

# 基于比例积分控制策略的三相三线制有源滤波器研究

吴继锋<sup>1</sup>, 何 晨<sup>2</sup>, 李应良<sup>3</sup>

<sup>1</sup>安络杰医疗器械(上海)有限公司, 上海

<sup>2</sup>合肥工业大学, 安徽 合肥

<sup>3</sup>鑫高益医疗设备股份有限公司, 浙江 宁波

收稿日期: 2022年8月9日; 录用日期: 2022年9月12日; 发布日期: 2022年9月19日

## 摘 要

随着制造业的飞速发展以及生产技术的迅速提升, 有源电力滤波器(Active Power Filter)作为能有效治理电网谐波的装置已成为了研究的热点。论文提出比例积分控制策略的PI控制器的复合电流环控制器结构设计, 对性能进行分析, 在Matlab仿真平台上进行仿真, 实验结果证明实验方法的正确性和可实现性, 同时也充分展示了系统具有良好的谐波补偿性能。

## 关键词

有源电力滤波器, 谐波补偿, 比例积分

## Development of Three-Phase Three Wire Active Power Filter based on Proportional Integral Control Strategy

Jifeng Wu<sup>1</sup>, Chen He<sup>2</sup>, Yingliang Li<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Analogic Medical Equipment (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai

<sup>2</sup>Hefei University of Technology, Hefei Anhui

<sup>3</sup>Xingaoyi Medical Device Co., Ltd., Ningbo Zhejiang

Received: Aug. 9<sup>th</sup>, 2022; accepted: Sep. 12<sup>th</sup>, 2022; published: Sep. 19<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

With the rapid development of manufacturing industry and the rapid improvement of production

文章引用: 吴继锋, 何晨, 李应良. 基于比例积分控制策略的三相三线制有源滤波器研究[J]. 光电子, 2022, 12(3): 125-132. DOI: 10.12677/oe.2022.123014

technology, active power filter (APF), as a device that can effectively control the harmonic of power grid, has become a research hotspot. In this paper, the structure design of compound current loop controller of PI controller with proportional integral control strategy is proposed. The performance is analyzed and simulated on MATLAB simulation platform. The experimental results show that the experimental method is correct and realizable. At the same time, it also fully shows that the system has good harmonic compensation performance.

## Keywords

Active Power Filter, Harmonic Compensation, Proportional Integral

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

有源电力滤波器(Active Power Filter, APF)是一种能够很好地抑制谐波和对电路进行无功补偿的装置,它可以消除特定次谐波,还可以消除其他次谐波,实现电网的有序运行。它具有更好的灵活性,如果可以做到精确补偿谐波,对于特定次数的谐波进行有效的补偿,那么这种谐波补偿器将对于电网的稳定运行将有巨大的利益。随着科技的发展,电力电子变换装置大量应用在工业中,在给生产带来便利的同时,随之而来的是日益严重的谐波污染问题。电网中大量谐波的出现会危害到其他电力设备的正常运行。作为治理谐波的主要电力装置,有源电力滤波器(APF)已成为电力电子领域的研究热点[1] [2] [3] [4] [5]。为了实现 APF 对谐波电流的精确补偿,本文设计了基于矢量谐振(VR)控制的 APF。首先,本文介绍了谐波的种类和危害,分析对比了现有的谐波治理方式,介绍了有源电力滤波器的研究现状与分类。同时,有源电力滤波器(APF)也是一种动态抑制谐波和无功的电力电子装置[6] [7]。为了简化传统 APF 的谐波和无功电流的检测和提取,本文使用了一种基于三相三线并联 APF 的直接电流源控制。也可以对电源电流在 d-q 旋转坐标中利用比例-积分(PI)控制器对其做到无静差控制。此外,考虑到电网电压波动[8] [9],提出了采用下垂调节器来解决直流母线电压对 APF 功率损耗和补偿性能的影响。该调节器与传统的电压外环 PI 控制相结合,可在 APF 系统的功率损耗和补偿性能之间实现全面优化。

## 2. 有源电力滤波器的比例积分控制算法

### 1) PI 调节器的优化

调节器在控制中是一种常用的控制器。在微机系统的数字控制中,采样频率足够高时,可以先按照模拟系统的设计方法进行设计,然后再离散化就可以得到数字控制器的方法。当输入函数为  $i(t)$ , 输出函数  $u(t)$ , 则 pi 控制器的传递函数如下所示[10]。

