

# 用于谐波分析研究的电弧炉系统的模型和仿真

郭继红, 颜湘武

(华北电力大学电气工程学院, 河北 保定 071003)

摘要: 为电弧炉系统谐波分析提供了一种新思路, 在理论上作了研究, 并用实例证明了它的可行性。首先根据电弧电阻的随机性公式, 用 Matlab 仿真得出电弧电阻随时间变化曲线, 再用对实际电弧炉系统进行仿真和谐波分析, 最终得到电弧炉系统的各次谐波含量, 与实际数据比较, 误差较小, 因此认为此方法是可行的。

关键词: 电弧炉; 谐波; 电弧电阻; Matlab

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2005)08-0031-03

## 0 引言

炼钢电弧炉是电力系统中各类波动性负荷中对电能质量影响比较严重的负荷, 它不光能引起电压波动和闪变, 而且还是重要的谐波源。但是因为电弧炉是非线性负荷, 所以它产生的谐波电流随时间的变化呈非平稳随机过程。这是由于在炼钢过程中, 电弧延时发弧、电弧电阻的非线性和电弧游动等因素, 使得电弧电流变化很不规则。电弧的游动是在电磁力、对流气流、电极移动以及炉料在熔化过程中的崩落和滑动等多种因素综合造成的, 它们都具有很大的随机性。这就使得电弧炉电流不仅数值大而且三相不平衡、畸变和大幅度脉动, 特别是在熔化期的初期, 畸变和脉动尤为严重。正是由于这个原因, 所以对电弧炉系统在理论上进行谐波分析和仿真研究进行缓慢。所以说关键是建立的电弧电阻模型, 而一旦建立了电弧电阻变化模型, 就可以对电弧炉的电气系统进行了。

## 1 交流电弧炉的等效数学模型的实现

### 1.1 电弧炉电阻的数学模型

根据文献 [1] 中所提供的模型公式:

$$R(t) = C_0 e^{1/\left(\frac{T_0}{a} + \frac{T_1 - T_0}{2a} [1 - \cos(2\pi t + D)]\right)} \quad (1)$$

其中:  $C_0 = \frac{N(L \text{Cot} - r)}{\sum_{i=1}^N e^{1/\left(\frac{T_0}{a} + \frac{T_1 - T_0}{2a} [1 - \cos(2\pi T_i/N + D)]\right)}}$  (2)

式中:  $T_0$  为弧柱最低温度;  $T_1$  为弧柱最高温度;  $a = 3.323 \times 10^4$ ;  $D$  为弧柱受热惯性的影响值;  $\omega$  为外加重正弦电压激励的角频率;  $\theta$  为电弧电流滞后电源

初相的角度;  $L$  为经过等效去耦化简的一相等效电感;  $r$  为短网及电弧炉变压器的一相等效电阻;  $T$  为电弧电流周期, 在工频为 50 Hz 的情况下,  $T = 0.02$  s。因  $C_0$  是近似值, 它是对一个周期内的电阻积分得到的, 但为了好求解, 把  $T$  分成  $N$  等分进行近似计算。一般取  $N = 60$ 。

### 1.2 电弧炉系统仿真的实现

本文采用 Matlab 进行模型的实现。Matlab 所具有的强大数学运算能力、方便实用的绘图功能及语言的高度集成性使它在工程领域的应用越来越广泛。特别是 Matlab 的 Simulink 是基于框图的仿真系统, 对一般的工程系统都能进行仿真。本文用的是 Matlab 7.0, 相对于以前的版本它更加人性化, 更加方便地搭建系统模型, 并能得到良好的仿真效果。因此首先用 Matlab 编写电弧时变电抗模型, 得到的一周期内的电弧电阻变化曲线。

## 2 电弧炉系统谐波分析理论

因为电弧炉的电阻是随机变化的, 因此要想研究电弧炉系统的谐波状况是非常困难的。所以本文的思想是把时变电抗模型封装成一个子系统再通过一个模块把它加到系统的模型中, 使整个系统默认这个时变电抗, 然后再整体仿真运行, 可分别得到电弧炉的电流电压波形, 最后再用傅里叶模块分析出电流电压的各次谐波含量。

## 3 工程实例

对包头钢铁公司无缝钢厂的 3 t 电弧炉进行了谐波测试。连续记录了多炉的谐波过程, 为求准确,

最后求出平均一炉的谐波电流电压变化过程。电弧炉炼钢的各个周期中,谐波不尽相同,加上电极的调节过程,很难看出谐波的规律。前面已经说过电弧的游动可引起电弧变化不规律,而熔化初期的炉料的崩落和滑动是电弧游动的主要因素,所以畸变最

