

有源电力滤波器的比例递推积分控制

唐 欣, 罗 安, 谭甜源

(中南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙, 410083)

摘要: 在采用有源电力滤波器消除谐波中, 由于滤波器的检测精度、指令电流计算延时和输出滤波器的相移等因素的影响, 滤波效果不是很理想. 提出了应用于并联型有源滤波器的比例递推积分控制算法, 比例系数和积分系数由模糊推理在线整定. 该算法能有效地提高系统的动态和稳态性能, 可适应于单相、三相三线制、三相四线制非线性负载电流波形畸变的抑制. 实验结果证明了所提出的控制算法的有效性.

关键词: 有源滤波器; 递推积分; 传统比例积分控制; 模糊推理

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Active power filter with a proportional recursive integral controller

TANG Xin, LUO An, TAN Tian-yuan

(College of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha Hunan 410083, China)

Abstract: In the use of active power filter for eliminating harmonics in the electric power system, the performance of active power filter is not satisfying due to the influence of detection accuracy, time delay of instruction current calculation and phase displacement of output filter. This paper presents proportional recursive integral controller applied for parallel active power filter to improve its steady-state and dynamic performance. The parameters of the controller are on-line tuned by fuzzy inference to enhance self-adaptive ability of the system. It can be applied to single phase, three phases three wires and three phases four wires active power filters. Experimental result confirms the validity of the proposed controller.

Key words: active power filter; recursive integral; traditional proportional-integral control; fuzzy inference

1 引言(Introduction)

近年来, 随着电力电子在工业中广泛应用, 谐波的污染日趋严重. 谐波不仅引起供电系统的电能质量下降、电气设备的误动作, 还对通信设备的正常工作造成很大影响. 目前, 滤除谐波主要采用无源滤波器和有源电力滤波器(active power filter, APF)^[1]两种方式. 采用电压型逆变器的并联 APF 由于它克服了无源滤波器易产生串并联谐振和只能滤除特定谐波等缺点被广泛应用. 并联型 APF 产生一个与负载电流(电压)中谐波分量相抵消的补偿电流(电压)使电网电流(电压)接近正弦波, 其基本工作原理图如图 1 所示. 为消除电网谐波电流, 并联的 APF 需注入与负载产生的谐波电流在幅值上相等而相位相反的谐波电流. 由于 APF 的检测精度、指令电流计算时延和输出滤波器(由 L_1 和 C 组成)的相移等因素, 使得 APF 的滤波效果不是很理想^[2,3].

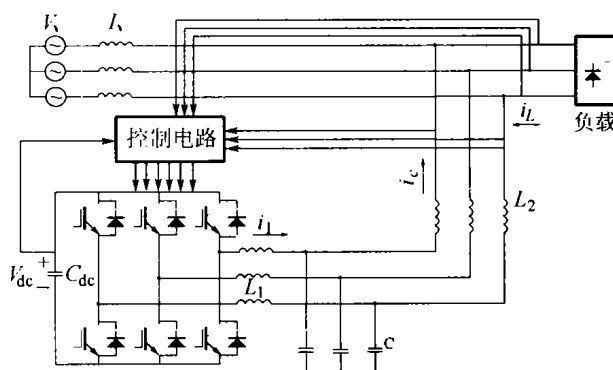


图 1 APF 系统原理图

Fig. 1 Active power filter configuration

目前文献大多讨论如何改进检测方法、PWM 调制方法和输出滤波器的设计来提高 APF 系统的性能. 本文作者提出了一种新的递推积分 PI 控制算法, 并应用于 APF 系统中, 以消除系统的稳态误差和提高系统的动态性能, 并且采用了模糊推理在线整定算法的参数来增强系统的自适应能力. 所提出

的算法具有计算量小、在工程中容易实现的特点.实验结果证明了所提出的控制算法的有效性.

2 系统控制结构(System description)

系统控制结构如图 2 所示,图中 i_{CX}^* 和 i_{CX} 分别是 APF 补偿支路相 x 的电流和参考电流, i_{SX}^* 是相 x 的电网参考电流, i_{LX} 是相 x 的负载电流.它由电流控制内环和电压控制外环构成,电流环用作改善电网电流波形,而电压环控制电网电流的幅值.

i_{CX}^* 由 i_{SX}^* 减去 i_{LX} 得到,即

$$i_{CX}^* = i_{SX}^* - i_{LX}. \tag{1}$$

由于 i_{SX}^* 只包含基波成份,而 i_{LX} 包含了负载谐波成份,那么 i_{CX}^* 就包含了负载的谐波成份.当 i_{CX} 能够很好的跟踪 i_{CX}^* 时(即当滤波支路的谐波电流幅值等于负载谐波电流而方向相反时),负载谐波就不会流入电网了.控制方式可以适合于单相、三相三线制和三相四线制有源电力滤波系统.

