

文章编号:1000-5013(2015)06-0672-05

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2015.06.0672

一种采用能量平衡关系的新型交流电弧炉模型

廖廷涛¹, 张海龙², 王恩荣¹, 黄苗玉³

(1. 南京师范大学 电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042;
2. 南京师范大学 物理科学与技术学院, 江苏 南京 210023;
3. 金陵科技学院 电子信息工程学院, 江苏 南京 211169)

摘要: 基于能量守恒定律,建立一种以微分方程描述的新型交流电弧炉(EAF)时域模型.模型以电导纳作为状态变量,弧长和电流作为输入,引入时序变化的电弧半径作为参变量,并给出模型参数的估算方法.以实际炼钢交流电弧炉为例,建立电气系统仿真模型,对熔化期的电弧特性及电弧炉对电网的冲击响应进行仿真研究.结果表明:仿真得到的电弧伏安特性与实测数据吻合度较高,有功和无功冲击均与实际工况相符,验证了模型的准确性和实用性.

关键词: 电弧炉; 电弧阻抗; 电弧半径; 负荷建模; 电能质量

中图分类号: TM 924.4 **文献标志码:** A

随着电力工业的发展、冶炼技术的进步及电弧炉设备的改进,交流电弧炉冶炼成本不断下降,效率不断提高,交流电弧炉在炼钢工业中得到了越来越广泛的应用.然而,电弧炉作为电力系统中对电网影响最大的负荷之一,由于电弧电抗的非线性、电极同炉料的接触性短路、炉料崩塌,以及钢液面的剧烈波动等因素,其负荷冲击性变化引起的电压波动与闪变,电弧阻抗非线性导致的电力系统谐波等一系列电能质量问题也不容忽视^[1-2].建立精确的模型是分析治理电弧炉引起的电网污染的关键^[3],国内外学者对此进行了大量研究并取得了一些成果^[4-12].本文基于能量守恒定律,提出一种新的交流电弧炉模型,从而仿真出较为准确的电弧炉实际运行特性.

1 交流电弧炉数学模型

等效数学模型的导出基于以下2个假设^[13].1) 电弧是具有明确界限的圆柱形气体通道,其截面具有均匀分布的温度.2) 能量散出是因弧柱变化过程所造成,与电极无关.

由能量平衡原理,可得

$$\frac{dq}{dt} = ei - S_{\text{loss}}. \quad (1)$$

式(1)中: q 为单位长度电弧弧柱中积累的能量; e 为弧柱中电场强度; i 为电弧电流; S_{loss} 为单位长度电弧弧柱的视在功率损失.

将模型表示成导纳的形式,将式(1)进一步转化为

$$\frac{dy}{dt} = (ei - S_{\text{loss}}) \frac{dy}{dq}. \quad (2)$$

式(2)中: y 为电导纳.

根据气体分子运动论,得到单位长电弧弧柱中积累的能量^[14]为

收稿日期: 2015-08-09

通信作者: 张海龙(1988-),男,博士研究生,主要从事电力系统自动化及非线性动力学的研究. E-mail:131001005@stu.njnu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51475246);江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(KYLX15_0725)

$$q = 0.354 p \pi r^2 (1 - \frac{T_1}{T_0}). \tag{3}$$

式(3)中: r 为电弧半径; T_1 为电弧炉的炉温; T_0 为电弧的弧柱温度; p 为气体压力,由于电弧炉是在一个标准大气压条件下自由燃烧的,所以 p 取值为 $1 \text{ W} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-3}$.

由沙哈公式推导出电弧电导率方程为

$$\sigma = \sigma_0 e^{-m/T_0}. \tag{4}$$

式(4)中: σ 为电弧电导率; σ_0, m 为常数, m 取值为 $3.323 \times 10^4 \text{ K}^{-1}$ [15].

由式(4)可得电弧导纳 y 为

$$y = \frac{\pi r^2 \sigma}{L}. \tag{5}$$

式(5)中: L 为电弧弧长.

