

文章编号:1672-058X(2013)05-0052-05

一种实用的混合有源电力滤波器的设计和仿真

史彦,甘丽,豆勤勤,郑群

(安徽工业大学 工商学院,安徽 马鞍山 243000)

摘要:提出了一种结构简单,实用性比较强的拓扑结构,分析了混合有源滤波器(HAPF)各部分器件参数选取的方法,并介绍开关管关断尖峰电压的抑制措施;实验仿真结果表明,这种混合有源滤波器较好地发挥了无源滤波器(PF)和有源滤波器(APF)的优点,并减小了系统的容量,具有良好的无功电流和谐波电流补偿效果。

关键词:混合有源电力滤波器;谐波补偿;无变压器;参数设计

中图分类号:TN713.8

文献标志码:A

电力电子器件应用广泛,但由于其自身所具有的非线性,使得电网的谐波污染日渐严重。近年来,抑制电网中谐波和无功功率补偿成为研究热点,分别单独用无源滤波器或有源滤波器有很多缺点^[1],将传统的PF和APF结合起来,组成混合有源滤波器(HAPF),是当前的重要方向。混合型滤波器成本低,滤波效果好,越来越受到青睐。其中的并联型有源电力滤波器应用最多。此处提出一种实用的并联型混合有源滤波器,并对该结构的主电路各部分的参数设计进行讨论,然后进行了仿真。

1 混合有源滤波器的拓扑结构

此处提出的无耦合变压器型混合有源电力滤波器系统的拓扑结构如图1所示,无源部分设计成7次单调谐电路,对基波和低频谐波处阻抗都很大,这就不仅使APF承受较小的基波电压,另外还可以阻断APF开关频率处谐波流入电网,因此可省略APF输出滤波器。而且这种特殊的电路结构由于不需要耦合变压器,使得电路结构更紧凑,价格更便宜,节约了成本,是一种比较有发展前景的拓扑^[2]。

2 混合有源滤波器主电路的参数设计

2.1 无源滤波器的设计

如图1所示,无耦合变压器型混合有源电力滤波器是由无源滤波器,即7次^[3]单调谐、电压型逆变器及其缓冲电路和直流侧电容组成。

为了便于分析,现假设在理想状态下。在投入混合有源滤波器进行补偿之前,负载谐波电流全部流入电网,并在电网阻抗上产生了一定的压降。由图1可看出,在混合有源滤波器工作后,无源滤波器承受全部基波电压,这样就会在电容 C_7 上产生一个基波无功电流 $I_Q = 220/Z_{F1}$ 。 Z_{F1} 为无源滤波器的基波阻抗,并且负载的谐波电流全部流入混合有源滤波器。

收稿日期:2012-12-02;修回日期:2013-01-03.

作者简介:史彦(1984-),女,江苏丹阳人,助教,硕士,从事电力电子方向研究.

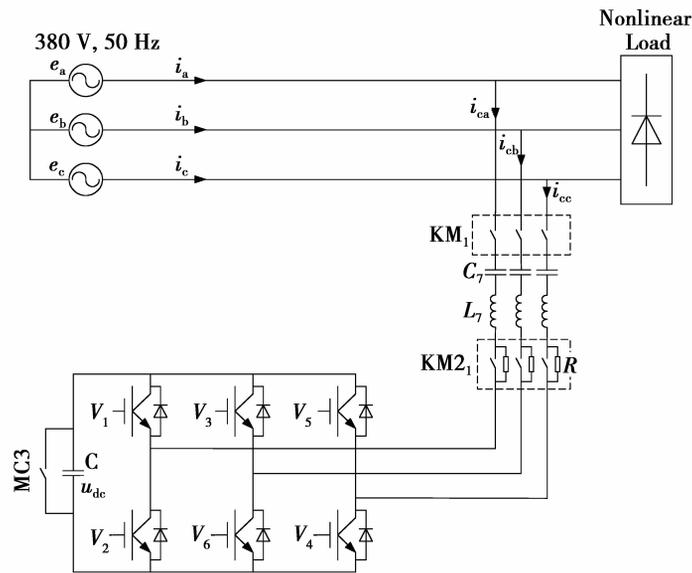


图 1 无耦合变压器型混合有源电力滤波器主电路结构图

无源滤波器的谐振频率 $f_n = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$, 谐振角频率:

$$\omega_n = 2\pi f_n = \frac{1}{\sqrt{LC}} \tag{1}$$

单调谐滤波器对 n 次谐波的阻抗:

$$Z_n = R + j\left(n\omega_s L - \frac{1}{n\omega_s C}\right) = R + j\left(\omega_n L - \frac{1}{\omega_n C}\right) \tag{2}$$

