

# 重复—模糊 PI 控制的三电平有源电力滤波器

孟超<sup>1</sup>, 杨昊<sup>2</sup>

(1. 西安工程大学 学报编辑部, 西安 710048; 2. 西安工程大学 电子信息学院, 西安 710048)

**摘要:** 三电平有源电力滤波器 (APF, active power filter) 系统在负载不同的情况下, 谐波补偿性能的稳定性较差, 通过分析三电平 APF 的基本工作原理, 给出了一种重复—模糊 PI 控制方法; 该方法通过瞬时无功功率理论的谐波检测将负载电流中的基波电流分离, 然后利用重复—模糊 PI 控制器控制基波电流与负载电流的误差信号; 采用 MATLAB/Simulink 进行仿真分析, 发现相比于重复控制和模糊 PI 控制方法, 重复—模糊 PI 控制的三电平 APF 结构在不同频点的跟踪稳定性得到了提升, 降低了入网谐波含量, 即总谐波失真 (THD, total harmonic distortion); 该方法可应用在工商业负载场合, 弥补了模糊 PI 控制和重复控制单独使用时系统性能受负载变化影响的缺点, 提高了其鲁棒性。

**关键词:** 模糊控制; PI 控制器; 有源电力滤波器; 谐波; 瞬时无功功率

## Three Level Active Power Filter Based on Repetitive Fuzzy PI Control

MENG Chao<sup>1</sup>, YANG Hao<sup>2</sup>

(1. Editorial Department of Journal, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China;

2. School of Electronics and Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** Three level active power filter The stability of harmonic compensation performance of active power filter (APF) system is poor under different loads. By analyzing the basic working principle of three-level APF, a repetitive fuzzy PI control method is given. The composite control method adopted the harmonic detection method of instantaneous reactive power theory to separate the fundamental current in the load current, and then controlled by repetitive fuzzy PI controller error signal between fundamental current and load current. Through MATLAB/Simulink simulation analysis, it is found that compared with repetitive control and fuzzy PI control, the tracking stability of repetitive fuzzy PI control three-level APF structure at different frequency points is improved, the incoming harmonic content is reduced, that is total harmonic distortion (THD). The method can be applied to industrial and commercial loads, makes up for the disadvantage that the system performance is affected by the load change when fuzzy PI control and repetitive control are used alone, and improves the robustness.

**Keywords:** fuzzy control; proportional plus integral controller; active power filter; harmonic; instantaneous reactive power

## 0 引言

电力电子系统是能量流转换的基本单元。随着电力电子系统的多样化、规模化、智能化发展以及可再生能源发电、直流输电和电气化负荷应用规模的持续扩大, 电力电子系统内的信息流和能量流互联互通日趋复杂, 不断促进系统向高度集成化和模块化发展<sup>[1-3]</sup>。但电网中电力电子设备的增加会产生大量畸变的谐波电流, 谐波电流耦合在线路上产生谐波电压, 从而引发电网谐波增大。这类谐波会对电网和用户产生很大危害, 影响电网的电能质量。所以, 抑制电网谐波污染、改善电能质量是“绿色电能”的一个重要研究方向, 同时也可助力国家“双碳”目标的实现。

目前, 抑制谐波污染比较有效的方法可以分为主动型谐波治理和被动型谐波治理 2 大类。被动型谐波治理主要使用滤波装置抑制电网中的谐波<sup>[4]</sup>, 包括无源电力滤波器

(PPF, passive power filter)、APF, 以及由其衍生的各种无源滤波器与有源滤波器相结合的混合有源滤波器等。在各种滤波装置中, APF 是一种很有前途和实用价值的解决方案。相对于传统的谐波抑制和无功补偿装置, APF 响应速度快、实时跟踪补偿各次谐波, 具有补偿谐波、无功补偿和平衡三相电流的功能。同时, APF 还具有不受系统阻抗影响、无谐振隐患、补偿效率高等优势。

与传统的两电平 APF 相比, 三电平 APF 具有高压、大功率、大容量和低谐波的特点<sup>[5]</sup>。在三电平 APF 中, 目前已有许多学者对其控制策略进行了研究。一些传统方法将 PI 控制器用于控制并联 APF 的谐波电流和直流电压。然而, 传统的 PI 控制器需要精确的线性数学模型, 这在参数变化、非线性模型和负载扰动下很难获得<sup>[6-7]</sup>, 并且在全负载范围内单一的 PI 参数很难使系统运行在最优状态。文献<sup>[8]</sup>提出了分段式 PI 控制方法, 系统选取了 3 个不同的 PI

收稿日期: 2022-03-07; 修回日期: 2022-03-16。

基金项目: 陕西省教育厅自然科学专项项目 (18JK0341); 西安市科技计划项目 (21XJZZ0014)。

作者简介: 孟超 (1987-), 男, 山东寿光人, 硕士, 主要从事电子信息、控制工程等方面的研究。

通讯作者: 杨昊 (1988-), 男, 河北石家庄人, 博士, 副教授, 主要从事电力设备状态评价方向的研究。

引用格式: 孟超, 杨昊. 重复—模糊 PI 控制的三电平有源电力滤波器[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(5): 97-102, 108.

