

有源电力滤波器仿真研究

华晓萍,王 奔,孟凌凌,兰金茹,孟庆波

(西南交通大学 电气工程学院,四川 成都 610031)

摘要: 叙述了有源电力滤波器 APF(Active Power Filter)的基本原理,分别介绍了组成 APF 的谐波和无功电流检测电路、补偿电流发生电路的构成和功能,在此基础上,介绍了常用的 APF 的谐波和无功电流检测方法、补偿电流控制方法和直流侧电压控制方法。为了验证 APF 的补偿功能同时加深对其控制方法的认识和理解,用 Matlab 6.5/Simulink 下的 SimPower Systems Blockset 对整个三相并联电压型 APF 系统进行了仿真研究。仿真结果表明,电压空间矢量脉宽调制 SVPWM(Space Vector Pulse Width Modulation)控制的 APF 能对负载电流中的谐波和无功分量进行快速精确的补偿。

关键词: 有源电力滤波器; 谐波和无功电流检测; 补偿电流控制; Matlab 仿真

中图分类号: TN 713; TM 714.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2007)01-0042-04

0 引言

随着电力电子装置的广泛应用,各类非线性负载产生的谐波和无功功率对电网的危害也日益严重。有源电力滤波器 APF(Active Power Filter)作为一种理想的谐波无功补偿装置,能够对频率和幅值均发生变化的谐波和无功进行补偿,弥补了传统无源电力滤波器的不足,具有比无源电力滤波器更好的补偿性能,因而得到了迅速的发展,在国外已开始应用于实际生产中。

目前,我国对 APF 的研究和开发尚处于实验阶段,暂时没有大容量的成熟产品投入使用,因此对 APF 的研究具有十分重要的意义^[1]。

1 APF 工作原理^[2-3]

APF 由 2 大部分组成:谐波和无功电流检测电路及补偿电流发生电路(由补偿电流控制电路、驱动隔离电路和主电路 3 个部分构成),APF 工作原理示意图如图 1 所示。前者的作用是检测出负载电流中的谐波和无功电流等分量;后者的作用是根据检测出来的谐波和无功电流等产生相应的补偿电流。其中,补偿电流控制电路是补偿电流发生电路的核心环

节,负责根据补偿电流指令信号,由控制算法计算得到主电路每相桥臂各功率开关器件的触发脉冲;隔离与驱动电路负责驱动主电路 IGBT 开关;主电路用来产生补偿电流。与 APF 并联的高通滤波器 HPF(High Pass Filter)能滤除 APF 所产生的补偿电流中开关频率附近的谐波。

APF 的基本工作原理是:谐波无功电流检测电路将负载电流 i_L 中的谐波电流 i_{Lh} 和无功电流 i_{Lq} 分离出来,然后把它们反相并产生出补偿电流 i_c 的调制波信号 i_c^* ,亦即指令信号 $i_c^* = i_{Lh} + i_{Lq}$ 。补偿电流控制电路根据 i_c^* 的值输出触发脉冲,通过驱动隔离电路驱动主电路的功率开关,使其创建出补偿电流 i_c , i_c 要跟踪 i_c^* ,故 $i_c \approx -i_c^*$,因此

$$i_s = i_L + i_c = i_L + i_c^* = i_L - (i_{Lh} + i_{Lq}) = i_{Lp} \quad (1)$$

即电源电流 i_s 中只含有基波有功分量 i_{Lp} ,从而达到消除谐波和补偿无功功率的目的。根据此原理,对于三相 APF,还能对电流的不对称度和负序电流等进行补偿。另外,作为主电路的 PWM 变流器,在产生补偿电流时,主要作为逆变器工作,在电网向 APF 直流侧储能元件充电时作为整流器工作,由于其既能工作在逆变状态又能工作在整流状态,故可称作变流器。

