

并联型 APF 比例谐振控制优化研究

吴雷 夏世平

(江南大学物联网学院 无锡 214122)

摘要: 配电系统的最新趋势表明,非线性负载的使用将在未来呈现上升的趋势,因此研究了并联型有源滤波器,用来消除谐波,从而提升电能质量。使用一种无谐波检测方法,从而使补偿精度不再受负载电流检测精度的影响,输出电流波形的控制使用一种优化的准比例谐振控制器完成。在并联型有源滤波器主电路系统结构的基础上,提出了一种电压电流双闭环及电流比例负反馈的准比例谐振优化控制方案。最后,通过 MATLAB/Simulink 对所提优化控制方案进行仿真,所提出优化控制的可行性通过仿真实验得到充分验证。

关键词: 并联型有源滤波器;准比例谐振;无谐波检测

中图分类号: TM714 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.10

Research on an optimized proportional resonant control strategy of shunt active power filter

Wu Lei Xia Shiping

(School of Internet Things, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: Recent trend in the power distribution system is showing that the use of non-linear loads and devices will take a rising profile in days to come. This introduces harmonics in source side currents which improves the power quality. In this paper, the use of a non harmonic detection method, so as to improve the accuracy of the compensation is no longer affected by the load current detection accuracy, control of output current waveforms using an optimized quasi proportional resonant controller. On the bases of shunt active power filter main circuit structure, the optimal control strategy of the quasi proportional resonant voltage current loop control and current ratio of negative feedback. Finally, through MATLAB/Simulink simulation results of the proposed control strategy, the proposed control strategy is feasible through the simulation experiment are fully verified.

Keywords: shunt active power filter; quasi proportional resonant; non-harmonic detection

0 引言

电力电子设备的发展、静态转换器的大量使用以及国内大量电子化应用的出现,严重影响了电力系统的电能质量^[1-2]。在不平衡的电网阻抗的条件下,这些非线性负载产生的谐波电流^[3-4],可能是不对称的,也可能导致电压下降。无源滤波器的传统技术的使用可以补偿特定的谐波,但其需要庞大且昂贵的无源部件和电磁干扰的可能性。鉴于无源滤波器存在上述不足,故而现今设计中谐波补偿主要依靠有源电力滤波器(active power filter, APF)^[5-6],同时其还可以对幅值与频率不断变化的谐波进行补偿,且 LC 滤波等经典谐波抑制和无功补偿方法的缺点在 APF 中也不存在。本文研究的并联型 APF 主要用来对电流源特性谐波源进行谐波补偿^[7-8],补偿电流通过 APF 输入到电

网,从而使电网电流成为无谐波的正弦波。

对于 APF 的应用,因为输出为周期性谐波信号,不是一个恒值,而传统的 PI 控制器跟踪交流电流时存在稳态误差,对谐波电流指令无法实现无静差跟踪,因此,许多 APF 应用采用了比例谐振控制技术,但这种控制技术严重依赖于元器件参数精度,谐波抑制效果明显变差,在工程中实现困难。

针对上述现状,本文介绍了一种无谐波检测^[9-10]并联型 APF 新型控制研究策略,使系统在向电网提供有功电能的同时,也能够无静差的跟踪指令电流及补偿谐波动态性能。这种优化控制由无谐波检测、电压电流双闭环控制及电流比例负反馈构成。其中无谐波检测解决了谐波检测^[3]计算复杂的问题;外环采用 PI 控制来稳定逆变器直流侧电压;内环则采用准比例谐振控制来保证指令电流的零

$$G_{PR}(s) = k_p + \frac{2k_r\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2} \quad (4)$$

式中： k_p 为比例系数； k_r 为积分系数； ω_0 为谐振频率； ω_c 为截止频率。当 $k_p = 1, k_r = 100, \omega_0 = 314 \text{ rad/s}, \omega_c = 1 \text{ rad/s}$ 时得到准谐振控制器的幅频特性曲线如图 3 所示。

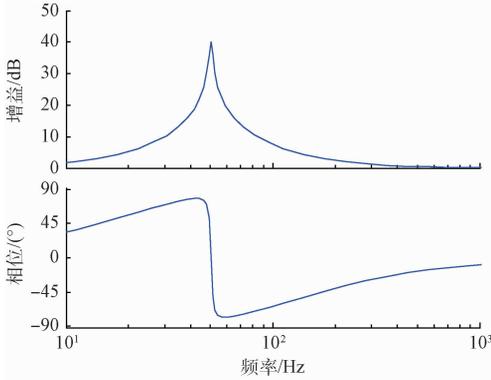


图 3 准谐振控制器幅频特性曲线

图 3 可知准 PR 控制器在谐振频率处的增益是有限的，并且增加 k_r 值能使其具备足够大的增益，准谐振控制器具有优越的控制性能。由于随着 ω_c 的增加，控制器的带宽增大， k_r 影响系统的整体增益，而控制器的带宽影响较小，则可以看出通过提高电阻以及增大截止频率 ω_c 可以有效提高系统稳定性。图 4 即为准谐振控制策略的电流环跟踪控制的原理框图。

