

有源滤波器直流侧电压稳定控制方法

许胜辉

(武汉职业技术学院 电子信息工程学院,湖北 武汉 430074)

摘要:针对有源滤波器直流侧电压波动对有源滤波器的稳定性问题,详细地分析了直流侧电压波动产生的原因。并提出了一种改进的基于电压偏差平方的PI控制方法,此方法对处理传统PI控制的非线性问题有很大的改进。通过实验验证,该方法具有可行性和有效性。

关键词:有源滤波器;直流侧电压;改进PI控制

中图分类号: TN713

文献标识码: A

文章编号: 1671-931X (2015) 01-0059-04

引言

目前,有源滤波器直流侧电压稳定的控制大多采取传统的PI控制方法,如有模糊-PI控制方法^[1]、直流侧电压闭环控制方法^[2]、直流侧电压神经网络控制^[3-6]等。本文探讨了有源滤波器直流侧电压波动的原因和它对系统稳定控制、谐波补偿效果的影响,提出了一种改进的基于电压偏差平方的PI控制的方法。最后通过实验验证了改方法的有效性。

一、工作原理

文中并联APF采用电压型逆变器,它的负载可作为谐波源,APF输出与谐波电流幅值相同而相位相反的电流,并与负载产生的谐波叠加,可滤掉电网中的谐波。该谐波检测电路可实时检测出负载电流中的谐波成分,该驱动电路将电流跟踪电路生成的PWM信号转变成逆变器开关器件的开关信号,逆变器向电网注入补偿电流,用来实现补偿谐波的目的。APF工作性能取决于对谐波电流的高精度和实时的检测,常用的有傅立叶变换法、小波变换、瞬时无功功率理论等方法,而采用基于瞬时无功功率理论最为广泛。该理论有d-q算法、p-q算法以及ip-iq算

法,通过比较,采用ip-iq算法。它可以准确检测出电网的负序和谐波电流,准确度不受电网电压畸变和负载变化的影响。

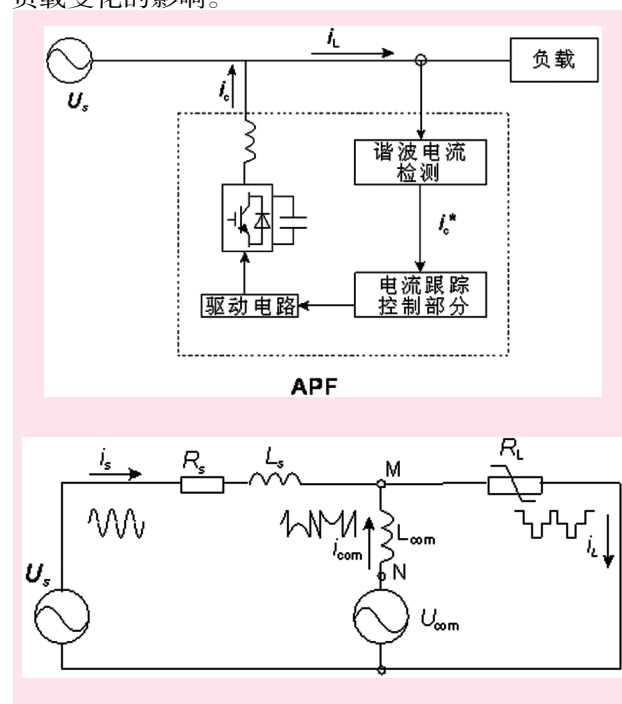


图1 APF工作原理与框图

二、直流侧电压波动的原因

APF 直流侧电压参数波动的原因有:(1)APF 与电网之间大容量的无功交换;(2)负序电流和系统电压在直流侧产生的脉动,引起 APF 直流侧电压波动;(3)逆变器开关损耗引起 APF 直流侧电压降低;(4)APF 自身的功耗,它要从系统吸收一定的有功功率。

从图 1 中的 APF 原理框图可知:

$$L_{\text{com}} \frac{di_{\text{com}}(t)}{dt} = U_{\text{com}}(t) - U_s(t) \quad (1)$$

