

三相有源电力滤波器控制方法的研究

侯文宝, 王超

中国矿业大学电气工程系, 江苏徐州 (221008)

E-mail: hwb@qq.com

摘 要: 针对典型的三相整流电路对电网产生的影响, 研究易于数字化的 SVPWM 与预测电流算法, 将其应用于并联有源电力滤波器内层跟踪控制中, 给出一种补偿功能较为完善的并联有源电力滤波器及其控制方法。仿真结果表明: SVPWM 与预测电流控制技术用于并联有源滤波控制可以明显改进补偿的动态性能, 提高滤波效果。实验结果证明了方法的有效性。

关键词: 有源电力滤波器, SVPWM, 电流跟踪, 仿真

中图分类号: TM76

1. 引言

近年来电力部门为抑制电网谐波和提高功率因数所采用的主要滤波装置是由电力电容器、电抗器和电阻器适当组合而成, 由 RLC 等元件构成的吸收谐波电流的滤波器通常称为“无源”型滤波器。无源型滤波器虽然有结构简单、运行可靠、维护方便等优点, 但是它同时存在许多不足之处。例如: 1) 体积大; 2) 滤波效果不够理想; 3) 装置损耗大; 4) 在某些条件下, 无源滤波器和系统发生谐振, 易引发事故; 5) 滤波和提高功率因数难以协调。

随着高功率大电流的半导体器件及晶闸管的发展, 使得“有源”型滤波器越来越趋于实用化。有源电力滤波器 (APF) 是一种抑制谐波、补偿无功的新型电力电子装置, 它能克服无源型滤波等传统的谐波抑制和无功补偿方法的缺点, 能对大小和频率同时变化的谐波以及变化的无功进行补偿^[1-2]。

对于有源电力滤波器来说, 其控制可分为两层结构, 内层直接面向电力电子主回路, 实现指令电流或是电压的跟踪, 通常是采用脉宽调制技术 (SPWM) 或是滞环控制, 它的跟踪性能好坏直接影响整个有源滤波器的性能。外层控制是指参考值的计算和直流电容电压控制。本文着重研究了基于电压空间矢量的 APF 电流控制算法, 并将其应用于有源电力滤波器内层跟踪控制中。该方法在 k 采样时刻预测 $k+1$ 采样时刻指令电流, 计算 $k+1$ 采样时刻 APF 参考电压, 通过电压空间矢量脉宽调制 (SVPWM) 方法得出相应控制开关信号, 以达到电流跟踪控制目的。电压空间矢量调制可以提高电流控制精度, 直流电压利用率高; 预测方法的应用则可以消除采样、计算等引起的延时对电流控制的不利影响。

2. 并联型 APF 基本工作原理

典型并联型 APF 的基本原理如图 1 所示。

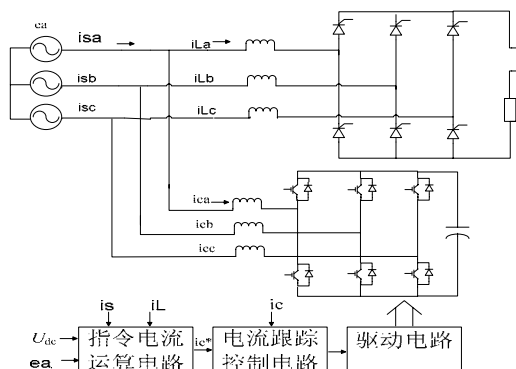


图 1 有源滤波器原理图

APF 系统由指令电流运算电路、电流跟踪控制电路、驱动电路和主电路组成。工作原理是指令电流运算电路计算出负载电流 i_L 中的谐波分量 i_h ，并且加上直流侧电压控制器的输出指令值，得到 APF 应输出的指令电流 i_c^* ；然后电流跟踪控制电路则通过控制逆变器的开关动作使 APF 的输出电流 i_c 基本与 i_c^* 相同，于是电源电流即等于负载电流的基波分量，成为正弦波。

