

新型三相三线制模糊滑模控制并联有源滤波器设计

江全才, 马晓旭, 李红刚

(三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 针对三相三线制电路中的谐波补偿问题, 采用模糊滑模控制方法设计了一种新型并联有源滤波器, 成功降低了三相电路中电源电流的谐波电流含量。谐波电流检测方法采用 p-q 谐波电流检测方法, 能快速、准确地检测出负载电流中的谐波分量。直流侧电压采用 PI 控制方法实现稳定控制。参考电流跟踪控制采用所设计的模糊滑模控制方法实现。Simulink 仿真结果显示, 与传统的滞环比较控制方法相比, 所设计的新颖模糊滑模控制方法能够有效地降低跟踪误差, 提高有源滤波器的谐波补偿效果。

关键词: 有源滤波器; 模糊控制; 滑模控制; 谐波补偿; 跟踪控制

Novel fuzzy sliding mode control method for three-phase three-wire shunt active power filter

JIANG Quan-cai, MA Xiao-xu, LI Hong-gang

(College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: This paper designs a shunt active power filter with the novel fuzzy sliding mode control method to solve the harmonic compensating problem in three-phase three-wire grid and reduces the harmonic distortion of the supply current successfully. The p-q harmonic detection method is applied and the harmonic component in load currents can be extracted quickly and exactly. The PI control technique is used to control the stability of capacitor voltage in DC side. The designed fuzzy sliding mode control method is applied in the reference current control. Simulation results reveal, compared to the hysteresis controller, the designed fuzzy sliding mode control method can reduce tracking error obviously and improve the harmonic compensation effect of active power filter.

Key words: active power filter; fuzzy control; sliding mode control; harmonic compensation; tracking control

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)07-0128-06

0 引言

随着电力电子技术的发展, 大量的非线性负载接入电网, 产生的谐波和无功功率严重影响电力系统的电能质量^[1]。有源电力滤波器(Active Power Filter, APF)是实现电力系统谐波和无功功率补偿的有效装置, 其基本原理是使补偿电路产生和谐波电流具有相同幅值但相位相反的补偿电流, 以达到消除谐波的目的^[2-3]。由于有源滤波器模型的非线性特性, 传统的控制方法很难适用。目前主要的控制方法有滞环控制、三角载波控制、无差拍控制和空间矢量控制方法等^[4-6]。滞环控制法响应速率快且精度高, 但开关频率不稳定, 损耗大, 并且易受到干扰^[7], 三角载波控制法开关速率稳定, 但响应速率较慢且精度较低^[8], 无差拍控制动态响应快, 但属于开环控制, 存在稳态误差, 空间矢量控制法虽然开关频率稳定, 但由于坐标变换复杂, 巨大的计算

量会带来延时。

本文采用的滑模变结构控制本质上是一种非线性控制方法, 会给被控对象带来一定的抖振^[9-11]。采用模糊控制方法能够有效地提高系统的鲁棒性和适应性, 削弱滑模控制方法所带来的抖振现象。文献[3, 12-13]分别采用了模糊控制方法, 实现了并联有源滤波器的直流侧电压控制和参考电流跟踪控制。文献[13]设计了一种基于双闭环模糊控制的有源电力滤波器, 模糊控制应用于有源滤波器的直流侧电压控制可以有效地提高电压的稳定性, 而用于参考电流跟踪控制可以降低非线性控制所带来的系统抖振, 降低补偿后电源电流的谐波含量。本文综合采用模糊控制和滑模控制方法, 提出了一种新型的模糊滑模变结构控制, 并成功应用于三相三线制并联有源电力滤波器的参考电流跟踪控制, 实现了三相输电系统的谐波补偿, 有效地降低了电流跟踪误差, 降低了补偿后电源电流的谐波含量。

