

基于灰色预测理论的并联型混合电力有源滤波器研究

徐子利^{1,2}, 罗春风²

(1. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640; 2. 广东电网公司佛山供电局, 广东 佛山 528300)

摘要: 并联型混合有源滤波器应用于电力系统可以动态抑制电网谐波, 但由于有源滤波器控制延时影响而无法进行完全电流补偿。提出采用灰色模型来实现无时延预测控制, 并将其应用于并联型混合有源滤波器有效补偿非线性负载中的谐波电流。文中具体分析了并联型混合电力有源滤波器的谐波检测原理、灰色预测控制策略及 PWM 滞环比较控制策略, 在 EMTDC 平台建立基于灰色预测控制策略的并联型混合有源滤波器仿真模型进行测试, 仿真结果表明采用灰色预测控制策略的并联型混合有源滤波器有较好的谐波抑制和无功补偿的性能。

关键词: 电力系统; 混合有源滤波器; 谐波电流; 灰色预测控制; EMTDC

Study of hybrid filter connected in series APF with PF based on grey prediction control

XU Zi-li^{1,2}, LUO Chun-feng²

(1. Electric Power College, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Foshan Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid, Foshan 528300, China)

Abstract: Hybrid parallel active filter is considered as an effective method for the dynamic suppression of power system harmonic. However, the hybrid active filter system is sensitivity to the delay control and difficult to compensate completely the harmonic current of nonlinear load. In this paper, a hybrid active filter with grey prediction controller is proposed for the harmonic compensation. The grey prediction control strategies as well as the harmonic detection are analyzed, and current hysteresis comparison control method is developed. A simulation model of hybrid active filter based on EMTDC is presented. The simulation results show that the PHAPF with grey prediction controller gives a satisfactory performance in harmonic and reactive power compensation.

Key words: power system; hybrid active filter; harmonic current; grey prediction control; EMTDC

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)22-0083-04

0 引言

在电力电网中, 存在大量非线性负载, 高次谐波的干扰严重影响电力系统中电能质量, 要求对接入电网的设备产生的谐波进行抑制和无功补偿。消除谐波的方法是加装滤波装置。目前对高压大容量谐波源, 国内外目前主要是采用 LC 谐振型无源滤波器 (PF), 并且这些滤波器具有无功和负序补偿功能。由于 PF 的滤波性能对系统阻抗、频率等参数变化极其敏感, 难以达到预想的滤波效果^[1]。有源滤波器 (APF) 虽能克服 PF 存在的缺陷, 但其安装容量受开关器件水平和补偿性能的限制。将无源滤波器和有源滤波器相结合构成的混合型电力有源滤波器, 有助于减少谐波补偿系统的初期投资, 达到 APF 实用化及谐波抑制的目的。

由于检测和计算带来的延时, 无论是串联的还

是并联的 APF 都很难作到完全的电压或电流补偿^[2], 因此我们采用灰色预测来提高补偿效果。

本文采用瞬时无功功率理论的谐波检测和灰色预测控制方法, 在 EMTDC 平台上对并联型混合滤波器系统进行建模, 并实现对该系统的仿真。

1 并联型混合有源滤波器结构和基本工作原理

并联型混合有源滤波器 (PHAPF) 采用 APF 与 PF 并行联结的方式, 如图 1 所示, APF 仍起谐波补偿的作用, 它将 PF 作用后残余的谐波电流加以消除。因此, APF 的容量很小。为使该结构适应高压系统, 可在 APF 上再串联一个高压电容隔离基波电压, 减少基波损耗, 从而进一步减少 APF 的容量。其工作原理就是根据所检测到的负荷谐波电流分量来控制有源滤波器, 使其发出一个相反的补偿谐波

