

钢厂中频炉系统谐波分析及治理研究

肖 坤 赵彩虹

(南京师范大学 电气与自动化工程学院 江苏 南京 210042)

[摘要] 介绍中频炉的基本原理并建立了钢厂非线性负载中频炉系统的仿真模型,在分析现有谐波治理方案和此系统产生谐波特点的基础上,采用改进的谐波检测方法检测谐波电流,基于某钢厂中频炉谐波治理选用混合电力滤波器来解决此系统的谐波问题,该方法具有成本低、可以综合补偿电能质量的优点,实际结果证明了该方法的有效性。

[关键词] 电能质量, MATLAB 仿真, 瞬时无功功率理论, 改进的谐波检测, 电力滤波器

[中图分类号] TM761 [文献标志码] A [文章编号] 1672-4292(2012)04-0011-05

Harmonic Analysis and Control of the Medium Frequency Induction Furnace

Xiao Kun Zhao Caihong

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

Abstract: The paper introduces the basic principle of medium frequency induction melting furnace and builds up the steel mills nonlinear load of intermediate frequency furnace system simulation model. Based on the analysis of the existing harmonic treatment schemes and the harmonic characteristics produced by the system, through technical economic analysis, the paper chooses a mixture of active power filter system to solve the harmonic problem. This method is lower in cost has the advantages of compensating comprehensive power quality. The actual results prove the effectiveness of this method.

Key words: power quality, MATLAB simulation, instantaneous reactive power theory, improved harmonic detection, power filter

中频感应炉广泛应用于钢铁、冶金行业,在带来巨大效益的同时,其所引起的无功和谐波问题也日趋严重,无论对于电力系统还是电力用户,这都十分重要,因此也成为近年来各方面关注的热点。中频炉的工作原理是将三相工频交流电经过整流电路变为直流电,再经过逆变电路输出为中频(500 ~ 10 000 Hz)的交流电。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,使炉料被加热升温,直至熔化。

中频电源主要分为主电路和控制电路两部分,主电路采用三相全控整流输出为直流,再经过逆变电路逆变输出为负载所需要频率的中频交流电,整流器件为晶闸管,应用电路多数为 6 脉波或 12 脉波整流电路,功率因数变化范围为 0.45 ~ 0.95。从逆变器部分看,国内绝大多数逆变器采用桥式电路,电网提供工频电源,经过三相全控桥整流电流反馈型并联逆变电路。在并联逆变器中,由感应线圈和炉料组成的负载等效模型与中频电容并联,目的是提高功率因数,工作在接近谐振状态,中频感应电源设备为电炉提供中频大电流,使熔炼炉具备了良好的加热功能。目前,相关文献对中频炉谐波的分析仅限于谐波实测分析或测试,理论分析还不够深入,国内对如谐波治理的措施主要是单一的无源滤波器和有源滤波器^[1-2],本文介绍中频炉的基本原理并建立了钢厂非线性负载中频炉系统的仿真模型,分析现有谐波治理方案和此系统产生的谐波特性,在考虑成本和经济效益及补偿效果的基础上,基于某钢厂中频炉谐波治理选用混合电力滤波器来解决此系统的谐波问题,该方法具有成本低、可以综合补偿电能质量等优点,实际结果证明了该

收稿日期:2012-07-15.

通讯联系人:赵彩虹,教授,研究方向:电力系统继电保护和电能质量, E-mail: 61081@njnu.edu.cn

方法的有效性.

1 中频炉仿真模型建立和谐波分析

该模型的整流变压器采用 Dddyn 接线的三绕组变压器,整流装置采用 12 脉动整流,它由两组 6 脉动的三相桥并联组成,两组整流桥的交流侧分别接到三绕组变压器的两个二次绕组上,一个绕组是三角形接法,另一个是星型接法.两者线电压互差 30° ,为了使整流桥中的换流器件能够可靠关断,在每个整流桥的后面均并联了放电电阻和放电二极管^[1].在直流电路部分,设置了平波电抗器,一则可以限制故障电流,二则可以和滤波电容一起减小直流电流的纹波量;并且平波电抗分别设置在两个 6 脉动整流器出口,这样可以使两个并联的整流器电流更均衡.逆变电路采用单相半桥逆变方式,逆变电路中采用适合大功率工作的 GTO 换流器件,逆变电路两桥臂均并联反馈二极管.给交流侧向直流侧反馈无功能量提供通道^[2-5],建立仿真模型如图 1 所示,仿真得到电压电流波形如图 2 所示.

