

中频炉谐波分析及仿真

李天然¹ 钱旭盛²

(1. 南京师范大学 电气与自动化工程学院 江苏 南京 210042)

(2. 南京市供电公司 江苏 南京 210008)

[摘要] 介绍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 Matlab/Simulink 仿真工具搭建了采用 12 脉动整流电路的中频炉仿真模型,并仿真分析其谐波电流.仿真结果符合理论预期,验证了该仿真模型的正确性,可作为未投产中频炉的谐波预估工具.基于此模型利用 Matlab/Simulink 对某新建钢厂供电系统进行仿真,分析其潜在的谐波污染.

[关键词] 中频炉;谐波;仿真

[中图分类号] TM761 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-4292(2012)03-0001-05

Harmonic Analysis and Simulation of Medium Frequency Furnace

Li Tianran¹, Qian Xusheng²

(1. School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

(2. Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210008, China)

Abstract: Basic structure and operational principles of medium frequency furnace are introduced in this paper. The characteristics of harmonic currents produced by it are analyzed theoretically. A simulation model of medium frequency furnace with 12-pulsating rectifier is set up with Matlab/Simulink. Its validity is proved for the simulation harmonic currents according to the theoretical anticipation. This model could be used to predict the harmonic of medium frequency furnace not in operation. Based on this model, potential harmonic pollution of a new steel plant is studied by simulation with Matlab/Simulink.

Key words: medium frequency furnace; harmonic; simulation

近年来,中频炉广泛应用于钢铁、冶金行业,在带来巨大经济效益和社会效益的同时,其所引起的谐波问题也日益突出,威胁到电力系统及电力用户的安全^[1].因此,供电营销管理部门要求相关企业在申请用电时,要根据谐波源和系统公用电网参数,进行谐波预测计算.对于超出允许值的,需采取谐波限制措施,与用电设备同时投运.新设备投运后,进行谐波实测复核,合格者才允许正式接网运行.

本文在介绍中频炉工作原理的基础上分析其谐波产生机理,建立中频炉 Simulink 仿真模型,将其用于预估新建钢铁企业的谐波污染.

1 中频炉工作原理

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,采用整流加逆变(即 AC—DC—AC)的变换方式.基本结构如图 1 所示^[2].先将电网的 50 Hz 交流电由桥式整流电路转为直流电,经过滤波后送到逆变器,从而将直流电变成频率可调的交流中频电流(一般在 500 ~ 1 000 Hz).该电流在中频炉的感应线圈中产生中频交变的磁场,使炉中的炉料产生感应电动势,从而在炉料中产生涡流,使炉料被加热升温,直至熔化.

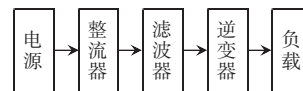


图 1 中频电源基本结构

Fig.1 Basic structure of medium frequency power supply

收稿日期: 2012-06-11.

基金项目: 江苏省高校自然科学基金(11KJB470010).

通讯联系人: 李天然,博士,讲师,研究方向: 电力系统优化运行. E-mail: litianran@njnu.edu.cn

1.1 整流装置及续流二极管

中频电源大多采用三相全控桥式整流电路,将电网输入的50 Hz三相电压整流成脉动的直流电压.其电压脉动频率较高,减轻了直流滤波环节的负担.它还可以工作在有源逆变状态,当中频逆变电路颠覆时,可将储存在滤波电抗中的能量通过有源逆变方式返回电网,保护逆变电路.

续流二极管位于整流器的两端.当整流器中的可控硅关断时,续流二极管可使直流电抗器中储存的能量循环流通.在整流器的两端再并联一个放电电阻,和续流二极管配合使用,为电抗器中的能量释放提供路径.如果没有这条路径,储存在电抗器中的能量将会破坏性地泄放.

1.2 滤波电路

滤波电抗上下分列,通常是共用一个铁心的两组电抗器,把脉动的电压整成直流电流.滤波电抗使整流桥输出的电流连续、纹波减小、可近似地把整流桥的输出电流看成平直电流;其另一个作用是限制中频电流进入工频电网,起到隔离作用.当逆变失败时,整流桥工作在有源逆变状态,起限制浪涌电流的作用.

