

铸钢用 50 t/32 MVA 交流电弧炉炼钢过程电气运行特性

李士琦¹ 谷林^{1,2} 韩建军¹ 郭晓东¹ 纪志军¹ 袁海伦^{1,3} 马宏³

(1 北京科技大学冶金与生态工程学院,北京 100083; 2 中国投资协会,北京 100037;

3 中信重工机械股份有限公司,洛阳 471039)

摘要 使用电气监测仪表对中信重工机械股份有限公司 50 t/32 MVA 交流电弧炉炼钢过程中的电气参数进行了实测,得到 52 310 个有效数据。结果表明,有载条件下电抗器上端的功率因数均为 0.800 以上,供电回路中的电压、电流以及功率因数均处于三相平衡状态。以二次侧工作电流为自变量,建立非线性电抗模型,绘制电气运行特性曲线,确定现用各挡电压下的工作电流许用范围。研究表明,若将电抗器挡位由原来的 3 挡改设为 4 挡运行,则炉用变压器容量利用率将提高 7.30%,功率因数将由原来的 0.812 提高为 0.841。

关键词 铸钢 炼钢 50 t/32 MVA 交流电弧炉 电气运行特性

Electrical Operation Characteristics of a 50 t/32 MVA AC Electric Arc Furnace for Steel Casting in Steelmaking Process

Li Shiqi¹, Gu Lin^{1,2}, Han Jianjun¹, Guo Xiaodong¹, Ji Zhijun¹, Yuan Hailun^{1,3} and Ma Hong³

(1 Metallurgical and Ecological Engineering School, University of Science and Technology, Beijing 100083;

2 The Invest Association of China, Beijing 100037; 3 CITIC Heavy Industries Co Ltd, Luoyang 471039)

Abstract The electrical power parameters of a 50 t/32 MVA electric arc furnace (EAF) in steelmaking at CIRIC Heavy Machinery Co Ltd were measured by electrical monitoring instrument to obtain 52 310 valid data. The results show that the power factors of reactor's primary side on load are all more than 0.800 and during steelmaking the three phase voltage, current and power factors of power supply circuit are balance. Taking the working current at secondary side of transformer as independent variable, the nonlinear reactance model is established to get the electrical operation characteristics curves and determine the permissible range of working current at each voltage tap. The research results show that as the operation voltage tap of reactor modifies to tap 4 from original tap 3, the utilization ratio of EAF transformer shall increase by 7.30%, and the power factor shall raise to 0.841 from original 0.812.

Material Index Cast Steel, Steelmaking, 50 t/32 MVA AC EAF, Electrical Operation Characteristics

大型重型机器制造企业使用交流电弧炉炼钢提供钢液,制造锻造用钢锭和铸钢件。生产节奏慢,冶炼周期长,吨钢电耗高是重机企业电弧炉工位的冶炼特点。

中信重工机械股份有限公司(以下简称“中信重机”)50 t/32 MVA 电弧炉是该公司目前提供初炼钢水的主要设备之一。本研究对中信重机 50 t/32 MVA 电弧炉炼钢运行过程中的电气参数进行了实测,分析该电弧炉的电气运行特性,以便制定合理供电制度。

中信重机 50 t/32 MVA 交流电弧炉最大出钢量约为 75 t,冶炼周期约为 110 min,吨钢电耗约为 450 kWh。

炉用变压器容量为 32 MVA,一次侧额定电压为 35 000 V,额定电流为 528 A;二次侧共设有 17 个电压挡位,第 1 挡电压为 625 V(其它各挡的电压以 25 V 等差递减),额定电流为 38 895 A。炉用变压器上端串有额定容量为 6 500 kVar 的电抗器,共设 6

个挡位(电抗压降分别为(%)20.98、15.79、11.45、7.84、4.98、0)。电抗器上端装有电压互感器($PT = 35\ 000:100$)和电流互感器($CT = 1\ 000:5$);变压器二次侧装有电压互感器($PT = 750:100$)。

