

电弧炉电极调节器的参数优化

刘飞跃¹, 宋艳慧², 韩 星²

(1. 兰州理工大学 机电工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 中冶集团 西安电炉研究所有限公司, 陕西 西安 710061)

摘要: 通过对电弧炉电极等阻抗调节控制算法的分析, 给出了一种实用的 PID 参数优化方法。电极调节时系统将测量弧流与额定弧流进行比较并计算出当前 PID 调节的增益系数和变积分常数进行调节。该方法是一种简单、实用的控制方法。结果表明该方法满足了电弧炉炼钢对电极调节的要求, 使三相电极更平稳地工作在平衡区内, 有效地降低了能耗和电极消耗。

关键词: 电弧炉; PID; 变增益; 恒阻抗控制

中图分类号: TM924.4 文献标志码: A 文章编号: 1002-1639(2008)04-0055-03

Optimization of Parameter for the Electric Arc Furnace Electrode Regulator

LIU Fei-yue¹, SONG Yan-hui², HAN-Xing²

(1. School of Mechanical and Electronical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. MCC-Xi'an Electric Furnace Research Institute Co., Ltd, Xi'an 710061, China)

Abstract: After analysis of arc furnace of constant impedance electrode control method, a method for PID optimization of parameter is proposed. Comparing measured arc-current with rate arc-current, the currently Gain coefficient and the Integral constant were computed for finally adjusted. It is a compendious, easy realization control method for controlling for arc furnace. The results suggest that the method could satisfy technology of steel-making for electrode controlling and ensure electrode working in balance field, this method can effectively reduce the consumption of energy and electrode.

Key word: electric arc furnace; PID; various gain; constant impedance control

电极调节是电弧炉控制的关键, 其控制水平和性能的优劣直接影响电弧炉的运行。本文通过对目前电弧炉的等阻抗控制方法的分析和研究, 结合炼钢工艺的实际需要, 提出了一种简单、易于实现的变增益系数和变积分时间常数结合的 PID 调节电极的一种新方法。

1 控制目标及要求

电弧炉的调节对象是弧长, 系统通过调节电极的升降来调节弧长, 也就是通过电极定位来实现。弧长是通过检测电弧炉主电路的电弧电流来间接反映^[1]。在保证稳定和可靠性调节的条件下, 要求电极调节灵敏度高, 快速性好, 超调小。在没有产生电弧不稳定和不增加耐火材料消耗的前提下, 利用某一熔炼过程中最佳设定电流作为电弧电流的额定值来进行电极调节及利用最高可能的输入功率进行冶炼; 特别是在熔化期, 当电弧强度的随机变化引起三相电流失去平衡时, 使其维持在给定的允许偏差范围内是控制的目标^[2]。结合电弧炉炼钢工艺和

冶炼要求, 自动调节应具有: (1) 高灵敏度, 即要求系统对电弧电流变化反应灵敏; (2) 电极调节时提升要快, 否则容易造成过负荷, 下降要慢, 以免电极碰撞炉料而折断电极; (3) 保证电弧电流能在额定值 I_e 的 30% ~ 125% 的范围内给定^[3]; (4) 冶炼开始时, 电极调节应能自动起弧; (5) 良好的三相平衡性和尽可能小的相互影响。

2 控制原理

针对电弧炉的特点, 调节系统采用 PLC 来实现电弧炉电极自动调节和三相电流平衡。电极控制原理如图 1 所示。

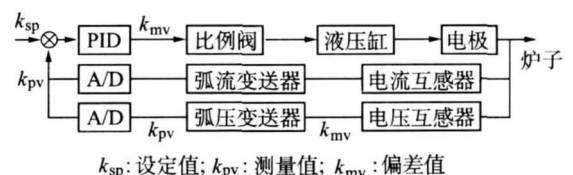


图 1 电极控制原理

图 1 中弧流、弧压变送器采集电流、电压互感器的信号经变换后送给 PLC, 程序将当前送来的弧流、弧压信号处理后和当前档位的额定阻抗进行比较, PLC 根据偏差进行调节。比例阀接收来自 PLC 的 AO 模块的控制信号 (-10 ~ 10 V DC), 驱动液压缸动作, 并最终精确

