

串联谐振注入式有源电力滤波器复合控制算法^①

汪玉凤, 许晓禹, 王 静

(辽宁工程技术大学 电气与控制工程学院, 葫芦岛 125105)

摘 要: 传统滞环电流控制开关频率不固定, 输出频谱范围宽, 滤波较困难, 以串联谐振注入式混合有源电力滤波器(SRIHAPF)为例, 在传统滞环控制的基础上加以改进, 并结合比例谐振积分控制算法, 提出一种复合控制算法作为该滤波器的电流跟踪控制算法. 避免了传统滞环控制开关频率不固定和比例谐振积分达到系统稳定延时长的缺点. 该算法准确性高, 跟踪效果好, 运用 Matlab 进行了仿真和实验验证. 仿真和实验结果证明, 该复合控制算法能够提高滤波器的电流跟踪性能和谐波补偿效果.

关键词: 有源电力滤波器; 滞环控制; 比例谐振积分; 谐波抑制

Compound Control of Hybrid Active Power Filter with Series Resonance Injection

WANG Yu-Feng, XU Xiao-Yu, WANG Jing

(Faculty of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)

Abstract: The traditional hysteresis current control switch frequency is not fixed, wide range of output spectrum, filter more difficult, based on active power filter with series resonance injection (SRIHAPF). In the traditional hysteresis control, and on the basis of introducing proportion integral control algorithm resonance, this paper puts forward a compound control algorithm as the filter of the current tracking control algorithm. To avoid the traditional hysteresis control switch frequency is not fixed and proportion integral achieve system stable resonance delay long weakness. The proposed algorithm has high accuracy and good tracking performance. The simulation and experimental results prove that the compound control algorithm can improve the current tracking performance of the filter and harmonic compensation effect.

Key words: hybrid active power filter; hysteresis control; proportion resonance integral; harmonic control

1 引言

随着电力电子技术的飞速发展, 各种非线性负载的使用使得电网谐波增加, 有源电力滤波器因其具有较强的谐波和电流补偿能力而被广泛应用^[1]. 电流跟踪控制算法很大程度上决定了有源滤波器的谐波抑制效果. 传统滞环控制具有精度高, 响应速度快, 但是开关频率不固定, 这给电流滞环控制型逆变器的滤波器设计带来了很大难度^[2]. 比例谐振控制器能使系统输出无差地跟踪给定信号, 但常规积分器只能消除直流参考信号的稳态误差, 对交流参考信号的效果不理想^[3]. 本文以一种串联谐振注入式混合有源电力滤波器(SRIHAPF)为例, 在滞环控制上加以改进, 并将改

进后的算法与比例谐振积分控制算法结合, 提出了一种复合控制算法, 以该算法作为一种等效控制算法对此滤波器进行电流跟踪控制, 进行了仿真和实验, 验证了复合控制算法的有效性和可行性.

2 SRIHAPF的拓扑结构

逆变器直流端为电容作为直流电压源, 充电后作为直流电压源 U_{dc} ; 有源滤波器输出端接有由 L_0 和 C_0 组成的输出滤波器, 用来滤除开关器件通断造成的高频毛刺. 有源部分通过耦合变压器的电气隔离能够承受基波电压和基波电流. 通过控制有源部分的逆变器的输出, 就可以使非线性负载产生的谐波电流完全的

^① 收稿时间:2012-06-08;收到修改稿时间:2012-08-15

流入滤波器所补偿. 整体拓扑结构如图 1 所示. 图中 i_s 、 i_L 、 i_F 分别为电网电流、负载电流和无源滤波电流,

i_c 为有源部分输出的谐波补偿电流^[4].

