

# 三相有源电力滤波器的灰色变结构控制器设计

杜继伟<sup>1</sup>, 毕伟东<sup>2</sup>, 王奔<sup>1</sup>

(1. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031; 2 南阳供电公司, 河南 南阳 473013)

**摘要:** 结合灰色系统理论和变结构控制理论, 设计一种新型三相有源电力滤波器的灰色变结构控制器。此控制器是在传统 VSC 的滑模面附近增设边界层, 同时将饱和函数代替传统变结构中符号函数, 再通过灰色预测下一状态值来调整滑模控制增益大小, 有效地减弱了传统变结构控制的“抖动”现象。仿真结果表明: 在 GVSC 控制下的 APF 具有更好的补偿效果, 且直流电容电压更稳定。

**关键词:** 有源电力滤波器 (APF); 灰色变结构控制 (GVSC); 补偿效果; 稳定性

**中图分类号:** TM714 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)06-0049-04

## 0 引言

随着非线性负载的广泛使用, 电网的谐波问题已经变得日益严重, 谐波补偿已成为当今一个研究热点。因此, 有源滤波器 (Active Power Filter) 已被用来对电网中的谐波进行动态补偿。为了保证有源滤波器的正常工作, 必须有效地控制谐波电流的形状和大小。目前 APF 的控制方法有灰色预测控制<sup>[1]</sup>, 滑模变结构控制<sup>[2-5]</sup>等。本文结合灰色系统理论和变结构控制的优点, 并提出了 APF 的灰色变结构控制, 通过 Matlab 仿真将本文所提出的方法与文献 [4] 提出的方法相比较, 结果表明, 在 GVSC 控制下的 APF 具有更好的补偿效果, 且直流电容电压稳定性增强。

## 1 APF 系统结构和控制策略

图 1 为 APF 系统结构框图。APF 由电压源型逆变器和直流电容组成, 并通过三个单相的变压器接到电网系统。非线性负载由二极管全整流桥和电容、电阻负载组成, 作为谐波源。

图 2 为 APF 的控制框图。本文采用了灰色滑模控制和间接电流控制技术<sup>[6,7]</sup>相结合。由于直流侧电压直接影响着交流侧输出的性能, 且谐波功率通过电容时会产生电压波动, 另外 APF 自身存在一定的功率损耗, 电容电压会逐渐降低。为了稳定直流侧电压, 本文采用 GVSC 控制器对直流侧电压进行控制。为此引入电容电压偏差负反馈, 即首先将电容电压与基准值的偏差作为 GVSC 控制输入, 再把 GVSC 输出作为参考电流  $i_p^*$  输入间接电流控制模块。而电源电流的瞬时参考电流为:

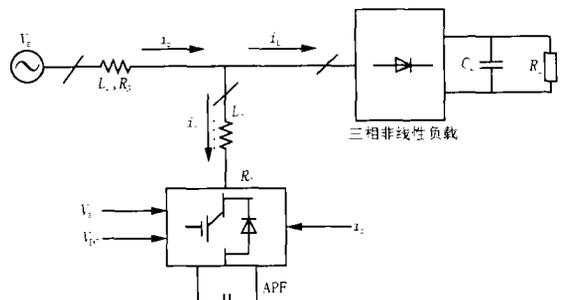


图 1 有源电力滤波器 (APF) 框图

Fig 1 Block diagram of active power filter

$$i_{sa}^* = \frac{i_{sp}^* V_{sa}}{V_{sp}}, \quad i_{sb}^* = \frac{i_{sp}^* V_{sb}}{V_{sp}}, \quad i_{sc}^* = \frac{i_{sp}^* V_{sc}}{V_{sp}},$$

$$\text{其中: } V_{sp} = \sqrt{\frac{2}{3} V_{sa}^2 + V_{sb}^2 + V_{sc}^2}$$

参考电源电流与实际检测电源电流的差作为 PWM 电流控制的输入, 从而实现 APF 的控制。

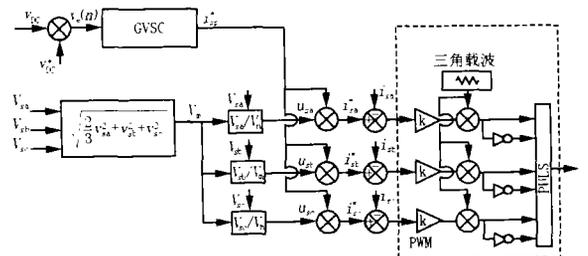


图 2 APF 的控制框图

Fig 2 Control scheme of APF

## 2 变结构控制器的设计

对电力有源滤波器直流侧电容电压, 设定在第  $n$  次采样直流电容上的电压差为  $v_{e(n)}$ , 则<sup>[4]</sup>:

$$x_1 = v_e(n) = V_{DC}^* - V_{DC} \quad (1)$$

$x_2$  定义为:

$$x_2 = \dot{x} = \frac{1}{T} \{ v_e(n) - v_e(n-1) \} \quad (2)$$

其中:  $T$  为采样间隔,  $x_1$ 、 $x_2$  为状态变量。在变结构控制中,滑模面方程为:  $s = c_1 x_1 + c_2 x_2$  ( $c_1$ 、 $c_2$  为常数),变结构控制律为:

$$\begin{cases} \dot{s} = -c_1 \operatorname{sgn}(x_1 s), & s > 0 \\ \dot{s} = -c_2 \operatorname{sgn}(x_2 s), & s < 0 \end{cases} \quad (3)$$

其中

$$\operatorname{sgn}(xs) = \begin{cases} +1, & xs > 0 \\ -1, & xs < 0 \end{cases}$$

所以滑模控制器输出  $u(n) = \dot{x}_1 + \dot{x}_2$ , 电流  $i_{sp}^*$  即为  $u(n)$  的值。

### 3 GM(1,1)预测模型<sup>[9]</sup>

给定量测数据序列

$$X^{(0)}(i) = \{ X^{(0)}(1), X^{(0)}(2), \dots, X^{(0)}(N) \} \quad (4)$$

经过一次累加得

$$X^{(1)}(i) = \sum_{j=1}^i X^{(0)}(j) \quad (5)$$

设  $X^{(1)}(i)$  满足一阶单变量常微分方程

$$\frac{dX^{(1)}}{dt} + aX^{(1)} = U \quad (6)$$

其中:  $a$  为常系数,  $u$  视为对系统的常输入。上述微分方程的解为

$$X^{(1)}(t) = (X^{(1)}(t_0) - \frac{U}{a}) e^{-a(t-t_0)} + \frac{U}{a} \quad (7)$$

灰色建模是依靠式(5)的序列值通过最小二乘法来估计  $a$  和  $u_0$

$$\begin{bmatrix} \hat{a} \\ \hat{u} \end{bmatrix} = (B^T B)^{-1} B^T Y_N \quad (8)$$

其中

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}(X^{(1)}(2) + X^{(1)}(1)) & 1 \\ -\frac{1}{2}(X^{(1)}(3) + X^{(1)}(2)) & 1 \\ \dots & \dots \\ -\frac{1}{2}(X^{(1)}(N) + X^{(1)}(N-1)) & 1 \end{bmatrix}, Y_N = \begin{bmatrix} X^{(0)}(2) \\ X^{(0)}(3) \\ \dots \\ X^{(0)}(N) \end{bmatrix}$$

基于式(7), GM(1,1)的预测模型为

$$\hat{X}^{(1)}(k+1) = (X^{(1)}(1) - \frac{U}{a}) e^{-ak} + \frac{U}{a} \quad (9)$$

用后减运算还原(AGO),得预测值:

$$\hat{X}^{(0)}(k+1) = (X^{(0)}(1) - \frac{U}{a}) (e^{-ak} - e^{-a(k-1)}) \quad (10)$$

### 4 灰色变结构控制器的设计

由于变结构控制本质上是一种非线性控制,这种非线性控制是通过对于开关函数不断进行切换而实现的。实际上,系统在运行过程中,由于系统惯性、切换时间和空间滞后以及开关本身的不连续性等原因,从而产生了“抖动”现象。另一方面,由于变结构系统过渡过程包括两阶段,一是状态点向滑模面  $s=0$  趋近的阶段,在这个阶段系统对外部干扰和参数变化很敏感;二是状态点沿着滑模面  $s=0$  向平衡点趋近的阶段,这个阶段系统对外部干扰和参数变化具有完全鲁棒性。为了提高系统的鲁棒性和动态性,可以通过提高增益使其加速趋近而缩短到达时间,同时也加剧了抖动现象。由于上述原因,本文提出了灰色滑模控制(GSMC),即通过灰色预测下一状态点来调整滑模控制增益,当状态点远离滑模面时,用较大的增益以缩短趋近时间,提高系统鲁棒性和动态性;当状态点距离滑模面较近时,采用较小的增益目的在于消弱抖动,提高系统稳定性。

