

有源电力滤波器重复控制的实验研究

倪建洵, 许明夏, 张 涛, 林 平*

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要:为解决有源电力滤波器(APF)采用传统比例控制算法时补偿精度不够高的问题,将比例控制与重复控制相结合的方法应用到有源电力滤波器电流跟踪控制环路中。开展了重复控制环路的参数设计,分析了重复控制环路的稳态精度及动态响应速度,并在 15 kVA 三相四线制并联型有源电力滤波器装置上进行了实验验证;在满足系统稳定的前提下,分别选取不同的重复控制环路参数实验,指出了最适合该装置工程应用的最优参数。实验结果证明,采用比例控制与重复控制组合的方法能够在保障系统动态性能的同时有效地消除稳态误差。

关键词:电能质量;有源电力滤波器;比例控制器;重复控制

中图分类号:TM477

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2013)09-1118-05

Application of repetitive control for APF

NI Jian-xun, XU Ming-xia, ZHANG Tao, LIN Ping

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at improving the compensation accuracy of the 15 kVA active power filter(ADF), the combination of proportional control and repetitive control were applied in the APF. The stability and design of parameter with the control method in APF system were analyzed, and the steady-state error and transient response were also analyzed. The theory was verified by experiment in a 15 kVA three-phase four-wire shunt APF. The performance was investigated under different repetitive control loop parameters, while the system was stable. The results indicate that the control method can effectively eliminate the steady state error without reducing the system dynamic performance.

Key words: power quality; active power filter(APF); proportional controller; repetitive control

0 引 言

随着现代工业的发展,非线性负载也随之增多,电网的谐波污染问题更加严重^[1]。有源电力滤波器(APF)作为一种良好的谐波污染治理工具,正逐渐得到广泛应用^[2]。

电流跟踪控制环路的性能对有源电力滤波器的补偿效果极为关键,常用的 PI 控制可以无静差地跟踪直流信号,而跟踪交流信号的时候会存在稳态误差。在 APF 的实际工程应用中,指令为富含多种频率成份的信号,若采用传统的 PI 控制器,会存在稳态误差,影响补偿的效果。

采用谐振控制器^[3]可以实现正弦信号的无静差跟踪,但若在 APF 中采用多个谐振控制器又会影响动态速度。T Inoue^[4]于 1981 年提出基于内模原理的重复控制算法,其基本思想是将前一个周期的误差量贮存起来,叠加到当前周期,如此周期性地累加可以逐步减小误差,最终使得系统实现无静差地跟踪输入信号。重复控制环可以高效地跟踪谐波指令信号,有利于提高有源电力滤波器的性能。

