

# 有源滤波器在6脉中频炉谐波治理中的应用

钱长远,汪良坤,赵燕,连涛,王宝安  
(东南大学电气工程学院,江苏南京 210096)

**摘要:**简述了中频炉的基本结构及工作原理,从理论上分析其产生的谐波电流特性。利用 PSIM 仿真平台分别搭建了6脉电流型和电压型中频炉仿真模型,并仿真分析其谐波电流特性;介绍了3种治理方案,选用有源滤波器(APF)对中频炉的谐波进行补偿,并在实际工程中采用 APF 对6脉中频炉的电流谐波进行抑制,取得了较为理想的效果。

**关键词:**有源滤波器;谐波补偿;中频炉;电能质量

**中图分类号:** TM714

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-0665(2013)05-0019-04

晶闸管中频电源的应用是从1996年瑞士BBC公司研制成功第一台感应熔炼电源开始的,并得到了广泛应用,遍及熔炼、透热、种子处理、环保等多个领域<sup>[1]</sup>。国内晶闸管中频电源已发展成为电力系统中最重要的非线性负荷。由于中频电源装置在实现功率控制和处理的同时,会不可避免地产生非正弦波形,向电力系统注入谐波电流,使公共联结点(PPC)的电压波形严重畸变,使电网电能质量严重下降,电能损耗显著上升,被公认为电力系统的一大公害,谐波治理工作尤为重要<sup>[2]</sup>。为减少中频炉带来的谐波污染,国内已采用多脉动整流技术研制出了多种中频炉设备,包括6脉、12脉、24脉中频炉等,由于后两者成本相对较高,因此大多炼钢企业仍旧采用6脉动中频炉进行金属熔炼,其谐波污染问题仍不能忽视。现阶段对于中频炉谐波的治理方法主要有2种方法:一种是补救性的治理方法,即为克服既存谐波问题所采用的方法;一种是避免中频炉谐波出现的预防性的措施<sup>[3]</sup>。虽然第二种方法可以从根本上解决日益严重的谐波污染,但对于现已大量使用的中频炉,则只有采用第一种方法补偿其产生的谐波。将结合中频炉的工作原理及其谐波治理措施进行讨论,提出利用有源滤波器(APF)对6脉中频炉工作的不同阶段产生的谐波进行补偿与治理分析。

## 1 中频炉工作原理

### 1.1 中频炉电气原理

中频炉是一种快速稳定的金属加热装置,其核心设备是中频电源。中频炉的电源通常采用 AC-DC-AC 变换方式,将输入的工频交流电输出为中频交流电,且频率变化不受电网频率的限制,其电路如图1所示<sup>[4]</sup>。

### 1.2 谐波分析

中频电源注入电网的谐波主要是由整流装置产

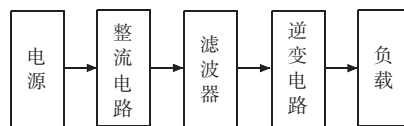


图1 中频电源电路框图

生的,这里以三相6脉动全控桥式整流电路为例来分析其谐波含量。忽略三相桥式晶闸管整流电路换相过程和电流脉动,假定交流侧电抗为0,直流电感为无穷大,利用傅里叶分析方法,将电流负、正两半波的中点作为时间零点,可推出交流侧a相电流的表达式:

$$i_a = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \left[ \sin \omega t - \frac{1}{5} \sin 5\omega t - \frac{1}{7} \sin 7\omega t + \frac{1}{11} \sin 11\omega t + \frac{1}{13} \sin 13\omega t - \frac{1}{17} \sin 17\omega t - \frac{1}{19} \sin 19\omega t \right] \quad (1)$$

式中: $I_d$ 为整流电路直流侧电流的平均值。

由式(1)可知,对于6脉动的中频炉来说,它可产生大量的5次、7次、11次、13次、17次、19次等谐波,可归纳为 $6k \pm 1$  ( $k$ 为正整数)次谐波,各次谐波有效值与谐波次数成反比,且与基波有效值的比值为谐波次数的倒数<sup>[5]</sup>。

## 2 6脉中频炉的建模仿真

利用 PSIM 软件分别建立电流型中频炉和电压型中频炉的仿真模型,其结构如图2和图3所示。电流型中频炉逆变侧由4个晶闸管桥臂组成,电压型中频炉逆变侧由4个IGBT组成。将中频炉加热频率设为1000 Hz,中频炉额定功率 $P$ 为100 kW,电源电压 $U$ 为220 V。根据所建仿真模型,得到中频炉的输入谐波特性:电流型中频炉输入侧a相电网电流波形和频谱如图4所示,电压型中频炉输入侧a相电网电流波形和频谱如图5所示。

