

文章编号:1671-6833(2007)02-0114-03

中频炉的谐波分析与治理

周 勇¹, 孙鹏涛¹, 关 鹏²

(1. 郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 河南长葛市电力公司, 河南 长葛 461500)

摘 要: 简述了中频炉的工作原理和谐波对电力系统的危害, 分析了其整流装置的谐波电流, 给出了河南金汇钢厂中频炉谐波电流和电压的实测数据. 由于中频炉的谐波特征比较明显, 各次谐波电流含量也比较稳定, 可以采用在整流变压器低压侧安装单调谐滤波器和高通滤波器相结合的无源滤波装置来进行谐波治理. 此外, 为了减少中频炉谐波对电网电压的影响, 建议大功率中频炉在接入电网时, 还要尽可能地选择短路容量较大的公共连接点.

关键词: 中频炉; 整流装置; 谐波; 滤波器

中图分类号: TF 083.2 **文献标识码:** A

0 引言

中频感应加热炉(以下简称中频炉)是一种快速稳定的金属加热装置, 它靠变频装置把三相工频交流电转变为单相中频交流电. 变频装置是中频炉的核心设备, 其产生的谐波能使旋转电机产生附加功率损耗和发热, 增加变压器和电网的损耗, 使电能计量仪表产生误差, 对继电保护、自动控制装置等产生干扰, 严重时会引起误动作; 谐波还有可能在无功补偿电容器回路被放大, 从而导致电容器过负荷甚至损坏; 另外谐波还会对相邻的通讯线路产生干扰^[1]. 因此, 大功率中频炉的谐波问题不可忽视. 目前的研究仅限于谐波测试^[2-3], 理论分析还不够深入. 鉴于这种情况, 本文作者将利用傅里叶分析方法并结合谐波实测数据, 分析中频炉的谐波问题, 进而提出对应的治理措施.

1 中频炉的工作原理及其谐波

1.1 中频炉的工作原理

中频炉的电源通常采用 AC-DC-AC 变换方式, 其电路框图如图 1 所示. 先将电网提供的 50 Hz 交流电流由桥式整流电路整为直流, 经过滤波, 然后再通过逆变装置为负载提供中频电流(500~10 000 Hz), 该电流在熔炉的感应线圈中产生中频交变磁场, 使熔炉中的炉料产生感应电

动势, 从而在炉料中产生涡流, 致使炉料被加热升温, 直至熔化.

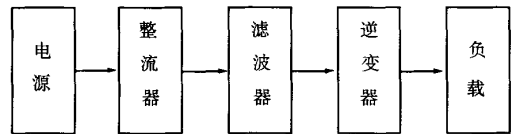


图 1 中频炉电源框图

Fig. 1 The electrical supply frame of intermediate frequency inductive stove

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生的. 以三相 6 脉动全控桥式整流电路为例, 在理想条件下, 整流电路交流侧各相电流可近似地用方波来表示, 利用傅里叶分析方法, 可推出交流侧 a 相电流的表达式为^[4]

$$\begin{aligned} i_a = & \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \left[\sin\omega t - \frac{1}{5}\sin 5\omega t - \frac{1}{7}\sin 7\omega t \right. \\ & \left. + \frac{1}{11}\sin 11\omega t + \frac{1}{13}\sin 13\omega t - \dots \right] \\ = & \sqrt{2} I_1 \sin\omega t + \sum_{\substack{n=6k\pm1 \\ k=1,2,3,\dots}}^{\infty} (-1)^k \sqrt{2} I_n \sin n\omega t \quad (1) \end{aligned}$$

式中: I_d 为整流电路直流侧电流的平均值; $I_1 = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d$

为整流电路交流侧的基波电流有效值; $I_n = \frac{\sqrt{6}}{n\pi} \cdot$

I_d 为整流电路交流侧的 n 次谐波电流有效值.

收稿日期: 2006-10-29; 修订日期: 2006-12-11

基金项目: 河南省自然科学基金资助项目(411010300)

作者简介: 周 勇(1957-), 男, 河南固始县人, 郑州大学教授, 主要从事电力系统谐波方面的教学和研究工作.