本研究结合三相四线制有源电力滤波器,分析重复控制环的参数设计,环路的稳态精度及动态响应速度,并在 15 kVA 装置上进行相关实验。

收稿日期:2013-02-18

作者简介:倪建洵(1987-),男,江苏泰州人,主要从事电能质量相关方面的研究. E-mail:njx@zju.edu.cn

通信联系人:林 平,男,副教授,硕士生导师. E-mail:linping@zju.edu.cn

1 三相四线制并联有源电力滤波器

三相四线制并联型有源电力滤波器主电路结构图如图 1 所示。电压源逆变器通过电感滤波后连接到电网,负载为三相不控整流。

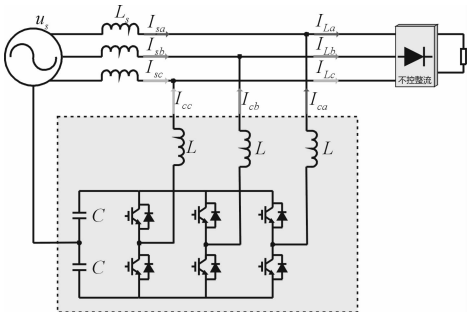


图 1 有源电力滤波器结构示意图

u_s —电网电压; L_s —电网等效电感; L —APF 输出滤波电感; C —直流母线电容

采用比例控制的有源电力滤波器电流控制环如图 2 所示。

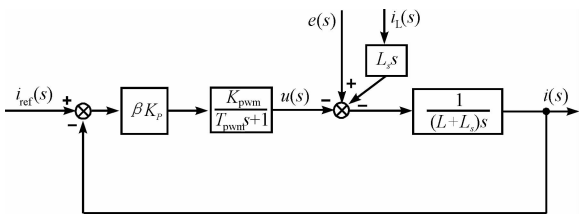


图 2 有源电力滤波器控制环

$i(s)$ —APF 输出电流; $i_{ref}(s)$ —指令电流; β —电流采样变比; K_p —开环增益; T_{pwm} —PWM 信号的延时; K_{pwm} —输出电压相对于载波信号的比率

假定 $e(s)$ 只包含基波分量,且 $i_L(s)$ 中谐波分量与 $i_{ref}(s)$ 中的谐波分量相同。则可以得到系统的开环传递函数为:

$$G(s) = \frac{\beta K_p K_{PWM}}{(T_{PWM}s + 1)(L + L_s)s}$$

(1)

开环幅频特性如图 3 所示,可见传统比例控制在 1 kHz ~ 2 kHz 处增益有限,影响系统的补偿效果,如提高比例控制器的增益,又会降低系统的相位裕度引起

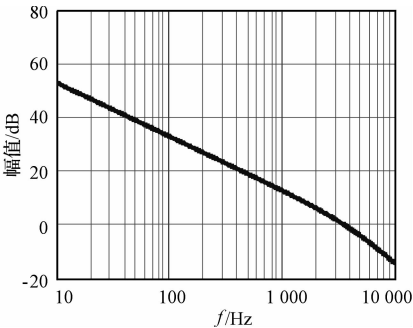


图 3 传统比例控制开环幅频特性

系统的不稳定。

2 重复控制环参数设计

重复控制器是基于内模原理提出的控制方案^[5]。基本思想是通过在控制器中嵌入一个基波周期的延时环节,对误差信号周期性累加,从而减小系统的静态误差。

基于重复控制器的 APF 控制框图如图 4 所示。

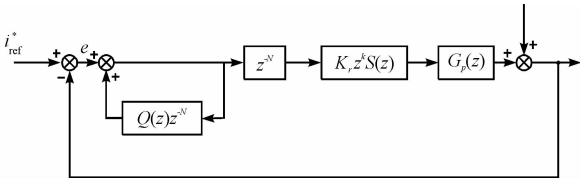


图 4 重复控制环

N —基波周期采样点数; K_r —增益系数; $Q(z), S(z)$ —辅助补偿器; $G_p(z)$ —受控对象模型; z^k —超前补偿环节; k —超前拍数; i_{ref}^* —指令电流

由于重复控制器的开环增益为无穷大,会影响到系统的稳定性。为了保证系统的稳定,一般情况下 $Q(z), K_r$ 取小于 1 的常数。补偿器 $C(z)$ 设计为 $z^k S(z)$, $S(z)$ 是一个低通滤波器,用来滤除高频分量。 $S(z)$ 的设计主要取决于被控对象 $G_p(z)$ 的特性,综合环路控制环路的特性,补偿器应该调整中低频段的增益使其接近于 1,同时抑制高频段的峰值,提高稳定性。 $S(z)$ 通常选择二阶低通滤波器,其 s 域传递函数为:

$$S(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$$

(2)

根据在 APF 应用中其补偿的谐波范围主要集中在 2 kHz 以内, $S(z)$ 转折频率设计为 2.7 kHz,阻尼比为 0.62。

控制系统的开环相频特性如图 5(粗实线)所示,由图 5 可知控制系统的相角滞后在 2 kHz 以下的中低频带最接近于 z^{-5} 环节,补偿器 $C(z)$ 中取参数 $k = 5$,即可保证控制系统输出与输入信号无相角偏差。根据