首先,设定当前状态为  $k$ ,

$$x_1 = v_e(k) = V_{DC}^* - V_{DC}$$

$$x_2 = \dot{x}_1 = \frac{1}{T} \{ v_e(k) - v_e(k-1) \} \quad (11)$$

其中:  $T$  为采样间隔,  $v_e(k)$  为当前采样点。从而可得到两个采样数据序列:

$$\begin{aligned} x_1 &= \{ x_1(1), x_1(2), \dots, x_1(k) \} \\ x_2 &= \{ x_2(1), x_2(2), \dots, x_2(k) \} \end{aligned} \quad (12)$$

本文中,采用了四维新陈代谢序列<sup>[9]</sup>,即  $x_1$  取  $x_1(k-3)$ ,  $x_1(k-2)$ ,  $x_1(k-1)$ ,  $x_1(k)$  四个采样点,同理,  $x_2$  取  $x_2(k-3)$ ,  $x_2(k-2)$ ,  $x_2(k-1)$ ,  $x_2(k)$  四个采样点。

根据上述 GM(1,1)建模的方法和推算,可得出  $x_1$ ,  $x_2$  在第  $k+1$  时刻的预测值。

$$\hat{x}_1^{(0)}(k+1) = (x_1^{(0)}(1) - \frac{U}{a}) (e^{-ak} - e^{-a(k-1)})$$

$$\hat{x}_2^{(0)}(k+1) = (x_2^{(0)}(1) - \frac{U}{a}) (e^{-ak} - e^{-a(k-1)})$$

(13)

由  $x_1$ 、 $x_2$  的预测值,可以得到第  $k+1$  时刻的滑模函数:

$$\hat{s}_{k+1} = c_1 \hat{x}_1^{(0)}(k+1) + c_2 \hat{x}_2^{(0)}(k+1) \quad c_1, c_2 > 0$$

另外,在相平面上设定滑模面边界宽度为  $w (w > 0)$ <sup>[10,11]</sup>,边界分布情况如图 3 所示,当  $|\delta| > w$  时,采用较大增益,当  $|\delta| \leq w$  时,采用增益为  $1/w, \dot{x}_1 = \dot{x}_2 = \dot{x}_3$

在边界层内,  $\text{sat}(\delta/w)$  是  $\delta$  的线性函数,在原来  $s=0$  滑动面上是连续函数。将式 (3) 中符号函数  $\text{sgn}(\delta)$  用饱和函数  $\text{sat}(\delta/w)$  所代替,则得到连续的灰色滑模控制律如下:

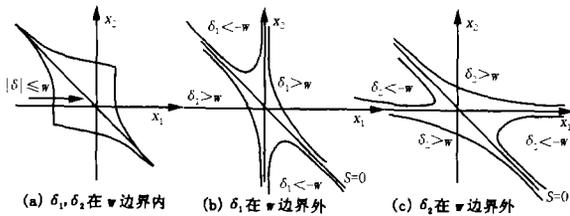


图 3 边界层分布

Fig 3 Boundary layer form

$$\begin{aligned}
 u(n) &= u_1 x_1 + u_2 x_2 \quad (14) \\
 u_1 &= \frac{1}{w} \text{sat}\left(\frac{\delta_1}{w}\right), \quad \delta_1 > 0 \\
 u_2 &= \frac{1}{w} \text{sat}\left(\frac{\delta_2}{w}\right), \quad \delta_2 > 0
 \end{aligned}$$

其中

$$\text{sat}\left(\frac{\delta}{w}\right) = \begin{cases} +1, & \delta > w \\ \delta/w, & -w \leq \delta \leq w \\ -1, & \delta < -w \end{cases} \quad w, w > 0$$

