

一种用于交流电弧炉供电的三相均衡电力电子变换器设计与开发

梁艳召^{1,2}, 陈 鹰^{1,2}, 姜佳彦³, 张 龙¹, 郝占聚¹, 姜建国^{1,3}

(1. 河北省高速飞轮储能与节能技术重点实验室, 盾石磁能科技有限责任公司, 河北 石家庄 050800;

2. 西岭磁能科技正定有限责任公司, 河北 石家庄 050800;

3. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

摘要: 大功率电弧炉作为非线性且无规律负荷, 通过变压器直接接入电网, 会引起较低的功率因数和谐波问题, 不但电耗增加, 同样功耗下还要求更大的电网容量支持。同时这种供电方式使其只能通过传感器采集相电压、电流操控电极升降, 实现对炉温的控制, 该控制方式可靠性不足, 容易造成炉况不稳定、能耗高等问题。针对这些问题与不足之处, 提出一种三相均衡电力电子变换器, 用于电弧炉节能供电技术改造。针对电弧炉负荷特性, 通过电力电子整流逆变技术抑制电弧炉闪变和高次谐波, 提高功率因数, 消除对电网的冲击和污染, 起到节能降耗和减小石墨电极损耗的作用。

关键词: 电弧炉; 电力电子; 功率因数; 电能质量; 电流均衡; 谐波; 节能; 电极

Design and development of a three-phase balanced power electronic converter for AC arc furnace

LIANG Yanzhao^{1,2}, CHEN Ying^{1,2}, JIANG Jiayan³, ZHANG Long¹, HAO Zhanju¹, JIANG Jianguo^{1,3}

(1. Hebei Key Laboratory of High-speed Flywheel Energy Storage and Energy Saving Technology, Dunshi Magnetic Energy Technology Co., Ltd., Shijiazhuang 050800, China; 2. Xiling Magnetic Energy Technology Zhengding Co., Ltd., Shijiazhuang 050800, China; 3. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: As a non-linear and irregular load, the high-power electric arc furnace is directly connected to the power grid through the transformer, which will cause lower power factor and harmonic problems, not only causing increased power consumption, but also requiring greater power grid capacity support under the same power consumption. This power supply mode makes it possible to control the furnace temperature only by controlling the electrode rise and fall through the sensor collecting phase voltage and current. This control mode has many problems such as insufficient reliability, but also easy to cause the furnace condition instability, high energy consumption. In view of these problems and shortcomings, a three-phase balanced power electronic converter for energy saving power supply of arc furnace is proposed. According to the load characteristics of electric arc furnace, the power electronic rectifier and inverter technology can restrain the flicker and high harmonic of electric arc furnace, improve the power factor, and eliminate the impact and pollution on the power grid. At the same time, it can save energy and reduce the loss of graphite electrode.

Key words: electric arc furnace; power electronics; power factor; power quality; current equalization; harmonics; energy saving; electrode

中央引导地方科技发展资金资助项目 (226Z4505G)

0 引言

近年来,冶金和石化行业在政策驱动下,都在谋求进一步降低生产能耗。电弧炉作为该行业核心生产设备,同时也是耗能量最大的设备,研究降低电弧炉生产能耗新技术极为重要。电弧炉作为传统供电设备,采用大容量电弧炉变压器,由高压侧电网电压直接降至低压侧所需交流短网电压,其作为非线性以及无规律负荷,通过变压器直接接入电网,对电网和其他负荷产生一系列不良影响,如产生负序电流,造成电网三相不平衡;产生谐波,造成严重电压畸变;电网的剧烈扰动,产生电压波动和闪变;降低功率因数^[1,3,10,11]等。而其负荷特性和供电质量问题会引起电弧不稳,由此造成石墨电极受热不均,损耗增加^[4]。所以亟需研究优化电弧炉供电技术,改善电能质量,提高冶炼效率,降低冶炼电耗,节省电极消耗。

许多研究人员针对电弧炉接入电网引起的电能质量问题提出了解决方案。文献[1]提出基于限流器抑制电压波动和闪变的方法,根据电流的大小自动投切,实时跟踪,稳定系统无功,搭配固定电容器实现对系统的无功补偿,抑制电压波动和闪变。文献[2-3]提出运用无功动态补偿法,检测冲击性电弧炉负荷的瞬时无功电流;采用电流直接控制方法,产生无功补偿电流,以此抑制电网电压波动与闪变。文献[3]提出35 kV直挂式角接链式 STATCOM 控制策略,在电网电压不对称条件下对电弧炉负荷进行无功、谐波和负序的综合补偿。文献[4-6]提出电弧炉供电低压侧补偿装置,从低压侧提高功率因数,达到电能质量治理和节能的目的。文献[7]提出从电弧炉冶炼周期开始,投入大容量的串联谐振注入式混合有源滤波器。当电弧炉冶炼至还原期时,投入注入式有源滤波器,进行剩余阶段的谐波治理任务,分析了新型混合有源滤波器的运行机理与开关投切时产生的冲击电流。上述手段都是从补偿或者电气器件抑制的角度进行电能质量治理,没有从负荷特性上进行分析,从而设计出适应负荷

特性的供电装置,未能从根本上解决负荷瞬变特性引起的电能质量问题。本文依据电弧炉负荷瞬变特性,提出了利用电力电子变换器对电弧炉进行供电。充分发挥IGBT器件快速响应的特点,在负荷变化时,迅速调整变换器输出,通过直流侧进行能量交换,从根本上解决电弧炉电能污染问题。

