

# 并联型有源滤波器复合控制方法的仿真研究

李 刚<sup>1</sup>, 沈 沉<sup>2</sup>, 周谦之<sup>1</sup>

(1. 安徽工业大学 电气信息学院, 安徽 马鞍山 243002;

2. 清华大学 电机系 电力系统国家重点实验室, 北京 100084)

**摘要:** 在并联型有源电力滤波器(APF)的控制方法中,滞环控制方法响应速度快,受负载参数变化影响小,但开关频率不固定,直流侧电压的稳定性不好。空间电压矢量控制(SVPWM)方法直流电压利用率高,直流侧电压稳定性好,但是负载参数变化影响空间电压矢量控制性能。提出一种将空间电压矢量控制和定频滞环控制相结合的 APF 电流控制方法,分析了 SVPWM 控制、单相和三相定频滞环电流控制以及空间电压矢量和定频滞环复合控制方法。并使用 PSCAD/EMTDC 软件对所述控制方法作了仿真,仿真研究表明,所提出的复合控制方法可使 APF 具有良好的静态稳定性和动态响应速度。

**关键词:** 有源电力滤波器; 空间电压矢量; 定频滞环; 复合控制

**中图分类号:** TM 761<sup>+</sup>.12

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1006-6047(2007)10-0064-05

近年来,有源电力滤波器(APF)作为滤除电网谐波的新型电力电子装置得到快速发展,它可以动态抑制谐波且响应速度快。

并联型 APF 的基本原理是向电网注入一个与负荷谐波电流大小相等、方向相反的电流,从而达到补偿的目的<sup>[1]</sup>。它要求可以对频率和大小都变化的谐波进行补偿;对补偿对象的变化有极快的响应速度;补偿谐波时,储能元件电容上的电压保持稳定。

目前,APF 电流控制常用的方法有空间电压矢量控制(SVPWM)、滞环比较控制等。空间矢量控制直流电压利用率高,同时直流侧电压的稳定性好,但是负载参数变化影响空间电压矢量控制方法的性能。滞环控制实现简单,精度较高且响应速度快,同时受负载参数变化的影响较小,鲁棒性好,但开关频率不固定,同时直流侧电压的稳定性不如空间电压矢量控制。为了提高 APF 的性能,在对国内外已有的滞环电流控制和空间电压矢量控制进行研究的基础上,提出了将空间电压矢量和定频滞环电流控制相结合的复合控制策略,以使 APF 具有空间电压矢量控制和滞环电流控制时的双重优点。

## 1 APF 及其电流控制方法

### 1.1 APF

一个典型的基于电压源逆变器的并联型 APF 的基本框图如图 1 所示。

图中的测量电路计算出 APF 应该输出的补偿电流  $i_c$ , 控制电路则根据实际输出的补偿电流  $i_c$  与指令电流  $i_c^*$  之间的差值确定电力电子元器件的有效

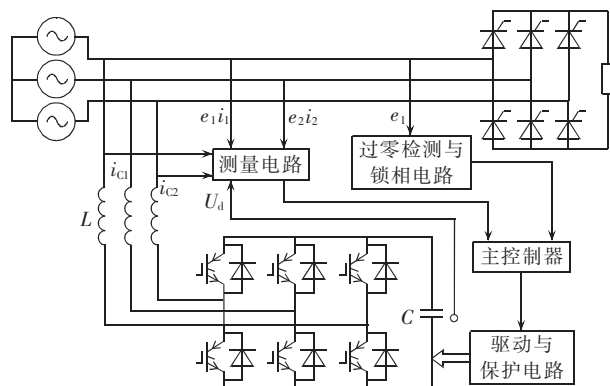


图 1 APF 原理图

Fig.1 Principle of APF

开关状态。因此可知,检测出补偿电流以后,控制电路的控制方法将是决定 APF 性能的关键环节。

### 1.2 空间电压矢量控制<sup>[2-3]</sup>

在传动领域,空间电压矢量控制得到了很好的应用,它以磁链跟踪控制为目标,具有直流电压利用率高、电流谐波小、稳态特性好等优点<sup>[4]</sup>。文献[5-6]将空间矢量控制方法应用在 APF 领域,说明空间电压矢量控制方法完全可以有效地控制 APF。图 2 为等效的三相电压源逆变器的结构(假设交流侧中性点对地绝缘)。

