

# 基于能量平衡的电弧炉模型的仿真与参数辨识

池 伟<sup>1</sup>, 张恺伦<sup>2</sup>, 查 蕾<sup>1</sup>, 陈宏伟<sup>2</sup>

(1. 浙江省电力试验研究院, 浙江 杭州 310014; 2. 浙江大学 电气工程学院, 杭州 310027)

**摘要:** 为了研究电弧炉对电力系统的谐波影响, 针对基于能量平衡关系的电弧炉(EAF)模型, 利用粒子群算法(PSO)对仿真模型中的参数进行了辨识, 得到的电压波形与实际波形吻合较好; 在此基础上, 在Matlab/Simulink中对该模型进行了仿真, 将得到的仿真结果与实测谐波含量进行了对比, 对比分析结果证明了该模型的合理性。研究结果表明, 该建模方法能够较准确地反映电弧炉对电网的谐波影响, 同时提出的参数辨识方法能够找到该模型参数合理的适应值, 进而重现和预测电弧炉的负荷特性。

**关键词:** 电弧炉; 负荷建模; 参数辨识; 粒子群算法

中图分类号: TM924.4; TF748.41

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)04-0454-04

## Modeling and parameter estimation of arc furnace model based on energy conservation

CHI Wei<sup>1</sup>, ZHANG Kai-lun<sup>2</sup>, ZHA Lei<sup>1</sup>, CHEN Hong-wei<sup>2</sup>

(1. Zhejiang Electric Power Test and Research Institute, Hangzhou 310014, China;

2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** In order to study the harmonics of EAF to grid, Aiming at the electric arc-furnace (EAF) model based on energy conservation, particle swarm optimization (PSO) was used to estimate the parameters of this model, and good fitting results were obtained of arc voltage. On this basis, a Matlab/Simulink model was established and simulated, and by comparing the result of harmonic content with the measured data, the rationality of this model was proved. The results indicate that this method of modeling can accurately reflect the harmonics of EAF to grid, also the method of parameter prediction are proved capable of finding the reasonable fitness, and thus to reproduce and predict the load characteristics of EAF.

**Key words:** electric arc-furnace(EAF); load modeling; parameter estimation; particle swarm optimization(PSO)

## 0 引 言

电弧炉是一种利用电弧产生的热量来熔炼金属的大容量冶金设备。由于冶炼金属的过程中金属液的不均匀, 以及电弧燃烧的不稳定等原因, 电弧炉对电力系统有着很大的影响。作为电力系统中的典型非线性负荷, 电弧炉对电网的影响主要包括三相功率不平衡、电压波动和闪变、电网谐波等等<sup>[1]</sup>。因而, 针对电弧炉负荷建立一个准确反映其电压电流关系的数学模型一直是电能质量研究领域的一个重要课题。

目前针对电弧炉谐波所建立的数学模型<sup>[2-8]</sup>主要有两种: 基于电弧弧径3个假设的电弧电阻模型, 以及

基于能量平衡方程的电弧能量模型。以上两种方法分别从不同的角度出发, 经过大量的仿真与实测对比, 已被证明可以较好地反映电弧炉的电压电流关系。但是, 由于以上模型的内部机理及其中的模型参数估算过程较为复杂, 在模型应用过程中存在着很多的不便。

本研究主要基于粒子群算法(PSO), 对电弧炉能量平衡模型的参数进行辨识。这种方法能够利用电弧炉典型电压电流波形, 计算出其对应的模型参数, 进而可以将具体的波形抽象成简单的数学模型, 给电弧炉负荷的谐波分析带来便利。

## 1 基于能量平衡关系的电弧炉模型

本研究中用于参数辨识的电弧炉负荷模型是基于功率平衡关系得到的动态电弧模型。文献[2]根据能量守恒原理,经过详细地推导,建立了微分方程形式的动态电弧模型。

首先,电弧功率平衡方程为:

$$p_1 + p_2 = p_3 \quad (1)$$

式中:  $p_1$  一向周围环境中散失的热功率;  $p_2$  一用于增加电弧内部能量的功率;  $p_3$  一电弧消耗的电功率,即  $p_1$  与  $p_2$  的和。