APF 控制系统中谐波无功电流的检测和补偿电流控制 2 部分控制方法的选取是影响 APF 性能的关键。

2 APF 谐波和无功电流检测方法

准确、实时地检测出电网中瞬态变化的畸变电流是 APF 进行精确补偿的关键。谐波电流检测方法主要有以下几种^[2-3]:模拟带通滤波器(或陷波器)检测法、基于频域分析的快速傅里叶变换 FFT(Fast Fourier Transformation)检测法、基于现代控制理论的检测法、瞬时波形比较法、自适应检测法和基于瞬时无功功率理论的检测法。其中,常用的是基于瞬时无功

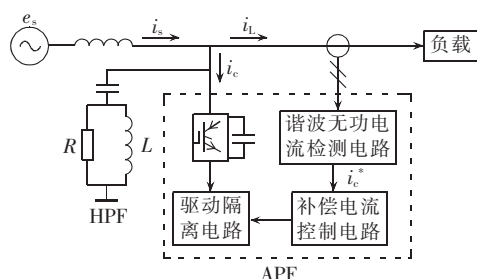


图 1 APF 基本原理

Fig.1 Principle of active power filter

率理论的检测法,目前,该方法在三相 APF 的电流检测方法中占主导地位。

基于瞬时无功功率理论的检测法现已包括 $p-q$ 法、 i_p-i_q 法和 $d-q$ 法。 $p-q$ 法应用最早,适用于三相对称且无畸变的公用电网; i_p-i_q 法不仅适用于三相不对称公用电网,而且对电网电压畸变也有效;基于同步旋转 Park 变换的 $d-q$ 法,简化了对称无畸变情况下的电流增量检测,同时也适用于不对称、有畸变情况下的电流增量检测。基于瞬时无功功率理论的检测法具有较好的实时性,在三相电路中得到了广泛的应用。

3 APF 补偿电流控制方法

补偿电流的控制方法是实现 APF 功能的核心环节,它通过产生开关器件的驱动脉冲控制 APF 的行为,从而实现对谐波和无功电流的动态补偿。现阶段 APF 采用的控制方法有三角波比较控制、滞环比较控制、空间电压矢量脉宽调制 SVPWM(Space Vector Pulse Width Modulation)控制、单周控制、无差拍控制及预测控制等^[1,4-5]。目前,常用到的控制方法是三角波比较控制、滞环比较控制和 SVPWM 控制。

对于电压型 APF,控制电路除了要使 APF 输出端的补偿电流跟踪指令电流的变化外,还需使主电路直流侧电压保持稳定。在 APF 实际运行时,很难把直流侧电容电压维持在某一给定值。实际上,保持直流侧电容电压稳定,只需对主电路进行适当的控制即可实现,这就是比例积分(PI)调节控制法。目前,常用的 PI 调节控制法,是将检测到的电容电压实际值与给定的参考电压值相减之差通过 PI 调节器得到调节信号,并将其作为实际的补偿电流指令值叠加到原检测电路中的电流指令信号上。该指令值是保证直流电压恒定的电流指令值,用来对 APF

的损耗进行补偿。由于 APF 的损耗是作为瞬时实功率分量考虑的,因此,PI 调节后得到的电流指令值,叠加到瞬时有功电流经 $d-q$ 变换后的直流分量上,经运算后,原检测电路输出的电流指令信号中包含一定的基波有功电流分量,使 APF 直流侧与交流侧交换能量,从而将直流侧电容电压调至给定的参考值^[2]。

4 APF 仿真研究

APF 系统是一个复杂的非线性、强耦合控制系统,对它进行精确的理论分析是比较困难的,而且新的控制算法应用于这样一个实际系统往往需要花费大量的时间和精力。仿真可以验证控制系统结构的正确性,加深对控制规律的认识和理解。仿真中,系统的一些重要电路参数和控制参数的值对实验装置的参数设计具有一定的参考价值。因此,在实际装置设计制作之前有必要对整个系统控制算法的有效性进行仿真研究^[6-7]。本文利用 Matlab 6.5/Simulink 中的电力系统模块 SimPowerSystems Blockset 对三相并联电压型 APF 进行动态的仿真和分析^[9-11],如图 2~7 所示。

