

文章编号: 1001-1609(2007)06-0419-04

注入式混合有源滤波器的复合变结构控制

罗邵屏^{1,2}, 罗安², 周柯²

(1. 邵阳学院信息与电气工程系, 湖南 邵阳 422000; 2. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

Compound Variable Structure Control of Injection Type Hybrid Active Power Filter

LUO Shao-ping^{1,2}, LUO An², ZHOU Ke²

(1. Shaoyang University, Shaoyang 422000, China; 2. Hunan University, Changsha 410082, China)

摘要: 通过对一种注入式混合有源滤波器建立数学模型, 结合传统滑模变结构控制算法快速性好和递推积分 PI 控制算法无稳态误差的优点, 提出一种新的复合变结构控制算法作为有源滤波器的电流控制方法。通过仿真, 从算法的跟踪速度和控制精度两个方面, 将新的复合变结构控制算法与传统滑模变结构控制算法以及单一的递推积分 PI 控制算法进行了比较分析。实验结果也证明了该算法的正确性和有效性。
关键词: 有源滤波器; 电流跟踪控制; 递推积分 PI; 变结构中图分类号: TM714 文献标志码: A

Abstract: This paper proposed a new compound variable structure control method, through modeling a new injection type hybrid active power filter, and combining with the merits of traditional sliding mode variable structure control and recursive integral PI control. With the new control method's simulation results, this paper compared the new control method with traditional sliding mode variable structure control method and single recursive integral PI control method in two aspects, tracking-speed and control-precision. Experiment results verify its validity of the proposed algorithm.

Key words: active power filter; current tracking control; recursive integral PI; variable structure

0 引言

随着电力电子设备的大量应用, 各种非线性负载引起的电流波形畸变对电网造成了污染。为了解决电网谐波污染问题, 以电流谐波抽取和注入为原理的有源滤波器获得了广泛应用^[1-4]。

有源滤波器能否按其工作原理实现预期的谐波治理效果, 除系统电路设计合理外, 在很大程度上还依赖于电流跟踪控制方法的优劣。滑模变结构控制算法具有控制率简单、系统响应迅速等优点^[5-7], 但该控制方法属有差调节, 不能实现被控量对给定量的无差跟踪。包含积分环节的控制器能够使系统输出

无差的跟踪给定信号, 但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^[8]。

笔者通过对注入式混合有源滤波器^[4]建立数学模型, 并结合传统滑模变结构控制算法控制率简单、快速性好以及递推积分 PI 控制算法稳态无误差^[8,9]的优点, 引入递推积分 PI 控制算法的控制量作为离散滑模变结构控制器的等效控制, 将两种控制方法有机结合, 提出了一种新的复合变结构控制算法作为有源滤波器的电流控制方法。通过仿真, 从算法的跟踪速度和控制精度两个方面, 将新的复合变结构控制方法与传统滑模变结构控制方法及单一的递推积分 PI 控制方法进行了比较分析。实验结果也充分证明了该算法的有效性。

1 注入式混合有源滤波器的建模

为满足某大型变电站高电压、大容量谐波抑制并兼具一定容量无功静补能力的工程要求, 文[4]提出了一种注入式混合有源滤波器, 并对其拓扑结构和工作原理做了详尽分析, 见图 1。

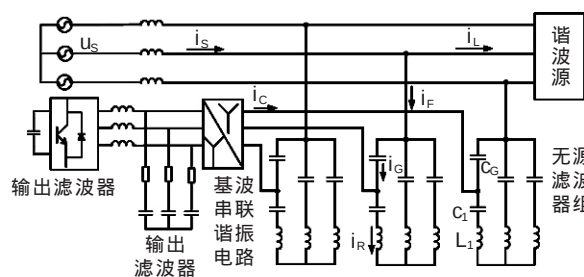


图 1 注入式混合有源滤波器的拓扑结构

由图 1 的拓扑结构和文[7]介绍的工作原理得到该系统的电流闭环控制框图, 见图 2。图 2 中的 G_{cn} 为控制器的传递函数; e^{-ST_1} 为计算处理引起的时延, $K_{inv}e^{-ST_2}$ 为逆变器的传递函数; G_{inv} 为控制电

收稿日期: 2007-05-13; 修回日期: 2007-07-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60474041); 国家 863 计划项目(2004AA001032)。

