

并联型有源电力滤波器的电流跟踪控制实现方法

文小玲,李凤旭,易 驰,文 超

(武汉工程大学电气信息学院,湖北 武汉 430074)

摘 要:在传统的无差拍电流跟踪控制基础上,提出了一种改进的无差拍电流跟踪控制方法.该法首先采用线性预测方法,在当前时刻预测出有源电力滤波器在下一时刻的输出电流参考值,然后用有源电力滤波器的离散化电流跟踪控制数学模型计算出脉冲宽度调制信号的占空比.这样就弥补了传统的无差拍控制方法因算法复杂导致计算延时的不足.同时,在有源电力滤波器系统投入逆变运行前,采用直流侧电容预充电和使直流侧电压线性增加的方法,防止启动时产生直流侧冲击电流;采用直流侧电压比例-积分控制方法,使得系统在逆变过程中,直流侧电压大小只在一定范围内波动.而且,此控制策略在基于数字信号处理器 TMS320LF2407A 的硬件平台上得以实现,并对有源电力滤波器在投入运行前后的系统网侧电流波形进行了实验分析.实验结果表明,所提的电流跟踪控制和直流侧电压控制方法可以使有源电力滤波器有效滤除电网中的谐波电流.

关键词:无差拍控制;有源电力滤波器;直流侧电压控制;数字信号处理器

中图分类号:TM761.1

文献标识码:A

doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2013.05.015

0 引 言

电能是现代社会生产和人民生活中必不可少的重要能源.目前,全球电能存在一个普遍的难题,非线性、冲击性和不平衡用电负荷大量增加,使电网的电能质量恶化.有源电力滤波器(Active Power Filter,以下简称:APF)作为消除电力公害、改善供电质量的有力工具,可以达到消除谐波、提高供电质量的目的.

从 APF 的基本原理可知,控制方法的选择对有源电力滤波器的补偿效果有很大的影响.为了使 APF 对电网中的谐波及无功成分进行实时的动态补偿,在准确地检测出补偿电流之后,如何有效地进行电流跟踪控制是研究 APF 的一个重要方向. APF 的电流跟踪控制方法有很多种,滞环电流控制方法得到了较为广泛的应用,但是其开关频率波动较大,稳定性相对不高.为此,文献[1]提出了基于电压空间矢量的滞环电流控制法,该法既有较好的电流响应速度,又有较好的电流跟踪性能.单周控制法虽不需检测谐波和无功电流分量,但控制器的结构复杂,而且变换器所有开关都工作在高频状态^[2].无差拍控制法是一种数字化脉宽调制(Pulse Width Modulation,以下简称:

PWM)技术,它对谐波分量有一定的预测功能,但同时也有一些不足之处,如控制过程的计算量大,使得其对被补偿量的预测周期增大,并易引起较大的预测误差,最终影响补偿特性^[3].本文以三相并联型 APF 为例,在原有的无差拍控制思想的基础上,提出了一种基于预测电流的无差拍控制方法,并对直流侧电容电压进行了控制,解决了在并网过程中,因直流侧电压大幅度波动而影响系统稳定运行的问题.

1 有源电力滤波器系统组成

图 1 所示为 APF 的控制原理图,可分为主电路和控制电路两大部分.其中,主电路由电压型逆变器和连接电感构成.控制电路主要包含两大功能模块:第一个功能模块是指令电流检测模块,其作用是为了检测出所需要的补偿对象,例如非线性负载中的谐波和无功电流分量,然后再根据 APF 的补偿目标得出相应补偿电流的指令信号 i_c^* ;其次就是电流跟踪控制模块,通过选择不同的电流跟踪控制方法来产生 PWM 脉冲信号,以控制开关管的通断状态,使 APF 产生能跟踪补偿指令电流的输出电流.