其中 $U_s(t)$ 和 $U_{\text{com}}(t)$ 分别是系统电压和 APF 输出电压, L_{com} 是等效电感。

根据电压源逆变器的调制控制理论,可以将电压源逆变器等效为一个比例放大器,即:

$$U_{\text{com}}(t) = KU_{\text{dc}}(t) \quad (2)$$

$U_{\text{dc}}(t)$ 为电压源逆变器的直流侧电容电压,而 K 为与调制控制方法有关的函数。

$i_c(t)$ 为使能够快速的跟踪要补偿的电流,设计时必须重视其电流变化率,从而要提高 $\frac{di_{\text{com}}(t)}{dt}$,

需减小 APF 的等效电感 L_{com} ,或者提高逆变器输出电压 $U_{\text{com}}(t)$ 。APF 中等效电感 L_{com} 越小,它的电流跟踪能力越强,但 L_{com} 过小,APF 输出电流中基于开关频率的特征谐波将会增大,一旦有源滤波器本身出现故障,也会产生较大的过电流,从而影响系统稳定运行。而调制控制函数的变化范围一般是固定的,因而提高直流侧电容电压 $U_{\text{dc}}(t)$ 将成为提高 APF 电流跟踪能力的有效手段。它的取值过低,将不能谐波电流完全消除;它的取值越高,补偿效果就越好,但将增加逆变器和电容器的容量,对器件耐压的要求也将提高,增加成本。它的电流侧电容电压波动或引起直流侧欠压,它们都将影响 APF 的正常工作或导致直流侧出现过压,影响 APF 的可靠运行。

三、控制方法

由于流入有源滤波器的有功电流直接影响其直流侧电压,目前主要采用 PI 控制,其基本原理是:根据直接母线电压的实际测量值 U_{dc} 与参考电压值 U_{dset} 之差,通过 PI 控制方法得到调节结果,将此调节结果叠加到瞬时有功电流的直流分量上,然后产

生对应的指令电流,使 APF 的补偿电流包含一定的基波有功电流分量,将 U_{dc} 调节到参考电压值。

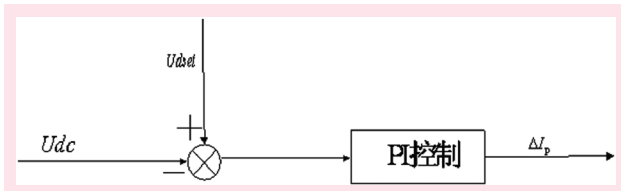


图 2 PI 控制原理图

传统的 PI 控制虽然能对直流侧电压起到有效的控制作用,但会导致被控制系统呈现严重的非线性,具有较大的超调量和静差,响应速度也比较慢。为了获得更好的稳态控制方法,各种新型的控制方法产生了,有模糊控制理论;有自适应滤波控制;还有神经网络控制等等,但很多都只是处于理论阶段,本文根据原有的理论提出了基于电压差平方的 PI 调节的控制策略,通过软件设计和仿真结果,发现其有效地控制了直流侧电压的稳定,保证了 APF 的稳定运行和谐波补偿的效果。

(一)电压差平方的 PI 控制方法

根据两端口网络的能量守恒定律,忽略逆变桥的开关损耗,它从交流侧吸收或释放的能量等于它向直流侧电容充电或放电的能量,即:

$$P_{\text{AF}}(t) = P_c(t) \quad (3)$$

$$P_c(t) = CU_{\text{dc}} \frac{dU_{\text{dc}}(t)}{dt} \quad (4)$$

$$\overline{P_{\text{AF}}}(t) = \frac{1}{2} U_s(t) I_s \quad (5)$$

由式(4)可知,APF 释放的瞬时有功功率平均值

$$\overline{P_c}(t) = \frac{1}{T} \int_0^T P_c(t) dt = \frac{1}{2T} C \cdot \Delta U_{\text{dc}}^2 \quad (6)$$