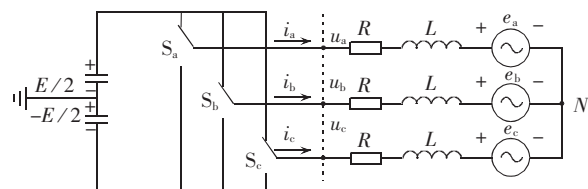
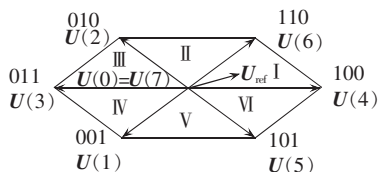


图 2 三相逆变器的结构

Fig.2 Structure of three-phase inverter

图 2 中的功率晶体管的开关状态一共有 8 个。假定晶体管导通为 1,截止为 0,则电压空间矢量可以表示为(000)、(001)、(010)、(011)、(100)、(101)、(110)、(111)这 8 种基本工作状态。空间电压矢量  $U_x$  的分布如图 3 所示。在每一个区间里,选择相邻的 2 个电压矢量和零矢量来合成每个扇区内的任何电压矢量。

图 3  $U_x$  的空间分布Fig.3 Space distribution of  $U_x$ 

使用仿真软件 PSCAD/EMTDC 对 SVPWM 控制方法进行了仿真。图 4 为在仿真环境中 SVPWM 控制单元的实现图,开关器件的开关频率为 10 kHz。谐波负荷电流波形如图 5 所示,仿真结果如图 6 所示。

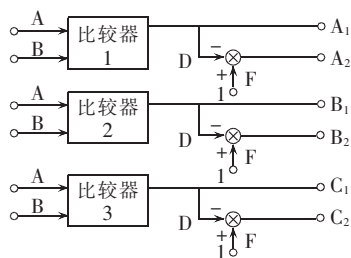


图 4 SVPWM 控制仿真实现图

Fig.4 Simulative implementation of SVPWM control

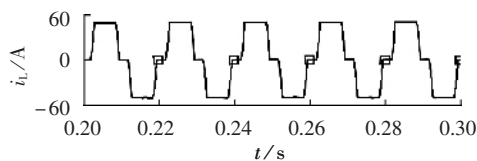
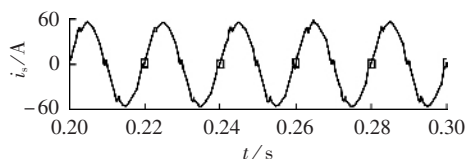
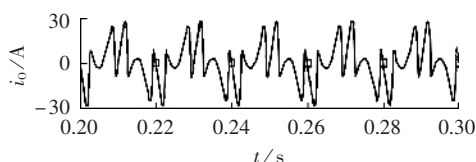


图 5 谐波负荷的电流波形

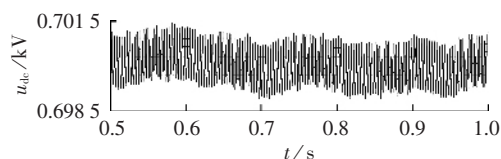
Fig.5 Current waveform of harmonic load



(a) 补偿后的电源电流波形



(b) APF 的输出电流波形



(c) 直流侧电压波形

图 6 空间矢量仿真波形

Fig.6 Simulative waveforms of space vector control

### 1.3 定频滞环电流控制

滞环电流控制是一种简单的 Bang-Bang 控制,它的优点是响应速度快、准确性高,并且无须了解负载参数。但是,由于滞环宽度的固定,导致开关频率变化很大。近年来,保持开关频率恒定的定频滞环控制方法得到了广泛应用。

#### 1.3.1 单相系统定频滞环电流控制

传统的滞环电流控制开关频率是变化的<sup>[7-8]</sup>,其变化的范围取决于滞环的宽度、直流侧电压、负载的阻抗及变化的占空比等因素。为了实现电流滞环控制的定开关频率的目标,需要增加一个固定频率的时钟信号作为基准信号<sup>[9-10]</sup>。图 7 为所提出的方案的基本结构图。

