

# 有源电力滤波器控制时延的研究

杨小品<sup>1</sup>, 淡锋博<sup>2</sup>, 李尚盛<sup>1</sup>, 查晓明<sup>1</sup>

(1. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 荥阳市电业局, 河南 荥阳 450100)

**摘要:** 针对有源电力滤波器 (APF) 系统存在的延时情况, 分析了延时对 APF 补偿效果的影响并提出了解决的办法。通过建立 APF 系统的网络阻抗传递函数, 利用 pade 近似式对其进行简化分析, 得到了不同滞情况下该网络频率响应特性。由此分析延时对系统性能的影响并说明在控制中不能忽略延时的存在。由于固有延时只能减小不能根除, 只能从消除延时对补偿效果影响的角度出发, 提出了一种利用谐波的周期性特点来延迟补偿谐波输出的方法提高补偿效果。仿真结果表明了该方法的正确性和有效性。

**关键词:** 有源电力滤波器; 延时; 谐波补偿; 周期时延; 控制

## Study on control delays of active power filter

YANG Xiao-pin<sup>1</sup>, DAN Feng-bo<sup>2</sup>, LI Shang-sheng<sup>1</sup>, ZHA Xiao-ming<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Xinyang Electric Power Company, Xinyang 450100, China)

**Abstract:** In order to eliminate some influence on compensating effects in active power filter (APF) system, some typical delays are analyzed and effective solutions are presented. The network impedance transfer function of APF is built and the pade approximation is used to simplify and analyze it, then the frequency response character of APF is gotten at different delays. Influences on system capability are researched on and it is clear that delays can not be neglected in application. Because inherent delays can not be erased, it can only be reduced by compensating effect. So a solution is presented to get perfect compensating result, which uses harmonic periodicity characteristic to delay the compensating harmonic output. Finally, simulation results show that this method is valid and effective.

**Key words:** active power filter; delay; harmonic compensating; periodicity delay; control

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)22-0043-05

## 0 引言

有源电力滤波器 (APF) 的基本工作原理是检测出系统中的谐波电流后, 产生一个与其波形一致、方向相反的谐波电流然后注入系统, 从而抵消系统中的谐波电流<sup>[1]</sup>。众所周知, 任何一个含有反馈的系统, 从输出信号到收到反馈信号, 其间必然有一个时间差。这个时间差是系统不稳定的一个重要因素。有源电力滤波器的反馈过程亦如此。即使它的时延不影响系统稳定, 对于补偿性能的影响也是显而易见的。基于此, 本文从 APF 网络传递函数的频率响应特性分析了时延可能会带来的影响, 以此说明实际运行中不可忽略时延的必要性。并且提出了一种利用周期时延提高补偿效果的方法, 然后由仿真结果做出了验证。

## 1 APF 模型

选取三相并联 APF 作为分析对象, 其主电路和系统连接示意图如图 1 所示。

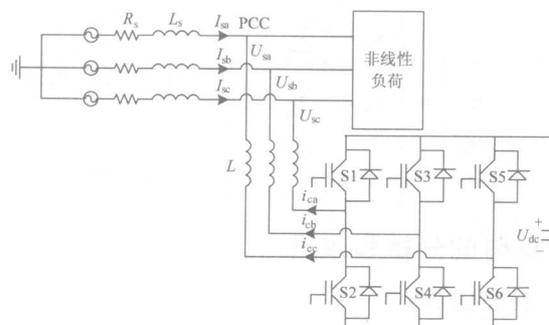


图 1 APF 系统图

Fig.1 System connection of APF

系统为无穷大电网，系统电压源为理想正弦对称的三相电压源。则公共点（PCC）电压仍为理想的正弦基波电压。等效处理时，系统三相电压源及  $L_s$ 、 $R_s$  支路可由三个正弦电压源等效代替，非线性负荷则由三个电流源代替，得如图 2 的等效电路。

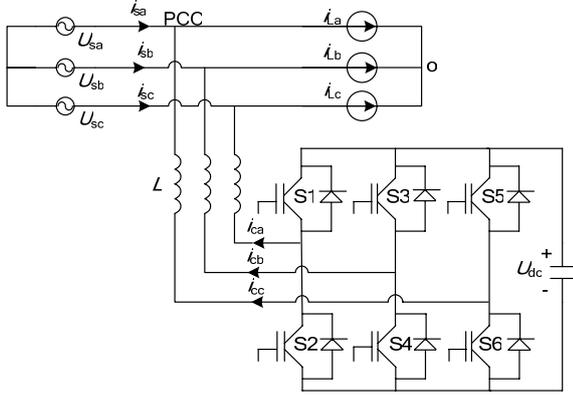


图 2 APF 系统连接等效图

Fig.2 Equivalent system connection of APF

定义单极性二值逻辑开关函数  $S_k$  为

$$S_k = \begin{cases} 1, & \text{(下桥臂关断, 上桥臂开通)} \\ 0, & \text{(上桥臂关断, 下桥臂开通)} \end{cases}$$