随着“双碳”政策实施,电弧炉高能耗问题迅速被企业重视起来,如何有效提高冶炼效率、降低冶炼电耗成了行业发展的重中之重。文献[8]提出矿热炉的系统电抗中70%是由短网系统产生,短网损耗占据了系统自身损耗的70%以上,短网设计及短网侧补偿装置设计直接影响矿热炉运行的电耗指标。因此提出一种低压补偿装置,低压补偿后变压器铜损减少的同时,短网损耗也降低了。根据一些成功运行经验节电为3%~5%。文献[9]提出一种低压补偿装置,理由为高压补偿和中压补偿只能满足电力部门对企业功率因数指标的要求,对投入点之后包括变压器绕组和短网系统的二次侧大电流回路没有任何补偿效果,因而对矿热炉的输出功率和节能增产无任何提升作用,利用低压补偿能有效地减小三相不平衡度,降低电能损耗。文献[10]提出采用相应补偿措施后,由于拉弧更为稳定,电弧炉的平均加热功率提高了8.1%,每炉钢的平均通电时间缩短了10.9%,平均吨钢电耗减少了5.2%。上述文献表明,功率因数的提高,特别是低压侧功率因数的提升,电能质量的改善,均能够有效提高冶炼效率,降低冶炼电耗。本文提出的利用电力电子变换器对电弧炉进行供电,可以直接提高低压侧的功率因数,同时提升电能质量,所以能够有效降低冶炼电耗。

石墨电极作为电弧炉供电的直接引入装置,利用了石墨耐高温、导电性能佳的特点。但是由于电弧不稳定等因素,导致电极损耗过高。文献[11]提出利用三相平衡监测技术改善石墨电极炼钢环境,从而节省电极材料。核心为控制三相功率平衡,炉内温度场合理分布,避免了因为温度差引起的电极热应力破坏。本文提出的电力电

子变换器可以实现三相电流均衡控制,同时通过相电压重构方式进行电极调整,实现三相电压均衡。电流和电压均实现均衡控制,三相热功率也实现均衡控制,有效降低温度差引起的电极损耗。

本文从提升电弧炉性能的三个角度对比说明本方案的优越性,并详细介绍了本方案的控制方式及原理。最后通过实验的方式采集运行数据,分析了该供电装置实际运行效果。

1 方案设计

1.1 现有设备供电方案

图1为本文实验用的交流电弧炉传统供电方案的整体结构。主电路采用三相变压器降压输出85 V交流电压,利用电流传感器采样三相电极运行电流,通过三个独立的电极控制装置控制电极升降,从而控制运行电流。其中设备参数见表1。

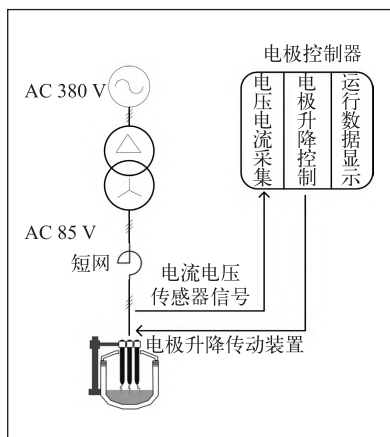


图1 系统原有供电示意图

Fig. 1 Original power supply diagram of the system

表1 设备参数

Tab. 1 Equipment parameter list

参数名称	参数数值
交流输入电压/V	AC 85 (三相)
交流输入电流/A	<700
容量/kV·A	100
电极间距/mm	130
电极直径/mm	65
干锅类型	石墨

1.2 改进方案

图2为本文改进的交流电弧炉供电方案的整体结构。供电装置添加在供电变压器和短网之间,主回路采用背靠背四象限变流器,通过可控整流和可控逆变的控制方式实现直流电压可调、逆变侧频率及电流可调。其中控制器通过实时采样交流电流实现交流电流直接控制,通过相电压重构方法用于电极升降控制。供电装置参数见表2。

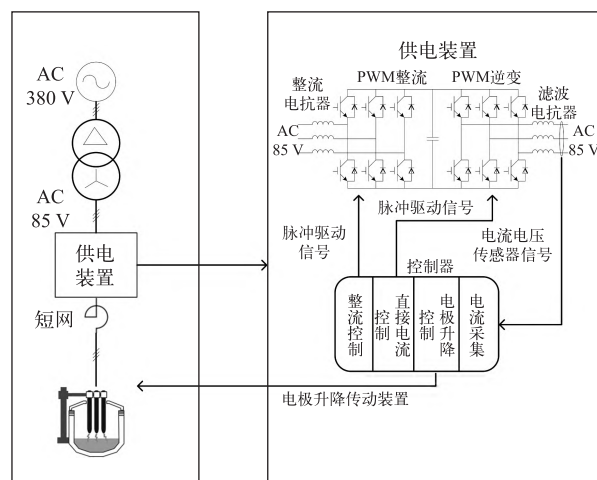


图2 改进供电方案示意图

Fig. 2 Diagram of improved power supply scheme

表2 供电装置参数

Tab. 2 Power supply device parameter

参数名称	参数数值
交流输入电压/V	AC 85 (三相)
交流输入电流/A	<700
容量/kV·A	100
交流输出频率/Hz	5 ~ 50
总电流波形畸变率(THD)(%)	< 3
总电压波形畸变率(THD)(%)	< 2

1.2.1 主回路设计及仿真

主回路采用四象限拓扑,采用PWM整流逆变控制技术,拓扑图如图3所示。在MATLAB下进行功率器件热仿真及控制原理仿真。仿真模型中,功率单元由3支FF600R06ME3组成,直流支撑电容可以选择450 V/6 800 μ F铝电解电容,每个功率单元安装3支,共12支,容值合计81.6 mF。电感选择感值20 μ H。功率器件配置如图4所示。