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

$K_p$  为控制器的比例系数;

$K_i$  为控制器的积分系数。

数字 PI 调节分为位置式和增量式两种算法,上面的式子为未知时的 PI 调节, P 和 I 两部分作用。参数调整简单明了。增量式算法如下所示。

$$\begin{aligned}
 u(k) &= u(k-1) + \Delta u(k) = u(k-1) + [u(k) - u(k-1)](k-1) \\
 &= u(k-1) + K_p [e(k) - e(k-1)] + KT_s e(k)
 \end{aligned}
 \quad (2)$$

根据其表达式可以算出怎样算法，只需要当前和上一拍的偏差量，即可计算出输出的偏差量。输出的值为

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k) \quad (3)$$

只要在控制器中储存好上一拍的输出值即可进行变换。

## 2) 积分分离算法。

在 PI 调节系统中，比例部件可以立即响应控制的作用，而积分部分是偏差的累积，最后消除静态误差，除非模拟 PI 调节器的偏差，则 P 和 I 一起工作。在快速调整的这个时候，基本上会有一个过充现象的发生。在严重的情况下，大系统会波动。

在微机控制系统中，如果可以把 PI 分开，则会优化这部分设计，偏差过大时，只让比例部分起作用，快速减少偏差，偏差降低到一定程度后再让积分投入即可最终消除，偏差又能最大又能避免较大的退保和超调，这就是积分分离算法的基本思想[11][12]。

电流控制内环主要是以谐波电流作为给定值，通过上述的推导可知，我们可以得到一个谐波电流，这个电流与电压控制环给定的电流相加，我们可以得到 SVPWM 的控制信号。将这个信号作为开关管的改进，从而控制开关管的动作。

电压外环和电流内环均采用 PI 控制，典型电压控制外环与电流控制内环如图 1 所示。

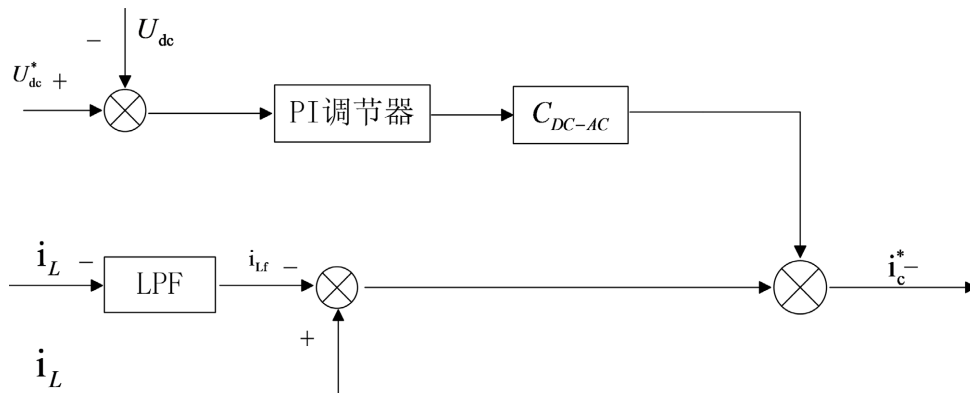


Figure 1. Voltage control outer loop and current control inner loop  
图 1. 电压控制外环与电流控制内环

## 3. 仿真与结果分析

根据上面的分析结果，本文使用 Matlab 中的 simulink 进行仿真实验，验证理论的可行性。最后根据不同的负载进行仿真，得到不同的结果。

### 3.1. 仿真准备

本文根据研究三相三线制有源滤波器的理论以及是否可实现的问题，仿真参数的设置如下：

电网电压：220 V；电网频率：50 Hz；有源滤波器容量：10 KW；

谐波源负载：

三相不控桥 + 阻容性负载，

三相不控桥 + 阻感性负载，  
改变负载特性以检验 APF 的工作性能。

### 3.2. 比例积分控制策略

设定参考变量为控制策略，选阻感性负载作为研究对象，电阻选择  $15\ \Omega$ ，电感选择为  $2\ \text{mH}$ 。由于信号为时变的，积分作用在整个电流环的控制过程中不是十分明显，故在控制策略中忽略积分的作用。

