



文章编号:1671-251X(2014)07-0048-04

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2014.07.014

荣相.有源电力滤波器的鲁棒重复电流控制策略研究[J].工矿自动化,2014,40(7):48-51.

有源电力滤波器的鲁棒重复电流控制策略研究

荣相

(中煤科工集团常州研究院有限公司,江苏 常州 213125)

摘要:针对传统的电流环PI控制存在稳态误差和相角偏移等问题,提出了一种有源电力滤波器的鲁棒重复电流控制策略,详细分析了鲁棒重复控制策略的具体实现方法。仿真和试验结果表明,该控制策略在实现有源电力滤波器输出补偿电流准确跟踪指令电流的同时,提高了有源电力滤波器的抗干扰性能,显著改善了有源电力滤波器的动静态性能。

关键词:有源电力滤波器;鲁棒重复控制器;补偿电流;指令电流

中图分类号:TD614

文献标志码:A

网络出版时间:

网络出版地址:

Research of robust repetitive current control strategy of active power filter

RONG Xiang

(CCTEG Changzhou Research Institute, Changzhou 213125, China)

Abstract: In view of problems of steady-state error and phase offset of traditional current loop PI control of active power filter, a robust repetitive current control strategy of active power filter was proposed, and concrete implementation method of robust repetitive control strategy was analyzed in details. The simulation and experimental results verify that the control strategy can achieve tracking of output compensation current with instruction current and improve anti-interference performance at the same time, which improves dynamic and static performance of active power filter significantly.

Key words: active power filter; robust repetitive controller; compensation current; instruction current

0 引言

近年来,电力电子装置等非线性负载在各个领域的广泛使用,使电网的谐波污染日益严重,引起电网电能质量下降、供电线路损耗增加、继电保护和通信系统等敏感设备故障等问题^[1]。目前,有源电力滤波器(Active Power Filter, APF)是解决谐波污染的有效途径,APF的研究和应用受到国内外学者越来越多的关注^[2-3]。

影响APF补偿性能的关键是电流控制环节,由于指令电流是多种频率正弦信号的叠加,采用传统

的PI控制存在稳态误差和相位偏移^[3]等问题,同时有功轴和无功轴的相互耦合对APF动态性能不利,因此,PI控制并不适用于APF。

鉴于此,本文提出一种APF鲁棒重复电流控制策略,在实现APF输出补偿电流准确跟踪指令电流的同时,提高了APF的抗干扰性能,显著改善了APF的动静态性能。仿真和试验结果验证了所提控制策略的可行性和有效性。

1 APF 结构及原理

本文以三相两电平并联型APF为研究对象,其

收稿日期:2014-04-15;修回日期:2014-05-08;责任编辑:张强。

基金项目:中煤科工集团常州自动化研究院研发项目(13GY007-01)。

作者简介:荣相(1977—)男,安徽枞阳人,工程师,现主要从事煤矿供电技术研究工作, E-mail: tdczrx@126.com。

控制系统结构如图 1 所示,其中 C 为变流器直流侧电容, L_f 、 L_g 、 C_d 分别为低通滤波器对应的变流器侧电感、网侧电感以及滤波电容。采用传统的电压外环-电流内环的双闭环控制策略,变流器直流侧电压采用 PI 控制器进行控制,输出值为基波有功直流分量,该值乘以由锁相环 (Phase-Locked Loop, PLL) 获得的三相电网电压空间角度 θ_{abc} ,即为基波有功分量,用于变流器交、直流侧的能量交换;与此同时,实时采样负载电流信号 i_{La} 、 i_{Lb} 、 i_{Lc} ,经谐波检测环节得到谐波电流指令信号,将上述两者进行合成,得到电流环指令 i_m^* ($m=a, b, c$)。将该信号和变流器实时输出信号的差值输入至电流环控制器,经 SVPWM 调制,生成一系列开关控制信号,驱动变流器产生与谐波电流指令大小相等、方向相反的补偿电流信号,注入电网后可减少电网谐波,改善供电质量。