1.3 逆变器

根据逆变器与谐振回路的连接形式,可分为并联型逆变器和串联型逆变器.目前大多数中频炉已选用串联型逆变电路,如图2所示^[3],其中C为滤波电容,整流输出电压经过电容C滤波成比较平稳的电压,相当于电压源;C1、C2为补偿电容器;R、L是电炉感应圈的等效电阻和电感.

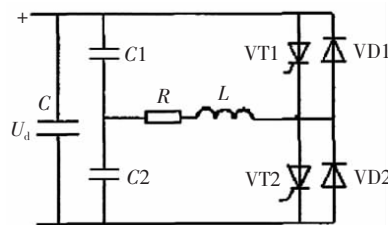


图2 串联型逆变器

Fig.2 Inverter in series connection

2 中频炉谐波产生机理及仿真

中频电源的整流装置会产生大量的高次谐波电流,一般以增加整流脉动数作为抑制谐波的主要措施.通常情况下,对于1000 kW以下的中频电源装置采用6脉动整流;而对于1000 kW以上的中频电源装置多采用12脉动整流.

2.1 6脉动整流电路谐波分析

6脉动整流电路指以6个晶闸管组成的三相全桥整流,如图3所示^[4].忽略三相桥式晶闸管整流电路换相过程和电流脉动,假定交流侧电抗为零,直流电感为无穷大,延迟触发角 α 为零,则交流侧电流傅里叶级数展开为:

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

由式(1)可知,系统含5、7、11、13等 $6k \pm 1$ (k 为正整数)次谐波.

2.2 12脉动整流电路谐波分析

12脉动整流电路由两组6脉动的三相桥并联组成,如图4所示^[4].两组桥的交流侧分别接到三绕组变压器的两个二次绕组上,一个绕组是星型接法,另一个是三角形接法,两者线电压相位差为 30° .

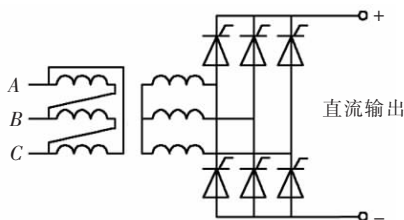


图3 6脉动整流电路

Fig.3 6-pulsating rectifier

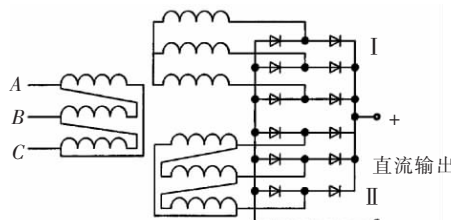


图4 12脉动整流电路

Fig.4 12-pulsating rectifier

若三绕组变压器满足以下理想条件^[5]:

① 低压侧的负载同时运行且完全平衡; ② 变压器制造时相角差为 30° ; ③ 变压器制造时阻抗完全一样; ④ 变压器二次容量完全一样.

则桥I的网侧电流傅里叶级数展开为:

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

桥 II 的网侧电流傅里叶级数展开为:

$$i_{IIA} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \left(\sin\omega t + \frac{1}{5}\sin 5\omega t + \frac{1}{7}\sin 7\omega t + \frac{1}{11}\sin 11\omega t + \frac{1}{13}\sin 13\omega t + \frac{1}{17}\sin 17\omega t + \frac{1}{19}\sin 19\omega t + \cdots \right). \quad (3)$$

由式(2)、(3)合成网侧电流为:

$$i_A = i_{IA} + i_{IIA} = \frac{4\sqrt{3}}{\pi} I_d \left(\sin\omega t + \frac{1}{11}\sin 11\omega t + \frac{1}{13}\sin 13\omega t + \cdots \right). \quad (4)$$

由式(4)可见,两个整流桥产生的5、7、17、19次谐波相互抵消,注入电网的只有 $12k \pm 1$ (k 为正整数)次谐波,即11、13、23、25等各次谐波.但由于上述理想条件很难满足,所以实际上5、7、17、19等次谐波难以完全消除.

