

文章编号: 1001-0920(2005)12-1419-04

基于自适应逆控制的有源滤波器的检测算法

吴言凤¹, 吴正国¹, 李 华²

(1. 海军工程大学 电气与信息工程学院, 武汉 430033; 2 中国北方大学 机械电子工程系, 太原 030051)

摘要: 提出一种新的并联型电力有源滤波器的检测方法, 通过控制有源滤波器直流电容电压来确定电网电流所需的基波有功分量的幅值, 首次将自适应逆控制用于电力有源滤波器。将系统的主电路部分及有源滤波器看作广义有源滤波器, 通过自适应逆控制方式控制直流电容电压, 使其输出跟随参考输入, 最终达到抑制谐波和补偿无功的目的。此检测算法简单有效, 稳态和暂态的仿真结果均证实了该算法的可行性。

关键词: 自适应逆控制; 有源电力滤波器; 广义有源滤波器; 稳态和暂态

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Detection Approach of Active Filter Based on Adaptive Inverse Control

WU Yan-feng¹, WU Zheng-guo¹, LI Hua²

(1. College of Electronic and Information Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

2. Department of Mechanical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China. Correspondent: WU Yan-feng, E-mail: wu-y-f2003@yahoo.com.cn)

Abstract: A detection approach of the shunt active power filter is proposed based on adaptive inverse control. The value of the fundamental active current needed by the mains current is determined through controlling the DC capacitor voltage. The supply system with the load and the APF are regarded as the generalized active filter and the inverse of its model is used as the controller to control DC capacitor voltage. The output voltage of the DC capacitor traces the reference voltage input and the harmonic currents can be suppressed and the reactive power can be compensated. The proposed approach is simple and valid. Simulation results under steady state and transient state show the effectiveness of the proposed method.

Key words: Adaptive inverse control; Active power filter; Generalized active filter; Steady state and transient state

1 引言

准确、实时地检测出电网中瞬态变化的电压或电流信号是有源电力滤波器(APF)进行精确补偿的关键。基于电压源逆变器的并联型有源滤波器的作用是补偿电网中非线性负载所产生的谐波和无功。

本文提出一种基于自适应逆控制的并联型有源滤波器的检测算法, 将包括主电路、负载以及APF在内的电路结构看作广义的APF, 通过控制直流电容电压跟随给定的参考信号来得到APF所需要的指令信号。因采用自适应逆控制, 不需要知道APF的精确模型, 而且性能非常可靠。所提出的检测算法

不仅在稳态情况下具有较好的补偿效果, 而且系统的暂态响应过程非常短暂, 能够很快地进入稳态且补偿效果好。

2 应用控制电容电压生成指令电流的有源滤波器检测方法

APF的期望性能是维持电网电流为正弦波且与电网电压同相位, 而不管负载电流如何变化。对于电压源型逆变器, 位于逆变器直流端的电容器用来作为调节电压的能量储存元件。直流电容电压的平均值可提供实功率的流动信息, 电网电流的幅值控制可用一个直流端电压调整电路来获得。直流电容

收稿日期: 2004-11-15; 修回日期: 2005-03-10

作者简介: 吴言凤(1974—), 女, 山东泰安人, 博士生, 从事电力电子、自适应滤波等研究; 吴正国(1943—), 男, 武汉人, 教授, 博士生导师, 从事电力电子、小波分析及自适应滤波等研究。

平均电压的变化能够反映出主电路与负载间功率的转换情况,通过逆变器直流电容的平均电压的变化情况可计算预期的主电流幅值

文献[1, 2]所提出的通过控制直流端电容电压来产生指令电流的控制框图如图 1 所示. 预期的补偿后的三相主电流可表示为

$$\begin{aligned} i_{sa}^* &= I_1 \sin(\omega t), \\ i_{sb}^* &= I_1 \sin(\omega t - 120^\circ), \\ i_{sc}^* &= I_1 \sin(\omega t - 240^\circ). \end{aligned} \quad (1)$$

其中 I_1 是期望的电网电流的幅值,而电网电流的相位可从电网电压中得到. 在此方法中只有一相电网电压用于相位参考来计算预期的电网电流. 式(1)中,因为电网电流的波形和相位已知,故只有电网电流的幅值有待确定. 这一数值可通过图 1 所描述的计算有源滤波器直流端电容电压得到