1 三相三线制并联有源滤波器

所设计的三相三线制并联有源滤波器的拓扑结构图如图1所示, 负载电流 i_L 由于含有大量的谐波, 其波形畸变严重。有源滤波器通过向负载电流中注入与谐波电流 i_h 大小相等, 相位相反的补偿电流 $-i_h$ 实现负载电流的谐波补偿。根据其电压和电流关系, 得到状态方程如式(1)所示。

$$\begin{cases} L \frac{di_{ca}}{dt} + u_{sa} - v_{aM} = 0 \\ L \frac{di_{cb}}{dt} + u_{sb} - v_{bM} = 0 \\ L \frac{di_{cc}}{dt} + u_{sc} - v_{cM} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中的非线性部分如式(2)所示。

$$\begin{cases} v_{aM} = u_{dc}(2j_a - j_b - j_c)/3 \\ v_{bM} = u_{dc}(-j_a + 2j_b - j_c)/3 \\ v_{cM} = u_{dc}(-j_a - j_b + 2j_c)/3 \end{cases} \quad (2)$$

逆变器开关函数如式(3)所示。

$$j_i = \begin{cases} 1 & i \text{相上桥臂IGBT导通、下桥臂IGBT关断} \\ 0 & i \text{相上桥臂IGBT关断、下桥臂IGBT导通} \end{cases} \quad (3)$$

$i = a, b, c$

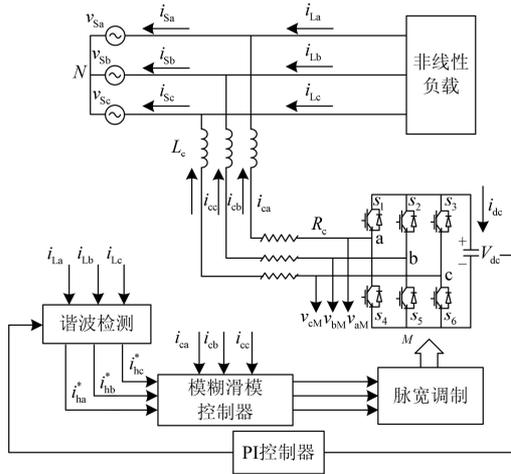


图1 三相三线制并联有源滤波器拓扑结构图

Fig. 1 Topology of three-phase three-wire shunt active power filter

2 有源滤波器控制系统设计

三相三线制模糊滑模控制并联有源滤波器系统结构图如图1所示, 其主要包括谐波检测、参考电流跟踪控制和直流侧电压控制三个部分。基于瞬时无功率理论的谐波检测方法又称PQ法, 其核心思想是: 利用所定义的瞬时无功率的波动部分是谐波电流和系统电压作用的结果这一特点提取谐波分

量^[2]。参考电流跟踪控制采用模糊滑模控制方法实现, 柔化了控制信号, 可以削弱滑模控制所带来的抖振。直流侧电压控制采用PI控制器实现, 具有动态响应速度快, 稳定性高的优点。

2.1 谐波检测和直流侧电压控制

三相三线制线路中常用的谐波检测手段是基于瞬时无功率理论的谐波检测方法。当系统三相电压中不含谐波, 且为基波正序电压时, 运用该方法可以迅速、准确检测出负载电流中的谐波分量和无功分量, 克服了传统方法中时延长、精度低、无法单独提取谐波分量和无功分量等缺点。然而, 当系统电压含有一定谐波时, 会出现波形畸变或相位失真等问题, 基于瞬时无功率理论的谐波检测方法的谐波检测精度会大大的降低。为了克服这一缺点, 本设计采用改进的谐波检测方法, 为基于瞬时无功率理论的谐波检测方法添加虚拟正序电压向量或负序电压向量代替真实的电压向量, 从而克服电源电压谐波对谐波检测的影响。直流侧电压采用传统的PI控制方法, 将PI控制器输出量叠加到有源滤波器参考电流的有功电流分量中, 完成对电压的控制。改进的PQ谐波检测和直流侧电压控制方法如图2所示, 其中的变换矩阵形式如式(4)~式(7)所示。

$$C_{123}^{\alpha\beta} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$C_{\alpha\beta}^{pq} = \begin{bmatrix} \cos \omega t & \sin \omega t \\ -\sin \omega t & \cos \omega t \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$C_{pq}^{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} \cos \omega t & -\sin \omega t \\ \sin \omega t & \cos \omega t \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$C_{\alpha\beta}^{123} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (7)$$