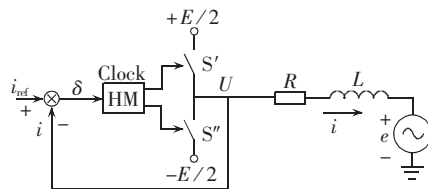


图 7 定频滞环控制基本方案图

Fig.7 Basic scheme of fixed-frequency hysteresis control

当电流误差  $\delta$  到达上部的滞环带时,逆变器开关  $S''$  导通( $S'$  关断),而当电流误差  $\delta$  到达下部的滞环带的时候, $S'$  导通( $S''$  关断)。增加一个时钟信号后,当时钟信号的上升沿到来时, $S'$  导通(除非此前电流误差  $\delta$  已提前到达滞环带的下部)。同理,当时钟信号的下降沿到来时,强迫  $S''$  导通。图 8 为定频滞环控制的基本原理图。这就基本实现了电流滞环控制开关频率的固定,因为它保证了滞环控制的开关频率和时钟信号的频率基本同步。这样,滞环的宽度  $\beta$  将等效为发生了变化。在这里需要特别指出的是时钟信号的频率应该高于没有时钟信号时的开关管的最大开关频率,否则时钟信号将失效。

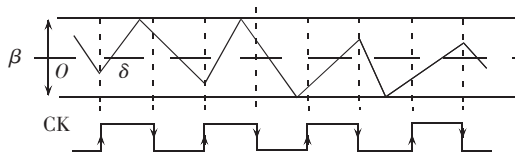


图 8 定频滞环控制原理图

Fig.8 Principle of fixed-frequency hysteresis control

#### 1.3.2 三相系统定频滞环电流控制<sup>[11-15]</sup>

和单相系统不同,典型的三相系统控制过程中由于三相开关控制不独立,相互干扰,因此不能直接采用上面的定频滞环电流控制。需要消除三相之间的相互干扰,即通过解耦的方式使得每相的控制等同单相系统,从而可以应用定频滞环电流控制。图 9 为三相定频滞环电流控制基本方案图。

使用仿真软件 PSCAD/EMTDC 对定频滞环控制方法仿真。图 10 为在仿真环境中定频滞环的实现图,滞环带为  $-4 \sim 4$  A,开关频率在 10 kHz,仿真结果如图 11 所示。