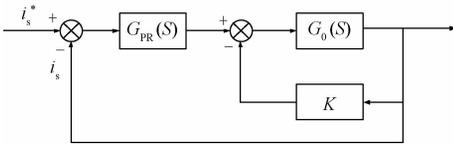


图 4 电流环准谐振控制原理

$$G_0(s) = \frac{1}{sL + R} \quad (5)$$

式(5)为变流器支路电阻电感传递函数，在系统中加入电流比例负反馈的环节能够有效提高系统的稳定性。即在调制环节加入比例负反馈，间接增加了电阻值，因此有效的提高系统的稳定性能。

则优化准比例谐振控制器的电流传递函数如下(K 为比例系数)：

$$G(s) = \frac{G_{PR}(s) \frac{KG_0(s)}{1 + KG_0(s)}}{1 + G_{PR}(s) \frac{KG_0(s)}{1 + KG_0(s)}} \quad (6)$$

化简之后(R 由于很小可以忽略)可得：

$$G(s) = \frac{b_1 s^2 + b_2 s + b_3}{a_1 s^3 + a_2 s^2 + a_3 s + a_4} \quad (7)$$

其中，

$$\begin{cases} a_1 = L \\ a_2 = K + Kk_p + 2\omega_c L \\ a_3 = \omega_0^2 L + 2K(1 + k_p + k_r)\omega_c \\ a_4 = (K + Kk_p)\omega_0^2 \\ b_1 = Kk_p \\ b_2 = 2K\omega_c(k_p + k_r) \\ b_3 = Kk_p\omega_0^2 \end{cases}$$

根据劳斯判据可知，在负反馈比例系数 $K > 0$ 时，系统即为稳定，并且随着负反馈比例系数 K 的增大，系统阻尼系数也会随着增大，系统稳定性会越来越高，因此系统的稳定性与 K 值密切相关。然而比例负反馈系统中的 K 值的选取并不能过大， K 值越大，则桥臂上电阻过高，IGBT 的耐压性会受到很大影响。因此 K 值的确定应考虑到 IGBT 的耐压能力。

为达到上述要求，可以通过附加电流比例负反馈控制以及增大截止频率 ω_c 这两种方法来提高系统稳定性，按照文献[15]中方法来选取准谐振控制器参数，根据参数整定原则，确定出 $\omega_c = 5 \text{ rad/s}, k_p = 10.3, k_r = 119.7, K = 10$ 。

2.2 准比例谐振控制器的实现

一般情况下常采用 Tustin 变换的数字控制器对比例谐振控制器离散化，由于 Tustin 变换仅在低频段 s 域与 z 域具有极好的线性关系，由此可知 Tustin 变换只在谐振频率较低的控制有效。而对于 APF，许多频率比较大的谐波仍存在于其所产生的补偿电流中，但 Tustin 变换并不适用于此种大频率谐波，其在高频段频率会产生很大的畸变。故而本文采用对 Tustin 变换进行提前修正的方法，来规避其对高频段不适用的缺点，即：

$$s = \frac{\omega}{\tan(\omega T_s/2)} \cdot \frac{z - 1}{z + 1} \quad (8)$$

式中： ω 为需修正的谐振频率； T_s 为采样周期。相较于一般 Tustin 变换，即将原来系数 $2/T_s$ 改为 $\omega/\tan(\omega T_s/2)$ 的修正系数，确保控制器在高频段频率 ω 幅值特性相同。

将式(8)代入式(4)，得 z 域的准比例谐振控制器传递函数为：

$$G_{PR}(z) = \frac{m_0 + m_1 z^{-1} + m_2 z^{-2}}{1 + n_1 z^{-1} + n_2 z^{-2}} \quad (9)$$

其中，

$$\begin{aligned} m_0 &= \frac{2K\omega_c C}{C^2 + 2\omega_c C + \omega_0^2} + K_p, \\ m_1 &= \frac{(2\omega_0^2 - 2C^2)K_p}{C^2 + 2\omega_c C + \omega_0^2}, \\ m_2 &= \frac{K_p(C^2 - 2\omega_c C + \omega_0^2) - 2K\omega_c C}{C^2 + 2\omega_c C + \omega_0^2}, \\ n_1 &= \frac{2\omega_0^2 - 2C^2}{C^2 + 2\omega_c C + \omega_0^2}, \\ n_2 &= \frac{C^2 - 2\omega_c C + \omega_0^2}{C^2 + 2\omega_c C + \omega_0^2}, \\ C &= \frac{\omega_0}{\tan(\omega_0 T_s/2)}. \end{aligned}$$