由此可知, I_s 可以由直流侧电容电压 ΔU_{dc}^2 的变化值来确定。

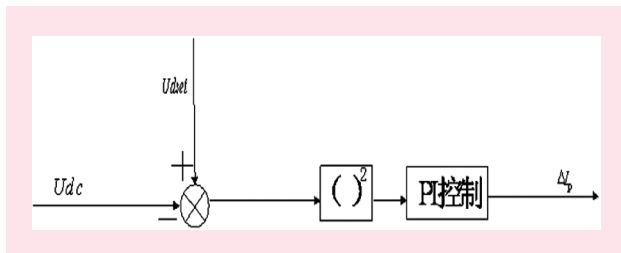


图 3 基于电压差平方的 PI 调节原理图

(二)电压差平方的 PI 控制对谐波电流的控制
与电网 A 相同相位的正余弦信号,通过锁相环 PLL 保证与电网同相位,通过正余弦发生器产生正

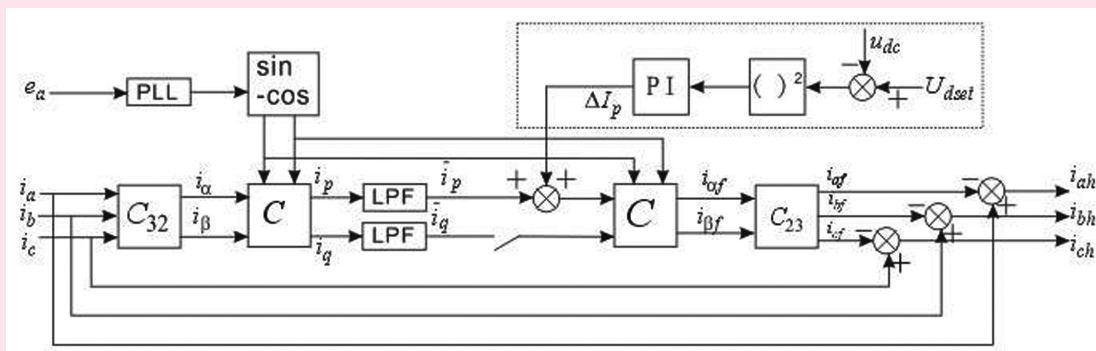


图4 包括直流侧电压控制对谐波电流检测的电路图

余弦信号。自动实时的跟踪电网频率,采样的负载电流通过低通滤波对 20HZ 以上频率进行滤波,然后进行 i_p-i_q 算法。其中,低通滤波器保证尽可能衰减交流分量,为保证滤波算法简单易行,系统采用 IIR 滤波器。直流侧电压对谐波电流的影响通过基于电压差平方的 PI 控制将 ΔI_p 补偿到 \bar{i}_p ,得到谐波电流。

四、实验结果分析

在前面分析的基础之上我们设计了一个三相/50Hz,380V/8KVA 容性负载的 APF 的实验装置。它的相关参数如下:系统相电压 220V,系统线路阻抗 $0.3\Omega + 0.3mH$,连接电感 $0.68mH$,变流器开关频率 10KHz,直流侧电容 $5000\mu F$,整流负载直流侧电感 $160mH$,电阻 15Ω 。中间电压采用软启动,分三次升至稳定电压 700V。因为当 APF 滤波装置启动时,由于直流侧电压突然由未投入装置时的稳定值在极短的时间内上升至设定值,从而造成了较大的 ΔU_{dc} 。



图5(a)不接PI实验时的负载A相电流波形及频谱

该装置实验波形见图5所示。图5(a)所示是不带任何滤波器时负载电流波形,可以看出此时负载电流的畸变率超过40%。图5(b)所示的是采用传统电流控制电压源策略的 APE (此时逆变器直流电压