2.3 中频炉 Simulink 仿真

依据上述分析,利用 Matlab/Simulink^[6]搭建12脉整流中频炉仿真模型,如图5所示.以电压为750 V的3T/2 500 kW中频炉为例设置参数,进行仿真,可得网侧A相电流波形如图6所示,其谐波频谱分析见图7.可以看出其谐波主要成分为11、13次谐波,符合2.2节理论分析结果,验证了该模型的正确性,可将该模型用于未投产中频炉的谐波分析.

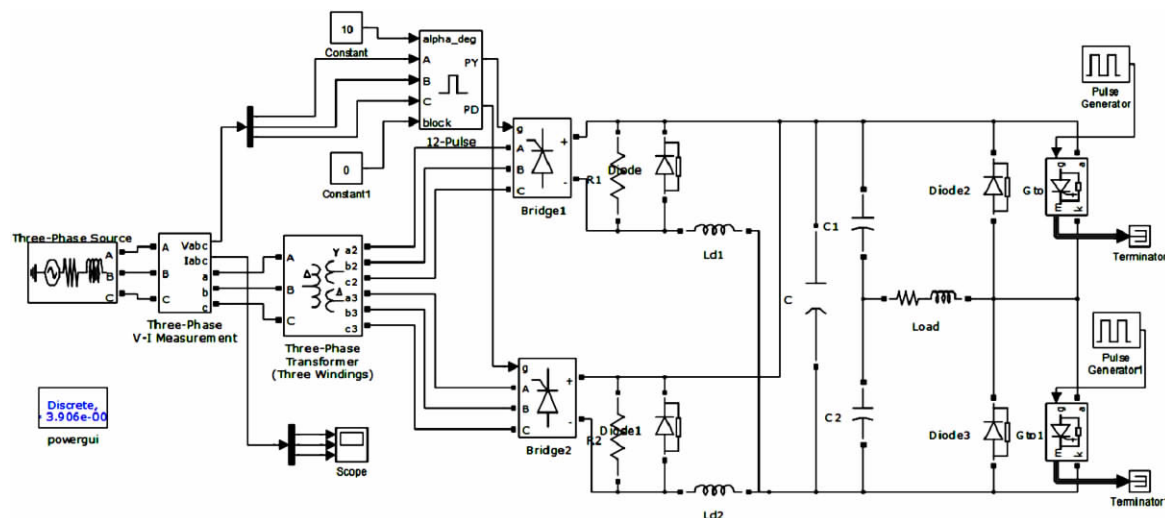


图5 中频炉 Simulink 仿真模型

Fig.5 Simulink model of medium frequency furnace

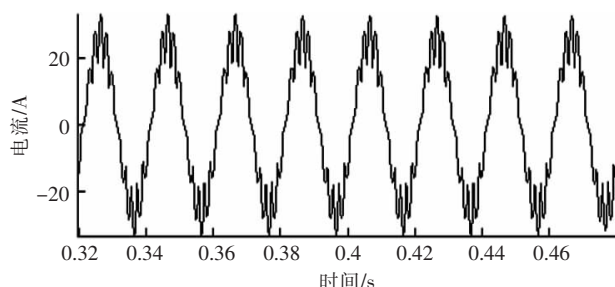


图6 网侧电流波形

Fig.6 Grid-side current waveform

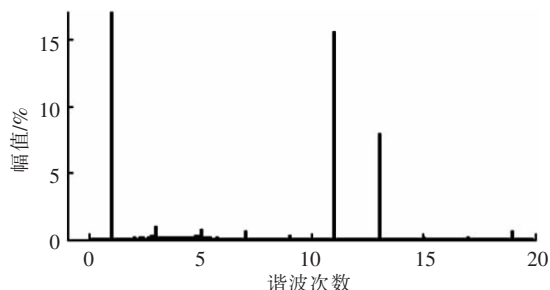


图7 中频炉谐波电流频谱分析

Fig.7 Spectrum analysis of harmonic current of medium frequency furnace

3 实例仿真分析

南京某新建钢铁厂有 6 台 S11-2000/35/0.75 三绕组变压器,每个炉变带 1 台 3T/2 500 kW 中频炉。由于尚未投产,谐波电流无法实测,因此考虑采用仿真方法评估其潜在的谐波污染。