3. APF 电压空间矢量预测电流控制方法

3.1 APF 预测电流控制基本原理

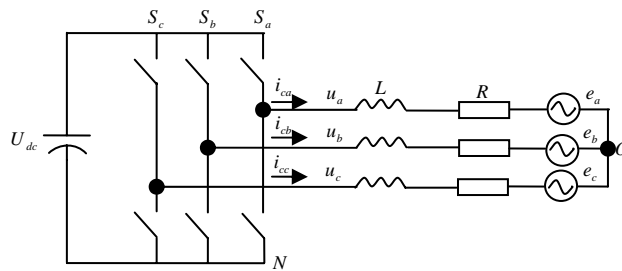


图 2 并联型 APF 等值电路

忽略系统阻抗，并用理想开关代替实际开关器件，由图 1 可得并联型 APF 等值电路，如图 2 所示。在图 2 中，忽略 APF 交流侧电阻的影响，有

$$\begin{cases} u_a = L di_{ca} / dt + e_a \\ u_b = L di_{cb} / dt + e_b \\ u_c = L di_{cc} / dt + e_c \end{cases} \quad (1)$$

式(1)离散化有

$$\begin{cases} u_a^*(k+1) = L \left[\frac{i_{ca}^*(k+1) - i_{ca}(k)}{T_s} \right] + e_a(k) \\ u_b^*(k+1) = L \left[\frac{i_{cb}^*(k+1) - i_{cb}(k)}{T_s} \right] + e_b(k) \\ u_c^*(k+1) = L \left[\frac{i_{cc}^*(k+1) - i_{cc}(k)}{T_s} \right] + e_c(k) \end{cases} \quad (2)$$

其中， T_s 为采样周期； $i_c^*(k+1)$ 和 $u^*(k+1)$ 分别为在 $k+1$ 采样时刻 APF 的指令电流与参考电压。

由式(2)可知，为了在 k 采样时刻得到 $k+1$ 采样时刻的 APF 参考电压 $u^*(k+1)$ ，就必须提前一个采样时刻预测出 APF 指令电流 $i_c^*(k+1)$ 。

在提前一个采样时刻计算出 APF 参考电压 $u^*(k+1)$ 后，使用电压空间矢量调制方法就可以得到合适的 APF 开关控制信号，从而达到电流跟踪控制目的。

3.2 指令电流预测原理

本文采用一种简单有效的快速预测指令电流方法，原理如图 3 所示。稳态时，利用上一周期的历史数据来产生下一采样时刻的指令电流值 $i_c^*(k+1)$ ；暂态时，利用二阶外推插

值法得到下一采样时刻的指令电流值 $i_c^*(k+1)$ 。

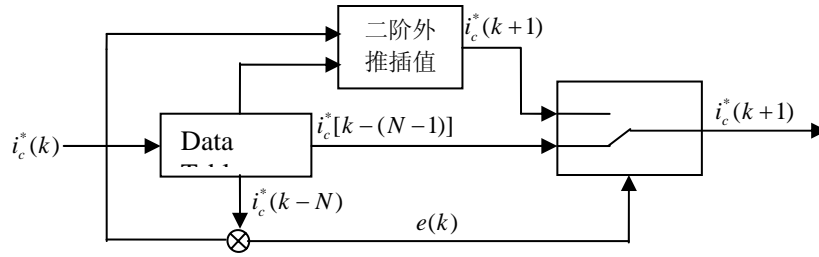


图3 参考电流预测原理图

在稳态时，负载电流及其所含有的谐波电流成分都比较稳定，可以认为负载电流是周期变化的，因此可以利用所存储的上一周期指令电流值来得到下一采样时刻指令电流值，即

$$i_c^*(k+1) = i_c^*[k-(N-1)] \quad (3)$$

上式中，N 为一个周期的采样点数。

在暂态时，因为负载电流在变化，因此上述预测方法不再准确。此时，利用拉格朗日插值法做出外推预测，有

$$i_c^*(k+1) = 3i_c^*(k) - 3i_c^*(k-1) + i_c^*(k-2) \quad (4)$$

图 3.4 中，下一采样时刻指令电流信号的产生需要根据不同情况选择不同预测方法，只需判断负载电流处于稳态还是暂态就可以确定指令电流信号的产生方法。在稳态时，有

$$i_c^*(k) - i_c^*(k-N) \approx 0 \quad (5)$$

由于系统的不确定性以及外界的各种干扰，上式中左边两者不一定完全相同。因此，暂态的判断条件可以设定为

$$e(k) = |i_c^*(k) - i_c^*(k-N)| \geq e_{\max} \quad (6)$$

上式中， e_{\max} 定义为两者的最大误差。当式(6)成立时，负载电流处于暂态，使用式(4)进行电流预测；当式(6)不成立时，负载电流处于稳态，则使用式(3)进行电流预测。