所以灰色滑模控制器输出  $u(n)$  即为电流  $i_{sp}^*$  值,从而实现了 APF 的灰色滑模控制。

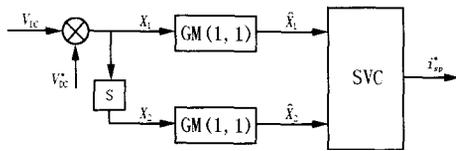


图 4 灰色滑模控制器

Fig 4 Grey sliding controller

### 4 仿真分析

为了验证本文所设计的 GVSC 对 APF 的控制效果以及对直流侧电容电压的稳定作用,分别对 GVSC 和文献 [3] 提出的控制方法进行仿真。仿真模型如图 1 所示。采用三相正弦电压源向非线性负载供电,电源相电压 220 V,  $f = 60 \text{ Hz}$ ,  $L_s = 0.25 \text{ mH}$ ,  $R_s = 0.1 \Omega$ ,  $C = 0.03 \text{ F}$ ,  $R_c = 0.1 \Omega$ ,  $L_c = 2 \text{ mH}$ ,  $V_{DC} = 650 \text{ V}$ 。

图 5 是负载电流波形,由于含有大量谐波使电流波形发生畸变。当不使用 APF 时,  $i_{sa}$  波形与  $i_{La}$  波形相同,也含有大量谐波。

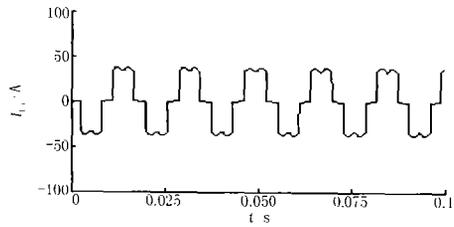


图 5 负载电流波形

Fig 5 Load current wave

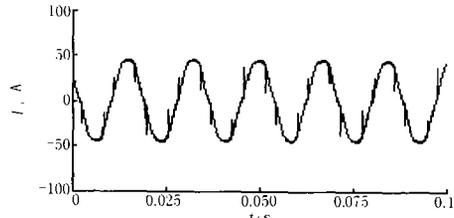


图 6 文 [4] VSC 控制 APF 时,  $i_{sa}$  电流波形

Fig 6 Supply current with VSC

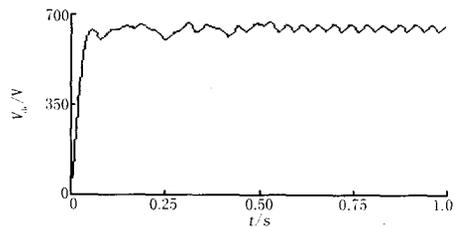


图 7 文 [4] VSC 控制 APF 时,电容电压波形

Fig 7 Capacitor voltage with VSC

使用文献 [4] 的 VSC 控制方法对 APF 进行控制时,APF 对系统进行谐波补偿,补偿后的  $i_{sa}$  波形如图 6 给出,波形明显出现毛刺,很大部分由于电容电压的波动 (图 7) 而影响 APF 的输出补偿电流性能所致。

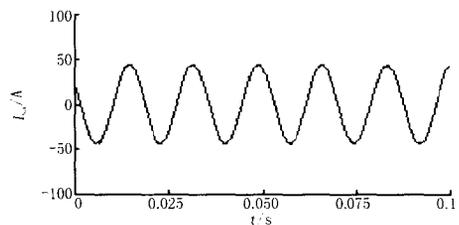


图 8 GVSC 控制 APF 时,  $i_{sa}$  电流波形

Fig 8 Supply current with GVSC

在使用本文设计的 GVSC 和间接电流控制技术相结合作用下,APF 对系统进行谐波补偿,补偿后的  $i_{sa}$  波形如图 8 给出,很明显曲线几乎是光滑的正弦波形,而且电容电压也几乎稳定 (图 9)。

为了进一步定量说明 APF 在两种控制下的谐

波补偿效果,下面给出补偿后谐波频谱对照图 10、图 11。

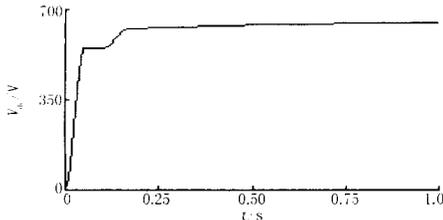


图 9 GVSC控制 APF时,电容电压波形  
Fig 9 Capacitor voltage with GVSC

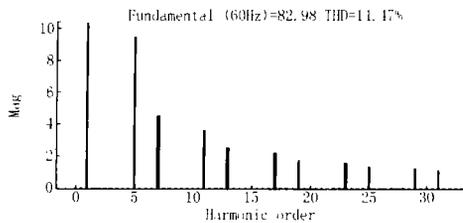


图 10 VSC控制下 APF时,  $I_{sa}$ 的谐波频谱  
Fig 10 Harmonic spectrum s of  $I_{sa}$  with VSC