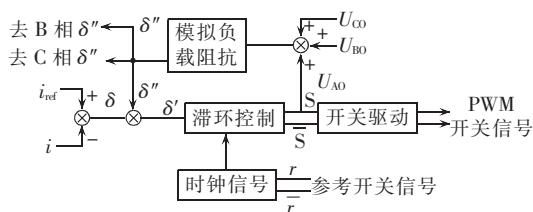


图 9 三相定频滞环电流控制基本方案图

Fig.9 Basic scheme of three-phase fixed-frequency hysteresis control

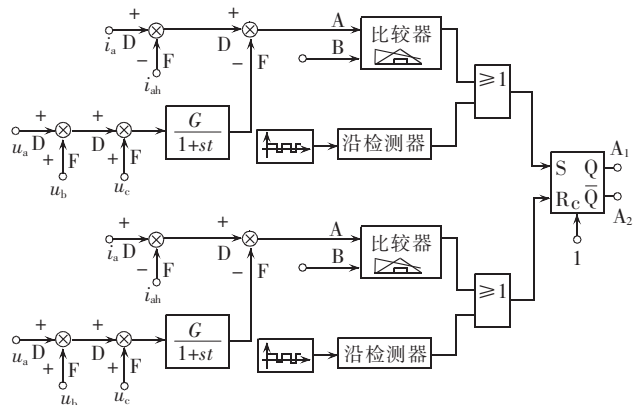


图 10 定频滞环仿真实现图

Fig.10 Simulative implementation of fixed-frequency hysteresis control

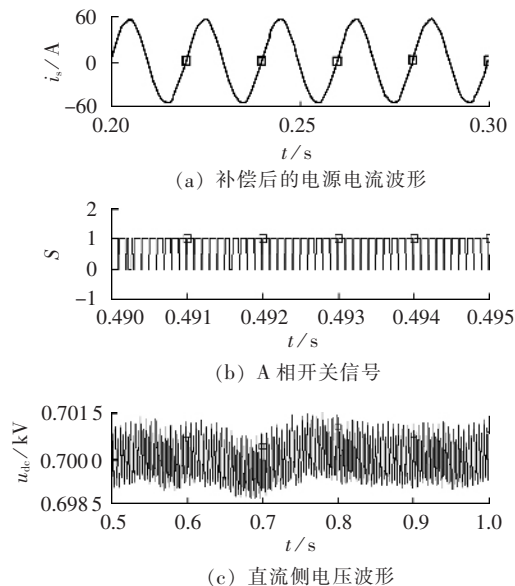


图 11 定频滞环控制仿真波形

Fig.11 Simulative waveforms of fixed-frequency hysteresis control

#### 1.4 定频滞环和空间矢量的复合控制

从对图 6(a)和图 11(a)的对比中可看出,使用滞环控制方法,电网侧电流总的谐波失真率 THD=2.3%;使用空间电压矢量控制方法,电网侧电流 THD=4.5% (负荷为二极管单相桥整流器,负荷电流的 THD=22%)。从对图 6(c)和图 11(c)的对比可看出,使用滞环控制方法,直流侧电压的最大峰值与最小峰值之间的差大约为 2.5 V;使用空间电压矢量控制方法,

直流侧电压的最大峰值与最小峰值之间的差为 1.8 V;这里利用最大峰值与最小峰值之差来定性描述直流侧电压的稳定性,间接表述稳态特性(其中仿真波形图 6、11、13~16 中  $u_{dc}$  的单位为 kV)。因而,空间矢量控制方法具有很好的静态性能,滞环控制方法具有良好的动态响应性能。为了同时具有空间电压矢量控制和定频滞环控制方法的优点,采用两者的复合方法控制 APF 的输出电流。

根据输出电流与参考电流之间的误差  $\delta$  的大小决定采用何种控制方法,具体的操作规则如下:

a.  $|\delta| \leq \Delta$  时,采用空间电压矢量控制方法,减小系统直流侧电压的波动,提高直流电压的利用率;

b.  $|\delta| > \Delta$  时,采用定频滞环控制方法,使输出电流  $i$  能够最快地跟踪参考电流  $i^*$  的变化,达到快速减小  $\delta$  的目标,提高系统的动态性能。

简而言之,复合控制方法本质上就是一种切换控制,它根据检测到的电流误差值与某一给定值之间的关系,最终确定采用滞环控制或者空间电压矢量控制。通过上面的论述可知,  $\Delta$  越小,系统的跟随特性就越好;  $\Delta$  越大,则系统的稳态性能就越好。在实际运用过程中,可以根据系统的要求选择合适的  $\Delta$ 。

为了验证复合控制方法的有效性,使用仿真软件 PSCAD/EMTDC 对复合控制方法仿真。图 12 为复合控制在仿真环境中的简图实现,开关频率为 10 kHz,滞环控制的偏差带为  $-4 \sim 4$  A,在负载没有突变的情况下,仿真结果如图 13 所示。可看出,使用复合控制方法,电网侧电流 THD=3.3%,它的值界于 2 种控制方法的 THD 值之间,同时直流侧电压稳定在 700 V,满足 APF 系统的要求。

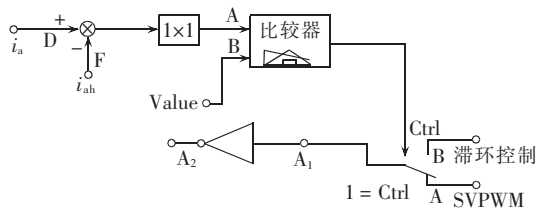


图 12 复合控制仿真实现图

Fig.12 Simulative implementation of hybrid control

另外在 0.8 s 时,负载突变为原来的 2 倍,分别对滞环控制、空间电压矢量控制和复合控制进行仿真,仿真结果如图 14~16 所示。根据图 14(a)和图 16(a)可看出,0.8 s 负载开始发生突变时,图 14(a)直流侧电压到达稳态值的时间  $t_1=1.199$  s,调整时间为 0.399 s;图 16(a)直流侧电压到达稳态值的时间  $t_1=1.099$  s,调整时间为 0.299 s。为了直观地说明问题,把仿真图中的横纵坐标进行缩放后观察,从图 14(c)和图 16(d)可看出,图 16(d)中的直流侧电压值首先经过设定值 700 V。因此,复合控制方法的调整时间比空间电压矢量方法的调整时间要短。