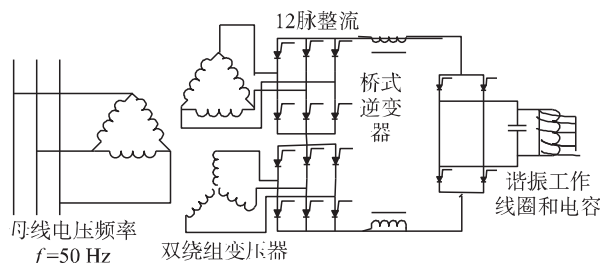


图 1 中频炉供电的仿真模型

Fig. 1 Simulation model of the medium frequency induction furnace

如果给定的函数是周期的同时又满足狄里赫利条件,那么它就可以展开成一个收敛级数 $f(t)$, 展开为:

$$\begin{aligned} f(t) &= a_0 + (a_1 \cos \omega_1 t + b_1 \sin \omega_1 t) + \\ &\quad (a_2 \cos 2\omega_1 t + b_2 \sin 2\omega_1 t) + \dots + \\ &\quad (a_k \cos k\omega_1 t + b_k \sin k\omega_1 t) + \dots = \\ &\quad A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_{km} \cos(k\omega_1 t + \psi_k), \\ A_0 &= a_0, A_{km} = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}, a_k = A_{km} \cos \psi_k, \\ b_k &= -A_{km} \sin \psi_k, \tan \psi_k = \frac{-b_k}{a_k}. \end{aligned} \quad (1)$$

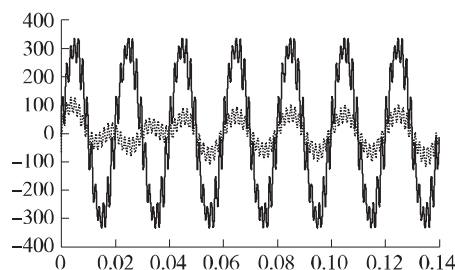


图 2 电网侧电压电流波形

Fig. 2 Grid side voltage and current waveforms

以上的无穷三角级数为傅里叶级数,式(1)的第一项 A_0 为周期函数 $f(t)$ 的恒定分量(或直流分量);第二项 $A_{1m} \cos(\omega_1 t + \psi_1)$ 为基波分量,其他各项统称为高次谐波.三相桥式整流电路,若忽略换相过程和电流脉动的情况, a 相电流为:

$$\begin{aligned} i_a &= \frac{2\sqrt{3}}{\pi} id \left(\sin \omega t - \frac{1}{5} \sin 5\omega t - \frac{1}{7} \sin 7\omega t + \frac{1}{11} \sin 11\omega t + \frac{1}{13} \sin 13\omega t - \dots \right) = \\ &\quad \sqrt{2} i_1 \sin \omega t + \sum_{n=6k+1}^{\infty} (-1)^k \sqrt{2} i_n \sin n\omega t, \end{aligned} \quad (3)$$

式中: id 为整流电路直流侧电流的平均值; $i_1 = \frac{\sqrt{6}}{\pi} id$ 为整流电路交流侧的基波电流有效值; $i_n = \frac{\sqrt{6}}{n\pi} id$ 为整流电路交流侧的 n 次谐波电流有效值;从式(3)可知,在整流电路交流侧电流中仅含有 $6k \pm 1$ 次谐波电流. n 次谐波含有率 HRI_n 为:

$HRI_n = \frac{I_n}{I_1} \times 100\%$ (1-4) I_n 为第 n 次谐波电流有效值; I_1 为基波电流有效值.取 $k=1$ 时,就会有 $n=5$ 和 $n=7$,则可算出 $HRI_5 = 20\%$, $HRI_7 = 14.3\%$,取 $k=2$ 时,就会有 $n=11$ 和 $n=13$,同样可算出 $HRI_{11} = 9.0\%$, $HRI_{13} = 7.7\%$. 电流谐波总畸变率 THD_i 为:

$$THD_i = \frac{I_n}{I_1} \times 100\%, \quad (4)$$

式中 I_n 为总谐波电流有效值,忽略 13 次以上谐波则可算出 $THD_i = 23.5\%$,从以上分析可以看到,带整流桥设备在电网中产生了高次谐波,一般情况下电流谐波总畸变率 THD_i 大于 20%.在实际工作过程中,整流桥设备的路数相当多,当可控硅移相控制角较大时,电流谐波总畸变率 THD_i 可达 30% ~ 60%.从式(4)

中可以看出,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,即 5 次、7 次、11 次、13 次谐波,这些次数的谐波电流成为三相 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有效值的比率为谐波次数 n 的倒数 ($1/n$),通过两个相角差 30° 的变压器分别供电的两个三相整流桥可构成 12 脉动整流电路^[3-6]。

2 中频炉谐波治理方案

在某钢厂第一铸造车间中频炉上进行了试验测试研究如图 3 所示。

该公司供电负荷由系统 35 kV 进线馈供,35 kV 母线(PCC 点)最小短路容量设定 300 MVA,在厂内 35 kV 母线上接有一台主变变压器,容量为 16 000 kVA、35/10 kV,在 10 kV 母线下接有 4 台变压器,其中 1#整流变压器容量为 6 300 kVA,所带负荷为 12 脉动 10T 中频熔炼炉;2#整流变压器容量为 6 300 kVA,所带负荷为 10 T 电弧炉;3#整流变压器容量为 4 000 kVA,所带负荷为 10T 精炼炉;4#电力变压器容量为 200 kVA、10/0.4 kV,所带负荷为全厂内照明及动力负荷,中频炉和电弧炉不同时生产,当前功率因数为 0.75~0.85。谐波测试显示为含有 5、7、11、13、15 谐波,总谐波畸变率达到 35%。

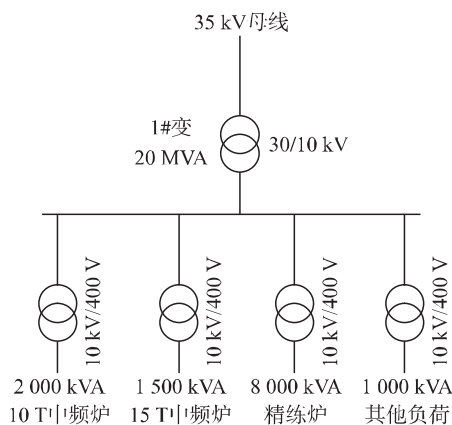


图3 钢厂供电系统图

Fig. 3 Steel supply system diagram

LC 无源滤波器的设计主要是电抗器和电容器参数的选择,滤波电容器容量的选择主要由基波无功补偿容量来确定,然后根据串联谐振频率确定电抗器的基波电抗率,为了防止完全谐振时滤波器支路严重过电流,并考虑到由于元件制造误差和电网频率变化等因素引起的等值频率偏差,单调谐滤波器设计在偏谐工作状态下。有源滤波器(APF)本身也是一种电力电子装置,它能对大小和频率都变化的谐波以及变化的无功进行补偿。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同极性相反的补偿电流与电网提供的电流叠加,从而使注入电网的总的电流只含基波分量。无源滤波器的采样电流一般取变压器低压侧进线,以主变功率因数为参照,功率因数低的时候才投入,高的时候不会投入,因此对于一些产生大量谐波,但功率因数高的负载并不适用,如中频炉。有源滤波器的输出是以谐波为参照,不受负载类型和功率因数的影响,无源滤波器设计谐波的滤除和无功补偿二者很难兼得,而有源滤波器滤波和补偿可以同时选择,选型简单可靠。一个无源滤波柜只能滤除某一次谐波,因此若要滤除大部分谐波,必须安装多个主要次数的无源滤波器,占地多、噪音巨大,存在谐振的危险,发热严重时内部的负荷隔离开关完全烧毁,电抗器绕组会因过电压导致绕组被击穿,滤波效果不理想。而有源滤波器滤波范围广,一台有源滤波器可以滤除数十次谐波,而有源滤波器不改变系统阻抗,不会与系统发生谐振^[7-10]。该治理方案为在 10 kV 母线安装 APF 和 FC 装置来综合治理该厂谐波问