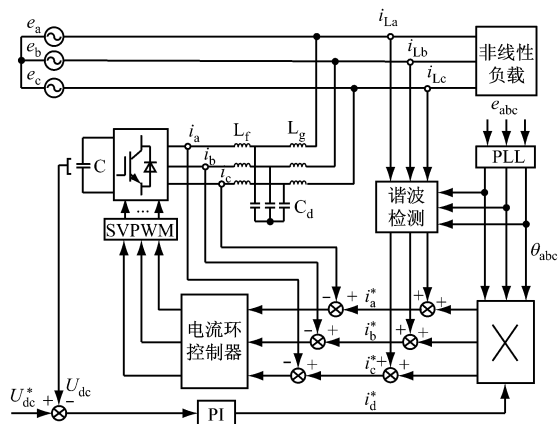


图 1 APF 控制系统结构

由图 1 可知,APF 控制系统的差异主要在于电流环控制器,不同的电流环控制器对 APF 的工作性能有着显著的影响。本文将围绕 APF 电流环控制器采用鲁棒重复控制器展开理论和试验研究。

2 鲁棒重复控制策略

APF 电流控制环节采用鲁棒重复控制策略,其控制原理如图 2 所示。由于在三相静止坐标系下电流环控制器是完全对称的,这里以 a 相为例展开研究。控制器由重复环节和鲁棒环节组成,其中 $F(s)$ 为低通滤波器传递函数, $e^{-\tau_d s}$ 为一个时间常数为 τ_d

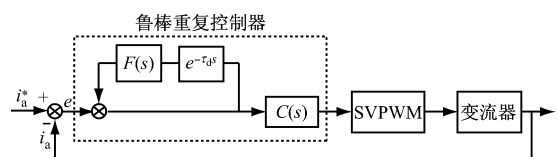


图 2 电流环鲁棒重复控制原理

的延时环节, $C(s)$ 为鲁棒控制器。重复环节使补偿电流准确跟踪指令电流,而鲁棒环节能增强系统的抗干扰性能^[4-7]。

接下来对鲁棒重复控制器进行设计,以 a 相为例,变流器简化模型如图 3 所示。其中, L_f 和 R_f 分别为变流器侧电感值及其等效电阻; L_g 和 R_g 分别为网侧电感值及其等效电阻; C_d 和 R_d 分别为滤波电容及其等效电阻; i_1 、 i_2 、 i_c 分别为变流器侧输出电流、网侧电流及其电容支路电流; u 、 e_a 分别为变流器输出电压和电网相电压有效值。

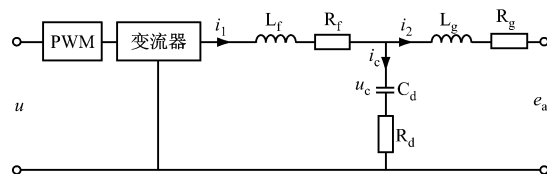


图 3 变流器简化模型

由图 3 可得

$$\begin{cases} u = L_f \frac{di_1}{dt} + R_f i_1 + u_c + R_d i_c \\ i_c = C_d \frac{du_c}{dt} = i_1 - i_2 \\ u_c + R_d i_c = R_g i_2 + L_g \frac{di_2}{dt} + e_a \end{cases} \quad (1)$$

选取状态变量 $x = [i_1 \ i_2 \ i_c]^T$, 外部输入 $\omega = [e_a \ i_{ref}]^T$, 输出信号 $e = i_{ref} - i_2$, 则系统的状态空间方程为

$$\begin{cases} \dot{x} = A_1 x + B_1 \omega + B_2 u \\ y = C_1 x + D_1 \omega + D_2 u \end{cases} \quad (2)$$

式中:

$$A_1 = \begin{bmatrix} -(R_f + R_d)/L_f & R_d/L_f & -1/L_f \\ R_d/L_g & -(R_d + R_g)/L_g & 1/L_g \\ 1/C_f & -1/C_f & 0 \end{bmatrix};$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -1/L_g & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; B_2 = \begin{bmatrix} 1/L_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; C_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix}^T;$$

$$D_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix}; D_2 = 0.$$

变流器的空间状态模型为

$$P = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 & B_2 \\ C_1 & D_1 & D_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

得到变流器状态空间模型后,通过 Matlab 的鲁棒控制工具箱即可求得鲁棒控制器 $C(s)$ 的传递函数。

将 $F(s)$ 定为一个 $F(\infty) = 0$ 的低通滤波器^[4]:

$$F(s) = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \quad (4)$$

式中: ω_c 为低通滤波器的截止频率, 该值应大于需要跟踪的谐波频率上限, 但同时不能取太大, 否则会使内模的带宽过大, 造成 APF 无法稳定工作。考虑补偿 50 次以内的谐波, 取 $\omega_c = 2\,500\text{ Hz}$ 。