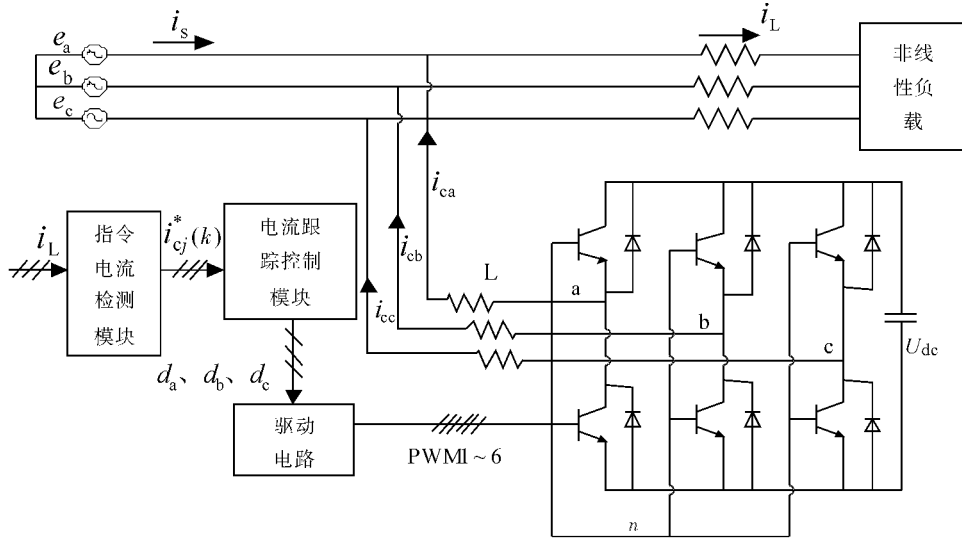


图 1 并联型有源电力滤波器组成原理图

Fig. 1 The structure of shunt active power filter

2 电流跟踪控制

有源电力滤波器的控制方法有很多种,本文所选用的是基于电流预测的无差拍控制方法。图 1 中, e_a, e_b, e_c 为电网电压, i_{ca}, i_{cb}, i_{cc} 为 APF 输出电流, L 为连接电感, U_{dc} 为直流侧电容电压。假设主电路的开关器件为理想开关,并工作于互补开关状态,当逆变器上桥臂导通时,APF 输出电压为 U_{dc} ;当下桥臂导通时,APF 输出电压为 0。以 A 相为例,设在开关周期 T_s 内,上桥臂导通时间为 $d_a T_s$,则 APF 的 A 相输出电压可表示为 $u_{an} = d_a U_{dc}$ 。同理,可求得 B、C 相电压。由图 1 所示 APF 主电路结构,根据电压回路定律,可得到三相电压平衡方程

$$\begin{cases} -L \frac{di_{ca}}{dt} + u_{an} - u_{bn} + L \frac{di_{cb}}{dt} = e_a - e_b \\ -L \frac{di_{cb}}{dt} + u_{bn} - u_{cn} + L \frac{di_{cc}}{dt} = e_b - e_c \\ -L \frac{di_{cc}}{dt} + u_{cn} - u_{an} + L \frac{di_{ca}}{dt} = e_c - e_a \end{cases} \quad (1)$$

将 APF 三相输出电压代入方程式(1)并改写成矩阵形式,就可得到 APF 的无差拍电流控制数学模型

$$\mathbf{Z} \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A} \mathbf{X} + \mathbf{B} \mathbf{e} \quad (2)$$

其中

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} -L & L & 0 & 0 \\ 0 & -L & L & 0 \\ L & 0 & -L & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -(d_a - d_b) \\ 0 & 0 & 0 & -(d_b - d_c) \\ 0 & 0 & 0 & -(d_c - d_a) \\ d_a & d_b & d_c & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{X} = [i_{ca} \ i_{cb} \ i_{cc} \ U_{dc}]^T, \mathbf{e} = [e_a \ e_b \ e_c \ 0]^T.$$

将方程式(2)离散化可得占空比

$$\begin{cases} d_a = \frac{1}{3}(2A + B + 1.5) \\ d_b = \frac{1}{3}(-A + B + 1.5) \\ d_c = \frac{1}{3}(-A - 2B + 1.5) \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中: $A = \frac{L}{U_{dc} \times T_s} (-x_a + x_b) + \frac{e_a - e_b}{U_{dc}}$,

$B = \frac{L}{U_{dc} \times T_s} (-x_b + x_c) + \frac{e_b - e_c}{U_{dc}}$,参考电流与反馈

电流的差值, $x_j = -(i_{cj}^* - i_{cj})$, $j \in (a, b, c)$ 。

从方程(3)可以看出,指令电流与反馈电流的差值对占空比的大小有很大的影响。为克服采样和计算延迟对补偿性能的影响,并使控制方法的计算量尽量小,采用线性预测方法在 k 采样时刻预测逆变器在 $k+1$ 时刻的输出参考电流。由于电流的周期性考虑,可以假设电流增量在每个控制周期近似相同^[4],经过线性推导可以得到 $k+1$ 时刻的参考电流预测值为

$$i_{ck}^*(k+1) = 2i_{cj}^*(k) - i_{cj}^*(k-1), j \in (a, b, c)$$

(4)

式(4)中, $i_{cj}^*(k)$ 、 $i_{cj}^*(k-1)$ 为 k 、 $k-1$ 时刻的参考电流瞬时值,该预测方法对谐波的线性变化段有比较好的预测效果。

