

作原理可得到系统的电流闭环控制框图,如图 2 所示。图中 G_{con} 为控制器, e^{-sT_1} 为数据计算等引起的延时, $K_{\text{inv}} e^{-sT_2}$ 为逆变器的传递函数, G_{inv} 为控制电流 $I_c(s)$ 对逆变器输出电压 $U_{\text{inv}}(s)$ 的传递函数。

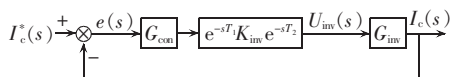


图 2 系统的电流闭环控制框图

Fig.2 Block diagram of current closed-loop control

图 3 为注入式混合型有源滤波器在谐波域时的单相等效电路,图中 u_{inv} 为受控电压源,用来等效逆变电路。由于电流闭环控制主要分析 i_c 跟踪参考信号 i_c^* 的性能,而且谐波源 i_{th} 和电网谐波电压 u_{sh} 对被控电流 i_c 的影响非常小,所以分析时只考虑逆变电路输出电压 u_{inv} 的作用。

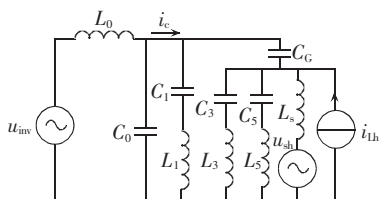


图 3 谐波域时系统的单相等效电路

Fig.3 Single-phase equivalent circuit in harmonic frequency domain

根据图 3 可以求得:

$$G_{\text{inv}} = \frac{I_c(s)}{U_{\text{inv}}(s)} = \frac{Z_{C0}}{Z_{L0}Z_{C0} + Z_{L0}Z_P + Z_{C0}Z_P} \quad (1)$$

$$Z_{C0} = 1/(sC_0), \quad Z_{L0} = sL_0$$

$$Z_P = [Z_1 Z_s Z_5 Z_3 + Z_G Z_s Z_5 Z_1 + (Z_s + Z_5) Z_G Z_3 Z_1] / [Z_s Z_5 Z_3 + Z_G Z_s Z_5 + (Z_s + Z_5) Z_G Z_3 + Z_s Z_5 Z_1 + (Z_s + Z_5) Z_3 Z_1]$$

2 滞环控制与双谐振积分控制

滞环控制的基本原理是以补偿电流的参考值 i_c^* 为基准设计一个滞环带,当实际的补偿电流 i_c 欲离开这一滞环带时,逆变器开关动作,从而保证 i_c 始终保持在滞环带内,并围绕 i_c^* 上下波动,该方式相当于在求取开关模式时引入了 Bang-Bang 控制,如图 4 所示(S 为开关信号)。显然,系统开关频率、响应速度及电流跟踪精度均受滞环带影响。当滞环带窄时,响应速度快、精度高,但开关频率也较高,导致开关损耗增加,对开关器件的要求也提高,而且该算法的开关频率随输入信号变化,给输出滤波器的参数设计带来困难。

由于滞环控制器总是要存在环宽误差时才会工作,所以系统的稳态误差是不可能消除的。而且,由于环宽是固定的,因此导致主电路中功率开关器件的开关频率是变化的,开关谐波也难以被滤除。尤其是当 i_c 变化范围较大时,一方面,在 i_c 值较小时,固定的环宽可能使补偿电流的跟踪误差过大;另一方面,

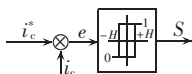


图 4 滞环控制的原理图

Fig.4 Principle of hysteretic control

在 i_c 值较大时,固定的环宽又可能使器件开关频率过高,甚至超出器件允许的最高工作频率而导致器件损坏。

在控制器的作用下,要使得被控对象的输出能够无差地跟踪给定信号,控制器就必须包含积分环节。但常规积分器只能保证参考信号为直流信号时系统无稳态误差;当参考信号为周期信号时,常规积分器将不能消除稳态误差。文献[13]利用分频控制的思想提出了广义积分控制算法,实现了系统无差控制,但必须为所需补偿的各次谐波分别提供一个广义积分控制器,因而加大了计算量,增大了系统延时,影响到系统稳定性。在此,在同步坐标系下选用双谐振积分控制器同时实现 2 次谐波的补偿。

针对 n 次谐波补偿的控制器 $G_{\text{con}}(s)$ 在同步旋转坐标系下和静止坐标系下存在以下关系[14-15]:

$$G_{\text{con,sta}}(s)|_n = \frac{1}{2} [G_{\text{con,rot}}(s + jn\omega)|_n - G_{\text{con,rot}}(s - jn\omega)|_n] \quad (2)$$

