

24 脉波 90kA 真空凝壳炉用直流电源的研制及应用

李 宏¹, 孙堂敏²

(1. 西安石油大学, 陕西 西安 710065; 2. 北京百慕航材高科技股份有限公司, 北京 100095)

摘 要: 本文介绍了用于国内首台 1.5T 真空凝壳炉供电的 90kA/85V 直流电源, 文中不但详细介绍了其应用背景、系统构成、主电路、控制电路主要单元工作原理和上位机监控系统, 而且给出了实用效果, 获得了应有的结论, 最终指明了应用前景。

关 键 词: 真空凝壳炉; 直流电源; 研制与应用

中图分类号: TM461

文献标识码: A

文章编号: 1002-0322(2019)02-0057-05

doi: 10.13385/j.cnki.vacuum.2019.02.11

Development and application of DC power supply for 24 pulse wave 90kA vacuum condensing furnace

LI Hong¹, SUN Tang-min²

(1. Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China; 2. Beijing Baimtec Material Co, Ltd., Beijing 100095, China)

Abstract: The 90kA/85V DC power supply of the first 1.5T vacuum condensing furnace in China is introduced. This work mainly focuses on the application background, system constitution, main circuit, principle of main unit of control circuit and monitoring system of upper computer. The practical effect and application prospect are discussed.

Key words: vacuum condensing furnace; DC power supply; studies & application

电力电子变流技术的可控时代起源于 1957 年美国 GE 公司发明了人类第一只晶闸管。到今经过 61 年的发展, 晶闸管仍然在电力电子器件的庞大家族中, 占据着单只功率最大的霸主地位, 对使用电流达 10kA 以上的工业用直流电源, 人类还是多选用晶闸管作为主功率器件。

直流真空浇铸用凝壳炉, 是完成以高性能合金或贵金属为原料、制造结构极为复杂的特殊用途工件的必用设备, 这种设备常用来在真空环境下, 以浇铸工艺制造诸如飞机垂尾、发动机部件、防腐泵阀、航天航空飞行器中使用的复杂结构工件。其生产过程可以简单的概况为, 在真空凝壳炉内给要被熔化电极中通过大直流电流, 保持其端面与坩埚中的金属溶液或起弧料之间保持一定距离, 从而产生直流电弧, 使得高性能合金或贵金属电极被电弧熔化, 熔化形成的液态金属进入结晶器(又称为坩埚), 待所有金属锭子都熔化完后, 使得坩埚旋转一定的电角度, 在真空条件下将液态贵金属材料浇铸入型壳中铸成工件

毛坯。我国真空凝壳炉及配套电源经过近 20 多年的发展, 2017 年前单炉最大可浇铸 800kg 钛合金, 配套电源的额定电流与电压为 65kA/85V。为了满足中国制造 2025 及航空航天、兵器工业等装备制造技术的发展, 国内 2018 年研制成功 1.5T 凝壳电弧炉及配套电源系统。我们有幸在几年前研制成功当时国内单炉最大浇铸容量(800kg)真空凝壳炉用直流电源 65kA/80V 的基础上, 承担研制 1.5T 真空凝壳炉用 90kA/85V 直流电源系统, 并取得了良好的实用效果。

1 大浇铸量真空凝壳炉对供电电源的特殊要求

真空凝壳炉随着单炉可浇铸贵金属重量的不断扩大, 被溶化锭子直径也相应增大, 对供电电源的电流值要求亦随之加大, 要求锭子在较短时间内被溶化成液态, 然后进行真空状态下快速烧铸, 因钛合金或其他贵金属熔化时温度达 1600℃ 以上, 溶化后的液体进入坩锅中暂存, 为

