

文章编号: 1007-6492(1999)03-0084-03

有源电力滤波器(APF)滤波特性仿真结果的研究

宋继东¹, 李 翔², 连世元²

(1. 郑州工业大学消防安全技术工程公司, 河南 郑州 450002; 2. 郑州电力高专电力系, 河南 郑州 450004)

摘 要: 在电力系统三相负荷不对称、控制器参数不精确及系统负荷突然变动的条件下, 对有源电力滤波器的滤波效果进行了仿真研究。采用一阶预测算法计算出逆变器的理想输出电压, 对逆变器各桥臂上的开关元件采用提出的新型脉宽调制(PWM)控制。结果表明: 有源电力滤波器对严重畸变的电源电流具有良好的补偿; 当滤波器交流侧的电感与参与滤波器理想输出电压计算的电感稍有不同时, 滤波器仍有较好的补偿效果, 补偿后的系统电流总畸变率小; 对电力系统中的波动, 快速变化的负荷, 有源电力滤波器能够进行动态补偿。

关键词: 电力系统; 有源滤波器; 仿真; 参数

中图分类号: TN 713.8 **文献标识码:** A

1 仿真原理

仿真采用的有源电力滤波器与系统的原理接线如图1所示。系统电源采用三相对称正弦电压源, 线电压取380 V。系统电抗综合考虑线路电感以及变压器漏感之和, 取 $l_{sa} = l_{sb} = l_{sc} = 0.1 \text{ mH}$ 。逆变器的开关元件采用1200 V/200 A的IGBT。谐波源负载为典型的三相二极管整流桥, 其换相电感 $l_a = l_b = l_c = 1 \text{ mH}$ 。负载参数取为 $L = 0.3 \text{ H}$, $R = 7.5 \Omega$, $C = 10 \mu\text{F}$ 。

根据“电能质量、公用电网谐波”国家标准^[1], 谐波电流的总畸变率THD_i (Total Harmonic Distortion) 可以采用下式计算:

$$\text{THD}_i = \frac{I_H}{I_1} \times 100\% ; \quad (1)$$

$$\text{补偿电流} \quad I_H = \left(\sum_{h=2}^{\infty} (i_h)^2 \right)^{\frac{1}{2}} ; \quad (2)$$

$$\text{谐波电流残余率} \quad \frac{I_{LH} - I_{CH}}{I_{LH}} \times 100\% . \quad (3)$$

采用 $\alpha - \beta$ 分解法时的逆变器控制流程为:

三相电压 $(u_a, u_b, u_c) \rightarrow 3\Phi/2\Phi \rightarrow u_\alpha, u_\beta$ 和三相电流 $(i_{ia}, i_{ib}, i_{ic}) \rightarrow 3\Phi/2\Phi \rightarrow i_\alpha, i_\beta$ 由公式 $p = u_\alpha i_\alpha + u_\beta i_\beta$, $q = u_\alpha i_\beta - u_\beta i_\alpha$, 经高通滤波并令 $p_c = \bar{p}$, $q_c = \bar{q}$, 再由公式 $i_{ca} = \frac{u_\alpha p_c - u_\beta q_c}{u_\alpha^2 + u_\beta^2}$ 及 $i_{cb} = (u_\beta p_c + u_\alpha q_c) / (u_\alpha^2 + u_\beta^2)$ 得 $i_{ca}, i_{cb} \rightarrow u_{ca}^* (i_{ca}^*), u_{cb}^* (i_{cb}^*)$, $u_{cc}^* (i_{cc}^*) \rightarrow$ 求取逆变器理想输出电压 \rightarrow 对逆变器的开关进行脉宽调制的控制 $\rightarrow i_{ca}, i_{cb}, i_{cc}$ 。

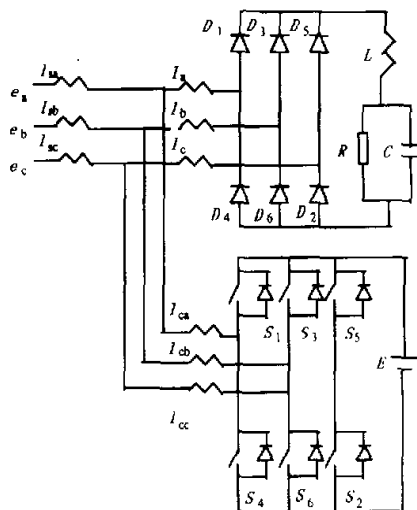


图1 有源滤波器与系统原理接线图

+ $u_\alpha q_c) / (u_\alpha^2 + u_\beta^2)$ 得 $i_{ca}, i_{cb} \rightarrow u_{ca}^* (i_{ca}^*), u_{cb}^* (i_{cb}^*)$, $u_{cc}^* (i_{cc}^*) \rightarrow$ 求取逆变器理想输出电压 \rightarrow 对逆变器的开关进行脉宽调制的控制 $\rightarrow i_{ca}, i_{cb}, i_{cc}$ 。