又设针对 h 次谐波补偿的控制器 $G_{\text{con}}(s)$ 在同步旋转坐标系下为

$$G_{\text{con,rot}}(s)|_h = K_{ih} s / [s^2 + (h\omega)^2] \quad (3)$$

将式(3)代入式(2),得静止坐标系下的控制器:

$$G_{\text{con,sta}}(s)|_n = \frac{K_{ih} s [s^2 + (n^2 + h^2)\omega^2]}{s^4 + 2(n^2 + h^2)\omega^2 s^2 + [(n^2 - h^2)\omega^2]^2} \quad (4)$$

设在静止坐标系下 2 个谐振积分控制器分别调谐于 $(n-h)\omega$ 和 $(n+h)\omega$, 即

$$G_{\text{con,sta}}(s)|_{(n+h)} = \frac{K_{i(n+h)} s}{s^2 + [(n+h)\omega]^2} \quad (5)$$

$$G_{\text{con,sta}}(s)|_{(n-h)} = \frac{K_{i(n-h)} s}{s^2 + [(n-h)\omega]^2}$$

如果 $K_{i(n+h)} = K_{i(n-h)} = K_{ih}/2$, 那么在静止坐标系下,式(5)中 2 个谐振积分控制器同时作用的效果就为

$$G_{\text{con,sta}}(s)|_{(n+h),(n-h)} = G_{\text{con,sta}}(s)|_{(n+h)} + G_{\text{con,sta}}(s)|_{(n-h)} = \frac{K_{ih} s [s^2 + (n^2 + h^2)\omega^2]}{s^4 + 2(n^2 + h^2)\omega^2 s^2 + [(n^2 - h^2)\omega^2]^2} \quad (6)$$

从式(4)和式(6)可知,同步旋转坐标系下针对 h 次谐波补偿的控制器 $G_{\text{con}}(s)$,如式(3)所示,就等效于静止坐标系下分别调谐于 $(n-h)\omega$ 和 $(n+h)\omega$ 的 2 个谐振积分控制器,如式(5)所示。因此,所提供的双谐振积分控制器不仅能实现系统无差控制,而且实时性也得到提高,但较之滞环控制的瞬时值比较控制方式而言,响应速度仍相对较慢。

3 复合型滞环控制算法

传统滞环控制算法具有控制率简单、系统响应快的优点,但缺乏系统稳态无差情况下的等效控制,属于有差调节;而在双谐振积分控制算法的作用下,注入式混合型有源滤波器虽然能实现更小的电流跟踪误差,但响应速度又相对较慢。为克服这些不足,现将双谐振积分控制算法引入到传统滞环控制算法中,作为一种等效控制来改变滞环控制的控制律,使控制器不仅只在跟踪误差大于环宽时工作,当跟踪误差小于环宽时启用双谐振积分控制算法。该控制思想通过环宽的设置,决定了等效控制的投入条件,使

得系统在电流跟踪误差较大时滞环控制占主导,误差减小速度较快,在误差减小到一定范围内时双谐振积分控制占主导,实现稳态无差。这种策略既克服了滞环控制有差调节、开关谐波难以滤除等不足,也避免了双谐振积分控制稳态到达时间长的缺点,实现了这 2 种控制算法的有机结合。

复合型滞环控制律为

$$S_a(k) = \begin{cases} 0 & e_a(k) > H \\ 1 & e_a(k) < -H \\ p(u_{eqa}(k)) & |e_a(k)| \leq H \end{cases} \quad (7)$$

$$S_b(k) = \begin{cases} 0 & e_b(k) > H \\ 1 & e_b(k) < -H \\ p(u_{eqb}(k)) & |e_b(k)| \leq H \end{cases} \quad (8)$$

$$S_c(k) = \begin{cases} 0 & e_c(k) > H \\ 1 & e_c(k) < -H \\ p(u_{eqc}(k)) & |e_c(k)| \leq H \end{cases} \quad (9)$$

式中 $p(u_{eq}(k))$ 为 $u_{eq}(k)$ 对应的开关状态, $u_{eq}(k)$ 由双谐振积分控制算法确定。

从以上控制律可知,环宽 H 越大,系统的响应速度越慢,当环宽 H 等于误差的最大值时,复合型滞环控制就相当于双谐振积分控制;环宽 H 越小,功率器件的开关频率越高,有可能超出功率器件的极限值,极限情况环宽 H 等于零时,复合型滞环控制就相当于环宽为零的传统滞环控制。