参数来满足装置不同负载需求，但是对于负载范围较大的系统，3 组 PI 参数不能满足装置的动态变化需求。所以，需要寻求一种动态变化 PI 微调参数的方法，来实现系统的最优控制。

自从 1965 年，拉特飞·扎德教授发表了题为“模糊集”的开创性论文以来，模糊控制由于鲁棒性强，不需要精确的数学模型，可以处理不精确的输入以及非线性模型等特点，在许多领域得到了广泛地应用<sup>[9-10]</sup>。文献 [11] 提出了模糊 PI 控制器，实现 PI 参数的动态微调，满足具有非线性、负载不稳定性系统，但模糊控制存在系统抗干扰能力差的问题，系统负载在动态过程中，很难调节出最优 PI 参数。为了使系统能以最优的 PI 参数去调节全负载范围内不同频点，文献 [12] 提出了一种 PI 加重重复控制的电流追踪方法。重复控制基于内模原理，对周期信号进行积分，从而零静差追踪各次谐波，使系统具有很强的抗干扰能力，但重复控制器会有周期延时，动态响应慢，不能满足宽负载范围内的最优控制。模糊 PI 控制器动态响应快，但是不能达到稳态零静差跟踪。

因此，本文结合重复控制器和模糊 PI 控制器的优点，给出了一种基于重复-模糊 PI 控制的复合控制方法，将其应用于并联型三电平 APF 结构中，在提高系统鲁棒性的同时，增强了其响应速度。

## 1 并联三电平 APF 结构和参数选取

### 1.1 结构设计

三电平拓扑结构广泛应用于光伏逆变器、风电变流器、不间断电源、高压变频器等领域<sup>[13-15]</sup>。与两电平拓扑相比，三电平拓扑具有谐波含量低、损耗低、补偿性能好等优点，不仅能提升直流侧电压利用率，而且适用于 APF 结构<sup>[16]</sup>。APF 按照系统结构分为串联型、并联型和混合型 3 种。串联型 APF 通过变压器接入电网，与系统负载构成串联关系，主要用于补偿电网中的谐波电压，但是流过串联型 APF 的电流较大，会产生较大的损耗，同时，串联型 APF 的控制较为复杂，给后期的维护带来许多困难，因此在实际工程中的应用较少；并联型 APF 相当于一个与负载并联的逆变器，通过有效控制可以产生补偿电网谐波、无功及不平衡的补偿电流，当其本身发生故障时可以实时脱离电网，不会对系统的正常运行造成影响；混合型 APF 将传统的 PPF 与 APF 结合到一起实现对谐波的动态补偿，结构简单，性能优越，但是体积相对较大，更适合大容量场合。相比较而言，对于中小容量场合，并联型 APF 被视作较为理想的谐波治理设备<sup>[17]</sup>。如图 1 所示，本文设计了并联型三电平 APF 结构。其中， $a$ 、 $b$ 、 $c$  分别为三相。

图 1 中， $u_{g,a}$ 、 $u_{g,b}$ 、 $u_{g,c}$  为三相电网电压； $i_{g,a}$ 、 $i_{g,b}$ 、 $i_{g,c}$  为电网侧电流； $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$  为需要注入电网进行补偿的电流； $u_a$ 、 $u_b$ 、 $u_c$  为中点钳位变换器输出电压； $i_{l,a}$ 、 $i_{l,b}$ 、 $i_{l,c}$  为负载电流； $S_{k,1}$ 、 $S_{k,2}$ 、 $S_{k,3}$  和  $S_{k,4}$  为三相桥臂的开关函数， $k$  代表  $a$ 、 $b$ 、 $c$  三相； $O$  为直流侧中点， $N$  为三相电网参考

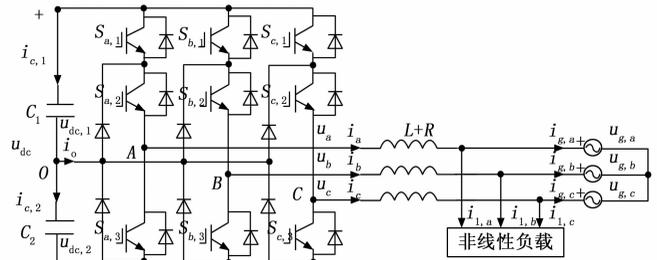


图 1 并联型三电平 APF 结构

点； $C_1$ 、 $C_2$  为直流侧电容，分别取值为  $C$ ； $u_{dc,1}$  和  $u_{dc,2}$  为 2 个电容的电压； $i_{c,1}$  和  $i_{c,2}$  为流过 2 个电容的电流； $i_o$  为直流侧中点电流； $U_{dc}$  为直流侧总电压； $L$  为三电平 APF 主电路中变换器的输出电感； $R$  为包括电感电阻在内的三相线路阻抗。

根据图 1 所定义的电流电压方向和拓扑结构，由基尔霍夫定律推导三相三线制三电平 APF 的主电路数学模型，可表示为

$$\begin{cases} u_{g,k} = L \frac{di_k}{dt} + Ri_k + u_k + u_{ON} \\ i_k + i_{l,k} + i_{g,k} = 0 \\ C_1 \frac{du_{dc,1}}{dt} + C_2 \frac{du_{dc,2}}{dt} + i_o = 0 \\ u_k = d_{k,p}u_{dc,1} - d_{k,N}u_{dc,2} \\ i_o = \sum (1 - d_{k,p})(1 - d_{k,N})i_k \end{cases} \quad (1)$$

式中， $k$  代表  $a$ 、 $b$ 、 $c$  三相； $O$  点和  $N$  点之间的电压差  $u_{ON}$  为系统共模电压； $d_{k,p}$  和  $d_{k,N}$  为占空比； $d_{k,p}$  和  $d_{k,N}$  为三电平电路等效控制信号，可以调节三电平 APF 输出补偿电流，从而实现补偿目的。