收稿日期: 2008-03-18; 修回日期: 2008-04-25

作者简介: 刘飞跃 (1975—), 男, 陕西西安人, 兰州理工大学机电学院, 工程师, 硕士研究生, 主要从事机械制造及其自动化研究。

控制三相电极的上升及下降速度，保证系统工作在平衡区和额定阻抗内。

3 控制模型

3.1 点弧

系统的控制模型过程分为点弧和熔炼两个阶段^[4]。在起弧熔化阶段，电弧变化急剧，而且经常发生断弧和短路现象，在此期间，当出现大扰动时，电极应快速动作，迅速消除影响。系统如图 2 所示。当系统开始运行时，首先运行的是点弧程序。冶炼开始，三相电极自动以 6 m/min (6 V DC) 的速度下降，经 8 s 后，自动转为以 2 m/min (2 V DC) 的速度缓慢下降，以避免因惯性引起超调。当某相电极接触到导电炉料时，该相电极自动停止下降，直至另一相电极下降并自动起弧。电极燃烧起弧，弧流大于额定弧流 I_e 的 30%时，系统自动转入熔炼阶段，点弧阶段结束。若电极没有起弧，调节系统中的非导电物质判断程序会自动提升电极。

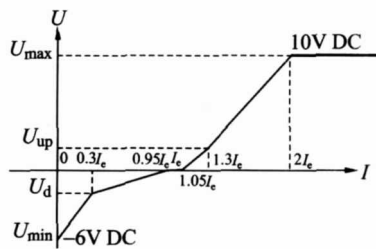


图 2 电极调节示意图

3.2 熔化熔炼阶段

当弧流 $>0.3I_e$ 时，程序进入电极下降速度调节区，进入该区系统自动根据弧流和弧压参数计算出电极下降速度，调节电极下降；当弧流在 $0.95I_e \sim 1.05I_e$ 之间时，系统进入为非调节区，又称平衡区，该区的电流近似等于额定弧流值，这时系统控制输出电压为零，电极保持静止不动，三相电极工作在冶炼平衡区。当弧流在 $1.05 \sim 1.3I_e$ 之间时，进入电极上升速度调节区，进入该区系统自动根据弧流和弧压参数计算电极上升速度，调节电极上升；当弧流 $>1.3I_e$ 额定弧流值时，进入电极快速上升调节区；当弧流瞬时 $>2I_e$ 额定弧流时，系统输出控制饱和电压 10 V DC，使电极以最大的设定速度上升。系统保证每相电流在受到外界各种因素影响时，使电极的调速平滑并迅速回到额定值，避免过大的冲击电流^[5]。为了避免电极插入熔池，造成增碳，调节系统设有灵敏度调节系数，用于改变调节精度。

4 电极自动调节系统的设计

本系统采用变增益系数和变积分常数结合的等阻抗

增量式 PID 进行电极调节，达到实现电极的实时动态控制的目的^[5]。下面以 30t 电弧炉 U 相电极为例对电极控制算法进行说明。

4.1 控制算法

该电炉变压器额定容量为 12.5 MVA，前 3 档位恒功率，后 6 档为恒电流见表 1。表 1 中 U_e 为变压器额定电压， I_e 为变压器额定电流，变压器空载电流 0.45%，空载损耗 31.25 kW，负载损耗 125 kW，阻抗电压 7%，一次侧电压 35 kV。电炉变压器的特点可长期过载 20%。计算变压器和短网阻抗约为 $Z_{TS} = 2.61 \text{ m}\Omega$ 。变压器在冶炼时，实际压降约为额定档位电压的 10%。

