

一种改进的电流控制方法在有源电力滤波器中的应用

贾红芳, 高学军, 程翔

(三峡大学电气信息学院, 湖北 宜昌 443002)

Application of an Improved Method of Current Tracking Control in APF

JIA Hong-fang, GAO Xue-jun, CHENG Xiang

(College of Electric Engineering & Information Science, Three Gorges University, Yichang 443002, China)

摘要: 给出了并联型有源电力滤波器系统简化数学模型, 详细探讨了有源电力滤波器中常采用的三角波脉宽调制电流控制方法, 在此基础上提出了一种改进的三角波脉宽调制电流控制方法。通过理论推导出, 在传统控制方法的输出指令电压中增加了一个与电源电压瞬时值成正比的量, 提高了变流器输出电压的准确性, 使 APF 实际输出电流能够精确地跟踪指令电流的变化。论文给出了这两种电流控制方法的 Simulink 仿真结果, 通过比较仿真结果验证了改进的三角波脉宽调制电流控制方法在谐波补偿效果和电流控制精度方面更有优越性。

关键词: 有源电力滤波器; 三角波; 脉宽调制; 电流控制方法

中图分类号: TM76

文献标识码: A

Abstract: This paper presents a simplified mathematic model of parallel APF, and an improved method of current control with triangle-wave pulse-width modulation. Compared with traditional method, a value proportional to source voltage is added to the reference voltage, which improves the accuracy of APF output voltage and makes the output current following the reference current precisely. The simulation results show that in two aspects: harmonic compensation and precision of current control, the improved current control method is better than the traditional one.

Key words: active power filter(APF); triangle-wave; pulse-width modulation; current tracking control

1 引言

有源电力滤波器是治理电力系统谐波污染的有效手段, 当其主电路和控制对象确定以后, 其输出电流的控制方式将是决定有源电力滤波器性能和效率的关键环节^[1]。

目前国内外很多学者采用的两种电流跟踪控制方法是三角波脉宽调制电流控制方法和滞环比较电

流控制方法。前者开关频率固定, 但响应较慢, 精度较低; 而后者实现较简单, 准确度较高且响应快, 但开关频率可能波动较大。笔者对三角波脉宽调制电流控制方法进行了深入的探讨, 提出了一种改进方案, 减小了 APF 输出电流误差的脉动。

2 并联型有源电力滤波器的简化数学模型

图 1 为并联型 APF 的简化数学模型。

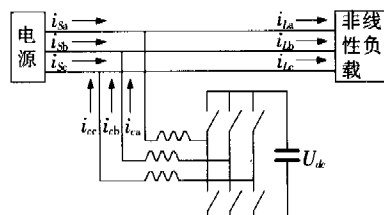


图 1 并联型有源电力滤波器系统简化数学模型

由图 1 可得:

$$\begin{cases} L \frac{di_{ca}}{dt} = K_a(n) U_d - e_a \\ L \frac{di_{cb}}{dt} = K_b(n) U_d - e_b \\ L \frac{di_{cc}}{dt} = K_c(n) U_d - e_c \end{cases} \quad (1)$$

式中: $K_a(n), K_b(n), K_c(n)$ 为对应变流器工作模式 n ($0 \sim 7$) 的开关系数, 其具体的数值见表 1。 e_a, e_b 和 e_c 为交流侧电源电压; U_d 为 APF 的主电路直流侧电容电压; L 为 APF 的主电路交流侧滤波电感; i_{ca}, i_{cb}, i_{cc} 为 APF 的实际输出电流^[2]。

3 传统的三角波脉宽调制电流控制方法

三角波与正弦波调制 (SPWM) 的控制方法在逆变器的控制中得到了广泛的应用, 而作为有源滤波

表1 主电路工作模式 $n(0 \sim 7)$ 的开关系数

工作模式 n	电力电子器件的工作状态			开关系数		
	a 相	b 相	c 相	$K_a(n)$	$K_b(n)$	$K_c(n)$
0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	ON	-1/3	-1/3	2/3
2	0	ON	0	-1/3	2/3	-1/3
3	0	ON	ON	-2/3	1/3	1/3
4	ON	0	0	2/3	-1/3	-1/3
5	ON	0	ON	1/3	-2/3	1/3
6	ON	ON	0	1/3	1/3	-2/3
7	ON	ON	ON	0	0	0

器主电路的四象限变流器,其结构与逆变器相同,因此这种三角波脉宽调制的控制方法在有源电力滤波器中得到了应用。

在电压型逆变器的电路结构中,逆变器作为一个可控的电压源,它的控制指令一般是正弦的基波电压,或者按谐波消除规则生成的基波与谐波电压的组合。而有源电力滤波器的基本工作原理是作为一个可控的电流源向电网提供负载所需的谐波电流,所以有源电力滤波器的指令电流 i_c^* 必须先转化为相应的指令电压 u_c ,作为 SPWM 的调制波。