从式(1)可知,在整流电路交流侧电流中仅含有 $6k \pm 1$ (k 为正整数)次谐波电流,这些谐波称为三相 6 脉动桥式整流电路的特征谐波,各次谐波电流有效值与基波电流有效值的比值(通常称为 n 次谐波电流含有率)都等于谐波次数 n 的倒数.在实际电路中,由于整流变压器中漏电抗的作用,使得整流阀的导通和关断都需要有一个过渡过程,整流电路交流侧各相电流的波形将变成梯形波,而不再是理想条件下的方波,因此,在实际情况下测到的 n 次谐波电流含有率一般都小于 $1/n$.

如果中频炉的整流电路为 12 脉动整流,其特征谐波的次数为 $(12k \pm 1)$. 依次类推, p 脉动整流电路的特征谐波次数为 $(pk \pm 1)$,各次谐波有效值与基波有效值的比值也都等于谐波次数的倒数.因此,增加整流电路的脉动数,可以减少注入电网的高次谐波.

2 中频炉的谐波测试

为了掌握中频炉注入电网的谐波水平和对电能质量的影响程度,对河南金汇钢厂的中频炉进行了谐波测试.该钢厂的中频炉由两台 35kV 变压器供电,容量均为 4 348 kVA,其中一台为 Dd12 接线,另一台为 Dy11 接线,两台并联运行从而构成 12 脉动整流,表 1 列出了部分谐波电流的实测数据.

从表 1 中可以看出,中频炉 35 kV 侧的谐波电流主要是 11 次和 13 次,这都是 12 脉动整流电路的特征谐波.除此之外,还有一些 3 次、5 次、7 次和 9 次谐波,15 次及以上的各次谐波数值都很小,故没有列出.

根据国家标准 GB/T 14549—93《电能质量 公用电网谐波》(以下简称国标)的规定^[5],注入公共连接点(35kV 母线)的各次谐波电流允许值应按照下面的公式计算:

$$I_n = \frac{S_{k1}}{S_{k2}} I_{np}$$

(2)

式中: S_{k1} 为公共连接点的最小短路容量,单位 MVA,根据供电部门提供的数据可以求出 35kV 母线的最小短路容量 $S_{k1} = 119.85\text{MVA}$; S_{k2} 为基准短路容量,单位 MVA,根据国标取 250MVA; I_{np} 为国标中基准容量下对应电压等级的第 n 次谐波电流允许值,单位 A; I_n 为短路容量为 S_{k1} 时的第 n 次谐波电流允许值,单位 A.

如果公共连接点有多个用户,还要再按照国标推荐的公式(3)计算出同一个公共连接点的第

i 个用户(#3 中频炉)向电网注入的谐波电流允许值.

表 1 中频炉注入电网的谐波电流实测数据

Tab.1 Tested data of harmonic currents injected into the electric network by intermediate frequency inductive stove

A

样本相别	I_1	I_3	I_5	I_7	I_9	I_{11}	I_{13}
1	A	138.22	0.88	2.43	2.65	3.75	7.51
	C	138.88	3.09	0.88	1.32	3.97	5.3
2	A	131.16	1.1	2.21	3.09	3.75	7.29
	C	135.13	2.87	1.1	0.88	3.31	4.86
3	A	129.83	0.66	0.44	2.87	2.21	7.51
	C	133.8	2.43	0.66	1.99	3.97	5.08
4	A	124.97	1.32	2.21	1.77	1.99	6.4
	C	123.87	1.99	1.55	4.2	2.21	5.96
5	A	123.21	2.43	1.32	2.21	4.86	7.51
	C	127.84	2.43	1.1	1.55	3.53	5.52
6	A	123.87	1.99	1.77	3.97	3.31	6.4
	C	125.86	1.99	1.32	3.09	2.21	5.52
7	A	123.65	0.88	1.99	1.99	3.31	6.4
	C	126.74	1.55	1.1	1.77	3.53	5.52
8	A	124.09	2.21	1.55	3.75	3.09	6.62
	C	126.52	2.65	1.32	3.31	1.55	5.3
9	A	123.87	0.44	0.88	2.43	3.31	6.4
	C	125.86	0.66	0.88	1.77	1.99	5.3
10	A	123.43	1.55	2.43	0.88	2.43	5.96
	C	125.64	2.87	1.32	2.21	3.53	4.64

$$I_{ni} = I_n (S_i / S_1)^{1/\alpha}$$

(3)