( $k = a, b, c$ )。考虑系统为三相三线平衡系统，则用单极性二值开关函数描述的 APF 的一般数学模型状态方程如下：

$$\begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_{ca}}{dt} \\ \frac{di_{cb}}{dt} \\ \frac{di_{cc}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_a \\ m_b \\ m_c \end{bmatrix} U_{dc} + \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \\ u_{sc} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中， $\begin{bmatrix} m_a \\ m_b \\ m_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_a - \sum_{k=a,b,c} \frac{S_k}{3} \\ S_b - \sum_{k=a,b,c} \frac{S_k}{3} \\ S_c - \sum_{k=a,b,c} \frac{S_k}{3} \end{bmatrix}$  为开关控制变量。

## 2 延时的分析和改进

### 2.1 延时环节

#### 2.1.1 采样延时

采样延时主要为 APF 从系统中获取相关数据时的延时。因为一次和二次互感器间的相位误差以及

A/D 采样转换延时，使得 APF 控制器获取的数据和系统原始数据间存在一个相位差。

#### 2.1.2 控制器延时

控制器延时主要是谐波检测和补偿算法造成的延时。目前的许多检测算法还不能在真正意义上实现对谐波电流的实时检测，只是延时的时间长短不同。补偿算法计算所需的时间，跟所选用的处理器及所选算法的繁简程度有关。一般算法所耗时间不是很多，但是不能完全消除这个延时。

#### 2.1.3 补偿电路延时

APF 的补偿电流产生电路是采用电力电子器件作为开关器件的，所用驱动电路一般会产生延时。主控回路与功率回路之间的电气隔离也会产生延时，因为开关器件的导通及关断都需要时间，所以补偿电路也存在很多延时。

## 2.2 延时影响分析

时滞的存在在一定条件下会引起系统的不稳定。设  $\tau$  为总控制延时，由式 (1) 可得到含控制时滞的数学模型为

$$\begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_{ca}}{dt} \\ \frac{di_{cb}}{dt} \\ \frac{di_{cc}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{a\tau} \\ m_{b\tau} \\ m_{c\tau} \end{bmatrix} U_{dc} + \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \\ u_{sc} \end{bmatrix} \quad (2)$$

文献[2]已经从时域和频域角度分析了该时滞系统不是时滞无关稳定的。也就是说，时滞可能会导致系统的不稳定，至少是补偿性能的下降<sup>[4]</sup>。

设计无记忆线性状态反馈控制器

$$\mathbf{u} = \mathbf{K}\mathbf{x} \quad (3)$$

其中， $\mathbf{x} = [i_{ca} \ i_{cb} \ i_{cc}]^T$ ， $\mathbf{u}_\tau = [m_{a\tau} \ m_{b\tau} \ m_{c\tau}]^T$ ，

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} -k & 0 & 0 \\ 0 & -k & 0 \\ 0 & 0 & -k \end{bmatrix} (k > 0)$$
，写成矩阵形式为

$$\mathbf{L}\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{K}U_{dc}\mathbf{x}_\tau - \mathbf{e}_u \quad (4)$$

其中， $\mathbf{e}_u = [u_{sa} \ u_{sb} \ u_{sc}]^T$ ， $\mathbf{L}_1 = \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix}$ 。

对于平衡系统，可选取一相来分析。对其进行 Laplace 变换可得：

$$sLX(s) = -kU_{dc}e^{-\tau s}X(s) - E(s) \quad (5)$$

阻抗传函为

$$Z_{AF}(s) = \frac{E(s)}{X(s)} = -sL - kU_{dc}e^{-\tau s} \quad (6)$$

根据文献[3], 用  $\text{pade}$  近似式逼近  $e^{-\tau s}$ , 可将其展开为线性表达, 取一阶近似即有

$$e^{-\tau s} = \frac{2 - \tau s}{2 + \tau s}$$

代入式(6)可得

$$Z_{AF}(s) = -sL - kU_{dc} \frac{2 - \tau s}{2 + \tau s} = \frac{L\tau s^2 + (2L - kU_{dc}\tau)s + 2kU_{dc}}{2 + \tau s} \quad (7)$$

