支路	276	36
高通滤波支路	5.354	11.681

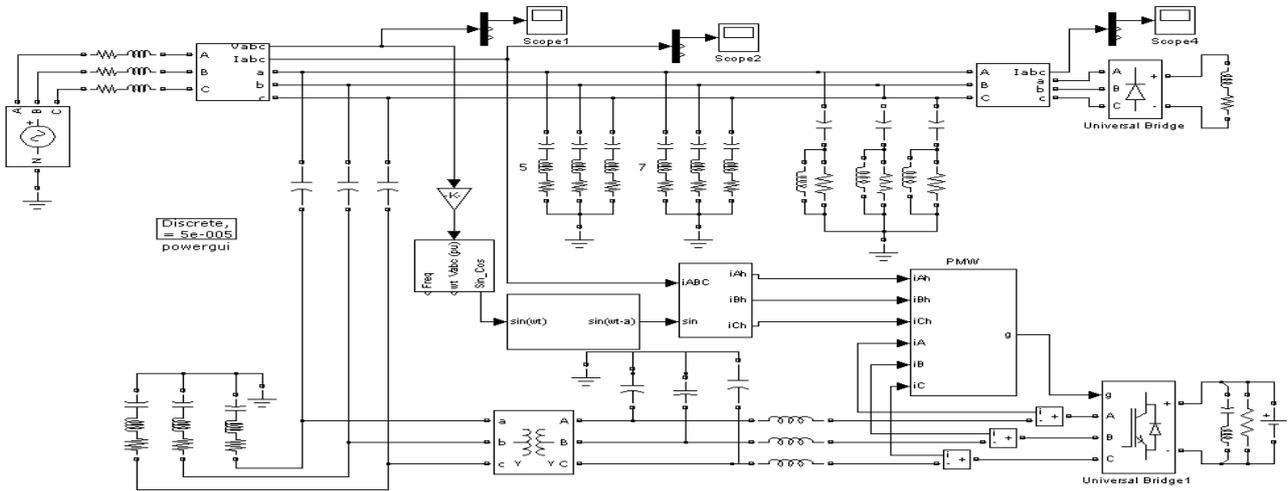


图 4 系统整体仿真模型

Fig. 4 Overall system simulation model

4.1 滤波性能比较分析

通过调整检测电流的输入，可以实现 3 种控制策略的检验。图 5 为无滤波器投入时电网侧 a 相的电流波形，电网电流畸变很严重。图 6 为仅投入无源滤波器组时电网侧电流波形。此时，使用 FFT 功能模块分别检测电网电流的谐波畸变率(THD)，无滤波器投入时 a 相电流畸变率达到了 22.31%，仅投入无源滤波器组时电网 a 相电流的畸变率为 7.86%，谐波畸变率明显降低，但没有达到理想效果。

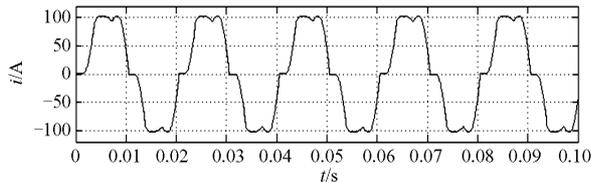


图 5 不投入滤波器时的电网侧 a 相电流

Fig. 5 Phase a current in grid side without filter inputting

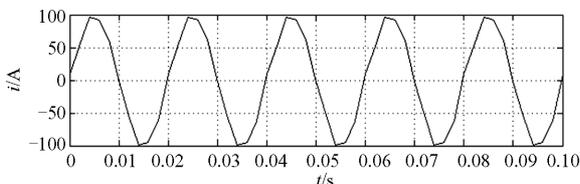


图 6 仅投入无源滤波器组时的电网侧 a 相电流

Fig. 6 Phase a current in grid side with only passive filter group inputting

电网中并入 SRITHAPF 结构，首先验证采用基于检测电网侧谐波电流 i_{sh} 的闭环控制策略和基于检测负载侧谐波电流 i_{Lh} 的开环控制策略下的混合有源滤波器的谐波治理效果。