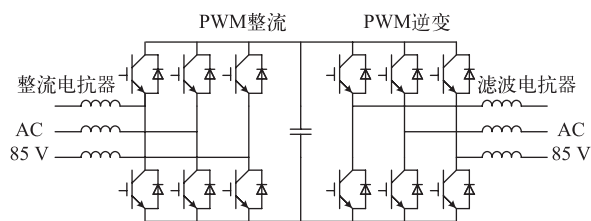


图3 供电装置主回路拓扑

Fig. 3 Main loop topology of power supply device

Input Requirements	
Control Algorithm	Sine-Triangle
DC Link Voltage (Vdc)	160 V
Blocking Voltage	600 V
Output Current (Iout)	333 Arms
Output Frequency	50 Hz
Switching Frequency	5000 Hz
Modulation Index	0.8
Power Factor cos (φ)	0.9
Load Type	Inductive Load
Modules/Discs	

图4 功率器件配置

Fig. 4 Power device configuration

热仿真结果如图5所示。每个功率单元发热量为 $(169.9\text{ W}+46.3\text{ W}) \times 2 \times 3=1.297\text{ kW}$ ，以此可作为功率单元热设计的依据。6个功率单元总计发热量7.783 kW，预计能量转换效率在94%左右。导致效率偏低的因素包含：①为了使用现有的85 V电压，网侧需要PWM整流；②85 V的电压使用了220 V电压常用的IGBT，电压裕量偏大。

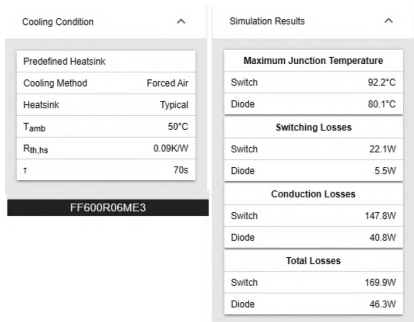


图5 热仿真结果

Fig. 5 Thermal simulation results

控制原理仿真模型中直流母线160 V，直流支撑电容81.6 mF，输出电感20 μH，电路电阻50 mΩ，控制输出电流1 000 A，电炉输出仿真波形如图6所示，其中 U_{dc} 为直流母线电压，单位为V； I 为电炉三相电流，单位为A。由此验证了方案的可行性。

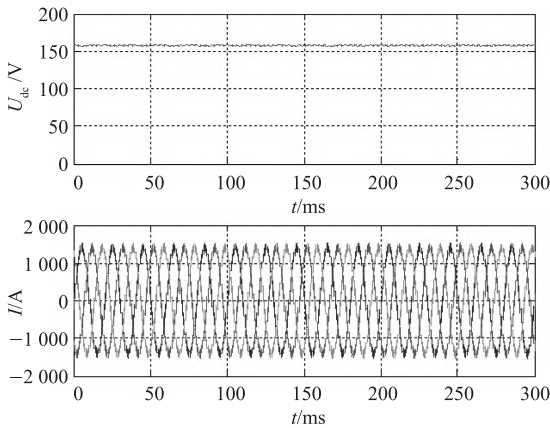


图6 波形仿真

Fig. 6 Waveform simulation

1.2.2 电流均衡控制方法

电弧炉三相电极输出均衡电流是提供冶炼生产所必需的合适热能的基础，是冶炼生产的必备条件。在实际应用中可能会出现由于三个电极插入炉料的深度不同等原因，导致三相电流不均衡，从而无法保证三相输出功率平衡，造成料面刺火严重，影响设备安全运行。

本方案采用了一种电弧炉电流均衡控制方法，以解决现有技术中电弧炉电极的三相电流不均衡的问题。其控制思路概述如下：

1) 首先利用电流传感器获取电弧炉三相电极的三相交流电流实际值。

2) 利用三相交流电流实际值通过正负序分离方法获取正序变换总电流和负序电流实际值。

3) 根据正序变换总电流和负序电流实际值进行电流均衡闭环控制。

(1) 正负序电流分离原理

正负序电流分离原理如图7所示。

计算流程如下：

1) 将三相交流电流实际值经过Clark等幅值变换得到 $\alpha\beta$ 两相直角坐标系的 α 轴电流信号和 β

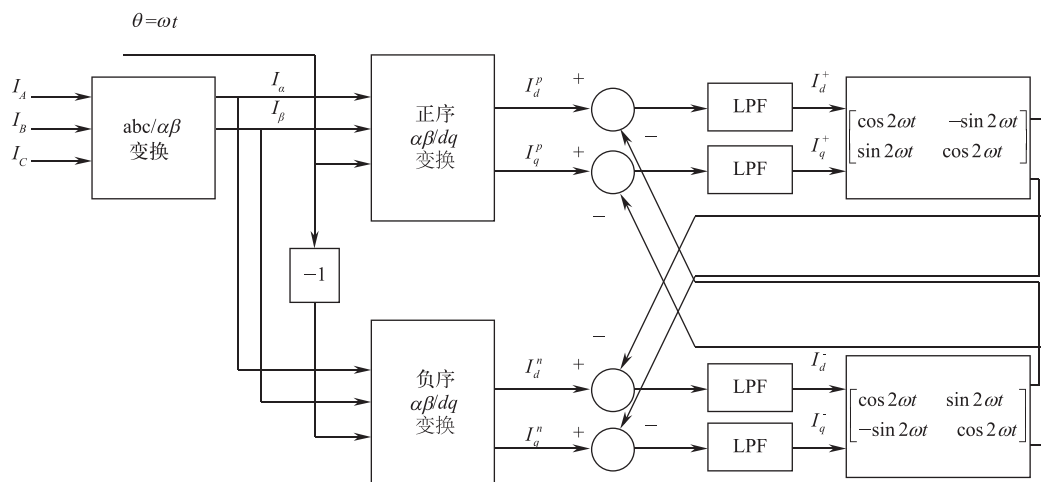


图7 正负序电流分离原理

Fig. 7 Principle of positive and negative sequence current separation

轴电流信号。

2) 采用正序Park变换，将 α 轴电流信号和 β 轴电流信号变换为正序变换总电流 d 轴分量和正序变换总电流 q 轴分量；采用负序Park变换，将 α 轴电流信号和 β 轴电流信号变换为负序变换总电流 d 轴分量和负序变换总电流 q 轴分量。