严重的时段是熔化期的初期。随着炉膛中熔化的钢水液面的不断升高,电弧也就越来越稳定,在精炼期,电流稳定得多,畸变也小得多。因此我们仅详细地分析了熔化期的谐波测量值,并与根据电弧炉模型得到的谐波含量相比较,来验证此方法的可行性。

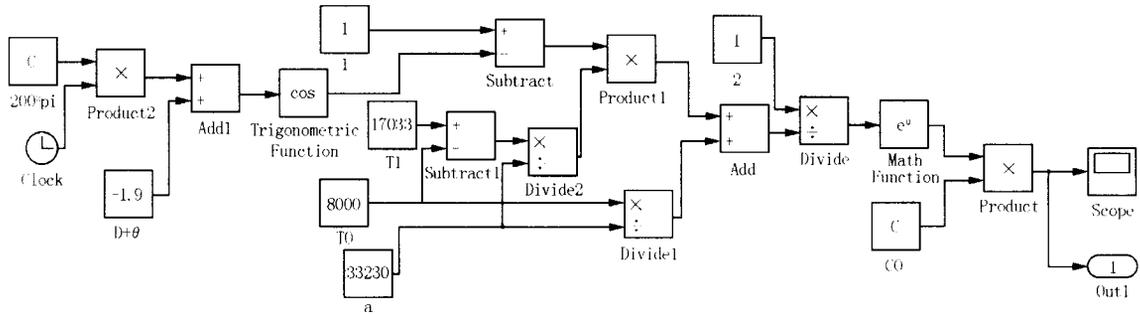


图 1 时变电弧电阻模型

Fig 1 Model of time-variable arc resistance

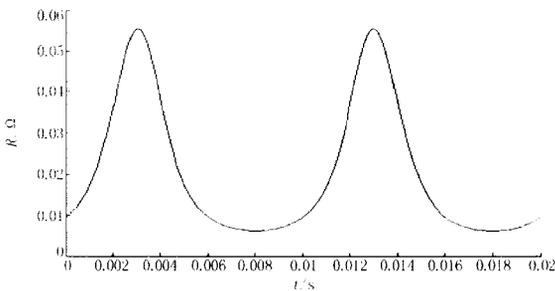


图 2 电弧电阻时变曲线

Fig 2 Time-variable curve of arc resistance

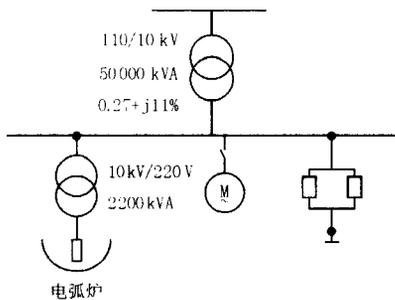


图 3 供电系统示意图

Fig 3 Schematic diagram of power supply system

### 3.1 3 t电弧炉的随机阻抗图

根据文献 [2] 和文献 [3],电弧炉阻抗模型的参数取为:  $T_0 = 8\ 000\ K$ ,  $T_1 = 17\ 033\ K$ ,  $D + \theta = -1.9\ rad$ ,  $N = 60$ ,  $L = 4.113\ 9 \times 10^{-5}$ ,  $\cos \theta = 0.8$ ,  $r = 2.608\ 7 \times 10^{-3}$ , 算出  $C_0$  为  $8.735\ 6 \times 10^{-4}$ , 然后根据以上数据按照式 (1) 搭建时变电弧电阻模型, 如图 1 所示, 得到如图 2 的一周期内的电弧电阻变化

曲线。

### 3.2 电弧炉系统谐波分析

图 3 是包钢无缝钢厂的简化供电系统示意图。配电变压器将高压线 110 kV 变为 10 kV, 经过一段架空线接入钢厂, 其主要负荷是电弧炉、电容器组和电动机, 其它负荷容量相对较小, 故忽略其影响。

系统参数如下: 高压电网: 当短路容量为最大时  $x = 0.027\ 4$ ; 当短路容量为最小时  $x = 0.034\ 5$ 。

架空线: 钢芯铝绞线约 3.146 km, 线间距离 2 m, 线路阻抗为  $0.4\ \Omega/km$ , 得  $r = 1.25$ ,  $x = 2.32$ 。 电缆: 由电力系统分析得一般方法, 6~10 kV 三芯电缆电抗  $x = 0.08\ \Omega/km$ , 故  $x = 0.8$ 。 电动机: 轴功率 12.5 MW, 功率因数 0.86, 效率 88%, 电抗 20%,  $x/R = 10$ 。 电炉变压器和短网电炉变压器  $r = 0.000\ 62$ ,  $x = 0.007\ 12$ 。 短网  $r$  为  $17 \sim 21 \times 10^{-4}$ ,  $x$  为  $40 \sim 60 \times 10^{-4}$ 。 故取  $r = 0.21 \times 10^{-2}$ ,  $x = 0.6 \times 10^{-2}$ 。