图 7 为 K 的变化对滤波器性能的影响^[16]，当 K

值从 0 变为 5 时，滤波器性能有一个明显的提升。当 K 从 5 逐渐增大时，滤波效果并没有的变化。根据前面的分析，增益系数 K 值越大，滤波系统稳定性越差。因此，采用闭环控制策略时，本文选取 $K_S=5$ ；采用开环控制策略时，由于要保证 $K_L=Z_{Gh}$ ，才能达到良好的谐波补偿效果，因此不能确定 K_L 的具体值，本文选取 $K_L=2$ ，来保证开环控制策略的实现。图 8、图 9 分别为采用传统控制策略时电网侧 a 相电流波形。通过 FFT 功能模块检测，电网侧电流控制策略下的电网侧 a 相电流畸变率为 3.45%，负载侧电流控制策略下的电网侧 a 相电流畸变率为 4.78%。

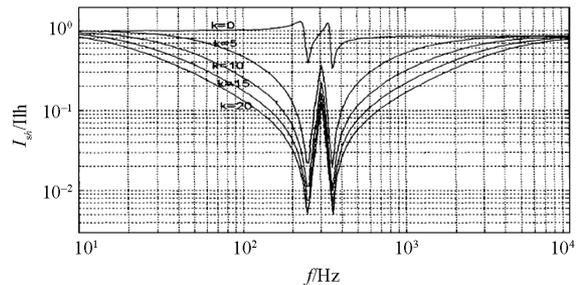


图 7 K 的变化对滤波器性能的影响

Fig. 7 Influence of K on the performance of the filter

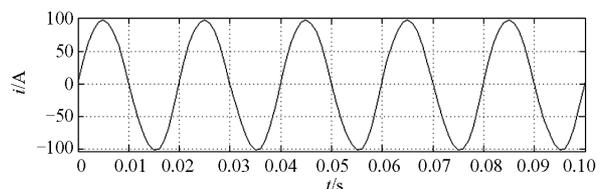


图 8 闭环控制策略下的电网侧 a 相电流

Fig. 8 Phase a current in grid side under closed-loop control strategy

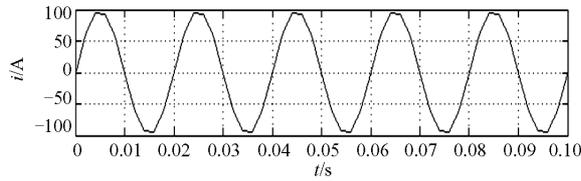


图 9 开环控制策略下的电网侧 a 相电流

Fig. 9 Phase a current in grid side under open-loop control strategy

最后, 有源部分控制策略选用电压源复合控制策略, 即 $K_S=5$, $K_L=2$ 。图 10 为复合控制策略下电网侧 a 相电流波形。此时, 通过 FFT 功能模块检测, 电网侧 a 相电流畸变率为 2.67%, 滤波后的电网 a 相电流基本接近正弦波。

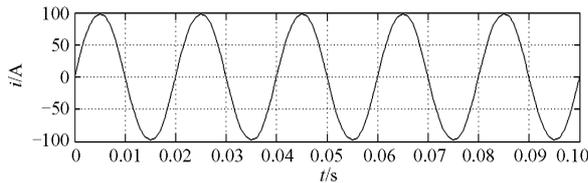


图 10 复合控制策略下的电网侧 a 相电流

Fig. 10 Phase a current in grid side under compound control strategy

4.2 动态跟踪特性比较分析

通过对比不同控制策略下滤波器滤波后的 a 相电网电流波形及谐波畸变率(THD), 充分表现了电压源复合控制策略的优越性。本节通过不同控制策略下混合有源滤波器的补偿电流特性曲线的对比, 进一步验证 3 种控制策略的补偿电流动态跟踪特性。