由式(3)~(5),可得

$$\frac{dy}{dq} = \frac{\frac{dy}{dT_0}}{\frac{dq}{dT_0}} = \frac{k}{r^2} y. \tag{6}$$

式(6)中: k 的表达式为

$$k = \frac{m}{0.354 p T_1 \pi}. \tag{7}$$

将式(6)代入式(2),整理得

$$\frac{1}{y} \cdot \frac{dy}{dt} = (ei - S_{\text{loss}}) \frac{k}{r^2}. \tag{8}$$

将式(8)两边同时乘以电弧弧长,进一步转化为

$$\frac{L}{y} \cdot \frac{dy}{dt} = (ui - S_0) \frac{k}{r^2}. \tag{9}$$

式(9)中: u 为电弧电压; S_0 为电弧弧柱的视在功率损失.

电弧损失的视在功率与电弧导纳的关系表达式为

$$S_0 = U_{\text{arc}}^2 y. \tag{10}$$

式(10)中: U_{arc} 为电弧电压有效值. 将式(10)代入式(9),整理得

$$\frac{dy}{dt} = (i^2 - U_{\text{arc}}^2 y) \frac{k}{L r^2}. \tag{11}$$

通过以上推导得到以能量守恒定律为基础的交流电弧炉模型. 它以 i, L 作为输入; U_{arc}, r 是与电弧特性直接相关的物理量; k 主要取决于电弧的燃烧环境.

2 电弧炉模型参数的估算方法

一般在电弧自由燃烧时,电弧电流越大,电弧半径越大,电弧阻抗也越低. 因此,电弧半径与电弧导纳的关系[10]可以定义为

$$r = \sqrt[m+2]{ny}. \tag{12}$$

式(12)中: m, n 为常数. m 根据电弧半径的增大分别选择 0, 1 或 2, 在熔化初期, 电弧半径较小, m 取值为 0; 根据专家经验[16]和实际调试, 可得 n 为 30.

在冶炼过程中, 炉温是变化的, 但一般情况下可以认为炉温变化对电弧特性几乎没有影响, 可将其视为常数[17]. 根据电弧炉的生产规格, 熔化期炉温基本上在 $300 \sim 1\,800 \text{ K}$ 范围内变化. 取 T_1 的值为 800 K , 根据式(7), 可估算出 k 为 37.368 7.

当电流大于 100 A 时, 电弧电压有效值 U_{arc} 与电弧长度 L 的关系[18]为

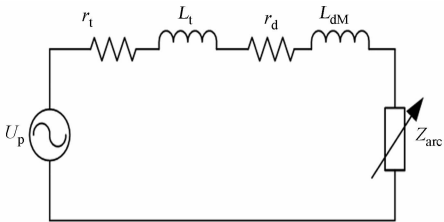
$$U_{\text{arc}} = \alpha + \beta L. \tag{13}$$

式(13)中: α 为电弧阳极和阴极的电位降; β 为弧柱梯度. 根据弧电位分布的研究成果[19], 在熔化期 α 取值为 40 V , β 取值为 $10 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1}$.

电弧炉单相等效电路图,如图 1 所示.图 1 中: U_p 表示与炉用变压器档位电压对应的相电压; r_d 为短网电阻; L_{dM} 为短网电感; r_t 为变压器内部电阻; L_t 为变压器内部电感; Z_{arc} 为电弧阻抗.由电路原理和式(13)可得弧长 L 为

$$0 \leqslant L < \frac{U_p - \alpha}{\beta}.$$

(14)



3 算例分析

3.1 模型验证

以江苏地区某钢厂 100 t 电弧炉为例,对熔化期的电弧特性进行仿真分析.基于 Matlab/Simulink 建立的三相交流电弧炉电气系统仿真模型,如图 2 所示.系统的主要参数表述如下:钢厂主变压器将 220 kV 的高压电网电压变为 35 kV;低压侧电路等效阻抗为 3.234 6 Ω ;通过炉用变压器将电压降到 996 V;短网电阻为 0.407 7 m Ω ;短网电抗为 2.978 6 m Ω ;钢厂主变压器的额定容量为 130 MV \cdot A;炉用变压器的额定容量为 90 MV \cdot A.根据式(14)计算出熔化期弧长的理论波动范围为 0~53.5 cm,文中取弧长值为 45 cm.