其次,由于电弧散失的热功率  $p_1$  受电弧温度的影响不明显,本研究假设散失的热功率为电弧半径  $r$  的函数,表示为:

$$p_1 = k_1 r^n \quad (2)$$

式中:  $k_1$  一常数,根据电弧温度,以及电弧长短的不同,  $n$  取 0、1 或 2。

$p_2$  与电弧内部能量的导数成正比,而该能量与  $r^2$  成正比,由此得到表达式:

$$p_2 = k_2 r \frac{dr}{dt} \quad (3)$$

式中:  $k_2$  一常数。

假设弧柱的电阻率与  $r^m$  成反比,则得到表达式:

$$p_3 = vi = \frac{k_3 / r^m}{r^2} i^2 \quad (4)$$

最后,将式(2,3,4)代入式(1)可以得到以电弧半径  $r$  为状态变量的表达式:

$$k_1 r^n + k_2 r \frac{dr}{dt} = \frac{k_3 / r^m}{r^2} i^2 \quad (5)$$

式(5)可以化简为:

$$\frac{dr}{dt} = \frac{k_3 i^2}{k_2 r^{m+3}} - \frac{k_1 r^{n-1}}{k_2} \quad (6)$$

又有电弧电压与电流的关系表示为:

$$v = \frac{k_3}{r^{m+2}} i \quad (7)$$

根据式(6,7),本研究可以将电弧炉负载等效成一个电流控制的电压源(CCVS),由电流计算电弧电压的框图如图1所示。

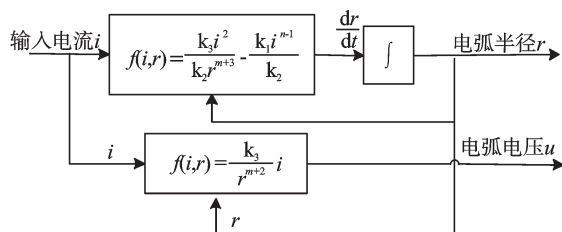


图1 电弧电压计算框图

## 2 电弧炉负荷的参数辨识

### 2.1 基于粒子群算法(PSO)的参数辨识

电弧炉能量模型参数辨识的主要任务是寻找一组最优的参数向量  $\theta^*$ ,使得误差的目标函数值最小,这里的目标函数取电弧电压计算与测量值的误差的平方和,即:

$$E = \sum_{k=1}^N (U_{\text{计算}} - U_{\text{测量}})^2 \quad (7)$$

式中:  $N$  一采样点的个数。

本研究在考虑参数向量  $\theta$  的取值范围后,可以得到如下的非线性规划问题:

$$\begin{cases} \min \sum_{k=1}^N (U_{\text{计算}} - U_{\text{实测}})^2 \\ \text{s.t. } \underline{\theta} \leq \theta \leq \bar{\theta} \end{cases} \quad (8)$$

本研究运用粒子群算法(PSO)求解上述非线性优化问题,能够较好地解决收敛性受初始值影响的问题。该算法的基本原理可用下述进化方程描述<sup>[9]</sup>:

$$v_{ij}(t+1) = v_{ij}(t) + c_1 r_{1j}(t)(p_{ij}(t) - x_{ij}(t)) + c_2 r_{2j}(t)(p_{gj}(t) - x_{ij}(t)) \quad (9)$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1) \quad (10)$$

式中:  $x$  一微粒的当前位置;  $v$  一微粒的飞行速度;  $p$  一微粒所经历过的具有最好适应值的位置;  $c_1, c_2$  一加速常数,通常在 0~2 之间;  $r_1, r_2$  一两个相互独立的随机函数; 下标“ $i$ ”一微粒的编号;“ $j$ ”一微粒的第  $j$  维,“ $t$ ”一第  $t$  代。

基本粒子群算法的流程如下:

(1) 依照初始化过程,对微粒群的随机位置和速度进行初始设定;

(2) 计算每个微粒的适应值;

(3) 对于每个微粒,将其适应值与所经历过的最好位置  $P_i$  的适应值进行比较,若较好,则将其作为当前的最好位置;

(4) 对于每个微粒,将其适应值与全局所经历的最好位置  $P_g$  的适应值进行比较,若较好,则将其作为全局的最好位置;

(5) 根据方程式(9,10)对微粒的速度和位置进行进化;