表 1 变压器参数和额定阻抗计算

档位	S/MVA	U_e/V	I_e/A	U_{ph}/V	$Z_e/m\Omega$
1	12.5	340	21 226	176.7	8.32
2	12.5	319	22 623	165.1	7.29
3	12.5	300	24 056	155.8	6.48
4	11.79	283	24 056	147.0	6.11
5	11.65	268	24 056	139.2	5.79
6	10.58	254	24 056	131.9	5.48
7	10.08	242	24 056	125.7	5.23
8	9.625	231	24 056	120.0	4.99
9	9.210	221	24 056	114.8	4.77

二次侧弧流、弧压检测方式如图 3 所示。因弧流测量互感器为星型接法，则相电流与测量弧流相等 ($I_d = I_e$)。弧压变送器为 300/10，弧流互感器为 40 000/5。可以得到 U 相冶炼相电压 $U_{ph} = \frac{U_e}{\sqrt{3}} \times 90\%$ (近似计算)，式中， U_e 为该档位线电压；U 相冶炼额定阻抗 $Z_e = \frac{U_{ph}}{I_e}$ ，式中， I_e 为电极电流；U 相冶炼实际采集阻抗 $Z_v = \frac{U_v}{I_v}$ ，式中， U_v 为 U 相实际采集弧压， I_v 为 U 相实际采集弧流；三相电极的平衡范围为 $[0.95 mI_e, 1.05 mI_e]$ ，式中， m 为灵敏度系数其变化范围为 $[0.95, 1.05]$ ；电极上升变化增益 $G_1 = K_1 \left(\frac{I_v - I_e}{I_e} + 0.5 \right)$ ，式中 0.5 为电极上升增益基数，用于保证电极提升调节时，有基本的增益系数；电极下降变化增益 $G_2 = K_2 \left(\frac{I_e - I_v}{I_e} + 0.3 \right)$ ，式中 0.3 为电极下降增益基数，用于保证电极下降调节时，有基本的增益系数；这里， K_1, K_2 为电极上升、下降时的增益常数，其值可根据实际冶炼状况从上位计算机给定。因计算出的阻抗值很小 (表 1)，不便于系统的控制调节，实际中将阻抗 Z 放大用于电极调节控制。

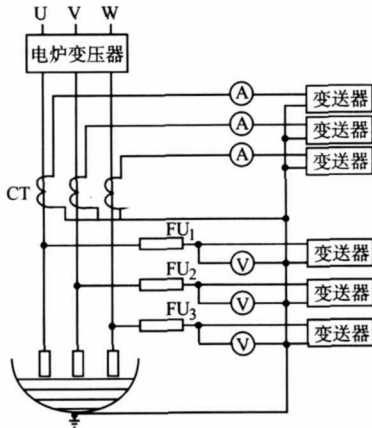
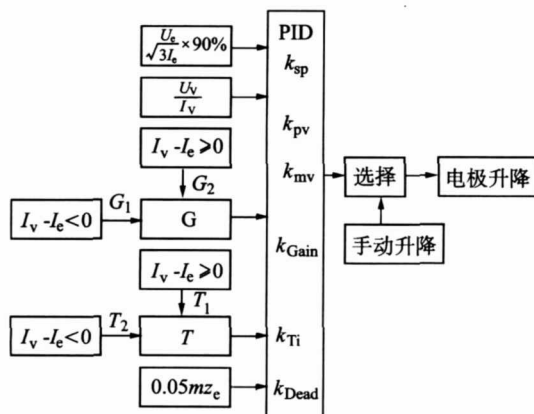