根据复合型滞环控制的控制律,可以得到系统控制框图,如图 5 所示。

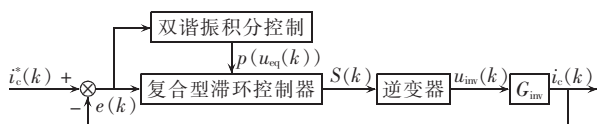


图 5 注入式混合型有源滤波器的控制原理图

Fig.5 Control principle of injection-type hybrid APF

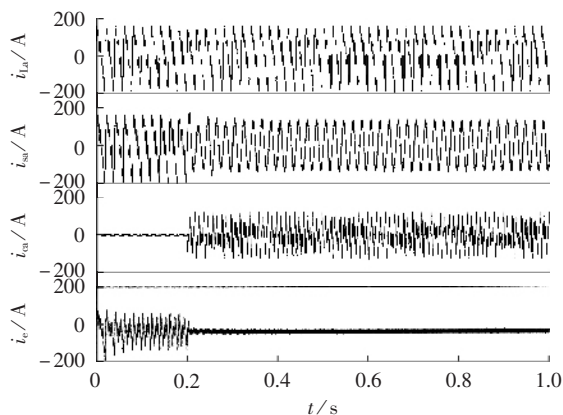
4 仿真分析

为验证复合型滞环控制算法在跟踪速度、控制精度和高频毛刺含量 3 个方面的优点,对传统滞环控制算法、单一的双谐振积分控制算法和复合型滞环控制算法进行了比较研究。

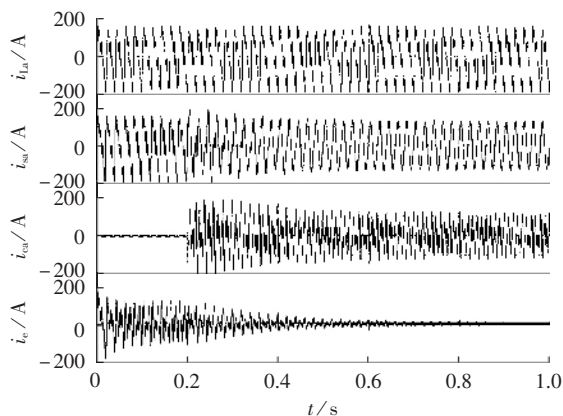
仿真中,逆变器直流侧电压为 600 V,输出滤波器的电感和电容分别为 0.5 mH 和 120 μ F,电网参数和无源滤波器参数均取自文献[9]。在双谐振积分控制和复合型滞环控制中,积分系数为 K_I 为 0.1,开关模式都采用三角波调制方法获取,三角波幅值为 $-10 \sim +10$ A,频率为 10 kHz。在传统滞环控制和复合型滞环控制中环宽设为 10 A。因为该注入式混合型有源滤波器所提供的无功功率较大,如果无源滤波器和有源滤波器同时投入,电网中较大的无功电流变化将会对无源滤波器产生很大的冲击作用,所以在仿真中,系统分两级投入,无源滤波器首先投入电网,而有源滤波器则于 0.2 s 时刻投入。

4.1 跟踪速度的比较

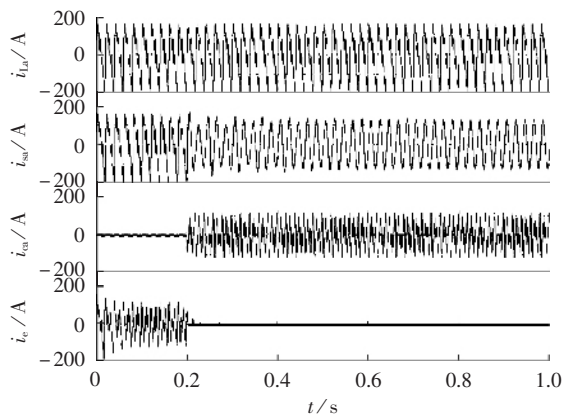
图 6 给出了 0~1 s 时段内,单相负载电流 i_{la} 、电网电流 i_{sa} 、逆变器输出电流 i_{ca} 以及 i_{ca} 对参考电流



