



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 116025440 A

(43) 申请公布日 2023. 04. 28

(21) 申请号 202310034240.2

(22) 申请日 2023.01.10

(71) 申请人 西安热工研究院有限公司

地址 710048 陕西省西安市碑林区兴庆路
136号

(72) 发明人 周毓佳 张一帆 李红智 姚明宇

(74) 专利代理机构 西安通大专利代理有限责任
公司 61200

专利代理师 钱宇婧

(51) Int. Cl.

F01K 25/10 (2006.01)

F01K 7/32 (2006.01)

F01D 13/00 (2006.01)

G21C 1/32 (2006.01)

G21C 15/02 (2006.01)

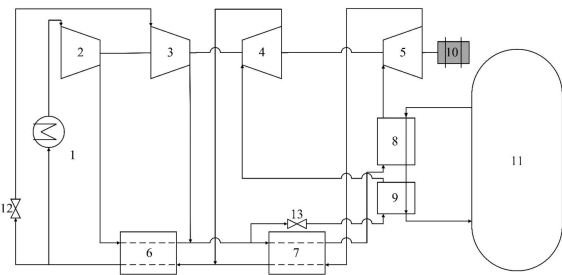
权利要求书2页 说明书4页 附图1页

(54) 发明名称

一种高效超临界二氧化碳高温气冷堆系统
及其运行方法

(57) 摘要

本发明公开了一种高效超临界二氧化碳高温气冷堆系统及其运行方法,该系统包括预冷器、主压缩机、再压缩机、高温透平、低温回热器、高温回热器、高温氦-超临界二氧化碳换热器、低温氦-超临界二氧化碳换热器和反应堆。本发明提出了包含高温分流再压缩循环回路和低温再分流再热膨胀循环回路的两级分流超临界二氧化碳循环的发电系统,通过布置发电系统中的高温氦-超临界二氧化碳换热器和低温氦-超临界二氧化碳换热器,确保氦气回路放热温度窗口与超临界二氧化碳动力循环回路吸热温度窗口的良好匹配,实现了高温气冷堆氦气回路大跨度温度区间热量的高效梯级利用。



1. 一种高效超临界二氧化碳高温气冷堆系统,其特征在于,包括高温氦-超临界二氧化碳换热器(8)和低温氦-超临界二氧化碳换热器(9);所述高温氦-超临界二氧化碳换热器(8)和低温氦-超临界二氧化碳换热器(9)共同连接有反应堆(11);

所述高温氦-超临界二氧化碳换热器(8)的冷侧出口连接有高温透平(5)的入口,高温透平(5)的出口连接有高温回热器(7)的热侧入口,高温回热器(7)的热侧出口连接有低温回热器(6)的热侧入口,低温回热器(6)的热侧出口分别连接有预冷器(1)和再压缩机(3),预冷器(1)的出口连接有主压缩机(2)的入口,主压缩机(2)的出口连接有低温回热器(6)的冷侧入口,低温回热器(6)的冷侧出口和再压缩机(3)的出口汇合后,分别和低温氦-超临界二氧化碳换热器(9)的冷侧入口以及高温回热器(7)的冷侧入口连接,所述高温回热器(7)的冷侧出口和高温氦-超临界二氧化碳换热器(8)的冷侧出口连接;

所述低温氦-超临界二氧化碳换热器(9)的冷侧出口连接有低温透平(4),所述低温透平(4)的出口汇入至低温回热器(6)的热侧入口。

2. 根据权利要求1所述的一种高效超临界二氧化碳高温气冷堆系统,其特征在于,所述反应堆(11)的出口和高温氦-超临界二氧化碳换热器(8)的热侧入口连接,高温氦-超临界二氧化碳换热器(8)的热侧出口和低温氦-超临界二氧化碳换热器(9)的热侧入口连接,低温氦-超临界二氧化碳换热器(9)的热侧出口和反应堆(11)的入口连接。

3. 根据权利要求1所述的一种高效超临界二氧化碳高温气冷堆系统,其特征在于,所述低温回热器(6)的热侧出口和再压缩机(3)之间设置有低温流量调节阀(12)。

4. 根据权利要求1所述的一种高效超临界二氧化碳高温气冷堆系统,其特征在于,所述主压缩机(2)的工作压力和温度在二氧化碳临界点附近。

5. 根据权利要求1所述的一种高效超临界二氧化碳高温气冷堆系统,其特征在于,所述低温回热器(6)的冷侧出口和低温氦-超临界二氧化碳(9)的冷侧入口之间设置有高温流量调节阀(13)。

6. 根据权利要求1所述的一种高效超临界二氧化碳高温气冷堆系统,其特征在于,所述主压缩机(2)、再压缩机(3)、低温透平(4)和高温透平(5)同轴布置,共同驱动电机(10)。

7. 根据权利要求1所述的一种高效超临界二氧化碳高温气冷堆系统,其特征在于,所述低温回热器(6)、高温回热器(7)、高温氦-超临界二氧化碳换热器(8)和低温氦-超临界二氧化碳换热器(9)均为印刷电路板式换热器。

