

并联有源滤波器输出 LCL 滤波器研究

武 健,徐殿国,何 娜

(哈尔滨工业大学 电气工程系,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 基于电流最大允许脉动、逆变器开关频率和阻尼特性要求,提出了应用在三相并联有源电力滤波器中的 LCL 滤波器的一种新颖的设计方法。LCL 滤波器是一种滤除逆变器开关谐波的有效手段,具有比 LC 滤波器更优异的性能,能够克服由于电网阻抗的不确定性而影响滤波效果的缺点。在详细介绍设计过程的基础上,给出了一个设计实例。为了避免 LCL 滤波器发生电流谐振,通常需要加入阻尼电阻,则导致损耗增加,降低系统效率。提出一种新的控制策略,引入电容电流反馈的方法,有效地替代了 LCL 滤波器中电阻的阻尼作用。通过调节反馈系数,不需要改变系统谐振频率,同时增强了阻尼作用,有效地抑制了低次谐波的振荡。仿真和实验结果证明了设计的 LCL 滤波器和采用的控制策略的优异性能。

关键词: LCL 滤波器; 广义积分器; 有源滤波器; 电容电流反馈

中图分类号: TN 713; TM 711 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2007)01-0017-04

0 引言

近年来,有源电力滤波器(APF)作为抑制电网谐波和无功扰动的一种有效手段,得到了广泛的研究^[1-3]。通常,APF 中应用的都是 L 滤波器。对 L 滤波器而言,需要较高的开关频率才能对开关谐波有效地衰减及获得良好的动态性能。为增强对开关谐波的衰减作用,不得不增大电感值,其缺点是造成系统的成本升高并使系统的动态性能变差。

为滤除开关谐波,将 LC 或 LCR 滤波器引入并联 APF 中^[4-5]。由于电网阻抗的不确定,LC 或 LCR 滤波器有时难以获得理想的滤波效果。而且,为了抑制谐振而加入的阻尼电阻还会增加系统的损耗。使用 LCL 滤波器能够克服由于电网阻抗的不确定性而影响滤波效果这一缺点,可以在较低的开关频率下,获得比 L 和 LC 滤波器更优异的性能。

同 LC 滤波器一样,由于 LCL 滤波器是谐振电路,对系统的稳定性有很大影响,通常需要引入阻尼作用^[6-7]。对于 APF 而言,一方面希望起补偿作用的低次谐波分量能够不受影响地通过 LCL 滤波器,另一方面,又希望获得一定的高频衰减特性。前者要求 LCL 滤波器谐振频率尽量高,而后者却要求谐振频率足够低。在开关频率不够高的情况下,为了滤除谐波电流,谐振频率取值必然较低,此时为了防止低次谐波发生畸变,必须增加阻尼作用,导致阻尼电阻阻值增加,加大了系统的损耗。针对这个问题,本文在详细介绍 LCL 滤波器设计过程的基础上,提出了在系统控制策略中引入电容电流反馈的方法,可以等效地增加 LCL 滤波器的阻尼作用。它的特点是在不改变系统谐振频率的条件下,相对提高了系统

阻尼比,有效地抑制了低次谐波的振荡。

1 LCL 滤波器设计

1.1 设计过程

在并联 APF 中应用 LCL 滤波器是为了能够更好地滤除开关谐波。LCL 滤波器设计主要有 3 个原则,即电网侧电流最大允许脉动、逆变器开关频率和阻尼特性要求。

设计过程需要综合考虑这 3 个方面因素,图 1 是带有 LCL 滤波器的并联 APF 系统结构图。谐波源是二极管整流桥带电阻 R 和电感 L , L_s 是电源内电感, L_1 是逆变器侧电感, L_2 是电网侧电感。

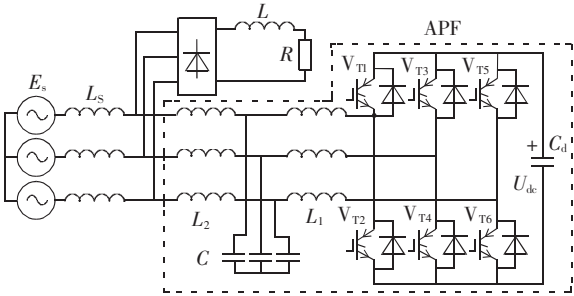


图 1 带有 LCL 滤波器的并联 APF 系统结构图

Fig.1 The system of shunt APF with LCL filter

下面介绍具体设计过程。

1.1.1 设计逆变器侧电感值

并联型 APF 的补偿性能主要决定于输出补偿电流对于参考电流的跟踪能力,而 APF 的输出电感值决定了补偿电流的跟踪速度,对其性能有很大影响。在一定的直流母线电压和交流电压条件下,电感值越大,电流的纹波越小,但电感的电流变化率会变小,导致电流跟踪能力减弱,同时电感值的增大也会造成设备成本的增加;反之,电感值越小,电感中

