

双闭环控制系统有源电力滤波器的研究与仿真

陈益华¹, 刘广业², 王志鹏², 魏明洋²

(1. 海南电网有限责任公司三沙供电局, 海南省海口市, 570122

2. 上海科梁信息工程股份有限公司, 上海, 200030)

Research on a SVG master slave control method

CHENG Yihua¹, LIU Guang-ye², WANG Zhi-peng², WEI Ming-yang²

(1.Sansha Power Supply Company of Hainan Power Grid Co.,Ltd.;Haikou 570125

2.Shanghai Keliang Information Tech. & Eng.Co.,Ltd., Shanghai, 200030)

ABSTRACT: In the power system, In order to guarantee the reliability and stability of the power supply, generally adopts the circuit breaker segregated bus bar power supply. Two bus bars are usually used to configure a SVG scheme to compensate the reactive power of the bus. When the bus tie switch is closed, two sets of SVG running at the same time, there will be complementary concussion problems and lead to system instability. In view of the above operating conditions, The proposed control scheme of double SVG master-slave control common bus reactive power compensation, namely two sets of SVG from the main one, sets of SVG controller through the parallel fiber direct way of compensation on the same bus. The operation principle of master-slave control is analyzed in detail in this paper, and have a detailed analysis of the response speed and compensation effect. The correctness and feasibility of the control strategy are analyzed through the pure digital model and the RTLAB hardware in the loop simulation platform. The results show that the controller two sets of master-slave parallel operation mode, can increase the compensation capacity of SVG, but also can ensure the response speed of the control within 30ms, can be a good solution to a single set of SVG capacity shortage and complementary shocks, has strong use value.

KEYWORDS:SVG; Master-slave control; RTLAB; Hardware in the loop

摘要: 随着大量非线性负载在电网中的使用, 电网中引来大量谐波, 目前 APF 是抑制谐波相应速度最快的一种方法。本文介绍了双闭环控制的有源电力滤波器(active power filter, APF)的控制原理, 用三相三线制并联型 APF 为研究对象, 利用瞬时无功功率理论对谐波分量进行检测, 然后以三角波比较的方式和滞环比较的方式进行调制, 采用 MATLAB 搭建模型进行仿真。结果证明了双闭环控制策略能够很好的对电网上的谐波电流进行补偿, 并有精度高、实时性快及稳定性好的特点, 同时对两种调制方式的优缺点进行比较。仿真过程和结果为 APF 控制设计提供参考和依据。

关键词: SVG; 主从控制; RTLAB; 硬件在环

0 引言

近年来, 随着电力电子技术的发展及电力电子设备的广泛应用, 一方面造成电力系统中谐波污染越来越严重, 从而使电网损耗增加, 发电、输电及用电效率降低, 对电机产生附加损耗, 产生机械振动、噪声和过电压, 变压器、电容器及电缆等设备过热, 绝缘老化, 寿命缩短, 导致继电保护和自动装置的误动作, 电气仪表不准; 对邻近通信系统产生影响, 产生噪音甚至信息丢失, 还会造成电网的局部并联谐振和串联谐振, 谐波进一步放大^[1]; 另一方面, 新型的电力电子设备对电能质量的要求也日益提高。因此, 谐波治理成为当前绿色电力面临的一个主要问题。

传统谐波抑制的方法是采用基于谐振原理的无源电力滤波器, 但是只能滤除设定次数的谐波, 而且容易与电网产生谐振导致谐波放大, 补偿效果不甚理想。而有源电力滤波器可以对各个频率的谐波进行检测并跟踪补偿, 且补偿效果不受电网阻抗的影响, 因而受到广泛关注。

1 APF 主电路及其工作原理

APF 系统构成如图 1 所示，其补偿原理为：负载电流 i_L 是被补偿对象，由基波分量 i_{Lf} 和谐波分量 i_{Lh} 两部分组成， i_s 为电网电流，期望只含有基波成分 i_L ，根据瞬时无功理论对负载电流进行检测，检测出负载电流中的基波分量 i_{Lf} 和谐波分量 i_{Lh} ，将谐波分量 i_{Lh} 反极性后作为补偿电流指令信号 i_c^* ，然后 i_c^* 经过补偿电路控制补偿电流 i_c ，使得 i_c 与 i_{Lh} 大小相等极性相反相抵消，达到谐波补偿的目的。

