

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.09.019

矢量谐振控制器在并联有源滤波器中的应用*

黄鹄敏,张有兵*,谢路耀,盛知汇
(浙江工业大学 信息工程学院,浙江 杭州 310023)

摘要:针对并联有源滤波器(SAPF)补偿电流的控制问题,分析了比例积分(PI)控制器和矢量谐振(VR)控制器对SAPF补偿电流控制的优势和不足之处,提出了这两种控制器并联的电流控制策略,具体将PI控制器、VR控制器分别用于在同步旋转坐标系下无静差地调节基波电流分量和相应频率次的谐波电流分量,介绍了SAPF的数学模型及其特点,并基于零极点对消的方法,详细分析了PI控制器和VR控制器的电流闭环频率特性,论证了并联电流控制方法的可行性,并在Matlab/Simulink模块中搭建的SAPF仿真系统和SAPF实验样机中进行了应用验证。仿真和实验结果都表明,采用该方法的SAPF对主要次的谐波电流有良好的补偿效果。

关键词:并联有源滤波器;矢量谐振控制;PI控制;无静差控制

中图分类号:TM477

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)09-1130-05

Application of vector resonant controller on shunt active power filter

HUANG Juan-min, ZHANG You-bing, XIE Lu-yao, SHENG Zhi-hui

(College of Information and Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: Aiming at problems of shunt active power filter (SAPF) in controlling compensation current, the advantages and drawbacks of proportional integral (PI) controller and vector resonant (VR) controllers were investigated. Based on the above controllers, a improved control scheme was presented, in which fundamental of compensation current was regulated separately by PI controller without static error, and harmonics of compensation current was accurately regulated separately by different VR controllers. The mathematic model of SAPF and its characteristics in synchronous rotating coordinate system were introduced. The feasibility of the proposed scheme was evaluated by detailed analysis of the VR and PI controllers in current closed-loop, based on the pole-zero cancellation technique. The proposed scheme were tested on Matlab/Simulink platform and SAPF prototype. The results indicate that the APF has excellent compensation performance by using the proposed scheme.

Key words: shunt active power filter(SAPF); vector resonant controller; PI controller; static error control

0 引言

近年来,为了提高工业生产效率和产品质量,电弧炉、变频调速装置、晶闸管和二极管整流装置等非线性负载越来越多地投入使用,不可避免地给电网带来了电流谐波污染^[1]。作为一种治理谐波污染的新型电力电子装置^[2-4],并联有源滤波器(shunt active power

filter, SAPF)正逐渐得到应用。

SAPF治理谐波电流污染的主要原理是通过向电网注入与负载谐波电流大小一致但相位相反的补偿谐波电流^[5],从而降低电网电流畸变率以达到国家规定标准,因此SAPF的电流控制显得尤为重要。常用的PI(Proportional Integral, PI)控制器^[6-8]虽然动态响应快、可无静差控制在同步旋转坐标系下基波电流转换的直流电流^[9-10],但控制带宽有限,对有丰富谐波成分

收稿日期:2015-04-05

基金项目:浙江省自然科学基金资助项目(LY16E070005, LQ14E070001)

作者简介:黄鹄敏(1990-),男,江西赣州人,硕士研究生,主要从事电能品质优化方面的研究。E-mail:hjuanmin@163.com

通信联系人:张有兵,男,教授,博士生导师。E-mail:youbingzhang@zjut.edu.cn

的 SAPF 补偿电流的控制效果并不理想。矢量谐振 (Vector Resonant, VR) 控制器^[11-13]对谐波电流有较高的增益,并在谐波频率点有单位幅频特性和零相位偏移,能够实现对特定次谐波电流的无静差调节,但其在频率 0 附近增益小而对直流电流的控制精度较差^[14]。

由于 SAPF 的补偿电流包括基波电流和谐波电流,为提高对补偿电流的控制性能,本研究采用 PI 控制和 VR 控制器并联的方法,在同步旋转坐标系下,对补偿电流中的基波电流和谐波电流同时实现无静差控制。

