

## 基于随机变环宽带的滞环电流控制策略

肖丽平<sup>1,2</sup>, 童朝南<sup>2</sup>

- (1. 北京联合大学 北京市信息服务工程重点实验室, 北京 100101;
2. 北京科技大学 自动化学院, 北京 100083)

**摘要:** 提出一种基于随机变环宽带的滞环电流控制策略. 该策略是在固定的滞环带内增加一随机变环宽带, 调节电流变化率, 以达到开关频率固定的目的. 该方法利用开关的另一种状态得到补偿电流的误差信息, 并给出变环宽带. 由于随机函数的引入, 使得电流频谱分布拉宽, 降低了谐波幅值和开关损耗. 仿真结果验证了所提出控制策略的有效性.

**关键词:** 有源滤波器; 随机滞环带; 固定开关频率; 变环宽控制; 开关损耗

**中图分类号:** TP273

**文献标志码:** A

## Hysteretic current control method with random variable bandwidth

XIAO Li-ping<sup>1,2</sup>, TONG Chao-nan<sup>2</sup>

- (1. Beijing Key Laboratory of Information Service Engineering, Beijing Union University, Beijing 100101, China;
2. College of Automation, University of Science & Technology Beijing, Beijing 100083, China. Correspondent: XIAO Li-ping, E-mail: zhuandniu@126.com)

**Abstract:** A constant hysteresis-band current control strategy based on the random variable bandwidth is proposed. An extra random hysteresis-band is added in the constant hysteresis-band. It is introduced for adjusting the variation of current to achieve constant switching frequency. Depending on the switch states, some information of the derivative of the current error is used for predicting an bandwidth with the random function which can widen the range of switching frequency, so as to reduce the harmonic distortion rate and decrease the switching loss. Simulation results show the effectiveness of the control strategy.

**Key words:** active power filter; random-band; fixed switching frequency; variable bandwidth control; switching loss

## 0 引言

有源电力滤波器(APF)作为解决电能质量问题的有效设备<sup>[1-2]</sup>, 已成为广大学者研究的热点. 其中电流跟踪控制方法是APF装置中的关键问题之一, 目前应用较多的有滞环电流跟踪法<sup>[3-8]</sup>. 该方法控制简单, 动态性能好, 受负载参数变化的影响较小, 具有良好的鲁棒性, 电流跟踪误差可控制在指定范围内(误差可以很小). 滞环电流跟踪法主要有<sup>[9-12]</sup>: 传统定频滞环控制, 网侧电压叠加的变环宽控制, 定频的变环宽控制, 不对称环宽控制以及空间矢量锁相环相结合的滞环电流控制方法等.

传统的滞环电流控制技术, 由于带宽恒定, 会导致在基频时期开关频率不固定, 变化范围大, 输出电压中的谐波

分量不含特定频率<sup>[13]</sup>, 滞环宽度对开关损耗与控制精度的影响互相矛盾, 而且该方法直流侧电压的稳定性不如空间电压矢量容易控制. 因此, 有必要通过适当的改进来完善其性能.

本文采用改进的随机变环宽带滞环电流控制方法, 通过在固定环宽内引入随机环宽带, 减小电流的变化率, 以达到固定开关频率的目的; 同时利用该开关状态时可得补偿电流的误差信息而给出合理的变环宽带, 可使开关频率减小, 并且由于随机函数的引入, 拉宽了补偿电流的频谱分布, 在保证控制精度的同时, 可以减小开关损耗.

## 1 电流控制方法

### 1.1 传统电流滞环控制原理

图1给出了采用传统滞环电流跟踪控制方法

收稿日期: 2013-07-15; 修回日期: 2014-02-11.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61271369); 北京市教委科技计划面上项目(KM201311417002).

作者简介: 肖丽平(1973-), 女, 博士, 从事电能质量、控制理论的研究; 童朝南(1956-), 男, 教授, 博士生导师, 从事过程控制、控制理论等研究.

(HCC)的结构原理. 图1(a)为基本HCC跟踪方法, 可见该方法为闭环控制, 利用实际补偿电流 $i_c$ 与补偿电流参考值 $i_c^*$ 相比较产生的误差( $e = i_c - i_c^*$ )来控制逆变器的开关. 其中滞环带宽决定了开关频率, 同时也决定了控制的精度. 带宽的值越小精度越高, 但开关频率增大, 会引起很大的开关损耗. 因而, 滞环电流控制的关键问题是滞环宽度的选定及开关频率的控制.