电弧炉运行过程中,主熔化期使用 3 挡电压 3 挡电抗;熔化末期及氧化期使用 5、6、8 挡电压,6 挡电抗。

1 电气参数测量及结果分析

1.1 测量设备及方案

本研究选用的测量仪表为美国施耐德公司生产的高精度 Power Logic 电力回路监测仪 CM2250,测量精度等级为 0.2%。与测试设备配套的软件为 SMS-1500,在英文版 Microsoft Windows98 操作系统下运行,可实时采集数据。

图 1 为电弧炉炼钢过程中电气运行参数测量系统示意图,每台仪表接于电压互感器和电流互感器上,仪表之间用通讯电缆连结。通过软件对测量仪

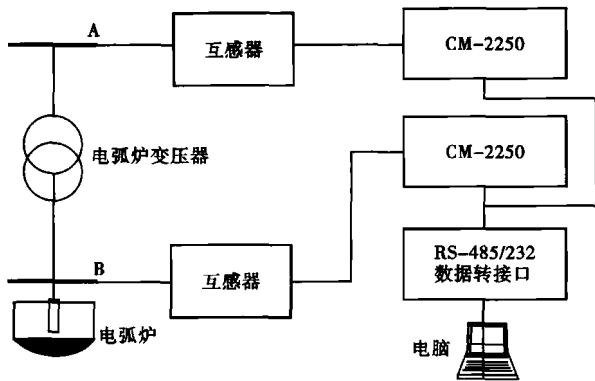


图1 电弧炉供电参数测量系统示意图

Fig.1 Schematics of measurement system for EAF power supply parameters

表进行参数设定,采样时间周期为1 min。每次采样同时测量三相相电流(I_a, I_b, I_c)、三相相电压(U_a, U_b, U_c)、三相线电压(U_{ab}, U_{bc}, U_{ca})、功率因数(PF_a, PF_b, PF_c)等电气运行参数。

1.2 电气参数测试结果

本研究连续测量20个炼钢炉次,共计52 310个有效数据。表1、表2列出了实测结果的平均值,表中“U_0、X_6”分别表示炉用变压器空载和6挡电抗;“U_3、X_3”表示电弧炉在3挡电压和在3挡电抗下运行,以此类推。由表1、表2可知,中信重机50 t电弧炉运行过程中,有载条件下电抗器上端的功率因数均为0.800以上;炉用变压器一次侧工作电流

表1 电抗器上端电气参数

Table 1 Electric parameters at primary side of reactor

电气参数	I_A/A	I_B/A	I_C/A	U_{AR}/V	U_{BC}/V	U_{CA}/V	U_A/V	U_B/V	U_C/V	PF_A	PF_B	PF_C
U_0、X_6	0	0	0	35 510	35 586	35 532	20 438	20 535	20 590	1	1	1
U_3、X_3	493	498	488	35 159	35 220	35 167	20 251	20 355	20 333	0.819	0.808	0.807
U_5、X_6	461	454	445	35 423	35 519	35 409	20 393	20 529	20 482	0.872	0.838	0.837
U_6、X_6	392	390	381	35 458	35 527	35 433	20 412	20 529	20 485	0.827	0.839	0.853
U_8、X_6	395	406	391	35 372	35 402	35 371	20 380	20 468	20 434	0.840	0.830	0.825

表2 电弧炉变压器二次侧电气参数/V

Table 2 Electric parameters at EAF transformer's secondary side /V

电气参数	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	U_A	U_B	U_C
U_3、X_3	524	521	525	317	313	310
U_5、X_6	500	499	503	295	297	301
U_6、X_6	488	486	488	291	292	288
U_8、X_6	442	440	443	265	264	259

表3 三相不平衡状况/%

Table 3 Status of three-phase imbalance /%

电气参数	相电流	线电压		相电压		PF
		一次侧	二次侧	一次侧	二次侧	
U_0、X_6	-	0.21	-	0.74	-	-
U_3、X_3	2.01	0.17	0.73	0.51	2.30	1.42
U_5、X_6	3.53	0.31	0.70	0.66	1.92	4.15
U_6、X_6	2.89	0.27	0.47	0.57	1.24	3.10
U_8、X_6	3.84	0.09	0.53	0.43	2.33	1.77