1 SAPF 系统模型介绍

三相三线制 SAPF 控制系统的控制结构图如图 1 所示。

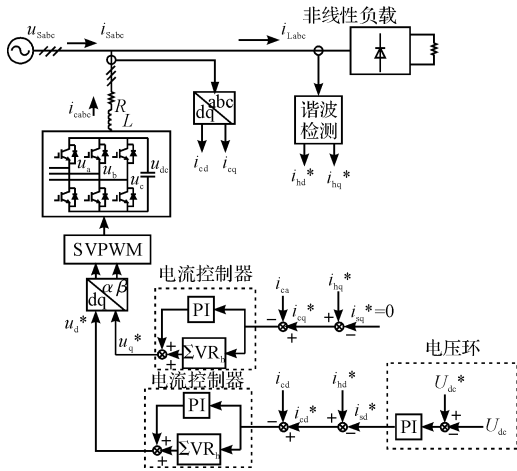


图 1 SAPF 控制系统的结构图

u_{Sabc} —电网电压; i_{Sabc} —电网电流; L, R —

SAPF 输出侧交流电感及其等效电阻

SAPF 采用电压型逆变器。图中,非线性负载仅考虑三相对称不控整流桥负载,其含谐波电流的次数可用 $h = 6n \pm 1$ ($n = 1, 2, 3, \dots$) 表示,“+”、“-”分别对应正、负序谐波电流。

图 1 所示的 SAPF 控制系统中,谐波检测环节提取负载电流 i_{Labc} 中的谐波电流 $i_{hd}^* (i_{hq}^*)$,电压环输出补偿 SAPF 功率损耗的基波电流 i_{sd}^* (不补偿无功时, $i_{sq}^* = 0$),两者之差作为有源滤波器实际注入电网的补偿电流 i_{cd} (i_{cq}) 的参考值 $i_{cd}^* (i_{cq}^*)$,电流控制器实现实际补偿电流对该参考值的跟踪。

忽略电网的线路电阻和线路电感的影响,SAPF 系统在同步旋转坐标系的电流方程可表示如下:

$$\begin{cases} L \frac{di_{cd}}{dt} + Ri_{cd} = u_d + \omega_s Li_{cq} - u_{sd} \\ L \frac{di_{cq}}{dt} + Ri_{cq} = u_q - \omega_s Li_{cd} - u_{sq} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $i_{cd}, i_{cq}, u_d, u_q, u_{sd}, u_{sq}$ —补偿电流、SAPF 输出电压以及电网电压在 $d-q$ 轴的分量; ω_s —电网电压的角频率。

为了便于分析,本研究把同步旋转坐标系的变量统一用同步旋转空间的矢量表示^[15], $i_{cqd} = i_{cq} - ji_{cd}$, $u_{qd} = u_q - ju_d$ 和 $u_{sqd} = u_{sq} - ju_{sd}$,则式(1)可变换为如下形式:

$$L \frac{di_{cqd}}{dt} + Ri_{cqd} + j\omega_s Li_{cqd} = u_{qd} - u_{sqd} \quad (2)$$

对式(2)进行拉普拉斯变换,得到 APF 在同步旋转坐标系下的 s 域模型,经过化简得到 SAPF 控制对象的传递函数 $P(s)$ 如下:

$$P(s) = \frac{i_{cqd}}{u_{qd} - u_{sqd}} = \frac{1}{Ls + R + j\omega_s L} \quad (3)$$

由式(3)可知, $P(s)$ 为典型的一阶惯性环节,在 $-R/L - j\omega_s$ 处有一个极点。若不抵消这个极点,系统的电流控制会有一定的相位延时。

2 电流控制器的特性分析

2.1 PI 控制器

在同步旋转坐标系下,基波电流变为直流信号,采用传统的 PI 控制器即可实现精确控制,但被控对象有一个耦合项 $j\omega_s L$,会导致在 d 轴和 q 轴的电流有耦合干扰。因此,本研究在传统 PI 控制器中加入一个耦合项 $j\omega_s K_p$ 抵消被控对象的 $j\omega_s L$,实现基波电流解耦控制^[16]。传统 PI 控制器加入耦合项 $j\omega_s K_p$ 后,其传递函数可表示如下:

$$G_{PI}(s) = K_p + (j\omega_s K_p + K_i) \frac{1}{s} \quad (4)$$

此外,式(2)中的电网电压矢量,可采用电压前馈控制来抵消,得到的采用 PI 控制器的电流控制结构框图如图 2 所示。

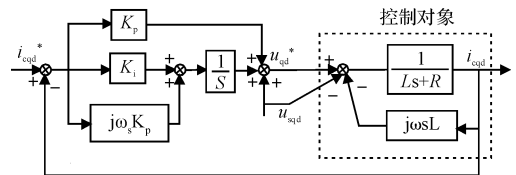


图 2 采用 PI 控制器的电流控制结构框图

i_{cqd}^* —补偿谐波参考电流在同步旋转空间

的矢量, $i_{cqd}^* = i_{cq}^* - ji_{cd}^*$

图 2 所示的电流闭环传递函数可表示如下:

$$\Phi_{VR} = \frac{K_p s + K_i + j\omega_s K_p}{Ls^2 + (K_p + R + j\omega_s L)s + K_i + j\omega_s K_p} \quad (5)$$

为提高对低频信号的增益,补偿相位延时,令 $K_p/K_i = L/R$,使式(5)分子在 $-K_i/K_p - j\omega_s$ 处的零点

开关频率 10 kHz,负载为三相对称不可控整流桥接 20 Ω 电阻。

为验证 VR 控制器对谐波电流的选择性控制,仿真内容包括在同步旋转坐标系下采用 VR₆ 控制器的 SAPF,仅补偿 5、7 次谐波电流;采用 VR₆、VR₁₂、VR₁₈、VR₂₄控制器的 SAPF,补偿主要的 5、7、11、13、17、19、23、25 次谐波电流。

PI 控制器的参数设为: $K_p=5$, $K_i=500$ 。VR 控制器的参数分别为: $K_{p6}=0.8$, $K_{i6}=80$, $K_{p12}=0.6$, $K_{i12}=60$, $K_{p18}=0.3$, $K_{i18}=30$, $K_{p24}=0.1$, $K_{i24}=10$ 。

补偿前电网 a 相电流及其频谱如图 6 所示。

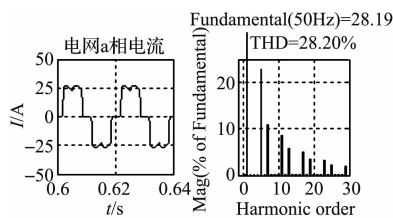


图 6 补偿前电网 a 相电流及其频谱

补偿 5、7 次谐波后电网 a 相电流及其频谱如图 7 所示。

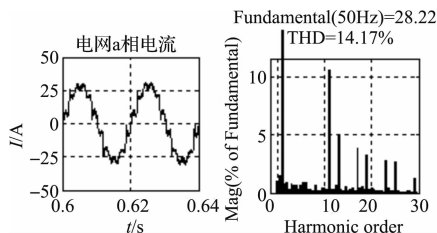


图 7 补偿 5、7 次谐波后电网 a 相电流及其频谱

补偿主要次谐波后电网 a 相电流及其频谱如图 8 所示。

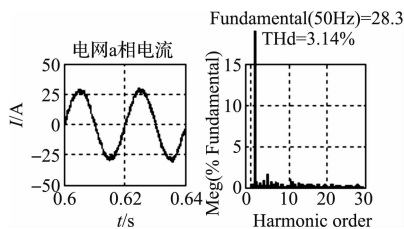


图 8 补偿主要次谐波后电网 a 相电流及其频谱

由图 6 可知,补偿前电网 a 相电流发生了畸变,其 5、7、11、13、17、19、23、25 次谐波电流畸变率都大于 2%,其总畸变率达 28.20%。而在图 7 中,采用 VR₆ 控制器,SAPF 只对电网电流的 5 次、7 次谐波电流补偿后,电网 a 相电流的 5 次畸变率从 22.59% 降低至 1.58%,7 次谐波电流从 10.85% 降低至 1.3%,而其他次谐波电流的畸变率没变,总畸变率降到 14.17%。在图 8 中,采用 4 个 VR 控制器,SAPF 对主要的 5、7、