### 1.2 参数选取

从图 1 可知，并联型 APF 结构参数的改变，会直接影响到控制和补偿的效果。因此，选取合适的参数是保证变流器达到满意的控制效果的首要条件。

#### 1.2.1 交流侧输出电感

三电平 APF 结构的一个用途就是可以补偿电流，实时跟踪指令电流。其中，指令电流包含了谐波电流和暂态电流。平波电感的选择直接影响着三电平 APF 的性能和效果，电感过大会增加设备的成本和体积；但过小也会增加开关电源中的纹波电流。因此，有必要确定输出滤波电感的取值范围，而交流侧输出电感的选取有如下 2 个原则。

1) 要满足三电平 APF 对指令电流的跟踪要求。当负载电流有较大的变化率，通过谐波检测得到的指令电流变化率也会较大，要使补偿后的电流变化率不小于指令电流变化率的最大值。

$$\left| \frac{di_k}{dt} \right| = \left| \frac{u_{g,k} - \frac{U_{dc}}{2}(2S_a - S_b - S_c)/3}{L} \right| \geq \left| \frac{di_k^*}{dt} \right|_{\max} \quad (2)$$

2) 三电平 APF 要抑制输出纹波电流的范围, 需要满足:

$$\left| \frac{di_k}{dt} \right| = \left| \frac{u_{g,k} - \frac{U_{dc}}{2}(2S_a - S_b - S_c)/3}{L} \right| \leq \frac{2\Delta i_{max}}{T} \quad (3)$$

式中,  $T$  为开关周期。综合式 (2)、(3), 一般为了满足要求且节省能量, 平波电感  $L$  均考虑其下限值, 则有

$$L \geq T \left| \frac{e_{g,k} - \frac{U_{dc}}{2}(2S_a - S_b - S_c)/3}{2\Delta i_{max}} \right| \quad (4)$$

### 1.2.2 直流电容

直流电容的选择与直流侧电容电压的波动限制有很大的关系, 与传统两电平 APF 相比, 三电平 APF 的电容电压波动可以分为上下电容相同的电压波动和上下电容不同的电压波动 2 个大类。

1) 上下电容相同的电压波动。忽略中点电流的影响, 直流侧 2 个电容相当于串联, 此时 2 个电容电压波动趋势相同且相等。对应电量偏移  $\Delta Q$  可以表示为

$$\Delta Q = \Delta U_{dc} \frac{C}{2} = i_{dc} T \quad (5)$$

式中,  $\Delta U_{dc}$  为直流侧电压偏移量, 且需要不大于直流侧允许的电压偏移量。

2) 上下电容不同的电压波动。这是三电平拓扑受中点电流影响的特有波动。此时 2 个电容电压的波动正好相反, 且波动幅值受不同开关状态的影响, 但理想情况下对整个电容电压没有影响。

已有理论分析表明, 三电平 APF 上下电容不同的电压波动往往通过中点电压平衡控制策略等方案来抑制。此处, 本文只考虑上下电容相同的电压波动情况, 电压外环使用的是传统成熟的 PI 控制策略。

### 1.3 瞬时无功理论谐波检测方法

谐波电流检测是三电平并联型 APF 结构的重要部分之一, 决定了其结构的有效性和稳定性<sup>[18]</sup>。

谐波检测主要分为时域和频域两类方法<sup>[19]</sup>。其中, 时域方法中的基于瞬时无功率理论的谐波检测不仅在检测过程中不受电网的影响, 而且可以实时分离有功和无功电流, 大大提高了谐波检测的实时性和准确性<sup>[20]</sup>。

瞬时无功率理论的谐波检测要包括  $p-q$  和  $i_p-i_q$  法<sup>[21-22]</sup>。 $p-q$  谐波检测法虽然应用最早, 但是只适用于三相电压对称且无畸变的电网中; 当电网电压不对称或出现畸变的情况,  $i_p-i_q$  谐波检测法可以更准确迅速地检测出谐波电流<sup>[23-24]</sup>, 而且检测误差比  $p-q$  法更小。故本文选择  $i_p-i_q$  法。

## 2 重复一模糊 PI 控制器设计

基本的重复控制器存在一定的控制延时和相位差, 因此需要增加相应的补偿器对其进行补偿。同时, 考虑到单纯的 PI 控制器具有抗干扰性较差的问题, 因此本文引入了模糊控制器来增强控制环节的抗干扰性, 如图 2 所示为重复一模糊 PI 控制结构。

### 2.1 重复控制器

内模理论是重复控制器的核心, 该理论将作用于系统

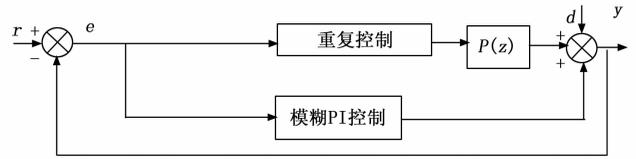


图 2 重复一模糊 PI 控制器结构

的外部输入信号 (含指令信号和扰动信号) 的动力学特性的数学模型植入控制环内, 从而构成高精度的反馈控制系统<sup>[25-26]</sup>。

在三电平 APF 中, 系统谐波的频率不是固定不变的, 而是基于基波频率整数倍的电流量。虽然补偿的谐波电流是不同频率叠加而成的, 却遵循所有补偿的谐波电流在每一个基波周期内的波形是统一的规律。为了不失一般性, 所以重复控制器的内模可以以基波周期进行设计<sup>[27]</sup>。内模虽然可以对控制信号零静差地跟踪, 但是其开环极点会增加系统的不稳定性。为了提高系统的稳定性, 本文使用 Z 域内模。