2.2 模糊滑模控制器设计

滑模控制实际是一种非线性控制, 通过切换控制量实现被控对象状态在滑模面附近震荡, 非常适合用于有源滤波器的参考电流跟踪控制。但是, 传统的滑模控制方法常常会给系统带来抖振, 影响跟踪控制的精度。模糊控制是一种不依赖于被控对象精确数学模型的控制方法, 能够克服系统非线性的影响, 提高被控对象对参数变化的鲁棒性, 抑制系统的超调量^[3,12-13]。为了削弱滑模控制的抖振, 克

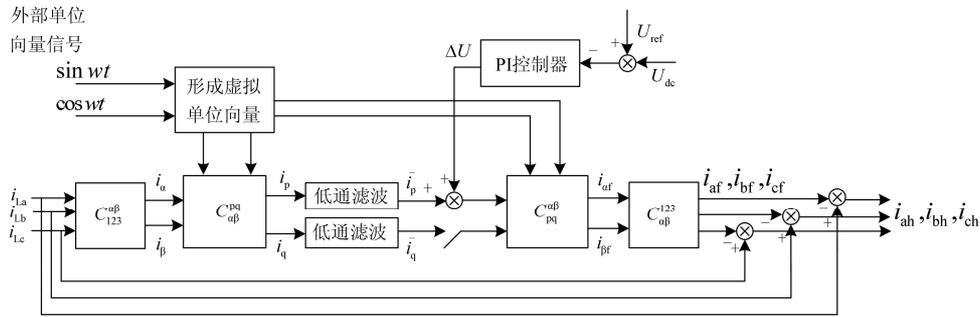


图2 改进PQ谐波检测与直流侧电压控制原理图

Fig. 2 Schematics diagram of improved PQ harmonic detection and DC voltage control

服参数不确定性及外干扰的影响，本文将模糊控制和滑模控制结合起来设计了一种新型的模糊滑模变结构控制方法，并用于有源滤波器的参考电流跟踪控制，充分发挥模糊控制不需要对象数学模型和滑模控制鲁棒性好的优点。模糊滑模控制的含义在于它不但简化了模糊控制的复杂性，而且柔化了滑模控制的控制信号，减轻或避免了一般滑模控制抖振现象^[14]。采用控制的变化量 Δu 作为模糊滑模控制器的输出，可使模糊滑模控制成为无模型控制，依赖于被控对象的程度小。根据前人的经验，可利用模糊滑模控制规则调整控制变量 u 的大小，确保条件 $s \dot{s} < 0$ 成立。谐波检测装置检测出的谐波电流为 $i_{ca}^*, i_{cb}^*, i_{cc}^*$ 作为参考电流信号，实际的补偿电流为 i_{ca}, i_{cb}, i_{cc} ，采用滑模控制方法实现参考电流跟踪控制。如式(8)所示，设跟踪误差 e_i ，误差变化率为 ec_i ，其中 $i = a, b, c$ ，则

$$\begin{cases} e_i = i_{ci}^* - i_{ci} \\ ec_i = \frac{d(i_{ci}^* - i_{ci})}{dt} \end{cases} \quad (8)$$

定义滑模控制的滑模面如式(9)所示。

$$S_i = c_i e_i + d_i ec_i \quad (9)$$

其中： $c_i > 0$ ； $d_i > 0$ ； $i = a, b, c$ 。

对于常规模糊控制，可以设计高阶控制器实现，但是，模糊滑模控制器通常都是二维的，因此模糊滑模控制又具有简化模糊控制系统结构复杂性的作用^[14]。设模糊控制器的输入是 (s, \dot{s}) ，输入经过模糊化，根据模糊控制规则，确定模糊滑模控制器输出 u 的模糊化变量。最后，经过对模糊化输出变量进行去模糊化，实现模糊滑模控制器精确输出量。定义模糊集PB=正大，PM=正中，PS=正小，ZO=零，NS=负小，NM=负中，NB=负大，整个模

糊滑模控制器的结构图如图3所示。为了满足稳定性条件 $s \dot{s} < 0$ ，设计模糊控制规则表如表1所示，使用的模糊规则为

If s is A and \dot{s} is B , then u is C

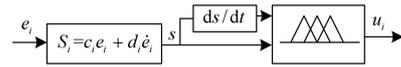


图3 模糊滑模控制器结构图

Fig. 3 Structure of fuzzy sliding mode controller

表1 模糊滑模控制规则表

Table 1 Fuzzy sliding mode control rules

ds/dt	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
PB	ZO	PS	PM	PB	PB	PB	PB
PM	NS	ZO	PS	PM	PB	PB	PB
PS	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	PB
ZO	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NS	NB	NB	NM	NS	ZO	PS	PM
NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZO	PS
MB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZO

3 仿真研究

采用Simulink/SimPowerSystem进行仿真实验，分别设计滑模控制和模糊滑模控制并联有源滤波器，对其谐波补偿的效果进行比较。考虑电源电压中含有谐波的情况，由于偶次谐波对电网的影响较小，所以在电源电压中加入21th和51th电压谐波。采用改进的p-q法实现谐波检测，并采用PI控制器实现直流侧电压的稳定控制，电压参考值为400 V。在实际电网运行过程中，由于非线性负载接入和断开导致的负载电流变化对有源滤波器的谐波补偿效果有很大的影响。因此，仿真在0.2 s时，通过开关，

再接入一个非线性负载, 且该负载在0.4 s时断开, 以观察有源滤波器对负载变化的适应性。仿真系统参数如表2所示。

表2 仿真系统参数

Table 2 Parameters of simulation system

电源电压	220 V	50 Hz
谐波电压	20 V	51th
	10 V	21th
负载电阻、电感	10 Ω	2e-3H
额外负载电阻、电感	5 Ω	2e-3H
补偿电路电感	1.1e-3H	
直流侧参考电压	400 V	
直流侧电容	50e-3	
PI 控制器参数 k_p 、 k_i	1.1	100
滑模控制器参数 c_i 和 d_i	1	3e-6

负载电流和补偿后电源电流的谐波分析如表 3 所示。负载电流中由于含有大量的谐波电流, 导致其波形出现严重的畸变, 如图 6 所示。通过谐波分析, 其各阶段的总谐波含量 (THD) 分别为 28.60%, 26.51% 和 28.60%。采用滑模控制并联有源滤波器补偿后, 电源电流谐波含量被降低到 4.17%, 1.89% 和 4.17%。非线性负载发生突变时, 负载电流增大 3 倍, 所设计并联有源滤波器仍然能够实现谐波补偿。采用所设计的模糊滑模控制并联有源滤波器补偿后, 电源电流的总谐波含量 (THD) 为 2.12%, 1.01% 和 2.16%。图 4 和图 5 分别为 $T=0.3$ s 时, 采用滑模控制和模糊滑模控制并联有源滤波器补偿后, 电源电流的总谐波含量分析图。图 6 和图 7 为负载电流波形图和两种并联有源滤波器补偿后电源电流波形图。图 8 和图 9 为采用滑模控制和模糊滑模控制方法实现参考电流跟踪控制的误差, 仿真结果显示, 所设计的模糊滑模控制并联有源滤波器能够有效地降低滑模控制的抖振, 提高参考电流跟踪控制的精度。

表 3 负载电流和补偿后电源电流 THD 分析

Table 3 The THD analysis of load current and the compensated supply current

仿真 时间/s	负载 电流	滑模控制有源滤波器 补偿后电源电流	模糊滑模控制有源滤 波器补偿后电源电流
	THD/%	THD/%	THD/%
$T=0.1$	28.60	4.17	2.12
$T=0.3$	26.51	1.89	1.01
$T=0.5$	28.60	4.17	2.16

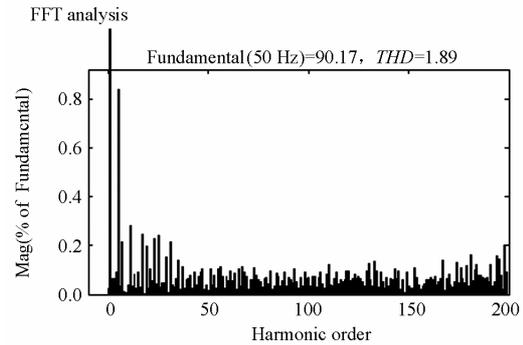
图 4 滑模控制并联有源滤波器补偿后
电源电流谐波分析图

Fig. 4 Sliding mode control of shunt active filter compensated supply current harmonic analysis chart