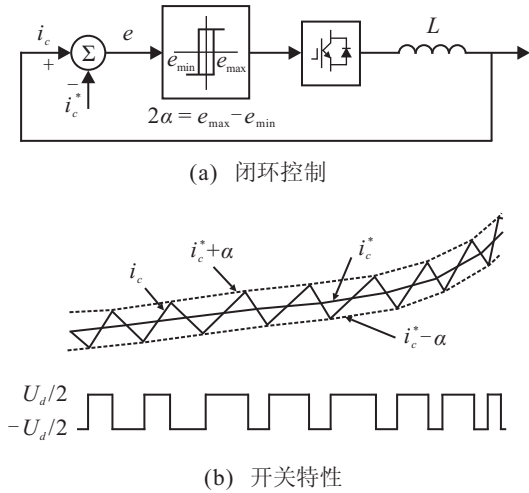


图1 传统滞环电流控制方法

## 1.2 本文提出的电流控制策略

由于传统滞环电流跟踪控制方法中存在开关频率不固定、开关损耗大的缺点, 本文以此为依据确定控制目标: 确保电流跟踪精度, 固定开关频率, 减小开关损耗. 针对控制目标, 以传统有源电力滤波器拓扑结构为平台(如图2所示), 对本文所用方法的开关频率特性进行分析.

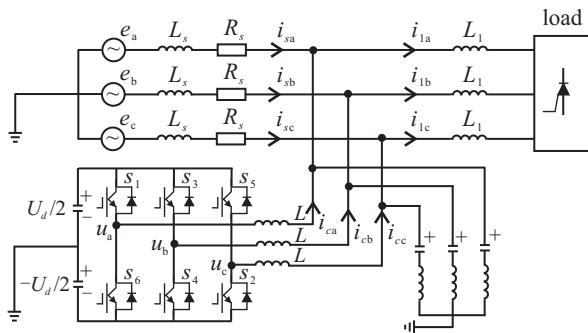


图2 三相四线APF电路原理

图2中, 主电路采用三相电压型逆变器, 开关器件采用IGBT. 传统滞环电流控制方法中, 只有通过上(下)桥臂导通和下(上)桥臂关断两种状态来控制补偿电流以跟随参考补偿电流. 实际上还有一种零状态, 即上桥臂的两个开关管导通, 或下桥臂的开关管导通, 将此状态增加到控制补偿电流中, 可以降低开关频率. 图2中 $e_a, e_b, e_c$ 为三相网侧电压,  $i_{c(a,b,c)}$ 为APF产生的三相补偿电流,  $u_{(a,b,c)}$ 为有源滤波器输出

端电压. 为便于分析, 忽略线路阻抗, 可以列出方程

$$L \frac{di_c}{dt} = u - e. \quad (1)$$

其中

$$e = [e_a \ e_b \ e_c]^T,$$

$$u = [u_a \ u_b \ u_c]^T.$$

从而得到本文所用各状态方程如下:

上桥臂导通, 下桥臂关断

$$\frac{di_{c1}(t)}{dt} = \frac{U_d}{2L} - \frac{e(t)}{L}; \quad (2)$$

仅上(下)桥臂两个开关导通

$$\frac{di_{c2}(t)}{dt} = -\frac{e(t)}{L}; \quad (3)$$

上桥臂关断, 下桥臂导通

$$\frac{di_{c3}(t)}{dt} = -\frac{U_d}{2L} - \frac{e(t)}{L}. \quad (4)$$

其中 $di_{c(1,2,3)}$ 表示 $di_c$ 在3种不同开关状态下的值.

### 1.2.1 开关频率特性

为简化分析, 假设在开关的开关周期中, 电网电压和参考补偿电流的变化率为常数. 图3给出了本文电流跟踪方法的说明. 其中:  $\alpha$ 为滞环半环宽,  $i_c^* + \alpha$ 为滞环带上限,  $i_c^* - \alpha$ 为滞环带下限. 这里增加了一个随机滞环带 $i_c^* + k\alpha$ ,  $k = \alpha_0 + \alpha_1 N(R)$ ,  $k \in [-1, 1]$ .