对应的差分方程为:

$$y(k) = m_0 u(k) + m_1 u(k-1) + m_2 u(k-2) - n_1 y(k-1) - n_2 y(k-2) \quad (10)$$

式中: $y(k)$ 为比例谐振控制器的输出; $u(k)$ 为 PR 控制器的输入。

3 仿真研究

为验证并联型 APF 比例谐振优化控制方法的有效性,在 MATLAB/Simulink 平台上对其进行仿真实验研究。在仿真系统中,参数如下:电网线电压为 380 V 的三相电源,频率 50 Hz,开关频率为 10 kHz, R 为 2Ω ,负载电感为 1 mH, APF 的输出电感为 2 mH,并设置直流侧给定电压为 500 V,谐波源为三相不控型整流电路,其负载为阻感性元器件。

二极管不控整流 A 相负载电流波形与频谱图如图 5 所示。

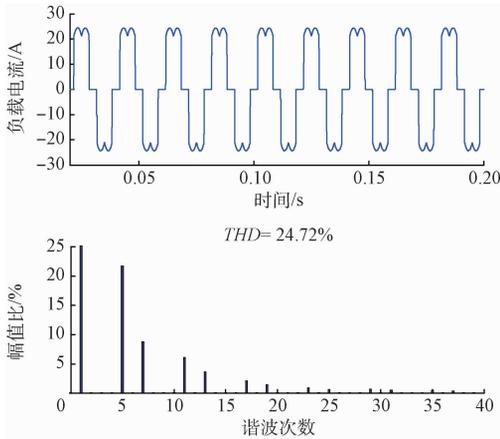


图 5 负载电流波形与频谱

图 6 为仅采用 PI 控制器对系统电流进行补偿后, A 相电网电流的波形与频谱,

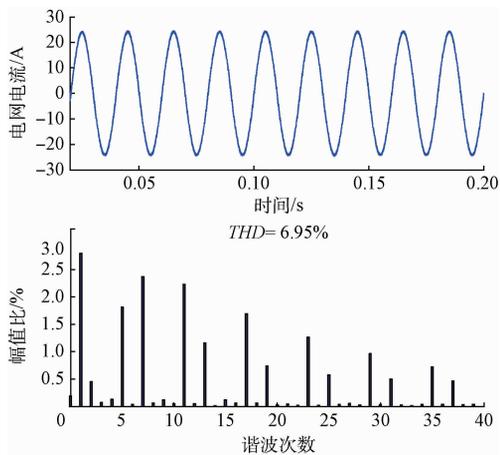


图 6 单独 PI 控制器时电网电流波形与频谱

由频谱分析显示采用 PI 控制器应用 APF 后电网电流谐波总畸变率从图 5 中的 24.72% 降为 6.95%。

图 7 为采用准比例谐振优化控制对系统电流补偿后,电网电流波形及其频谱,由频谱分析显示电流畸变率又降为 3.16%。

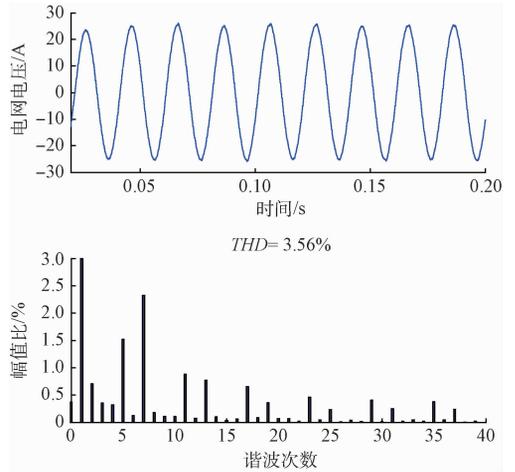


图 7 准比例谐振控制器时电网电流波形与频谱

结果表明,准比例谐振优化控制器降低了电网侧电流畸变率,因此该方法能够无静差地跟踪指定频率的交流信号,对特定频率的谐波能够有选择地补偿,改善了传统补偿的不足的问题。