电容器: 额定容量是 4500 kvar, 得  $x = 22.22$ 。

根据以上数据用 Matlab7.0 对系统进行仿真, 如图 4 所示, 对电弧炉系统进行仿真和谐波分析, 图中的 continuous 模块可以对电弧炉的电流电压波形进行谐波分析, 得到谐波含量。图 5 分别是仿真出来的电流和电压波形, 上图为电流波形, 下图为电压波形。波形通过傅里叶分解后得到各次的谐波含量, 如表 1 所示。实测谐波含量如表 2 所示。可以看出用本模型仿真出来的数据和实际值较接近, 所以此模型是合理的。

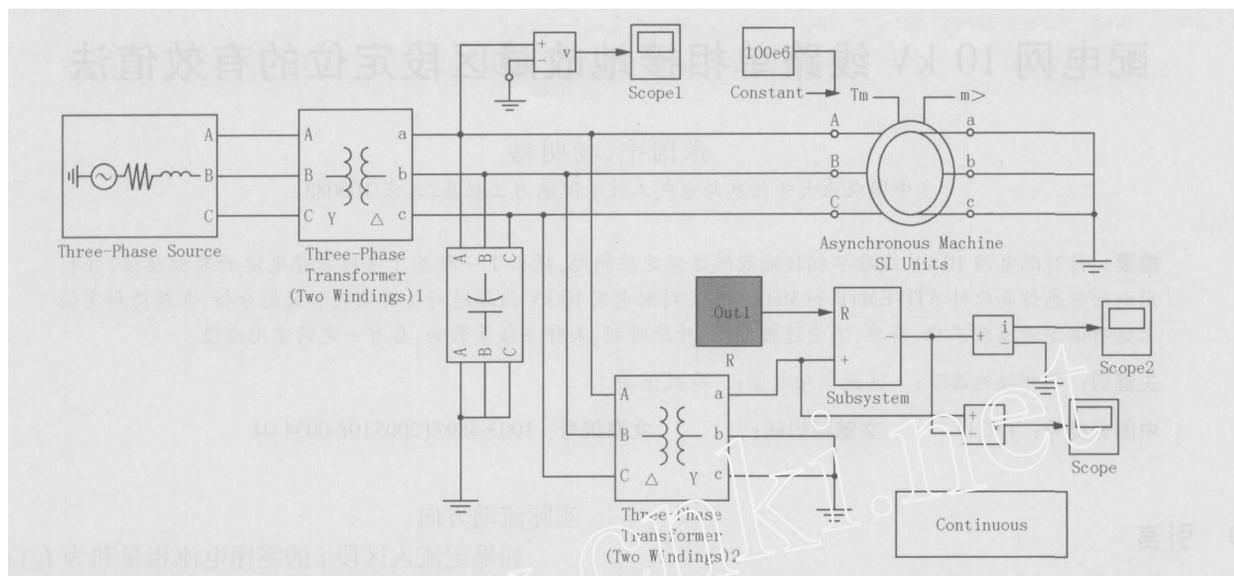


图 4 供电系统仿真模型

Fig 4 Simulation model of power supply system

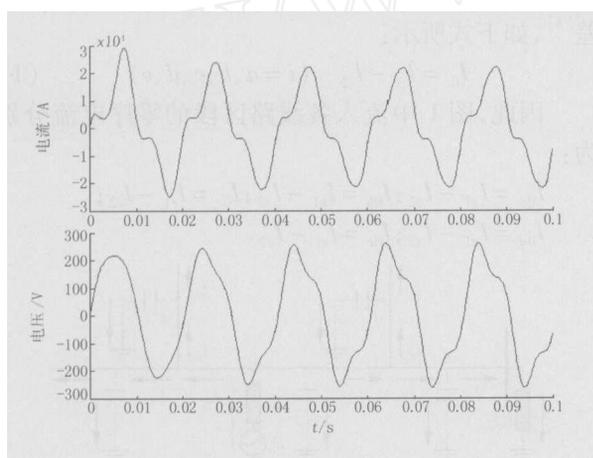


图 5 仿真出的电流电压波形

Fig 5 Waveforms of simulated current and voltage

表 1 仿真出的谐波含量

Tab 1 Simulated harmonic contents

谐波次数	电流畸变率 / (%)	电压畸变率 / (%)
1	100.0	100.0
2	0.70	0.59
3	34.27	19.31
4	0.31	0.35
5	8.00	0.49
6	0.23	0.10
7	1.45	0.03
8	0.09	0.06
9	0.20	0.05
10	0.06	0.04