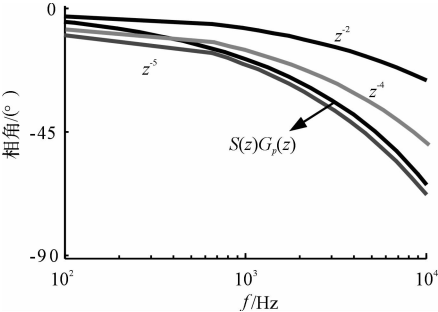


图 5 相频特性

上述分析,稳定补偿器 $C(z)$ 为 $z^5S(z)$,代入控制系统中,根据小增益原理^[6-10],可得系统的稳定性条件为:

$$|K_r S(j\omega) G_p(j\omega) e^{-kj\omega T_s} - Q(j\omega)| < 1 \quad (3)$$

函数 $K_r S(j\omega) G_p(j\omega) e^{-kj\omega T_s} - Q(j\omega)$ 的末端轨迹如图 6 所示,处在单位圆内,可知系统选取当前参数时,可以维持稳定。

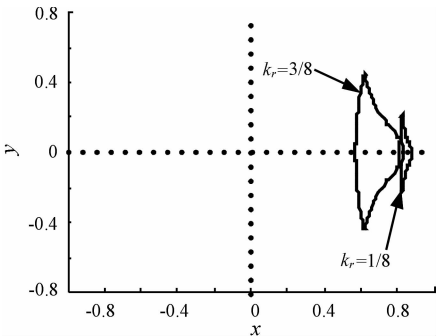


图 6 P+重复控制特征表达式轨迹

重复控制虽然可以精确地跟踪周期性指令信号,但是其缺陷也比较明显,即为动态响应速度慢。而采用比例控制方法,虽然指令跟踪的精度不高,却可以保证动态响应的速度。可以考虑采用比例控制与重复控制结合的控制方法,应用到有源电力滤波器中,系统的控制框图如图 7 所示。

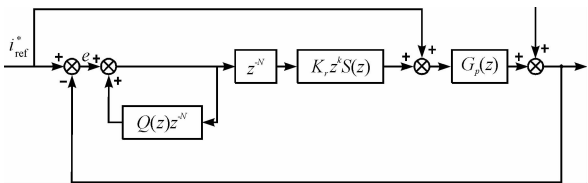


图 7 P+重复控制框图

系统稳态工作时,主要由重复控制保证稳态精度,当负载突变时,由于重复控制的延时,主要由比例控制保证系统的动态响应速度,其开环幅频特性如图 8 所示。

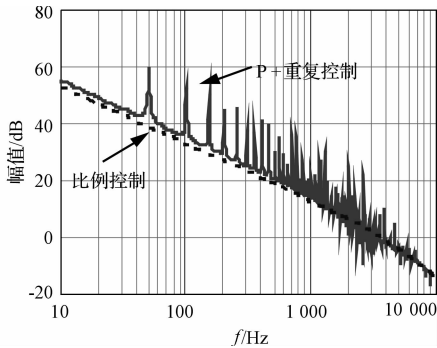


图 8 P+重复控制幅频特性图

如图 8 所示,采用比例控制与重复控制组合方法,与传统比例控制器相比,在特定频率处有更高的增益,且通过补偿器的设计,保证了控制环路高频段的衰减。

3 实验分析

本研究建立了一个 15 kVA 的三相四线制并联型有源电力滤波器装置。系统结构如图 1 所示,负载为三相不控整流,功率变化范围为 10 kW~40 kW,系统参数如表 1 所示。

表 1 APF 系统参数

参数	描述	值
S/kVA	容量	15
e/V (RMS)	电网电压	220
f_s/kHz	开关频率	15
L_s/mH	电网感抗	0.05
C/μF	直流侧电容	3 300
U _{DC} /V	直流侧电压	780
L/mH	输出电感	0.8

为了验证重复控制器可以无静差跟踪输入信号特性,假定系统指令信号为 150 Hz 正弦波,采用重复控制组合算法时,系统电流跟踪控制的波形如图 9 所示。由图 9 可知,输出电流能够很好地跟踪指令电流。