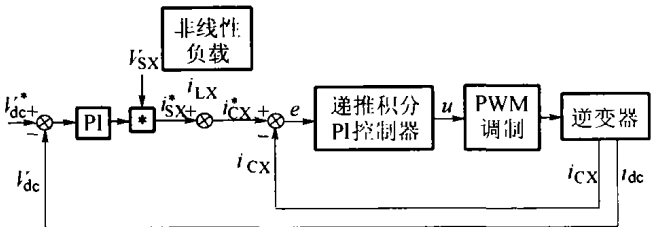


图 2 系统控制结构图
Fig. 2 Controller for APF

3 递推积分 PI 控制器的设计(Design of recursive PI controller)

3.1 控制器的结构(Controller structure)

本文采用的控制器的结构如图 3 所示,它由一个递推积分 PI 和一个 Fuzzy 自调整机构组成.传统的 PI 控制器由于其算法简单、可靠性高,被广泛应用工业过程控制.但当被控量为正弦量时,传统的 PI 难以实现无静差控制^[4].为此,本文提出了递推积分 PI 算法来消除系统的稳态误差,并且利用 fuzzy 推理在线整定控制器参数提高系统的动态性能.

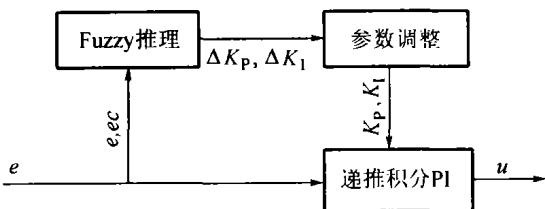


图 3 控制器的结构
Fig. 3 Proposed controller construction

3.2 递推积分 PI 算法 (Recursive integral PI algorithm)

传统的 PI 能够对被控量为直流量和变化缓慢的量实现无静差控制,但当被控量为正弦量时(比如交流驱动),如果直接采用传统 PI 进行控制,就会存在静态误差.同步框架 PI 能够对被控量为标准的正弦量实现无静差控制^[4],但有源滤波系统中被控量为谐波,即为以 20 ms 为公倍周期的各次谐波的合成量.如采用同步框架 PI 进行控制,需对各次谐波建立框架,分别计算,从而计算量大,不易于工程实现.本文作者在传统 PI 算法的基础上,针对系统跟踪控制的量具有周期小、变化快的特点,提出了递推积分 PI 算法,实现了对系统的无静差控制.被控量信号波形见图 4,算法分别对 $e(I_{CX}^*$ 减去 $I_{CX})$ 每个周期内相应的各采样点进行积分,相当于有 N 个 PI 并行工作(假设 e 每个周期内的采样点数为 N) 实现对系统 PI 控制.

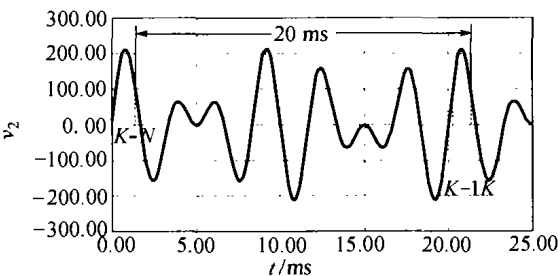


图 4 被控量信号波形
Fig. 4 Waveform of a reference signal

算法为

$$u(K) = K_{P_K} \cdot e(K) + \sum_{i=0}^C K_{I_{K-iN}} e(K-iN). \tag{2}$$

式中 $u(K)$ 为 K 时刻的控制量, $e(K)$ 为 K 时刻的误差采样值, N 为一个周期内的采样数, K_{P_K}, K_{I_K} 为控制器的参数, C 为 K/N 取整.为简化计算,可利用 $u(K)$ 的增量形式进行计算.在 $K-N$ 时刻,式(2)可改写为

$$u(K-N) = K_{P_{K-N}} \cdot e(K-N) + \sum_{i=0}^{C-1} K_{I_{K-(i+1)N}} e(K-(i+1)N). \tag{3}$$

将式(2)减去式(3)得

$$\Delta u(K) = K_{P_K} \cdot e(K) - K_{P_{K-N}} \cdot e(K-N) + K_{I_K} e(K), \tag{4}$$

于是得到控制律为

$$u(K) = u(K-N) + \Delta u(K) =$$

$$u(K-N)+K_{p_A}\cdot e(K)-$$
$$K_{p_{A-N}}\cdot e(K-N)+K_I e(K).$$

(5)

3.3 Fuzzy 自调整机构 (Fuzzy self-tuning mechanism)

近年来,由于传统 PI 控制在系统的动态和稳态性能同时取得最优之间存在矛盾,许多文献利用现代控制理论结合传统 PI 来解决这一问题.本文采用 Fuzzy 自调整机构应用于递推积分 PI 算法,用以提高系统的动态性能和自适应能力.Fuzzy 自调整机构根据 e 的大小、方向以及变化趋势等特征,通过 Fuzzy 推理作出相应决策,在线调整算法的 K_p 、 K_I 参数,从而使得系统同时具有较好的动态、稳态性能和自适应能力^[5].