均小于额定电流528 A,尤其是在6挡电压和8挡电压下运行时,一次侧平均工作电流均小于400 A。

1.3 三相不平衡分析

对中信重机50 t电弧炉供电系统进行三相不平衡度分析,不平衡度 ζ 计算公式为:

$$\zeta = \frac{\max(y_A, y_B, y_C) - \min(y_A, y_B, y_C)}{\text{average}(y_A, y_B, y_C)} \quad (1)$$

式中: y -代表电气参数。

若三相不平衡度 ζ 小于5%,即在工程允许范围之内,可认为电气参数 y 处于三相平衡状态。不平衡度分析结果列于表3。中信重机50 t电弧炉供电回路中的电抗器上端及炉用变压器二次侧的电压、电流以及功率因数均处于三相平衡状态。

2 电气运行特性

2.1 工作电抗模型

电弧炉炼钢过程中,电流所经过的线路、变压

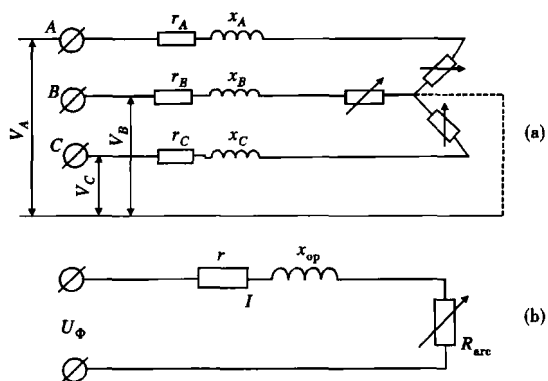


图2 三相交流电弧炉的等效电路

Fig.2 Equivalent circuit of three-phase AC EAF

器、电极和电弧等分别具有一定的电阻和感抗,借助等效电路的概念,可将各参数折算至炉用变压器二次侧的三相交流等效电路图(图2a);在三相线路对称的情况下可得单相等效电路图(图2b)^[1,2]。图2中, r_A, r_B, r_C, r 为相电阻, X_A, X_B, X_C, X_{op} 为相电抗,

V_A, V_B, V_C, U_ϕ 为相电压, R_{arc} 为电弧电阻。

根据电工学原理, 将所测得的一次侧数据折算至二次侧, 折算过程所用公式如下:

$$K = U_1 / U_2 \quad (2)$$

$$I_2 = K \cdot I_1 \quad (3)$$

$$X_{op} = Q / 3I_2^2 \quad (4)$$

式中: K - 炉用变压器某挡电压下的变比; U_1, U_2 - 变压器一次侧和二次侧线电压/V; I_1, I_2 - 变压器一次侧和二次侧电流/kA; Q - 无功功率/kVar; X_{op} - 工作电抗/m Ω 。

工作电抗为电弧炉炼钢运行时供电线路上的电抗。以二次侧电流 I_2 为自变量, 工作电抗 X_{op} 为因变量, 建立各电压挡位下的工作电抗模型。

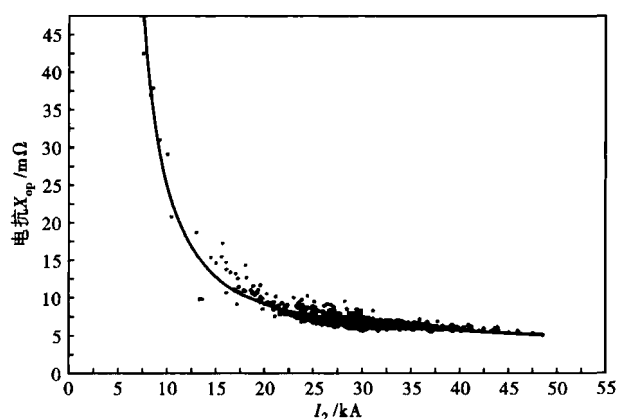


图 3 工作电抗 X_{op} 和二次侧电流 I_2 的关系图 (U_3, X_3)
Fig. 3 Relation between working reactance X_{op} and current at secondary side I_2 (U_3, X_3)