采用重复控制器的系统在基频及其整数倍频率下具有很高的增益, 对这些频率下的指令电流具有较高的稳态跟踪性能。重复控制器的结构如图 3 所示。

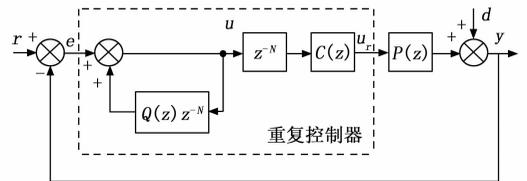


图 3 重复控制器结构

图 3 中, 重复控制器主要由内模结构和补偿器 2 部分构成。 $Q(z)$  与  $z^{-N}$  一起构成内模结构, 补偿器为  $C(z)$ , 被控对象为  $P(z)$ 。 $Q(z)$  一般取一个小于 1 的常数, 用于提高稳定性, 本文取 0.98;  $N$  为采样点, 本文取 100。

$C(z)$  是补偿器, 包括相位补偿和幅值补偿, 为了简化, 令

$$C(z) = k_r z^K \quad (6)$$

式中,  $K$  为相位补偿次数;  $k_r$  为增益;  $z^K$  为超前补偿, 通过它来补偿被控对象  $P(z)$  在低频段带来的相位延迟。

重复控制器的传递函数  $H(z)$  表示为

$$H(z) = \frac{z^{-N}}{1 - Q(z)z^{-N}} C(z) = \frac{k_r z^{-N+K}}{1 - 0.98z^{-N}} = \frac{y}{e} \quad (7)$$

用 MATLAB 绘制被控对象  $P(z)$  的频率响应, 即伯德图, 如图 4 所示。

从图 4 可以看出, 被控对象  $P(z)$  在中低频段有 22 dB 的增益放大, 而且从相频特性来看, 有一定的相位滞后, 这对谐波补偿的实时性有很大影响。

为了信号传递的稳定性, 被控对象  $P(z)$  在中低频段的增益应控制为 1。而补偿器  $C(z)$  除了可以把被控对象不稳定的极点抵消, 同时可以实现中低频段的增益为 1。

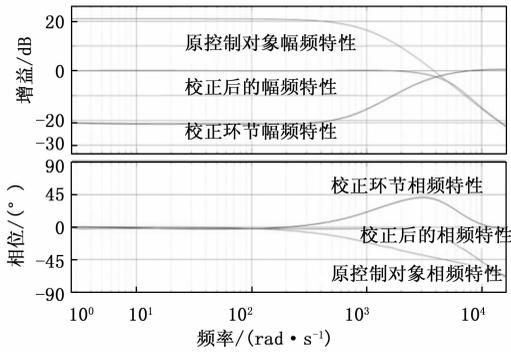


图 4  $P(z)$  的频率响应

### 2.2 模糊 PI 控制器

模糊 PI 控制器包含输出、模糊规则、解模糊等部分，其中模糊规则是模糊控制的核心，需要人的经验和知识的总结。其设置原则是：比例  $K_p$  能够反映误差  $e$ ，出现误差后立即反应，来减少偏差；若其值过大，反而会造成系统振荡。所以，如果误差  $e$  较大，为了快速抑制误差， $K_p$  的值也要变大；反之如果误差  $e$  较小，为防止超调太大使系统振荡， $K_p$  的值要变小<sup>[28-30]</sup>。

综合考虑误差变化率  $R_e$  时，当  $R_e$  和  $e$  同号时，输出值会偏离稳定值，此时要加大  $K_p$ ；反之，要减小  $K_p$ 。 $K_i$  的分析过程与其相同。在模糊控制中，输入输出变量大小是以语言形式描述的，一般都选用大、中、小 3 个词汇，再加上正、负 2 个方向和零状态，共有 7 个词汇：{负大，负中，负小，零，正小，正中，正大} 来描述模糊控制器的输入和输出变量的状态，据此可以制定  $\Delta K_p$  和  $\Delta K_i$  的模糊控制规则。模糊 PI 控制器结构如图 5 所示。

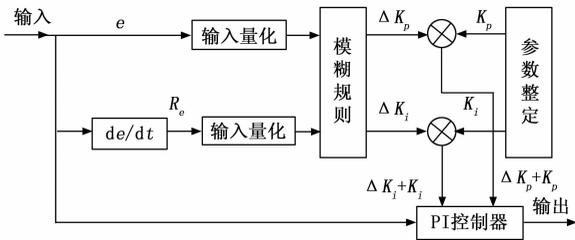


图 5 模糊 PI 控制器结构

## 3 本文系统结构及仿真分析

### 3.1 系统结构

本文给出重复一模糊 PI 控制的三电平 APF 控制方法，系统实时测量网侧电压和负载侧电流，其控制结构如图 6 所示。

图 6 中，通过  $i_p-i_q$  法得到实际的负载谐波分量，再转换为实际的  $d、q$  轴电流信号；给定的直流电容电压值与实际值的差值经过 PI 调节器，得到  $d$  轴电流的额定值， $q$  轴电流额定值设为零， $d、q$  轴电流额定值与实际值比较后送入重复一模糊 PI 控制器；输出的调制波再经过脉宽调制器和直流中点电压平衡控制策略，从而得到系统中各个开关