其中 ω_s 为基波角频率。

由于选择的是 7 次单调谐, 根据式(2)可知, 当发生串联谐振时, $f_n = 350 \text{ Hz}$, $\omega_n L = \frac{1}{\omega_n C}$ 。

另外还定义单调谐一个重要的参数, 即品质因素:

$$Q = \frac{\omega_n L}{R} = \frac{1}{\omega_n C R} = \sqrt{\frac{L}{C}} \frac{1}{R} \tag{3}$$

由于混合有源滤波器在工作时, 单调谐是承受基波电压和谐波电流共同作用的。因此电容和电感的容量分别为:

$$Q_c = \left(\frac{\frac{1}{\omega_s C}}{\frac{1}{\omega_s C} + \omega_s L} U_f \right)^2 \omega_s C + \frac{I_{Lh}^2}{\omega_n C} = U_f^2 \omega_s C + \frac{I_{Lh}^2}{\omega_n C} \tag{4}$$

$$Q_L = (U_f \omega_s C)^2 \omega_s L + I_{Lh}^2 \omega_n L \tag{5}$$

式(4)(5)中的 U_f 是基波电压, I_{Lh} 是谐波电流。

根据投资最小的原则确定具体数值。设单位容量的电容和电感的费用分别为 a 和 b , 则总投资为 M :

$$M = aQ_c + bQ_L \tag{6}$$

将式(1)(4)(5)代入式(6), 可以将 M 看成是电容值 C 的函数, 为求 M 的最小值, 将函数求导并令其为零, 求得的电容值为:

$$C = \sqrt{\frac{(a+b)I_{Lh}^2}{n\omega_s^2 U_f^2 (a+b/n^2)}} \tag{7}$$

再将式(7)代入式(1)可得:

$$L = \frac{1}{C\omega_n^2} = \sqrt{\frac{n\omega_n^2 U_f^2 (a + b/n^2)}{(a + b) I_{LH}^2}} \frac{1}{\omega_n^2} \quad (8)$$

由式(2)可知品质因素的定义,对于 n 次谐波,它的阻抗与滤波器的品质因素成正比,品质因素 Q 越大,谐波阻抗越大,频率的性能也就越好,但是会造成滤波器太过敏感,一旦发生失谐现象,就会使滤波器的性能变得很差。反之, Q 越小,谐波阻抗也就越小,选择就会迟钝。因此品质因素 Q 不能选的太大或太小。

此处设计选取的 7 次单调谐的电感和电容分别为 100 μF 和 2 mH, Q 取 30。

2.2 有源滤波器的设计

2.2.1 逆变器主开关器件的设计

对于 GTO,一般作为大容量有源电力滤波器主电路开关器件,因为它的工作频率较低,无法满足较高次谐波的补偿要求。而对于中、小容量的有源电力滤波器,因为 IGBT 的工作频率较高,常选用 IGBT 作为主电路的开关器件,但当它工作在较高工作频率的情况下,其损耗将加大,效率也将随之降低^[4]。所研究的并联型混合有源电力滤波器属于中小容量范围,因此可选择 IGBT 作为主电路的开关器件。

(1) IGBT 电流等级。如图 1 所示,有源滤波器是一个三相桥式 PWM 逆变器,直流侧由一个电容提供支撑电压。由于整流桥电路是大量谐波产生的源头,所以所选用的负载是带阻感的三相不可控整流电路,如图 2 所示,它的谐波电流有效值为 19.8 A,峰值为 49 A,这就意味着流过逆变器 IGBT 谐波的峰值电流为 49 A。实际选择器件时,考虑到安全裕量,需要选取集电极电流可以通过 100 A 的 IGBT。

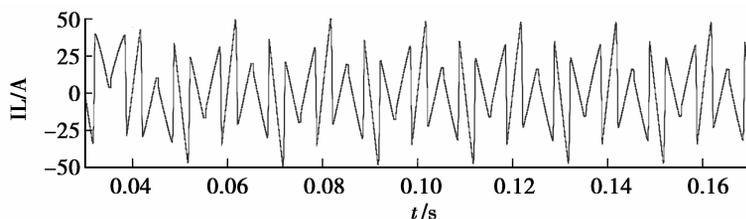


图 2 负载谐波电流图

(2) IGBT 电压等级。在有源电力滤波器中,开关器件电压的选择取决于 APF 的直流母线电压值 U_{dc} ,考虑裕量,通常 IGBT 耐压等级取为 U_{dc} 的 2 倍左右即可满足要求。设计的混合有源电力滤波器的直流母线电压 U_{dc} 值为 300 V。