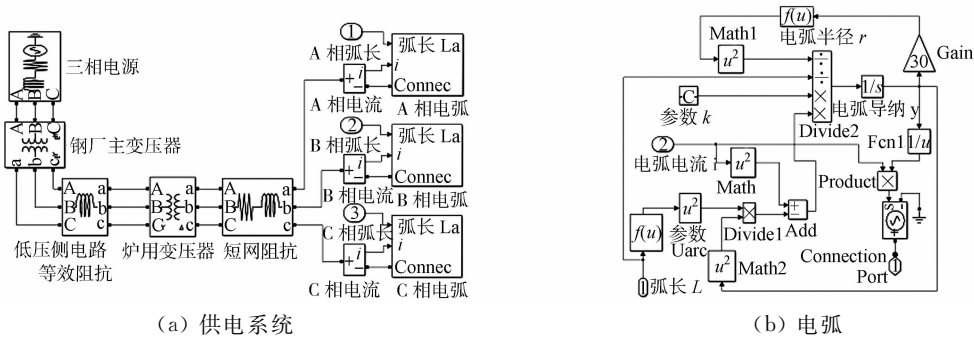


图 2 三相交流电弧炉电气系统仿真模型

Fig. 2 Simulation model of the electrical system for the three-phase AC EAF

电弧阻抗(Z_{arc})和电弧半径(r)曲线,如图 3 所示.由图 3 可知:1) 电弧阻抗和半径呈现脉动形变化,频率为供电频率的两倍;2) 当电弧半径增加时,由于弧柱温度上升,电离度提高,导致电弧阻抗迅速降低,反之亦然.

上述结论符合电弧的实际特性,说明提出的模型对于电弧现象的吻合度较高,从而在真实反映电弧物理特征的基础上,得到更加准确的仿真结果.

电弧电流(i)、电弧电压(u)和伏安特性曲线对比图,如图 4 所示.由图 4 可知:仿真结果与实测曲线基本一致,从而证明了以上的推断.

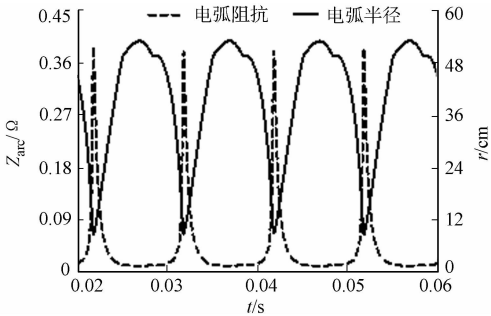


图 3 电弧阻抗和电弧半径曲线

Fig. 3 Curve of electric arc impedance and radius

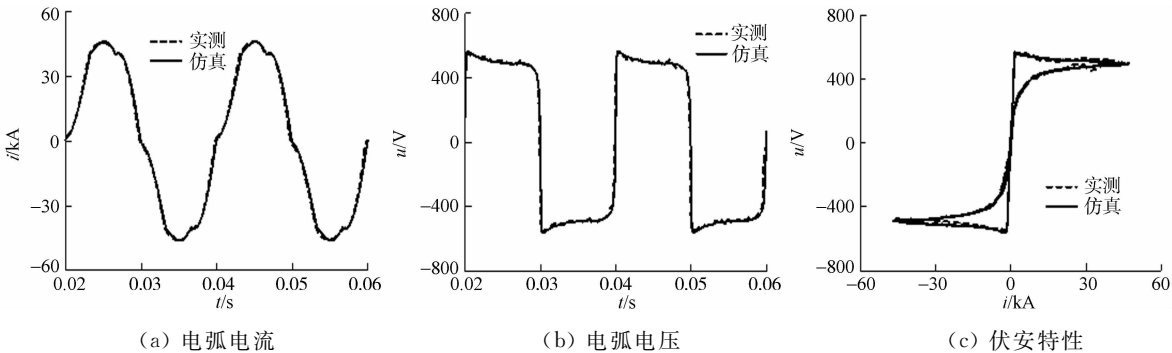


图 4 电弧电流、电弧电压和伏安特性对比图

Fig. 4 Comparison diagram of arc current, arc voltage and volt-ampere characteristic