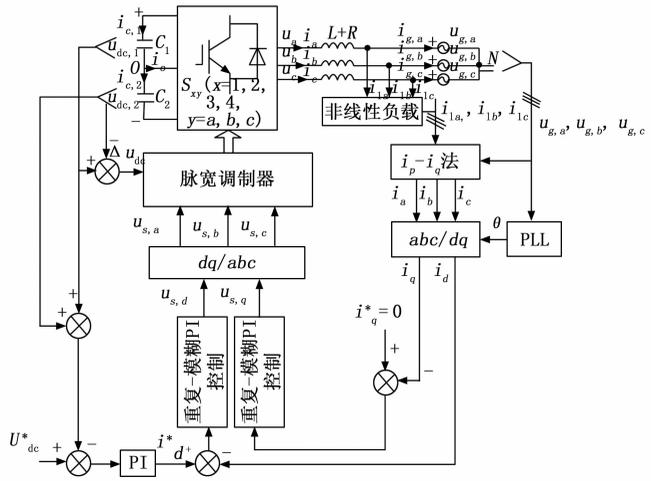


图 6 重复一模糊 PI 控制的三电平 APF 结构

管的控制信号，可提高 APF 的补偿精度。

### 3.2 系统仿真参数

为验证所提控制策略的可行性，基于重复一模糊 PI 调制方法，搭建三电平 APF 仿真模型，主要参数：交流侧线电压为 380 V；直流侧电压为 800 V；额定频率为 50 Hz；系统额定电流为 80 A；额定容量为 25 kVA；电感为 0.25 mH；系统开关频率为 20 kHz；电容为 2 700  $\mu$ F。采用的仿真工具为 MATLAB/Simulink。

### 3.3 系统稳定性

在系统负载范围内分别选取系统输出电流为 20 A（频点 1）、30 A（频点 2）和 55 A（频点 3）的 3 个频点来验证方法的有效性，图 6 为不同控制方法下不同频点 APF 装置所提供的补偿电流与跟踪电流的对比。

从图 7 (a) 可以看出，在重复控制方法下，电流跟踪效果差；从图 7 (b) 可以看出，模糊 PI 控制方法下，跟踪效果比重复控制方法要好，但依然不能稳定跟踪；从图 7 (c) 可以看出，在重复一模糊 PI 控制方法下电流能够零静差跟踪，且在不同频点范围内保持稳定。

### 3.4 系统动态响应

不同控制方法下，变动负载大小，以 3 个频点为例，来验证重复一模糊 PI 控制的动态响应速度，其动态谐波补偿仿真效果如图 8 所示。

从图 8 可以看出，重复控制、模糊 PI 控制和重复一模糊 PI 控制方法在频点 1 到频点 2 的响应时间分别为 0.065 s、0.035 s 和 0.040 s，频点 2 到频点 3 的响应时间分别为 0.065 s、0.035 s 和 0.040 s。3 种方法中模糊 PI 控制方法的响应速度最好，但综合考虑系统响应速度与滤波效果时，重复一模糊 PI 控制方法的效果在 3 种方法中表现最好。

### 3.5 系统谐波分析

作为电力系统谐波分析的重要参数，THD 将多种谐波考虑在内，能够有效反映系统的谐波含量<sup>[31]</sup>。THD 表明功放工作时，由于电路不可避免的振荡和其他谐振产生的各次谐波与实际输入信号进行叠加，输出信号还包括了谐波

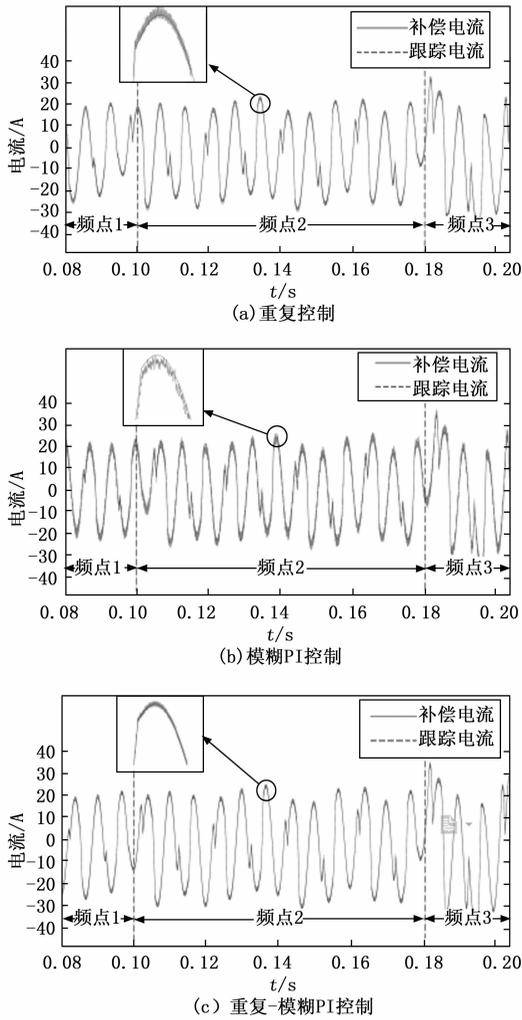


图 7 不同控制方法下不同频点的跟踪电流与补偿电流

成分的信号, 这些多余出来的谐波成分与实际输入信号的对比, 用百分比来表示就称为 THD。在基频为 50 Hz 的情况下, 对 3 种控制方法不同频点的进行谐波分析, 如图 9~11 所示。

从图 9~11 可以看出, 重复控制、模糊 PI 控制和重复一模糊 PI 控制在频点 1 的入网谐波含量, 即 THD 分别为 2.67%、1.79% 和 0.55%, 在频点 2 的 THD 分别为 3.23%、1.98% 和 0.64%, 在频点 3 的 THD 分别为 3.80%、2.30% 和 0.97%。可知, 单一的重复控制和模糊 PI 控制, 系统在不同频点下也都能够有效地减少谐波含量, 但其稳定性不高, 滤波效果随负载变化影响较大; 重复一模糊 PI 控制方法的 THD 在频点 1、频点 2 和频点 3 时, 相对于单一控制策略, 重复与模糊 PI 控制策略稳定性更高, 滤波效果更好, 同时, 该方法也符合我国《电能质量公用电网谐波》标准以及《IEEE Std 519—1992》标准中关于谐波含量的限制。