电流变化率就越大,APF 的动态响应速度就越快,但电流的变化也越剧烈,容易造成系统振荡冲击,工作不稳定。实际应用中,通常在保证补偿性能的前提下,尽量选择较小的电感值。因此,本文根据补偿电流最大允许纹波条件决定逆变器侧电感的取值^[8-9]为

$$L \geq \frac{1}{8} \frac{U_{dc}}{f_{sw} \Delta i_{max}} \quad (1)$$

1.1.2 设计电容值

电容值越大,产生的无功越多,造成系统效率降低。本文设计中,电容产生的无功被限制为不超过 5% 的系统额定功率,即

$$C \leq 5\% \frac{P_N}{3 \times 2 \pi f \times U_N^2} \quad (2)$$

1.1.3 衰减比例、谐振频率和电网侧电感

设定开关谐波的衰减比例,并且选择 LCL 滤波器的谐振频率和电网侧电感值。图 2 是带 LCL 滤波器的 APF 单相等效电路,不考虑电源内阻抗的影响。同时,由于连结 PCC 点的负载输入阻抗通常远大于电源内阻抗,因此,设计 LCL 滤波器时,忽略负载的影响。

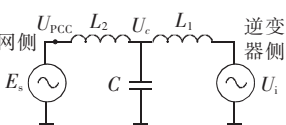


图 2 单相等效电路
Fig.2 The single-phase equivalent circuit

由此可以得到如下的传递函数关系:

$$U_c(s) = U_i(s) W_2(s) + E_s(s) W_1(s) \quad (3)$$

$$W_2(s) = \frac{L_2}{L_1 L_2 C s^2 + L_1 + L_2}$$

$$W_1(s) = \frac{L_1}{L_1 L_2 C s^2 + L_1 + L_2}$$

由 $W_2(s)$ 可以得到谐振角频率为

$$\omega_r^2 = (L_1 + L_2) / (L_1 L_2 C)$$

设定电流的脉动衰减比例,确定电网侧电感 L_2 的电感值,计算时忽略损耗和阻尼作用,可以得到开关谐波电流衰减率:

$$\frac{i_g}{i_i} = \frac{1}{L_2 C |\omega_r^2 - \omega_{sw}^2|} \quad (4)$$

式中 ω_{sw} 为开关谐波角频率; i_g 、 i_i 分别为电网侧和逆变器侧的开关谐波电流。

进而求出谐振频率。一方面,要使 LCL 滤波器取得一定的高频衰减特性, f_r 应足够低,即当 L_1 一定时, C_f 在满足无功要求时,应尽量大。另一方面,对于二极管整流阻感性负载而言,APF 主要补偿 5、7、11、13、17、19 次谐波,因此,经过 LCL 滤波器除了有高频开关谐波外还包括补偿的低次谐波。当 f_r 过小时,低次谐波电流将通过 LCL 滤波器得以放大,使补偿效果变差。为避免电网电流畸变, f_r 应该尽量取高值。对于其他场合应用的 LCL 滤波器,一般要求谐振频率位于 10 倍基频和一半开关频率之间,但在 APF 中,这个设计规则显然需要修改,谐振频率应尽量靠近开关频率的一半,以保证在高频衰减的同时,避免低次谐波被放大。

电网侧电感 L_2 过大,会降低 APF 的动态性能,因此,在谐振频率和无功要求都满足时, L_2 取值应尽量小。

需要综合考虑谐振频率范围、无功约束和系统动态性能要求,设计 LCL 滤波器的谐振频率和电网侧电感。

1.1.4 阻尼

在 LCL 滤波器中加入阻尼,通常的方法是加入阻尼电阻,一般取值为谐振点电容阻抗的 1/3。但是,此时的阻尼系数比较低,难以抑制低次谐波的振荡,虽然增大电阻值可以提高系统阻尼,但同时损耗亦增加。本文提出引入电容电流反馈的控制策略,代替阻尼电阻的作用,其显著特点是:不需要改变系统谐振频率,同时增强了阻尼作用,有效地抑制了低次谐波的振荡。

引入电容电流反馈后,

$$U_c(s) = [U_i(s) - K_f I_c(s)] W_2(s) + E_s(s) W_1(s) = U_i(s) W_2'(s) + E_s(s) W_1'(s)$$

$$W_2'(s) = \frac{L_2}{L_1 L_2 C s^2 + K_f C L_2 s + L_1 + L_2} \quad (5)$$

$$W_1'(s) = \frac{L_1}{L_1 L_2 C s^2 + K_f C L_1 s + L_1 + L_2}$$

考虑 $W_2'(s)$ 时,

$$\omega_r^2 = \frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C}, \quad \xi = \frac{K_f}{2} \sqrt{\frac{L_2 C}{L_1 (L_1 + L_2)}} \quad (6)$$