3 直流侧电压控制

APF 在动态过程中,直流侧电容电压会产生大幅度的波动,这种电压的不稳定性将会直接影响整个装置的安全可靠运行。在启动、并网和负载切换等动态过程中对直流母线电压的控制是十分必要的^[5]。对于直流侧电压的控制,需要从两个方面来考虑,一是 APF 在投入逆变前的直流侧软启动,二是在逆变过程中直流侧电压的稳压控制。

直流侧电压控制原理图如图 2 所示。对于直流侧的软启动部分,分为直流侧电容的预充电和升压过程。这样,一方面可以使直流侧电压在一定的时间里呈线性增加,另一方面可以保证电流较小的冲击量,防止系统在投入逆变时发生过流过压的情况。直流侧电压的预充电过程,可以利用由逆变器的反并联二极管所组成的不控整流桥来实现。在充电稳定后进行的升压过程,可以通过主电路的三相升压(Boost)整流电路来实现。具体实现方法是,将主电路的三个下桥臂开关管关断,使三个上桥臂开关管工作,给每个管子以相同的占空比,并通过信号数字处理器(Digital Signal Processing,以下简称:DSP)来控制占空比的大小,使其值从 0 开始呈线性增加,最后达到一个固定值,此后主电路以稳定的占空比对直流侧电容进行充电,直到电压达到期望值 U_{aim} 。

在直流侧电压达到期望值后,利用直流侧电压瞬时值 U_{dc} 和直流侧电压设定值 U_{aim} 的差值,经比例-积分控制(Proportional-Integral Control,以下简称:PI)闭环控制环节来进行稳压控制。这种控制方法一方面能够快速随着电网电压变化,另一方面可以提高系统的动态响应速度,从而维持直流侧电压的稳定。

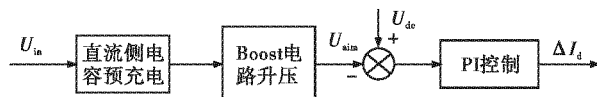


图 2 直流侧电压控制原理框图

Fig. 2 Block diagram of direct current link voltage control

4 软件设计

本实验系统的采样频率为 6.4 kHz,即在每个工频周期内采样 128 个点。系统主要是由 DSP 处理器 6 号捕获通道 CAP6 中断服务程序、定时器 T1 中断服务程序和模数转换 A/D 中断服务程序

组成^[6]。主程序流程图如图 3 所示。其中,CAP6 中断服务程序是为了解决电压同步信号及程序内部正余弦表指针复位的问题;T1 中断服务程序是用来触发采样程序的;A/D 中断服务程序完成了电流电压等信号的采样,并将其结果经基于瞬时有功电流、无功电流的 ip-iq 算法得到指令电流。最后将指令电流与检测到的反馈电流的差值,经无差拍控制算法处理得出占空比,送入事件管理器(Event Manager 以下简称:EV)模块,触发主电路工作。

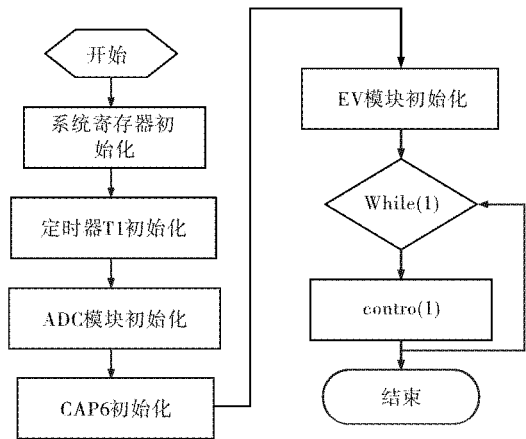


图 3 主程序流程图

Fig. 3 Flowchart of main program

图 4 为控制程序流程图。首先 T1 中断服务程序会在一个时间周期里产生一次中断,此中断产生时就会触发一次 A/D 采样,所以 A/D 采样的周期是由 T1 周期中断的时间来确定。在本实验中,所设定的 T1 周期寄存器的值为工频周期的 1/128,即在一个工频周期时间里 DSP 控制器会采样 128 次。先将直流侧的电压升压到期望值,经过 PI 调节后的量,加入到指令电流 ip-iq 算法过程中。