由式(7)知, 当  $2L - kU_{dc}\tau = 0$  时,  $Z_{AF}(s)$  存在  $s$  平面虚轴上的解  $s_{12} = \pm j\sqrt{\frac{2kU_{dc}}{L\tau}}$ , 所以

$\omega = \sqrt{\frac{2kU_{dc}}{L\tau}}$  即为 APF 网络的谐振角频率。

由以上分析可知道, 延时在满足一定条件下, 可能对 APF 补偿输出造成谐振放大影响。即使不满足谐振条件, 对 APF 输出补偿效果造成的影响也是显而易见的。图 4 即为实时仿真中捕捉到的一次电流失稳现象, 仿真图 6 和图 7 也说明了延时存在对补偿效果的影响。由此可见, 延时的存在对于系统的运行具有很大的潜在威胁, 因此必须对时滞进行处理。

### 2.3 改进的周期延时补偿法

为了消除延时的影响, 对于采样误差, 可采用高精度高速度的元件以减小硬件造成的误差, 采用数字控制器, 产生的延时一定时, 也可以采用软件补偿。在硬件选取和软件算法编程改进都曾取得过一定程度的效果。但靠提高软硬件的工作性能, 只能减小延时, 不能根除。比较极端的情况下还有可能引起系统不稳甚至导致系统谐振。因此本文不是力图减小延时, 而是从力图消除延时造成的影响这个角度出发, 寻求对付延时的新办法。

改进的周期延时补偿法: 根据谐波的周期性原理, 控制补偿谐波注入系统的时间点, 从而消除时延带来的相位差。

从时域角度分析, 对于系统电流中分离出的谐波分量为

$$i_h = \sum_{n=2}^{\infty} \sin(2\pi nft) \quad (8)$$

在没有延时的理想情况下, APF 发出的谐波补

偿电流应该为

$$i_{hc} = -\sum_{n=2}^{\infty} \sin(2\pi nft) \quad (9)$$

考虑补偿电流注入系统相对于采样点延时为  $t_d$  时的情况 (为 APF 所有环节延时之和), 则输出谐波补偿电流为

$$i'_{hc} = -\sum_{n=2}^{\infty} \sin(2\pi nft + 2\pi ft_d) \quad (10)$$

于是  $i_h + i'_{hc} \neq 0$ , 则剩有未能补偿的残余谐波分量。

控制谐波注入系统的时间点, 若对补偿电流波形控制其延时  $t_c$  后输出, 则对应的角度有

$$\varphi_c = 2\pi m - 2\pi ft_d \quad m = 1, 2, 3 \dots \quad (11)$$

则控制输出补偿电流为

$$i''_{hc} = -\sum_{n=2}^{\infty} \sin(2\pi nft + 2\pi ft_d + \varphi_c) = -\sum_{n=2}^{\infty} \sin(2\pi nft + 2\pi m) = -\sum_{n=2}^{\infty} \sin(2\pi nft) \quad (12)$$

即在  $t$  时刻开始检测谐波, 控制补偿电流延时  $t_c$  后在  $t_d + t_c = m/f + t$  时刻输出投入补偿, 即可得到理想的谐波补偿。图 3 为该方法的控制示意图。对于 APF 初次投入补偿时, 可滞后检测波形一个或者数个周期, 让程序有足够的时间来处理各种延时并计算投入补偿时间。

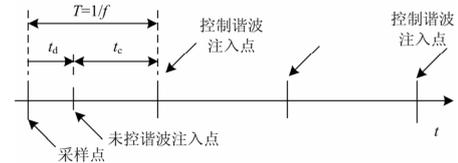


图 3 控制示意图

Fig.3 Sketch map of control

经过精确计算投入补偿, 让补偿的时候无相位差而不出现残存高次谐波。虽然延时  $t_d$  对于不同的运行环境有不同的值, 由于现在的数字补偿装置的核心计算单元都带有数个定时时钟<sup>[5-6]</sup>, 针对具体环境的延时输出控制, 并不难做到。

本方法对系统运行于稳定状态时的稳定谐波源有较好的修正作用。文献[7]已经对实际系统的延时现象做了分析、探讨和修正, 并建立了 APF 的硬件在环系统仿真平台, 力图对延时现象的处理作进一步的研究。