(a) 传统滞环控制作用下的波形



(b) 双谐振积分控制作用下的波形



(c) 复合型滞环控制作用下的波形

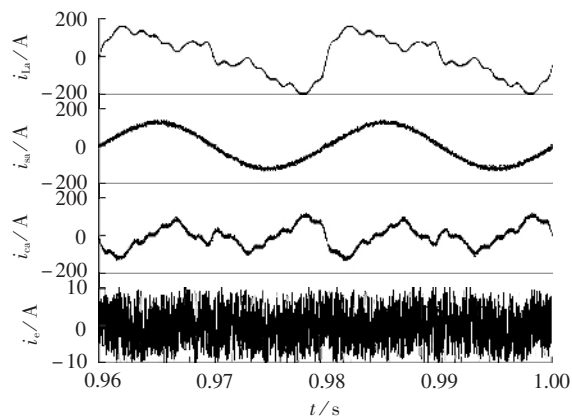
图 6 0~1 s 时段的电流对比波形

Fig.6 Waveform comparisons from 0 s to 1 s

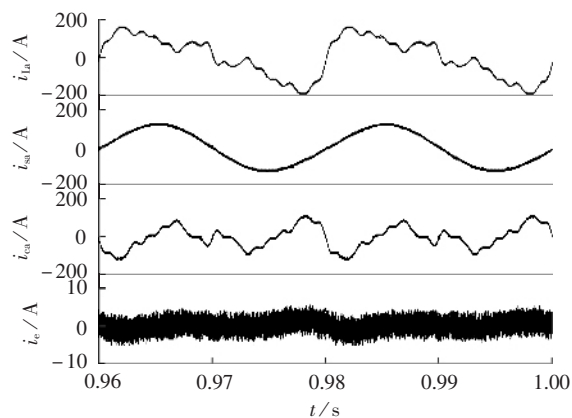
跟踪误差 i_e 的波形。从图中可以看出,3 种控制算法都能达到较好的控制效果,这说明注入式混合型有源滤波器投入后能够使 i_{sa} 的波形非常接近于正弦波。从 i_e 的波形可知,传统滞环控制和复合型滞环控制都能使电流跟踪误差迅速减小到一个很小范围,而双谐振积分控制器则相对需要较长的时间。由此可以得到结论:传统滞环控制和复合型滞环控制的跟踪速度快,而双谐振积分控制达到一定控制精度的时间较长。

4.2 控制精度的比较

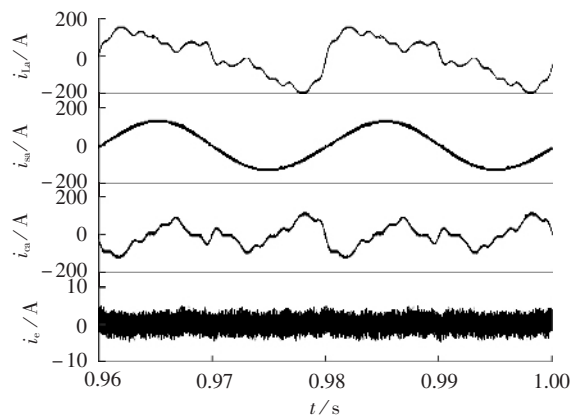
图 7 给出了 0.96~1 s 时段内各控制算法作用下的电流对比波形。从图中可以看出,复合型滞环控制的控制效果最好。而在传统滞环控制作用下,滤波效