3.3 电压空间矢量调制

如图 4 所示,电压源逆变器正常工作时有 8 种状态,根据开关的不同状态形成八个基本空间矢量 $V_0 \sim V_7$,包括 6 个有效矢量 $V_1 \sim V_6$ 和两个零矢量 V_0 、 V_7 ，将复平面分成 6 个扇区。

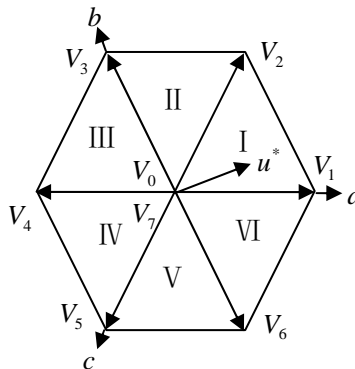


图4 空间矢量原理图

任意 APF 的参考电压矢量 u^* 都可用其所在扇区边界的两个相邻的特定矢量 V_x 与 V_y 来合成, 从而实现 APF 的电流跟踪控制。由平行四边形法则和 PWM 面积等效原理可求出相应的功率器件的开关占空比为

$$\begin{cases} T_x = \frac{\sqrt{3}|u|\sin(\pi/3 - \theta)}{U_{dc}} T_s \\ T_y = \frac{\sqrt{3}|u|\sin \theta}{U_{dc}} T_s \\ T_0 = T_s - T_x - T_y \end{cases} \quad (7)$$

对于三相电压源逆变器某一给定的电压空间矢量 u^* , 常有三种合成方法, 综合考虑算法复杂性、开关频率、开关损耗及谐波幅值, 本文中选用第二种合成方法: 将零矢量 V_0 均匀地分布在矢量 u^* 的起、终点上, 除零矢量外, u^* 依次由 V_x 、 V_y 、 V_x 合成, 并从矢量 u^* 中点截出两个三角形, 如图 5 所示 (假设电压矢量 u^* 位于区间 I)。

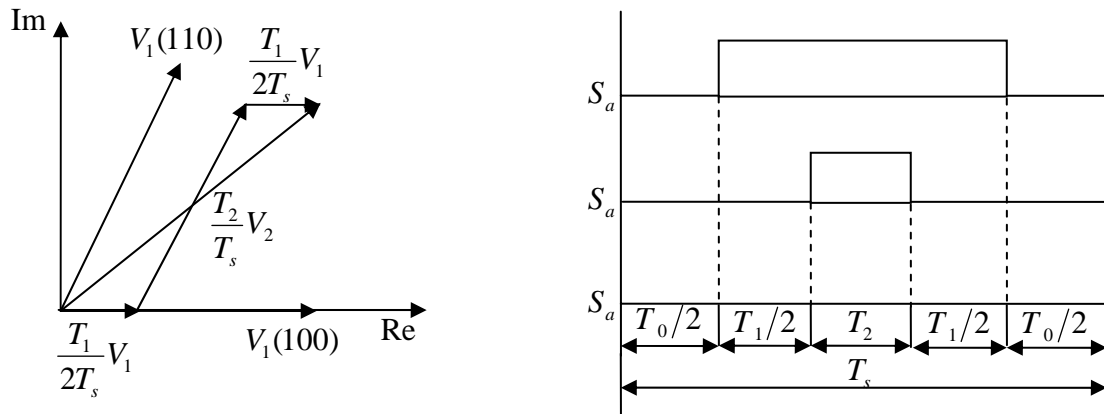


图 5 电压空间矢量合成方法

对三相电压源逆变器输出电压的约束, 可采用限制开关的导通时间来实现。如果

$$T_x + T_y > T_s \quad (8)$$

则取

$$\begin{cases} T'_x = \frac{T_s}{T_x + T_y} T_x \\ T'_y = \frac{T_s}{T_x + T_y} T_y \end{cases} \quad (9)$$