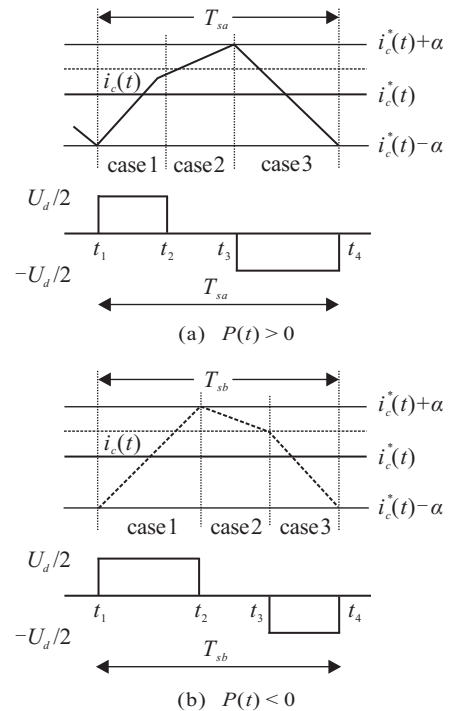


图3 控制策略说明

分析图3(a)可得

$$T_{sa} = \frac{(1+k)\alpha}{\frac{di_{c1}(t)}{dt} - \frac{di_c^*(t)}{dt}} + \frac{(1-k)\alpha}{\frac{di_{c2}(t)}{dt} - \frac{di_c^*(t)}{dt}} - \frac{2\alpha}{\frac{di_{c3}(t)}{dt} - \frac{di_c^*(t)}{dt}}. \quad (5)$$

令

$$\frac{e_s(t)}{L} + \frac{di_c^*(t)}{dt} = P(t), \quad (6)$$

将式(6)代入(5), 可得

$$T_{sa} = \frac{(1+k)\alpha}{\frac{U_d}{2L} - P(t)} + \frac{(1-k)\alpha}{-P(t)} - \frac{2\alpha}{\frac{-U_d}{2L} - P(t)} = \frac{1}{\alpha f_{sa}}. \quad (7)$$

此时  $P(t) > 0$ , 可得

$$\alpha f_{sa} = \frac{[U_d^2 - 4L^2P^2(t)]}{(6LU_d - 2kLU_d)P(t) + (k+1)U_d^2}. \quad (8)$$

同理, 由图 3(b) 可得 (此时  $P(t) < 0$ )

$$T_{sb} = \frac{2\alpha}{\frac{U_d}{2L} - P(t)} + \frac{(1+k)\alpha}{P(t)} + \frac{(k-1)\alpha}{\frac{-U_d}{2L} - P(t)} = \frac{1}{\alpha f_{sb}}. \quad (9)$$

进而可得

$$\alpha f_{sb} = \frac{[U_d^2 - 4L^2P^2(t)]}{(6LU_d + 2kLU_d)P(t) + (k-1)U_d^2}. \quad (10)$$

设  $\alpha f_{sa} = \alpha f_{sb} = \alpha f_s$ , 则

$$k = \frac{[U_d^2 - 4L^2P^2(t) - 6LU_d\alpha f_s]P(t) + U_d^2\alpha f_s}{[2LU_d|P(t)| - U_d^2]\alpha f_s}. \quad (11)$$

观察  $\alpha f_s$  可知, 其是直流侧电压  $U_d$  和电网电压  $e$  的函数, 选择适当的  $k$  值, 可使  $\alpha f_s$  保持尽量小的值, 得到范围较宽的随机滞环带, 而且在实现控制精度的同时固定开关频率。

### 1.2.2 开关损耗分析

开关器件之所以存在开关能耗, 是因为其在开通和关断的瞬间, 电压和电流产生重叠<sup>[14]</sup>. 相关资料表明, 开关能耗主要由流过绝缘栅双极晶体 (IGBT) 的电流  $I_c$ , 及其集射极间电压  $V_{ce}$ , 门极信号 ( $V_{GE}$ 、 $I_G$ 、 $R_G$ ) 和结温决定. 假定开通损耗  $E_{on}$  及关断损耗  $E_{off}$  正比于  $I_c$ , 且在一定范围内正比于  $V_{CE}$  (20%), 则有

$$E_{on} = E_{on-NOM} \times \frac{I_c}{I_{c-NOM}} \times \frac{V_{CE}}{V_{CE-test}}, \quad (12)$$

$$E_{off} = E_{off-NOM} \times \frac{I_c}{I_{c-NOM}} \times \frac{V_{CE}}{V_{CE-test}}, \quad (13)$$