仿真分析结果验证了理论上的谐波分析。中频炉采用6脉波整流电路,通过FFT分析得知输入侧电流中含有大量的 $6k \pm 1$ 次谐波,其中5次谐波含量很大,

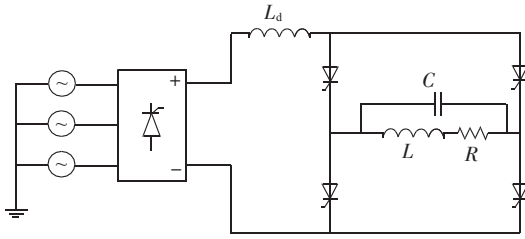


图2 电流型中频炉结构

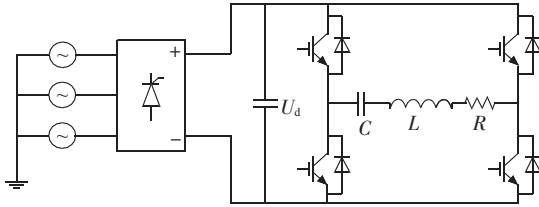
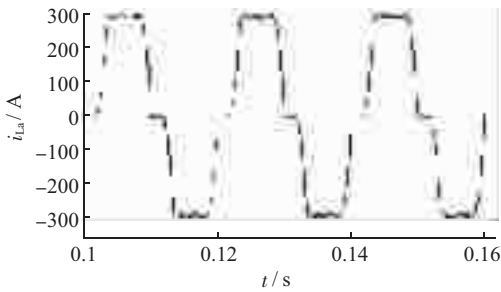
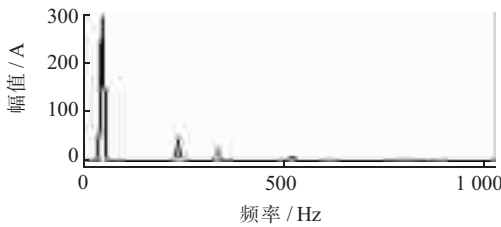


图3 电压型中频炉结构

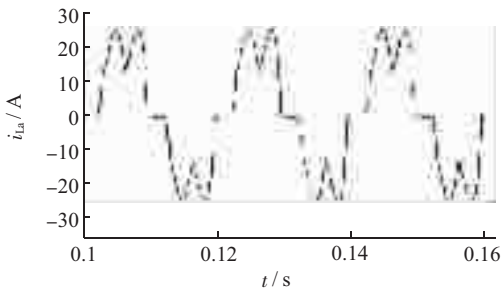


(a) 输入侧电流

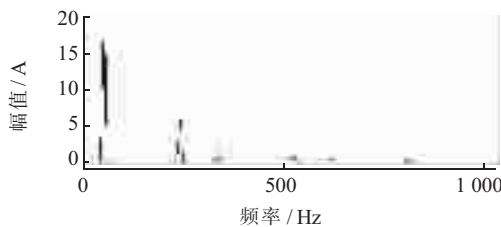


(b) 频谱

图4 电流型中频炉输入侧电流波形和频谱



(a) 输入侧电流



(b) 频谱

图5 电压型中频炉输入侧电流波形和频谱

通过计算得出电流型谐波电流总畸变率为 19.71%，电

压型谐波电流总谐波畸变率为 19.26%，严重超过国家电能质量公用电网谐波标准。

### 3 谐波治理措施

#### 3.1 治理方案

为了使中频炉产生的谐波对公共电网的影响符合设备使用地供电系统的要求，可采取积极有效的治理措施以消除谐波污染，具体治理措施如下<sup>[6]</sup>：

一是变压器采用 Y/Y/Δ 接线方式。对于大容量的中频炉，其供电变压器可以采用 Y/Y/Δ 接线方式，通过改变整流器交流侧变压器的接线形式来抵消较低次的特征谐波。但成本较高。

二是采用 LC 无源滤波器，主要结构是用电容器与电抗器串联起来，组成 LC 串联回路，并联于系统中。这种方法比较传统，既可补偿谐波，又可补偿无功功率，结构简单，一直被广泛使用。但补偿特性受电网阻抗和运行状态的影响，易和系统发生并联谐振，且只能补偿固定频率的谐波，补偿效果也不甚理想。