为了得到所提控制策略的动态特性,在 0.1 s 时突加非线性负载,仿真波形如图 8 所示,由图可知,该电流控制策略可以极好地跟踪指令电流的突变,并迅速对突变电流

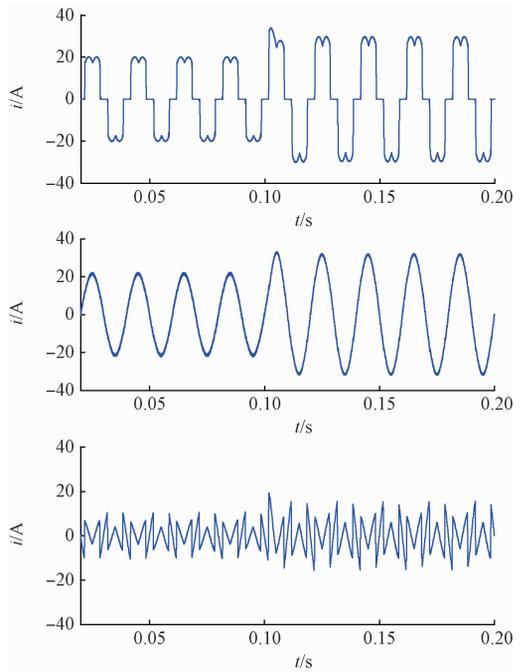


图 8 准比例谐振优化控制系统突加负载动态波形

进行处理。由仿真结果可知,所提优化控制策略较好的适应负载的波动。

4 结 论

本文在并联型 APF 数学模型的基础上,提出了一种基于无谐波检测方法,提高了最终检测到的谐波指令电流的精度。为了改进控制行为,使用优化的准比例谐振控制器而不是 PI 控制器,这种方法只会产生较小的电网电流的总谐波失真,除了将直流电压保持在参考电压,在负载突变的情况下,该控制策略能快速地响应指令的突变并进行补偿,提高了 APF 补偿效果和系统的可靠性。

参考文献

- [1] SINGH M, KHADKIKAR V, CHANDRA A, et al. Grid interconnection of renewable energy sources at the distribution level with power-quality improvement features[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(1): 307-315.
- [2] HE J W, LI Y W, SHIRAJUM M. A flexible harmonic control approach through voltage-controlled DG Grid interfacing converters [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(1): 444-455.
- [3] 王学华,阮新波,刘尚伟.抑制电网背景谐波影响的并网逆变器控制策略[J].中国电机工程学报,2011,31(6):7-14.
- [4] 魏学良,程婷.谐波治理设备在供电系统中的应用[J].国外电子测量技术,2015,34(3):73-76.
- [5] LUO Y, CHEN Z, CHEN M, et al. A Cascaded shunt active power filter with high performance for aircraft electric power system[C]. The 3rd IEEE Energy Congress and Exposition, Phoenix, AZ, USA, 2011:1143-1149.
- [6] 黄海宏,江念涛,毕楠夏,等.一种混合谐波检测法在 APF 中的应用[J].电子测量与仪器学报,2016,30(2):297-303.
- [7] 张宸宇,梅军,郑建勇,等.基于内置重复控制器改进无差拍的有源滤波器双滞环控制方法[J].电工技术学报,2015,30(22):125-132.
- [8] 马立新,吴兴锋,穆清伦.基于特征提取的有源电力滤波器故障诊断方法[J].电测与仪表,2015,52(15):124-128.
- [9] 张艳军,杨晟飞,张荣.一种无谐波检测的并联型电能质量调节器[J].电力电子技术,2015,49(1):85-87.
- [10] 黄媛,罗安,王逸超.一种无谐波检测的三相并网逆变器谐波灵活控制方法[J].电工技术学报,2016,31(24):213-222.
- [11] 杨德友,王博,蔡国伟.基于改进自适应局部迭代滤波的谐波检测方法研究[J].仪器仪表学报,2016,37(10):2274-2281.
- [12] 徐金榜,杨君,何悦嘉,等.基于快速傅里叶变换的 i_d - i_q 谐波检测算法[J].电力电子技术,2012,46(11):57-59.
- [13] HUANG ZH X, ZOU X D, LI F, et al. A Novel filter for harmonics and inter-harmonics analysis and suppression in ac electronic load [C]. ICPE 2011-ECCE Asia on Power Quality and Energy Saving Technology, 2011:770-777.
- [14] 郭攀锋,李欣.并联型有源滤波器无谐波电流检测的矢量控制[J].电气传动,2015,45(8):29-31.
- [15] 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.

作者简介

吴雷,1962 年出生,硕士,副教授,主要研究方向为电源技术与新能源。

E-mail:13003329155@126.com

夏世平(通信作者),1992 年出生,硕士研究生,主要研究方向为电源技术与电能质量。

E-mail:xiashiping1992@163.com