当指令电流为 150 Hz 正弦波,且有效值为 11.5 A,重复控制环路,选取不同参数时输出电流的情况如图 10 所示。由图 10 可见重复控制比传统比例控制有更高的跟踪精度,且随着 Q 的增加,会有更好的跟踪精度。而采用不同 K_r 时,并无明显差别。

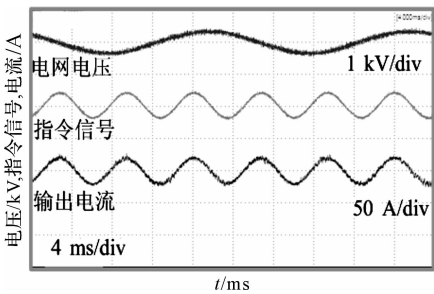


图 9 3 次谐波电流跟踪

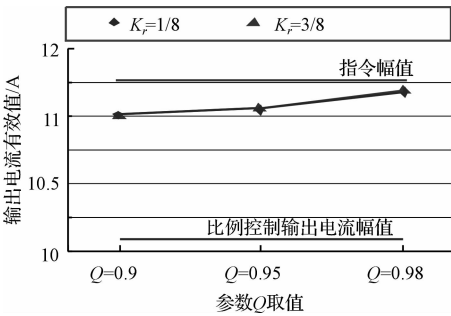


图 10 三次谐波电流跟踪

APF 系统负载为不控整流负载,采用不同控制方法时系统的稳态实验波形如图 11 所示,考虑到跟踪精度与系统的稳定裕量,其中重复控制环的参数为 $K_r =$

3/8, $Q=0.9$ 。

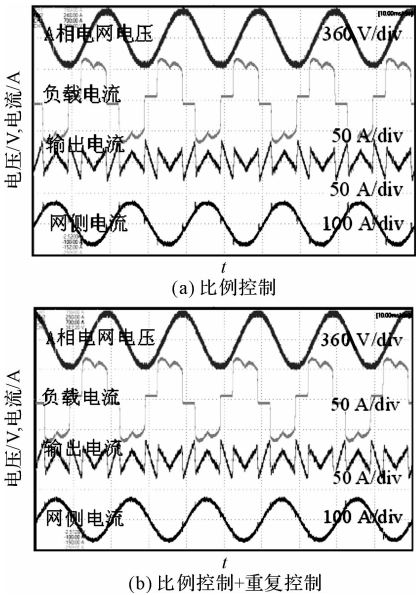


图 11 稳态实验波形

三相不控整流负载功率为 40 kW 时,有源电力滤波器输出电流、网侧电流、负载电流及网侧电压波形如图 11 所示,可见采用比例控制与重复控制结合的方法,网侧电流的波形更为光滑,尖刺明显减小。采用比例控制算法的时候,网侧电流的 THD 为 4.6%。而采用比例控制器加重重复控制器的時候,网侧电流的 THD 下降到 2.9%。

采用两种控制算法时网侧电流的频谱分析图如图 12 所示,可见加入重复控制算法之后,网侧电流各次谐波的含量与传统比例控制相比都有了显著的下降,负载功率变化时,网侧电流畸变率的情况如图 13 所示,当负载功率从 10 kW ~ 40 kW 逐渐增加时,采用重复控制时网侧电流 THD 更小。

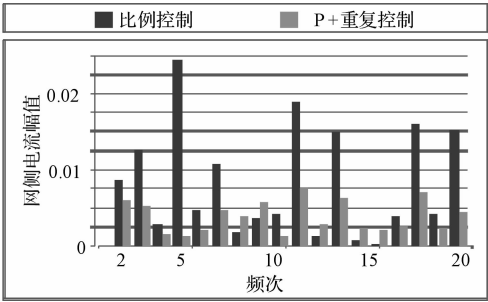


图 12 频谱分布(40 kW 负载)