3) 根据负序变换总电流 d 轴分量和负序变换总电流 q 轴分量，得到负序电流 d 轴分量和负序电流 q 轴分量。

4) 通过式(1)计算得到正序变换总电流 d 轴分量和正序变换总电流 q 轴分量。

5) 通过式(2)计算得到负序变换总电流 d 轴分量和负序变换总电流 q 轴分量。

6) 基于式(3)计算第一矩阵变换值和第二矩阵变换值。

7) 将负序变换总电流 d 轴分量减去第一矩阵变换值得到负序电流 d 轴分量，将负序变换总电流 q 轴分量减去第二矩阵变换值得到负序电流 q 轴分量。

式(1)为

$$\begin{bmatrix} I_d^p \\ I_q^p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中， I_d^p 为正序变换总电流 d 轴分量； I_q^p 为正序变换总电流 q 轴分量； I_α 为 α 轴电流信号； I_β 为 β 轴电流信号； $\begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}$ 为第一系数矩阵。

式(2)为

$$\begin{bmatrix} I_d^n \\ I_q^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中， I_d^n 为负序变换总电流 d 轴分量； I_q^n 为负序变换总电流 q 轴分量； $\begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}$ 为第二系数矩阵。

式(3)为

$$\begin{bmatrix} V_{\text{alue1}} \\ V_{\text{alue2}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos 2\theta & \sin 2\theta \\ -\sin 2\theta & \cos 2\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d^- \\ I_q^- \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中， V_{alue1} 为第一矩阵变换值； V_{alue2} 为第二矩阵变换值； I_d^- 为负序电流 d 轴分量； I_q^- 为负序电流 q 轴分量； $\begin{bmatrix} \cos 2\theta & \sin 2\theta \\ -\sin 2\theta & \cos 2\theta \end{bmatrix}$ 为第一矩阵变换系数。

(2) 电流均衡闭环计算原理(如图8所示)

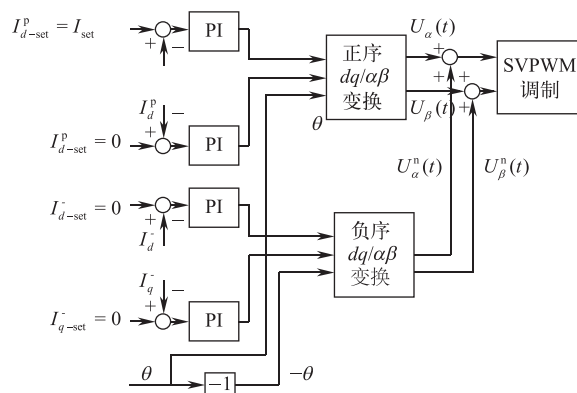


图8 电流均衡控制原理

Fig. 8 Current equalization control principle

图8控制流程如下:

1) 将正序变换总电流和总电流给定值输入到PID控制器, 输出正变换总电流 d 轴输出值和正变换总电流 q 轴输出值, 并将负序电流实际值和负序电流给定值输入到PID控制器, 输出负序电流 d 轴输出值和负序电流 q 轴输出值。

2) 将正变换总电流 d 轴输出值和正变换总电流 q 轴输出值经过正序Park逆变换得到第一电压参考值, 并将负序电流 d 轴输出值和负序电流 q 轴输出值经过负序Park逆变换得到第二电压参考值。第一电压参考值包括第一 α 轴电压参考值和第一 β 轴电压参考值; 第二电压参考值包括第二 α 轴电压参考值和第二 β 轴电压参考值。

3) 通过式(4)计算得到第一 α 轴电压参考值和第一 β 轴电压参考值。

4) 通过式(5)计算得到第二 α 轴电压参考值和第二 β 轴电压参考值。

5) 将第一 α 轴电压参考值和第二 α 轴电压参考值的和, 以及第一 β 轴电压参考值和第二 β 轴电压参考值的和输入SVPWM脉冲生成器, 输出变频供电变流器的占空比信号。

式(4)为

$$\begin{bmatrix} U_\alpha(t) \\ U_\beta(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d^{\text{OUT}}(t) \\ I_q^{\text{OUT}}(t) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, $U_\alpha(t)$ 为第一 α 轴电压参考; $U_\beta(t)$ 为第一 β 轴电压参考值; $I_d^{\text{OUT}}(t)$ 为正变换总电流 d 轴输出值; $I_q^{\text{OUT}}(t)$ 为正变换总电流 q 轴输出值;

$\begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$ 为第一逆变换系数。

式(5)为

$$\begin{bmatrix} U_\alpha^n(t) \\ U_\beta^n(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{d-}^{\text{OUT}}(t) \\ I_{q-}^{\text{OUT}}(t) \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, $U_\alpha^n(t)$ 为第二 α 轴电压参考值; $U_\beta^n(t)$ 为第二 β 轴电压参考值; $I_{d-}^{\text{OUT}}(t)$ 为负序电流 d 轴输出值;

$I_{q-}^{\text{OUT}}(t)$ 为负序电流 q 轴输出值; $\begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$ 为第二逆变换系数。

1.2.3 相电压重构电极控制方法

传统电弧炉采用变压器作为供电设备, 只能

通过传感器采集相电压电流操控电极升降, 实现对炉温的控制。该控制方式存在可靠性不足、采样延迟、自动控制效果不理想、人工控制依赖经验和技术水平的问题, 并存在引发电极软硬断事故的风险, 同时也容易造成炉况不稳定、能耗高等问题。这些问题增加了生产成本, 降低了企业的经济效益。为防止大电流烧坏加热棒, 还需要超大容量断路器及调压变压器等特种设备, 进一步增加了投资成本。本方案提供了一种电极自动升降控制方法, 以解决现有技术中由于三相电极在炉内的下降深度不一致造成炉内三相功率不平衡的问题。