确定好低通滤波器的截止频率后, 要保证整个内模环节的延时为工频周期 $\tau = 20\text{ ms}$, 即得到延时环节的延时时间:

$$\tau_d|_s = \tau - \frac{1}{\omega_c} = 0.019\,6 \quad (5)$$

3 仿真研究

为了验证 APF 电流控制环节采用鲁棒重复控制策略的可行性, 本文采用 Matlab/Simulink 仿真软件进行仿真分析, 将三相平衡阻性负载和三相不控整流电路并联作为负载进行研究。APF 仿真参数如下: 电网相电压有效值为 110 V ; 直流母线电容 $C = 2\,200\text{ }\mu\text{F}$; 逆变器侧电感 $L_f = 1.5\text{ mH}$; 逆变器侧电感等效电阻 $R_f = 0.1\text{ }\Omega$; 网侧电感 $L_g = 1.2\text{ mH}$; 网侧电感等效电阻 $R_g = 0.1\text{ }\Omega$; 滤波电容 $C_d = 9.4\text{ }\mu\text{F}$; 滤波电容等效电阻 $R_d = 0.1\text{ }\Omega$; 三相平衡阻性负载为 $50\text{ }\Omega$; 三相不控整流电路负载电阻为 $75\text{ }\Omega$; 采样频率为 10 kHz ; 开关频率为 10 kHz 。

根据 APF 仿真参数和 Matlab 提供的鲁棒控制工具箱可以求得鲁棒重复控制器的传递函数 $C(s)$, 其中 s 为复变量。

$$C(s) = \frac{39.66(s + 37.25)}{s + 2\,550} \quad (6)$$

负载电流波形如图 4 所示, 由于非线性负载的存在, 电流波形发生了明显畸变, 对其进行频谱分析(图 5)可知, a 相电流畸变率 $\text{THD} = 16.05\%$, 显然不符合相关标准($\text{THD} \leq 5\%$)。

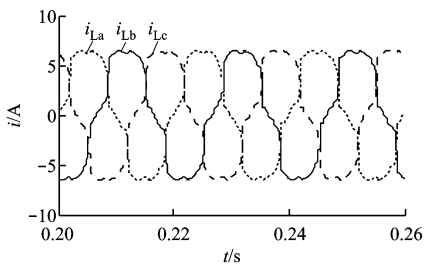


图 4 负载电流波形

采用鲁棒重复控制策略跟踪补偿谐波电流, 补偿后电网电流波形及其频谱分析如图 6、图 7 所示。从图 6、图 7 可看出, 三相对流对称, 畸变率仅为 1.49% , 电网电流的电能质量得到了显著改善。

若负载在 0.3 s 发生波动, 仿真模型中的三相

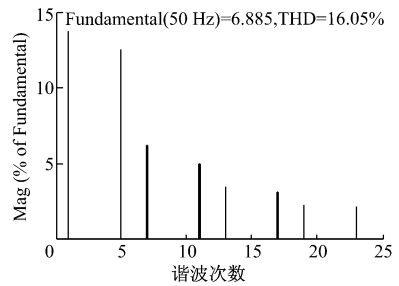


图 5 补偿前电网电流频谱

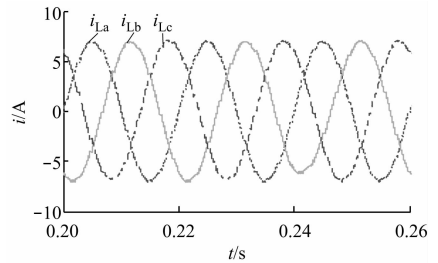


图 6 补偿后电网电流波形

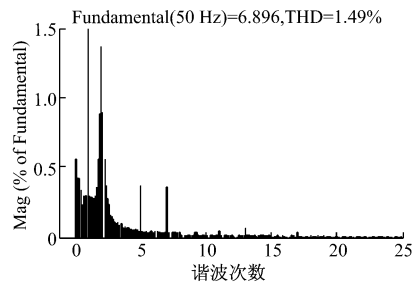


图 7 补偿后电网电流频谱

不控整流电路负载电阻由 $75\text{ }\Omega$ 变为 $37.5\text{ }\Omega$, 负载发生突变时电网电流波形如图 8 所示。负载突变后, 电网电流大约经过一个基波周期就达到稳定状态, 具有快速的动态响应。经频谱分析可知, 三相电网电流的畸变率分别为 1.35% 、 1.30% 、 1.35% , 三相电流对称。可见负载突变后, 系统工作效果依然良好, 说明鲁棒重复控制器对负载波动具有良好的适应性。