图 3 为 3 挡电压 3 挡电抗下工作电抗和二次电流的关系图。工作电流与工作电抗呈负相关关系, 可采用指数形式、乘幂形式、双曲线形式等多种形式拟合。本课题组经长期研究认为^[3-5], 指数形式的工作电抗模型最为合理。经回归分析可得, 3 挡电压 3 挡电抗下指数形式的工作电抗模型为:

$$X_{op} = 3.183 \times \exp(20.524 / I_2) \quad (5)$$

同理可得其它电压挡位下的工作电抗模型分别为:

$$U_5, X_6: X_{op} = 2.811 \times \exp(18.669 / I_2) \quad (6)$$

$$U_6, X_6: X_{op} = 2.060 \times \exp(25.353 / I_2) \quad (7)$$

$$U_8, X_6: X_{op} = 2.002 \times \exp(24.825 / I_2) \quad (8)$$

2.2 电气运行特性曲线

电气运行特性曲线反映了在某挡电压下, 供电

回路中的视在功率 S 、有功功率 P 、无功功率 Q 、功率因数 PF 与工作电流 I_2 之间的变化关系^[6]。根据建立的非线性电抗模型, 结合中信重机 50 t/32 MVA 电弧炉供电系统的状况, 制定电气运行特性曲线。所需公式如下:

$$S = \sqrt{3} U_2 I_2 \quad (9)$$

$$Q = 3 X_{op} I_2^2 \quad (10)$$

$$P = \sqrt{S^2 - Q^2} \quad (11)$$

$$PF = \frac{P}{S} \quad (12)$$

$$P_{arc} = P - 3rI_2^2 \quad (13)$$

式中: U_2 - 炉用变压器二次侧线电压; I_2 - 二次侧相电流; X_{op} - 工作电抗; S - 视在功率; Q - 无功功率; P - 有功功率; P_{arc} - 电弧功率; r - 线路电阻; U_{arc} - 弧压; PF - 功率因数。

参考相关文献^[3], 本研究取 r 为 0.4 m Ω 。图 4 为 3 挡电压 3 挡电抗下的电气特性图, 其中阴影部分为许用工作电流范围。其约束条件^[2,3]为:

(1) 电弧炉稳定工作的电流 I_2 小于或等于变压器的额定电流 I_{2c} , 视在功率 S 小于或等于变压器的额定容量 S_e ; (2) 为了使电弧能稳定燃烧, 功率因数 $PF \leq 0.866$ 。

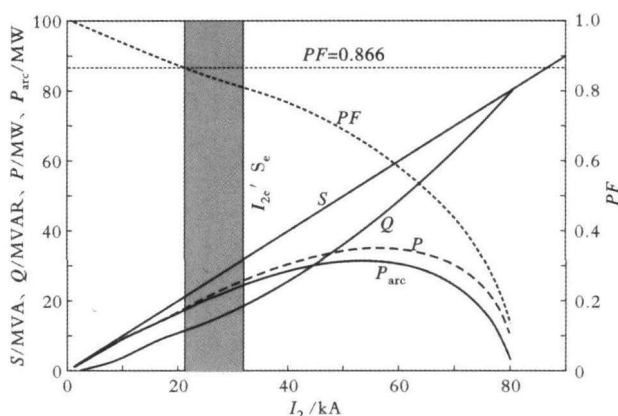


图 4 电气特性曲线 (U_3, X_3)
Fig. 4 Electrical characteristic curves (U_3, X_3)

由图 4 可知, 随着电流的增大, 功率因数不断减小; 在 $I_2 \leq I_{2c}$ 范围内, 随着工作电流的增大, 视在功率、有功功率和无功功率增大。为增大电弧功率, 提高电弧燃烧的稳定性, 可在许用工作电流范围内增大工作电流。各电压挡位下的许用工作电流列于表 4。

2.3 讨论

中信重机 50 t/32 MVA 电弧炉主熔化期使用

表4 工作电流许用范围/kA

Table 4 Security range of working current /kA

电气参数	工作电流 I_2
U_3, X_3	21.46 ~ 32.13
U_5, X_6	27.02 ~ 35.19
U_6, X_6	30.62 ~ 36.95
U_8, X_6	27.32 ~ 38.89