收稿日期: 2018-06-10

作者简介: 李宏(1960-), 男, 陕西省乾县人, 硕士, 教授。

通讯作者: 孙堂敏, 高级工程师。

保证坩埚不被熔化,通常坩埚都采用水冷,同时为防止逐渐被熔化锭子径向外沿与铜质坩埚内壁之间产生放电起弧击穿坩埚,制造时通常锭子的径向外沿与坩埚的内壁之间设计有 20mm ~ 60mm 的间隙,因熔化时真空凝壳炉熔化室内抽真空,造成被熔化锭子外部温度低,中间温度高,导致被融化金属锭子离已融化金属液面最近端面径向中间熔化快,靠边沿熔化慢出现严重的掏心,引起电弧长度不同,使电流波动加剧,真空凝壳炉对供电电源的电流稳定性要求很高,稳流精度是必须严格保证的指标。

其次,因熔化速度很快,锭子熔化过程中常常会有被熔化贵金属掉块或成连续线条状流入坩埚,由此导致锭子与坩埚中的液态金属短路,这将造成供电直流电源的输出正极与负极短路,且这种情况是频繁出现的,另一方面,为保证被熔化锭子最下端与已融化液态金属表面之间保持基本固定的距离,防止距离太大引起弧压太高起边弧或击穿坩埚,因而在控制程序中都设计有被融化电极上下调节的程序,由于电极杆(被融化的锭子)在熔化过程中频繁上下调整(该调整一般由伺服电机拖动),也就是供电直流电源正负极的负载电阻不断在变化,这也会影响电流的稳定性。

第三,凝壳电弧炉在将锭子从固态化为液态的过程完成后,为保证被熔化金属的温度及良好的流动性,要求直流电源输出电流从正在运行的电流值,瞬时要变为零,电流变化率极高。由于整流变压器二次绕组与直流电源输出电极之间引线电感实实在在存在,引起极高的尖峰过电压 Ldi/dt ,直流电源各构成部件及主电路中的电力电子器件应有承受如此高的 Ldi/dt 尖峰过电压,而不发生击穿等问题的能力。

第四,国家对电网的绿色化指标要求越来越高,直流电源使用时,注入电网的谐波要满足国家标准要求。

2 90kA/85V 真空凝壳炉供电电源的设计及工作原理

根据以上要求,我们设计了图 1 所示的真空凝壳炉电源系统框图,共由高压开关柜、整流变压器、主整流电路、控制环节、纯水冷却器、电压电流检测、保护电路、PLC 监控与上位机,共计 8 个功能单元构成,各主要单元的工作原理、特点和功用可分别介绍如下:

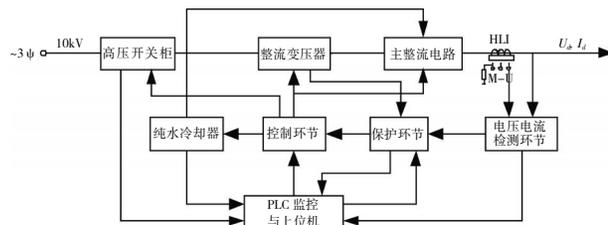


图 1 90kA/80V 直流电源系统框图

Fig.1 Diagram of the 90kA/80V DC power supply system

2.1 高压开关柜

考虑到 1.5T 真空凝壳炉每个工作周期时间短,运行时间不超过 20 分钟,而且最终用户一台电源供多台真空凝壳炉分时使用,每天需要多次开炉与停机,供电的高压开关柜必须频繁的进行分合控制,鉴于常规高压开关柜中使用高压真空断路器分断和接通高压,而真空断路器设计的初衷,是用于高压配电室内,在进行高压系统检修时分断高压通路,平时基本处于接通状态,每年动作次数仅仅几次,为解决常规的高压开关柜真空断路器寿命有限,难以满足真空凝壳炉这么高频率的合分操作,避免原来这种应用后出现的合不上分不断等问题,我们经多年的摸索和改进,对这种系统应用高压真空接触器取代高压真空断路器,增加过流与短路保护,使其工作寿命提高了几个数量级,且操作更方便灵活,取得了很好的效果。