IGBT 的开关损耗为

$$P_{sw} = f_{sw} \times (E_{on} + E_{off}). \quad (14)$$

其中:  $E_{on-NOM}$ 、 $E_{off-NOM}$ 、 $I_{c-NOM}$  为额定值,  $V_{CE-test}$  为测试值. 由式(12)~(14)可知, 合理地降低开关频率及流过 IGBT 的电流可有效减小开关损耗. 因此, 上节中  $\alpha f_s$  的选取在考虑  $\alpha$  的同时应选择最小的  $f_s$  值, 同时在一个周期内合理分布开关的次数, 当电流较小时, 次数可以较多; 而电流较大时, 减少次数, 这样可以降低开关损耗。

### 1.2.3 参考电流的选择

在电流跟踪控制中, 当第 3 种状态下 APF 输出电压  $u = 0$  时,  $u_L(t) = -e_s(t)$ , 因而, 可以从电感电压上获得需补偿电流前一刻的误差信息, 并将其用于参考补偿电流中. 由于对参考补偿电流有一个提前的预知, 可以设定合理的随机滞环带以减小开关频率。

## 2 仿真研究

### 2.1 仿真模型说明

利用 Matlab 软件, 根据图 2 构建三相电压型 PWM 可逆变流器的仿真模型. 仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真模型的参数

电源相电压/V	220
电源频率/Hz	50
电源电阻 $R_s/\Omega$	10
电源电感 $L_s/mH$	2
滤波电容/ $\mu f$	14.7
滤波电感/ $\mu H$	400
传输线路电感 $L_1/mH$	5
补偿电感 $L/H$	0.15
直流电容电压/V	800
负荷	三相不控桥

### 2.2 仿真结果及分析

#### 2.2.1 随机滞环带的效果分析

在式(8)和(10)中, 由于假定电网电压和参考补偿电流的变化率为常数, 可将式(8)和(10)变为

$$k\alpha f_s = N, \quad (15)$$

其中  $N$  为常数, 则有

$$f_s = \frac{N}{k\alpha}. \quad (16)$$

其中

$$k\alpha = \alpha_0 + \alpha_1 N(R) = \alpha_0 \left[ 1 + \frac{\alpha_1}{\alpha_0} N(R) \right], \quad (17)$$

$\alpha_0$ 、 $\alpha_1$  为常数,  $N(R) \in (0, 1)$ .

设环宽  $k\alpha$  为参考补偿电流的 5%,  $I_c^* = 5 A$ , 分别对  $\alpha_1/\alpha_0$  取 0.1、1、10 三个值进行分析, 此 3 个值分别代表环宽变化的小、中、大 3 种情况. 其中环宽取每次变化最大环宽值和最小环宽值的平均值。

当  $\alpha_1/\alpha_0 = 0.1$  时, 有

$$\frac{\alpha_0 + (1+0.1)\alpha_0}{2} = 0.25,$$

$$\alpha_0 = 0.24, \alpha_1 = 0.024.$$

于是

$$k\alpha = 0.24 + 0.024N(R), \quad N(R) \in (0, 1).$$

同理可求得: 当  $\alpha_1/\alpha_0 = 1$  时, 有

$$k\alpha = 0.17 + 0.017N(R), \quad N(R) \in (0, 1);$$

当  $\alpha_1/\alpha_0 = 10$  时, 有

$$k\alpha = 0.04 + 0.004N(R), N(R) \in (0, 1).$$

图 4 给出了上述 3 种情况和传统 HCC 控制的输出电流的仿真曲线. 由仿真结果可得出以下结论: 本文方法的电流频谱优于传统滞环电流方法, 且谐波电流的峰值有所减小; 随着随机滞环带变化的增加, 负载电流的峰值减小, 但开关频率变化是非线性的. 对于中小范围变化的随机滞环带, 负载电流的峰值可降低到可接受的范围内.