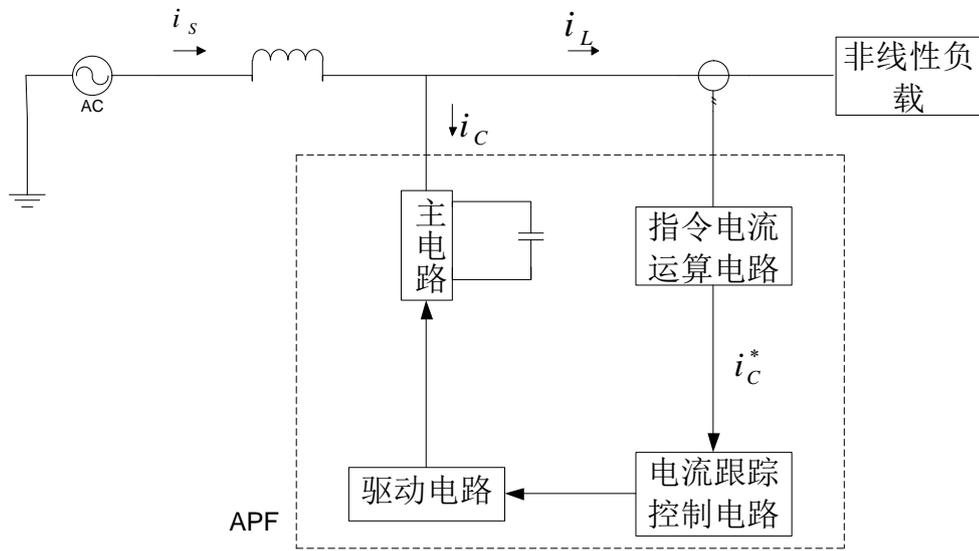


图 1 并联有源电力滤波器系统构成

上述原理可用下面公式描述：

$$i_s = i_l + i_c \quad (1)$$

$$i_L = i_{lf} + i_{hf} \quad (2)$$

$$i_c = -i_{Lh} \quad (3)$$

$$i_s = i_l + i_c = i_{lf} \quad (4)$$

主电路结构仿真设计如图 2 所示，其中指令电流运算电路模块为基于瞬时无功功率理论的谐波检测电路，补偿电流发生电路包括 PWM 控制脉冲调制控制部分及 IGBT 主电路两部分，本论文的 PWM 控制脉冲调制控制部分分别采用三角波比较的调制方式和滞环比较调制方式，在 IGBT 开关频率基本相同的情况下比较两种调制防止的控制效果。

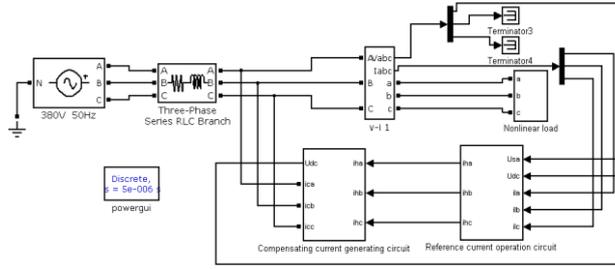


图 2 APF 主电路结构

2 双闭环系统介绍

2.1 基于瞬时无功功率理论的谐波电流检测

三相电路瞬时无功功率理论在上世纪 80 年代首先由赤木泰文提出，该理论突破了传统的以平均值为基础的功率定义，系统的定义了瞬时无功功率、瞬时有功功率等瞬时功率量。目前以该理论为基础而提出的谐波电流检测的算法主要为 p-q 法和 $i_p - i_q$ 法，本文在 $i_p - i_q$ 算法的基础上，加上直流侧电容电压控制回路的电压外环及补偿电流回路的电流内环构成双闭环控制。

$$i_p - i_q \text{ 检测算法仿真图如图 3 所示，其中 } C_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} \sin \omega t & -\cos \omega t \\ -\cos \omega t & -\sin \omega t \end{bmatrix}$$

C_{23} 是 C_{32} 的逆。

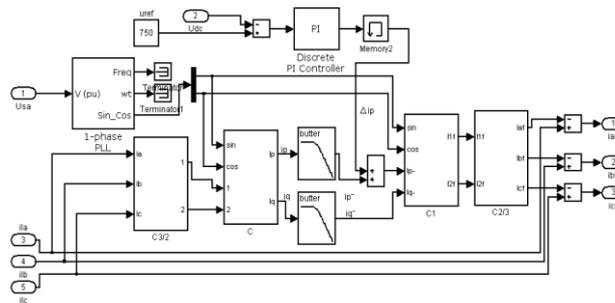


图 3 包括电压环节的 $i_p - i_q$ 算法仿真图

该算法中要用到的与 a 相电网电压 e_a 同相位的正、余弦信号由一个锁相环 (PLL) 和一个正、余弦信号发生电路得到，假设三相三相电流

$$i_a = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} I_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (5)$$

$$i_b = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} [I_n \sin n(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + \varphi_n] \quad (6)$$

$$i_c = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} [I_n \sin n(\omega t + \frac{2\pi}{3}) + \varphi_n] \quad (7)$$