## 3 仿真结果

仿真系统中母线电压为工频 380 V, 非线性负

载采用三相不可控整流桥带阻感负载。图 4 为仿真中捕捉到的一次系统电流不稳定现象。图 5 为不考虑时延的仿真结果，为了表示清晰，只选取一相图示。从仿真图可以看出，补偿电流完全跟踪上了指令电流，补偿效果非常好。

考虑延时，图 6 和图 7 分别为延时为 0.002 88 s 和 0.017 28 s 时投入补偿电流的系统电流波形。由仿真图可以看出，即使补偿电流完全跟踪上指令电流，由于延时的存在，补偿电流注入系统后，系统电流的谐波分量并没有得到有效的补偿。

图 8 和图 9 分别为控制谐波电流注入点时延为  $\frac{1}{f}$ 、 $\frac{2}{f}$  时的补偿波形。由图 3 和图 7、图 8 比较可以看出，延时  $\frac{m}{f}$  再投入补偿，补偿效果是一样的。

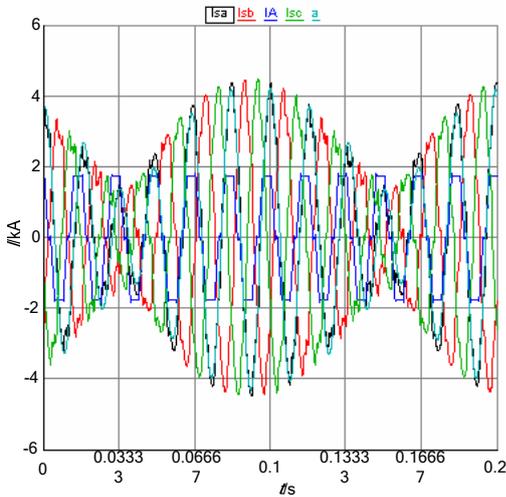


图 4 系统电流失稳现象  
Fig.4 Abnormal current of system

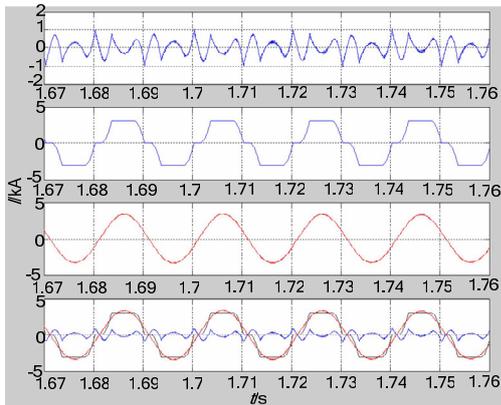


图 5 不考虑延时电流波形图  
Fig.5 Current waveform without delay

图 5 中，第一个波形为谐波补偿电流波形，第二个波形为负载电流波形，第三个波形为系统电流波形，第四个波形为三者对比图。图 6~9 的波形定

义类同。

图 6 和图 7 是随机选取了 2 个延时的系统电流和补偿电流的波形图，由此可见，延时的存在对 APF 补偿效果的影响还是很大的。

图 8 和图 9 为采取周期延时措施后的波形图，图 10 为未控与已控谐波注入点的补偿结果对比图。由仿真结果可说明控制补偿输出的时间点可保证补偿效果，能消除延时带来的影响。