(6) 如未达到结束条件(通常为足够好的适应值或达到一个预设最大代数  $G_{\text{max}}$ )则返回步骤(2)。

### 2.2 参数辨识结果及电压曲线拟合

#### 2.2.1 实测数据的获得

本研究的电弧炉炉端电压、电流数据取自文献[4]中的一般波形,如图1、图2所示。数据长度为 0.04 s,数据间隔取 0.000 1 s。

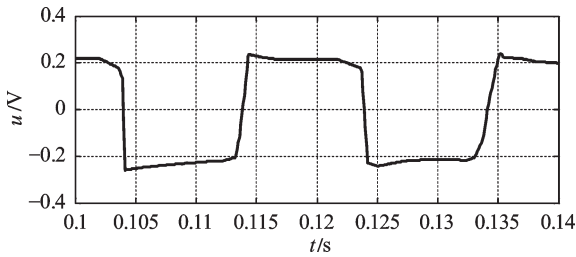


图2 电弧电压曲线

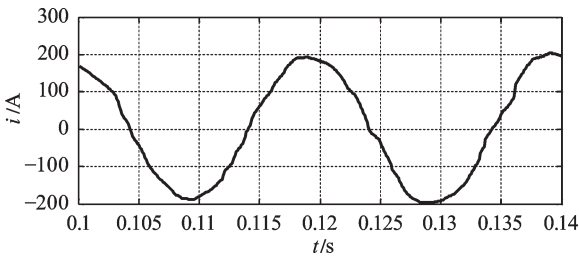


图3 电弧电流曲线

### 2.2.2 辨识结果及电压曲线拟合

根据上述辨识方法及文献中的数据,本研究编写了基于粒子群算法的辨识程序。该程序将电弧电流作为输入量,以电弧电压作为辨识量,待辨识参数为  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$ 、 $m$ 、 $n$ 。其中  $m$  和  $n$  为整数,因此这两个参数不能用 PSO 算法来确定,程序中可做如下处理:令  $m$  和  $n$  分别取 0、1、2,共有 9 种组合,每种组合下用 PSO 辨识算法计算出一个目标函数的最小值,最后本研究取 9 种之中目标函数值最小的一组参数作为辨识结果。

本研究运行上述程序得到了一组电弧炉能量模型的参数辨识值,该参数对应的电弧模型电压单位为 kV,电流单位为 A。参数辨识结果如表 1 所示,电弧电压的测量与辨识波形对比如图 4 所示。

表1 参数辨识结果

参数	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$m$	$n$
辨识结果	628.4	0.52	0.000 7	0	2

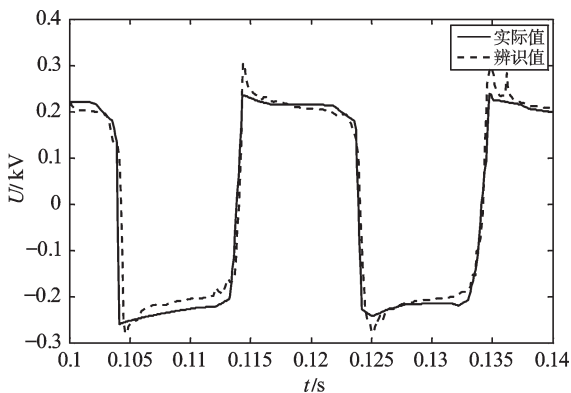


图4 电弧电压曲线比较

由图 4 可知,该辨识结果能够较好地重现实际电弧炉端电压波形。为了进一步验证该结果和实际波形的吻合程度,笔者定量地分析了实测与辨识电压波形

的基波有效值及谐波含量,其结果如表 2、表 3 所示。

表2 电弧电压基波有效值对比

辨识电压基波有效值/kV	实测电压基波有效值/kV	相对误差/(%)
0.193 0	0.196 8	1.93

表3 电弧电压谐波含量对比

谐波次数	仿真电流畸变率/(%)	实测电流畸变率/(%)	畸变率绝对误差/(%)
1	100	100	—
3	33.64	32.68	0.96
5	18.27	16.78	1.29
7	11.48	10.65	0.83
9	7.34	7.15	0.19
11	5.06	5.25	0.19
13	3.12	4.22	1.10
THD	41.45	40.66	0.79

由表 2、表 3 中数据可知,实测与辨识电压的有效值相对误差为 1.93%,电压各次谐波含量的绝对误差不超过 1.29%,总谐波畸变率 THD 相对误差为 0.79%。以上结果定量地证实了该能量模型的合理性,并说明该参数辨识方法能够根据给定电流辨识电弧电压,同时能够找到参数的最优值,进而可以应用于对电弧炉模型的参数估计和预测。

## 3 电弧炉在 Simulink 中的仿真

### 3.1 仿真系统

根据电弧能量平衡方程,结合以上辨识结果,本研究在 Matlab/Simulink 环境中搭建了电弧炉模型,电弧炉等效为一个电流控制的电压源 (CCVS)。

浙江丽水某钢厂 6 300 kVA/35 kV 电弧炉(精炼炉)的等效单相模型的仿真实接线图如图 5 所示,系统在公共连接点处可以等效为 37 kV 理想电压源与短路阻抗串联。变压器变比为 35 kV/230 V,一次侧等效电阻 0.09  $\Omega$ ,等效电抗 1.03  $\Omega$ ,短网电阻 0.02  $\Omega$ ,短网电抗忽略不计。