图 3 弧流、弧压接线方式图

4.2 调节功能的实现

如图 4 所示，在 PID 自动控制时，将当前档位的相电压减去线路损耗压降的值作为该档位的额定弧压 U_{ph} ；额定弧压与额定弧流 I_e 的比值作为该档位阻抗的设定值 k_{sp} ；测量值 k_{pv} 为实测弧压与弧流的比值 R_v ，系统根据设定值和测量值的差值来进行自动调节，维持弧压和弧流之间的恒定比例，同时系统根据测定弧流与额定弧流的关系自动计算动态变化的增益系数，并选择相应的电极上升积分常数 T_1 或下降积分常数 T_2 进行 PID 调节，自动控制电极升降，使三相电极工作在平衡区内。系统的调节系数 K_1, K_2 和灵敏度系数 m ，可以在冶炼过程中通过上位机给定。在调节过程中，可以随时人工干预，手动提升电极；每相电极有一套独立的调节系统，减小了三相电极间的相互影响。



k_{sp} : 设定值; k_{pv} : 测量值; k_{Gain} : 增益系数;
 k_{Ti} : 积分时间; k_{Dead} : 死区; m : 灵敏度系数

图 4 电极调节控制功能

5 控制结果分析

图 5 为采用该方法进行电极调节的弧流控制结果与传统的等阻抗 PID 调节的对比图（控制参数的选取见表 2，其中 T 为采样时间）。从图 5 控制结果可以看出，该调节器在快速响应和系统的稳定性上都明显地优于传统的

等阻抗控制。增益系数可根据实际采集弧流的变化，实时动态地做出调整，同时根据弧流的变化判断电极需要上升还是下降，选择不同的积分常数，实现电极的快升慢降调节。

表 2 控制变量的选取

电极动作	k_{sp}/Ω	k_{pv}/Ω	K_1	K_2	T_1/s	T_2/s	m	T_c/ms
上升	51.83	48.45	4.0		5	10	1.0	50
下降	51.83	55.46		2.0	20	4	1.0	50

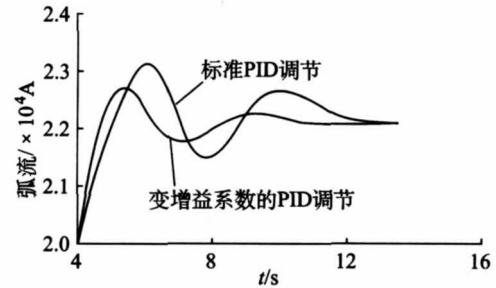


图 5 电极调节结果

系统优化了控制模型，能根据冶炼不同阶段调整控制系统的增益系数，改善了电极调节系统的控制品质。该系统有如下特点：

- (1) 采用实时变化的增益系数和变积分常数的 PID 调节，在保证系统稳定性的同时提高了系统的快速响应性，使电弧炉在冶炼过程中弧流始终处于最佳状态。
- (2) 稳定了电弧，有效地降低了电耗。经过某钢厂 30t 电弧炉一年多的实际运行分析表明断电极和断弧现象减少了 60%，每吨钢电耗下降了 2%，炉况适应能力增强了。

6 结论

本文结合电弧炉电极调节的特点和冶炼工艺的实际要求，利用变增益系数和变积分常数相结合的等阻抗 PID 调节方法实现了对电弧炉电极调节器的自动控制。实际结果表明此方法简单、实用，是一种较为完善的电极调节控制方法，尤其在实现电极调节的快升、慢降和三相电极平衡中发挥了重要的作用，具有推广应用前景。

参考文献：

- [1] 王荣芝, 周传胜. 三相电弧冶炼电炉自动化控制系统 [J]. 自动化技术与应用, 2004, 23(6): 43-48.
- [2] 陈峻岭, 罗安, 李正国, 等. 智能大功率电弧炉自动控制系统 [J]. 中国有色金属学报, 2002, 12(2): 391-395.
- [3] CAMDALL U, TUNC M. Modelling of Electric Energy Consumption in the AC Electric Arc Furnace [J], International Journal of Energy Research, 2002, 26: 935-947.
- [4] JOHN PRESTIDGE, MARK LEE, LOUIS WIBBERLEY. EAF Process Monitoring at Sydney Steel Mill [J]. Steel Research, 2002, 73 (1): 5-8.
- [5] 陶百生, 周建平, 李桂海, 等. 直流电弧炉优化控制模型的研究及应用 [J]. 冶金自动化, 2005, 29(4): 13-17.