式中: S_i 为第 i 个用户的用电协议容量,即#3 中频炉变压器容量为 8 700 kVA; S_1 为公共连接点的供电设备容量,即钢厂供电变压器容量为 31 500 kVA; I_n 为国家标准规定的公共连接点允许注入的第 n 次谐波电流值, A; I_{ni} 为公共连接点处第 i 个连接点的第 n 次谐波电流允许值, A; α 为相位迭加系数,随谐波电流次数而定.对 3, 5, 7, 11, 13 次谐波, α 分别取 1.1, 1.2, 1.4, 1.8, 1.9; 对 9 次, 13 次以上的奇次谐波和所有的偶次谐波, α 值均取 2.

根据(2)式和(3)式可以计算出中频炉的各次谐波电流允许值 I_n ,并将其与测试结果 $I_{\text{实}}$ (95% 概率值)一并列入表 2.

表 2 谐波电流测试结果(95%概率值)

Tab.2 The tested result of harmonic currents

谐波次数	I_n/A	$I_{\text{标}}/A$	备注
3	1.79	2.87	超标 1.6 倍
5	1.97	2.21	超标 1.12 倍
7	1.68	3.97	超标 2.36 倍
9	1.03	3.97	超标 3.85 倍
11	1.31	7.29	超标 5.56 倍
13	1.15	4.86	超标 4.23 倍

表 3 35 kV 母线的电压总谐波畸变率 THD_u

Tab.3 The voltage total harmonic distortion of 35kV bus-bar

相别	$THD_u/\%$									
	样本 1	样本 2	样本 3	样本 4	样本 5	样本 6	样本 7	样本 8	样本 9	样本 10
A	9.06	9.64	9.65	8.54	9.71	8.55	8.65	9.22	8.72	8.8
B	8.01	8.51	8.54	9.32	8.75	7.86	8.17	8.14	8.36	8.38
C	8.11	7.93	7.85	8.95	8.49	7.67	7.66	7.25	7.76	8.07

从表 3 中可以看出,35 kV 母线电压的总谐波畸变率大约在 7.5%~9.5%之间,而国标中规定 35 kV 电压等级的电压总谐波畸变率限值为 3.0%,超标 2.5~3.2 倍。

3 谐波治理措施

对于中频炉的谐波问题,可以通过安装滤波器来进行治理。根据滤波器结构和原理,可将其分为有源滤波和无源滤波两种方式^[6]。有源滤波器(APF)本身也是一种电力电子装置,其基本原理是从补偿对象中检测出谐波电流,然后产生一个与谐波电流大小相等而极性相反的补偿电流,从而使注入电网的电流只含基波分量。无源滤波器(PPF)是由电容器、电抗器和电阻通过串并联结合组成的一种补偿装置,其基本原理是通过电容电抗谐振时的低阻抗特性来吸收谐波,从而达到滤波的目的。有源滤波器的滤波效果要优于无源滤波器,适用于谐波成分复杂、谐波量变化较大的环境使用,但其结构复杂,价格昂贵,维护成本也比较高。无源滤波器具有投资少,结构简单的特点,同时还兼有无功补偿的作用,但滤波效果受系统和负荷变化的影响较大,可能在一些情况下还会引起谐波电流放大^[7]。

根据以上的测试与分析,该钢厂中频炉的谐波成分并不复杂,其中以 7 次、9 次、11 次和 13 次谐波电流比较严重,各次谐波电流含量变化不大,故可采用无源滤波装置来吸收中频炉的谐波电流。建议在整流变压器低压侧安装 7 次、9 次、11 次和 13 次 4 种滤波器,其中 7 次、9 次和 11 次滤波器采用单调谐波滤波结构,分别用于滤除 7 次、9