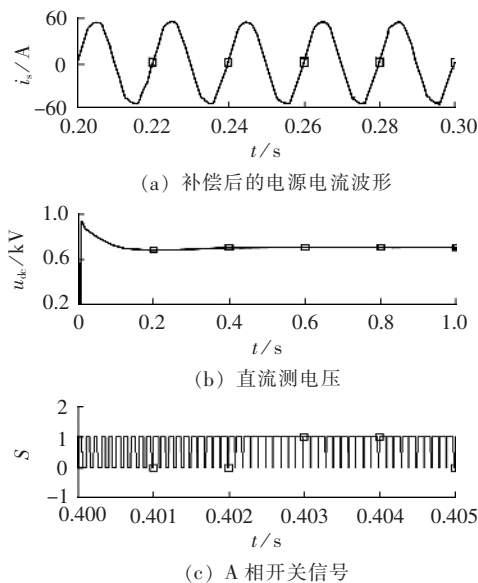


图 13 复合控制仿真波形

Fig.13 Simulative waveforms of hybrid control

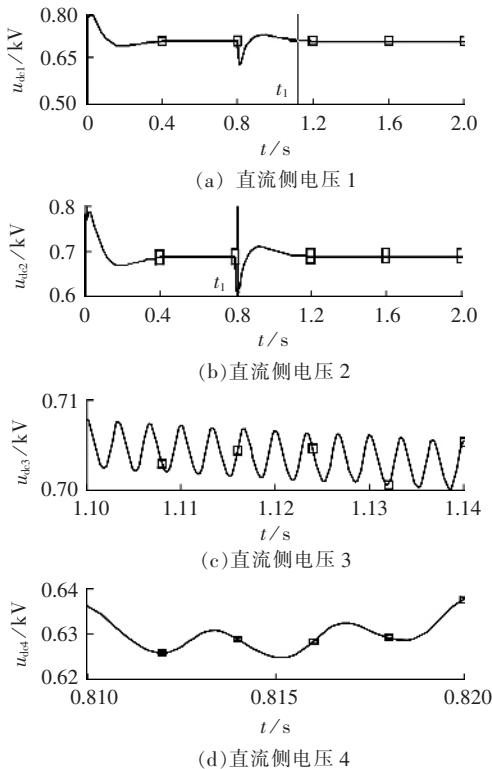


图 14 空间矢量控制直流侧电压波形

Fig.14 DC side voltage waveforms of space vector control

由图 14(b)和图 16(b)可见,0.8 s 负载开始发生突变时,直流侧电压开始下降。图 14(b)直流侧电压最低点的值  $U_1=626\text{ V}$ ,电压跌落 74 V;图 16(b)直流侧电压最低点的值  $U_1=635\text{ V}$ ,电压跌落 65 V。同样,从图 14(d)和图 16(e)可见,图 16(e)中的直流侧电压值最低点要高于图 14(d)中的直流侧电压最低点。因此,复合控制方法的电压跌落值比空间电压矢量方法的电压跌落值小。从负载突变到稳态时,