作者简介: 罗邵屏(1965-), 女, 硕士研究生, 主要从事电力系统谐波抑制及无功功率补偿等方面的研究。

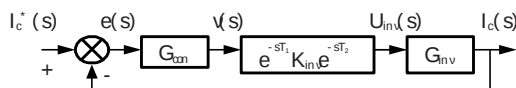


图2 系统的电流闭环控制框图

流 $I_c(s)$ 对逆变器输出电压 $U_{inv}(s)$ 的传递函数。

图3为注入式混合有源滤波器在谐波域的单相等效电路,图中的 u_{inv} 为受控电压源,用来等效逆变电路。因为电流闭环控制主要分析 i_c 跟踪参考信号 i_c^* 的性能,而且由于负载谐波 i_{Lh} 和电网谐波 u_{gh} 对被控电流 i_c 的影响非常小,所以在分析 i_c 时只考虑逆变电路输出电压 u_{inv} 的作用。根据图3可以求得

$$G_{inv} = \frac{I_c(s)}{U_{inv}(s)} = \frac{Z_c}{Z_L Z_c + Z_L Z_p + Z_c Z_p} \quad (1)$$

式(1)中 $Z_c = \frac{1}{sC_0}$; $Z_L = sL_0$;

$$Z_p = \frac{Z_1 Z_3 Z_5 + Z_1 Z_5 Z_6 + (Z_5 + Z_6) Z_4 Z_3 Z_6}{Z_3 Z_5 Z_6 + Z_5 Z_6 Z_5 + (Z_5 + Z_6) Z_3 Z_6 + Z_4 Z_5 Z_6 (Z_5 + Z_6) Z_1 Z_3}$$

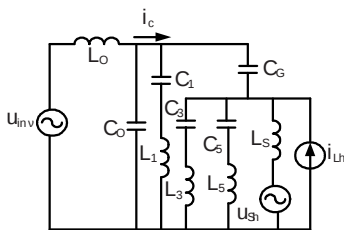


图3 谐波域系统的单相等效电路

在没有进行校正设计之前,控制器一般当成一个比例环节,即 $G_{tm} = K_p$ 。根据图2可以求得电流跟踪闭环传递函数为

$$G(s) = \frac{I_c^*(s)}{I_c(s)} = \frac{K e^{-sT_3} G_{inv}}{1 + K e^{-sT_3} G_{inv}} \quad (2)$$

式(2)中 T_3 为 T_1 与 T_2 之和; K 为 K_p 与 K_{inv} 之积。

2 传统滑模变结构控制与递推积分PI控制

传统滑模变结构控制器通过判别电流跟踪误差在切换曲面两侧中的哪一侧,直接选取相应的开关模式,具有控制率简单、系统响应迅速等优点。但正因为控制器只在切换曲面两侧变化,控制率中只定义了误差不为0的情况,所以只有当电流跟踪误差不为0时控制器才被激活。系统的稳态响应表现为有源滤波器的输出电流围绕其参考信号抖振,因此该方法实际上相当于环宽为0的滞环控制,属于有差调节,不能实现被控量对给定参考信号的无差跟踪。

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^[8,9]。因此,笔者采用递推积分PI控制算法来降低注入式混合有源滤波器的稳态误差,系统的闭环

控制框图见图4。设被控对象和逆变器串联后的传递函数为 $G_o(s)$ 。若在50Hz及其整数倍频率处,系统输出量 $I_c(s)$ 的幅值和相位能够完全等于参考信号 $I_c^*(s)$,就说明递推积分PI控制算法能够实现对系统的无差控制。由图4可得到系统的闭环传递函数^[9]为

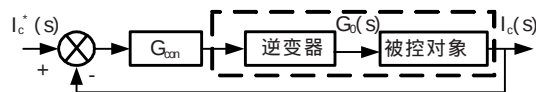


图4 系统的电流闭环控制框图

$$G(s) = \frac{I_c^*(s)}{I_c(s)} = \frac{[K_p(1 - e^{-sNT}) + K_I] G_o(s)}{1 - e^{-sNT} + [K_p(1 - e^{-sNT}) + K_I] G_o(s)} \quad (3)$$

系统的频率特性方程为

$$G(s) = \frac{1}{\frac{1 - \cos \omega NT + j \sin \omega NT}{[K_p(1 - \cos \omega NT + j \sin \omega NT) + K_I] G_o(s)} + 1} \quad (4)$$