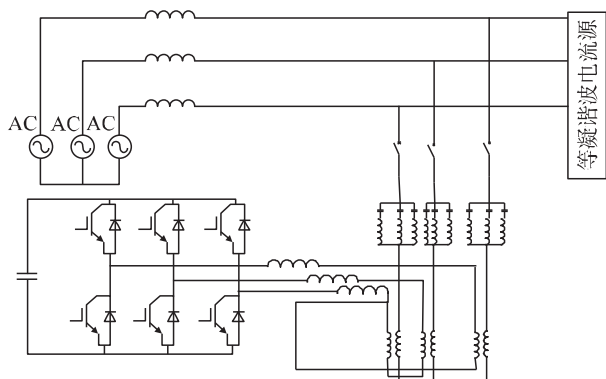


图4 中频炉谐波治理的 matlab 仿真模型

Fig. 4 Simulation model of the medium frequency induction furnace with filters

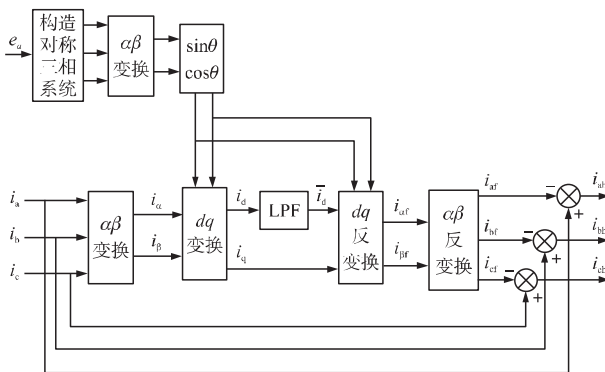


图5 改进的 i_d-i_q 法检测电路原理图

Fig. 5 Schematic circuit of current detection based on improved i_d-i_q operation mode

题 建立治理方案的 MATLAB 仿真模型.

本文建立治理方案的 MATLAB 仿真模型,采用 APF 和 FC 装置来综合治理该厂谐波问题,在传统的检测法基础上,提出了一种新的检测方法,其基本思想就是利用虚拟对称三相系统的合成电压矢量来形成旋转坐标系这一思路.该方法不需要锁相环,消除了 PLL 产生的不利影响,且在电网电压不平衡条件下能够实现同步旋转角实时跟踪电网电压基波正序频率的变化^[10-14].