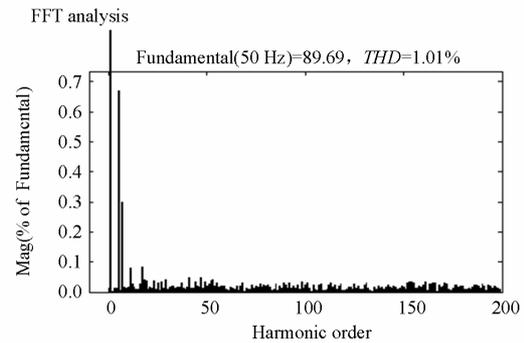
图 5 模糊滑模控制并联有源滤波器补偿后
电源电流谐波分析图

Fig. 5 Fuzzy sliding mode control of shunt active filter compensated supply current harmonic analysis chart

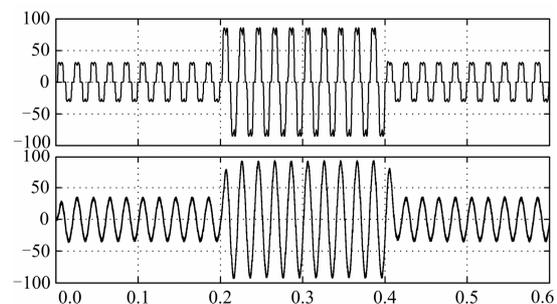
图 6 负载电流波形和滑模控制并联有源滤波器补偿后电源
电流波形图

Fig. 6 Load current waveform and the sliding mode control of shunt active power filter compensated current waveform

4 结论

所设计模糊滑模控制方法能够有效地削弱滑模控制的抖振, 降低有源滤波器电流跟踪控制的误差, 提高有源滤波器的谐波补偿效果。模糊滑模控制方

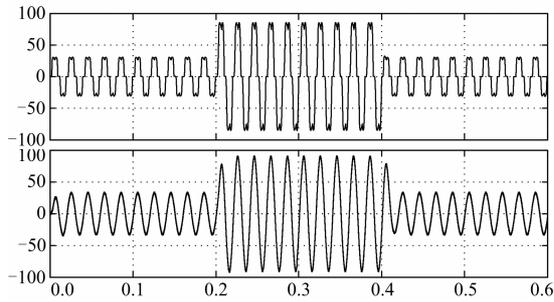


图 7 负载电流波形和模糊滑模控制并联有源滤波器补偿后电源电流波形图

Fig. 7 Load current waveform and the fuzzy sliding mode control of shunt active power filter compensated current waveform

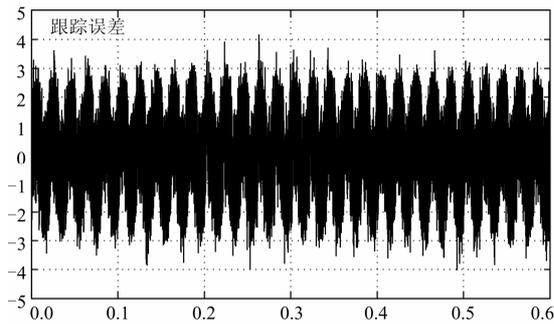


图 8 滑模控制参考电流跟踪误差

Fig. 8 Sliding mode control reference current tracking error

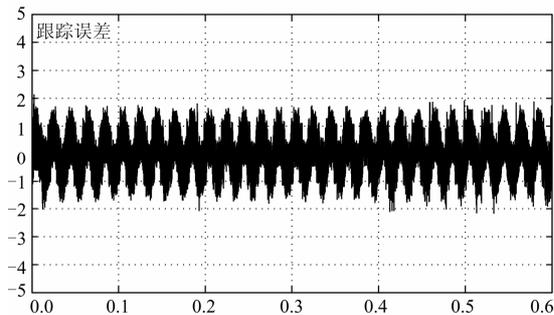


图 9 模糊滑模控制参考电流跟踪误差

Fig. 9 Fuzzy sliding mode control reference current tracking error

法与滞环控制、滑模控制具有同样广泛的适用范围, 所设计的三相三线制模糊滑模控制并联有源滤波器具有优秀的谐波补偿效果, 补偿后电源电流谐波含量较低, 且对于非线性负载的变化具有很好的鲁棒性和适应性。但是, 由于加入了模糊控制方法, 算法的复杂度有所增加。

参考文献

[1] 袁慧梅, 陈文, 陈卫华. 基于 FPGA 的粒子群优化 PI

控制器在有源滤波器中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(23): 23-57.