2.2.2 抑制尖峰电压方法的设计

由于线路杂散电感和电容的存在,IGBT 的突然关断会产生关断浪涌尖峰电压,如果尖峰电压过大,容易造成开关管的损坏。因此必须对其进行处理,为保证 IGBT 安全稳定的运行,可以加上缓冲电路的设计。

如图 3 所示的 RCD 缓冲电路示意图,其工作原理是:当开关管 T 关断时, i_c 通过二极管 D 给电容 C 充电至 $V_c - V_D$,这就减轻了 i_c 对开关管的负担,抑制了过电压;当开关管 T 开通时,电容 C 又通过限流电阻 R 向开关管 T 放电,让 i_c 先上一个台阶,从而抑制了过电流的影响。

从上面原理分析可知, T 关断时,电容 C 经过充电后两端电压可上升为 $V_c e^{-\frac{t_{on}}{RC}}$ 。因此选择 RC 参数时,需要使电容在每次导通时间 t_{on} 内,将电容电量放尽。假设可以在 3 倍时间常数内放完电,则 $3RC = t_{on}$,故

$$R = \frac{t_{on}}{3C} \quad (11)$$

另外为了防止 T 开通时,过电流对开关管的冲击,限流电阻的阻值要保证放电电流值 I_{dis} 小于开关管最大集电极电流值 I_c 的 1/4。如果根据式(11),限流电阻阻值 R 使 I_{dis} 大于 I_c 的 1/4,根据式 $R = \frac{4V_{CE}}{I_{dis}}$ 计算。参

阅工程手册资料可知参数(开关频率选为 $6K$, t_{on} 是整个开关周期的 40%):

$I_c = 100 \text{ A}$, $V_{cE} = 1\ 200 \text{ V}$, $t_r = 70 \text{ ns}$, $t_f = 350 \text{ ns}$, 根据式(10)和(11), 可算出电容 $C = 0.07 \mu\text{F}$, $R = 317 \Omega$ 。这样, 选择的电容是 $1 \text{ kV}/334$, 电阻是 500Ω 。

2.2.3 直流侧电容的设计

当电源电压为正弦波, 仅负载谐波电流单独作用时, 图 1 可简化等效电路如图 4 所示^[5]。

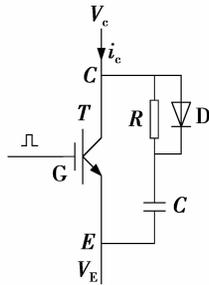


图 3 RCD 缓冲电路结构图

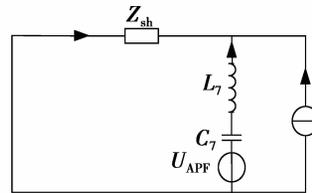


图 4 无耦合变压器型混合有源电力滤波器等效电路图

根据基尔霍夫定律, 由图 4 可得等式:

$$U_s = L_7 \frac{di_{Fh}}{dt} + \frac{1}{C_F} \int i_{Fh} dt + U_{APF} \quad (12)$$

假设负载谐波电流全部被滤除, 即 I_{Lh} 完全进入 PF 支路, 且电源侧谐波阻抗电压值 U_s 为零。由式(12)可得:

$$-U_{APF} = L_7 \frac{di_{Lh}}{dt} + \frac{1}{C_F} \int i_{Lh} dt \quad (13)$$

负载是三相不可控整流装置, 谐波只含奇次数 $6k \pm 1 (k = 1, 2, 3, \dots)$ 。可以得出 a, b 两相的负载谐波含量:

$$\begin{cases} i_{ah} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \sum_{\substack{n=6k\pm1 \\ k=1,2,3,\dots}} (-1)^k \frac{1}{n} \sin n\omega t \\ i_{bh} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \sum_{\substack{n=6k\pm1 \\ k=1,2,3,\dots}} (-1)^k \frac{1}{n} \sin \left[n\omega \left(t - \frac{2\pi}{3} \right) \right] \end{cases} \quad (14)$$

综合式(13)与(14), 得到 U_{APF} 在 a, b 两相的谐波输出电压值 U_{aAPF}, U_{bAPF} 再经过 $3/2$ 变换到旋转坐标下:

$$\begin{cases} U_d = U_{aAPF} \\ U_q = (U_{aAPF} + 2U_{bAPF}) / \sqrt{3} \end{cases} \quad (15)$$