图 2 所示为整个三相并联电压型 APF 系统的模块图^[12-14],图中控制三相可控桥式整流器的为同步六脉冲发生器。当其导通角输入为 0° 时,负载电流中仅含有高次谐波电流;当导通角输入为 60° 时,负载电流中不仅包含谐波分量,而且包含一定的无功分量。仿真中的谐波和无功电流检测采用基于瞬时无功功率理论的 $d-q$ 检测法,即图 2 中的 $d-q$ 检测子系统,仿真框图如图 3 所示。

APF 直流侧电压的控制采用 PI 调节法,将实际的电容电压与参考电容电压的差值通过比例积分器,得到调节信号,再将其叠加到图 3 所示的 $d-q$ 检测系统中的基波有功电流上,从而把直流侧电容电压控制到给定值^[13,15]。APF 子系统仿真框图如图 4 所示。

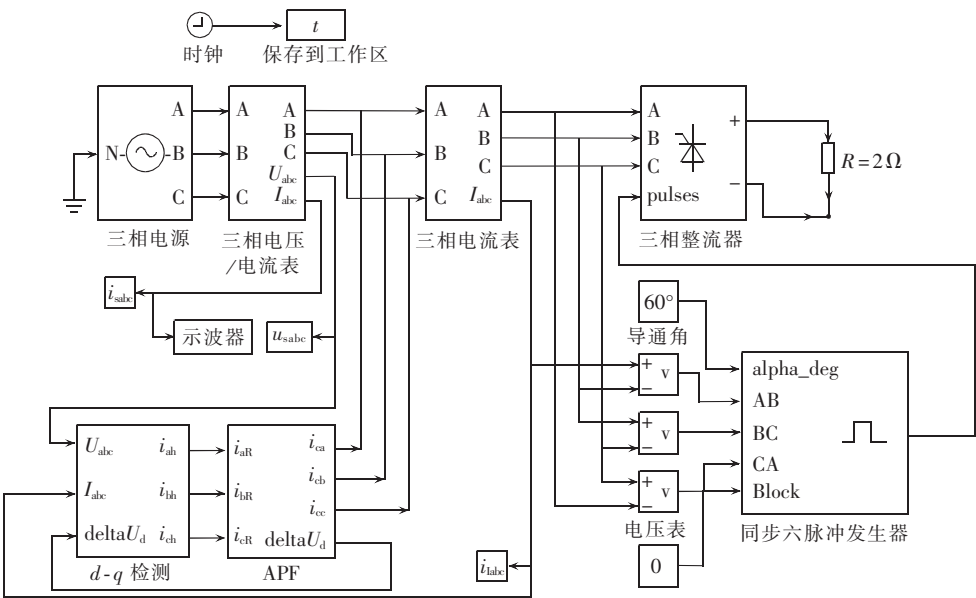


图 2 有源电力滤波器系统仿真电路

Fig.2 Simulation circuit of active power filter system

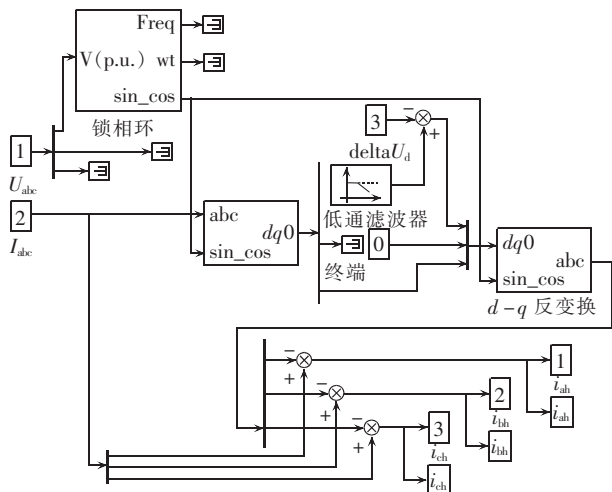


图 3 d-q 检测法仿真电路图

Fig.3 Simulation circuit of d-q detection method

APF 的补偿电流控制方法采用空间电压矢量 PWM 控制方法,对 SVPWM 控制模块子系统的仿真既可通过模块实现^[16],如图 5 所示,也可采用 M 函数通过编写程序实现。SVPWM 的具体实现方法可参考其他文献,本文不作讨论。对整个 APF 系统仿真算法采用ode23tb,0.1 s 仿真结果如图 6 所示。