图 11 至图 13 分别为基于开环控制策略、闭环控制策略和复合控制策略下混合有源滤波器输出补偿电流与谐波检测环节输出补偿电流波形的对比图。3 幅图中混合有源滤波器输出补偿电流与谐波检测环节输出补偿电流波形的主要差异区域已做标记。通过观察图中标记的位置, 开环控制策略下滤波器输出补偿电流与谐波检测环节输出补偿电流波形在标记的 7 个区域内都有明显的差异, 尤其在第 2、4 标记区域最为明显, 两组电流的最大幅值差可达 10 A, 拟合程度较差。闭环控制策略下滤波器输出补偿电流与谐波检测环节输出补偿电流波形的拟合程度有了明显的提高, 但在第 1、3、5、7 四个区域仍存在一定的差异。复合控制策略下的混合有源滤波器输出补偿电流与谐波检测环节输出补偿电流波形的拟合度最好, 除了第 7 标记区域存在一定的差异外, 其他区域波形基本接近重合, 取得了理想的补偿效果。

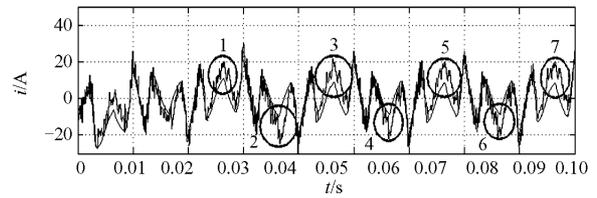


图 11 开环控制策略下的滤波器输出补偿电流波形

Fig. 11 Offset current waveform of filter under open-loop control strategy

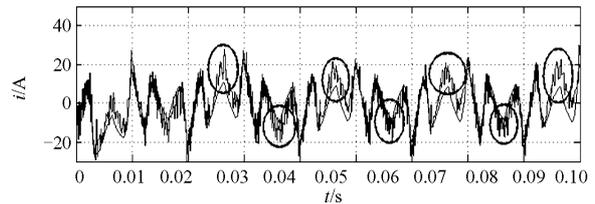


图 12 闭环控制策略下的滤波器输出补偿电流波形

Fig. 12 Offset current waveform of filter under close-loop control strategy

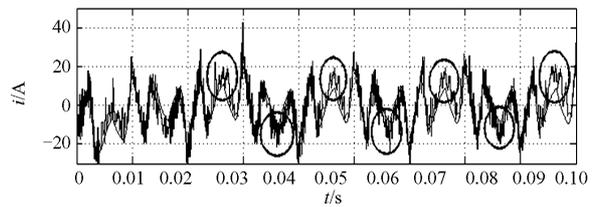


图 13 复合控制策略下的滤波器输出补偿电流波形

Fig. 13 Offset current waveform of filter under compound control strategy

5 结论

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影响, 并且在滤波性能上要优于单独使用无源滤波器组, 可以有效地防止谐波阻抗之间的串并联谐振, 保证滤波系统的稳定性。

通过分别对比 3 种控制策略下混合有源滤波器的滤波性能和补偿电流的动态跟踪特性, 复合控制策略的综合性能要明显优于两种传统控制策略。因此, 在实际工程应用中, 只需要根据实际需要, 设置相应的 K_S 、 K_L 的参数值, 就能够实现理想的谐波治理效果。

参考文献

- [1] ASIMINOAEI L, RODRIGUEZ P, BLAABJERG F. Application of discontinuous pwm modulation in active power filter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(4): 1692-1706.