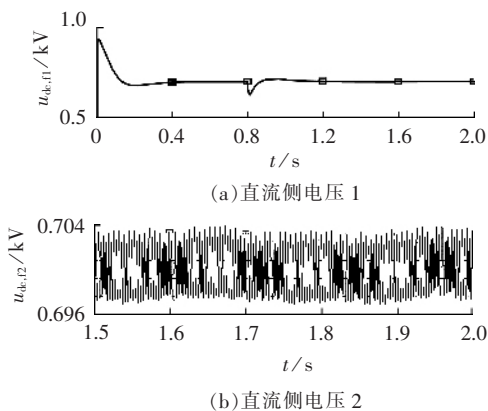


图 15 定频滞环控制直流侧电压波形

Fig.15 DC side voltage waveforms of fixed-frequency hysteresis control

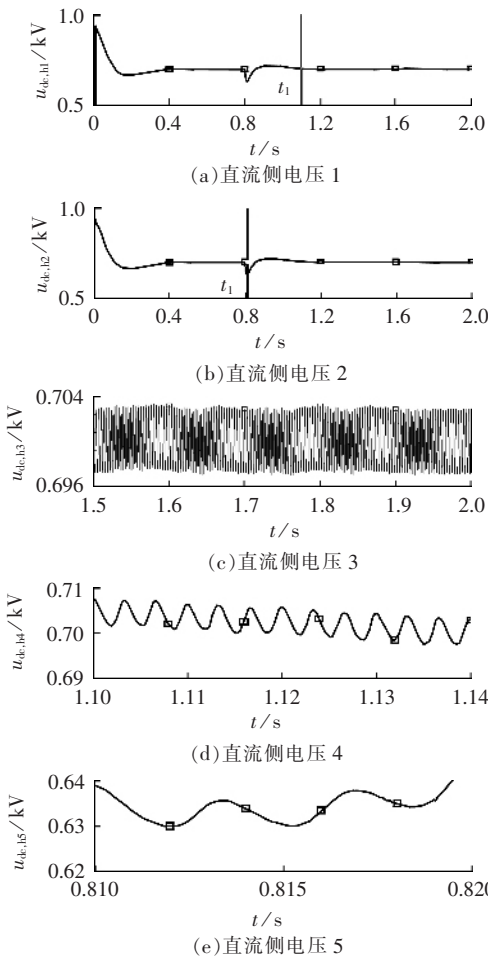


图 16 复合控制直流侧电压波形

Fig.16 DC side voltage waveforms of hybrid control

图 15(b)直流侧电压的最大峰值与最小峰值之间的差为 6.4 V;图 16(c)直流侧电压的最大峰值与最小峰值之间的差为 3.9 V。因此,复合控制方法的直流侧电压的稳定性高于定频滞环控制方法。根据分别在负载没有突变及负载发生突变的 2 种情况下的仿真结果分析可知,复合控制方法保持了滞环控制动态响应快、跟随特性好的优点和空间矢量控制稳态特性好的优点,能够更好地满足 APF 系统的要求。

## 2 结论

为满足有源滤波器高性能的输出电流的要求,提出一种新的电流控制方案——基于定频滞环控制和空间矢量控制的复合控制方法。仿真结果证明:

a. 使用新的控制方法可以有效地控制有源滤波器的输出电流,维持直流侧电压稳定,同时基本保证了开关频率的稳定;