假设 e 、 ec 、 K_p 的增量 ΔK_p 和 K_I 的增量 ΔK_I 的模糊集均为 {NB, NM, NS, O, PS, PM, PB}, 他们的论域均为 $\{-1, -0.667, -0.334, 0, 0.334, 0.667, 1\}$, 并设 e 、 ec 和 ΔK_p 、 ΔK_I 隶属度函数均服从正态分布.通过一个典型动态过程响应曲线和工程经验建立模糊规则^[6,7], ΔK_p 和 ΔK_I 控制规则分别由表 1 和表 2 给出.解模糊的方法采用加权平均法.

表 1 ΔK_p 模糊控制规则

Table 1 ΔK_p control rule based fuzzy

e	ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

表 2 ΔK_I 模糊控制规则

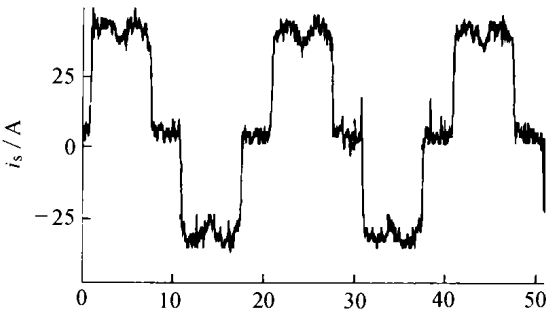
Table 2 ΔK_I control rule based fuzzy

e	ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO
NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB	PB
PB	ZP	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

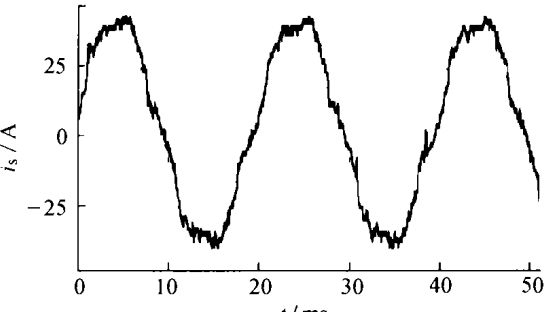
4 实验结果 (Experimental results)

采用本文中提出的控制算法,研制了一台并联型 APF 的实验样机,并用它进行谐波滤除研究,实验结果如图 1 所示.其中负载容量为 5 kVA,控制算法采用 DSPM320C30 实现.电网电流的波形和频谱采用文献[8]提出的测量装置测得,见图 5,6.

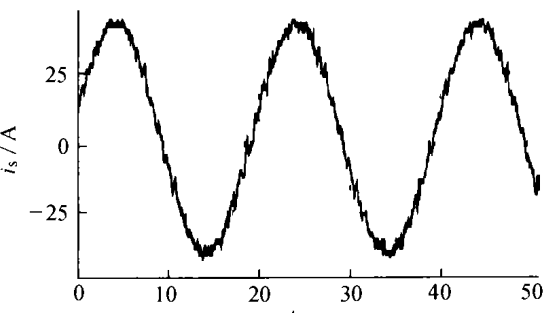
从图 5 中可以看出,采用本文方法控制的 APF 比采用传统 PI 控制的 APF 滤波后电网电流的波形要好.从频谱图中可以看出采用传统 PI 控制和采用本文中方法控制的 APF 分别将电网电流的总畸变率从 21.7% 降到 6.9% 和 2.6%,说明了本方法能很好地克服传统 PI 的缺点,消除系统的稳态误差,从而有效地滤除谐波.