- [2] 江全才, 马骁旭, 李红刚. 新型三相三线制模糊滑模控制并联有源滤波器设计[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(7): 128-133.
WANG Quancai, MA Xiaoxu, LI Honggang. Novel fuzzy sliding mode control method for three-phase three-wire shunt active power filter[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(7): 128-133.
- [3] 徐永海, 刘书铭, 朱永强, 等. 并联型有源滤波器的补偿策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(8): 71-74.
XU Yonghai, LIU Shuming, ZHU Yongqiang, et al. Research of shunt active power filter compensation strategy[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(8): 71-74.
- [4] SHUAI Zhikang, LUO An, ZHU Wenji, et al. Study on a novel hybrid active power filter applied to a high-voltage grid[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(4): 2344-2352.
- [5] 牟龙华, 张大伟, 周伟. 基于并联谐振的新型混合有源滤波器研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 162-166.
MU Longhua, ZHANG Dawei, ZHOU Wei. Research on a novel hybrid active power filter based on shunt resonance[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(18): 162-166.
- [6] 郑建勇, 张榆, 丁祖军. 并联电感型混合有源滤波器及其控制策略[J]. 电网技术, 2010, 34(1): 90-97.
ZHENG Jianyong, ZHANG Yu, DING Zujun. The parallel inductance type hybrid active power filter and its control strategy[J]. Power System Technology, 2010, 34(1): 90-97.
- [7] 丁祖军, 郑建勇, 胡敏强, 等. 新型混合式电力滤波装置电流源控制策略[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(3): 74-77.
DING Zujun, ZHENG Jianyong, HU Minqiang, et al. Current source control strategy of hybrid power filter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(3): 74-77.
- [8] 江智军, 林娜, 黄太阳. 单相并联混合有源电力滤波器控制策略的研究[J]. 电测与仪表, 2007, 44(7): 15-19.
JIANG Zhilun, LIN Na, HUANG Taiyang. Research on single-phase shunt hybrid active power filter control strategy[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2007, 44(7): 15-19.
- [9] ZHANG Shuquan, DAI Ke, YU Haiyang, et al. Current compound control strategy for single-phase shunt active power filter[C] // Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), Chendu, March, 2010: 1-4.
- [10] 舒明雷. 混合有源滤波器控制策略研究[D]. 济南: 山东大学, 2006.
SHU Minglei. Research on the control strategy of hybrid active power filter[D]. Jinan: Shandong University, 2006.
- [11] 汪玉凤, 王宝秋, 赵瑞, 等. 串联谐振注入式混合有源滤波器的研究[J]. 电力电子技术, 2012, 46(6): 42-44.
WANG Yufeng, WANG Baoqiu, ZHAO Rui, et al. Research on series resonant injection type hybrid active power filter[J]. Power Electronic Technology, 2012, 46(6): 42-44.
- [12] 张君, 刘磊. 电力系统中两大谐波检测法的比较分析[J]. 甘肃科技, 2010, 26(15): 49-50.
ZHANG Jun, LIU Lei. Comparative analysis of two harmonic detection methods in power system[J]. Gansu Science and Technology, 2010, 26(15): 49-50.
- [13] 肖红霞, 范瑞祥. 有源电力滤波器时延分析[J]. 电气传动, 2006, 36(10): 33-36.
XIAO Hongxia, FAN Ruixiang. Analysis of active power filter delay[J]. Electric Drive, 2006, 36(10): 33-36.
- [14] 赵玉林, 李鹤, 隋涛. 混合滤波器时延对谐波补偿的影响及改进措施[J]. 东北农业大学学报, 2014, 45(5): 116-121.
ZHAO Yulin, LI He, SUI Tao. Hybrid active filter delay effect on harmonic compensation and improvement measures[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2014, 45(5): 113-121.
- [15] 杨晓利, 葛宝明, 姜新建. 并联型多重化三相四线有源电力滤波器综合控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(23): 103-108.
YANG Xiaoli, GE Baoming, JIANG Xinjian. Integrated control strategy of three-phase four-wire shunt active power filter using multiple converters[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(23): 103-108.
- [16] 宋平. 并联型混合有源电力滤波器的研究[D]. 济南: 山东大学, 2005.
SONG Ping. Research on the parallel hybrid active power filter[D]. Jinan: Shandong University, 2005.

收稿日期: 2015-02-15; 修回日期: 2015-07-10

作者简介:

赵辉(1963-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为故障诊断与容错控制, 电力电子技术与微机控制、智能控制; E-mail: Zhaohui3379@126.com

吕新亚(1990-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为冶金炉的谐波治理及无功补偿; E-mail: 756364798@qq.com

王红君(1963-), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为流程工业先进控制、微机控制、智能控制。

(编辑 姜新丽)