式中 $n=3k \pm 1$ ，其中看 k 为整数 ($k=0$ 时只取+号)， ω 为电网角频率， I_n 为各次谐波有效值， φ_n 为各次谐波初相角。经过 C_{32} 、 C 两个矩阵可以计算出瞬时有功电流 i_p 和瞬时无功电流 i_q ，

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \end{bmatrix} = \sqrt{3} \begin{bmatrix} \sum_{n=1}^{\infty} I_n \cos[(1 \mp n)\omega t \mp \varphi_n] \\ \sum_{n=1}^{\infty} \pm I_n \sin[(1 - n)\omega t - \varphi_n] \end{bmatrix} \quad (8)$$

i_p 、 i_q 经过低通滤波器 (LPF) 得出直流分量 \bar{i}_p 、 \bar{i}_q ，

$$\begin{bmatrix} \bar{i}_p \\ \bar{i}_q \end{bmatrix} = \sqrt{3} \begin{bmatrix} I_1 \cos(-\varphi_1) \\ I_1 \sin(-\varphi_1) \end{bmatrix} \quad (9)$$

再经过 C_{23} 、 C 的矩阵逆运算得到三相电流的基波分量 i_{af} 、 i_{bf} 、 i_{cf} ，

$$\begin{bmatrix} i_{af} \\ i_{bf} \\ i_{cf} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{2} I_1 \sin(\omega t + \varphi_1) \\ \sqrt{2} I_1 \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \varphi_1) \\ \sqrt{2} I_1 \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \varphi_1) \end{bmatrix} \quad (10)$$

最后与三相电流相减得出三相谐波分量 i_{ah} 、 i_{bh} 、 i_{ch} ，作为 APF 的控制指令进行调制，进而产生相应 IGBT 的控制脉冲。

$$\begin{bmatrix} i_{ah} \\ i_{bh} \\ i_{ch} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{n=2}^{\infty} \sqrt{2} I_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \\ \sum_{n=2}^{\infty} \sqrt{2} I_n \sin[n(\omega t - \frac{2\pi}{3} 0 + \varphi_n)] \\ \sum_{n=2}^{\infty} \sqrt{2} I_n \sin[n(\omega t + \frac{2\pi}{3} 0 + \varphi_n)] \end{bmatrix} \quad (11)$$

2.2 双闭环控制器的设计

电压环外环的作用是对并联型 APF 补偿电流发生电路的补偿，控制直流侧电压稳定，以补偿由于设备损耗而导致的直流侧电压波动，使整个 APF 控制系统具有很好的补偿电流跟随性。传统的控制方法是，为直流侧电容提供一个单独的直流供电电源，增加了整个系统的复杂性和成本。从图 3 可以看出，本仿真是将直流侧基准电压 u_{ref} 与直流侧电容电压 u_{dc} 相比较，二者差经过 PI 调节器后得到调节信号 Δi_p ，将其叠加到有功电流的直流分量 \bar{i}_p 上，经运算在指令信号 i_c^* 中包含一定的基波有功电流，补偿电流发生电路根据

i_c^* 产生补偿电流 i_c 注入电网，使 APF 补偿电流中包含一定的有功电流分量，从而使 APF 直流侧与交流侧交换能量，将直流侧电压调至基准值。

电流内环控制目标为谐波电流，本仿真电流环采用电流直接控制方法，即采用跟踪性 PWM 控制技术对电流波形的瞬时值进行反馈控制，电流控制的方法很多，如三角载波控制、滞环控制、周期采样控制、无差拍控制、模糊控制、滑模控制、内模控制等等，本文主要采用三角载波控制和滞环控制两种方法进行仿真，为了具有可比性，两种方法在 IGBT 触发脉冲基本一致的情况下 APF 的补偿效果进行比较，具体控制算法在本章第三小节分别进行介绍。

2.3 三角载波及滞环比较的控制方法^[5,6]