3.2 电弧炉对电网的冲击影响

电弧炉在熔化期时,弧长变化比较剧烈,电弧熄灭(即开路)与短路现象频繁发生,对电网造成强烈的冲击干扰.当三相电弧断路时,电弧炉的有功功率急剧变化,对电网造成的有功冲击最大;当三相电弧短路时,则对电网造成的无功冲击最为明显.

公共连接点(PCC)有功功率(P)和无功功率(Q)冲击响应,如图 5 所示.根据电弧炉的实际运行状态,一般发生一次短路或断路故障的持续时间为 $0.01\sim0.02\text{ s}$,仿真所设置的故障时间为 $0.37\sim0.38\text{ s}$,其余时间为稳态运行.由图 5 可知:1) 断路故障发生时,PCC 点的有功功率从正常值迅速跌落至零点附近,呈负值是由故障瞬间电弧炉设备向外输送少量电能所致;2) 短路故障发生时,PCC 点的无功功率剧烈波动,经过 0.1 s 后才逐渐恢复平稳,其最大波动量达到 9.62 Mvar .

通过以上分析可知,电弧炉在实际运行过程中对电网的冲击影响是不容忽视的,必须采取相应的电极控制和无功补偿等方法进行治理,从而验证了文中提出的模型是合理、有效的.

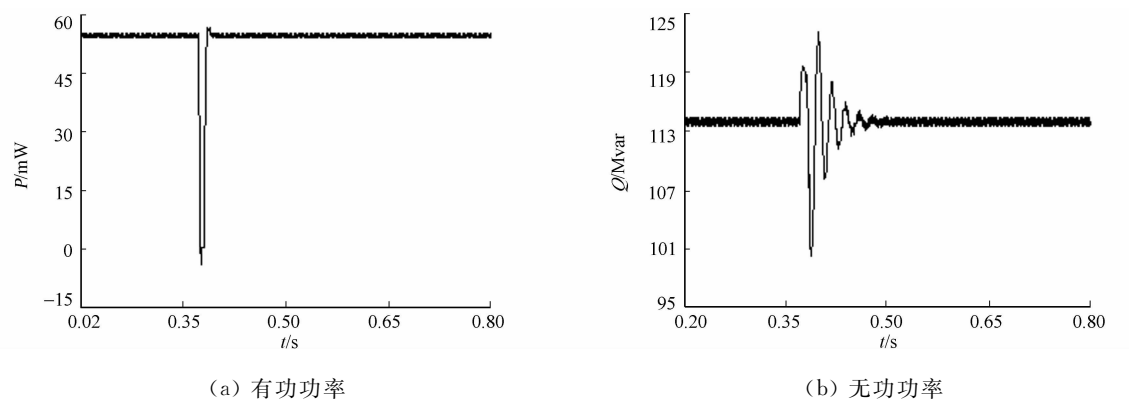


图 5 PCC 点有功功率和无功功率冲击响应

Fig. 5 Active power and reactive power shock responses of PCC

4 结束语

基于电弧的物理机理,从能量方程出发,以电弧导纳为状态变量,电弧电流和弧长作为输入,创新地采用时序变化的电弧半径作为模型参数,实现一种能够综合反映电弧特性的新型电弧炉模型.将电弧模型作为等效的电压源接入供电系统,通过仿真,该模型不仅体现了电弧半径与阻抗之间的关系,而且模拟出的电弧电压、电弧电流、伏安特性,以及 PCC 点有功和无功冲击响应均与实际工况相符.这表明模型较好地实现了电弧的内在物理机理和外在电路特性的统一,避免了此类模型参数不易估算的缺陷,因而兼有准确性和实用性的特点.这对于进一步深入开展电弧炉的理论分析和仿真研究,具有较大的意义,也为采取相应的电能质量治理措施奠定了基础.虽然文中是以特定的电弧炉作为研究对象,但仍可结合其他电弧炉系统的供电运行条件 and 生产规格进行仿真,进一步用于电能质量的分析.