电流^[3]。补偿电流与负载电流中要补偿的谐波及无功电流抵消, 这样在系统中将不会含有这个谐波电流成分, 从而起到补偿作用。

并联型混合有源滤波器由 LC 滤波器和有源滤波器组成, 有源滤波器的主电路是一个小功率电压型 PWM 交流器, 功率器件为 IGBT, 控制电路由指令电流运算电路和 PWM 控制部分组成。APF 对 PF 起补充作用, 由 APF 消除残余谐波电流, 并同时具有消除 PF 与系统阻抗的谐振和参数变化对滤波系统性能的影响, 而且这种结构具有初期投资低、APF 的运行容量小和较好的无功和谐波补偿效果。

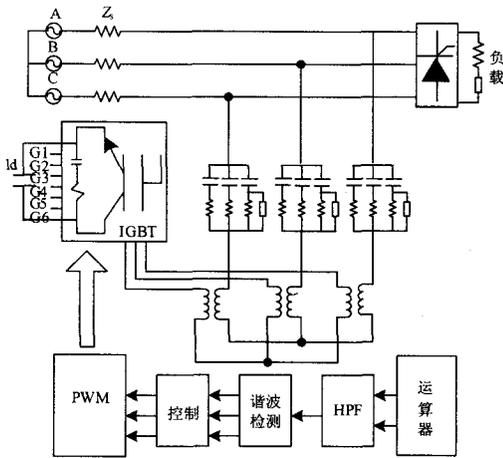


图 1 并联型混合有源滤波器原理图

Fig.1 Schematic diagram of the hybrid filter

2 并联型混合有源滤波控制策略

并联型混合滤波器控制器包括谐波检测、补偿电流控制及 PWM 控制等部分。

2.1 谐波检测

本文采用基于瞬时无功功率理论的谐波检测方法, 使用 i_p, i_q 运算方式^[4]。

该方法用一个相环和一个正、余弦发生电路得到与 a 相电源电压同相位的正弦信号 $\sin \omega t$ 和对应的余弦信号 $-\cos \omega t$, 两个信号与 i_a, i_b, i_c 一起计算出 i_p, i_q 。

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \end{bmatrix} = CC_{32} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \omega t & -\cos \omega t \\ -\cos \omega t & -\sin \omega t \end{bmatrix} C_{32} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:

$$C = \begin{bmatrix} \sin \omega t & -\cos \omega t \\ -\cos \omega t & -\sin \omega t \end{bmatrix}; C_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \end{bmatrix} \quad (2)$$

经 LPF 滤波后得出 i_p, i_q 的直流分量 \bar{i}_p, \bar{i}_q , 即

可计算出基波分量 i_{af}, i_{bf}, i_{cf} :

$$\begin{bmatrix} i_{af} \\ i_{bf} \\ i_{cf} \end{bmatrix} = C_{32}^T C \begin{bmatrix} \bar{i}_p \\ \bar{i}_q \end{bmatrix} = C_{32}^T \begin{bmatrix} \sin \omega t & -\cos \omega t \\ -\cos \omega t & -\sin \omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{i}_p \\ \bar{i}_q \end{bmatrix}$$

谐波分量 i_{ah}, i_{bh}, i_{ch} 为:

$$\begin{bmatrix} i_{ah} \\ i_{bh} \\ i_{ch} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_a - i_{af} \\ i_b - i_{bf} \\ i_c - i_{cf} \end{bmatrix}$$

2.2 参考补偿电流

实际电流参考值就是负荷电流中的谐波电流值, 由于系统负荷非线性, 很难推导一个解析的预测参考电流值, 但可以采用预测模型来预测下一时刻负荷电流的谐波分量, 并采用滚动式的有限时域优化目标函数, 使实际补偿电流始终跟踪参考电流。可以采用灰色模型来实现预测控制, 以系统实际采样数据为原始信息, 建立灰模型 (GM), 用所建立的 GM 预测系统行为的发展, 与行为给定值进行比较、决策, 以确定系统的超前控制值^[5]。图 2 为基于 GM(1, 1) 模型产生参考补偿电流的有源滤波器的原理框图:

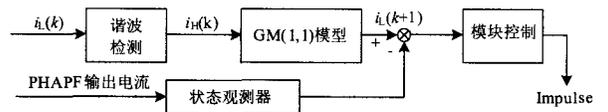


图 2 PHAPF 灰色预测原理框图

Fig.2 Block diagram of a grey prediction PHAPF system

系统采样检测获得一组输出序列

$$x = (i_h(1), i_h(2), i_h(3), \dots, i_h(k)) = (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), x^{(0)}(3), \dots, x^{(0)}(k))$$

对 x 做累加生成运算 $x^{(1)}$, 建立 GM(1, 1) 预测模型微分

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = u \quad (3)$$

其中: a, u 分别为灰色预测控制器的发展参数和灰作用量。

通过最小二乘法计算推导出:

$$\begin{bmatrix} a \\ u \end{bmatrix} = (B^T B)^{-1} B^T Y_M \quad (4)$$

式中:

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}(x^{(1)}(1) + x^{(1)}(2)) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\frac{1}{2}(x^{(1)}(M) + x^{(1)}(M-1)) & 1 \end{bmatrix}, Y_M = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ \vdots \\ x^{(0)}(M) \end{bmatrix}$$

GM(1) 响应模型为:

$$x^{(1)}(k+1, p) = (x^{(1)}(1) - \frac{u}{a})e^{-a(k+p-1)} + \frac{u}{a} \quad (5)$$

$$x^{(0)}(k+1, p) = x^{(1)}(k+1, p) - x^{(1)}(k, p) = (x^{(1)}(1) - \frac{u}{a})e^{-a(k+p-1)}(1 - e^{-a}) \quad (6)$$

预测值 $i_h(k+1)$ 与 PHAPF 输出的补偿电流 $i_h(p)$ 比较判断, 通过控制模块产生脉冲信号控制逆变器的输出补偿电流。

2.3 PWM滞环比较控制策略

电流滞环比较控制方法是将指令电流信号与实际补偿电流的差值输入到具有滞环特性的比较器中进行比较, 形成方波脉冲信号, 得到PWM波控制信号来控制逆变器的开关器件^[6]。这样就可以以补偿电流参考值为基准设计一个滞环带, 当实际补偿电流欲离开滞环带时, 逆变器开关动作, 使实际电流始终保持在滞环带内, 围绕其参考值上下波动。

PWM 控制信号产生原理如图3 所示。

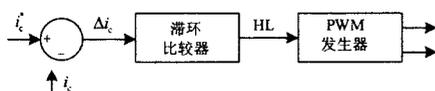


图3 滞环比较PWM控制信号原理框图

Fig.3 Principle drawing of current hysteresis comparison pulse width modulation control

将预测值 $i_h(k+1)$ 与 PHAPF 输出的补偿电流 $i_h(p)$ 的差值 Δi_c 输入到施密特滞环比较器, $\pm \lambda$ 是该施密特比较器的阈值, 输出HL的表达式为逻辑函数:

当 $\Delta i_c < -\lambda$ 时, HL下跳; 当 $-\lambda \leq \Delta i_c \leq \lambda$ 时, HL不变。

这样PWM 发生器根据滞环比较器的状态产生相应的PWM触发脉冲控制信号, 来控制逆变器的开关器件。使逆变输出电流在指令电流 $\pm \lambda$ 之间波动, 确保输出电流能较好地跟踪指令电流信号。采用电流滞环比较控制策略, 开关频率、响应速度及电流的跟踪精度会受滞环带宽一定影响。PWM脉冲经驱动电路后作用于有源滤波器主电路, 产生补偿电流。这样使电网电流中只含有基波的有功分量, 从而达到消除谐波与无功补偿的目的。