这样, 合成的电压矢量就可以限定在图 5 中六边形内切圆之内的空间矢量圆轨迹中。

4. 仿真与结果分析

4.1 仿真模型

在仿真软件 MATLAB/Simulink 对本文提出的 APF 预测电流控制方法进行了仿真研究，并与普通滞环电流控制算法进行了对比分析。

仿真模型的主电路如图 6 所示，根据 3.2 节的数学模型搭建的 A 相预测电流控制模型如图 7，其他两相类似。三相 SVPWM 脉宽调制仿真模型入图 8。

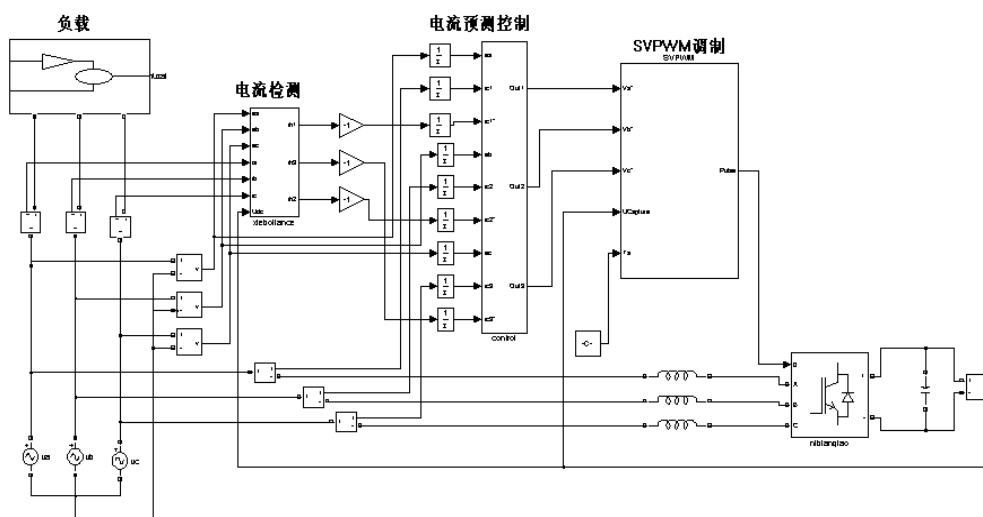


图 6 基于 SVPWM 调制的电流预测控制系统仿真模型

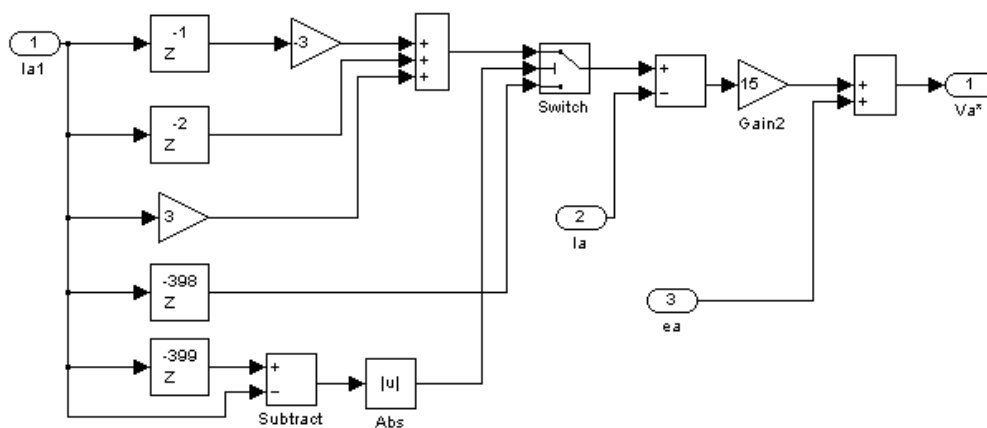


图 7 预测电流控制仿真模型

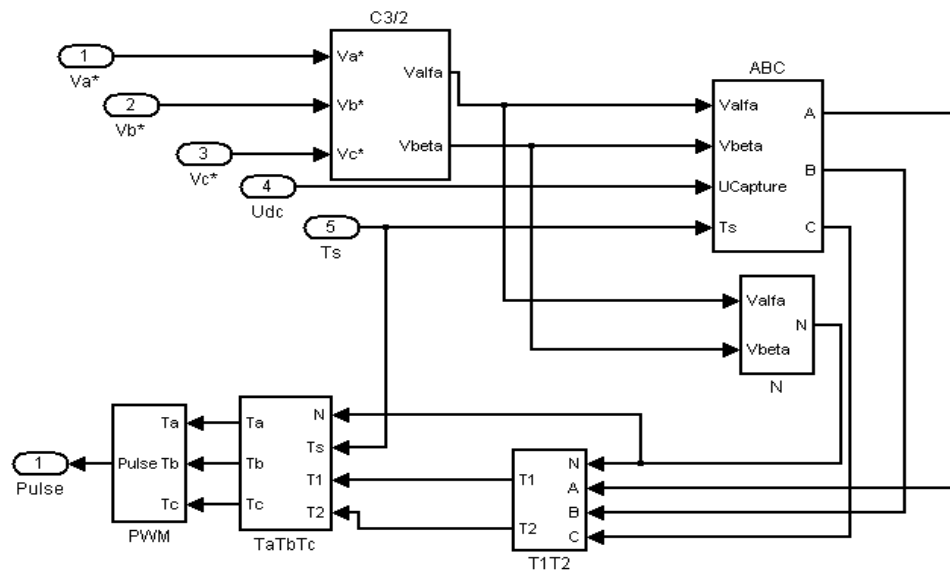
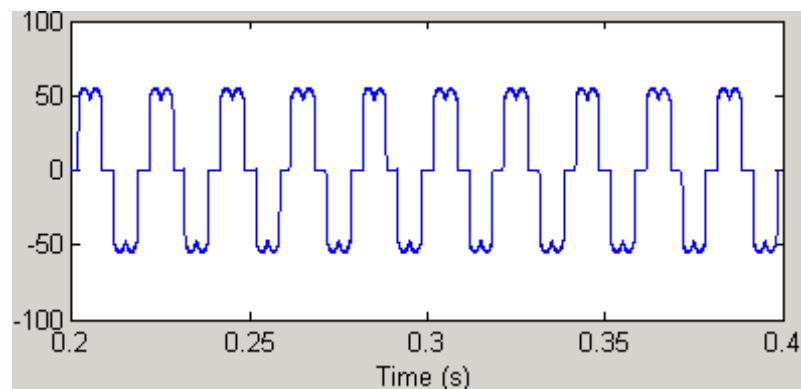