2.2 纯水冷却器

纯水冷却器用来为整流柜中的元件母线和快熔母线及晶闸管提供冷却散热,为解决在我国北方冬天气温低于零度,纯水冷却器中水会结冰冻结问题,我们对纯水冷却器设计为恒温系统,其控制系统除带有循环水泵及水质水温水压监测与控制环节外,还专门设计有水温加热与空调冷却系统,当冷却水温低于 5℃ 时,自动启动加热环节,保持最低水温不低于 5℃,最高冷却水温不高于 40℃,如发生最高冷却水温高于 40℃ 时,空调启动进行降温冷却。从而保证了晶闸管、快速熔断器及元件母排和快熔母排的可靠散热与冷却。

2.3 干式环氧浇铸整流变压器及整流方案

我国研究和制造整流器的历史可以追溯到 20 世纪 70 年代,因当时电力电子器件工艺和技术的限制,晶闸管的压降较大,故在当时为提高运行效率,国内形成一个粗浅基本认识,这就是对同样负载电流的直流供电系统,因双反星型可控整流电路,工作时电流通路中少了一个晶闸管

压降,运行效率高于三相桥式可控整流电路,这个概念在整流行业一直延续到今,因而不论电流大小,基本有个行业习惯,直流电压低于 150V 的系统使用双反星型可控整流电路,直流电压高于 150V 的使用三相桥式可控整流电路,但这个粗浅的基本概念,到今没有查到有严谨的理论计算和严格证明。

60 多年的发展,电力电子器件制造工艺和技术不断完善和进步,特别是有关电力电子器件制造设备的上档次和智能化,在晶闸管制造中采用喷腐、中子辐照、管壳结构改进、扩散方式、结终端结构改进等新工艺和新技术,使得同样额定电压条件下,晶闸管的管芯厚度变薄,通态压降得以大幅度降低,以代表 20 世纪 70 年代最高水平的 4kV 3 英寸晶闸管为例,在 3000A 电流时测试,当时通态峰值压降为 1.85V,现在同规格晶闸管通态峰值压降仅仅 1.4V,可见通态峰值压降低幅度接近 30%,另外因双反星型可控整流电路,整流变压器二次绕组仅仅半波工作,又比三相桥式可控整流电路多了一个平衡电抗器,其整流电路输出负(或正),来自整流变压器二次两个双反星型之间的平衡电抗器中点,总输出引线要远远长于三相桥式可控整流电路,整流变压器的效率必然要低于同容量的三相桥式可控整流电路,这些因素综合后,双反星型可控整流系统的效率不一定比三相桥式可控整流电路高,我们将另外就此专文就此问题进行分析与论证!

由于此电源系统额定运行时功率高达 7.65MW,为满足注入电网的谐波指标要求,所以整流变压器组与可控整流电路设计为 24 脉波,每个变压器一次采用外延三角形接线,二次为三相桥式同逆并联结构,4 台整流变压器一次依次移相 15°,一次移相角度配置为 +22.5°、-7.5°、+7.5°、-22.5°。为解决油浸式整流变压器体积大,存在有火灾隐患,有漏油风险,长期使用油质变劣等问题,在国内如此大功率的整流系统中,首次设计选用环氧浇铸干式整流变压器,从而使体积缩小,效率得以提高。图 2 给出了整流变压器内部原理电路及整流方案图,串于整流变压器组中每个与变压器一次的交流电流互感器 CT_i (i=1~8)为交流过流保护提供取样信号。交流保护用来在直流霍尔传感器或直流电流闭环调节器失效,直流过流保护又无法及时动作时,由交流过流保护动作切断系统输出,防止直流输出电流不受限制增大,导致严重事故而添加事故,

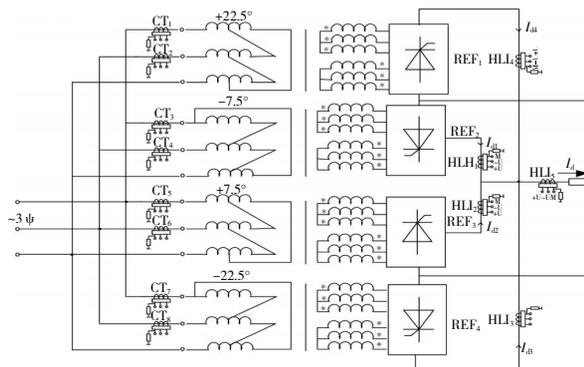


图 2 整流变压器内部原理及整流方案图

Fig.2 Internal principle of rectifier transformer and rectification scheme HLI1 ~ HLI5 与 HLV1 分别为霍尔电流与电压传感器,用来为直流电流的闭环调节和过流与过压保护、参数显示与采集提供取样信号。