3挡电压3挡电抗运行,电抗器上端的功率因数约为0.812。3挡电抗下,电抗器存在着11.45%的电抗压降,炉用变压器一次侧实际线电压为30993 V,视在功率为26.46 MVA,容量利用率为82.70%。主熔化期若使用3挡电压4挡电抗,则功率因数将提高为0.841,炉用变压器的容量利用率可提高为90.00%,较现有工况提高了7.30%;采用5挡电抗运行,则功率因数约为0.858,易造成断弧现象。

熔化末期及氧化期使用6挡电抗运行,电抗器的电抗压降为0。电抗器内部电阻极小,则5、6、8挡电压下电抗器上端的电气参数等同于炉用变压器一次侧的电气参数。变压器容量利用率分别为88.52%、74.44%和80.34%。6挡和8挡电压下变压器容量利用率较低的原因是工作电流小。

中信重机50 t/32 MVA电弧炉炼钢过程中,若主熔化期使用3挡电压4挡电抗,且将各挡电压下的工作电流提高至额定电流,则可缩短冶炼周期,降低吨钢的电耗。

3 结论

(1)中信重机50 t电弧炉炼钢过程中,电抗器上端的功率因数均为0.800以上,供电回路中的电压、电流以及功率因数均处于三相平衡状态。

(2)电弧炉炼钢运行过程中,工作电抗与工作电流间呈非线性的负相关关系。根据实测数据,得到指数形式的非线性电抗模型分别为:

$$U_3, X_3: X_{op} = 3.183 \times \exp(20.524/I_2)$$

$$U_5, X_6: X_{op} = 2.811 \times \exp(18.669/I_2)$$

$$U_6, X_6: X_{op} = 2.060 \times \exp(25.353/I_2)$$

$$U_8, X_6: X_{op} = 2.002 \times \exp(24.825/I_2)$$

(3)制定了电气运行特性曲线,确定了现用的各挡电压下的许用工作电流范围。

(4)在3挡电压下运行,电抗器挡位应将原来的3挡改设为4挡,相应的炉用变压器容量利用率将提高7.30%,功率因数将由原来的0.812提高为0.841。

“十一五”国家科技支撑计划课题资助(2007BAF08B01)

参考文献

- 1 李士琦,李伟立,刘仁刚.现代电弧炉炼钢.北京:原子能出版社,1995
- 2 刘冰.100 MVA交流电弧炉供电优化研究:[博士论文].北京:北京科技大学,2008
- 3 孙彦辉.高阻抗电弧炉炼钢过程电气运行研究:[博士论文].北京:北京科技大学,2002
- 4 刘冰,曹立国,孙彦辉,等.高阻抗电弧炉合理供电技术研究.钢铁,2005,40(10):35
- 5 李京社,武俊,李士琦,等.交流电弧炉的工作电抗模型与电气运行合理化.钢铁,1999,15(6):40
- 6 武骏,孙彦辉,李京社.现代交流电弧炉电气运行合理化的研究.钢铁,1999,34(9):20

作者简介见2页

收稿日期:2009-12-15

“2010年先进钢铁材料国际会议”(International Conference on Advanced Steels 2010, ICAS 2010) 将于2010年11月9~11日在中国桂林召开。ICAS 2010合并了两个国际会议“International Symposium on Ultrafine Grained Structures (ISUGS)”和“International Conference on Advanced Structural Steel (ICASS)”,由中国、日本、韩国、印度共同主办,会议主题涵盖了钢铁冶金、物理冶金、钢种、加工和制造、模拟、性能及应用等领域。

会议主办单位:中国金属学会(CSM)、日本钢铁协会(ISIJ)、韩国金属和材料学会(KIMM)和印度冶金研究院(IIM)。会议组织单位:钢铁研究总院(CISRI)和先进钢铁材料技术国家工程研究中心(NERCAST)。

会议名誉主席:中国工程院徐匡迪院长

会议主席:中国金属学会翁宇庆理事长

我们真诚地欢迎所有感兴趣的人员踊跃投稿和参会,并提出宝贵建议。详情请查询会议网站 <http://www.nercast.com/icas2010>

ICAS 2010 会议秘书处;联系人:刘苏;地址:北京学院南路76号钢铁研究总院结构材料研究所
邮编:100081 电话:010-62185204 传真:010-62182308 电邮:icas2010@nercast.com