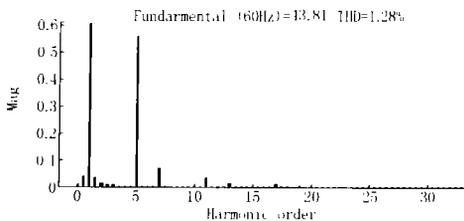


图 11 GVSC控制下 APF时,  $I_{sa}$ 的谐波频谱  
Fig 11 Harmonic spectrum s of  $I_{sa}$  with GVSC

从图 10、图 11的谐波频谱对照图可知,在 VSC 控制下,5、7、11、13含量分别为 9.43%、4.56%、3.6%、2.56%,THD = 14.47%;在 GVSC控制下,5、7、11、13含量分别为 0.56%、0.07%、0.03%、0.01%,THD = 1.28%,明显在 GVSC控制下主要次谐波含量指数较低。

定性地比较了图 5~9的波形和定量地分析了图 10、11的谐波含量,都说明了本文设计的灰色滑模控制更有效地改善了谐波补偿效果,同时也大大增强了电容电压的稳定性。

## 5 结论

本文主要结合了灰色预测理论和变结构控制理论的优点,为三相电力滤波器设计了一种新型的灰色变结构控制器(GVSC)。仿真结果表明了控制效果较好。由此得出结论:

1) 与文献[4]的控制方法比较,本文设计的灰

色变结构控制有更好的补偿效果,APF的直流电容电压更稳定。

2) 灰色预测需要采集数据少,且不需要知道系统的准确的动态模型等优点,具有较大工程实用价值。

3) 在传统 VSC的滑模面附近增设边界层,同时将饱和函数代替传统变结构中符号函数,再通过灰色预测状态来调整滑模控制增益大小,有效地减弱了传统变结构控制的“抖动”现象,大大提高了系统的稳定性。

## 参考文献:

- [1] 李江,孙海顺,程时杰,等.基于灰色理论系统的有源滤波器的预测控制[J].中国电机工程学报,2002,22(2):6-10.  
LI Jiang, SUN Hai-shun, CHENG Shi-jie, et al Prediction Control of Active Power Filter Based on the Grey Theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(2): 6-10.
- [2] Singh B N. Sliding Mode Control Technique for Indirect Current Controlled Active Filter[J]. IEEE, 2003: 51-58.
- [3] Cardenas V, Viquez N, Hernandez C. Sliding Mode Control Applied to a 30 Shunt Active Power Filter Using Compensation with Instantaneous Reactive Power Theory[J]. IEEE, 1998: 236-241.
- [4] Singh B, Al-Haddad K, Chandra A. Active Power Filter with Sliding Mode Control[J]. IEE Proceedings—Gener, Transm, and Distrib, 1997, 144(6).
- [5] Radulovic Z, Sabanovic. Active Filter Control Using a Sliding Mode Approach[J]. IEEE-PESC, 1994: 177-182.
- [6] Labben Ben Braiek M, Fnaiech F. Comparison of Direct Current Control Techniques for a Three-phase Shunt Active Power Filter[J]. IEEE, 2002: 1217-1222.
- [7] Singh B N, Chandra A, Al-Haddad K. Performance Comparison of Two Current Control Techniques Applied to an Active Filter [A]. 8th International Conf on Harmonics and Quality of Power.
- [8] Kikuchi H. Active Power Filter Toshiba GTR Module (IGBT) Application Notes[Z]. 1992: 44-45.
- [9] 邓聚龙.灰色系统理论教程[M].武汉:华中理工大学出版社, 2002.  
DENG Ju-long. The Course on Grey System Theory[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2002.
- [10] 高为炳.变结构控制的理论及设计方法[M].北京:科学出版社, 1996.  
GAO Wei-bing. Variable Structure Control Theory and Design [M]. Beijing: Science Press, 1996.
- [11] 姚琼荟,等.变结构控制系统[M].重庆:重庆大学出版社, 1997.  
YAO Qiong-hui, et al. Variable Structure Control System [M]. Chongqing: Chongqing University Press, 1997.