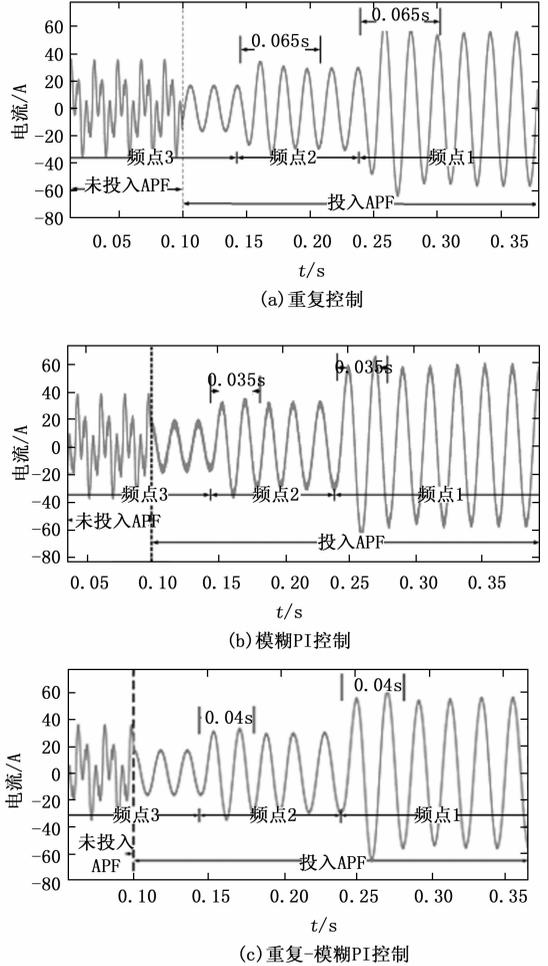


图 8 不同控制方法下不同频点的电流波形

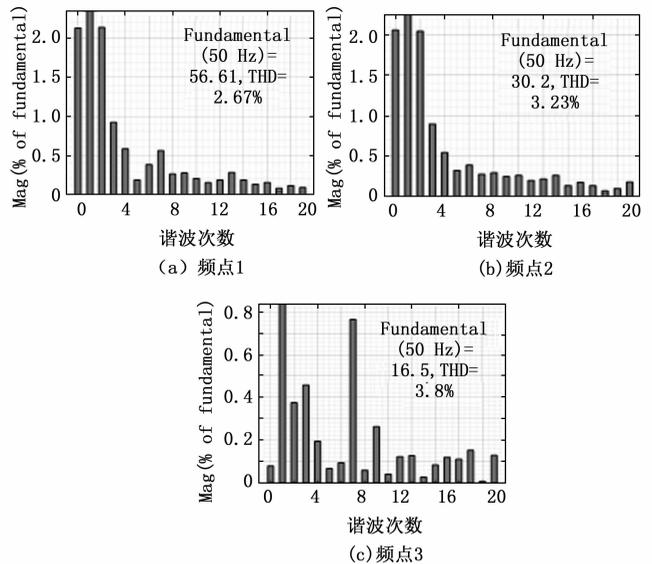


图 9 重复控制下不同频点谐波分析

### 4 结束语

通过研究发现, 采用基于重复一模糊 PI 策略控制的三

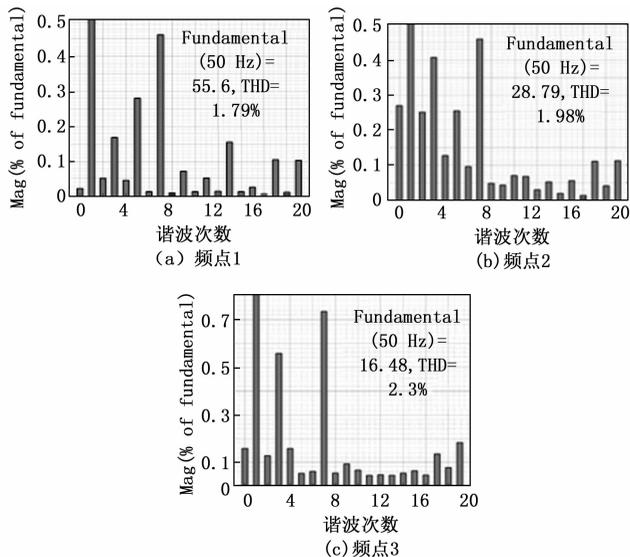


图 10 模糊 PI 控制下不同频点谐波分析

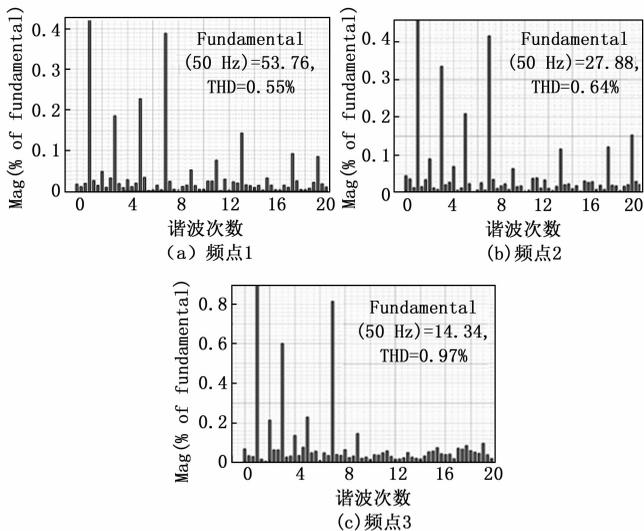


图 11 重复一模糊 PI 控制下不同频点谐波分析

电平 APF, 在不同频点的稳定性高且响应速度快, 有着良好的滤波效果。能够有效解决负载突变导致的重复控制方法单独使用时系统跟踪性能差和模糊 PI 控制策略单独使用时动态稳定性差的缺点。

参考文献:

[1] 王雪, 高云广, 吝伶俐, 等. 有源电力滤波器的研究现状与展望 [J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47 (1): 177-186.