在不影响谐振频率的情况下,可以通过调节反馈系数 K_f ,增加系统阻尼比 ξ ,抑制系统的低频振荡。

实际应用中,电网侧电感 L_2 与电源内感串联,虽然有利于增加高频衰减率,但也会导致 LCL 谐振频率降低,引起系统不稳定。通过本文提出的电容电流反馈控制策略,可以有效地改变系统阻尼比,获得最佳的滤波效果。

1.2 设计实例

实验环境: $E_a = 311$ V,开关频率 $f_{sw} = 6.4$ kHz, $U_{dc} = 800$ V, $I_m = 20$ A。图 3 反映了跟踪电流最大允许脉动和输出电感 L 最小值之间的关系。

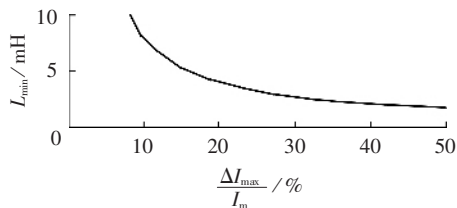


图 3 跟踪电流最大允许脉动和输出电感 L 最小值的关系

Fig.3 The relation between the max allowable current ripple and the min output inductance L

一般,脉动电流可选择为额定电流的 15%~25%,本文选择脉动电流为额定电流的 20%。因此,根据式(1)可得到 $L \geq 4$ mH;按照式(2)可得到 $C \leq 5\% \times P_N / (3 \times 2 \pi f \times U_N^2) = 10.2$ (μ F)。为留有余量,选择电

出,使用 LCL 滤波器和引入电容电流反馈后,不但低次谐波得到补偿,而且开关谐波也得到了有效衰减。此时,电源电流和 PCC 点电压的 THD 分别为 3.99% 和 5.06%。

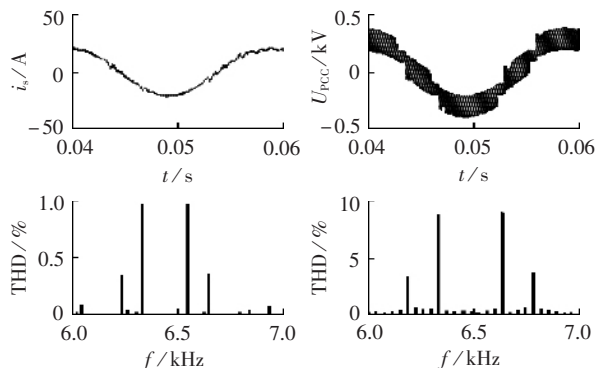


图 8 电源电流、PCC 点电压及频谱
(未加入 LCL 滤波器)

Fig.8 The spectrums of grid current and voltage at PCC(without LCL filter)

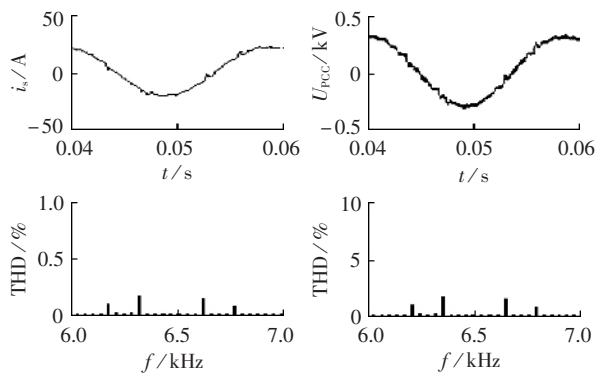


图 9 电源电流、PCC 点电压及频谱
(加入 LCL 滤波器)

Fig.9 The spectrums of grid current and voltage at PCC(with LCL filter)

根据 LCL 滤波器的设计参数和图 1 拓扑结构,构建了一台并联 APF 实验系统。实验结果如图 10 所示。图中,1 为电源电流(10 A/div, 10 ms/div);2 为 PCC 点电压(250 V/div, 10 ms/div);3 为电源电流频谱(1 A/div, 1 kHz/div)。结果证明采用本文所提出的 LCL 滤波器设计方法和控制策略,并联 APF 能取得理想的补偿效果,同时可以有效抑制开关谐波。