图 4 为三角波比较的控制方法，三角载波控制是一种由瞬时值比较法衍生出的一种线性控制方法。它以检测环节得到电网高次谐波值与 APF 输出值作比较，差值经过 PI 调节器来产生相应的调制信号，然后将调制信号与高频三角载波相比较，所得到的脉冲矩阵作为逆变器各开关器件所需的调制波信号，调制波信号经过平波器在在逆变器输出端得到与检测谐波电流等幅等相位的补偿电流，实现补偿，此过程为电流环控制过程（IGBT）的过程。三角载波控制开关频率固定（即为三角载波频率），响应速度快，对高开关频率的系统具有较好的控制特性，但也有开关损耗和高频失真比较大等缺点^[2-4]，实际工程可以根据 IGBT 的散热情况选择合适的开关频率，在本仿真中，三角波的频率采用 2000Hz。

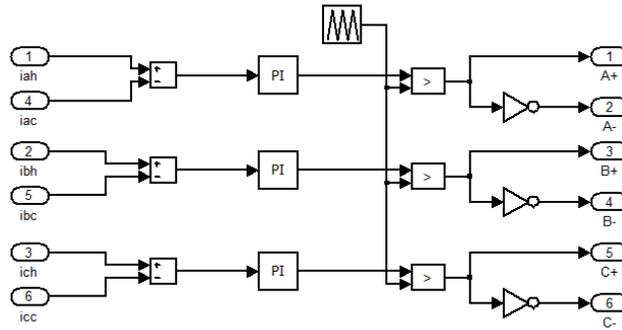


图 4 三角波比较原理图

图 5 为滞环控制仿真原理，滞环控制是将指令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，优点是控制简单，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滞环带内，围绕其参考值上下波动，缺点是开关频率、响应速度及电流的跟踪精度会受滞环带宽影响；带宽固定时，开关频率会随补偿电流变化而变化，从而引起较大的脉动电流和开关噪声。

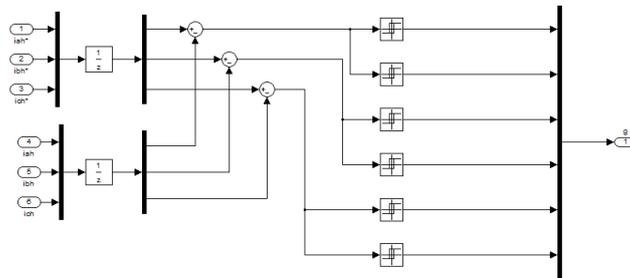


图 5 滞环控制原理图

3 Matlab 仿真结果及分析

3.1 仿真参数

根据图 1 结构原理图，利用 Matlab 分别设计主电路结构（图 2），电流检测环节（图 3），在确保补偿效果的前提下，考虑到经济性及实用性，根据文献^[7]确定主要系统参数如表 1 所示：

表 1 APF 系统参数

三相电源电压	380V/50Hz	线路阻感	0.4 Ω
滤波电感	3mH	直流侧电容	5640uF
非线性负载	50 Ω 5mH, 40 Ω 5mH	直流侧参考电压	750V
电压环Kp	1	电压环Ki	0.1
电流环Kp	7	电流环Ki	0.1

3.2 仿真结果结果与分析

仿真时间分两个阶段：0-0.1s，没有投入 APF，从 0.1s 开始 APF 投入电网，0.1s-0.3s 负载为 50 Ω 5mH，0.3s-0.4s 负载为 40 Ω 5mH，图 5（a）为三角波比较方式下电网电流，（b）为指令电流和 APF 补偿电流波形，图 6 为滞环比较方式下电网电流，（b）为指令电流和 APF 补偿电流波形。从图 5 图 6 可以看出，0.1s 之前没有投入 APF，0.1s 投入 APF 后，两种控制方式都能在很短时间内电网电流接近正弦，且 APF 补偿电流能够跟踪指令电流，0.3s 后进行负荷切换，从结果可以看出，在负荷切换后两种控制方式也能够快速响应。