三是采用 APF，这是谐波抑制比较新的方法<sup>[7]</sup>。APF 是一种动态谐波补偿设备，具有高度可控性和快速响应性，能对频率和幅值都变化的谐波进行跟踪补偿，动态特性好，且补偿特性不受阻抗的影响，谐波补偿效果最佳，因而受到广泛重视。

#### 3.2 APF 工作原理

采用并联型 APF，其主电路结构如图 6 所示，出口处采用 LCL 滤波器连接电网，用于滤除开关次谐波。采用一种新型的基于直流侧电容电压控制和电流闭环反馈控制的算法<sup>[8]</sup>，从瞬时有功和瞬时无能量在系统中传递的角度出发，以调节电网有功能量为主要目标来对输入的电流进行控制。

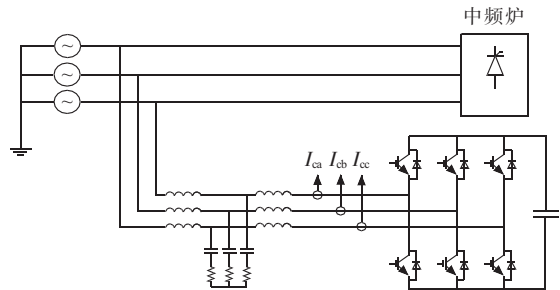


图6 APF 主电路结构

APF 的工作原理如图 7 所示。指令电流运算电路，一方面为达到消除谐波和补偿无功功率的目的，将负载电流  $i_L$  中的谐波电流  $i_{Lh}$  和无功电流  $i_{Lq}$  分离出来，产生调节信号  $i_{cl}^*$ ；另一方面为保持直流侧电容电压稳定，采用 PI 调节控制法，将检测到的电容电压实际值与给定的参考电压值相减之差通过 PI 调节器得到调节信号  $i_{c2}^*$ ，并将  $i_{c2}^*$  作为实际的补偿电流指令值叠加到  $i_{cl}^*$  上，即：

$$i_c = i_{c1}^* + i_{c2}^* \quad (2)$$

作为补偿电流  $i_c$  的调制波信号。通过正弦脉宽调制 (SPWM) 技术产生输出触发脉冲,通过驱动电路驱动主电路的功率开关,使其创建出补偿电流  $i_c$  来跟踪指令电流  $i_c^*$ ,故  $i_c \approx i_c^*$ ,因此电源电流  $i_s$  为:

$$i_s = i_L + i_c \approx i_L + i_c^* \approx i_{LP} \quad (3)$$

即电源电流  $i_s$  中只含有基波有功分量  $i_{LP}$ 。

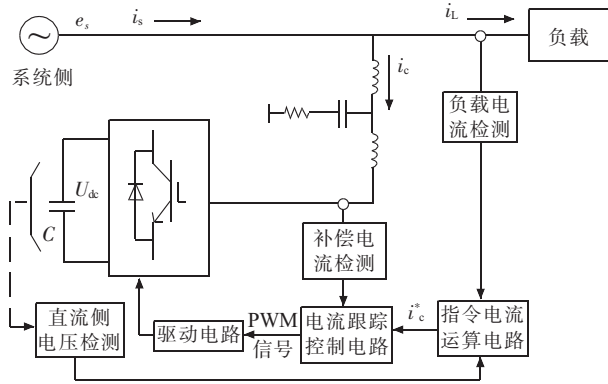


图7 APF工作原理

#### 4 APF 应用于6脉中频炉的谐波治理效果

APF 研制成功后,在苏州振吴电炉有限公司投入运行。该公司装有1台1600 kV·A主变,在该公司380 V母线上,安装了1台100 kW的中频炉,及其他无功补偿设备。380 V/220 kV·A的APF安装在变压器低压侧,即中频炉的接入点。针对6脉中频炉不同阶段的波形进行实测,得到补偿前后的电流波形(波形由恒河DL750录波仪测得);将波形数据导入MATLAB中进行FFT分析,得到补偿前后电源侧电流对应的频谱分析图,如图(8—13)所示。