(1) 相电压重构方法

变流器采用空间矢量脉宽调制技术。获取电弧炉三相电极的三相电流实际值, 并将三相电流实际值由三相坐标系转换至两相坐标系, 得到 d 轴电流分量和 q 轴电流分量。

d 轴电流分量和 q 轴电流分量进行PID运算得到输出值, 并将输出值进行Park逆变换, 得到 α 、 β 两相坐标系的 α 轴电压参考信号 U_α 和 β 轴电压参考信号 U_β , 最后经两相坐标系转化至三相坐标系, 得到当前的三相电压实际值, 即 U_A 、 U_B 、 U_C 。其中, 三相电压的坐标系转换示意图如图9所示, 三相电压实际值 U_A 、 U_B 、 U_C 的计算公式为

$$\begin{cases} U_A = U_\alpha \\ U_B = -\frac{1}{2}U_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}U_\beta \\ U_C = -\frac{1}{2}U_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}U_\beta \end{cases} \quad (6)$$

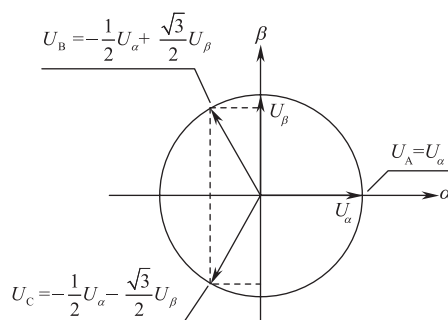


图9 相电压重构计算原理

Fig. 9 Calculation principle of phase voltage reconstruction

利用全周期均值滤波方法,对当前周期的三相电压实际值进行滤波,得到三相电压平均值。

对当前周期内每个采样点的第一相相电压的绝对值求平均,第一相相电压包括A相相电压、B相相电压和C相相电压。计算公式为

$$U_i^{\text{ave}} = \frac{\sum_{k=1}^N |U_i^k|}{N} \quad (7)$$

式中, $i=A,B,C$; $k=1,2,\dots,N$; $|U_i^k|$ 为当前周期内第 k 个采样点的 i 相相电压的绝对值。

(2) 电极控制方法

通过对每一相相电压平均值和相电压给定值进行PID计算,得到该相对应的电极升降方向和运行速度。计算流程为:

1) 偏差值计算,计算公式为式(8)

$$U_i^{\text{err}}(t) = U_{\text{set}} - U_i^{\text{ave}} \quad (8)$$

式中, $U_i^{\text{err}}(t)$ 为相的偏差值; $i=A,B,C$ 。

2) PID计算,计算公式为式(9)

$$U_i^{\text{OUT}}(t) = K_p U_i^{\text{err}}(t) + K_i \int_0^t U_i^{\text{err}}(t) dt + K_d \frac{dU_i^{\text{err}}(t)}{dt} \quad (9)$$

式中, K_p 为比例系数; K_i 为积分系数; R_d 为微分系数。

3) 电极的升降方向和运行速度计算。

PID输出值 $U_i^{\text{OUT}}(t)$ 为每相对应的电极运行速度系数,电极的升降方向通过 $U_i^{\text{OUT}}(t)$ 正负确定。若 $U_i^{\text{OUT}}(t) > 0$, 则确定 i 相相电压相对应的电极升降方向为上升;若 $U_i^{\text{OUT}}(t) < 0$, 则确定 i 相相电压相对应的电极升降方向为下降。

本方案提出的电极控制方法不仅可以实现电弧炉三相电极的自动化调节,而且在三相电流均衡的前提下,实现三相电压均衡,从而实现三相功率均衡。

2 对比实验

根据电弧炉改进方案进行工程样机搭建,并在电能质量、节能效果及电极消耗三方面进行实验对比,以检验本方案的有效性。图10为实验装置实物图,具体实验内容见表3。



图 10 实验装置实物图

Fig. 10 The actual picture of the experimental device

表 3 实验内容

Tab. 3 Experimental content

实验名称	实验内容
电能质量对比实验	同样的供电条件下,进行电能质量对比,包含炉内电流波形、电网电流均衡度、功率因数和功率稳定性
节能效果对比实验	同样的电能量下,进行电石产量对比
电极消耗对比实验	同样冶炼一炉,进行电极消耗对比

2.1 电能质量对比实验

电能质量对比实验包括对炉内电流、电网电流均衡度、功率因数及功率稳定性分别进行对比。

2.1.1 炉内电流波形对比

图11和图12为炉内交流电流波形(其中蓝色: A相电流,红色: B相电流,绿色: AB线电压,紫色: BC线电压),对比可见炉内电流由之前的无序、不均衡和非正弦改善为有序、均衡和类正弦度极高。