(a) 没有滤波器时



(b) 滤波器采用传统PI控制时



(c) 滤波器采用本文方法控制时

图 5 实验中电网电流的波形
Fig. 5 Experimental line current waveforms

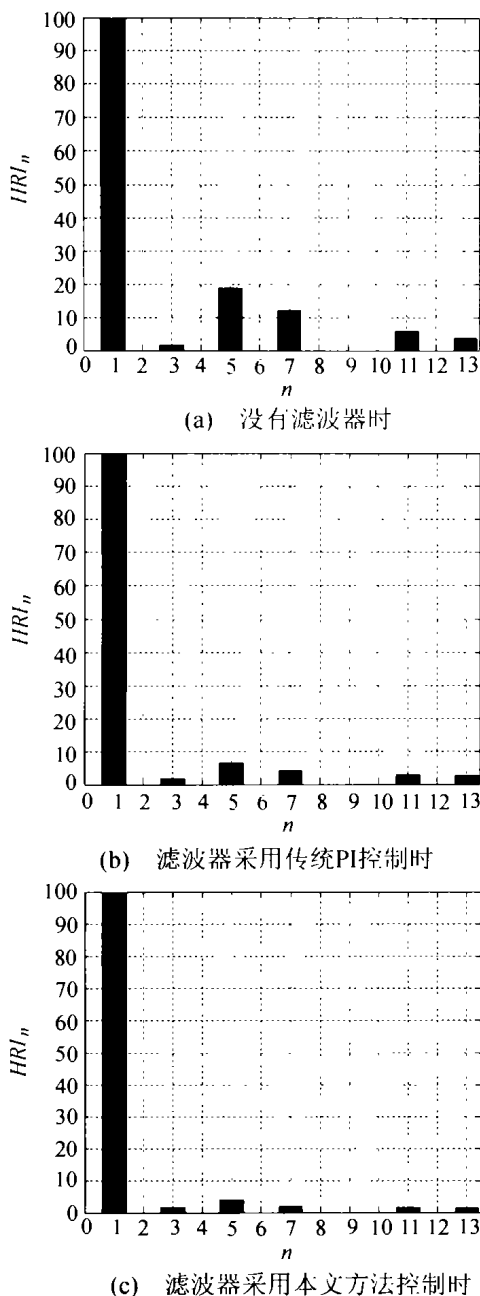


图6 图5中电网电流的频谱
Fig.6 Spectrum of line current in Fig.5

5 结论(Conclusion)

本文针对并联型 APF 系统存在的问题,在传统的 PI 算法的基础上,根据系统跟踪控制的量具有周期小和变化快的特点,提出了参数 Fuzzy 推理自整定的递推积分 PI 控制算法.控制算法的应用提高了 APF 系统的滤波性能,可适用于单相、三相三线制和

三项四线制的非线性谐波负载电流波形畸变的抑制.实验结果证明了控制算法的有效性.

参考文献(References):

- [1] AKAGI H. New trends in active filters for power conditioning [J]. *IEEE Trans on Industry Applications*, 1996, 32(6): 1312 - 1322.
- [2] RAJARAMAN R, DOBSON I, LASSETER R H, et al. Computing the damping of subsynchronous oscillations due to a thyristor controlled series capacitor [J]. *IEEE Trans on Power Delivery*, 1996, 11(2): 1120 - 1127.
- [3] GYUGYI L, SCHAUDER C D, SEN K K. Static synchronous series compensation of transmission lines [J]. *IEEE Trans on Power Delivery*, 1997, 12(1): 406 - 417.
- [4] LORENZ R D, LIPO T A, NOVOTNY D W. Motion control with induction motors [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1994, 82(8): 1115 - 1135.
- [5] 李卓. 基于模糊推理的自调整 PID 控制[J]. *控制理论与应用*, 1997, 14(2): 238 - 241.
(Li Zhuo. Self-adjusting PID controller base fuzzy inference [J]. *Control Theory & Applications*, 1997, 14(2): 238 - 241.)
- [6] COPELAND R P, RATTAN K S. A fuzzy logic supervisor for PID control of unknown systems [C]// *Proc of IEEE Symposium on Intelligent Control*. Columbus, OH, USA: [s.n.], 1994: 22 - 26.
- [7] LEONID R, OMAR G. PID plus fuzzy controller structures as a design base for industrial applications [J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2000, 13: 419 - 430.
- [8] 李正国, 罗安. 智能型谐波检测、分析与保护一体化装置[J]. *电力系统自动化*, 2000, 24(1): 64 - 67.
(Li Zhengguo, LUO An. An intelligent instrument for integrated harmonic detection, analysis and protection [J]. *Automation of Electric Power System*, 2000, 24(1): 64 - 67.)

作者简介:

唐欣 (1975—), 男, 中南大学信息科学与工程学院博士生, 主要研究方向为柔性交流输电及电力系统自动化技术等, E-mail: tangxing_csu@163.com;

罗安 (1957—), 男, 教授, 博士生导师, 1993 年博士毕业于浙江大学, 现任中南大学信息科学与工程学院副院长, 先后主持了国家 863 科技攻关项目和湖南省重点科技攻关项目等, 获湖南省 1999 年度和 2000 年度科技进步二等奖, 目前主要的兴趣是模糊控制、模糊神经控制以及智能实时控制系统等。

谭甜源 (1979—), 男, 主要研究方向为柔性交流输电及电力系统自动化技术。