本系统中整流变压器和整流柜选用 24 脉波三相桥式同相逆并联,由 8 个相同结构的三相桥式可控整流单元,组成 4 个同相逆并联环节,然后并联获得总电流 90kA/85V 的输出。

2.4 整流单元电路图

图 3 给出了每个三相桥式分整流单元的原理电路图,图中每个晶闸管旁并联的 R₀-C₀ 串联网络及并联的压敏电阻 R_{u1},为其自身防止尖峰过电压的阻容吸收环节。R-C、R_{u2} 为交流进线过电压吸收环节,R₁-C₁、R_{u3} 为直流出线侧过电压吸收环节。正是由于有这些环节的存在,才保证了每次真空凝壳炉熔化完贵金属锭子后,进入翻转浇铸前,整流柜输出电流从 90kA 在极短时间(ms 级内)突变为零,进行坩埚翻转浇铸,整流单元内的晶闸管承受如此高的 Ldi/dt 尖峰过电压而不出现被击穿问题。图中与每个晶闸管串联的快速熔断器为防止晶闸管击穿或其他原因直通后,电子式过流或短路保护电路失效使事故扩大,用此来使故障支路的晶闸管自动解列,退出运行而不影响整个电力电子变流系统的继续全电流输出工作。

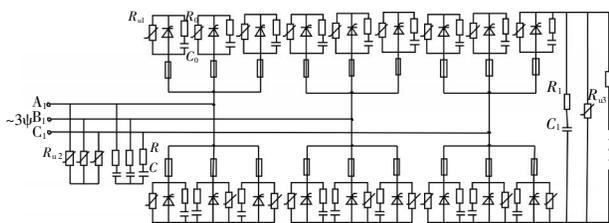


图 3 每个三相桥式分整流单元的原理电路图

Fig.3 Schematic diagram of the principle of each three-phase bridge sub-rectifier unit

3.5 控制环节

控制环节包括同步信号产生、晶闸管触发脉冲形成、电流闭环调节器、调制脉冲形成、脉冲功

放与整形、动态无扰动切换、继电操作等等单元，本节仅给出触发脉冲形成、动态无扰动切换、闭环调节器 3 个单元的原理分析，其余部分可参见参考文献。

(1) 触发脉冲形成单元

考虑到单控制板要完成 24 脉波触发脉冲的产生、闭环调节、动态热备用、数据监测和处理、输出脉冲与输入同步电压相序自适应、控制运算及逻辑关系极为复杂，因而该部分以高性能数据处理芯片 DSP 和复杂可编程逻辑器件 CPLD 配合完成 24 路触发脉冲的产生、闭环调节及软件式故障保护、输出 24 路相位依次严格互差 15° 的调制触发脉冲，每路触发脉冲选用双窄脉冲，其中双窄脉冲的每个脉冲宽度大于 15° 而小于 30°，采用频率为 20kHz 调制脉冲将双窄脉冲调制为脉冲宽度更窄的调制脉冲，以减少触发脉冲电路中的损耗，触发脉冲形成单元利用 DSP 强大的数据和信息处理能力，按同步信号产生环节输出的同步方波信号，前后沿时间确定触发脉冲移相的范围，依据闭环调节器输出幅值的大小，通过内部计算确定输出触发脉冲的相位角度。应特别强调的是，在该触发脉冲形成单元内，依据高性能的软件设计，实现了触发脉冲与晶闸管阴阳极电压的严格同步，而与整流变压器一次三相电压的接入相序没有关系，达到相序自适应功能。同时触发脉冲形成单元设计有与备用触发控制板之间同步通信的功能，并能把运行参数及时与备用触发控制板中的触发脉冲形成单元进行交互，运行中两套触发脉冲控制板中，一个在线运行，一个实时在线热备用，从而保证了正在使用的主触发控制板出现问题时，另一个备用的触发控制板能在 ms 级时间内自动无扰动投入，代替原运行的触发控制板运行，实现触发控制系统的免停电检修，保证了触发控制系统的高度稳定与可靠，图 4 给出了触发脉冲形成与动态热备用环节的原理框图。