从表 2 中可以看出,该钢厂的中频炉在冶炼过程中,35 kV 侧的 3~13 谐波电流均有不同程度的超标,其中 9 次、11 次和 13 次都超标 3 倍以上。大量的谐波电流注入电网后,必然会引起 35 kV 母线电压的总谐波畸变率超标,表 3 列出了与表 1 对应的 35 kV 母线电压总谐波畸变率的实测值。

次和 11 次谐波电流,13 次滤波器采用二阶高通滤波器结构,用于滤除 13 次及以上的谐波电流。

4 结束语

近年来,中频炉的数量和容量都在增加,由此引起的谐波问题应该引起有关部门的关注。鉴于中频炉的谐波特征比较明显,各次谐波电流含量也比较稳定,可以采用无源滤波装置来进行谐波治理。此外,供电部门在进行大功率中频炉的报装审批时,一定要建议用户采用多脉动整流电源,以减少中频炉谐波对电网的污染,还要尽可能地选择短路容量较大的公共连接点接入,以减少中频炉的谐波对于母线电压的影响。

参考文献:

[1] 吴竞昌,孙树勤,宋文南,等. 电力系统谐波[M]. 北京:水利电力出版社,1988.

[2] 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.

[3] 王国锋. 临安地区典型中频炉用户的谐波测量与分析[J]. 浙江电力,2004,(5):63-65.

[4] 王兆安,黄 俊. 电力电子技术[M]. 北京:机械工业出版社,2001.

[5] 全国电压电流等级和频率标准化技术委员会. GB/T14549-93 电能质量公用电网谐波[S]. 北京:中国标准出版社,1993.

[6] 王兆安,杨 君,刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京:机械工业出版社,2004.

[7] 周 勇,王文峰,赵慧光. 电容器的谐波放大问题分析[J]. 郑州大学学报(工学版),2005,26(2):36-38.

(下转第 120 页)

证,结果发现模拟结果较准确,能反映出重金属随水流的运动和变化过程.

参考文献:

[1] 叶守泽,夏 军,郭生练,等. 水库水环境模拟预测

与评价[M]. 北京:中国水利水电出版社,1997.

[2] 谢东瑜. 感潮河网水污染控制研究——以佛山市水系为例[D]. 广州:中山大学,2006.

[3] 何 用,李义天. 重金属迁移转化模型研究[J]. 水科学进展,2004,15(5):576-583.

Numerical Simulation on Cadmium Pollution Emergency in North River

DOU Ming¹, MA Jun-xia¹, XIE Dong-yu², LI Xiao-hua²

(1. School of Environment and Water Conservancy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Department of Water Resources and Environment, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: In view of the cadmium pollution emergency in North River basin in Dec. 2005, one-dimension heavy metal transport and transformation model in rivers is established. Combined with the observed data of the pollution emergency, the parameters of heavy metal model are calibrated and validated. The conclusions are that the simulation effect between calculated value and observed value is rather good when the concentration value of cadmium in water is comparatively big, and the simulation effect is not ideal when the concentration value of cadmium is comparatively small. Furthermore, cadmium concentration of water body is decreased from upper reaches to lower reaches, and it shows that the heavy metal is subsided into the mud by the absorption and sedimentation actions.

Key words: North River; heavy metal; numerical simulation

(上接第 116 页)

Harmonic Analysis and Suppression of Intermediate Frequency Inductive Stove

ZHOU Yong¹, SUN Peng-tao¹, GUAN Peng²

(1. School of Electric Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Henan Changge Power Supply Company, Changge 461500, China)

Abstract: This paper discusses intermediate frequency inductive stove's principle and the damage that harmonic wave causes to the power system. Harmonic currents caused by rectifying devices are analyzed. Practical datum of Henan Jinhui Steel Plant is presented. Harmonic characteristics of stove is obvious and the content of harmonic currents is also steady, so passive power device equipped in low-voltage side of rectifier transformer should be adopted for suppression of harmonics, which consists of single tuned filter and high-pass filter. In order to reduce its influence on grid voltage, the point of common coupling which has bigger short-circuit capability should be chosen when the stove is connected to electric network.

Key words: intermediate frequency inductive stove; rectifying device; harmonic; power filter