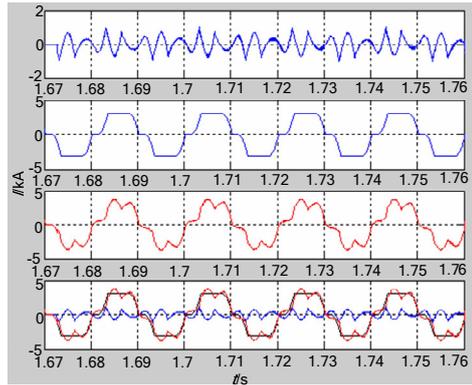


图 6 延时为 0.00288 s 时电流波形图  
Fig.6 Current waveform with 0.002 88 s delay

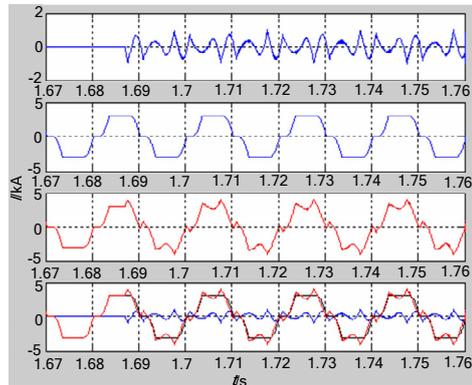


图 7 延时为 0.017 28 s 时电流波形图  
Fig.7 Current waveform with 0.017 28 s delay

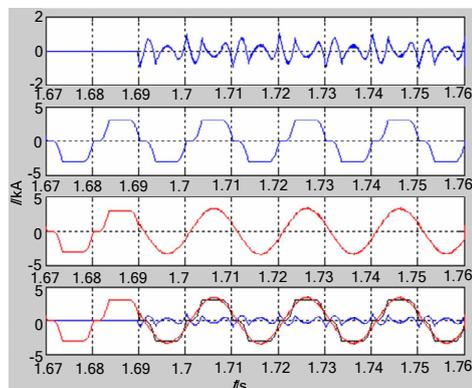


图 8 延时为 0.02 s 时电流波形图  
Fig.8 Current waveform with 0.02 s delay

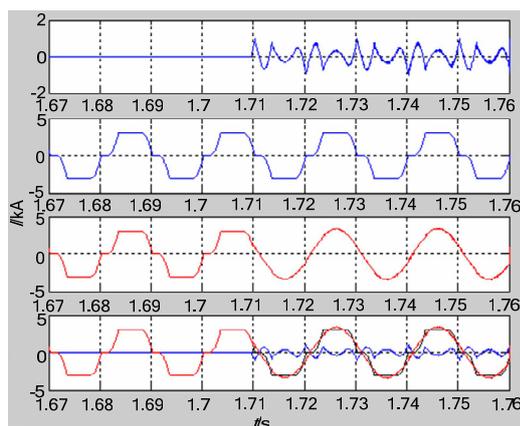


图9 延时为 0.04 s 时电流波形图

Fig.9 Current waveform with 0.04 s delay

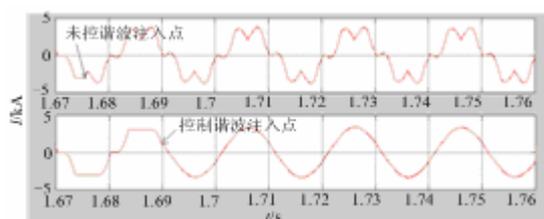


图 10 未控与控制谐波注入点的仿真对比图

Fig.10 Compensating harmonic and controlled compensating harmonic

## 4 结束语

本文采用了周期延时的方法来解决固有延时不可消除带来的影响, 如果采用该方法, 可以不必考虑系统软硬件带来的延时长短, 也不必费尽心思地去缩短延时, 只需要控制补偿电流的输入时间点即可消除这些延时带来的影响, 而数字控制器也能很容易地实现时间控制。该方法可能会使 APF 的初始响应时间长一点点, 但是系统的全响应效果则比未处理时延时的情况下好很多, 仿真图形也说明了该方法的有效性。

## 参考文献

- [1] 胡铭, 陈珩. 有源滤波技术及其应用[J]. 电力系统自动化, 2000, 24 (3): 66-70.  
HU Ming, CHEN Heng. Active power filter technology and its application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24 (3): 66-70.
- [2] 石峰. 有源电力滤波器能量变换机理分析及其控制测量研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2008.
- [3] 吕志民, 周茂林. 使用 pade 近似式处理数字控制系统中的纯滞后[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2001, 40 (1): 114-115.
- [4] Zhou J Z, Rajapakse A, Gole A M. Effects of control systems time delay on the performance of direct harmonics elimination[C]. // Proceedings of Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. 2004 (1): 609-612.
- [5] 郭伟峰, 杨世彦, 杨威. 基于 DSP-FPGA 全数字控制的并联有源电力滤波器[J]. 电工技术学报, 2007, 22 (5): 123-127.
- [6] 左小琼, 孙建军, 查晓明. 基于 DSP 和 FPGA 实现的逆变电源重复学习控制[J]. 电工技术学报, 2006, 25 (5): 42-46.
- [7] YANG Xiao-pin. Research on hardware-in-the-loop simulation of active power filter[C]. // IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems. Hefei (China): 2010.

收稿日期: 2010-08-06; 修回日期: 2010-09-13

作者简介:

杨小品 (1977-), 女, 博士生, 从事电能质量控制、电力电子仿真的研究工作; E-mail: sunyafe1189@126.com

淡锋博 (1977-), 男, 工程师, 从事生产技术管理工作;

李尚盛 (1982-), 男, 博士生, 从事电能质量控制、轻型直流高压输电的研究工作。