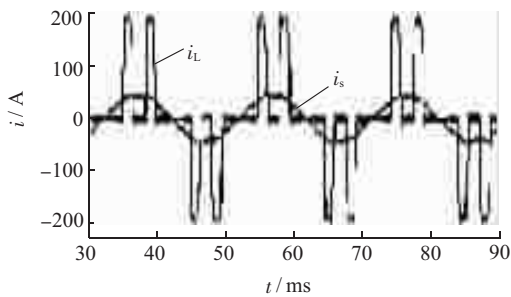
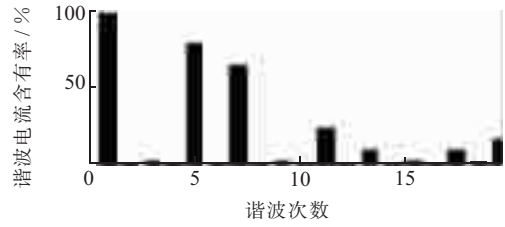
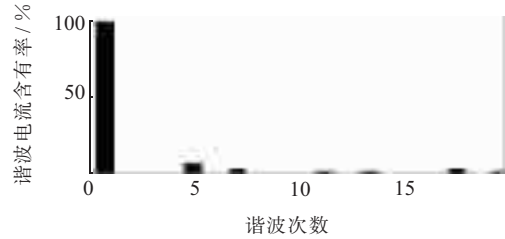


图8 中频炉空载时负载侧和电源侧电流波形

对6脉中频炉在空载、50%负载、满载3种不同阶段的电源侧电流波形及频谱分析可知,在未使用APF进行谐波治理前,中频炉投入运行时,电源侧电流波形出现严重畸变,谐波电流组成主要为5次,7次,11次,13次谐波电流,谐波畸变率较大。针对中频炉满载的典型情况,补偿前系统电流的5次,7次,11次,13次谐波含有率明显超高,尤其5次谐波含有率达到21.49%,7次谐波电流达11.77%。谐波畸变率THD



(a) 负载测



(b) 电源测

图9 中频炉空载时负载侧(THD=110%)和电源侧电流频谱(THD=10.3%)

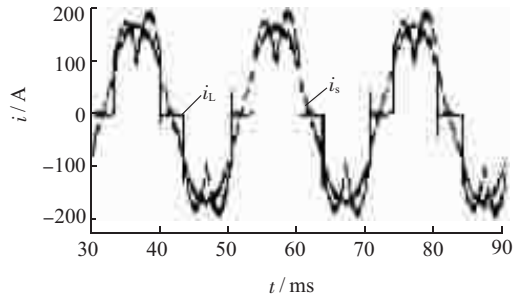
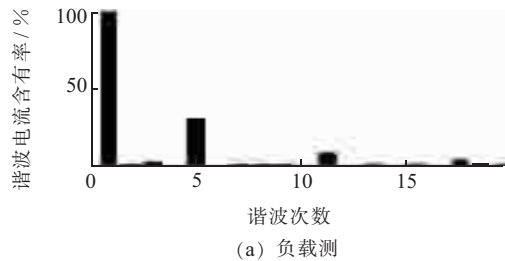
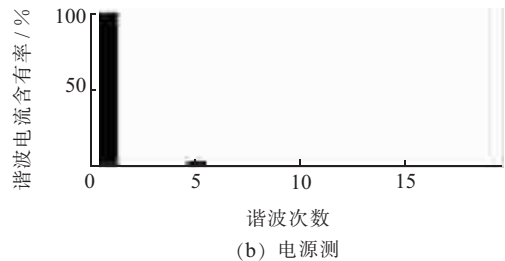


图10 中频炉50%负载时负载侧和电源侧电流波形



(a) 负载测



(b) 电源测

图11 中频炉50%负载时负载侧(THD=34.3%)和电源侧电流频谱(THD=5.4%)

高达27.9%。投入APF进行谐波治理后,5次,7次,11次,13次谐波谐波含有率迅速下降,电流波形接近于正弦波,电能质量得到显著改善。针对中频炉满载的典型情况,补偿后谐波畸变率THD下降到3.8%,符合国家电能质量公用电网谐波标准,补偿效果良好。

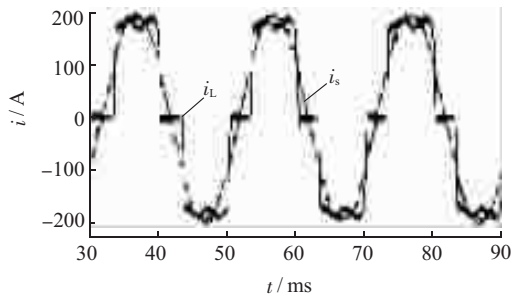
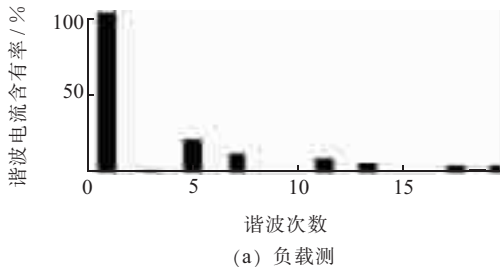
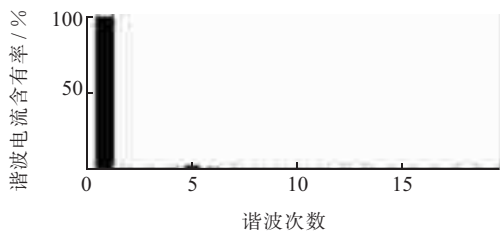