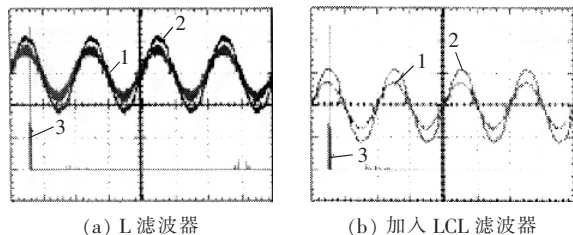


图 10 实验结果

Fig.10 Experiment results

4 结论

在对应用于并联 APF 中的 LCL 滤波器的设计过程进行分析的基础上,本文在两相静止坐标系下提出了一种新的并联 APF 控制策略。仿真和实验结

果表明这种控制策略是有效可行的。在这种控制方式下,通过引入电容电流反馈等效地增加了 LCL 滤波器的阻尼特性,抑制了谐振,同时取得了良好的滤波效果。

参考文献:

- [1] AKAGI H. New trends in active filters for power conditioning [J]. IEEE Trans on Ind App, 1996, 32(6): 1312-1322.
- [2] EI-HABROUK M, DARWISH M K, MEHTA P. Active power filter: a review [J]. IEE Proc Electr Power Appl, 2000, 147(5): 403-413.
- [3] 陈国柱, 吕征宇, 钱照明. 有源滤波器的一般原理及应用 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(9): 17-21.
CHEN Guo-zhu, Lü Zheng-yu, QIAN Zhao-ming. The general principle of active filter and its application [J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(9): 17-21.
- [4] 武健, 何娜, 徐殿国. 三相并联有源滤波器输出滤波器设计方法研究 [J]. 电力电子技术, 2004, 38(6): 16-19.
WU Jian, HE Na, XU Dian-guo. Study on output filter of parallel active power filter [J]. Power Electronics, 2004, 38(6): 16-19.
- [5] 唐欣, 罗安, 涂春明. 有源滤波器中输出滤波器的参数设计及优化 [J]. 电力电子技术, 2005, 39(5): 91-94.
TANG Xin, LUO An, TU Chun-ming. Design and optimization of output filter of parallel active power filter [J]. Power Electronics, 2005, 39(5): 91-94.
- [6] LISERRE M, BLAABJERG F, HANSEN S. Design and control of an LCL filter based active rectifier [J]. IEEE Trans on Ind App, 2001, 37(2): 299-307.
- [7] LINDGREN M, SVENSSON J. Control of a voltage-source converter connected to the grid through an LCL-filter-application to active filtering [C]//IEEE PESC 1998. Fukuoka, Japan: [s.n.], 1998: 229-235.
- [8] LINDGREN M. Feed forward-time efficient control of a voltage source converter connected to the grid by low pass filters [C]//IEEE PESC 1995. Atlanta, USA: [s.n.], 1995: 1028-1032.
- [9] WANG T C Y, YE Zhi-hong, SINHA G, et al. Output filter design for a grid-interconnected three-phase inverter [C]//IEEE PESC 2003. Acapulco, Mexico: [s.n.], 2003: 779-784.
- [10] MATTARELLI P. A closed-loop selective harmonic compensation for active filters [J]. IEEE Trans on Ind App, 2001, 37(1): 81-89.
- [11] 武健, 何娜, 徐殿国. 基于优化滑动傅立叶分析和广义积分的并联有源滤波器控制策略 [J]. 电网技术, 2005, 29(17): 21-25.
WU Jian, HE Na, XU Dian-guo. A novel control strategy for shunt active power filter based on optimized sliding Fourier analysis and generalized integral [J]. Power System Technology, 2005, 29(17): 21-25.

(责任编辑: 柏英武)

作者简介:

武健(1979-),男,黑龙江哈尔滨人,博士研究生,研究方向为电力系统的谐波抑制及无功补偿(E-mail: wujian@hit.edu.cn);

徐殿国(1960-),男,黑龙江哈尔滨人,教授,从事电能质量方面的研究;

何娜(1979-),女,山东临沂人,博士研究生,研究方向为电力系统的谐波抑制及无功补偿。

(下转第 35 页 continued on page 35)

Research on LCL filter applied to shunt active power filter

WU Jian,XU Dian-guo,HE Na

(Harbin Institute of Technology,Harbin 150001,China)

Abstract: Based on the maximal allowable current ripple,the switching frequency and the damping characteristic,a novel design method of the LCL filter applied to the three-phase shunt APF(Active Power Filter) is proposed. The LCL filter is effective in eliminating switching harmonics of VSI, which has better performance than LC filter and can overcome the influence of the grid parameter uncertainty. With the detail introduction of design process,an example is presented. To avoid the current resonance caused by LCL filter,damping resistance is usually needed,which increases wastage and reduces system efficiency. A novel control strategy is proposed,in which the capacity current feedback is used as damping resistance to strengthen the damp and effectively suppress the resonance of low harmonics by regulating the feedback coefficient with unchanging system resonance frequency. Simulation and experiment validate the design of LCL as well as the control strategy.

Key words: LCL filter; generalized integrator; active power filter; capacity current feedback