收稿日期: 2005-08-16; 修回日期: 2005-10-14

(下转第 63 页 continued on page 63)

## 参考文献:

- [1] 肖晋宇,谢小荣,李建,等. 电网广域动态安全监测系统及其动态模拟试验[J]. 电网技术, 2004, 28(6): 5-9.  
XIAO Jin-yu, XIE Xiao-rong, LI Jian, et al. Wide-area Dynamic Security Monitoring System for Power Network and Its Dynamic Simulation[J]. Power System Technology, 2004, 28(6): 5-9.
- [2] Phadke A G Synchronized Phasor Measurements—a Historical Overview[A]. Proceedings of IEEE/ PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002. 476-479.
- [3] 张广渊,胡俊辉,王春莉. 工业以太网与现场总线的融合[J]. 机械设计与制造, 2003, (3): 28-29.  
ZHANG Guang-yuan, HU Jun-hui, WANG Chun-li. Merging Industrial Ethernet and Fieldbus[J]. Machinery Design & Manufacture, 2003, (3): 28-29.
- [4] 海涛,高翔,徐嫣. 基于高速以太网的现场总线控制系统[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2004, 29(9): 69-71.  
HAI Tao, GAO Xiang, XU Yan. Fieldbus Control System Based on High Speed Ethernet[J]. Journal of Guangxi University, Nat & Sci, 2004, 29(9): 28-29.
- [5] 季坤,王克英,蔡泽祥. 广域测量系统中 PMU 的通信方案[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(3): 77-80.  
JI Kun, WANG Ke-ying, CAI Ze-xiang. Communication Scheme of Phasor Measurement Unit in WAMS[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(3): 77-80.
- [6] TEXAS Instruments TMS320F2810 & TMS320F2812 Digital Signal Processors Data Signal Processors Data Manual[Z]. Literature Number: SPRS1741 2001-Revised, 2003.
- [7] IEEE Std 1344-1995 (R2001), IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems[S].

收稿日期: 2005-07-13

作者简介:

汤 娇 (1981 - ),男,硕士研究生,研究方向为电力系统保护、控制与自动化; E-mail: tj97405@163.com

王克英 (1963 - ),男,教授,从事微型计算机在电力系统测量和控制中的应用研究;

邓岳华 (1973 - )男,电气工程师,研究方向为电力系统运行与控制。

## Application of eCAN and Ethernet in phasor measurement units

TANG Jiao<sup>1</sup>, WANG Ke-ying<sup>1</sup>, DENG Yue-hua<sup>2</sup>

(1. Electric Power College, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Nanhai Power Supply Bureau, Foshan 528000, China)

**Abstract:** This paper presents a communication scheme combining Enhanced Controller Area Network (eCAN) with Industrial Ethernet for Phasor Measurement Unit (PMU). It is developed in the form of double CPUs including Digital Signal Processor (DSP) and high-speed AVR MCU. The hardware and software designs of eCAN are discussed, embedded gateway based on high-performance digital signal processor TMS320LF2407 is designed to connect CAN with industrial Ethernet. The real-time communication between local computer and remote control center is realized.

**Key words:** phasor measurement unit (PMU); eCAN; industrial Ethernet; CAN/Ethernet gateway

(上接第 52 页 continued from page 52)

作者简介:

杜继伟 (1977 - ),男,硕士,主要研究方向为电力系统非线性控制及继电保护; E-mail: hunter-djw@163.com

毕伟东 (1969 - ),男,硕士,高级工程师,从事电力工程建设电气设备、继电保护及电力通信技术方面的研究;

王 奔 (1960 - ),男,教授,主要研究方向为电力系统非线性及变结构控制。

## Design of grey variable structure controller for three-phase active power filter

DU Ji-wei<sup>1</sup>, BI Wei-dong<sup>2</sup>, WANG Ben<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. Nanyang Power Company, Nanyang 473013, China)

**Abstract:** In this paper, the grey prediction is integrated into the VSC to develop a grey variable structure controller (GVSC) for a three-phase active power filter (APF). The principle of this controller is adding a boundary layer around the sliding surface of conventional variable structure control, the function saturation replacing the function sign, and next state is predicted by grey theory to regulate the gain of sliding mode control ahead of time. Chattering of conventional variable structure is reduced effectively. Simulation results verify that APF with GVSC has better compensation performance and capacitor voltage has better stability.

**Key words:** APF; GVSC; compensation performance; stability