设 $i_{ca}^*, i_{cb}^*, i_{cc}^*$ 为有源电力滤波器的输出指令电流, i_{ca}, i_{cb}, i_{cc} 为有源电力滤波器实际的输出电流,在传统的有源电力滤波器 SPWM 电流控制方法中, $(i_{ca}^* - i_{ca}), (i_{cb}^* - i_{cb}), (i_{cc}^* - i_{cc})$ 经过 PI 电流调节器后的输出 u_{ca}, u_{cb}, u_{cc} 作为变流器的输出指令电压,即:

$$\begin{cases} \Delta i_{cx} = i_{cx}^* - i_{cx} \\ u_{cx} = K_p \Delta i_{cx} + K_i \int i_{cx} dt \end{cases} \quad (\text{其中: } x=a, b \text{ 或 } c) \quad (2)$$

为保证 APF 输出电流跟踪指令电流的变化,电流控制框图见图 2。

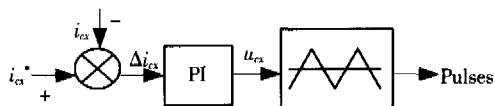


图2 传统的 SPWM 电流控制框图

4 改进的三角波脉宽调制电流控制方法

为了保证有源电力滤波器具有良好的补偿性能,其直流侧电容电压 U_d 必须保持稳定。从理论上讲,在 APF 中直流侧电容电压 U_d 的反馈值与给定值之差经过 PI 调节器后,叠加到瞬时有功电流的直流分量上,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,使得 APF 的补偿电流中包含一定的基波有功电流分量,从而使 APF 的直流侧与交流侧交换能量,将 U_d 调节至给定值。

由式(1)可以看出,有源电力滤波器的补偿电流是由变流器输出电压 $K_a(n)U_d, K_b(n)U_d$ 和 $K_c(n)U_d$ 与对应的交流侧电源电压 e_a, e_b 和 e_c 的差值作用在

滤波电感 L 上产生的,对于 $x(x=a, b \text{ 或 } c)$ 相有^[3-4]:

$$\begin{cases} \frac{di_{cx}}{dt} = \frac{1}{L} [K_x(n)U_d - e_x] \\ \frac{di_{cx}^*}{dt} = \frac{1}{L} [u_{cx}^* - e_x] \end{cases} \quad (3)$$

式中: i_{cx}^* 为 x 相的指令电流, u_{cx}^* 为与 i_{cx}^* 相应的变流器 x 相指令电压。

由上式可知:

$$u_{cx}^* = L \frac{di_{cx}^*}{dt} + u_x \quad (4)$$

可见 u_{cx}^* 不仅与 di_{cx}^*/dt 有关,而且与电源的瞬时电压 u_x 有关,所以笔者提出在变流器的输出指令电压中引入一个与电源的瞬时电压成正比的量(前馈电压),即:

$$\begin{cases} \Delta i_{cx} = (i_{cx}^* + K u_x) - i_{cx} \\ u_{cx} = K_p \Delta i_{cx} + K_i \int i_{cx} dt \end{cases} \quad (5)$$

则改进的 SPWM 的电流控制框图见图 3。

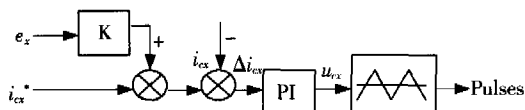


图3 改进的 SPWM 电流控制框图

改进的三角波脉宽调制电流控制方法与传统的三角波脉宽调制电流控制方法相比,通过在输出指令电压中增加了一个前馈电压,使得滤波电感两端的电压差包含一个基波分量,这样就可以控制有源电力滤波器输出或输入基波有功电流。 K_p 和 K_i 的值与主电路交流侧滤波电感 L 的值和控制电路的放大倍数有关,其中 K_p 的值与指令电流幅值的大小和三角载波的最大值、最小值有关; K_i 的取值要使补偿后电流的基波幅值变化很小,也要使补偿后电流的总谐波系数(THD)减小。适当地选取 K_p 和 K_i 的值,可以使 u_{cx} 的值和 u_{cx}^* 的值相等或相近,提高了变流器输出电压的准确性,使有源电力滤波器实际输出电流能够精确地跟踪指令电流的变化,从而有效地减小了输出电流误差的脉动范围。

5 仿真结果及其比较

下面通过 Simulink 仿真实验对两种电流控制方法的滤波效果和性能指标进行了直观的比较。文中 Simulink 仿真模型由 3 部分组成:三相电源、非线性负载(谐波源)和 APF。为了便于对比,在仿真实验中对两种控制方法采用相同的仿真参数^[5-8]:三相电源等效电阻 0.1Ω ,等效电感 0.05 mH ;非线性负载前的平波电感 1 mH ;三相不控整流电路的负载电阻 10Ω ;APF 交流侧滤波电感 4.5 mH ;APF 功率器件开关频率 $f=4.5 \text{ kHz}$;其中:控制参数 $K_p=0.3, K_i=0.0004$;仿真采样时间 $T=5 \text{ e-}6 \text{ s}$ 。

考虑到三相电路的对称性,笔者只给出了a相的仿真波形:图4为传统的三角波脉宽调制电流控制方法,图5为改进的三角波脉宽调制电流控制方法的仿真波形。其中上面的图、中间的图和下面的图分别为a相负载电流、APF的a相实际补偿电流和补偿后的a相电源电流。