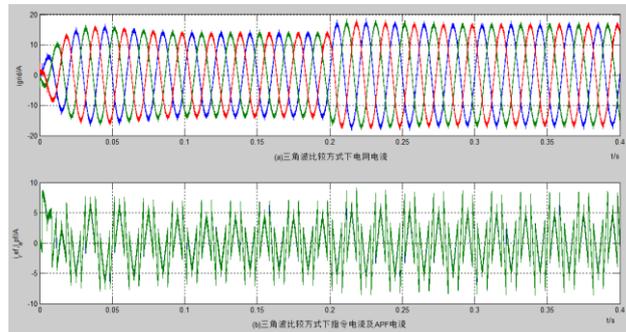


图 5 三角波比较控制的电网电流及 APF 补偿电流

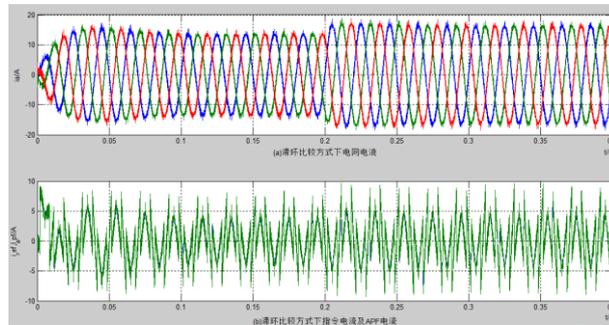


图 6 滞环比较控制的电网电流及 APF 补偿电流

从图 7 为两种方式下直流侧电压波形，从波形可以看出，在 APF 投入阶段和负载变化阶段，直流侧电压能够在三个周波内恢复到设定值，说明了在负载变化时，最多经过三个周波，即可实现对谐波的跟踪补偿，具有良好的跟随性，响应特性好，电压波动在 5V 以内说明稳定性好。

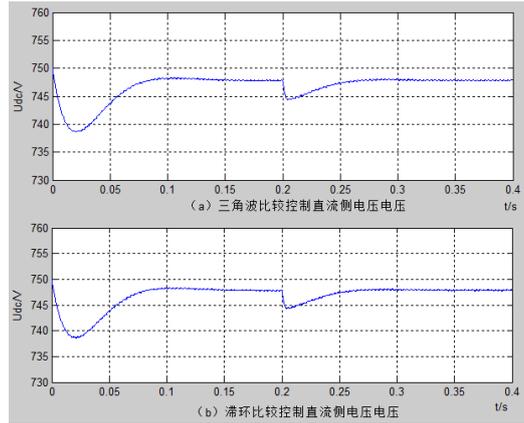


图 7 两种控制方式下直流侧电压

图 8 为两种控制方式下补偿后电网电流 THD，从图可以看出，三角波比较方式电流 THD 在 2.6%，滞环比较控制电流 THD 为 3.09%，从比较可以看出，在开关频率接近的情况下，三角波比较方式 THD 更小，补偿效果更明显。

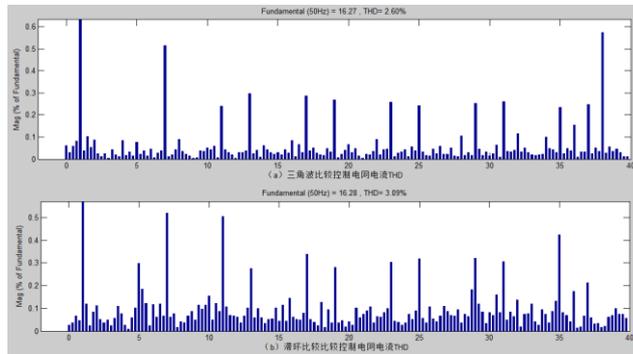


图 8 两种控制方式下补偿后电网电流 THD

4 结论

本文首先分析了 APF 的工作原理及谐波电流检测算法进行介绍，然后分析了双闭环控制系统，最后利用对仿真结果进行分析，证明基于双闭环控制系统的 APF 能够连续、快速、准确的对谐波电流进行检测补偿，具有良好的动态响应特性与静态补偿效果,对具体实践具有指导作用。

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, 2004
- [2] 周林, 孟婧, 徐会亮, 吴春红. 并联有源电力滤波器三角载波与滞环比较控制策略比较与仿真[J].中国电力, 2008,41(4): :25-29
- [3] 戴朝波, 林海雪. 电压源型逆变器三角载波电流控制新方法[J]2002,22(2) : 99-102
- [4] 巫付专,万健如,沈虹. 基于不同电流跟踪方式 APF 连接电感选取与设计[J].电力电子技术,2009,43(8).
- [5] 仲伟堂, 王巍. 电源电流控制的并联有源电力滤波器研究[J].电力电子技术, 2009,43 (10): 29-30.
- [6] 陈瑜, 刘惠康. 基于模糊控制的有源电力滤波器电流控制研究[J].科学技术与工程, 2010,10 (29) :7156-7170.
- [7] 潘凯. 并联三相三线制有源电力滤波器的仿真与设计[D].大连: 大连理工大学, 2009.

作者简介：

陈益华, 男, 1987 年生, 助理工程师, 研究方向微电网仿真计算。

刘广业, 男, 1987 年生, 电力系统仿真应用工程师, 从事电能质量及柔性直流输电仿真研究。

王志鹏，男，1985年生，电力系统仿真应用工程师，研究方向为电力系统实时仿真及应用。
魏明洋，男，1986年生，电力系统仿真应用工程师，研究方向为电力系统实时仿真及应用。