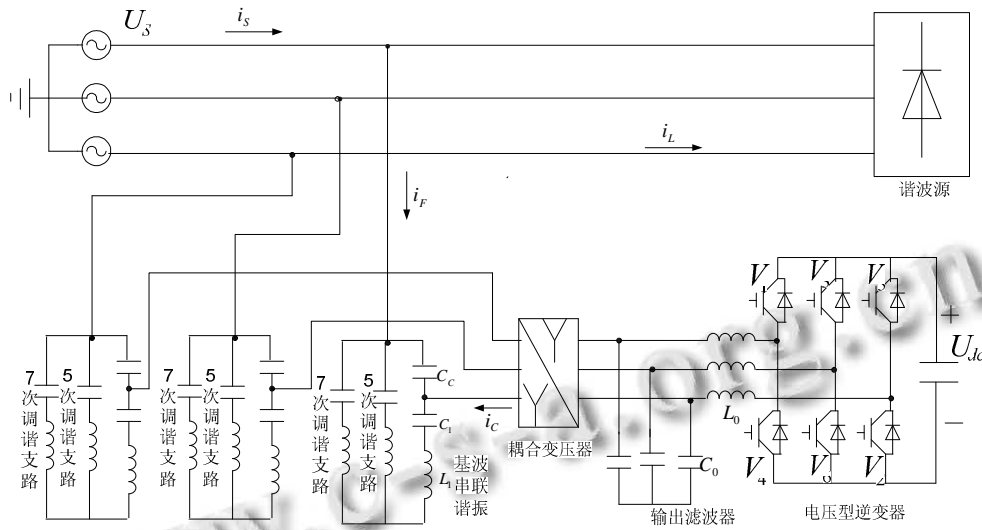


图 1 SRIHAPF 的拓扑结构

2 滞环控制与比例谐振积分控制

2.1 传统滞环控制算法

滞环电流控制原理如图 2 所示, 将检测环节所得的电流参考信号 i_c^* 与控制器实际输出的电流信号 i_c 相比较, 可得出误差信号 Δi , 滞环比较单元对此误差信号进行判定, 输出脉冲信号来控制开关器件的通断, 进而实现 i_c 对 i_c^* 的跟踪, 达到滞环控制的目的.

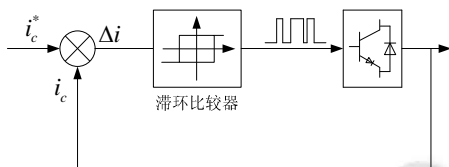


图 2 滞环控制原理图

用 H 表示滞环比较器的环宽, 当 $|i_c^* - i_c| < H$ 时, 滞环比较器的输出保持不变, 当 $|i_c^* - i_c| > H$ 时, 滞环比较器的输出 PWM 驱动信号将翻转, 迫使 i_c 在 $i_c^* - H$ 和 $i_c^* + H$ 之间的范围内呈锯齿波状的跟随变化, 如图 3 所示.

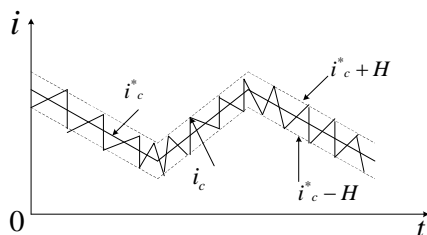


图 3 滞环控制方法原理图

2.2 改进后滞环控制算法

有源电力滤波器的补偿电流是由变流器输出电压 $K_a(n)U_{dc}$ 、 $K_b(n)U_{dc}$ 和 $K_c(n)U_{dc}$ 与串联支路的分压 u_a, u_b, u_c 共同作用在滤波电感上产生的:

$$\frac{di_{cx}}{dt} = \frac{1}{L} [K_x(n)U_{dc} - u_x] \quad (1)$$

$$\frac{di_{cx}^*}{dt} = \frac{1}{L} [u_{cx}^* - u_x] \quad (2)$$

式中, i_{cx}^* 为 x 相 ($x = a, b$ 或 c) 的指令电流; u_{cx}^* 为与 i_{cx}^* 相应的指令电压.