根据式(15), 如果谐波输出电压矢量在逆变器输出电压矢量区间范围之内, APF 的输出电流能够很好的对谐波电流进行跟踪, 进行谐波补偿。此处所需补偿的谐波电流有效值 20 A , 当无源滤波器中电感值和电容值分别为 $L_7 = 2 \text{ mH}$, $C_7 = 100 \mu\text{F}$ 时, 直流母线电容电压至少需要达到 300 V 时, 才能对谐波进行可靠补偿。

有源滤波器直流侧电容容量公式:

$$C_{\min} = \frac{S}{\lambda(1 + \lambda)u_{dc}^2} \quad (20)$$

由于上述计算是在理想状况下, 实际还需留有一定的容量。实验中选用的电容容量为 $6\ 800 \mu\text{F}$, 耐压 450 V 。

3 仿真分析

根据上述的分析和参数的选择, 在 MATLAB/Simulink 下进行仿真, 其波形如图 5 所示。

(1) 未投入混合有源滤波器前,电网侧电流波形。

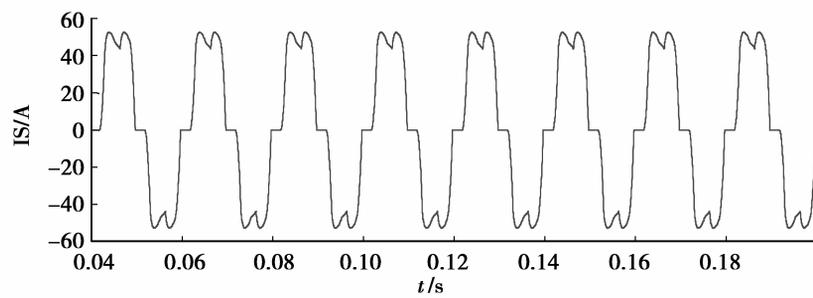


图 5 补偿前的电网侧电流仿真波形

(2) 投入混合有源滤波器后得到的电网侧电流波形。

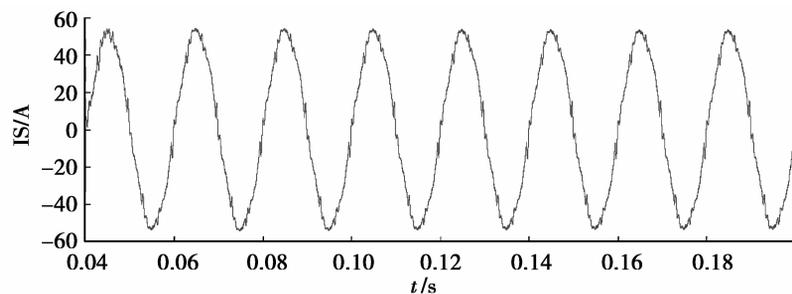


图 6 投入混合有源滤波器电网侧电流波形

图 5 是未使用滤波器补偿前的网侧电流波形,可以看出电流中含有大量的谐波成分。投入无变压器型混合有源滤波器后,在电压源闭环控制策略下,得到电源电流波形如图 6 所示。可见,波形得到了明显的改善。因此,此处所设计的混合有源滤波器具有很好的谐波滤除效果及补偿能力。

4 结束语

提出一种实用的混合有源滤波器,分别对无源滤波器和有源滤波器两个部分的参数进行了设计。同时针对开关管关断时产生的过电压尖峰问题,提出采用缓冲电路来治理。并对系统运用软件进行仿真,从实验结果可以看出,混合有源滤波器不仅减小了 APF 的容量,而且改善了 PF 的滤波性能,具有很好的效果。

参考文献:

- [1] 王兆安,杨君,刘进军. 谐波抑制与无功功率补偿[M]. 北京:机械工业出版社,1998
- [2] 郑群. 一种实用并联型混合有源电力滤波器的研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2011
- [3] RICHARD M, SIMON D. The Steady-state Performance of a Controlled Current Active Filter[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 1993, 8(2): 140-147
- [4] 戴朝波,林海雪,雷林续. 单相并联型电力滤波器的仿真分析[J]. 电网技术, 2001, 25(8): 28-32
- [5] 孙佐,王念春. 并联混合有源电力滤波器仿真研究[J]. 池州学院学报, 2007, 21(5): 42-45
- [6] FUJITA H, AKAGI H. A practical approach to harmonic compensation in power systems; series connection of passive and active filters[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1991, 27(6): 102

(下转第 61 页)