将比例系数设为 15，不加微分和积分系数，进行仿真后可以得到负载电流，对其进行谐波补偿后的结果如下所示：纯比例控制下的负载电流，电网电流和逆变器输出电流之间的关系如图 2 所示。其中图 3 展示了电网电流的 FFT 分析，图 4 展示了负载电流的 FFT 分析情况。

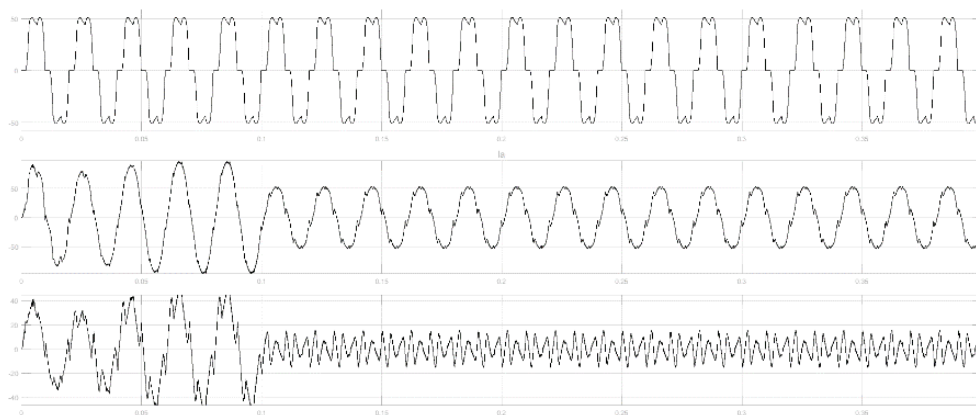


Figure 2. Relationship among load current, grid current and inverter output current under pure proportional control  
图 2. 纯比例控制下的负载电流，电网电流和逆变器输出电流之间的关系