3 治理效果分析

3.1 仿真结果图

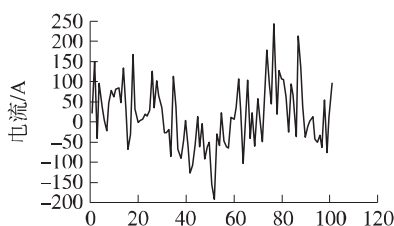


图6 电网侧谐波电流波形
Fig.6 Grid side voltage and current waveforms

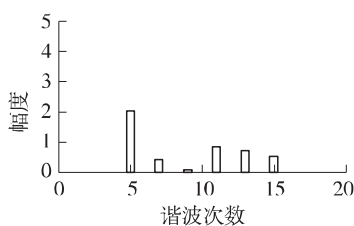


图7 电网侧谐波电流波形 FFT 分析
Fig.7 Grid side current FFT harmonic analysis with filters

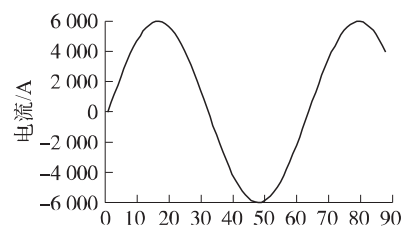


图8 治理后电网侧谐波电流波形
Fig.8 Grid current waveforms FFT harmonic

3.2 治理结果图

其中 FC 装置包括 H5、H7、Hh 共 3 组滤波支路,安装容量 7 900 kvar,其基波输出容量约 5 140 kvar.该容量可兼顾中频炉、电弧炉、精炼炉工作时基本无功的需要.滤波电容器投用后补偿容量 4 817 kvar,按补偿前自然功率因数 0.80,总有功平均功率为 7 995.3 kvar 计算,功率因数可补偿至 0.956,同时改善电能质量,提高了电网的安全性和可靠性,变压器的平均负荷电流减小 25%,相当于变压器运行容量降低了 25%;变压器铜损减少 $1 - (0.80/0.956) \times 2 = 67\%$;变压器温度降到 65℃ 左右;每月节省电量 40 kW $\times 67\% \times 12 \text{ h} \times 30 \text{ d} = 9\,648 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{月}$ (40 kW-2 台变压器的合计铜耗,每天工作 12 h).根据电能质量国家标准和用户要求,滤波器投运后供电系统电能质量达到如下技术指标: (1) 35 kV 谐波电压总畸变率 THD = 0.785%; 10 kV THD = 3.74%,谐波电流总畸变率 THD = 1.783%; (2) 功率因数 $\cos\Phi \geq 0.95$ (3) 谐波电流的治理满足 GB/T14549-1993 的要求; (4) 电压畸变率满足 GB/T14549-1993 的要求; (5) 根据以上的计算,滤波装置投入后,未出现影响装置安全运行的谐振现象.

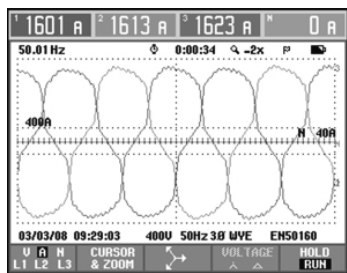


图9 实测电网侧电压电流波形
Fig.9 On-site grid side voltage and current waveforms

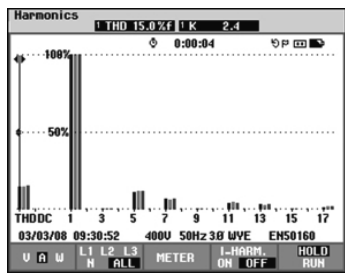


图10 实测电网侧电流波形 FFT 分析
Fig.10 On-site grid side current FFT analysis

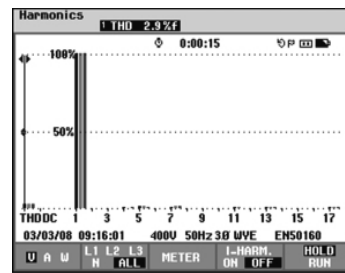


图11 实测治理后电流的 FFT 谐波分析
Fig.11 On-site grid current waveforms FFT harmonic analysis with filters

4 结语

本文首先建立了钢厂非线性负载中频炉系统的仿真模型,基于理论计算和某钢厂中频炉现场测试结果证明检测的有效性,在分析现有谐波治理方案及经济效益和此系统产生的谐波特点的基础上选用混合电力滤波器来解决此系统的谐波问题,实际投运后经现场测试该中频炉的整流装置向电网注入的谐波含量满足了电能质量公用电网谐波国标 GB/T14549-1993 的要求.