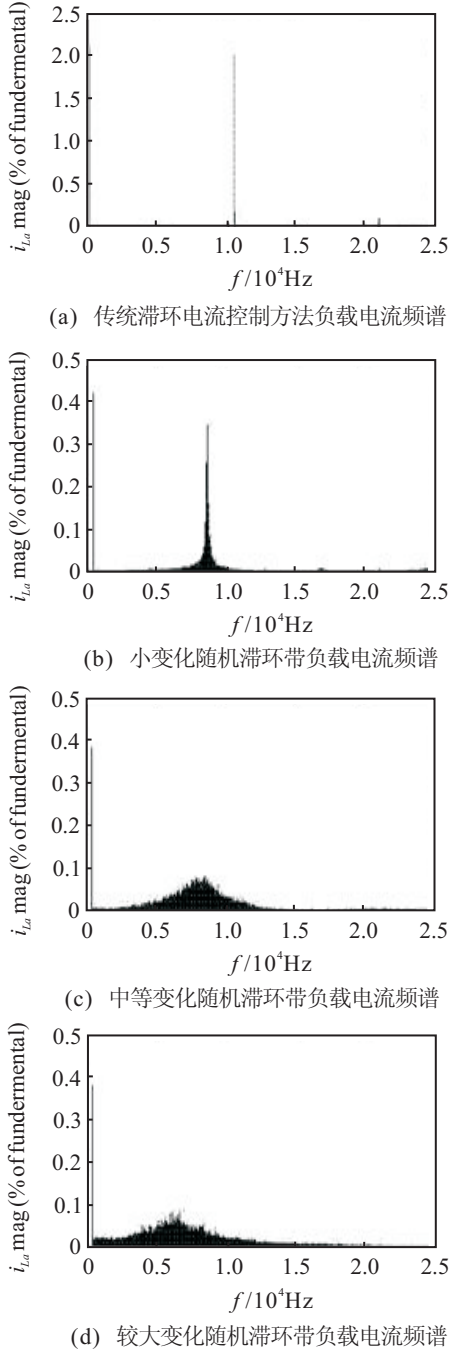


图 4 负载电流仿真频谱分析

### 2.2.2 电流补偿效果及开关损耗分析

对有源电力滤波器部分采用双环控制, 其中外环为电压环, 内环为电流环. 电流环控制部分采用传统

HCC控制方法和随机变环宽带的控制方法进行对比仿真分析. 图 5(a)和图 5(b)分别为传统 HCC 控制和随机变环宽控制的仿真电流波形及对两种方法负载电流(图中为 a 相)进行的 FFT 分析结果. 由仿真结果可知: 在相同电路参数的同一系统中, 采用传统 HCC 控制方法和随机变环宽电流控制方法的电

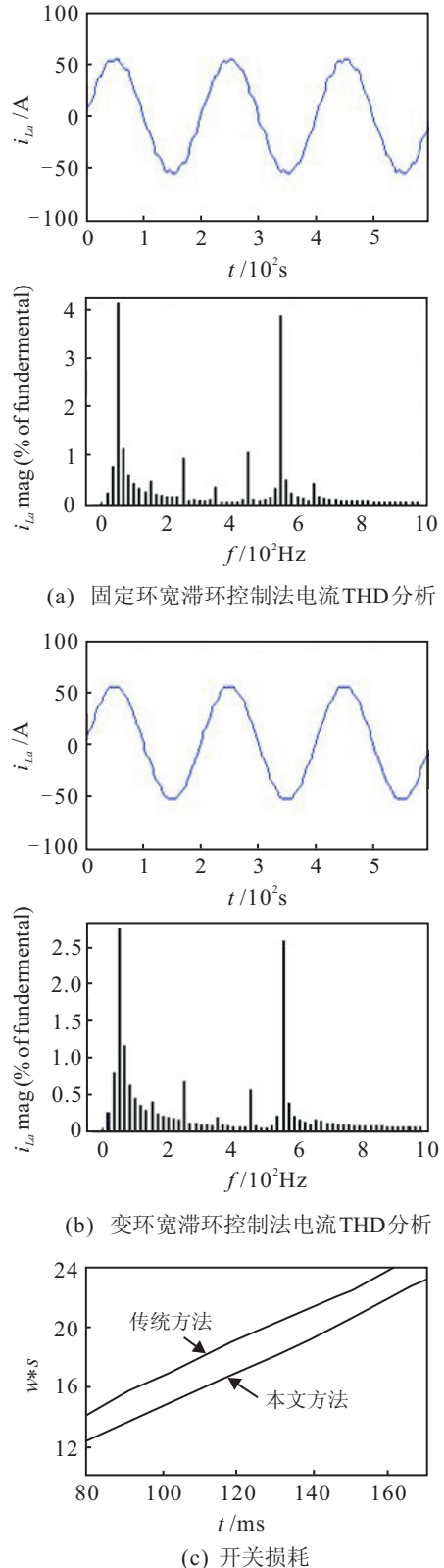


图 5 补偿效果仿真分析

流 THD 分别为 3.98% 和 2.67%, 表明随机变环宽电流控制方法的电流畸变率小于传统控制方法. 因此本文所采用的控制策略是有效的, 且补偿效果较好. 图 5(c) 给出了在相同开关频率、相同控制精度下, 这两种电流控制方法的开关损耗曲线. 结果表明本文方法的开关损耗小于传统控制方式.