2 不对称三相负荷对 APF 补偿效果影响

为了解系统的不对称三相负荷对有源电力滤波器补偿效果的影响, 本文对有源滤波器及系统

收稿日期: 1999-04-10; 修订日期: 1999-05-15

作者简介: 宋继东(1964-), 男, 河南省郑州市人, 郑州工业大学消防安全技术工程公司工程师, 主要从事自动控制方面的研究。

的三相负载参数取如下值时进行了仿真分析: $l_a=0.002\text{ H}$, $R=7.5\text{ }\Omega$, $l_b=0.001\text{ H}$, $L=0.3\text{ H}$, $l_c=0.0015\text{ H}$, $l_{ca}=l_{cb}=l_{cc}=0.0015\text{ H}$, $C=10\text{ }\mu\text{F}$, 逆变器的开关频率取 20 kHz , 采用一阶预测算法^[2] 计算出逆变器的理想输出电压, 对逆变器各桥臂上的开关元件采用提出的新型脉宽调制(PWM)控制^[3]. 图2给出了补偿后的电源电流、负载电流、补偿电流指令信号以及逆变器实际输出的电流两个周期的波形.

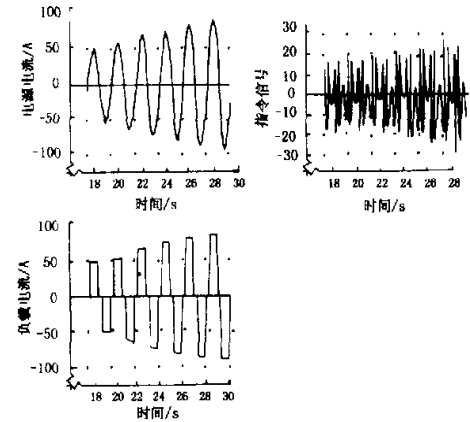


图2 仿真结果

由图2可以看出,有源电力滤波器对严重畸变的电源电流具有良好的补偿. 结合公式(1)、(2)、(3)可以算出有源滤波器补偿前后的谐波电流畸变率如下表1. 由表1可以看出,补偿后谐波电流畸变率为2.42%,有源滤波器具有优良补偿效果. 其5,7,11,13次谐波电流残余率的计算结果如表2.

表1 谐波电流总畸变率		%
补偿前	20.87	
补偿后	2.42	

表2 谐波电流残余率				
谐波次数	5	7	11	13
残余率/%	5.75	5.2	30	66.7

2 控制器参数不精确对补偿效果的影响

以上的仿真都是在控制器参数精确的条件下进行的. 当逆变器交流侧电感 l_c 发生变化时,投入实际运行中的有源滤波器会对滤波效果产生一定的影响. 本文对如下两种情况进行了仿真:参与逆变器理想输出电压计算的 l_c 取 1.5 mH ,而实际电路中的 l_c 分别为: $l_c=1.0\text{ mH}$ 和 $l_c=2.0\text{ mH}$. 补偿后电源电流、负载电流、补偿电流指令信号、

及逆变器实际输出电流两个周期仿真结果图3和图4. 两种情况下补偿前后谐波电流总畸变率见表3^[3].