b. 与单独使用定频滞环控制或空间矢量控制相比,新的控制方法在负载发生突变时,综合的动态性能更好。

## 参考文献:

- [1] 王兆安,杨君,刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京:机械工业出版社,2002.
- [2] 祝琴,钟祥微,章鸿. SVPWM 原理及其 Simulink 仿真[J]. 电机电器技术,2005(4):49-51.  
ZHU Qin,ZHONG Xiang-wei,ZHANG Hong. The principle of SVPWM and simulation in Simulink[J]. Appliances Technology, 2005(4):49-51.
- [3] BROECK V H W,SKUDELY H C,VSTAKE G. Analysis and realization of a pulsewidth modulator based on voltage space vector[J]. IEEE Trans on Ind Appl,1988,24(1):142-150.
- [4] 熊健,康勇,张凯. 电压空间矢量调制与常规 SPWM 的比较研究[J]. 电力电子技术,1999,33(1):25-28.  
XIONG Jian,KANG Yong,ZHANG Kai. Comparison study of voltage space vector PWM and conventional SPWM[J]. Power Electronics,1999,33(1):25-28.
- [5] 姜俊峰,刘会军. 空间矢量控制在有源滤波器中的应用[J]. 继电器,2004,32(9):27-30.  
JIANG Jun-feng,LIU Hui-jun. Application of SVPWM strategy in active power filter[J]. Relay,2004,32(9):27-30.
- [6] 田大强,蒋平,唐国庆. 空间矢量控制在有源滤波器中的应用研究[J]. 电力电子技术,2003,37(8):1-3.  
TIAN Da-qiang,JIANG Ping,TANG Guo-qing. Adaptive SVPWM control strategy in active power filter[J]. Power Electronics,2003,37(8):1-3.
- [7] 张代润,刘红萍. 单相有源电力滤波器的滞环控制策略分析[J]. 电机与控制学报,1998(9):153-157.  
ZHANG Dai-run,LIU Hong-ping. Analysis of hysteresis control schemes for active power filters[J]. Electric Machines and Control,1998(9):153-157.
- [8] 曾江,焦连伟,倪以信,等. 有源滤波器定频滞环电流控制新方法[J]. 电网技术,2000,24(6):1-8.  
ZENG Jiang,JIAO Lian-wei,NI Yi-xin,et al. A new current control method for active power filters[J]. Power System Technology,2000,24(6):1-8.
- [9] ANUNCIADA A V,SILVA M M. A new current mode control process and applications [J]. IEEE Trans on PE,1991,6(4):601-610.
- [10] MALESANI L,ROSSETTO L,TOMASIN P. Digital adaptive hysteresis current control with clocked commutation and wide operating range[J]. IEEE Trans on Ind Appl,1996,32(2):316-325.
- [11] MALESANI L,TENTI P. A novel hysteresis control method for current-controlled voltage-source PWM inverters with constant modulation frequency[J]. IEEE Trans on Ind Appl,1990,26(1):88-92.
- [12] MALESANI L,MATTAPELLI P,TOMASIN P. High-performance hysteresis modulation technique for active filters[J]. IEEE Trans on PE,1997,12(5):876-884.
- [13] CHIARELLI C,MALESANI L,PIRONDINI S. Single-phase, three-level, constant frequency current hysteresis control for UPS applications[C]//Power Electronics and Applications,1993, Fifth European Conference. Brighton,UK:IAS,1993:180-185.
- [14] MALESANI L,MATTAPELLI P,TOMASIN P. Improved constant-frequency hysteresis current control of VSI inverters with simple feed-forward bandwidth prediction [C]//Thirtieth IAS Annual Meeting,1995. Orlando,FL,USA:IAS,1995:2633-2640.
- [15] YAO Qun-ying. HOLMES D G. A simple, novel method for variable-hysteresis-band current control of a three phase inverter with constant switching frequency [C]// Industry Applications Society Annual Meeting,1993. Toronto,Canada:IAS,1993:1122-1129.

(责任编辑:汪仪珍)

## 作者简介:

李刚(1980-),男,安徽马鞍山人,硕士研究生,研究方向为电力电子技术(E-mail:hillmanligang@ahut.edu.cn);  
沈沉(1970-),男,四川成都人,副教授,博士,研究方向为电力系统分析、电力网格以及电力电子技术的应用;  
周谦之(1945-),女,湖南长沙人,教授,研究方向为电力电子技术及其在电源、传动和电网治理领域中的应用研究。

## Simulative study on hybrid control of shunt active power filter

LI Gang<sup>1</sup>, SHEN Chen<sup>2</sup>, ZHOU Qian-zhi<sup>1</sup>

(1. School of Electric Engineering & Information, Anhui University of Technology, Maanshan 243002, China; 2. State Key Lab of Power Systems, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** For the control methods of shunt APF(Active Power Filter), the hysteresis control has faster response and less influence of load parameter variation, but unfixed switching frequency and worse stability of DC voltage, while the SVPWM(Space Vector Pulse Width Modulation) control has higher DC voltage utilization ratio and better DC voltage stability, but more influence of load parameter variation on its performance. A hybrid method combining the space voltage vector control and the fixed frequency hysteresis control is used to control the output current of APF. The SVPWM control, the single-phase & three-phase fixed-frequency hysteresis control and the hybrid control are analyzed and simulated with PSCAD/EMTDC. Results show that the hybrid method has better static stability and quicker dynamic response.

**Key words:** active power filter; space voltage vector; fixed-frequency hysteresis; hybrid control