(2) 电流闭环调节器

对真空凝壳炉这种使用中频繁短路的负载，电流的稳定度关系着真空凝壳炉的化料均匀性及浇铸工件的质量，电流闭环调节器的功用表现在随时对实际输出电流和用于上位机的给定差值进行调节，保证输出电流的高度稳定，本系统中选用数字式 PID 调节器，其调节原理可用式 (1) 表达：

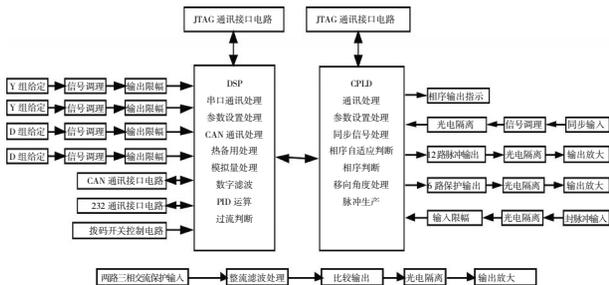


图 4 触发脉冲形成单元与动态热备用单元的原理框图

Fig.4 Diagram of the trigger pulse forming unit and the dynamic hot spare unit

$$u_k = Ke + \frac{1}{T} \int e dt + \frac{de}{dt} T_d \tag{1}$$

式中 K 、 T 、 T_d 分别为比例、积分和微分时间常数。这些常数在实际调试过程中，可按系统实际情况，通过计算机在运行过程中随时设置和调节，而不像模拟式调节器那样需要停机更换电阻与电容。

2.6 PLC 与上位机监控

为了实现 90kA/85V 直流电能的高度自动化与智能化，该电源系统设计有 PLC 与上位机监测单元。PLC 随时监测来自各主要单元之间(整流变压器、整流柜、高压开关柜、纯水冷却器、霍尔电流传感器、霍尔电压传感器)的有关系统运行电压、电流、温度、水压、水流量、瓦斯气体与设定值进行比较判断，以确定是否正常，出现运行不正常状态时及时进行保护，并把信息及时传送给上位机，同时接受上位机下达的电源启动、运行、停机、保护、复位、运行电流值设定等。这些信息通过 PLC 的输出口以通讯模式传递给触发脉冲形成单元，并且应用 Modbus 总线实现与上位机的通信，在上位机中应用组态软件 Wincc 构成监控及报警画面，从而方便运行人员观察、操作与控制，同时记录运行信息(曲线参数，报警，保护)，实现运行档案的全方位记录，有关这部分的详细软件此处从略。

2.7 保护单元

大型电力电子变流设备的故障保护，对增强设备运行的可靠性，保证人身及设备安全，提高经济效益都有极为重要的意义。本直流电源系统设计有交流过流、过压，直流输出过流、过压、缺相，整流柜冷却水温高，整流变压器温度高，晶闸管失效，快速熔断器熔断，触发控制板异常等故障保护功能，使整个电源的可靠性与安全性达到一个很高的水平。

3 应用效果简介

本文所述的 90kA/85V 真空凝壳炉用直流电

源,已成功的用于某研究院的国内首台1.5T凝壳电弧炉供电系统中,整流变压器采用环氧浇铸的干式整流变压器,出于减少每台重量和利于散热冷却考虑,整流变压器专门制造为两台独立的12脉波带有移相绕组的分整流变压器,晶闸管的电压与电流安全裕量都选用4倍,每个整流臂采用4英寸的晶闸管3只并联,每只晶闸管串联快速熔断器。经运行时实际测试,每个整流臂并联元件的均流系数高于0.92,4个整流单元并联的均流系数大于0.93,整流变压器运行温度低于85℃,整流变压器二次的4个三相绕组对应相的电压误差低于1%,满功率运行时注入电网的谐波经第三方检测高于国家标准要求,系统保护灵敏,上位计算机控制与监控灵活方便,取得了良好效果。图5(a)给出了24脉波触发控制板输出相邻两相触发脉冲波形,图5(b)给出了24脉波运行时,直流侧输出的直流电压波形。