如果单一采用重复控制,则系统至少需要一个周期的延时,才能响应指令电流的变化,而实际实验中可以采用重复控制和比例控制相结合的复合控制,除了满足跟踪精度要求外,可以满足快速地跟踪指令信号的动态要求,3 次谐波动态响应如图 14 所示。应用到

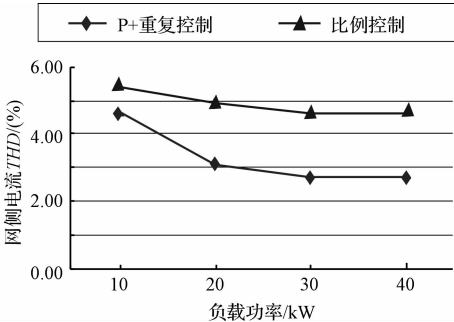


图 13 不同负载 THD

有源电力滤波器中,负载为 40 kW 三相不控整流时,输出电流的动态响应如图 15 所示,可见采用这种方法后,既可获得快速的动态响应,又可提高系统的补偿性能。

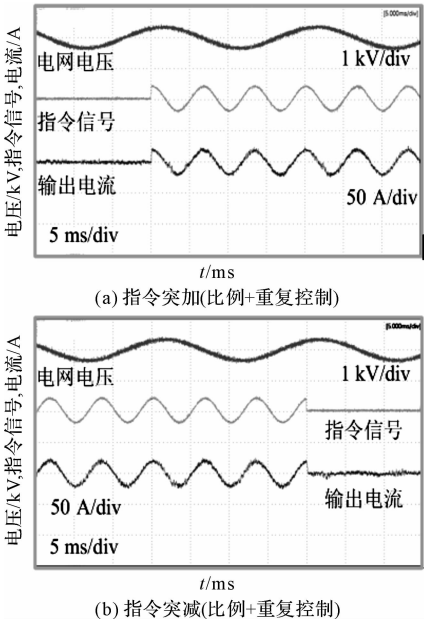


图 14 三次谐波动态响应

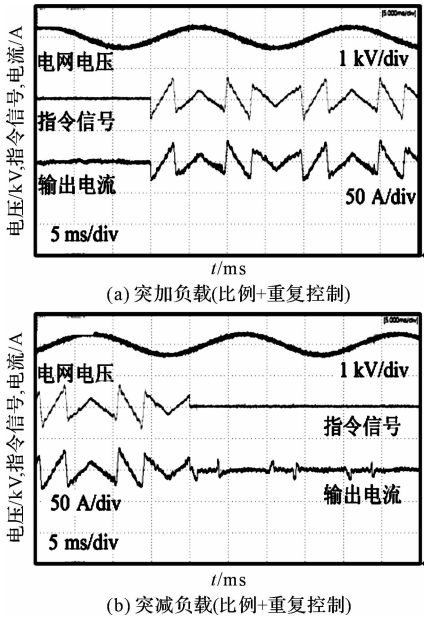


图 15 带不控整流负载动态响应波形

4 结束语

本研究探讨了重复控制方法中的参数设计,通过在有源电力滤波器装置的实际应用中进行实验,比较了采用单一比例控制和比例与重复控制相结合的控制方法在 APF 系统中的应用,验证了在 15 kVA 有源电力滤波器工程应用中的最优参数。实验结果表明通过将该控制方法和比例控制相结合,能够在保障系统动态特性的同时有效地消除稳态误差,可以有效提高有源电力滤波器的补偿效果。

参考文献 (References):

- [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,1998.
- [2] 陈国柱,吕征宇. 有源电力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.
- [3] 李建林,张仲超. 有源电力滤波器控制策略综述[J]. 电力建设,2003,24(6):44-49.
- [4] INOUE T, NAKANO M, IWAI S. High accuracy control of

servomechanism for repeated contouring [C]//10th Annual Symp. on Incremental Motion Control Systems and Devices, 1981:285-292.