从仿真结果可以看出,空间电压矢量 PWM 补偿电流控制方法具有良好的补偿性能和较快的动态响应速度。补偿后的电流与电源侧电压同相位,即 APF

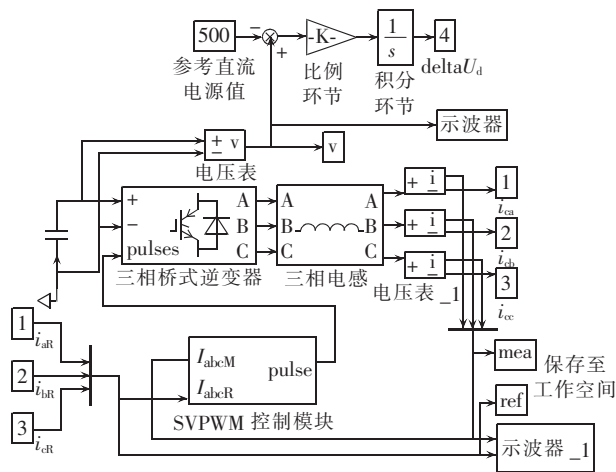


图 4 APF 补偿电流控制仿真电路图

Fig.4 Simulation circuit of APF compensation current control

既补偿了谐波电流也补偿了无功电流;直流侧电容电压有一定的波动,这是由于 APF 既对谐波又对无功电流进行补偿,从而使其直流侧与交流侧有能量交换,直流侧电压会随着交流侧消耗的有功功率的变换而波动,但 APF 瞬时有功功率的平均值为零。

另外,与传统的三角波控制方法和滞环电流控制方法相比,空间电压矢量 PWM 控制方法由于其整个补偿电流的控制可以通过 SVPWM 算法实现,不需要采用模拟的滞环比较控制电路,使得这种控制