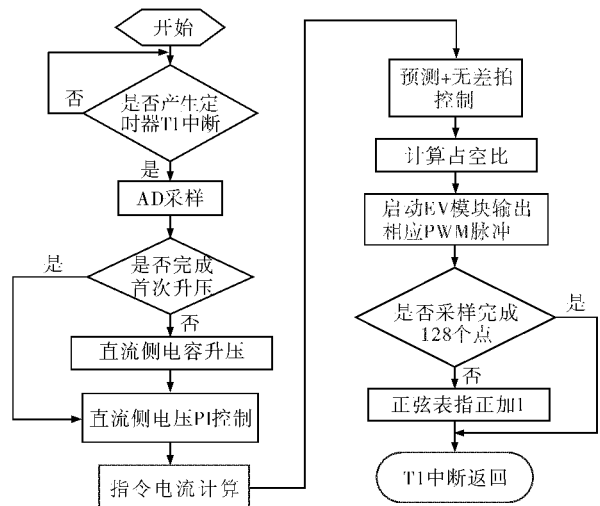


图 4 控制程序流程图

Fig. 4 Flowchart of control program

然后经过预测与无差拍电流跟踪控制,最后计算得到所需的占空比,送入 EV 模块,其后 DSP 发出相应的控制脉冲控制主电路输出所需的补偿电流.发完一次脉冲之后,DSP 将会自动判断是否完成了 128 次 A/D 采样,如果完成了 128 次采样就直接中断返回,如果没有完成则正余弦指针自动加 1,直到中断返回.其中,每送一次占空比,就会自动产生一个 A/D 中断.

5 实验结果分析

为了验证基于预测电流的无差拍控制算法的可行性及有效性,在完成所有的软件、硬件基础上,以图 1 作为实验模型,对并联型有源电力滤波器进行了实验.实验中的电源相电压为 50 V,所选的连接电抗器的大小为 3 mH,负载为二极管整流桥带灯箱的非线性负载,电流有效值 3 A,实验结果波形从 TDS3012B 型示波器中观察得出.以 c 相为例,指令电流、负载电流和网侧电流波形如图 5 所示.

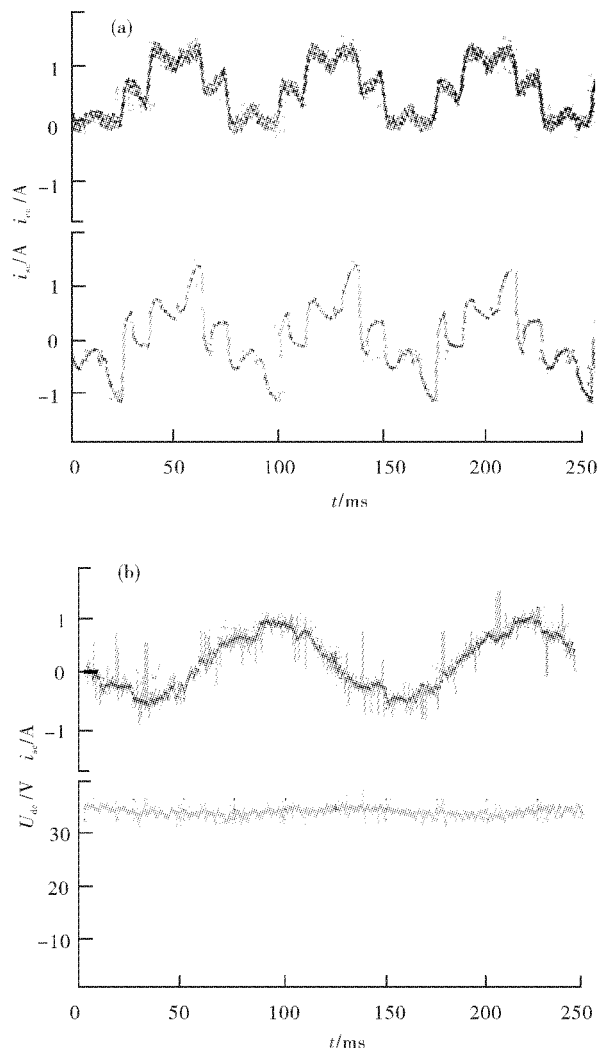


图 5 APF 投入前后网侧电流波形比较

Fig.5 The comparison of the current waveform of grid side

图 5(a)中上面的波形是采用 ip-iq 算法得到的指令电流波形 i_c ,图 5(a)中下面的波形是未经过 APF 补偿的网侧电流波形,即为负载电流 i_L .从图中可以看出,在此控制方法下,可以准确的得到所要补偿的指令电流,未经 APF 补偿时,网侧电流中是含有谐波电流分量的.图 5(b)中上面的波形是经过 APF 补偿后的网侧电流,图 5(a)中下面的波形是直流侧电容电压 U_{dc} 波形.从图中可以看出,在本文提出的基于预测电流的无差拍控制方案下,经过 APF 补偿之后,可以得到一个近似正弦波的网侧电流.因此本文提出的控制法可以有效地消除非线性负载中的谐波电流对电网的影响.