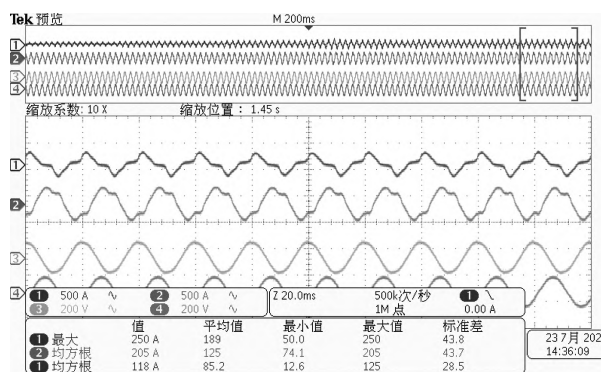


图 11 原有供电炉内电流波形

Fig. 11 Current waveform in the original power supply furnace

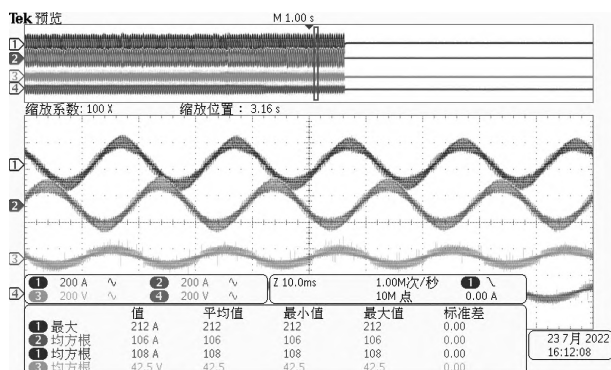


图 12 改进供电炉内电流波形

Fig. 12 Current waveform in the Improved power supply furnace

2.1.2 电网电流均衡度对比

图 13 和图 14 分别为改进前和改进后的电网电流均衡度，原有供电方案中电网侧三相电流不平衡度最高可达 7%，改进方案电流不平衡度降低到 0.2% 左右，由此可解决负序电流问题。

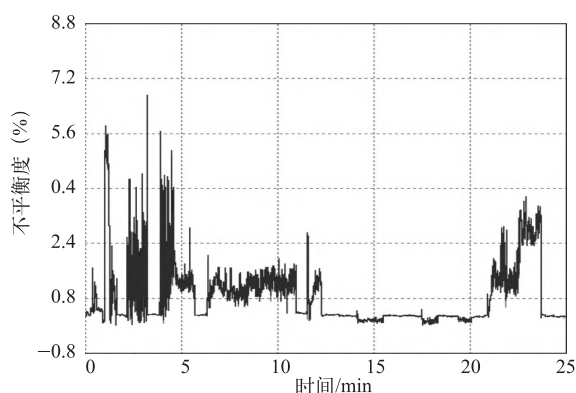


图 13 原有供电电网电流均衡度

Fig. 13 Current balance of the original power supply network

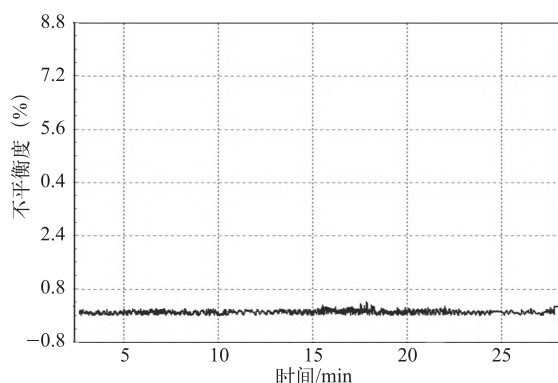


图 14 改进供电电网电流均衡度

Fig. 14 Current balance of the Improved power supply network

2.1.3 功率因数对比

图 15 和图 16 分别为改进前后的供电功率因数，原有供电系统电网功率因数波动较大，而且较低 (<0.8)；改进后供电系统功率因数稳定，而且极高 (>0.95)，因此改进方案可极大地改善电网质量。