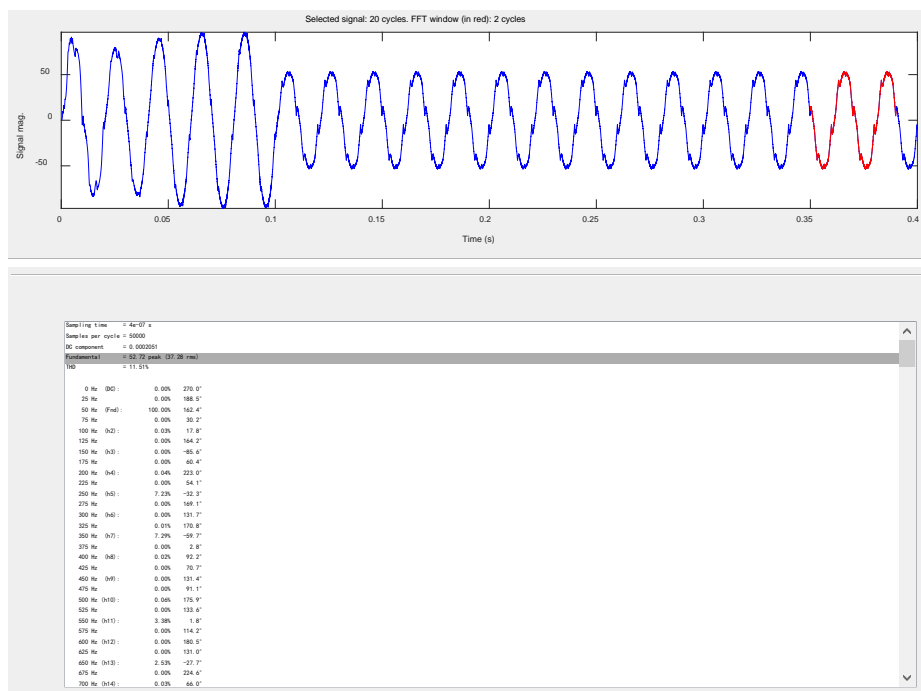


Figure 3. FFT analysis of grid current  
图 3. 电网电流的 FFT 分析

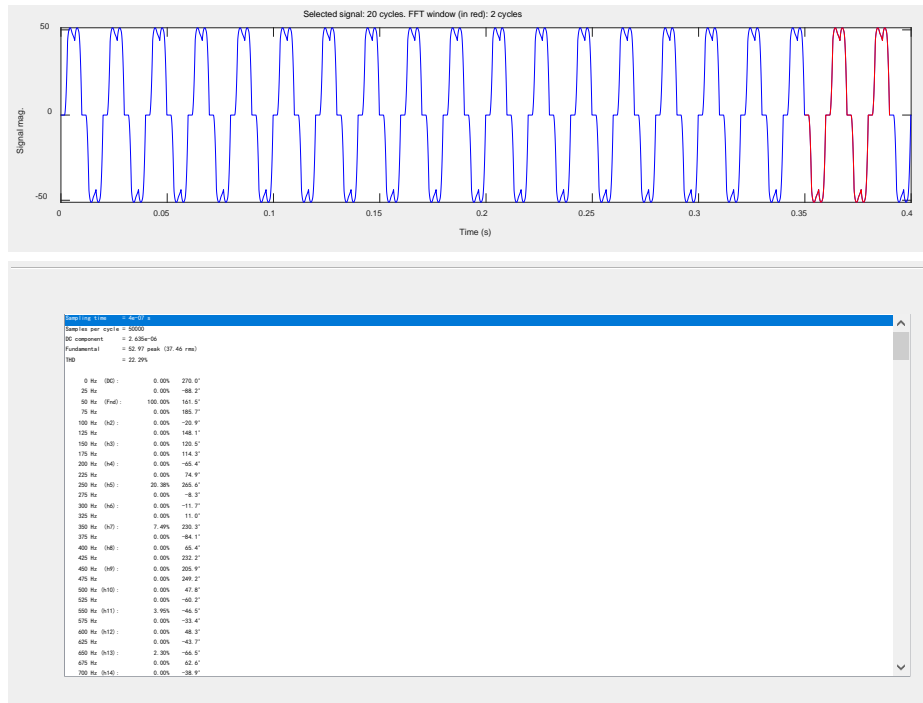


Figure 4. FFT analysis of load current  
图 4. 负载电流的 FFT 分析

更改控制环节中比例系数  $K$ ，可以得到如下参数：

Table 1. Relationship between scale factor and current harmonic content  
表 1. 比例系数与电流谐波含量的关系

比例系数 $K$	5	10	15	20	25	50
电网电流谐波 THD (100%)	10%	12%	11%	10%	27%	40%

表 1 展示了比例系数和电流谐波含量关系，从表 1 可以看出，电网谐波可以一定程度降低。根据仿真结果，如果控制比例系数在 20 左右，可以将电网电流的 THD 含量降低至 10% 左右。

### 3.3. 阻容性负载的分析

选择电容和电阻并联的方式进行仿真，电阻的选择为 20 欧姆，电容的选择为 0.001F。图 5 为电阻容

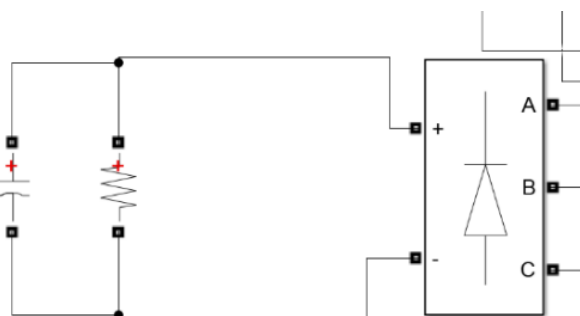
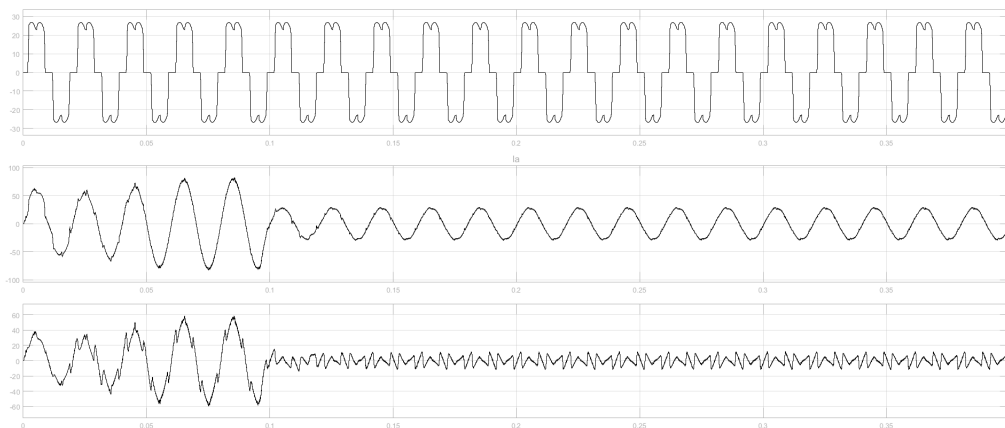