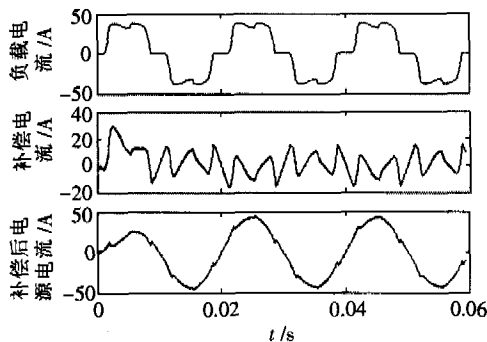


图4 传统的三角波脉宽调制电流控制方法的仿真波形

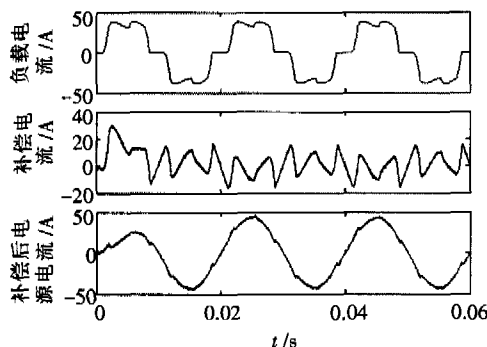


图5 改进的三角波脉宽调制电流控制方法的仿真波形

从图4、图5可以看出,两种电流控制方法都能有效地滤除负载中的谐波电流分量,达到使电源电流接近正弦的目的。

图6和图7分别为图4和图5中补偿后电源电流的FFT分析图。

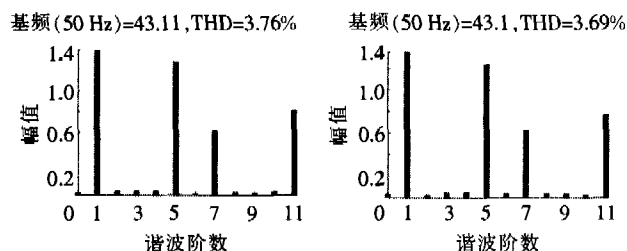


图6 传统方法补偿后电源电流的FFT图

图7 改进方法补偿后电源电流的FFT图

由图6和图7的FFT图分析可以看出,采用传统的三角波控制方法后,补偿后电源电流的基波幅值为43.11A,谐波畸变系数THD=3.76%;而采用改进的三角波控制方法后,电源电流的基波幅值为43.1A,谐波畸变系数THD=3.69%。由此可以得出,改进后电流控制方法的APF的滤波效果略优于传统电流控制方法的APF。而且在补偿后的电源电流的正、负峰处,采用改进的电流控制方法优于采用传统的电流控制方法的补偿效果^[3]。

由于一般的补偿装置中都有交流电压检测,用于锁相及保护,因此前馈电压的加入几乎不增加装置的成本。

6 结语

笔者提出了一种改进的三角波电流控制方法,在这个基础上进行了仿真试验。仿真结果表明,通过加入前馈电压,APF的滤波效果略优于传统的三角波电流控制方法,而且在补偿后的电源电流的正、负峰处波形具有一定改善。

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.
- [2] 颜晓庆,王兆安.并联型电力有源滤波器的仿真研究[J].西安交通大学学报,1997,31(11):88-93.
- [3] 马惠,刘静芳,刘斌帅.改进的有源电力滤波器三角波脉宽调制电流控制方法[J].电力自动化设备,2004,24(11):30-33.
- [4] Young-Gook Jung, Woo-Yong Kim, Young-Cheol Lim, et al. The Algorithm of Expanded Current Synchronous Detection for Active Power Filters Considering Three-phase Unbalanced Power System[J]. IEEE Trans. on Ind Appl, 2003, 21(5): 1000-1006.
- [5] Orts S, Segui S. Modelling and Simulation of Three Phase Power Active Compensator with Matlab/Simulink [A]. 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference [C], 2004. 3182-3187.
- [6] 任永峰,李含善.基于MATLAB的并联型有源电力滤波器的仿真研究[J].电力科学与工程,2003(1):10-13.
- [7] 罗世国,侯振程.有源电力滤波器的参数计算及其控制[J].重庆大学学报,1994,17(2):12-16.
- [8] 赵小英,王平.基于MATLAB的并联有源电力滤波器的仿真研究[J].自动化技术与应用,2005,24(3):28-31.

(上接第69页)

法加以验证,并参考三相绕组频响曲线进行横向比较。在阻抗电压变化高于4%时,表明变压器绕组已发生严重变形,应立即退出运行;当阻抗电压变化高于2%时,应引起足够的重视。

(4)频响法灵敏度高,易受外界干扰的影响,引线长短、感应电压、杂散电容等因素影响程度较大,

在现场试验时要引起重视,避免误判。

参考文献:

- [1] 戴文军.用频率响应法检测变压器绕组的变形[J].高压电器,2004,40(6):464-465.
- [2] 吴国跃.电力变压器绕组变形测试中的影响因素[J].高压技术,2001,27(3):81-82.