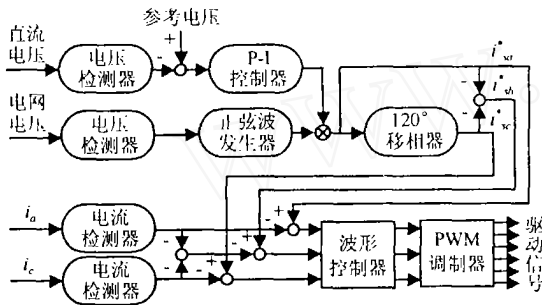


图 1 通过直流端电容电压控制的 APF 检测原理

上述方法不需要计算谐波电流,而且所需乘法器和检测元件要比其他控制算法少得多. 表 1 为采用瞬时无功功率理论检测法与控制直流电容电压生成指令电流的检测法所需器件的比较,显然,采用控制直流电容电压生成指令电流的检测法要简单且容易实现

表 1 两种检测方法的比较

方 法	所需器件		
	乘法器	减法器	电流传感器
瞬时无功功率检测法	10	2	4
控制直流端电容电压检测法	1	6	2

文献[1, 2]采用上述检测方法,直流电容电压采用比例积分(PI)控制,但PI积分器的参数调节非常困难,而且对电路中其他参数的改变非常敏感. 文献[3~ 5]也采用这种检测方法,只是电容电压经过PI之前,利用自适应滤波器代替固定参数的滤波器来滤除电容电压纹波. 文献[6]介绍的直流侧电容电压控制是与基于瞬时无功功率理论检测方法相结合的控制方法,这些方法虽然比瞬时无功功率理论等检测方法简单,但对于直流侧电容电压的控制仍离不开PI积分控制器,因此仍存在调节PI参数困难

且对电路其他元件变化敏感的问题

3 用自适应逆控制控制电容电压的有源滤波器检测方法

自适应逆控制作为一种智能控制,在控制系统和调节器的设计中是一种很新颖的方法^[7]. 其基本思想是利用一个来自控制器的信号驱动对象,而该控制器的传递函数就是该对象本身传递函数的逆^[8, 9].

根据分析,直流电容电压的变化反映了主电路中电网电流的变化,通过控制电容电压为恒定参考值,即可达到谐波抑制和无功补偿的目的. 将并联型 APF 中包括主电路与负载以及 APF 在内的电路结构看作广义的 APF,则可定义如下方程:

$$V = f(i), \quad (2)$$

式中: V 为有源滤波器直流端电容电压, i 为期望的主电流幅值. 根据式(2)所给出的关系对广义 APF 进行自适应建模,得出其自适应模型,再通过离线建模便可得到自适应模型的逆模型

$$\hat{C}(z) = f^{-1}(V),$$

即 $\hat{C}(z)$. 得到逆模型后,将此逆模型的复制作为控制器来实现对有源滤波器的控制. 控制器的输出信号 i_s^* 作为离线逆建模过程的指令信号,而控制器的输入信号可设定为直流端电容电压的参考信号 v_{dc}^* . 控制框图如图 2 所示

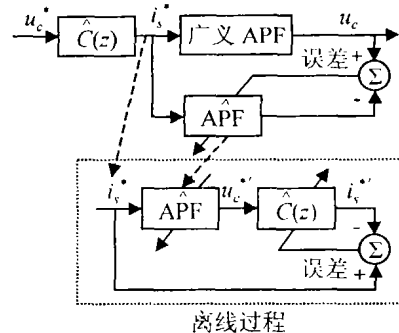


图 2 基于自适应逆控制的并联型有源电力滤波器

由于 $\hat{C}(z)$ 为 APF 模型的逆,在离线过程收敛的情况下,APF 的模型与 $\hat{C}(z)$ 的级联传函即为 1. 在控制电路中,广义 APF 与 $\hat{C}(z)$ 的级联传函也为 1,那么将控制器的输入指令给定为参考信号 v_{dc}^* ,广义的 APF 在完全收敛的情况下其输出便能跟踪这个输入信号

自适应逆控制具有动态响应快、随动性好等特点. 在本方法的建模过程中,首先将 APF 作为一个整体进行自适应建模,得到 APF 的模型;然后通过逆建模的方法,求出其逆传函,即为 APF 模型的逆模型. 在此过程中,不论是求模型的过程还是求其逆

模型的过程都是自适应的过程,并不需要知道广义 APF 的确切表达式,只需要所得的自适应模型与广义的 APF 具有相同的动态特性即可。自适应算法本身可以看作是一个自动寻优的过程,在模型阶数不高的情况下,具有较快的收敛速度

4 仿真研究

根据图 2 的控制框图,建立基于自适应逆控制的并联型有源电力滤波器的仿真模型,仿真中的电路不变参数见表 2

表 2 仿真模型的电路参数

电源阻抗	0.3 M Ω
补偿支路电感	5 M Ω
电源电压	220 V
自适应滤波参数	$N = 2, \mu = 0.001$
直流侧电容	2 200 μ F
二极管整流桥负载	50 M Ω , 30 Ω (串联)