参考文献:

- [1] 彭卉,邹舒,付永生,等.冲击负荷接入电网的电能质量分析与治理方案研究[J].电力系统保护与控制,2014,42(1):54-61.
- [2] 刘华东,张定华,唐建宇,等.抑制电弧炉闪变的 STATCOM 直接电压控制研究[J].电工技术学报,2012,27(9):41-47.
- [3] 鞠平,王耀,项丽,等.考虑特殊负荷的宁夏电网负荷建模[J].电力自动化设备,2012,32(8):1-4.
- [4] CHANG G W, SHIH M F, CHEN Yiyang, et al. A hybrid wavelet transform and neural-network-based approach for modelling dynamic voltage-current characteristics of electric arc furnace[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(2): 815-824.
- [5] 王育飞,姜建国.用于电能质量研究的新型交流电弧炉混沌模型[J].中国电机工程学报,2008,28(10):106-110.
- [6] ALONSO M A P, DONSION M P. An improved time domain arc furnace model for harmonic analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(1): 367-373.

[7] 祁碧茹,肖湘宁.用于电压波动研究的电弧炉的模型和仿真[J].电工技术学报,2000,15(3):31-35.

[8] 刘小河,赵刚,于娟娟.电弧炉非线性特性对供电网影响的仿真研究[J].中国电机工程学报,2004,24(6):30-34.

[9] WANG Yan,MAO Zhizhong,TIAN Huixin,et al. Modeling of electrode system for three-phase electric arc furnace [J]. Journal of Central South University of Technology,2010,17(3):560-565.

[10] ACHA E,SEMLYEN A,RAJAKOVIC 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.

[11] 池伟,张恺伦,查蕾,等.基于能量平衡的电弧炉模型的仿真与参数辨识[J].机电工程,2012,29(4):454-457.

[12] 王晶,束洪春,林敏,等.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,2003,18(3):53-58.

[13] 王仁甫.电弧现象模型的发展[J].高压电器,1991,4(12):39-46.

[14] 王其平.电器电弧理论[M].北京:机械工业出版社,1991:167.

[15] 刘小河,程少庚,苏文成.电弧炉电气系统的谐波分析研究[J].电工技术学报,1994,9(1):21-26.

[16] 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.

[17] ALEXIS J, RAMIREZ M, TRAPAPA G, et al. Modeling of a DC electric arc furnace-heat transfer from the arc[J]. ISIJ International,2000,40(11):1089-1097.

[18] HORTON R, HASKEW T A, BURCH R F. A time-domain AC electric arc furnace model for flicker planning studies[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2009,24(3):1450-1457.

[19] 南条敏夫.炼钢电弧炉设备与高效益运行[M].李中祥,译.北京:冶金工业出版社,2000:67-71.

Novel Model of Alternating Current Electrical Arc Furnace
Based on Energy Conservation

LIAO Yantao¹, ZHANG Hailong²,
WANG Enrong¹, HUANG Miaoyu³

- (1. School of Electical and Automation Engineering, Nangjing Normal University, Nangjing 210042, China;
2. School of Physics and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China;
3. School of Electronic Information Engineering, Jingling Institute of Technology, Nanjing 211169, China)

Abstract: A novel time-domain differential model is proposed for the alternating current electrical arc furnace (EAF) based on the law of conservation energy. The model is established with arc admittance as a state variable, arc length and current as the input, respectively. The chronological arc radius is introduced as a parameter. In addition, the method to estimate the model parameters is given. Moreover, a real EAF is taken to establish the simulation model of the electrical system. The arc characteristics and the shock response of EAF on the power grid in smelting stage are simulated. The results show that the simulated arc volt ampere characteristics are highly identical with actual measurement data, the active and reactive power shock are consistent with the actual working condition. It proves the accuracy and practicability of the proposed models.

Keywords: electrical arc furnace; arc impedance; arc radius; load modeling; power quality

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 吴逢铁)