3 基于 EMTDC 的系统仿真

3.1 EMTDC 仿真软件

EMTDC 提供类似于 EMTP 的 TACS 系统, 由于程序库中的函数采集网络中(支路或节点)变量信息, 再通过函数块的功能, 实现变量的转换, 构成

所需要的控制变量; 另一方面它将控制系统与该元件特性放在一处成为一个块元件而组合到网络中去, 这给程序的使用者提供了极大的方便, 是应用于电力系统科学计算的仿真软件。

3.2 EMTDC 仿真模型

该有源滤波器可分为电流检测、电流控制、PWM 逆变器主电路三部分, 并联型混合有源滤波器的仿真模型如图4 所示。

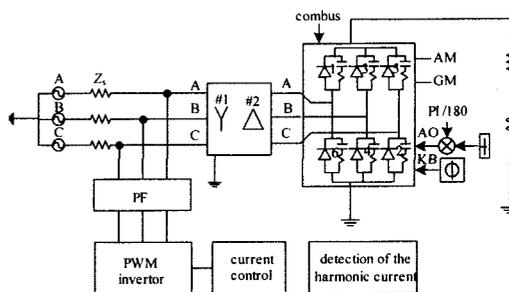


图4 滤波器整体框图

Fig.4 Overall block diagram of the hybrid filter

4 系统仿真结果分析

并联型混合滤波器系统参数如下: $U=380$ V, $f=50$ Hz, $L_s=1$ mH; 三相六脉冲可控整流器作为感性负载, 最大容量为 200 kW; 逆变器侧的直流电压为 200 V, $L_{dc}=0.3$ mH, $C_{dc}=5\ 000$ μ F; C型高通滤波器参数为: $C=1\ 000$ μ F, $L_d=0.576$ mH, $C_d=17\ 600$ μ F, $R=1.012$ Ω 。选取环宽 $\lambda=0.005$ 。

图5 示出整流负荷触发角为 20° , 未投入有源滤波器时电源提供的电流曲线。

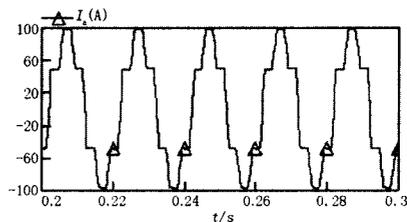


图5 未加入有源滤波器时的电源电流曲线

Fig.5 Source current without PHAPF

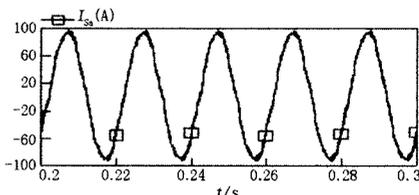


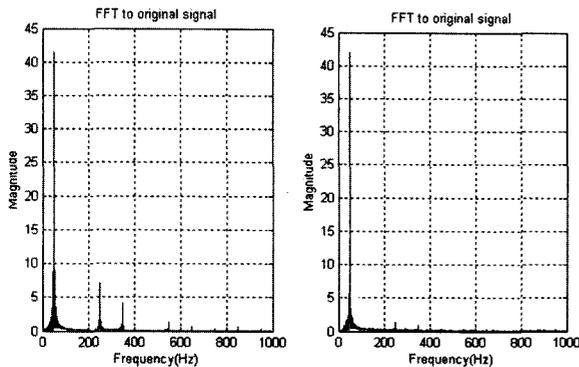
图6 加入有源滤波器时的电源电流曲线

Fig.6 Source current with PHAPF

图 6 为投入滤波器之后的负荷电流曲线。畸变的电源供电电流波形得到明显的补偿。

从图 7(a)和 7(b)两图可以明显看出, 加入有源滤波器之后谐波分量被有效地进行了补偿。

表 1 为未投入有源滤波器和投入有源滤波器的电源电流各次谐波含量百分比对照表。投入有源滤波器后的电源电流五次谐波和七次谐波被明显消除。



(a) 未投入滤波器电源电流频谱图 (b) 投入滤波器后电源电流频谱图

图 7 滤波器电源电流频谱图

Fig.7 Frequency spectrum of source current

表 1 有源滤波器投入前后的电源电流各次谐波分量

Tab.1 Before and after the filter input power at the current harmonic component

状态	谐波	5 次	7 次	11 次	13 次	17 次
	谐波	谐波	谐波	谐波	谐波	谐波
未加有源滤波器		11.16	9.167	0.048	0.03	0.001
加入有源滤波器		1.33	0.48	0.003	0.008	0.001