6 结 语

本文提出了一种基于预测电流的无差拍电流跟踪控制方案,并完成了该控制方法在 APF 系统上的软件设计.该法将预测电流控制算法预测出的下个采样周期的参考电流,加入到占空比计算中,推导出了下个采样周期的开关占空比信号,克服了传统无差拍控制因计算延迟而影响补偿效果的缺点,达到了实时跟踪电流波形的效果.实验证明,该电流跟踪控制方法可以有效地滤除电网中的谐波电流分量,使网侧电流趋近于标准的正弦波;加入的直流侧电压控制,使系统在启动、并网和负载切换等动态运行过程中,直流侧电压值可以在一定范围内上下波动,提高了系统的稳定性.

致谢

本研究过程中,武汉工程大学电气信息学院刘健老师提供了三相滤波电抗器,在此表示感谢!

参考文献:

- [1] 郑建勇,王杰,梅军,等.基于电压空间矢量的滞环电流控制方法和 APF 的系统设计[J].电力自动化设备,2011,31(5):49-52.
ZHENG Jianyong, WANG Jie, MEI Jun, et al. Hysteresis current control based on voltage space vector and APF system design[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31 (5): 49-52. (in Chinese)
- [2] 杨新华,戴路加,周仁伟.单周控制三相有源滤波器的矢量运算控制研究[J].科学技术与工程,2008,8(7):1690-1693.
YANG Xin-hua, DAI Lu-jia, ZHOU Ren-wei. OCC Conter Three Phase APF of Vector Operation Research[J]. Science Technology and Engineering,

- 2008,8(7):1690-1693. (in Chinese)
- [3] 彭晓涛,程时杰,宁联辉,等. 差拍控制在有源电力滤波器中的应用[J]. 继电器,2004,32(8):40-44.
PENG Xiao tao, CHENG Shi jie, NING Lian hui, et al. Application of beat control in shunt active power filter [J]. Relay, 2004, 32 (8): 40-44. (in Chinese)
- [4] 周玉洁,杨洁,夏永平,等. 基于三相四桥臂逆变器的APF预测控制方法的研究[J]. 华中电力,2010,23(6):20-23.
Zhou Yu-jie, Yang Jie, Xia Yong-ping, et al. Investigation on the Control Method of APF Forecast Based on the Three-phase Four-leg Converters[J]. Central China Electric Power,2010,23(6):20-23. (in Chinese)
- [5] 王智强. 基于重复控制的大容量并联型有源电力滤波器的几个关键技术[D]. 杭州:浙江大学,2010.
Wang Zhiqiang. Key Techniques of High Power Shunt Active Power Filter Based on Repetitive Control Strategy [D]. Hangzhou: Zhejiang University,2010. (in Chinese)
- [6] 孙谋,文小玲,黄文慧,等. 无功与谐波电流检测系统的设计[J]. 武汉工程大学学报,2011,33(12):81-84.
SUN Mou, WEN Xiao-ling, HUANG Wen-hui, et al. Design of harmonic and reactive current detection system[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2011,33(12):81-84. (in Chinese)

Current tracking control implementation method for shunt active power filter

WEN Xiao-ling, LI Feng-xu, YI Chi, WEN Chao

(School of Electrical and Information, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: An improved deadbeat current tracking control method was proposed based on the shunt active power filter. First, the output reference current value of the next time was predicted using the linear prediction method at a certain time. Then, the duty cycle of pulse width modulation signal was calculated based on the discrete mathematical model of the active power filter. This method can not only eliminate the calculation delay due to the algorithm complexity effectively but also ensure the stability of the system. At the same time, the direct-current link (DC-link) impact current was inhibited using the method of DC-link capacitor pre-charging and DC-link voltage increased linearly before the active power filter was put into operation. Proportional integral control method was used to make the DC-link voltage fluctuated within a certain range. Furthermore, the presented control strategy was implemented on the hardware platform of the active power filter based on the digital signal processor TMS320LF2407A. Power grid side current waveforms were analyzed before and after the active power filter was put into operation. Experimental results show that the proposed current tracking control and DC-link voltage methods can make the active power filter to eliminate the harmonic currents effectively in the power grid.

Key words: deadbeat control; active power filter; direct current link voltage control; digital signal processor

本文编辑:苗 变