[参考文献](References)

- [1] 王兆安 杨君. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
Wang Zhaoan, Yang Jun. Harmonic Suppression and Reactive Power Compensation[M]. Beijing: China Machine Press, 1998. (in Chinese)
- [2] 金广厚 李庚银 周明. 国内外电能质量控制水平及管理策略[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(1): 1-5.
Jin Guanghou, Li Gengyin, Zhou Ming. Power quality mitigation level and management policy in domestic and foreign electric utilities[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(1): 1-5. (in Chinese)
- [3] 祁强 张广溢. 三相 PWM 整流技术研究与仿真[J]. 系统仿真学报, 2009, 4(5): 81-84.
Qi Qiang, Zhang Guangyi. Research and simulation on the three phase PWM rectifier technique[J]. System Simulation Technology, 2009, 4(5): 81-84. (in Chinese)
- [4] 韦莉 张逸成 沈玉琢 等. 基于 MATLAB 的大功率电源系统的建模与仿真[J]. 系统仿真技术, 2009, 5(3): 202-207.
Wei Li, Zhang Yicheng, Shen Yuzhuo, et al. Modelling and simulation of high power system based on MATLAB[J]. System Simulation Technology, 2009, 5(3): 202-207. (in Chinese)
- [5] 孙晓娟 靳红梅. 基于 MATLAB 的静止无功发生器系统仿真[J]. 电子工业专用设备, 2005, 12(3): 60-64.
Sun Xiaojuan, Jin Hongmei. System simulation of STATCOM based on MATLAB[J]. Equipment for Electronic Products Manufacturing, 2005, 12(3): 60-64. (in Chinese)
- [6] Mihalic R, Zunko P, Povh D. Improvement of transient stability using undefined power flow controller[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(1): 485-492.
- [7] Zhang Bo, Yi Songwen, He Xiaoming. A novel harmonic current detection technique based on a generalized dq coordinate transform for active power filter and fault protection of power system[C]// Proceedings of the 31st International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management. Hong Kong, 2000: 543-547.
- [8] Sebastien Mariethoz, Alfred C. Rufer. Open loop and closed loop spectral frequency active filtering[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2002, 17(4): 564-573.
- [9] Vasco Soares, Pedro Verdelho, Gil Marques. Active power filter control circuit based on the instantaneous active and reactive current i_d-i_q method[C]// IEEE Annual Power Electronics Specialist Conference. St. Louis, Mo, 1997: 1096-1101.
- [10] Vasco Soares, Pedro Verdelho, Gil D Marques. An instantaneous active and reactive current component method for active filters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2000, 15(4): 660-669.
- [11] 陈东华 谢少军 周波. 用于有源电力滤波器谐波和无功电流检测的一种改进同步参考坐标法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(20): 62-67.
Chen Donghua, Xie Shaojun, Zhou Bo. An improved synchronous references frame method for harmonics and reactive currents detection of active power filters[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(20): 62-67. (in Chinese)
- [12] 孙卓 姜新建 朱东起. 电气化铁路中谐波、无功、负序电流的实时检测方法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(15): 53-57.
Sun Zhuo, Jiang Xinjian, Zhu Dongqi. Detecting methods of reactive power, harmonic and negative-sequence current in electrified railway systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(15): 53-57. (in Chinese)
- [13] 肖坤 赵彩虹. 基于 Simulink 的 STATCOM 的控制仿真研究[J]. 南京师范大学学报: 工程技术版, 2011, 11(4): 6-11.
Xiao Kun, Zhao Caihong. Study on control system about STATCOM based on simulink[J]. Journal of Nanjing Normal University: Engineering and Technology Edition, 2011, 11(4): 6-11. (in Chinese)
- [14] 周胜军 林海雪. 并联电容器装置中的串联电抗选择[J]. 供用电, 2001, 18(5): 15-18.
Zhou Shengjun, Lin Haixue. Choice of series reactance for shunt connected capacitor banks[J]. Distribution and Utilization, 2001, 18(5): 15-18. (in Chinese)

[责任编辑: 刘 健]