11、13、17、19、23、25 次谐波电流都补偿后,电网 a 相的这些主要次谐波畸变率都降低到 2% 以内,总畸变率降到 3.14%。

上述仿真结果表明:针对三相对称的非线性负载,采用 VR 控制器,SAPF 能对指定次谐波选择性的补偿,并且取得较高的稳态补偿精度。若采用多个 VR 控制器,SAPF 可以同时有选择性的降低各主要次谐波的畸变率,从而降低电网电流的总畸变率。

4 实验结果

为了进一步验证所提控制策略的有效性,笔者根据图 1 所示的控制框图,研制了一台三相三线的并联 SAPF 实验样机。控制系统由 DSP、可编程逻辑器件 CPLD 芯片构成:浮点 DSP 芯片 TMS320F28335 完成信号采集、谐波检测和控制算法、矢量脉宽调制(SVPWM)、控制信号输出以及过载保护等功能;CPLD 芯片 XC95288XL 实现逻辑运算功能。主电路功率器件选用 IGBT 模块 PM50RL1B120。

实验平台参数与上一节的仿真参数一致。其提供谐波的非线性负载为直流侧接纯电阻的三相不可控整流器,其中整流器型号为 MDS100 A,而纯电阻的功率 20 kW,采用 4 个 5 kW 的电炉串并联得到。

只补偿 5、7 次谐波的实验结果如图 9 所示。

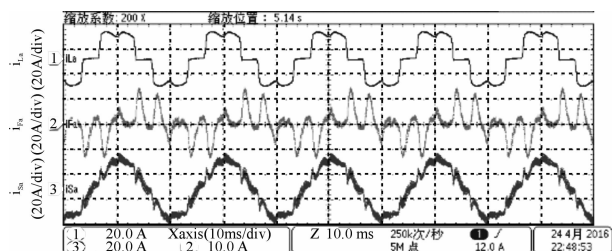


图 9 只补偿 5、7 次谐波的实验结果

补偿主要次谐波的实验结果如图 10 所示。

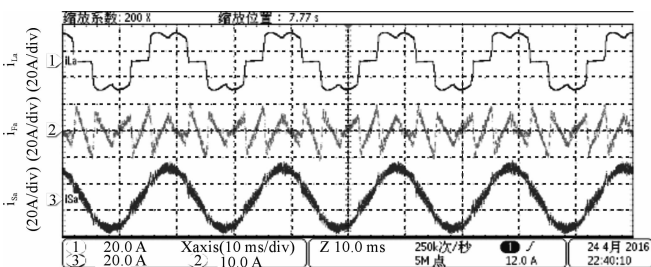


图 10 补偿主要次谐波的实验结果

在图 9 和图 10 中, i_{La} 、 i_{Fa} 、 i_{Sa} 分别代表 a 相负载电流、a 相补偿电流和 a 相电网电流。考虑到三相三线的有源滤波器应用于三相三线系统中,本研究仅以 a 相负载电流、补偿电流、电网电流的波形变化说明

SAPF 的实验效果。

图 9 中,在同步旋转坐标系下,只采用在 ± 6 倍基波角频率的发生谐振的单个 VR 控制器,SAPF 只补偿 5、7 次谐波电流,电网电流得到了改善,但仍有较严重的畸变。而图 10 中,在同步旋转坐标系下,采用在 ± 6 、 ± 12 、 ± 18 、 ± 24 倍基波角频率的发生谐振的多个 VR 控制器,SAPF 选择补偿主要的 5、7、11、13、17、19、23、25 次谐波电流后,电网电流有了明显改善,其波形变得更平滑,更接近余弦波。

上述实验结果表明:与仿真结果一致,针对三相对称的非线性负载,在同步旋转坐标系下,有 PI 控制器精确地调节基波电流,SAPF 能够根据补偿谐波的需求,灵活地选择 VR 控制器的个数和种类,可选择性地针对特定正、负序频率次的谐波高精度补偿,也可以同时对主要次谐波高精度补偿,降低电网电流的总畸变率。

5 结束语

本研究在分析 PI 和 VR 控制器对 SAPF 补偿电流控制的优缺点的基础上,提出将这两者结合,可以取长补短,提高补偿电流的稳态控制精度。PI 和 VR 控制器并联控制 SAPF 电流的方法,通过分析 PI 和 VR 控制器的电流闭环频率特性,被证明是可行的,并在 Matlab/Simulink 搭建的 SAP 仿真系统和 SAPF 实验样机中得到了验证。