在并联混合型有源电力滤波器输出回路设计高通滤波电路滤波后可消除开关频率纹波^[7], 投入高通滤波电路后逆变器输出功率为投入前的 28.4%, 明显降低逆变器的容量要求。投入高通滤波器前逆变器侧的直流电压要求为 800 V; 投入高通滤波器前逆变器侧的直流电压要求为 200 V。

采用灰色预测控制算法能够明显改善电网电源侧电流波形, 通过对系统下一步输出做出预测, 根据预测结果进行控制, 达到消除谐波的目的。

5 结语

谐波抑制关键是谐波电流的实时、准确、快速的检测, 由于检测和计算的延时, APF 很难实现完全的电流补偿, 使用 PWM 控制策略存在一定的偏差。瞬时无功功率理论检测电流方法能很好地满足实时、准确、快速谐波电流检测的要求。本文利用瞬时无功功率理论进行并联型混合有源滤波器的仿真

设计, 采用 GM(1, 1) 预测模型预测下一时刻负荷电流的谐波分量, 并采用滚动式的有限时域优化目标函数, 使实际补偿电流始终跟踪参考电流。用 EMTDC 仿真软件对滤波器的各环节进行了建模和仿真。仿真结果表明本文所设计的有源滤波器装置能够有效地检测出谐波分量, 进行谐波补偿和无功补偿, 同时大大降低了逆变器的容量要求。

参考文献

- [1] 王兆安, 杨君, 刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
WANG Zhao-an, YANG Jun, LIU Jin-jun. Harmonic Suppression and Reactive Power Compensation[M]. Beijing: China Machine Press, 1998.
- [2] 姜齐荣, 赵东元, 陈建业. 有源滤波器——结构·原理·控制[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
JIANG Qi-rong, ZHAO Dong-yuan, CHEN Jian-ye. Active Power Filter—Structure Theory Control[M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [3] Hirofumi Akagi, Yukifu Mi Tsukamoto, Akira Nabae. Analysis and Design of an Active Power Filter Using Quad-Series Voltage Source PWM Converters[J]. IEEE Trans on Industry Application, 1990, 26(1).
- [4] 孙浩, 周维维. 并联混合型有源电力滤波器滤波特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2007, 35(8): 61-65.
SUN Hao, ZHOU Luo-wei. Filter Performance Analysis of Hybrid Shunt Active Power Filter[J]. Power System Protection and Control, 2007, 35(8): 61-65.
- [5] 李江, 孙海顺, 等. 基于灰色系统理论的有源滤波器的预测控制[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(2).
LI Jiang, SUN Hai-shun, et al. Prediction Control of Active Power Filters Based on the Grey Theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(2).
- [6] Malesani L, Tenti P. A Novel Hysteresis Control Method for Current Controlled Voltage Source PWM Inverters with Constant Modulation Frequency[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1990, 26(1): 88-92.
- [7] 王银乐, 刘振华. 并联有源滤波器中输出滤波器的设计研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(11): 46-49, 70.
WANG Yin-le, LIU Zhen-hua. Design and Study on Output Filter of Parallel Active Power Filters [J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(11): 46-49, 70.

收稿日期: 2008-08-30; 修回日期: 2009-09-30

作者简介:

徐子利 (1976-), 男, 工学硕士, 现从事电力系统继电保护管理和研究工作。E-mail: zilixu@21cn.com