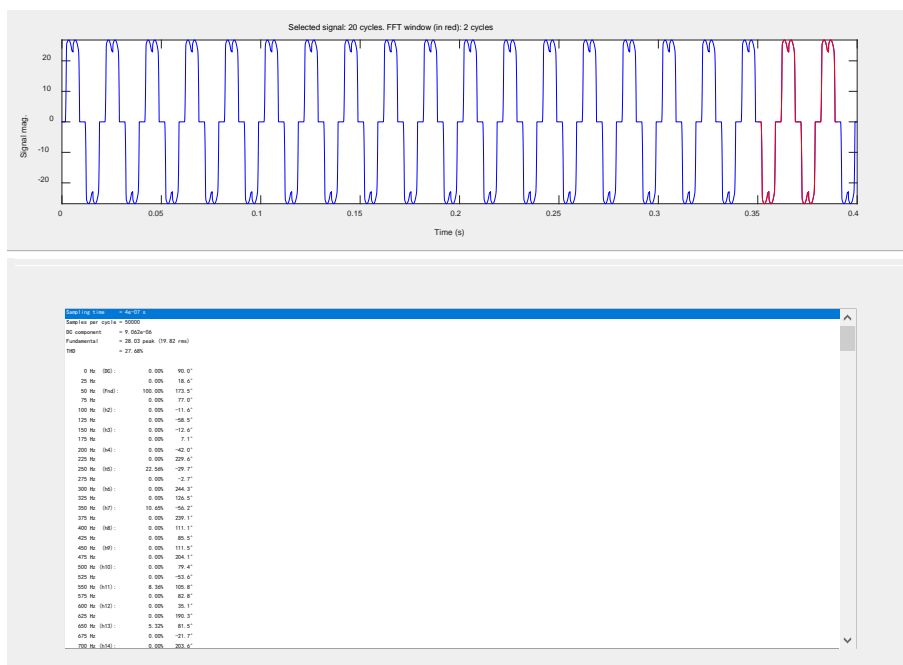
Figure 5. Resistive capacitive load  
图 5. 阻容性负载

性负载的示意图。根据该示意图，可以得到图 6 的电网电流和逆变器输出电流之间的关系，图 7 为负载电流波形。进一步的分析，可以得到图 8 的电网电流分布情况[13] [14]。

经过设计可以得到相应的电流波形。



**Figure 6.** Relationship among load current of resistive capacitive load, grid current and inverter output current  
**图 6.** 阻容性负载的负载电流，电网电流和逆变器输出电流之间的关系



**Figure 7.** Load current waveform  
**图 7.** 负载电流波形

可以将负载电流 THD 27.6%将为 4.3%。小于 5%，满足入网要求。

#### 4. 总结与展望

近年来，随着电力电子装置的大量应用，谐波和无功已经对电网造成了严重危害，导致了电网电能质量下降。有源电力滤波器因其高性能的谐波抑制和无功补偿能力成为热点和难点，有着广阔的发展前景。因谐波和无功对电网产生了严重的污染，故对目前两种谐波治理方法进行介绍。第一种为改造谐波

源, 减少谐波产生; 第二种为安装有源电力滤波器。与无源电力滤波器相比, 有源电力滤波器因不受电网运行参数影响、能够对各次谐波进行补偿等众多优点, 成为谐波治理的一个重要研究方向。本文基于比例积分控制策略对三相三线制有源滤波器进行分析, 给出系统的设计方法并进行案例设计, 在 Simulink 环境下进行了系统仿真, 通过仿真验证了该拓扑进行电流补偿的可实现性, 同时对各种不同类型的负载进行仿真, 也验证了该设备的广泛性。