[2] 朱蜀, 刘开培, 秦亮, 等. 电力电子化电力系统暂态稳定性分析综述 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37 (14): 3948-3962.

[3] 杨光辉, 冯豆, 张彪, 等. 基于网络指纹识别的电力系统应急调度动态控制技术 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (2): 65-69.

[4] 杨阳, 陈红卫. 模糊-PI 控制的 APF 在电弧炉谐波抑制中的

应用 [J]. 电子设计工程, 2020, 28 (15): 114-119.

[5] 邸彩芸, 赵志, 李明星, 等. 一种基于 T 型三电平 APF 的优化无差拍控制 [J]. 电气传动, 2020, 50 (10): 63-66.

[6] THENTRAL T M T, VIJAYAKUMAR K, USHA S, et al. Development of control techniques using modified fuzzy based SAPF for power quality enhancement [J]. IEEE Access, 2021 (9): 68396-68413.

[7] 田飞燕, 高云广, 宋建成, 等. 并联型有源电力滤波器的复合电流控制方法 [J]. 电气传动, 2017, 47 (7): 67-71.

[8] 张宇, 渠浩, 张宁云, 等. 基于分段 PI 控制的逆变式等离子切割电源设计 [J]. 电力电子技术, 2017, 51 (4): 68-70.

[9] 楚焱芳, 张瑞华. 模糊控制理论综述 [J]. 科技信息, 2009 (20): 161-162.

[10] 武夷山. 模糊集之父扎德 [N]. 科技日报, 2020-04-24 (8).

[11] 刘丽丽, 左继红. 磁悬浮球系统模糊 PID 参数自调整控制方法 [J]. 控制工程, 2021, 28 (2): 354-359.

[12] 赵宇明, 何新华, 孟亨, 等. 基于 ELM 优化 PI+重复控制策略在 APF 中的应用研究 [J]. 计算机应用与软件, 2021, 38 (3): 46-50.

[13] 卫才猛, 彭翠萍, 周晓明, 等. LCL 型三电平 NPC 并网变流器单电流反馈有源阻尼控制 [J]. 西安工程大学学报, 2020, 34 (3): 26-31.

[14] 李臻, 蒋程, 田博文. 三电平 NPC 变换器谐波与电磁干扰噪声优化调制 [J]. 西安工程大学学报, 2021, 35 (5): 74-79.

[15] 田博文, 呼斯乐, 彭佩佩, 等. 三电平 ANPC 变流器损耗平衡的 SVPWM 策略 [J]. 西安工程大学学报, 2021, 35 (1): 30-36.

[16] 韩小安, 韩海安, 程显舒, 等. APF-TCR 联合运行系统控制方法与仿真 [J]. 智慧电力, 2019, 47 (2): 101-106.

[17] 谢川. 数字控制大容量并联型 APF 关键技术研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2012: 10.

[18] 武敏. 基于 SVPWM 控制的三电平并联型 APF 研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2016: 4-5.

[19] ASIMINOAEI L, BLAABJERG F, HANSEN S. Detection is key-Harmonic detection methods for active power filter applications [J]. Industry Applications Magazine IEEE, 2007, 13 (4): 22-33.

[20] AKAGI HIROFUMI, KANAZAWA YOSHIHIRA, NABAE AKIRA. Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits [C] // IEEE&JIEE Proceedings IPEC. Tokyo: IEEE, 1983: 1375-1386.

[21] DIAN R J, XU W, MU C X. Improved negative sequence current detection and control strategy for H-bridge three-level active power filter [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26 (7): 1-5.

[22] 高文华, 周娟, 王子绩. 基于瞬时无功率理论的 ip-iq 算法中的 SPLL 改进研究 [J]. 电子技术应用, 2017, 43 (3): 145-148.

(下转第 108 页)

定, 误差小, 从而实现了热影响范围可控、芯片对位精准、加热温度闭环的 BGA 型芯片智能返修系统的设计, 达到了预期目标。

## 5 结束语

通过了解 BGA 型芯片返修台的国内外研究现状和发展趋势, 分析此种类型芯片返修的技术需求, 基于激光选区和 Fuzzy-PID 温控技术, 设计了一种激光选区 BGA 型芯片智能温控返修系统。通过在 Windows 操作系统下, 采用 MFC 编写软件控制系统的 GUI, 采用 C++ 编写上位机控制与监测软件系统, 实现了对温度、激光、电机、相机的实时监测与控制。实验结果表明, 该系统操作简单、运行稳定、时延较短、自动化程度高, 且可控性强, 对 BGA 型芯片的返修具有良好的实用价值。在后续工作中, 对拆解与焊接操作步骤进行优化, 设计出更加简单、可靠、稳定的返修系统。

## 参考文献:

[1] 余霞, 罗佳琪, 肖晓晨, 等. 高功率超快光纤激光器研究进展 [J]. 中国激光, 2019, 46 (5): 85-96.