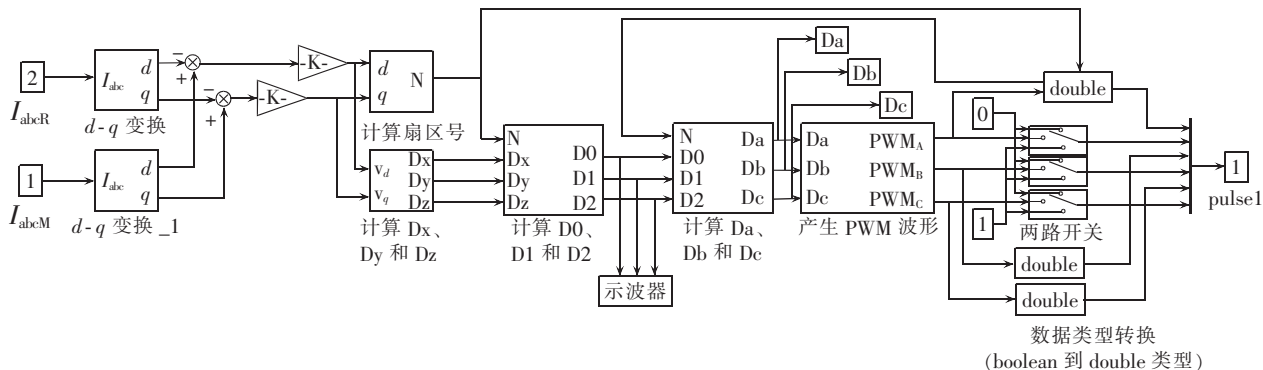


图 5 SVPWM 控制模块仿真框图

Fig.5 Simulation circuit of SVPWM control module

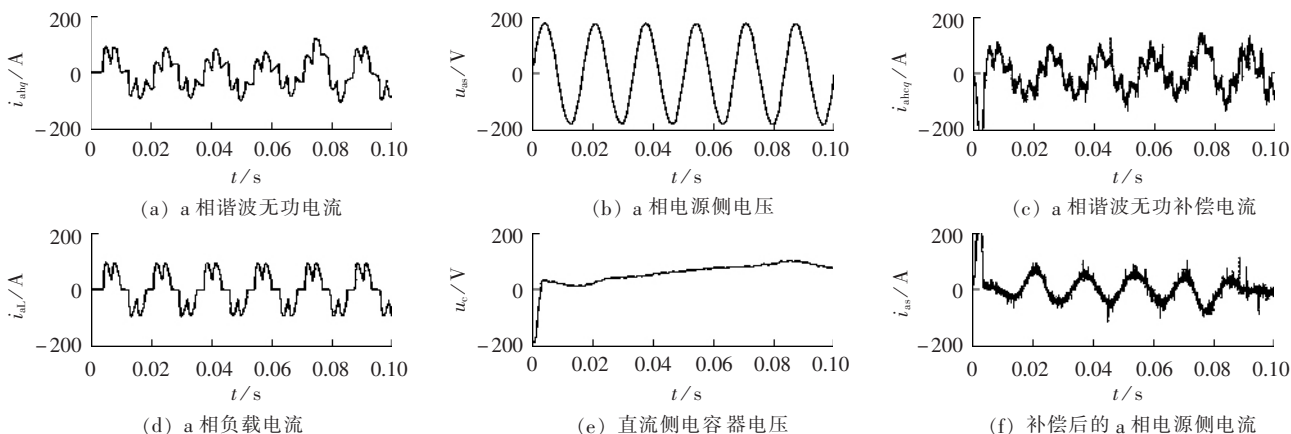


图 6 APF 系统仿真结果

Fig.6 Simulation results of active power filter system

方法更易于数字化实现。目前,用数字信号处理器 DSP(Digital Signal Processor)实现 SVPWM 算法再对 APF 进行控制的方法,是一种新的且值得推荐的控制方法,这是由于现有的很多 DSP 芯片上提供了专门用于产生 PWM 控制脉冲的 PWM 端口,如 TI 公司的 TMS320C2407 芯片,使 SVPWM 技术的实现更为方便,算法仅需计算出 APF 的每一相桥臂上开关在一个 APF 开关周期中的占空比,再将其送入芯片上的 PWM 端口,便可直接产生出控制 APF 开关器件的 PWM 脉冲。

5 结语

详细叙述了有源电力滤波器的基本原理,然后简要介绍了有源电力滤波器常用的谐波电流检测方法、补偿电流控制方法及直流侧电压控制方法,重点对三相并联电压型有源电力滤波器系统进行了仿真研究。仿真结果表明,空间电压矢量 PWM 控制的有源电力滤波器能够对负载中的谐波和无功电流进行快速精确补偿。随着数字信号处理器技术的迅速发展,用 DSP 实现对有源电力滤波器的控制是一种值得推荐并具有很大发展潜力的控制方法。

参考文献:

- [1] 卓放,王兆安. 有源电力滤波器的发展与应用[J]. 船电技术,2000(4):23-26.
- [2] ZHUO Fang, WANG Zhao-an. Development and application of APF[J]. Marine Electric & Electronics Technology, 2000(4):23-26.
- [3] 刘凤君. Delta 逆变技术及其在交流电源中的应用[M]. 北京:机械工业出版社,2003.
- [4] GYUGYI L. Active AC power filters[J]. IEEE IAS, 1976(10):529-535.
- [5] 胡学之,皮大能. 有源电力滤波器及其应用技术综述[J]. 船电技术,2005(1):39-42.
- [6] HU Xue-zhi, PI Da-neng. Summary of active power filter and its application[J]. Marine Electric & Electronics Technology, 2005(1):39-42.
- [7] 周方圆,唐朝晖. 有源电力滤波器的研究现状与发展[J]. 电测与仪表,2005,42(8):1-4.
- [8] ZHOU Fang-yuan, TANG Zhao-hui. Active power filters and their development[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2005, 42(8):1-4.
- [9] 薛定宇,陈阳泉. 基于 Matlab/Simulink 的系统仿真技术与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [10] 范影乐. Matlab 仿真应用详解[M]. 2 版. 北京:人民邮电出版社,2002.
- [11] 吴天明,谢小竹. Matlab 电力系统设计与分析[M]. 北京:国防工业出版社,2004.
- [12] 田亚菲,何继爱. 电压空间矢量脉宽调制(SVPWM)算法仿真实现及分析[J]. 电力系统及其自动化学报,2004,16(4):68-71.
- [13] TIAN Ya-fei, HE Ji-ai. Simulation and analysis of space vector PWM[J]. Proceedings of the EPSA, 2004, 16(4):68-71.
- [14] 程善美. Simulink 环境下空间矢量 PWM 的仿真[J]. 电气自动化,2002,24(3):38-41.
- [15] CHENG Shan-mei. Simulation of voltage space vectors PWM under Simulink[J]. Electric Automation, 2002, 24(3):38-41.
- [16] 孙亚树,周新云,李正明,等. 空间矢量 PWM 的 Simulink 仿真[J]. 农机化研究,2003(2):105-106.
- [17] SUN Ya-shu, ZHOU Xin-yun, LI Zheng-ming, et al. Simulation of voltage space vectors PWM in Simulink[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2003(2):105-106.
- [18] 张剑辉,姜齐荣,赵地,等. 有源滤波器控制器的设计[J]. 电网技术,2002,26(10):48-52.
- [19] ZHANG Jian-hui, JIANG Qi-rong, ZHAO Di, et al. Design of active power filter controller[J]. Power System Technology, 2002, 26(10):48-52.
- [20] 吴卫民,童立青,钱照明,等. 新型串联混合有源电力滤波器控制技术研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(3):38-43.
- [21] WU Wei-min, TONG Li-qing, QIAN Zhao-ming, et al. A research on new control strategy for series type active power filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(3):38-43.
- [22] 张崇巍,张兴. PWM 整流器及其控制[M]. 北京:机械工业出版社,2003.
- [23] ZHAN C J, RAMACHANDARAMURTHY V K. Dynamic voltage restorer based on voltage-space-vector PWM control[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2001, 37(6):1855-1863.
- [24] 杨贵杰,孙力,崔乃政,等. 空间矢量脉宽调制方法的研究[J]. 中国电机工程学报,2001,21(5):79-83.
- [25] YANG Gui-jie, SUN Li, CUI Nai-zheng, et al. Study on method of the space vector PWM[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(5):79-83.

(责任编辑:康鲁豫)

作者简介:

华晓萍(1980-),女,四川广元人,硕士研究生,主要研究方向为嵌入式系统开发(E-mail:huaxp819@163.com);

王奔(1960-),男,湖南长沙人,教授,主要研究方向为电力系统的非线性及变结构控制;

孟凌凌(1980-),女,四川广元人,硕士研究生,主要研究方向为嵌入式系统开发。



华晓萍

Simulation research on active power filter

HUA Xiao-ping, WANG Ben, MENG Ling-ling, LAN Jin-ru, MENG Qing-bo

(Institute of Electric Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The basic principle of APF(Active Power Filter) is introduced, including structures and functions of harmonic & reactive current detection circuit and compensation current generation circuit, based on which, methods of harmonic & reactive current detection, compensation current control and DC voltage control are introduced. To verify its compensation function and further understand its control methods, a whole three-phase shunt voltage APF system is simulated using Simpower Systems Blockset in Matlab 6.5 / Simulink. Simulation results show that, APF controlled by SVPWM (Space Vector Pulse Width Modulation) can quickly and precisely compensate the harmonic and reactive components of load current.

Key words: active power filter; harmonic and reactive detection; compensation current control; Matlab simulation