3.1 供电系统仿真

将图 6 中的中频炉模型封装为子系统后,基于其构建该厂供电系统仿真模型如图 8 所示。以 6 台中频炉同时处于工作状态设为 35 kV 侧谐波电流检测时刻,谐波电流分析结果见图 9,谐波畸变率 THD = 11.12%。其中基波以及 3、5、7、11、13 次谐波电流数值见表 1。

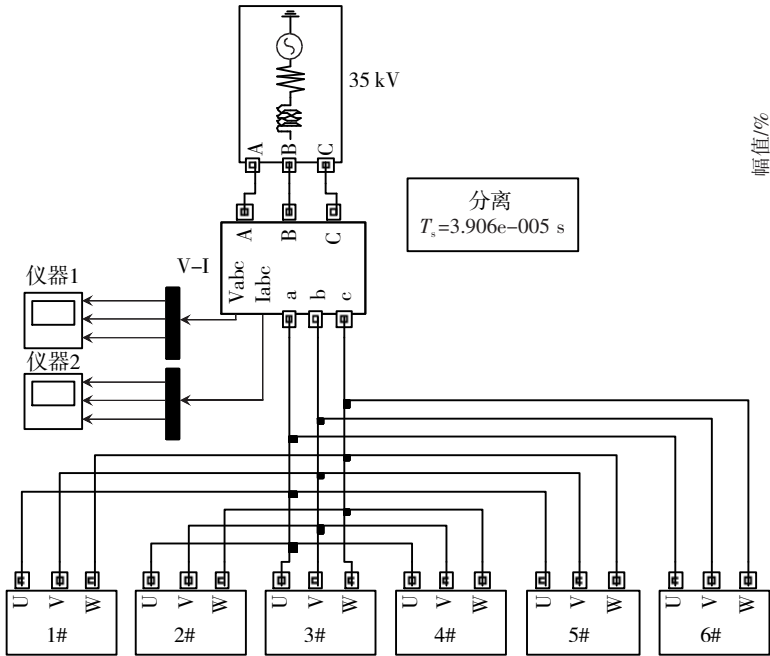


图 8 某钢铁厂供电系统仿真模型
Fig.8 Simulation model of a steel plant power supply system

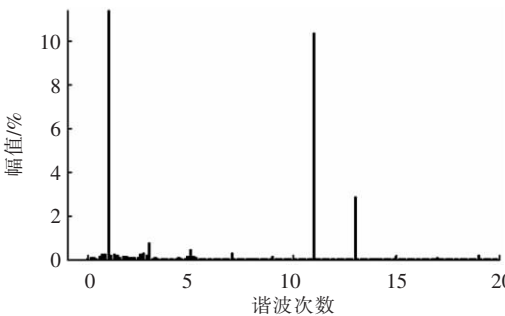


图 9 谐波电流频谱分析
Fig.9 Spectrum analysis of harmonic current

表 1 主要谐波电流数值
Table 1 Main harmonic current values

谐波次数	电流/A	百分值/%
1	114.43	100
3	1.04	0.91
5	0.74	0.65
7	0.49	0.43
11	11.90	10.40
13	3.28	2.86

3.2 谐波电流分析

根据国标《电能质量公用电网谐波》(GB/T14549-93)规定^[7],按照下式(5)计算出注入公共连接点(这里为上级变电所 35 kV 母线)的各次谐波电流允许值为:

$$I_h = (S_{k1}/S_{k2}) \times I_{hp}, \tag{5}$$

式中 S_{k1} 为公共连接点的最小短路容量/MVA; S_{k2} 为基准短路容量/MVA; 对于 35 kV 系统,其值为 250/MVA; I_{hp} 为标准中第 h 次谐波电流允许值/A; I_h 为短路容量为 S_{k1} 时的第 h 次谐波电流允许值。