式(3)、(4)中 T 为采样间隔, $NT = 20 \text{ ms}$, 说明控制器包含了被控量的周期信息。从而可以得到

$$G(jn \cdot 2\pi \cdot f) = 1 \quad (5)$$

式中 f 为电网工频, n 为 $0, 1, 2, \dots$ 。

式(5)说明在电网工频及其整数倍频率处,闭环系统的幅值等于1,相位移等于0。也就是说,递推积分PI控制算法可以保证系统输出电流对参考电流的跟踪误差将随着时间的推移而趋近于0,但要获得无稳态误差的代价是响应速度较慢。

3 复合变结构控制算法

传统滑模变结构控制方法控制率简单,系统响应快,但缺乏系统稳态无差情况下的等效控制,属于有差调节。而在递推积分PI控制算法的作用下,注入式混合有源滤波器虽然能够实现更小的电流跟踪误差,但响应速度相对较慢。为了克服这些不足,笔者应用递推积分PI控制算法来求取等效控制 $u_{\alpha}^0(k)$,能够保证周期量系统无稳态周期误差。从某种意义上说,在离散滑模变结构控制中加入了递推积分PI控制算法后,相当于控制器的结构除了在切换边带两侧变化以外又增加了第3种变化。见图5。笔者将递推积分PI控制算法的输出作为滑模变结构控制的等效控制,从而使得注入式混合有源滤波器兼具较快的响应速度和较小的稳态误差。

如图6所示,复合变结构控制算法通过设置切

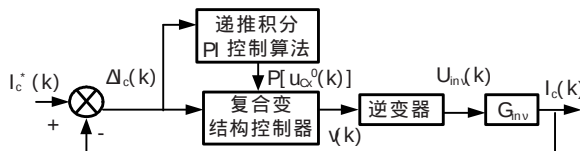


图5 注入式混合有源滤波器的控制原理图

换边带 $-e$ 和 e ,使得控制器拥有在切换边带两侧($\Delta i_c > e$ 和 $\Delta i_c < -e$)和切换边带之内($\Delta i_c \leq |e|$)的三重变化。在切换边带两侧由传统滑模变结构控制率起作用;而在切换边带之内则由递推积分PI控制算法的等效控制起作用。在电流跟踪误差 Δi_c 较大时传统滑模变结构控制占主导, Δi_c 减小速度较快,而在 Δi_c 减小到一定范围内时递推积分PI控制占主导,进一步减小电流跟踪误差 Δi_c 。从而使得注入式混合有源滤波器兼具较快的响应速度和较小的稳态误差。

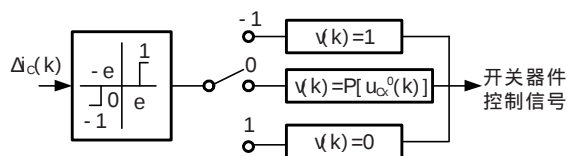


图6 复合变结构控制框图

复合变结构控制率为

$$v(k) = \begin{cases} 0 & \Delta i_c(k) > e \\ 1 & \Delta i_c(k) < -e \\ P[u_{\alpha}^0(k)] & |\Delta i_c(k)| \leq e \end{cases} \quad (6)$$

4 仿真研究及实验结果

为验证复合变结构控制算法的有效性与可行性,笔者将该方法应用到注入式混合有源滤波器系统中进行了仿真与实验,并从跟踪速度和控制精度两个方面出发,与传统滑模变结构控制以及单一的递推积分PI控制进行了比较。

逆变器直流侧电压为600V,输出滤波器的电感和电容分别为0.5mH和120μF,电网参数和无源参数均取自文[7]。在递推积分PI控制算法和复合变结构控制算法中,比例系数 K_p 为5,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-100~+100,频率为10kHz。在传统滑模变结构控制算法和复合变结构控制算法中边带设为10A。在仿真过程中,注入式混合有源滤波器分两级投入,无源滤波器在开始时刻就投入电网,而有源滤波器于0.21s时投入,避免电网中较大的无功电流变化对有源滤波器产生的冲击。

4.1 跟踪速度分析

图7给出了在0.21~0.29s时段内,单相负载电流 i_{La} 、电网电流 i_{sa} 和对参考电流的跟踪误差Error的波形。从图中可看出,3种控制器都能达到较好的控制效果,这说明注入式混合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Error的波形可知,复合变结构控制器能使电流跟踪误差迅速减小到一个很小范围,而递推积分PI控制器则需要相对较长的时间。由此可以得到结论:复合变结构控制器的跟踪速度快,而递推积分PI控制器达到一定控制精度需要的时间较长。