YUAN Hui-mei, CHEN Wen, CHEN Wei-hua. Application of particle swarm optimization PI controller in active power filter based on FPGA[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(23): 23-57.

[2] 姜齐荣, 赵东元, 陈建业. 有源电力滤波器结构、原理、控制[M]. 北京: 科学出版社, 2005.

JIANG Qi-rong, ZHAO Dong-yuan, CHEN Jian-ye. APF: structure, principle, control[M]. Beijing: Science Press, 2005.

[3] 王盼, 刘飞. 模糊-重复学习复合控制策略在并联型有源滤波器中的应用[J]. 电工技术学报, 2011, 26(1): 166-171.

WANG Pan, LIU Fei. Fuzzy-repetitive learning composite control strategy in shunt active filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(1): 166-171.

[4] 唐欣, 罗安. 基于重复控制的有源滤波器的三态滞环控制方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(9): 134-139.

TANG Xin, LUO An. Repetitive control based three-state hysteresis control of a single-phase active filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(9): 134-139.

[5] 叶小军, 曾江, 王克英, 等. 并联有源电力滤波器双滞环电流控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(9): 60-64.

YE Xiao-jun, ZENG Jiang, WANG Ke-ying, et al. Double hysteresis current control strategy for shunt active power filter[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(9): 60-64.

[6] 周娟, 秦静, 王子绩, 等. 内置重复控制器无差拍控制在有源滤波器中的应用[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 233-238.

ZHOU Juan, QIN Jing, WANG Zi-ji, et al. Application of deadbeat control with plug-in repetitive controller in active power filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 233-238.

[7] 胡志坤, 张乾, 刘守明, 等. 三相并联型有源滤波器的滑模控制方法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(12): 122-128.

HU Zhi-kun, ZHANG Qian, LIU Shou-ming, et al. Sliding mode control method of three phase shunt active power filter[J]. Transactions of China Electrotechnical

- Society, 2011, 26(12): 122-128.
- [8] 刘心旻, 王杰, 王昕, 等. 有源滤波器的模糊阈值变环宽滞环电流跟踪控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(11): 116-123.
- LIU Xin-yang, WANG Jie, WANG Xin, et al. A fuzzy threshold mutative bandwidth hysteresis current tracking control method for active power filter[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(11): 116-123.
- [9] 李建林, 张小蓉, 李彩霞, 等. 基于滑模变结构控制的三相有源电力滤波器[J]. 电源技术应用, 2004, 7(10): 604-608.
- LI Jian-lin, ZHANG Xiao-rong, LI Cai-xia, et al. Shunt three-phase active power filter based on sliding mode variable structure control[J]. Power Supply Technologies and Applications, 2004, 7(10): 604-608.
- [10] 王伟, 周林, 徐明. 有源电力滤波器控制方法综述[J]. 继电器, 2006, 34(20): 81-86.
- WANG Wei, ZHOU Lin, XU Ming. Control methods of active power filter[J]. Relay, 2006, 34(20): 81-86.
- [11] DIXON J, CONTARDO J, MORAN L. DC link fuzzy control for an active power filter, sensing the line current only[C] // 28th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, 1997, 2: 1109-1114.
- [12] GEORGIOS T, GEORGIOS A. Shunt active power filter control uUsing fuzzy logic controllers[C] // 2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2011: 365-371.
- [13] 殷志柱, 杨煜普, 董祖毅, 等. 基于双闭环模糊控制的有源电力滤波器[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(4): 58-62.
- YIN Zhi-zhu, YANG Yu-pu, DONG Zu-yi, et al. Double-closed-loop fuzzy controlled active power filter[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(4): 58-62.
- [14] 刘金琨. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- LIU Jin-kun. MATLAB simulation for sliding mode control[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.

收稿日期: 2013-07-01; 修回日期: 2013-08-25

作者简介:

江全才(1962-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为输配电线路理论与工程技术; E-mail: qcjiang@ctgu.edu.cn

马骁旭(1987-), 男, 硕士研究生, 研究方向为输配电线路理论与工程技术;

李红刚(1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向为配电网自动化。