### 3 结 论

本文提出了一种基于随机变环宽滞环电流控制方法. 在引入第 3 种开关状态的基础上, 得到了补偿电流前一时刻的误差信息, 将其应用于随机变环宽滞环电流控制中, 并以此建立随机滞环带宽的取值量, 可有效降低开关频率, 且在同一周期内, 由于第 3 种控制状态的引入, 减小了电流的变化率, 可使开关频率固定, 同时减小了开关损耗. 仿真结果表明, 该电流控制方法是有效的, 且易于数字化实现, 控制精度高, 具有良好的应用前景.

### 参考文献(References)

- [1] Akagi H, Nabae A. Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1984, 20(3): 625-630.
- [2] Kouro S, Malinowski M, Gopakumar K, et al. Recent advances and industrial applications of multilevel converters[J]. IEEE Trans on Industrial Electron, 2010, 57(8): 2553-2580.
- [3] Zare F, Nami A. A new random current control technique for a single-phase inverter with bipolar and unipolar modulations[C]. Power Conversion Conf. Nagoya: IEEE, 2007: 149-156.
- [4] 曾江, 刘艳, 叶小军, 等. 有源滤波器的低损耗滞环电流控制方法[J]. 电网技术, 2010, 34(1): 73-78.  
(Zeng J, Liu Y, Ye X J, et al. A novel hysteresis current control for active power filter with low switching loss[J]. Power System Technology, 2010, 34(1): 73-78.)
- [5] Srinivas B K, Nagesh G, Mahesh K M, et al. A modified three-phase four-wire UPQC topology with reduced DC-link voltage rating[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2013, 60(9): 3555-3566.
- [6] Mohd A M R, Nasrudin A R. Neural network and bandless hysteresis approach to control switched capacitor active power filter for reduction of harmonics[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2009, 56(5): 1477-1484.
- [7] Kisun Lee. Advanced control schemes for voltage regulators[D]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2007.
- [8] 李俊, 王大志. 基于谐波线性化的滞环电流优化控制[J]. 控制与决策, 2010, 25(5): 748-752.  
(Li J, Wang D Z. Hysteresis current optimal control based on harmonic linearization[J]. Control and Decision, 2010, 25(5): 748-752.)
- [9] Søren Poulsen, Michael A E Andersen. Hysteresis controller with constant switching frequency[J]. IEEE Trans on Consumer Electronics, 2005, 51(2): 688-693.
- [10] 洪峰, 单任仲, 王慧贞, 等. 一种变环宽准恒频电流滞环控制方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(1): 115-119.  
(Hong F, Shan R Z, Wang H Z, et al. A varied hysteresis-band current controller with fixed switching frequency[J]. Trans of China Electrotechnical Society, 2009, 24(1): 115-119.)
- [11] Rahim Nasrudin Abd, Radzi Mohd Amran Mohd. DSP-based flexible digital hysteresis in switched capacitor active power filter[J]. IEICE Electronics Express, 2010, 7(9): 621-627.
- [12] 郭自勇, 周有庆, 刘宏超, 等. 一种基于电压空间矢量的有源滤波器滞环电流控制新方法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(1): 112-117.  
(Guo Z Y, Zhou Y Q, Liu H C, et al. A novel hysteresis current control method for active power filter based on voltage space vector[J]. Proc of the CSEE, 2007, 27(1): 112-117.)
- [13] 乐健, 姜齐荣, 韩英铎. 基于同一数学模型的三相四线有源电力滤波器的电流滞环控制策略分析[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(10): 85-91.  
(Le J, Jiang Q R, Han Y D. The analysis of hysteresis current control strategy of three-phase four-wire APF based on the unified mathematic model[J]. Proc of the CSEE, 2007, 27(10): 85-91.)
- [14] 许德伟, 朱东起, 黄立培, 等. 电力半导体器件和装置的功率损耗研究[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2000, 40(3): 5-8.  
(Xu D W, Zhu D Q, Huang L P, et al. Power loss analysis of power semiconductor devices and power converters[J]. J of Tsinghua University: Science and Technology, 2000, 40(3): 5-8.)

(责任编辑: 李君玲)