4.2 控制精度分析

图8给出了0.52~0.6s时段内系统稳定运行时各控制器作用下的电流波形对比及频谱示意图。从图中可以看出,复合变结构控制器的控制效果最

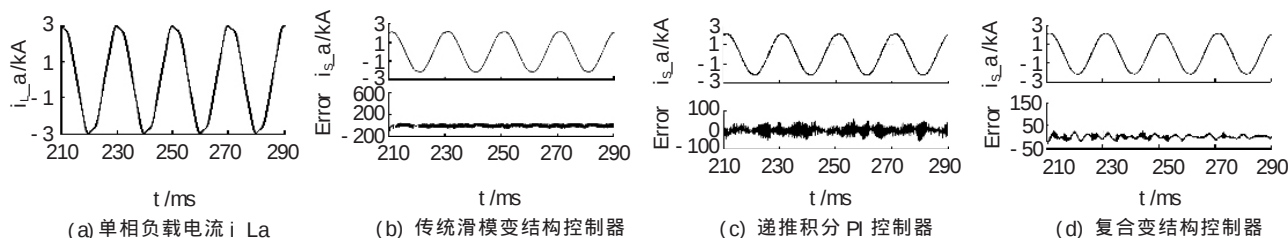
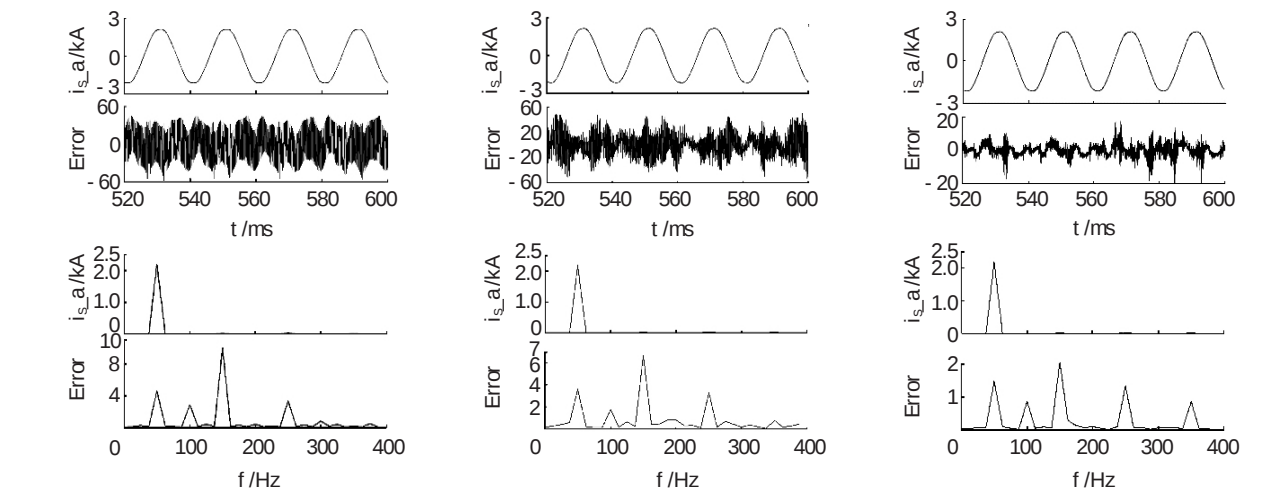


图7 0.21~0.29s时段的电流波形对比



(a) 传统滑模变结构控制器作用下的波形和频谱

(b) 递推积分PI控制器作用下的波形和频谱

(c) 复合变结构控制器作用下的波形和频谱

图8 0.52~0.6s时段的电流对比波形

好, 各次谐波电流的跟踪误差均在 2 A 以下, 滤波后电网谐波含量最小。而在传统滑模变结构控制器作用下, 各次谐波电流的跟踪误差是复合变结构控制器作用时的 3 倍以上, 滤波效果相对较差。递推积分 PI 控制器作用时的跟踪误差接近传统滑模变结构控制器作用时的跟踪误差, 这是因为递推积分 PI 控制器尚未使系统完全达到稳定状态, 大约在 1 s 左右才能使系统稳定。由此可以得出结论: 复合变结构

控制器的控制精度优于其它两种控制器。

4.3 实验结果

图 9 给出了在复合变结构控制算法作用下, 注入式混合有源滤波装置在实验室的运行情况。实验参数为: 电网线电压为 110 V, 谐波源为 10 kV·A 三相整流桥带阻感负载。从滤波器投入前后的电流波形可以看出复合变结构控制算法的正确性和滤波装置滤波效果的明显性。