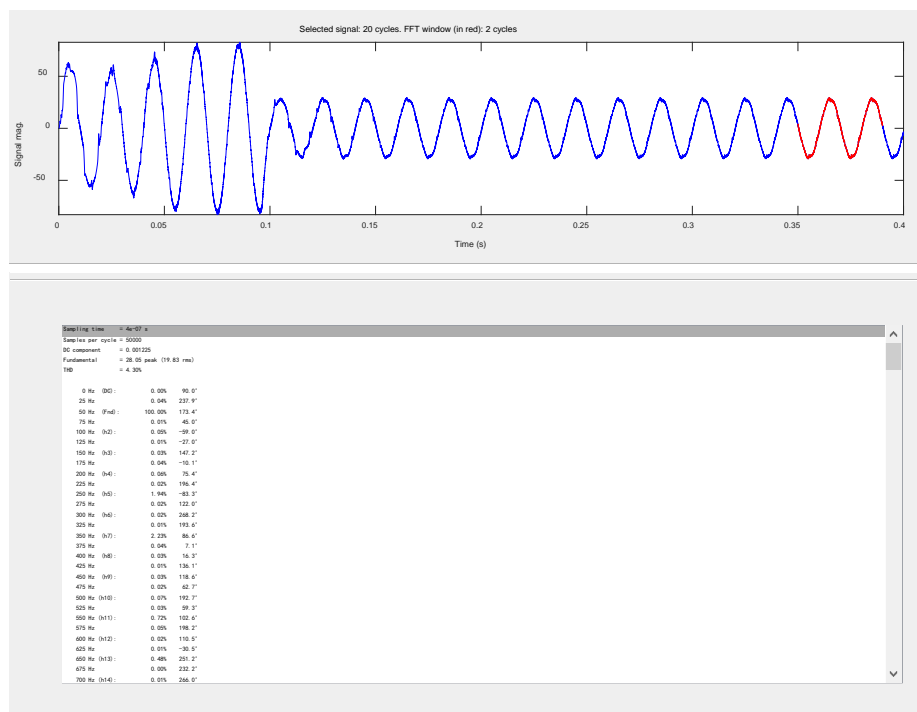


Figure 8. Grid current  
图 8. 电网电流

当然, 本文仅研究了重复控制与比例控制的结合, 后续可以进一步研究其他控制方法与重复控制的结合。本文仿真内容仅采用了 APF 进行研究, 输出电流比较固定。如果对容量有需要, 可以增加 APF 台数, 将 APF 的电流输出比例进行实时更新, 同时可以将载波相移多重化技术应用于样机中, 研究单台或多台 APF 故障时对系统的影响。

对于阻容型负载的优化还不够, 可以针对阻容型负载进行深度优化设计。以上这些, 都需要后续工作者继续研究。

## 参考文献

- [1] 程稳. LCL 滤波三相并联有源电力滤波器研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2015.
- [2] 许若冰. 三相四线制并联有源电力滤波器研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2015.
- [3] 杨佳能. 有源电力滤波器补偿性能研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
- [4] 刘洁. 混合级联有源电力滤波器预研[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2015.
- [5] 周柯, 罗安, 蒋辉平. 混合型有源电力滤波器建模与控制特性分析[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(1): 65-69.
- [6] 魏艳迪. 有源电力滤波器建模与复合控制策略研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 济南大学, 2010.
- [7] 韩忠旭, 张同为, 潘钢, 孙颖, 考志强. 增量式广义 PI 函数观测器的概念与工程应用[J]. 控制工程, 2008, 15(1): 89-93.

- [8] 刘亚峰, 陈羽, 彭克, 刘国栋. 基于改进 PR 控制的多功能逆变器控制策略[J]. 山东电力技术, 2017, 44(235): 35-39.
- [9] 殷明. LCL 滤波并联有源电力滤波器研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2016.
- [10] 周卫平, 吴正国, 夏立, 刘大明. 三相三线有源电力滤波器电流跟踪性能最优化控制[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(11): 85-90.
- [11] 万山明, 吴芳, 黄声华. 三相四桥臂电压源高频链逆变器[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(12): 47-51.
- [12] 刘桂英, 粟时平. 并联有源电力滤波器滞环电流比较控制研究[J]. 高电压技术, 2005, 31(5): 58-60.
- [13] 王明菊, 张昌凡, 兰志杰. 一种改进的高压大功率有源电力滤波器设计及实现[J]. 电子测量与仪器学报, 2007, 21(3): 108-112.
- [14] Matthias Lüscher, T. (2004) 5 Integrated Gate Commutated Thyristors Application Note. ABB Switzerland Ltd., Switzerland.