再按照式(6)计算出同一公共连接点第 i 个用户向电网注入的谐波电流允许值。

$$I_{hi} = I_h (S_i/S_1)^{1/\alpha}, \tag{6}$$

式中 I_{hi} 为公共接点处第 i 个用户的第 h 次谐波电流允许值/A; I_h 为按式(5)换算的公共节点第 h 次谐波电流允许值/A; S_i 为第 i 个用户的用电协议容量/MVA; S_1 为公共接点的供电设备容量/MVA; α 为相位迭加系数,按表 2 取值^[7]。

利用式(5)和(6)计算可得该厂注入公共连接点的谐波电流允许值,如表 3 所示。对比表 1 及表 3 可见该厂的 11、13 次谐波电流超标,尤其是 11 次严重超标。因此该厂必须实施谐波治理,方可投运。

表 2 相位迭加系数
Table 2 Coefficient of phase superposition

谐波次数	3	5	7	11	13	9(>13) 偶次
α	1.1	1.2	1.4	1.8	1.9	2

表 3 谐波电流允许值
Table 3 Allowable value of harmonic current

谐波次数	3	5	7	11	13
允许值(A)	3.11	3.53	3.12	2.56	2.35

注: $S_{k1} = 280$ MVA, $S_i = 15$ MVA, $S_1 = 75$ MVA.

4 结语

近年来,我国钢铁、冶金行业使用中频炉的数量和容量都在增加,由此引起的谐波问题受到供电部门的关注.本文在介绍中频炉工作原理的基础上,分析其谐波产生原因,并构建 Matlab/Simulink 仿真模型,其仿真结果符合理论预期.该模型可作为钢铁企业申请用电时预估其谐波危害的分析工具.利用此模型分析了南京某新建钢厂的潜在谐波污染,分析结果说明该厂必须进行谐波治理后方可投产.

[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,2005: 40-44.
Wang Zhaoan, Yang Jun, Liu Jinjun, et al. Harmonic Suppression and Reactive Power Compensation[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2005: 40-44. (in Chinese)
- [2] 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): 113-116.
Zhou Yong, Sun Pengtao, Guan Peng. Harmonic analysis and suppression of intermediate frequency inductive stove[J]. Journal of Zhengzhou University: Engineering Science Edition, 2007 28(2): 113-116. (in Chinese)
- [3] 崔景萍,邹黎,邹雪. 中频电炉串联半桥逆变器调功原理分析[J]. 山东理工大学学报: 自然科学版,2009 23(1): 97-99.
Cui Jingping, Zou Li, Zou Xue. Analysis on the power adjustment principle of series half-bridge inverter main circuit of Thyristor intermediate frequency furnace[J]. Journal of Shandong University of Technology: Natural Science Edition, 2009 23(1): 97-99. (in Chinese)
- [4] 王兆安,黄俊. 电力电子技术[M]. 北京: 机械工业出版社,2000: 56-80.
Wang Zhaoan, Huang Jun. Power Electronics Technology[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2000: 56-80. (in Chinese)
- [5] 潘双双. 中频电炉谐波实测分析及抑制措施[J]. 低压电器,2008(19): 40-43.
Pan Shuangshuang. Actual measurement analysis and measures to suppress harmonic of electrical induction furnace[J]. Low Voltage Apparatus, 2008(19): 40-43. (in Chinese)
- [6] 王晶,翁国庆,张有兵. 电力系统的 MATLAB/SIMULINK 仿真与应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社,2008: 2-5.
Wang Jing, Weng Guoqing, Zhang Youbing. MATLAB/SIMULINK Simulation and Application of Power System[M]. Xi'an: Xidian University Publishing House, 2008: 2-5. (in Chinese)
- [7] 能源部电力司. GB/T 14549-1993 电能质量 公用电网谐波[S]. 北京: 中国标准出版社,1994: 1-5.
The Department of Electric Power of Ministry of Energy. GB/T 14549-1993, Quality of electric energy supply-Harmonics in public supply network[S]. Beijing: Standards Press of China, 1994: 1-5. (in Chinese)

[责任编辑: 刘 健]