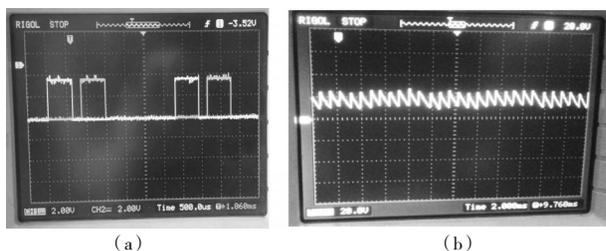


图5 系统运行的实际波形(横轴扫速2.5ms/div)。

(a) 24脉波触发控制板输出相邻两相触发脉冲波形

(b) 运行时直流电源系统输出的24脉波直流电压波形

Fig.5 Actual waveform of the system operation (horizontal axis sweep speed 2.5ms / div). (a) 24-pulse adjacent two-phase trigger pulse waveform output from the trigger pulse forming unit. (b) 24-pulse DC voltage waveform output from the DC power system during operation

4 结论

通过以上对90kA/85V真空凝壳炉用直流电源系统的分析和实际应用效果的介绍,我们可得下述结论:

1. 对大电流应用需求的直流电源系统,选用多脉波可控整流方案,不但可以减小每个整流臂并联晶闸管元件的个数,提高均流效果,而且降低了注入电网谐波;

2. 在先工频降压后整流的AC-DC电力电子变换系统中,将整流变压器直接设计制造为环氧浇铸的干式结构,既具有效率高,体积小,重量轻

的优点,又同时避免了漏油,瓦斯,火灾等风险,是今后发展的一个方向;

3. 电力电子器件制造工艺的不断进步,晶闸管通态压降的逐渐降低,促使传统的三相桥式可控整流电路效率低于双反星型可控整流电路的电压分界线已远远低于传统的整流系统额定输出电压150V;

4. 应用DSP与CPLD配合,通过巧妙的软件设计,可以完成24脉波晶闸管整流系统的智能移相触发,实现故障的动态无扰动切换,具有相序自适应,闭环数字调节,脉冲调制等较完善功能,将大电流晶闸管直流电源触发与控制环节的性能提高了一个档次;

5. 特大电流直流电力电子变流设备,因运行功率很大,其良好的监控保护对设备、人身和供电安全都极为重要,是系统运行可靠稳定的关键;

6. 应用PLC和上位机配合,对实现电力电子变流设备的高度自动化,减少操作和值班人员,降低值班人员劳动强度,提高运行效率都有着极为重要的意义;

7. 本文介绍的直流电源方案,不但可以用于负载频繁短路的电弧炉系统,而且可以应用于负载较为稳定的电化,有色冶炼行业,其应用前景是十分广阔的。

参考文献

- [1] 张明勋. 电子变流设备设计与应用手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1990.
- [2] 李宏著. 常用电力电子变流设备的调试与维修基础[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [3] 李宏著. 常用电力电子变流设备的调试与维修实例[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [4] 马开道. 有色金属冶炼及装备[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009.
- [5] 李宏. 浅析大电流晶闸管直流电力电子成套装置的均流问题[J]. 电气传动自动化, 2001, 增刊: 196 ~ 198.
- [6] 李宏. 试探影响真空自耗电极熔炼炉供电直流电源稳定性的因素[J]. 真空, 2012. 49(6): 63 ~ 66.
- [7] 李宏. 10t真空电弧炉用40kA直流电源的研制与应用[J]. 电力电子技术, 2012. 46(11): 72 ~ 75.
- [8] 李宏. 16.5MW高压直流电源的研制与应用[J]. 大功率变流技术, 2016. (6): 66 ~ 70.