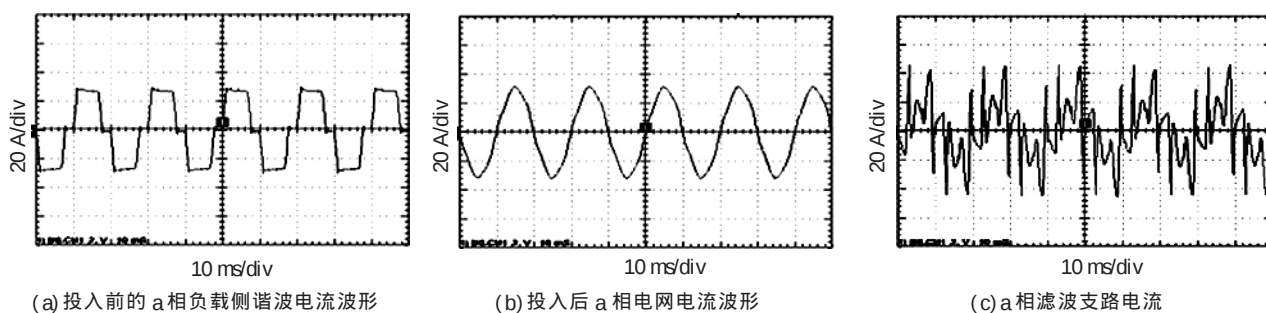


图 9 实验中单相各支路的电流波形

5 结语

通过对注入式混合有源滤波器建立数学模型, 结合传统滑模变结构控制算法快速性好和递推积分 PI 控制算法无稳态误差的优点, 提出了一种新的复合变结构电流控制算法。通过仿真, 从跟踪速度和控制精度两个方面, 将新的控制方法与传统滑模变结构控制及单一的递推积分 PI 控制进行了比较分析, 结果表明提出的复合变结构控制算法在新型注入式混合有源滤波器的跟踪速度和补偿精度方面都有较好的效果。实验结果也充分证明了该算法的正确性和有效性。

参考文献:

- [1] 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.
- [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.

- [3] 钱挺, 吕征宇, 胡进. 基于单周控制的有源滤波器双环控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(3): 34-37.
- [4] 唐欣, 罗安, 涂春鸣. 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, 60.
- [5] 睢刚, 徐治皋. 一种基于变结构的预测控制算法及其应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(7): 10-13, 18.
- [6] 宋立忠, 陈少昌, 姚琼荃. 自适应离散变结构控制及其在电力系统中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(12): 97-100.
- [7] 罗庆跃, 李晓明. 变结构模型短路电流计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(1): 77-80.
- [8] YUAN X, MERK W, STEMLER 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, 2002, 38(2): 523-532.
- [9] 唐欣, 罗安, 涂春鸣. 一种电力有源滤波器电流控制的新方法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(13): 31-34.

(上接第 418 页)

- [3] 罗学琛. SF₆ 气体绝缘全封闭组合电器 (GIS) [M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.
- [4] XU Xiao-bang, LIU Guang-hao, CHOW Peter. A Finite Element Method Solution of the Zero-sequence Impedance of Underground Pipe-type Cable [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2002, 17(1): 13-17.
- [5] BRUCE C W, FRED E VERMEULEN. Power Losses in Steel Pipe Delivering Very Large Currents[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2002, 17(1): 25-32.
- [6] 谢德馨. 三维涡流场的有限元方法 [M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [7] 李琳. 电力变压器三维漏磁场及铁心拉板涡流损耗的计算[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(6): 33-36.
- [8] 盛剑霓. 工程电磁场数值分析 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1991.

- [9] 王仲奕, 董军心, 顾沈卉. 箔式电抗器电磁分析及降低功耗的研究[J]. 高压电器, 2005, 41(3): 173-175.
- [10] 刘诗俊. 变分法、有限元法和外推法 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1986.
- [11] 李大潜. 有限元法 [M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- [12] 钱伟长. 变分法及有限元 [M]. 北京: 科学出版社, 1980.
- [13] 雷照银. 关于电磁场数值分析的若干认识[J]. 电工技术学报, 1997, 12(6): 32-34.
- [14] 上海市电器技术协会. 常用电工材料手册 [K]. 上海: 上海科学技术出版社, 1985.
- [15] 冯慈章. 电磁场 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1991.
- [16] KRIEZEIS E E, STVROS M PANAS. Eddy Current [J]. Theory and Applications Proceedings of the IEEE, 1992, 80(10): 1559-1581.