u_{cx}^* 不仅与 $\frac{di_{cx}^*}{dt}$ 有关, 而且与注入端串联支路

分压的瞬时值 u_x 有关, 所以提出在变流器的输出指令电压中引入一个与注入端瞬时电压成正比的量, 即为滞环控制方法的改进方案. 如式(3)所示. 改进后的原理图如图 4 所示.

$$\Delta i'_{cx} = \Delta i_{cx} + K u_x \quad (3)$$

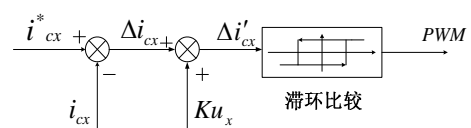


图 4 改进的滞环控制方法的原理图

改进的滞环控制方法是通过在输出指令电压中增

加一个与注入端电压瞬时值成正比的量, 抵消了其输出电压的干扰作用. 其中 K 与滤波电感量有关, 适当选取 K 值可以提高变流器输出电压的准确性, 使有源电力滤波器实际输出电流精确地跟踪指令电流的变化, 输出电流的误差明显缩小.

2.3 比例谐振积分控制算法

根据图 1 的拓扑结构和原理可得系统的电流闭环控制框图 5, 图中 G_C 为控制器, $e^{-sT_1} K_{inv} e^{-sT_2}$ 为电压型脉宽调制逆变器的传递函数, G_i 为控制电流 $i_c(s)$ 对逆变器输出电压 $U_i(s)$ 的传递函数.

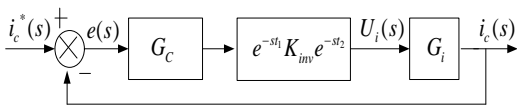


图 5 系统电流闭环控制框图

当参考信号为具有某一频率 ω_n 的周期信号 $A_n \sin(\omega_n t + \varphi_n)$ 时, 谐振积分控制器传递函数为:

$$G_n(s) = \frac{2s}{s^2 + \omega_n^2} \quad (4)$$

$\Delta i_c(s)$ 的谐振积分满足:

$$U(s) = i_c(s) \sum_{n=1}^{\infty} G_n(s) = \Delta i_c(s) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2s}{s^2 + (n\omega_1)^2} \quad (5)$$

比例谐振积分控制率为^[5],

$$U_p(s) = \Delta i_c(s) \times (K_p + \sum_{n=1}^H \frac{2K_n s}{s^2 + (n\omega_1)^2}) \quad (6)$$

式中, K_p 为比例常数, K_n 为 n 次谐波的积分常数.

3 复合型控制算法

改进后的滞环控制优点是控制简单而且精度高, 响应速度快, 可以实时控制^[6], 但开关频率不固定容易造成高频控制; 单纯将比例谐振积分控制算法应用于滤波器响应速度相对较慢. 为此将比例谐振积分算法引入改进后滞环控制算法中, 将两种控制算法有效结合起来, 作为一种等效控制来改变滞环控制的控制律, 电流跟踪控制器实现框图如图 6.

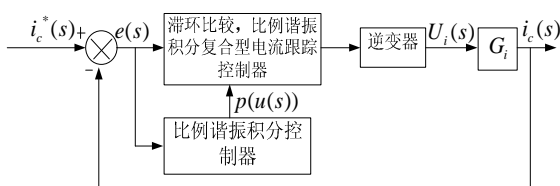


图 6 复合电流跟踪控制器实现框图

复合型控制算法控制率为:

$$u_a(k) = \begin{cases} 0, \Delta i_{sa}(k) > \Delta \\ 1, \Delta i_{sa}(k) < -\Delta \\ ueq_a(k), |\Delta i_{sa}(k)| < \Delta \end{cases} \quad (7)$$

$$u_b(k) = \begin{cases} 0, \Delta i_{sb}(k) > \Delta \\ 1, \Delta i_{sb}(k) < -\Delta \\ ueq_b(k), |\Delta i_{sb}(k)| < \Delta \end{cases}$$

$$u_c(k) = \begin{cases} 0, \Delta i_{sc}(k) > \Delta \\ 1, \Delta i_{sc}(k) < -\Delta \\ ueq_c(k), |\Delta i_{sc}(k)| < \Delta \end{cases}$$

式中, Δ 为误差连带宽度, 其大小根据实际应用情况而定, 如谐波含量、开关上限频率、治理指标等.