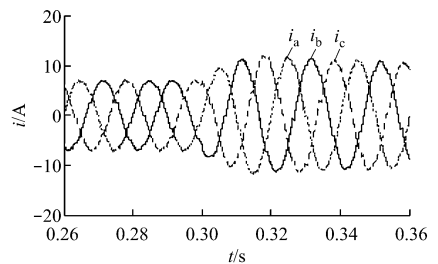


图 8 负载突变时电网电流波形

4 试验研究

为了再次验证鲁棒重复电流控制策略的可行

性,在上述仿真研究的基础上,本文又在 2 kVA 试验平台上进行了试验研究,硬件参数同仿真参数,试验结果如图 9 所示。APF 电流环采用鲁棒重复控制器后,电网电流谐波畸变率由补偿前的 14.3%、14.1%、14.3%降低到补偿后的 2.1%、2.1%、2.1%,各次谐波均得到明显抑制,符合相关标准;补偿后电网电压、电流相位一致,APF 始终运行在单位功率因数状态下;负载发生突变后,电网电流大约经过 2 个工频周期就达到新的稳定状态,系统具备优良的抗干扰能力。综上所述,所提出的鲁棒重复电流控制策略显著改善了 APF 的动静态性能。

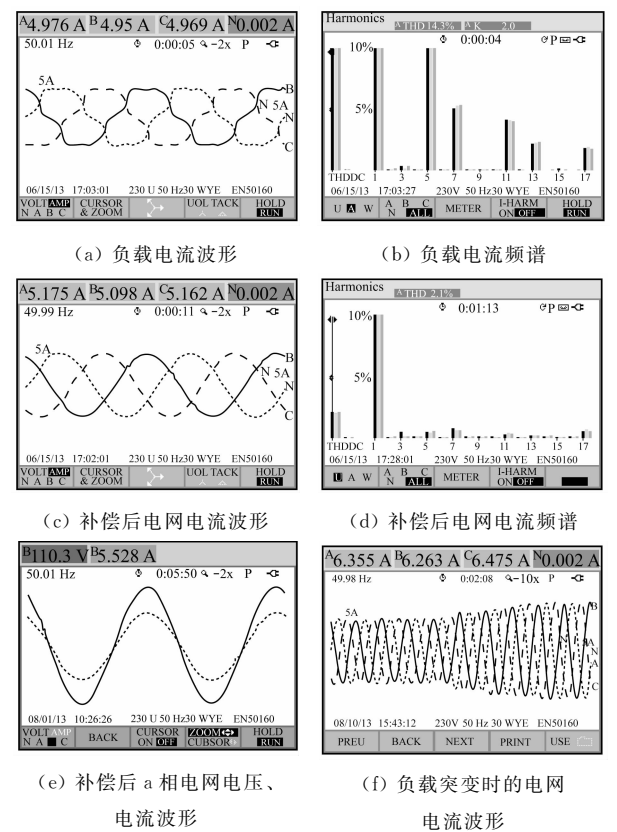


图 9 试验结果

5 结语

将鲁棒重复控制策略引入到 APF 电流控制环节,具有原理清晰、设计方法简单等优点。仿真和试验结果表明,所提出的控制策略不仅能获得较高的指令跟踪精度,而且对于负载变化有良好的适应性,显著改善了 APF 的动静态性能,对于工业应用具有一定的参考价值。

参考文献:

[1] 王兆安,杨君,刘进军,等. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京:机械工业出版社,2005.

[2] 耿攀,戴珂,魏学良,等. 三相并联型有源电力滤波器电流重复控制[J]. 电工技术学报,2007,22(2):127-131.

[3] 周娟,张勇,耿乙文,等. 四桥臂有源滤波器在静止坐标系下的改进 PR 控制[J]. 中国电机工程学报,2012,32(6):113-120.

[4] 耿乙文,伍小杰,徐立华,等. 基于 H_∞ 和重复控制的三相四线制 PV-AF 系统[J]. 中国电机工程学报,2013,33(24):90-96.

[5] HORNIK T, ZHONG Q C. A current-control strategy for voltage-source inverters in microgrids based on H_∞ and repetitive control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(3):943-952.

[6] ZHONG Q C, HORNIK T. Cascaded current-voltage control to improve the power quality for a grid-connected inverter with a local load [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(4): 1344-1355.

[7] ZHONG Q C, HORNIK T. H_∞ repetitive voltage control of grid-connected inverters with frequency adaptive mechanism[J]. IET Power Electronics, 2010, 3(6):925-935.