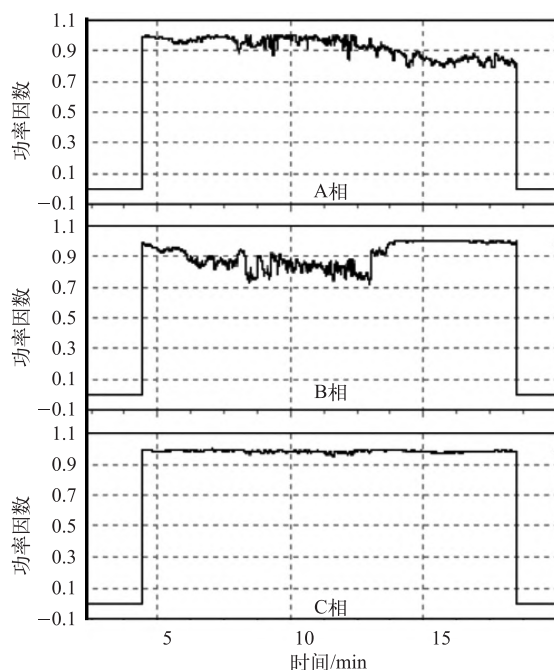


图 15 原有供电功率因数

Fig. 15 Original power factor

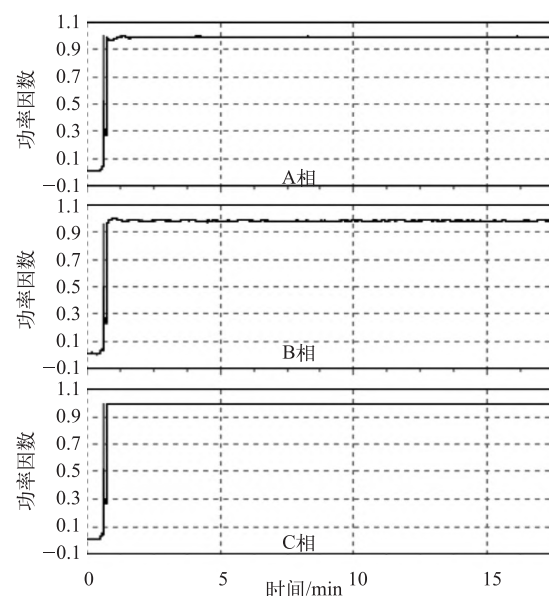


图 16 改进供电功率因数

Fig. 16 Improved power factor

2.1.4 功率稳定性对比

图17和图18为改进前和改进后的功率波形图,由此可得改进供电方案使电网侧三相功率波动性由剧烈改善为稳定,能有效解决功率波动问题,同时可提高冶炼熔池的稳定性。

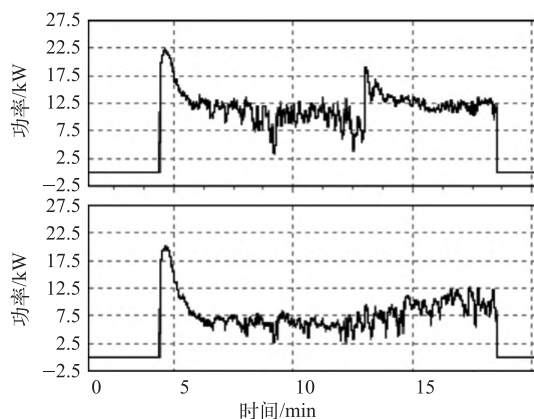


图 17 原有供电功率波形

Fig. 17 Power waveform in the original power supply system

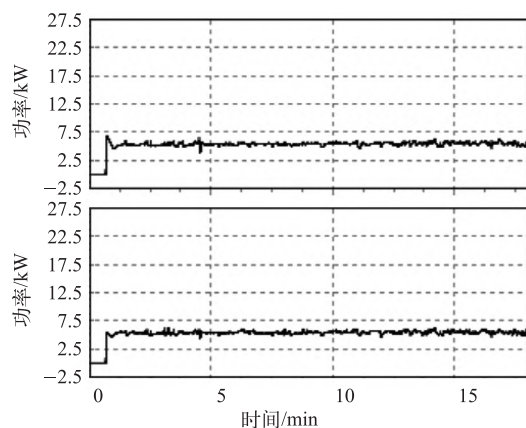


图 18 改进供电功率波动

Fig. 18 Power waveform in the Improved power supply system

2.2 节能效果对比实验

节能效果对比是通过在同样的电能下电石产量的对比进行的。实验步骤如下:

1) 按照化学反应比例10:6,准备定量的石灰石和兰炭。统一按照8 kg总重量准备。

2) 分别采用变压器和实验设备给电弧炉供电,达到同样能量时,停止供电。统一按照15 kW·h。

3) 冷却后,整炉料包含生成电石和未反应完全的原料,全部放入同等质量的水中,待出气

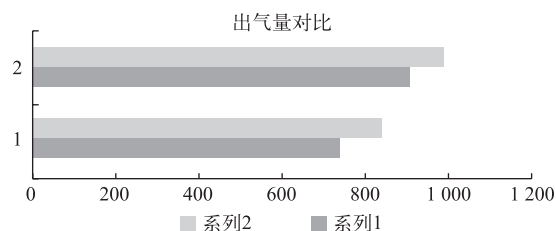
结束后,测量重量差。统一采用17 kg水。

4) 重量差即为反应出的乙炔和部分水蒸气,在所有对比条件一致的前提下,重量差对应电石产量。

实验结果如图19所示。在同样电能下,产量增加约20%,节能效果显著。

(单位: g)

数据组	变压器驱动出气量 (乙炔+部分水蒸气)	变流器驱动出气量 (乙炔+部分水蒸气)	出气最 差值
第一组	740	910	170
第二组	840	990	150
平均	790	950	160



同样能量下,产量增加:160/790=20.2%,节能20%。

图 19 节能效果

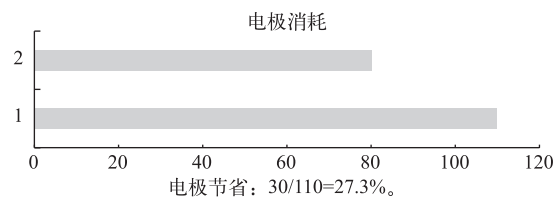
Fig. 19 Energy-saving effect

2.3 电极消耗对比实验

该实验是通过冶炼同样一炉电石所消耗的电极量进行比较的。实验步骤包括:①分别使用变压器和实验设备供电,同样电耗下冶炼一炉;②使用电子秤对比电极消耗量。实验结果如图20所示,改进方案可使电极节省27.3%。

(单位: g)

数据组	变压器驱动电极消耗	变流器驱动电极消耗	减小消耗量
数据 1	A:40 B:30 C:40	A:30 B:20 C:30	30
数据 2	A:30 B:40 C:40	A:20 B:30 C:30	30



电极节省:30/110=27.3%。

图 20 电极节省效果

Fig. 20 Electrode saving effect

3 结束语

针对电弧炉接入电网引起的电能质量问题及

其高能耗问题,本文提出了一种三相均衡电力电子变换器用于电弧炉节能供电技术改造方法。该方法充分发挥IGBT器件快速响应的特点,对电弧炉负荷瞬变的特性能迅速调整输出,从根本上解决电弧炉电能污染问题。另外,该方法通过实现三相电流和电压的均衡控制,从而实现三相热功率的均衡控制,有效降低了温度差引起的电极损耗,且通过保证电弧炉内的功率稳定使冶炼效果达到最佳节能目的。本方法通过仿真模型分析了设计的合理性;并通过工程样机进行了实验,分别在电能质量、节能及电极消耗三方面进行了对比实验。实验结果表明本方法可以提高功率因数,解决功率波动问题,有效改善电弧炉电能质量;同时节能效果及降低电极消耗效果显著。对于该改进装置在超大功率电弧炉供电系统中的应用效果仍需进一步验证。

参考文献

- [1] 赵玉寿. 电弧炉引起的电压波动和闪变的抑制方法研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2012.
- [2] 卢晶, 茆华风, 傅鹏, 等. 静止无功补偿器和发射器在电弧炉动态无功补偿系统中的应用[J]. 强激光与粒子束, 2019, 31(5): 77-83.
- [3] 万聪聪, 田翠华, 陈柏超, 等. 基于故障限流器的电弧炉电压波动和闪变抑制研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(4): 126-131.
- [4] 郑建华. 利用三相平衡监测技术改善UHP石墨电极炼钢条件的实践与应用[J]. 炭素技术, 2018, 37(4): 61-66.
- [5] 黄黎芬, 姜建国, 王育飞. 一种新型DSTATCOM用于电弧炉柔性供电的研究[J]. 微计算机信息, 2007, 188(1): 208-210.
- [6] 杨贤昭, 程耕国, 刘惠康. 无功动态补偿在电

弧炉供电系统中的应用[J]. 控制工程, 2011, 18(3): 410-412.