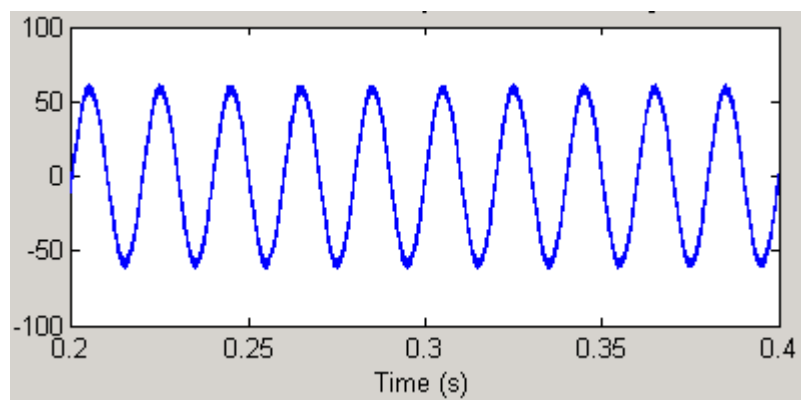
图 8 三相 SVPWM 脉宽调制仿真模型

4.2 仿真结果与分析

仿真波形如图9、10所示：

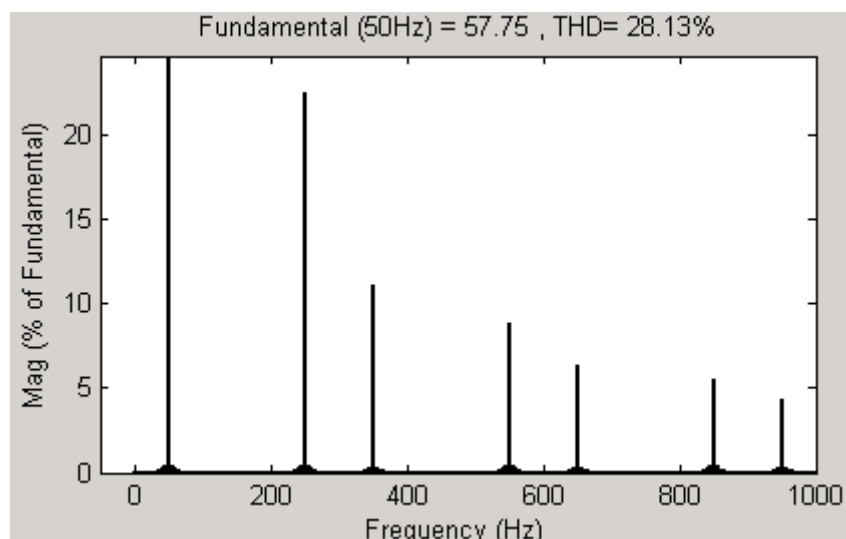


(a) 补偿前

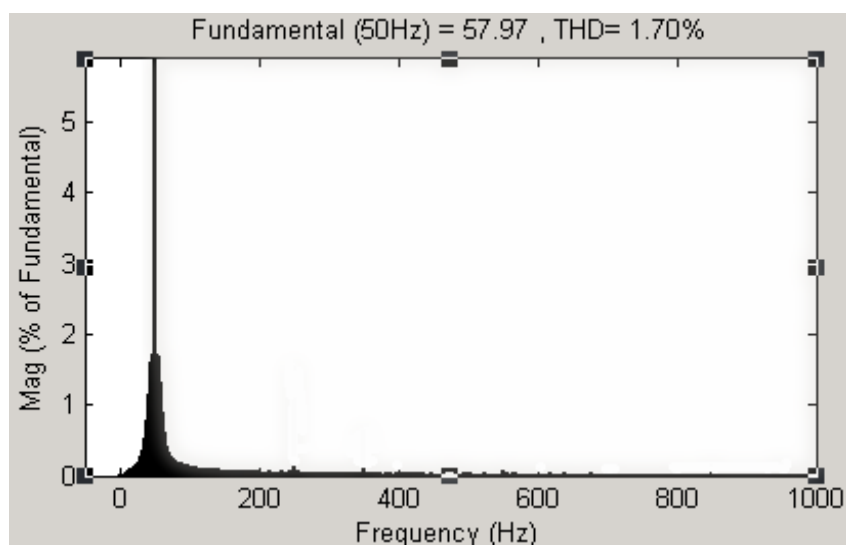


(b) 补偿后

图 9 补偿前后 A 相电源电流波形



(a) 补偿前



(b) 补偿后

图 10 补偿前后 A 相电源电流频谱

由图 9, 10 可知, 补偿前, 电源电流畸变严重, 电流谐波幅值较大, A 相电流谐波畸变率(THD)为 28.13%。补偿后电源电流波形有很大改善, 近似为正弦波, 谐波幅值大大减小, A 相电流 THD 降为 1.7%。

5. 总结

本文通过理论分析和仿真试验表明: SVPWM 与电流预测控制技术应用于有源电力滤波器跟踪控制中, 不但具有易于数字化的优点, 而且可以改进补偿的动态性能, 降低直流电容值, 减小装置体积。综合以上方面, 采用 SVPWM 与电流预测控制方法要优于传统方法。这种补偿方法在三相整流电路及有非线性负载的电力系统中有较好的谐波抑制能力, 应用前景广阔。

参考文献

- [1] 陈国柱, 吕征宇, 钱照明. 有源电力滤波器的一般原理与应用 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(9): 17-21
- [2] 王群, 姚为正, 刘进军, 等. 谐波源与有源电力滤波器的补偿特性 [J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(2): 16-20.
- [3] 赵勇, 张涛, 李建华, 等. 一种新的谐波源简化模型. 中国电机工程学报, 2002, 22(4): 45-50
- [4] 颜晓庆, 杨君, 王兆安. 并联型电力有源滤波器的数模型和稳定性分析 [J]. 电工技术学报, 1998(1).
- [5] 张崇巍, 张兴. PWM 整流器及其控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [6] 张森, 吴捷. 基于灰色预测的有源滤波器预测控制技术 [J]. 华南理工大学学报, 2005, 33(7): 74-77.
- [7] 曾繁鹏, 谭光慧, 伏祥运等. 有源电力滤波器的简单无差拍控制策略 [J]. 电气应用, 2006, 25(8): 60-63.
- [8] 杨君, 王兆安, 邱关源. 并联型电力有源滤波器直流侧电压的控制 [J]. 电力电子技术, 1996(4): 48-50.

Study on Control Method of Three-phase APF

Hou Wenbao, Wang Chao

Department of Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou,
Jiangsu (221008)

Abstract

In view of a typical three-phase rectifier circuit to the power grid, the study focused on SVPWM and predictive current control method. Parallel APF will be applied to inner tracking control. Compensation gave a relatively perfect parallel APF and its control method. Simulation results show the voltage space vector predictive current control method for Parallel Active Filter compensation control can markedly improve the dynamic performance and the filtering effect.

Keywords: Active power filter; SVPWM; Current tracking; Simulation