表 2 实测谐波含量

Tab 2 Actual measured harmonic contents

谐波次数	电流畸变率 / (%)	电压畸变率 / (%)
1	100.0	100.0
2	1.00	0.47
3	38.24	14.1
4	0.25	0.34
5	7.97	0.79
6	0.55	0.19
7	1.55	0.07
8	0.081	0.13
9	0.35	0.06
10	0.044	0.05

## 4 结论

对电弧炉系统在理论上进行谐波分析,不但难度较大,主要是因为电弧炉的电弧电阻是随机变化的,不容易得到电弧电阻变化特性,因此使谐波分析也不能得到理想的结论。本文所做的工作只是为了解决这一问题提供了一个思路,以后继续研究,希望能不断的改进完善其研究结果。

## 参考文献:

- [1] 刘小河,程少庚,苏文成. 电弧炉电气系统分析研究[J]. 电工技术学报, 1994, 5(2): 21-26  
 LIU Xiao-he, CHENG Shao-geng, SU Wen-cheng Analytical Study of Arc Furnace Electrical System[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1994, 5(2): 21-26

(下转第 37页 continued on page 37)

- Floating Neutral[J]. Journal of Fushun Petroleum Institute, 1997, 17(4): 52-57.
- [3] 夏雨,贾俊国,靖晓平,等.基于新型配电自动化开关的馈线单相接地故障区段定位和隔离方法[J].中国电机工程学报,2003,23(1):102-106  
XIA Yu, JIA Jun-guo, JING Xiao-ping, et al A New Method of Locating and Isolation for Single Phase Grounding Fault Section of Feeders in Power Distribution Network Based on New Types of Distribution Automation Switchgear[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(1): 102-106
- [4] 邱关源.电路(第四版)[M].北京:高等教育出版社,1999.  
QIU Guan-yuan Circuit, Fourth Edition [M]. Beijing: Higher Education Press, 1999.
- [5] 徐政.免费使用的电磁暂态分析程序——ATP-EMTP程序介绍[J].电网技术,1999,23(7):64-66  
XU Zheng An Introduction to ATP-EMTP[J]. Power System Technology, 1999, 23(7): 64-66
- [6] 钱鑫,李琥,施围.电力系统仿真计算软件介绍[J].继电器,2001,30(1):43-46  
QIAN Xin, LI Hu, SHI Wei Simulation Software in Power System [J]. Relay, 2001, 30(1): 43-46

收稿日期: 2004-08-02; 修回日期: 2004-09-30

作者简介:

张国平(1979-),男,硕士研究生,研究方向为配电自动化技术; E-mail: mhs4@cau.edu.cn

杨明皓(1953-),女,教授,博士生导师,主要研究方向为配电自动化、配电系统规划与运行。

### A virtual value method of locating single-phase grounding fault section of 10kV feeders in power distribution system

ZHANG Guo-ping, YANG Ming-hao

(China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** To solve the problem of locating single-phase grounding fault section of 10 kV feeders in power distribution system, this paper presents a virtual value method based on zero-sequence current of sections. Simulation experiment with ATP-EMTP and data processing with Matlab demonstrate that the proposed method is correct. The method is simple in theory, and not influenced by grounding resistance, fault time, and sampling nodes. It has some practical values.

**Key words:** single-phase grounding fault; zero-sequence current of sections; virtual value method

(上接第 33 页 continued from page 33)

- [2] 过增元,赵文华.电弧和热等离子体[M].北京:科学出版社,1986.  
GUO Zeng-yuan, ZHAO Wen-hua Plasma of Electric Arc and Heat[M]. Beijing: Science Press, 1986.
- [3] 王其平.电气电弧理论[M].北京:机械工业出版社,1982.  
WANG Qi-ping Theory of Electrical Arc [M]. Beijing: China Machine Press, 1982.
- [4] 吴竞昌.供电系统谐波[M].北京:中国电力出版社,1998.  
WU Jing-chang Harmonic of Power Supply System [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1998.

收稿日期: 2004-07-30; 修回日期: 2004-09-23

作者简介:

郭继红(1979-),女,硕士生,研究方向为变电站电流谐振和抑制方法; E-mail: slimgirl\_1979@163.com

颜湘武(1965-),男,教授,主要从事电力电子与电气工程理论方面的研究和教学工作。

### Model and simulation of arc furnace system for harmonic analysis

GUO Ji-hong, YAN Xiang-wu

(School of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract:** A new idea for harmonic analysis of arc furnace system is put forward with theoretical research, and its feasibility is testified with examples. At first, a performance curve of arc furnace resistance is obtained by Matlab simulation according to random variation equation of arc resistance. And then, simulation of overall system and harmonic analysis are carried out based on ultimate value of arc resistance. Finally, simulation results and actual measurement data are compared, and the error is very little. So this theory is feasible.

**Key words:** arc furnace; harmonic; arc resistance; Matlab