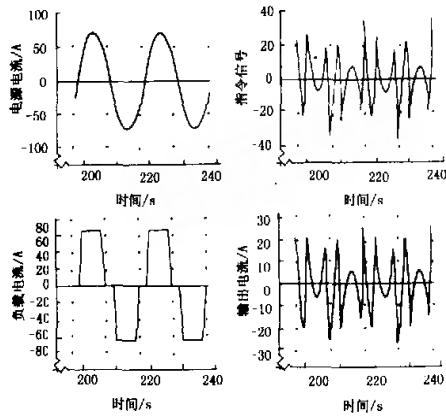


图3 $l_c=1.0\text{ mH}$ 时仿真结果

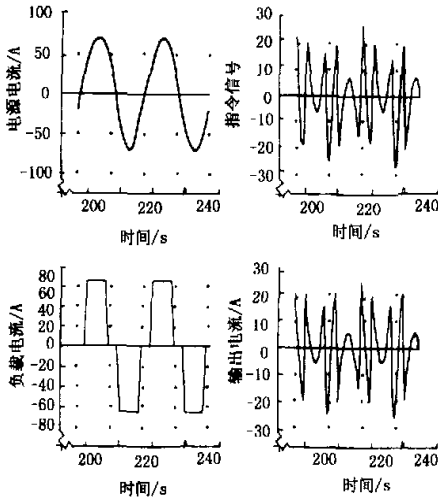


图4 $l_c=2.0\text{ mH}$ 时仿真结果图

状况	总畸变率/%	
	实际 l_c 为 1.0 mH	实际 l_c 为 2.0 mH
补偿前	22.136	22.136
补偿后	4.197	3.113

由仿真的结果图以及频谱分析图,并结合表3可以看出,此时滤波器仍有较好的补偿效果. 因此,有源滤波器具有较好的适应性.

有时,系统的负荷会突然变动,为了解有源滤波器的跟随特性,在三相二极管整流桥负载电阻上用定时开关并联一电阻,选择一固定时刻将开关闭合. 这样,负载电阻突然下降,电流将增大. 由于受电路中电感、电容的影响,电流突变的并不十

分明,开关闭合后的仿真结果如图5.

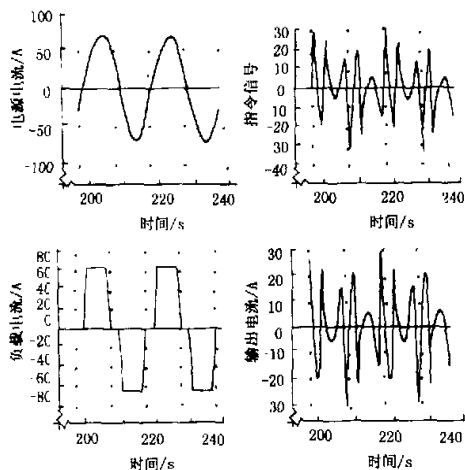


图5 负荷突变时仿真结果

由图5可以明显看出,当负载突变时,有源滤波器能够进行动态补偿.随着三相二极管整流桥负载电流的增大,求得的补偿电流指令信号也是增大的.相比于无源滤波器,在补偿动态负荷方面,有源滤波器的确存在着相当大的优势.

由于篇幅所限,关于有源电力滤波器滤波特性仿真的理论分析及验证可参看参考文献[2,4].

3 结论

(1) 有源滤波器对系统的不对称三相负荷具有良好的补偿效果.

(2) 实际运行中的有源滤波器在运行一段时期后有可能出现控制器参数变化的现象.当逆变器交流侧的电感偏离不大时,有源滤波器仍有较好的补偿效果,补偿后的系统电流总畸变率小.

(3) 在补偿谐波方面,相比于无源滤波器,有源滤波器有着相当大优势.它能够对电力系统中的波动、快速变化的负荷,实现动态补偿.

参考文献:

- [1] GB/T 14549-93.电能质量公用电网谐波[S].
- [2] 任万强.有源滤波器控制器的仿真与分析[J].郑州大学学报,1998,31(3):32-36.
- [3] AKAGI Hirofumi, NABAE Akira, ATOH Satoshi. Control strategy of active power filters using multiple voltage—Source PWM converters[J]. IEEE Transaction on Industry Applications, 1986, 22(3):34-37.
- [4] 任万强.电力有源滤波器控制器的研究与仿真分析[J].郑州工业大学学报,1998,19(4):75-79.

Study on Simulation and Analysis of APF Parameters

SONG Ji-dong¹, Li Xiang², LIAN Shi-yuan²

1. Fire Protection of Technical Engineering Company, Zhengzhou University of Technology, Zhengzhou 450002, China; 2. Department of Electric Power, Zhengzhou Electric Power College, Zhengzhou 450004, (China)

Abstract: In order to get the hang of the effect of active filter under the conditions of asymmetric 3-phase load, inaccurate controller parameters and abrupt change of system load, this article presents simulation research on it. Switch components on each bridge of the active power filter (APF) are controlled by the new pulse-width modulation, which is presented in the article, with the ideal inverter output voltage calculated by single-order predicted method. The results show that the active power filter might compensate the seriously distorted current successfully. Even when the inductance of the filter's AC side differs a little from the ideal inductance, the compensation result was still very good. The current distortion after compensation was decreased. The active power filter can provide dynamic compensation to system fluctuations and fast variation of load.

Key words: power electronics; active power filter; simulation; parameters