仿真和实验结果表明,在同步旋转坐标系下,采用本研究提出的方法,SAPF 不仅能对指定次谐波电流进行准确补偿,也能同时对多个主要次谐波电流实现精确补偿,从而在整体上改善电网电流的畸变率,提高电网的供电质量。

参考文献 (References):

- [1] 肖湘宁,徐永海. 电能质量问题剖析[J]. 电网技术,2001,25(3):66-69.
- [2] 周 贺,王玲玲,陈辉明,等. 高频混合型有源电力滤波器的研究[J]. 机电工程,2015,32(4):549-552.
- [3] 倪建洵,许明夏,张涛等. 有源电力滤波器重复控制的实验研究[J]. 机电工程,2013,30(9):1118-1122.
- [4] 张 若,史晨虹,王志良,等. 基于瞬时无功功率理论的 APF 研究[J]. 机电工程技术,2014,43(7):69-72.
- [5] AKAGI H. Active harmonic filters[J]. **Proceedings of the IEEE**,2005,93(12):2128-2141.

- [6] BUSO S, MALESANI L, MATTAVELLI P. Comparison of current control techniques for active filter applications[J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**,1998,45(5):722-729.
- [7] RIM C T, CHOI N S, CHO G C, et al. A complete DC and AC analysis of three-phase controlled-current PWM rectifier using circuit DQ transformation[J]. **IEEE Transactions on Power Electronics**,1994,9(4):390-396.
- [8] KAZMIERKOWSKI M P, MALESANI L. Current control techniques for three-phase voltage-source PWM converters: a survey[J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**,1998,45(5):691-703.
- [9] 乔鸣忠,夏益辉,梁京辉,等. 基于重复-PI 的复合控制应用于并联有源滤波器研究[J]. 电力系统保护与控制,2013,9(14):54-59.
- [10] YUAN X, MERK W, STEMMLER H, et al. Stationary-frame generalized integrators for current control of active power filters with zero steady-state error for current harmonics of concern under unbalanced and distorted operating conditions[J]. **IEEE Transactions on Industry Applications**,2002,38(2):523-532.
- [11] 徐海亮,廖自力,贺益康. 比例-谐振控制在 PWM 变换器应用中的几个要点[J]. 电力系统自动化,2015,8(18):151-159.
- [12] 年 珩,宋亦鹏. 谐波电网下基于矢量比例积分电流调节器的双馈异步发电机运行控制技术[J]. 中国电机工程学报,2013,33(6):101-111.
- [13] LASCU C, ASIMINOAEI L, BOLDEA I, et al. High Performance Current Controller for Selective Harmonic Compensation in Active Power Filters[J]. **IEEE Transactions on Power Electronics**,2007,22(5):1826-1835.
- [14] 易 皓,卓 放,翟 灏. 基于矢量谐振调节器的有源电力滤波器网侧电流检测控制方法研究[J]. 电工技术学报,2015,30(7):72-79.
- [15] YI H, ZHOU F, ZHANG Y, et al. A source-current-detected shunt active power filter control scheme based on vector resonant controller[J]. **IEEE Transactions on Industry Applications**,2014,50(3):1953-1965.
- [16] BOJOI R, LIMONGI L R, ROIU D, et al. Frequency-domain analysis of resonant current controllers for active power conditioners[C]// **Industrial Electronics**, 2008. IECON 2008. 34th Annual Conference of IEEE. New York, IEEE,2008:3141-3148.
- [17] YEPES A G, FREIJEDO F D, LOPEZ O, et al. High-Performance Digital Resonant Controllers Implemented With Two Integrators[J]. **IEEE Transactions on Power Electronics**,2011,26(2):563-576.

[编辑:张 豪]

本文引用格式:

黄鹄敏,张有兵,谢路耀,等. 矢量谐振控制器在并联有源滤波器中的应用[J]. 机电工程,2016,33(9):1130-1134.

HUANG Juan-min, ZHANG You-bing, XIE Lu-yao, et al. Application of vector resonant controller on shunt active power filter[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2016,33(9):1130-1134.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>