[2] 本刊编辑部. 2018 年先进激光制造产业发展大会将在张家港举行 [J]. 中国表面工程, 2018, 31 (5): 166.

[3] 韩满林, 赵雄明. BGA 返修工艺 [J]. 电子工艺技术, 2007 (4): 214-217.

[4] 倪宏俊. BGA 芯片的返修与锡球重整 [J]. 印制电路信息, 2011 (9): 65-67.

[5] 刘焱, 明正东. 浅析 BGA 元件的返修技术 [J]. 广东科技, 2015, 24 (12): 45-47.

[6] 吴政南, 谢江容, 杨雁南. 高功率半导体激光器光束整形的设计和实现 [J]. 激光技术, 2017, 41 (3): 416-420.

[7] 丁铠文, 王聪, 罗志, 等. 超快激光光束整形原理与方法及其在功能性微结构制造中的应用 [J]. 中国激光, 2021, 48 (2): 59-72.

[8] CAI C, GUO L, LIU J. Fuzzy Sliding Mode Predictive Control of Air Flow Rate for a High-Speed High-Temperature Heat-Air-flow Test System [J]. International Journal of Aeronautical and Space Sciences, 2020, 21 (3): 806-815.

[23] 陈乐鹏, 谭晓东. ip-iq 的改进算法与小波变换谐波检测方法研究 [J]. 电子测量技术, 2020, 43 (19): 69-74.

[24] 张建忠, 耿治, 徐帅, 等. 一种有源电力滤波器的改进自适应谐波检测算法 [J]. 电工技术学报, 2019, 34 (20): 4323-4333.

[25] CLEARY-BALDERAS A, MEDINA-RIOS A, CRUZ-HERNÁNDEZ O. Hybrid active power filter based on the IRP theory for harmonic current mitigation [C] //2016 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC). Ixtapa: IEEE, 2016: 1-5.

[26] 张国胜, 胡海兵, 夏玉政, 等. 一种简易的三电平 APF 中点电位控制方法 [J]. 电力电子技术, 2021, 55 (6): 122-124.

[27] 王素娥, 王鹏萱, 郝鹏飞. 有源电力滤波器改进快速重复控制

[9] BOLDBAATAR E A, LIN C M. Self-Learning Fuzzy Sliding-Mode Control for a Water Bath Temperature Control System [J]. International Journal of Fuzzy Systems, 2015, 17 (1): 31-38.

[10] 张宝峰, 张耀, 朱均超, 等. 基于模糊 PID 的高精度温度控制系统 [J]. 传感技术学报, 2019, 32 (9): 1425-1429.

[11] 徐元飞, 胡晓冬, 姚建华, 等. 半导体直接输出激光加工系统开发与温度控制策略研究 [J]. 应用激光, 2015, 35 (1): 115-123.

[12] 齐艺超, 陈伟, 穆春元, 等. 基于粒子群自整定 PID 算法的激光器温度控制系统 [J]. 激光技术, 2019, 43 (5): 60-64.

[13] 余明亮, 杨维明, 赵明俊. 空调自动调温控制系统的设计研究 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26 (7): 57-61.

[14] 李杰, 田俊. 基于模糊和反步算法的 EHA 力控制 [J]. 控制工程, 2021, 28 (7): 1382-1389.

[15] 李良喆, 陈锋, 张广, 等. 波浪式生物反应器温度控制系统模糊 PID 算法设计及 simulink 仿真 [J]. 军事医学, 2016, 40 (10): 824-828.

[16] 周凯, 杨嵇森. 磁粉离合器自调整模糊 PID 励磁控制技术 [J]. 电机与控制学报, 2017, 21 (2): 87-93.

[17] WANG L, WANG W, DU Y, et al. A novel adaptive fuzzy PID controller based on piecewise PID controller for dynamic positioning of sandglass-type FDPSO [J]. Journal of Marine Science and Technology, 2019, 24 (3): 720-737.

[18] ESFANDYARI M, FANAIEI M A, ZOHREIE H. Adaptive fuzzy tuning of PID controllers [J]. Neural Computing and Applications, 2013, 23 (1): 19-28.

[19] 王慧, 赵国超, 宋宇宁, 等. 采煤机调高过程的轨迹跟踪模糊 PID 控制 [J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32 (8): 164-171.

[20] 王明宇. 激光加热辅助切削温度自适应系统研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2021.

[21] 庄源昌, 高罗卿, 郑湃, 等. 基于 Labview 和 Matlab 的模糊 PID 温度控制系统研发 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (8): 2485-2487, 2507.

[22] 文波, 孟令军, 张晚春, 等. 基于增量式 PID 算法的水温自动控制器设计 [J]. 仪表技术与传感器, 2015 (12): 113-116.

[28] 管声启, 张潇, 杨栋峰, 等. 绳驱动机械手抓取力自整定模糊 PID 控制 [J]. 西安工程大学学报, 2021, 35 (6): 96-103.

[29] 徐健, 惠楠, 苏泽斌. 基于 BAS-PID 算法的介电弹性体执行器控制研究 [J]. 西安工程大学学报, 2021, 35 (4): 84-89.

[30] 贾东旭, 刘梁, 徐照平. 电动负载模拟器的自适应模糊 PI 控制策略 [J]. 上海航天 (中英文), 2021, 38 (5): 131-137.

[31] 侯川川, 朱森, 刘纯, 等. 并网逆变器的谐波放大机制与应用 [J/OL]. 中国电机工程学报: 1-13 [2021-12-25]. (2022-03-07). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20211223.1942.022.html>.

(上接第 102 页)