$ueq_a(k)$, $ueq_b(k)$, $ueq_c(k)$ 为三相开关对应状态. 当电流的跟踪误差大于环宽时启用滞环控制算法, 误差减小到范围 Δ 内时启用比例谐振积分控制. 滞环控制为有差调节, 比例谐振积分控制算法达到稳态时间较长, 复合控制算法避免了这两者的缺点, 实现了两种算法的有效结合.

4 仿真分析

为了比较传统滞环控制算法和融入比例谐振积分控制算法后复合型控制算法的有效性, 运用 Matlab 平台进行了仿真, 滞环控制和比例谐振积分复合控制算法内部仿真模型如图 7 所示.

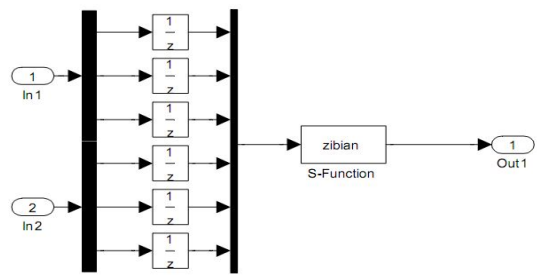
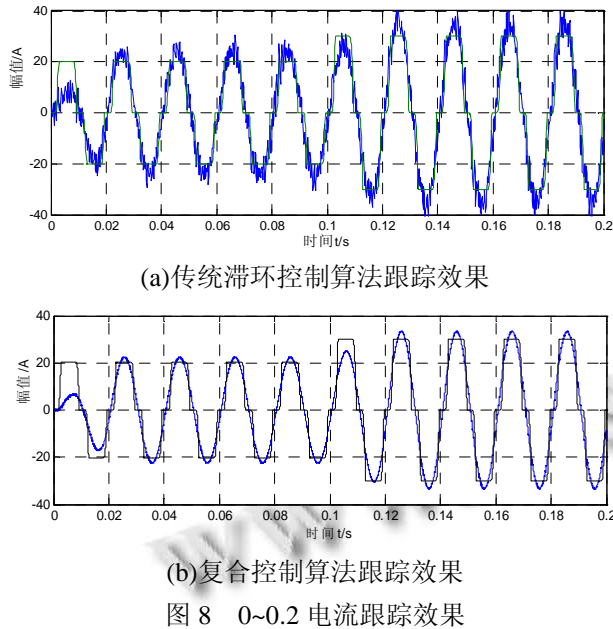


图 7 复合控制算法内部建模

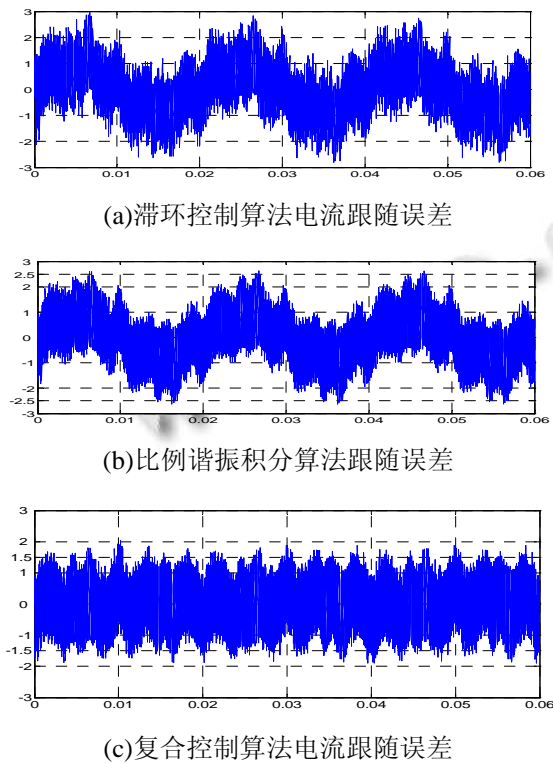
该复合控制算法采用 Matlab 中的 S-function 功能编写, 可以方便移植到 DSP 中实现. 如图 8(a) 单纯滞环控制算法跟踪效果和 (b) 复合控制算法跟踪效果.