图 12 中频炉满载时负载侧和电源侧电流波形



(a) 负载测



(b) 电源测

图 13 中频炉满载时负载侧( $THD=27.9\%$ )和电源侧电流频谱( $THD=3.8\%$ )

## 5 结束语

将 APF 应用于 6 脉中频炉的谐波治理中,通过对补偿前后的谐波情况进行对比与分析,可知电网的电能质量得到了显著改善,其电流畸变率迅速下降,从而降低了中频炉对电网的谐波污染,并改善了其他用电设备的运行环境,为企业节约大量电能。因此,APF 将在 6 脉中频炉的谐波治理上得到广泛的应用。

参考文献:

- [1] 席文娣.中频炉节能原理与方法的研究[D].山东:山东理工大学,2012.
- [2] 杨润梅.中频炉谐波分析与治理[D].北京:华北电力大学,2009.
- [3] 宋智.钢铁企业电网中利用有源滤波器实现谐波治理[D].上海:上海交通大学,2009.
- [4] 李伟.一种用于炼钢中频炉的谐波抑制装置[D].武汉:华中科技大学,2007.
- [5] 周勇,孙鹏涛,关鹏.中频炉的谐波分析与治理[J].郑州大学学报(工学版),2007,28(2):114-116.
- [6] 李德武,齐延章.中频感应电炉产生的谐波及谐波治理[J].华北电力技术,2010,(6):16-20.
- [7] 顾竞梅.有源电力滤波器在谐波治理中的应用[J].电工技术,2008,(3):27-30.
- [8] 周伟鹏,宋弘.三相电力有源滤波器(APF)控制策略的研究[J].电力科技与环保,2011,27(3):57-59.
- [9] 王亮.中频炉工作原理及谐波治理[J].电工技术,2006(4):47-48.
- [10] 李海洋,杨勇,陈杰,等.一种单相并联混合型有源电力滤波器的研究[J].电力系统保护与控制,2010,38(3):53-57.
- [11] 黄岚.三相四线制系统中有源滤波器控制方法研究[D].武汉:华中科技大学,2008.
- [12] 梁秋艳,陈思羽,周海波.有源滤波器的谐波检测算法及仿真实现[J].佳木斯大学学报(自然科学版),2011,29(2):206-209.
- [13] 吴任国.有源滤波器控制算法研究[J].航天技术,2011,31(6):32-37.
- [14] 杨华,王孝能.中频炉谐波实测及治理改造[J].四川电力技术,2005(S1):49-50.

作者简介:

- 钱长远(1987),男,江苏扬州人,硕士研究生,研究方向为电力电子及其应用、电能质量;
- 汪良坤(1989),男,江苏连云港人,硕士研究生,研究方向为电力电子及其应用、电能质量;
- 赵燕(1991),女,黑龙江黑河人,硕士研究生,研究方向为电力电子及其应用、电能质量;
- 连涛(1989),男,江苏常熟人,硕士研究生,研究方向为电力电子及其应用、电能质量;
- 王宝安(1978),男,江苏扬州人,副教授,研究方向为电力电子在电力系统中的应用、电机拖动。

## The Application of APF in Harmonic Control of the 6-pulse IF Furnace

QIAN Chang-yuan, WANG Liang-kun, ZHAO Yan, LIAN Tao, WANG Bao-an  
(School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** This paper outlines the basic structure and working principle of the IF furnace, and analyzes the characteristics of its harmonic current theoretically. Using PSIM simulation platform, the six-pulse current-and voltage-IF furnace simulation models were built, and the characteristics of its harmonic current were analyzed in the simulation. Three kinds of governance programs were described, and the active filter (APF) was selected to compensate the harmonic of the IF furnace. In the actual project, APF was used to curb the current harmonics of the 6-pulse IF furnace, which achieved some satisfactory results.

**Key words:** APF; compensation for harmonic; IF furnace; power quality