- [5] 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.
- [6] ESCOBAR G, VALDEZ A A, LEYVA-RAMOS J, et al. Repetitive-based controller for a UPS inverter to compensate unbalance and harmonic distortion [J]. **Industrial Electronics, IEEE Transactions**,2007,54(1):504-510.
- [7] 周 导. 提高并联有源电力滤波器补偿精度的研究[D]. 杭州:浙江大学电气工程学院,2010.
- [8] 徐德鸿. 电力电子系统建模及控制[M]. 北京:机械工业出版社,2006.
- [9] XU M X, XU D, LIN P, et al. Understanding repetitive control and resonant control [C]//Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), 2012 3rd IEEE International Symposium on,2012:621-627.
- [10] 许明夏,林 平,张 涛,等. 有源电力滤波器重复控制方法的设计[J],电源学报,2012(2):16-20.

[编辑:李 辉]

(上接第 1112 页)

(3)中帮及后帮重叠结帮,中帮与后帮结帮衔接平顺,动作一次成型;

(4)编码器控制中帮结帮,中帮鞋胶轨迹控制及指头扫入更加精确;

(5)实现触控式屏幕人机界面,整合于屏幕的人性化操控装置,操作维护方便;

(6)实现计算机化动作电路控制,PLC 动作变化灵活多样且控制精确,故障检修容易;

(7)完成智能型自动侦错功能,对可能故障点及时提供警示,检修方便快捷;

(8)整体涂胶结帮效率比原有机器提高 8 ~ 10 倍,每小时完成 800 ~ 1 000 只。

4 结束语

本研究设计了一种制鞋装备中智能化全自动涂胶的技术方案。该方案克服了原来前帮机喷胶、上胶时,针对不同鞋型手动调整涂胶分段轨迹、涂胶不均匀、有毒胶液长期暴露在空气中致使安全性差的不足。该系统使制鞋装备中的涂胶工艺具有极强的灵活性和适应性。通过该技术能够对涂胶轨迹实时采集、实时调整,三轴插补的伺服系统使上胶位置更加精确。其加工后的鞋帮既有手工涂胶精准、均匀的优点,又能达到机械生产的高劳动强度、高生产效率的标准。

参考文献 (References):

- [1] 李龙根,张海鹰,舒雨锋. 涂胶运动控制机构:中国,ZL 2012 2 0316830.1 [P]. 2013-02-13.
- [2] 张 彬. CDX2 型包装机组涂胶工艺结构改进[J]. 包装与食品机械,2011(1):63-66.
- [3] 舒雨锋,张海鹰,李龙根. 双边涂胶运动控制机构:中国,ZL 2012 2 0316829.9 [P]. 2013-02-13.
- [4] 雷李辉,朱晓明,席文明. 基于视觉的微马达转子引线自动化装配研究[J]. 机电工程,2011,28(6):671-674.
- [5] 韩九强. 机器视觉技术及应用[M]. 北京:高等教育出版社,2009.
- [6] 马颂德,张正友. 计算机视觉计算理论与算法基础[M]. 北京:科学出版社,2000.
- [7] [美]桑 卡,[美]赫拉瓦卡,[美]博伊尔. 图像处理、分析与机器视觉[M]. 3 版. 艾海舟,译. 北京:清华大学出版社,2011.
- [8] 张国素,付 冬,郑 广. 基于图像处理的运动目标跟踪系统[J]. 河北省科学院学报,2005,22(Z1):179-181.
- [9] 朱映远,倪风雷,史士财,等. 基于手眼视觉的空间末端操作器的轨迹规划[J]. 机电工程,2012,29(7):759-764.
- [10] 王 璐,崔益安,苏 虹. 移动机器人的运动目标实时检测与跟踪[J]. 计算机工程与应用,2005(15):30-34.
- [11] 胡志军,戴 敏,张 磊,等. 一种视觉引导助老服务机器人的总体设计[J]. 机电工程,2009,26(4):1-4.

[编辑:洪炜娜]