控制输出模块的模型如图 7 所示, In1 和 In2 为输入的电网谐波采样量和输出反馈量, 进入复合控制模块后输出 IGBT 的全桥驱动信号. 由图 8 可以明显看出, 在相同采样率和控制周期的仿真模式下, 纯滞环控制算法的开关毛刺较复合控制算法的毛刺多, 并且

跟踪误差相对较大^[7]，这是因为滞环控制导致开关频率不固定，导致波形局部振荡，而加入比例谐振积分的复合控制有效弥补了这点。



为了验证复合控制算法的优越性，本文还进行了电流跟随误差比较，如图 9。



由图 9 可以看出，单纯的滞环控制算法和比例谐振积分算法的电流跟随误差都在-2.5A~2.5A 之间，而采用复合型控制算法的电流跟踪随差在-1.5A~1.5A 之间。由此可以看出复合控制算法降低了电流的跟随误差，提高了系统的补偿性能。

5 实验验证

为了检验该复合控制算法的有效性和可行性，进行了硬件电路实验。设计了一套串联谐振注入式混合有源电力滤波器。系统谐波主要由实验室自制的谐波源提供，谐波电源可以输出任意次和含量的谐波，详见文献[8]。电路中采用纯电阻负载，系统以 TMS320LF2407A DSP 为主控核心。IGBT 作为逆变桥开关器件，选用 16 位高速 A/D 转换器 AD7612，主要包括：采样电路、驱动电路、保护电路、外围电路(电源电路、仿真电路、复位电路等)、倍频锁相电路、信号调理电路及 D/A 转换电路。控制系统结构如图 10。

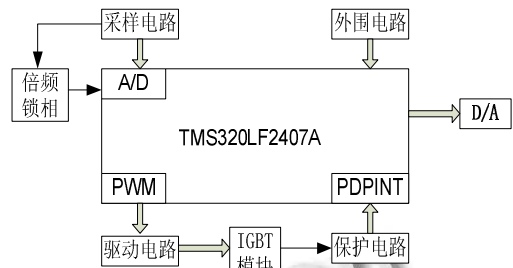
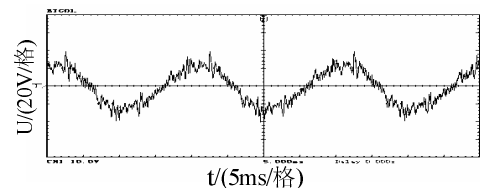


图 10 控制系统结构图

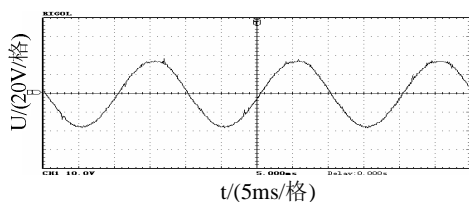
DSP 工作步骤如下：

- 1)采样电流信号调理电路提供的电压同步脉冲信号，确定电流相序；
- 2)采样电网三相谐波与输出补偿电流值；
- 3)调用检测及控制算法程序，计算控制量，装载相应 PWM 寄存器。