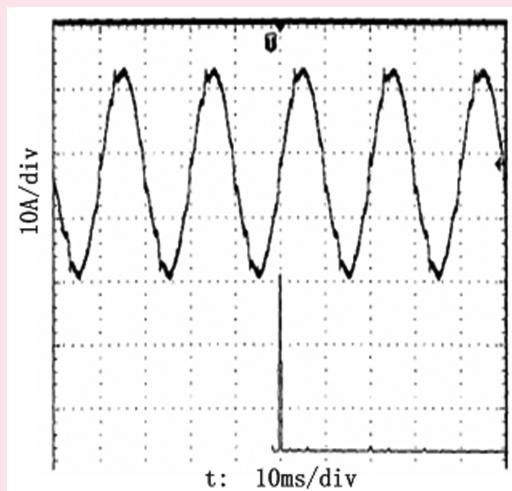


图5(b)接传统PI实验时的负载A相电流波形

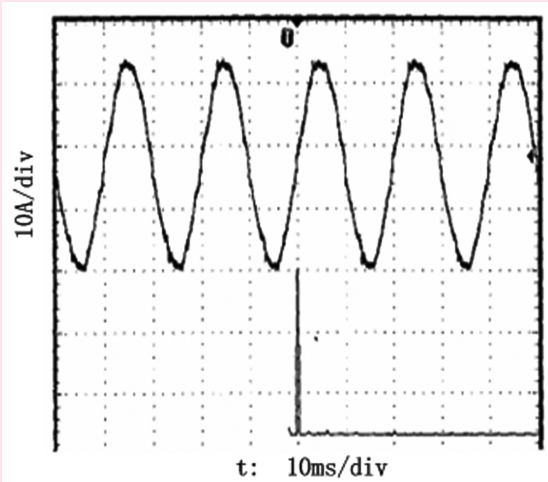


图5(c)接新型控制策略的PI实验时的负载A相电流波形为 360V)后,实验的电网 A 相电流波形以及频谱。图5(c)所示的是接入提出的采用新型控制策略的 APE 后(此时逆变器直流电压为 300V),实验的电网 A 相电流波形以及频谱。从图5(c)对比可以看出,采用新型控制方案后,APE 的性能价格比得到很大提高,电网电流的畸变率很小,THD($\%$)<5%。

五、结语

从实验波形图 5 可以看出基于电压差平方的 PI 调节(新型控制策略 PI 调节方法)比传统的 PI 调节方法对直流侧电压稳定控制在超调量和静差上都有很好的改善。由图 5 可知基于电压差平方的 PI 调节对补偿效果有明显改善,比传统 PI 调节有进一步改善。基于电压差平方的 PI 调节的控制策略,提高了 APF 稳定工作的性能。这种方法有较强的处理非线性能力,且不需要增加硬件设备。采用该控制技术后,能大大改善传统 APF 的滤波性能,减小有源部分的容量,增加了装置的性能。实验结果验证了该控制策略的正确性和可行性。

参考文献:

- [1] H.Akagi, et al. Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices without Energy Storage Components [J]. IEEE Trans. on Industry Application, 1984, 20(3):625-630.
- [2] Marks, J.H. and Green, T.C. Predictive transient-following control of shunt and series active power filters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2002, 17(4):574-584.
- [3] Dixon J. W., Venegas G., Moran L. A. A series active power filter based on a sinusoidal current controlled voltage source inverter [J]. IEEE Trans. on Ind. Electron., 1997, 44(5):612-620.
- [4] Zhaoan Wang, Qun Wang, Weizheng Yao, Jinjun Liu. A series active power filter adopting hybrid control approach [J]. IEEE Trans. on Power Electron., 2001, 16(3):301-310.
- [5] F.Z. Peng, H. Akagi, and A. Nabae. Compensation characteristics of the combined system of shunt passive and series active filters [J]. IEEE Trans. on Ind. Appl., 1993, 29(1):114-152.
- [6] 戴朝波, 林海雪, 雷林绪. 两种谐波电流检测方法的比较研究 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(1):80-84.

[责任编辑: 刘 骋]

Stable Voltage Control at DC-side of Active Power Filter

XU Sheng-hui

(Wuhan Polytechnic, Wuhan 430074, China)

Abstract: In the view of the stability of the fluctuation of DC side voltage on the active filter, the paper analyzes the cause of the fluctuation of DC side voltage in details. Based on the voltage deviation square, the PI control was improved. The method has been proved to be able to improve the nonlinear problem of traditional PI control. Finally the feasibility and effectiveness of the method is verified by experiment.

Key words: active power filter; DC side voltage; improved PI control