- [7] 常非, 王一, 梅红明, 等. 35 kV直挂式角接链式STATCOM控制策略[J]. 高电压技术, 2016, 42(1): 121-126.
- [8] 叶辛, 许朝阳, 郭松, 等. 矿热炉低压无功补偿优化设计方案[J]. 电力电容器与无功补偿, 2016, 37(5): 7-10, 20.
- [9] 王秀艳, 夏晓峰, 王素珍, 等. 矿热炉节电技术探讨及补偿装置设计[J]. 电力电容器与无功补偿, 2015, 36(4): 22-26, 31.
- [10] 王红君, 石亚慧, 岳有军, 等. 用于电弧炉谐波治理低损耗混合有源滤波器的研究[J]. 中国科技论文, 2017, 12(11): 1280-1284.
- [11] 石山, 刘树, 梅红明, 等. STATCOM在电弧炉电能质量治理上的应用[J]. 电力电容器与无功补偿, 2015, 36(6): 63-68.

作者简介

梁艳召(1983—), 男, 工程师, 研究方向为电力电子与电网技术。

陈鹰(1956—), 男, 正高级工程师, 研究方向为输配电系统及新型节电技术。

姜佳彦(1988—), 女, 硕士, 实验师, 研究方向为电力电子系统控制与仿真。

张龙(1988—), 男, 工程师, 研究方向为电力电子技术与测试技术研究。

郝占聚(1987—), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为电力电子系统控制与仿真。

姜建国(1956—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力电子技术和设备。

(收稿日期: 2022-02-20)

低压能量回馈装置中SHEPWM技术的研究 P57

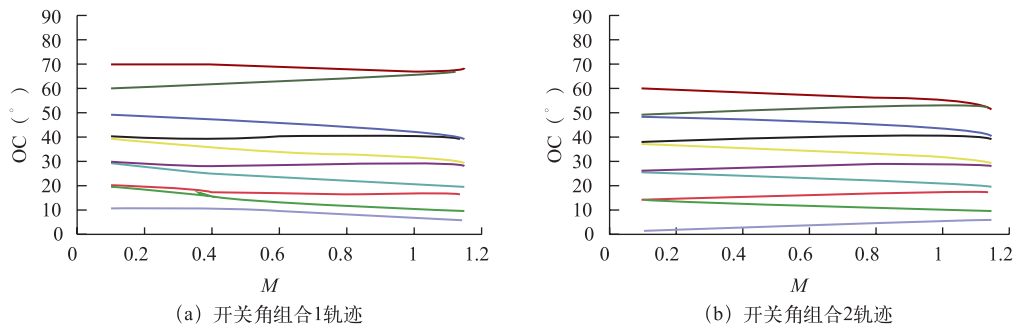


图 3 0.1 ≤ M ≤ 1.15 时开关角轨迹图

Fig.3 Switching angle trajectory diagram when 0.1 ≤ M ≤ 1.15

300 MW可逆式抽水蓄能水轮机组摆度大原因分析与处理 P72

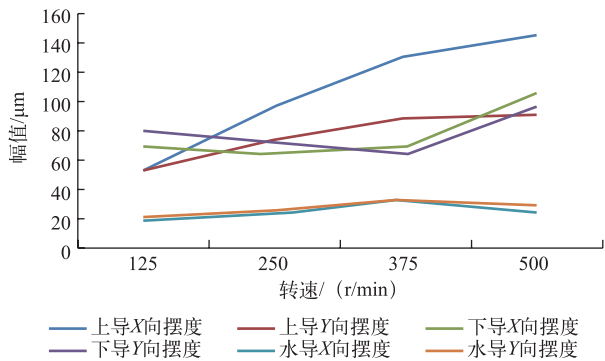


图 变转速过程各摆度 1 倍频幅值趋势

Fig. The trend of frequency amplitude of each swing during the variable speed process

一种用于交流电弧炉供电的三相均衡电力电子变换器设计与开发 P97

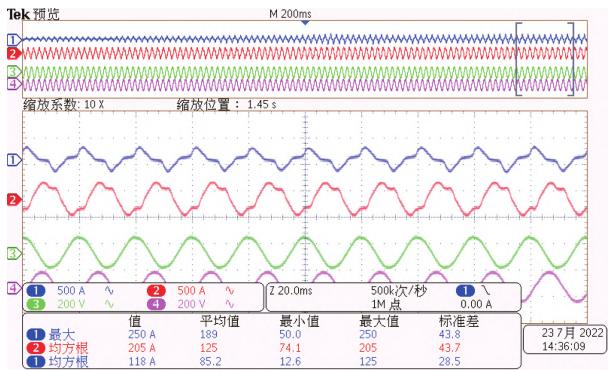


图 11 原有供电炉内电流波形

Fig. 11 Current waveform in the original power supply furnace

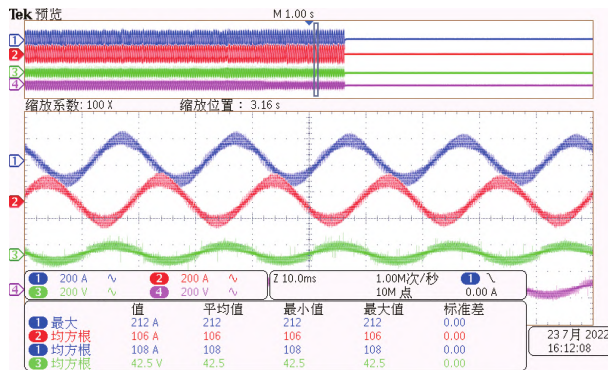


图 12 改进供电炉内电流波形

Fig. 12 Current waveform in the Improved power supply furnace