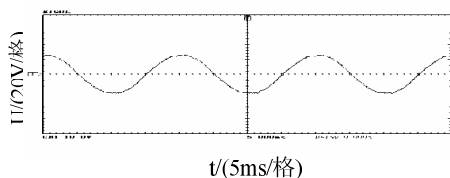
实验利用 APF 控制算法平台对三种控制算法分别调试，可以得到如下注入补偿谐波后的电网波形 11。



(a)滞环控制下输出电网波形



(b)比例谐振积分控制下输出电网波形



(c)复合控制算法下输出电网波形

图 11 整机注入波形结果

由图 11 可以看出,滞环控制算法下输出的电网波形抖振严重,波形毛刺多,比例谐振积分算法下输出波形效果优于前者,但仍有部分抖振,复合控制算法下 APF 补偿效果明显,THD 由原来的 23.56% 下降为 1.2%,滤波效果非常好。

6 结论

通过分析串联谐振注入式有源电力滤波器(SRIHAPF)的拓扑结构,比较传统滞环控制算法和比例谐振积分算法的优缺点,将两者有效结合,提出了

一种复合型控制算法.将三种控制算法应用到 SRIHAPF 中进行了仿真和实验.仿真环节通过电流跟踪效果和跟随误差可以比较出复合型控制算法跟踪效果好,跟随误差小的优点.实验结果验证了该复合控制算法的准确性,可行性。

参考文献

- 1 王兆安,杨君,刘进军.谐波抑制和无功功率补偿.北京:机械工业出版社,2006.
- 2 朱军卫,龚春英.逆变器单极性电流 SPWM 控制与滞环控制比较.电力电子技术,2004,38(1):25-29.
- 3 Zmood DN, Holmes D G. Stationary frame current regulation of PWM inverters with zero steady-state error. IEEE Trans. on Power Electronics, 2003,18(3):814-822.
- 4 帅智康,罗安,定国涂,春鸣.串联谐振注入式混合型有源电力滤波器及滤波特性分析.电工技术学报,2009,24(5):125-134.
- 5 涂春鸣,罗安,汤赐,吴宁.注入式混合型有源电力滤波器的控制算法.中国电机工程学报,2008,28(24):52-58.
- 6 王兆安,黄俊.电力电子技术.北京:机械工业出版社,2000.
- 7 洪峰,单任仲,王慧贞,严仰光.一种变环宽准恒频电流滞环控制方法.电工技术学报,2009,24(1):115-119.
- 8 汪玉凤,章振海,董平.基于载波移相 SPWM 和级联逆变器的谐波电源.电力电子技术,2010,44(12):113-115.

(上接第 38 页)

NFWMA 在地震工程和岩土工程领域的普及和应用。

参考文献

- 1 廖振鹏.工程波动理论导论.北京:科学出版社,2002.
- 2 杨柏坡,陈庆彬.显式有限元法在地震工程中的应用.世界地震工程,1992,8(4):31-40.
- 3 廖振鹏,杨柏坡,袁一凡.三维地形对地震地面运动的影响.地震工程与工程振动,1981,1(1):56-75.
- 4 林建仁,林文广.Visual Basic 6.X 程序设计:教学指南篇.北京:中国铁道出版社,1999.
- 5 Golden Software, Inc. Surfer8.0 Automation Reference. http://www.goldensoftware.com,2005.
- 6 边荫. ANSYS5.7 有限元实例分析教程.北京:机械工业出版社,2002.
- 7 周正华.地基土介质阻尼和辐射阻尼的数值模拟.哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2000.
- 8 谭超,陈慧,谭黎明.利用 VB 绘制二维曲线图.电脑学习,2002,(6):42-43.
- 9 潘昌实.隧道力学数值方法.北京:中国铁道出版社,1995.
- 10 熊玉春,房营光.ADINA 有限元软件中材料本构的二次开发.岩土力学,2008,29(8):2221-2225.
- 11 荀丽,龙英.基于 MATLAB/SIMULINK 的仿真应用研究.科学技术与工程,2005,5(14):1018-1020.