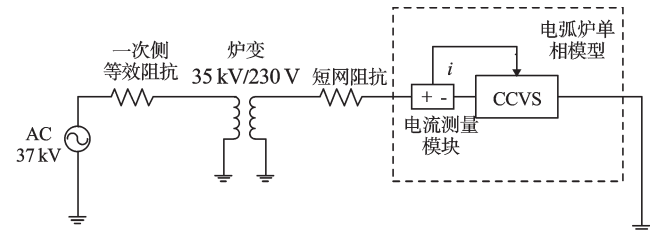


图5 电弧炉仿真实接线示意图

### 3.2 仿真结果

本研究对上述系统在 Matlab/Simulink 中进行仿真,变压器一次侧测得电流波形,并对其谐波含量进行

分析,将其与该钢厂的现场实测谐波含量进行对比,结果如表4所示。

表4 电流谐波含量对比

谐波次数	仿真电流畸变率/(%)	实测电流畸变率/(%)	畸变率绝对误差/(%)
1	100	100	—
3	5.36	5.78	0.42
5	1.99	1.21	0.78
7	0.88	0.69	0.19
9	0.43	0.40	0.03
11	0.23	0.18	0.05
13	0.13	0.07	0.06
THD	5.80	5.98	0.18

由仿真与实测的谐波含量对比发现,结果与实际情况符合得较好,各次谐波畸变率的误差值不超过基波大小的0.8%,总谐波畸变率THD的误差也仅有基波大小的0.18%。以上结果说明,该能量模型通过合理地设定参数,能够重现实际电弧炉运行的电流、电压波形关系,进而能够较准确地反映电弧炉对电力系统的谐波影响。

## 4 结束语

电弧炉能量模型是基于电弧内部的能量平衡关系,表示为以弧柱半径为状态变量的微分方程的数学模型。本研究利用粒子群算法(PSO)对该能量模型参数进行辨识,辨识结果能够较好地吻合设定的参数,说明该辨识方法能够有效地搜寻到模型参数的适应值。

在此基础上,本研究在 Matlab/Simulink 环境中根据该数学模型搭建了仿真模型,并将其接入电网进行

了仿真,最后通过与实测数据谐波含量的对比,验证了该模型的合理性。

本研究的参数辨识方法可以方便地应用于分析录波仪记录的炉端实测波形。未来电弧炉负荷建模的一个思路是:依照本研究的方法,在对多组实测波形进行参数辨识后,得到与炉况相关的参数变化规律,进而可以对电弧炉负荷进行准确的预测。

## 参考文献(References):

- [1] 李俊,彭涨,谢良德. 大容量电弧炉负荷对电网的影响及其防范措施[J]. 湖北电力,2007,31(1):19-20.
- [2] ACHA E, SEMLVEN A, RAJAKOVI N. A harmonic domain computational package for nonlinear problems and its application to electric arcs[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1990, 5(3):1390-1397.
- [3] 刘小河,崔杜武. 电弧炉电气系统的模型、谐波分析及电极调节系统自适应控制的研究[D]. 西安:西安理工大学自动化学院,2000.
- [4] 郭继红,颜湘武. 用于谐波分析研究的电弧炉系统的模型和仿真[J]. 继电器,2005,33(8):31-37.
- [5] 宁元中,梁颖,吴昊. 电弧炉的混合仿真模型[J]. 四川大学学报,2005,37(1):85-89.
- [6] 王育飞,潘艳霞,姜建国. 基于MATLAB的交流电弧炉随机模型与仿真[J]. 高电压技术,2008,34(5):973-977.
- [7] 王晶,林敏,陈学允. 用于动态电能质量分析的交流电弧炉的建模与仿真[J]. 电工技术学报,2003,8(3):53-58.
- [8] 申展,朱永强. PSCAD中基于能量平衡关系的电弧炉负荷模型的参数[J]. 现代电力,2007,24(3):34-38.
- [9] 曾建潮,介婧,崔志华. 微粒群算法[M]. 北京:科学出版社,2004.

[编辑:张翔]

(上接第442页)

## 参考文献(References):

- [1] 望亭发电厂. 300 MW 机组运行与检修技术培训教材·仪控[M]. 北京:中国电力出版社,2002.
- [2] 黄海跃. 转子应力控制在DEH程序中的应用解析[J]. 热力透平,2009(2):142-144.
- [3] 黄海跃,杨炯. 吴泾600MW汽轮机调节保安系统[J]. 热力透平,2001(4):47-51.
- [4] 李道霖. 电气控制与PLC原理及运用[M]. 北京:电子工业出版社,2004.
- [5] 张凤珊. 电气控制及可编程序控制器[M]. 北京:中国轻工业出版社,1999.
- [6] 沈亚芳. 国产300MW机组危急遮断系统(ETS)的改造[J]. 电力建设,2005(6):64-67.
- [7] 王兴武,王晓峰,罗丽英. 双PLC在汽轮机组ETS中的应用[J]. 电站系统工程,2003(1):63-63.
- [8] 史国生. 电气控制与可编程序控制器技术[M]. 北京:化学工业出版社,2004.

[编辑:张翔]