(a) 传统滞环控制作用下的波形



(b) 双谐振积分控制作用下的波形



(c) 复合型滞环控制作用下的波形

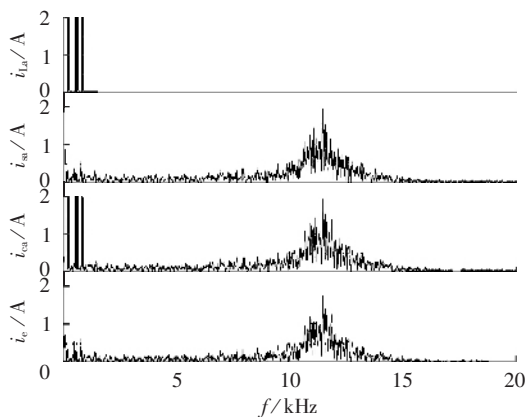
图 7 0.96~1 s 时段的电流对比波形

Fig.7 Waveform comparisons from 0.96 s to 1 s

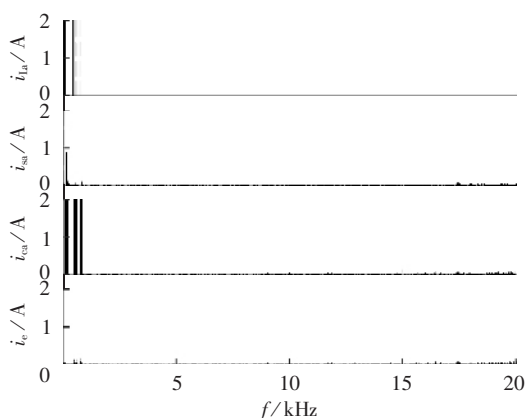
果相对较差。双谐振积分控制器作用时的跟踪误差接近复合型滞环控制作用时的跟踪误差,这是因为系统尚未完全达到稳定状态,大约在 2 s 时才能使系统稳定,此时双谐振积分控制和复合型滞环控制的作用相似。由此可以得出结论:双谐振积分控制和复合型滞环控制的控制精度优于传统滞环控制。

4.3 高频毛刺含量的比较

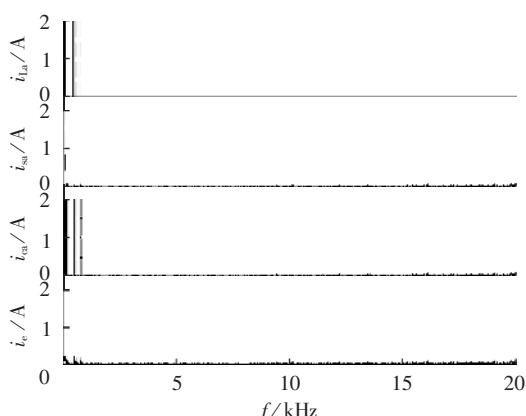
图 8 给出了各控制算法作用下的频谱对比图。从图 8(a)中可以看出,在传统滞环控制器的作用下,电网电流 i_{ia} 、逆变器输出电流 i_{is} 以及 i_e 的波形中都含有大量高频开关毛刺,而且分布范围也很宽,因而难以用输出滤波器进行抑制。而从图 8(b)(c)可看出,在双谐振积分控制器和复合型滞环控制器的作用



(a) 传统滞环控制作用下的频谱



(b) 双谐振积分控制作用下的频谱



(c) 复合型滞环控制作用下的频谱

图 8 3 种控制器的频谱比较图

Fig.8 Spectrum comparisons of three controllers

下,高频开关毛刺的含量非常小。由此可以得出结论:采用传统滞环控制器时所产生的高频毛刺含量要远大于采用双谐振积分控制器和复合型滞环控制器时所产生的高频毛刺含量。

5 结论

通过对注入式混合型有源滤波器的建模,结合传统滞环控制算法响应速度快和双谐振积分控制算法无稳态误差的优点,提出了一种复合型滞环控制作为注入式混合型有源滤波器的电流跟踪控制算法。通过仿真,从跟踪速度、控制精度和高频毛刺含量 3 个方面,将新的复合型滞环控制算法与传统滞环控制算

法以及单一的双谐振积分控制算法进行了比较研究。仿真结果表明:

a. 当电流跟踪误差超过设定环宽时,系统将在较简单的滞环控制律下工作,电流跟踪误差快速减小,使系统具有良好的动态性能;

b. 当电流跟踪误差在设定环宽范围内时,引入基于双谐振积分控制算法的等效控制,实现系统控制的无稳态误差,从而使系统具有良好的稳态性能;

c. 环宽两侧的变开关频率调节与环宽内的固定开关频率调节的组合方式,使得逆变器高频开关毛刺比较容易抑制,将显著降低电网电流中的开关谐波。

参考文献:

- [1] IEEE Industry Application Society, IEEE Power Engineering Society. IEEE Std 519-1992 IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power system[S]. [S.I.]: IEEE, 1993.
- [2] FUJITA H, YAMASAKI T, AKAGI H. A hybrid active filter for damping of harmonic resonance in industrial power systems[J]. IEEE Trans Power Electron, 2000, 15(2): 215-222.
- [3] CHOU Chih-ju, LIU Chih-wen, LEE June-yown, et al. Optimal planning of large passive-harmonic-filters set at high voltage level[J]. IEEE Trans Power System, 2000, 15(1): 433-441.
- [4] WANG Z A, WANG Q, YAO W Z, et al. A series active power filter adopting hybrid control approach[J]. IEEE Trans Power Electron, 2001, 16(3): 613-620.
- [5] MARKS J H, GREEN T C. Predictive transient-following control of shunt and series active power filters[J]. IEEE Trans Power Electron, 2002, 17(4): 574-584.
- [6] DAS J C. Passive filters-potentialities and limitations[J]. IEEE Trans Ind Applicat, 2004, 40(1): 232-241.
- [7] 徐永海, 肖湘宁, 刘昊, 等. 混合型有源电力滤波器与并联电容器组联合补偿技术研究[J]. 电工技术学报, 2005, 20(1): 112-117. XU Yong-hai, XIAO Xiang-ning, LIU Hao, et al. Shunt hybrid filter for harmonic suppression and reactive power compensation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(1): 112-117.
- [8] 李圣清, 朱英浩, 周有庆, 等. 并联型有源电力滤波器对电动机和电容

- 器谐波源补偿特性的研究[J]. 电工技术学报, 2005, 20(2): 93-97. LI Sheng-qing, ZHU Ying-hao, ZHOU You-qing, et al. Research on compensation characteristics of shunt active power filter to motor and capacitor harmonic sources[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(2): 93-97.
- [9] 唐欣, 罗安, 涂春鸣. 新型注入式混合型有源滤波器的研究[J]. 电工技术学报, 2004, 19(11): 50-55, 60. TANG Xin, LUO An, TU Chun-ming. Study of new injection type hybrid active power filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(11): 50-55, 60.
- [10] 马永健, 徐政, 沈沉. 有源电力滤波器的闭环控制算法研究[J]. 电工技术学报, 2006, 21(2): 73-78. MA Yong-jian, XU Zheng, SHEN Chen. Studies of closed-loop control strategy of active power filters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(2): 73-78.
- [11] 王兆安, 黄俊. 电力电子技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [12] 赵振波, 李和明, 董淑惠. 采用电流滞环调节器的电压矢量控制 PWM 整流器系统[J]. 电工技术学报, 2004, 19(1): 31-34, 43. ZHAO Zhen-bo, LI He-ming, DONG Shu-hui. Voltage vector-controlled PWM rectifier system with current hysteresis regulators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(1): 31-34, 43.
- [13] YUAN X, MERK W, STEMMLER H. Stationary-frame generalized integrators for current control of active power filter with zero steady-state error for current harmonics of concern under unbalanced and distorted operating conditions[J]. IEEE Trans Ind Applicat, 2002, 38(2): 523-532.
- [14] ZMOOD D N, HOLMES D G, BODE G H. Frequency-domain analysis of three-phase linear current regulators[J]. IEEE Trans Ind Applicat, 2001, 37(2): 601-610.
- [15] ZMOOD D N, HOLMES D G. Stationary frame current regulation of PWM inverters with zero steady-state error[J]. IEEE Trans Power Electron, 2003, 18(3): 814-822.

(责任编辑: 李育燕)

作者简介:

唐 杰(1975-), 男, 湖南武冈人, 博士研究生, 研究方向为电力系统谐波抑制和无功功率补偿(E-mail: Tang_jie4952@yahoo.com.cn);

罗 安(1957-), 男, 湖南长沙人, 教授, 博士生导师, 研究方向为高电能质量输配电技术。

Synthesized hysteretic control of injection-type hybrid APF

TANG Jie^{1,2}, LUO An², TANG Ci², YANG Xiao²

(1. Department of Information and Electrical, Shaoyang University, Shaoyang 422000, China;

2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Taking the injection-type hybrid APF (Active Power Filter) as an example, a synthesized hysteretic control method for current tracking is proposed by establishing its mathematical model, which combines the fast hysteretic control with the zero-static-error double harmonic integrator control. The double harmonic integrator is used as an equivalent control to improve the control rules of traditional hysteretic control. When current tracking error is bigger, the hysteretic control prevails to quickly decrease it. When the error is reduced to a certain range, the double harmonic integrator control prevails to eliminate the static error. The synthesized hysteretic control, traditional hysteretic control and double harmonic integrator control are simulated and the simulative results are compared in tracking speed, control precision and high frequency burr amount, which shows the proposed control has perfect dynamic and static performance with less high frequency burrs.

This project is supported by the National Natural Science Foundation of China (60474041) and the National High Technology Research and Development of China 863 Program (2004AA001032).

Key words: injection type; hybrid; active power filter; mathematical model; hysteretic control; double harmonic integrator