模型中共用了两个自适应滤波器,一个是在自适应建模过程中采用,另一个是在逆建模过程中应用,两个自适应滤波器的阶数均为两阶,自适应算法采用最小均方(LMS)算法,滤波器结构采用的是 FIR 结构

4.1 稳态特性研究

根据表 2 的仿真参数对系统进行仿真,系统稳定后的仿真结果如图 3 所示

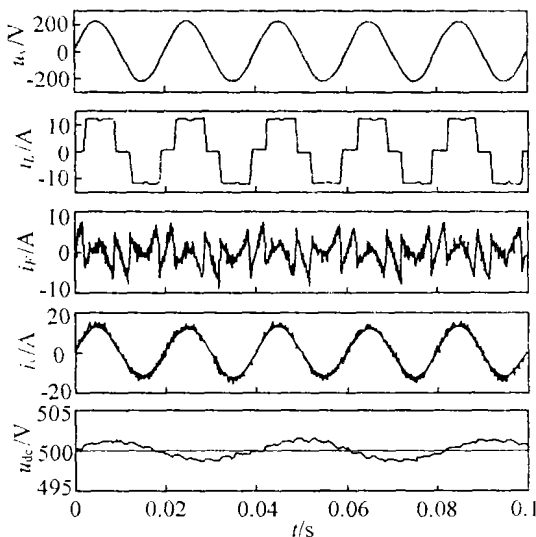


图 3 系统稳态时的仿真结果

图 3 中各分量的次序由上至下分别为电源电压、负载电流、补偿电流、补偿后的主电流以及直流电容电压,由补偿后的主电流可以看出,补偿后的电流波形比较理想,没有较大的毛刺,而且补偿后的主电流中高次谐波的含量非常少;而从直流电容电压可以看出,实际的直流电压跟随参考电压,波动幅值不超过 ± 2 V,这都表明所提出的控制方案具有较

好的补偿性能和跟随性能

4.2 暂态特性研究

改变系统中负载的大小,对于整个基于自适应逆控制系统的有源滤波器的暂态过程进行仿真研究,因为系统实际上是一种运动跟踪系统,当系统的负载改变时,系统的建模过程以及逆建模过程都要相应进行自适应调节,所以要求系统具有快速的跟踪速度和响应能力,而且在暂态过程中,系统要有较高的稳定性和可靠性

图 4 为系统在暂态时的仿真结果,图中各分量次序从上至下依次为电网电压、负载电流、补偿电流、补偿后主电流以及直流端电容电压,从图中可以看出,当负载电流变大时,补偿后的主电流在一个周期内就能达到稳态,而且过渡过程平稳,补偿后的主电流中没有较大的毛刺;从直流端电容电压变化情况看,当负载电流变大时,直流电压先变小,然后又逐渐跟随参考电压的变化,过渡过程快速且平稳.这进一步表明基于自适应逆控制算法的有源滤波器具有较好的鲁棒性

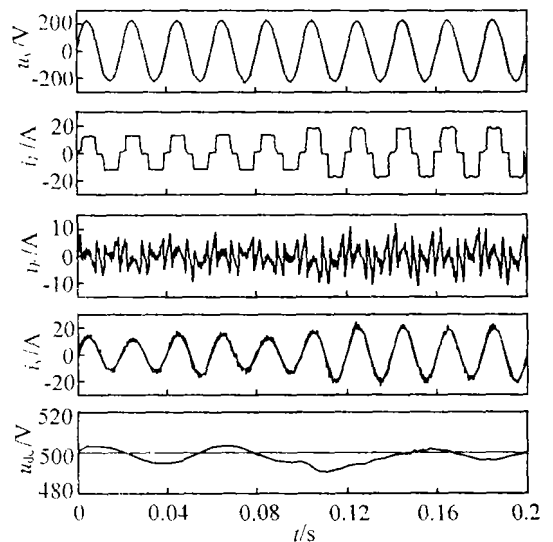


图 4 系统暂态时的仿真结果

5 结 语

本文提出了一种检测算法,通过用自适应逆控制来控制直流电容电压,得出所需要的 APF 的指令信号,仿真研究表明,本方法不仅简单易行,而且具有可靠的性能,因为算法本身的自适应性能,可在较大范围内对电路参数的变化不敏感,在所提出的检测算法中,令人感兴趣的一点是所提出的广义 APF 严格说应该是一个非线性系统,但对其进行自适应建模时,只用两阶的 FIR 滤波器即可满足要求,而且进行逆建模的过程中也只需要两阶的 FIR 结构的滤波器.仿真结果表明,所提出的基于自适应逆

控制有源电力滤波器的检测算法,在稳态和暂态两种情况下都能得到较好的补偿效果和跟随效果

参考文献(References)

- [1] Wu J C, Jou H L. Simplified Control Method for the Single-phase Active Power Filter[J]. *IEEE Proc Electr Power Appl*, 1996, 143(3): 219-224
- [2] Huang S J, Wu J C. A Control Algorithm for Three-phase Three-wired Active Power Filters under Nonideal Mains Voltages[J]. *IEEE Trans on Power Electronics*, 1999, 14(4): 753-760
- [3] 王向军,尹为民,吴正国. 基于自适应滤波理论的单相电力有源滤波器[J]. *电力电子技术*, 1999, 33(4): 19-21.
(Wang X J, Yin W M, Wu Z G. The Single-phase Active Filter Based on Adaptive Filter Theory [J]. *Power Electronics*, 1999, (4): 19-21.)
- [4] 张鹏鹰,王向军,曹跃文. 并联型电力有源滤波器直流电容电压的研究[J]. *电力电子技术*, 2000, 34(3): 3-6
(Zhang P Y, Wang X J, Cao Y Y. DC Capacitor Voltage of Shunt Active Power Filter [J]. *Power Electronics*, 2000, (3): 3-6)
- [5] 吴言凤,吴正国,夏立. 一种基于自适应滤波的三相有源电力滤波器的检测算法[J]. *海军工程大学学报*, 2002, 14(1): 54-57.
(Wu Y F, Wu Z G, Xia L. Analysis of Control Algorithm for the Three-phase Active Power Filter[J]. *J of Naval University of Engineering*, 2002, 14(1): 54-57.)
- [6] 杨军,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, 30(4): 48-89
(Yang J, Wang Z A, Qiu G Y. DC-side Voltage Control of Shunt Active Power Filter [J]. *Power Electronics*, 1996, 30(4): 48-89.)
- [7] Bernard Widrow, Eugene Walach. *Adaptive Inverse Control* [M]. Prentice-Hall Press, 1996
- [8] Widrow B. Adaptive Inverse Control [A]. *The 2nd IFAC Workshop on Adaptive Control and Signal Processing* [C]. Lund, Sweden, 1986
- [9] Plett G L. Adaptive Inverse Control of Linear and Nonlinear Systems Using Dynamic Neural Networks [J]. *IEEE Trans on Neural Networks*, 2003, 14(2): 360-376

(上接第 1418 页)

将 KPCA 应用于故障诊断还有许多方面需要进一步完善. 目前 KPCA 只能诊断故障是否发生,而不能识别故障,原因在于无法从特征空间 F 向原空间进行映射,因而无法象线性 PCA 那样进行故障重构. 另外, T^2 统计量和 SPE 统计量及其控制限的计算方法还需从理论上进一步完善.

参考文献(References)

- [1] Schölkopf B, Smola A, Müller K R. Nonlinear Component Analysis as a Kernel Eigenvalue Problem [J]. *Neural Computation*, 1998, 10(5): 1299-1319
- [2] Kim Sang-Woon, John Oommen B. On Using Prototype Reduction Schemes to Optimize Kernel-based Nonlinear Subspace Methods[J]. *Pattern Recognition*, 2004, 37(2): 227-239
- [3] Baudat G, Anouar F. Feature Vector Selection and Projection Using Kernels[J]. *Neurocomputing*, 2003, 55(1-2): 21-38
- [4] Lee Jong-Min, Chang Kvoov Yoo, Sang Wook Choi, et al. Nonlinear Process Monitoring Using Kernel Principal Component Analysis [J]. *Chemical Engineering Science*, 2004, 59(1): 223-234
- [5] 李巍华,廖广兰,史铁林. 核函数主元分析及其在齿轮故障诊断中的应用[J]. *机械工程学报*, 2003, 39(8): 65-70
(Li W H, Liao G L, Shi T L. Kernel Principal Component Analysis and Its Application in Gear Fault Diagnosis [J]. *Chinese J of Mechanical Engineering*, 2003, 39(8): 65-70)
- [6] Downs J J, Vogel E F. A Plant-wide Industrial Process Control Problem [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 1993, 17(3): 245-255
- [7] Lyman P R, Georgakis C. Plant-wide Control of the Tennessee Eastman Problem [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 1995, 19(3): 321-331
- [8] Leo H Chiang, Randy J Pell, Mary Beth Seasholtz. Exploring Process Data with the Use of Robust Outlier Detection Algorithms [J]. *J of Process Control*, 2003, 13(5): 437-449