8. 一种权利要求1所述的高效超临界二氧化碳高温气冷堆系统的运行方法,其特征在于,反应堆(11)输出高温氦气依次通过高温氦-超临界二氧化碳换热器(8)和低温氦-超临界二氧化碳换热器(9)释放热量后,回到反应堆(11)中;

从高温氦-超临界二氧化碳换热器(8)输出的超临界二氧化碳输出至高温透平(5)膨胀做功后,进入高温回热器(7)中作为热侧释放热量,从高温回热器(7)热侧输出的超临界二氧化碳进入低温回热器(6)作为热侧降温,超临界二氧化碳在低温回热器(6)降温后分为两路,一路在预冷器(1)降温后进入主压缩机(2)升压,另一路则直接进入再压缩机(3)升压,从主压缩机(2)输出的超临界二氧化碳进入低温回热器(6)作为冷侧升温后,与再压缩机(3)输出的超临界二氧化碳汇合后分为两部分,一部分进入高温回热器(7)作为冷侧升温,另一部分进入低温氦-超临界二氧化碳(9)的冷侧进行升温;高温回热器(7)输出的超临界二氧化碳进入高温氦-超临界二氧化碳换热器(8)的冷侧进行升温,升温后的超临界二氧化碳

碳进入高温透平(5)；

所述低温氮-超临界二氧化碳(9)输出的超临界二氧化碳进入低温透平(4)，超临界二氧化碳在低温透平(4)膨胀做功后汇入至低温回热器(6)的热侧入口。

一种高效超临界二氧化碳高温气冷堆系统及其运行方法

技术领域

[0001] 本发明属于核能发电技术领域,涉及一种高效超临界二氧化碳高温气冷堆系统及其运行方法。

背景技术

[0002] 第四代核电技术具有更好的经济性,更高的安全性,并能有效解决核废料处理问题和防止核扩散问题,但是较高的热源温度对动力循环和工质也提出了更高的要求。高温气冷堆作为一种先进第四代核电堆型技术,具备固有安全性,可模块化设计与建造,能实现发电、制氢、供热等多用途,被认为是最有前景的第四代核电技术。高温气冷堆核电站的成功并网发电确定了该核电技术的在国内外外的领跑地位。

[0003] 超临界二氧化碳循环发电技术以二氧化碳为工质,采用闭式布雷顿循环方式发电。与传统的以水和蒸汽为工质、采用朗肯循环的发电方式相比,超临界二氧化碳循环发电技术具有热效率高、系统简单、结构紧凑、适用范围广、固有安全性高等特点,是热力发电领域的一种变革性低碳发电技术。因此,超临界二氧化碳布雷顿循环被广泛认为是第四代先进核电系统的理想发电循环。

[0004] 考虑采用超临界二氧化碳布雷顿循环替代原有的蒸汽朗肯循环,能有效利用高温气冷堆高温高压(堆芯压力为7MPa,堆芯进/出口温度为250/750℃)的特点,提高发电效率;采用不发生相变的超临界二氧化碳作为循环工质,使系统具备了深度和快速调峰的能力,此外可解决原有蒸汽发生器中的两相不稳定、流致振动等难题;在出现一/第二回路边界破口事故时,还可避免蒸汽与石墨、堆芯材料反应的问题。

[0005] 高温气冷堆与超临界二氧化碳布雷顿循环之间采用主换热器来实现第一回路热源系统与第二回路发电系统之间的热功转换。为了保证第一回路氦气风机的可靠性,对氦气风机的设计温度有所限制,这使得第一回路氦气在主换热器热侧的放热温度区间跨度较大,温降约为500℃。而对于目前公认效率较高的一次分流再压缩超临界二氧化碳循环而言,因其平均吸热温度较高导致吸热温度窗口较窄,使得该循环在主换热器内冷侧的温升为100℃左右。若将一次分流再压缩超临界二氧化碳布雷顿循环系统直接用于高温气冷堆,则存在第一回路氦气侧放热温度窗口与超临界二氧化碳循环吸热温度窗口匹配度较差问题。该问题的存在不利于高温气冷堆第一回路氦气的充分冷却,较低温度区间的热量无法得到充分利用,以致影响整个系统的发电效率。

发明内容

[0006] 本发明的目的在于克服上述现有技术的缺点,提供一种高效超临界二氧化碳高温气冷堆系统及其运行方法,以解决现有技术中氦气侧放热温度窗口与超临界二氧化碳循环吸热温度窗口匹配度较差的问题。

[0007] 一种高效超临界二氧化碳高温气冷堆系统,包括高温氦-超临界二氧化碳换热器和低温氦-超临界二氧化碳换热器;所述高温氦-超临界二氧化碳换热器和低温氦-超临界

二氧化碳换热器共同连接有反应堆；

[0008] 所述高温氦-超临界二氧化碳换热器的冷侧出口连接有高温透平的入口，高温透平的出口连接有高温回热器的热侧入口，高温回热器的热侧出口连接有低温回热器的热侧入口，低温回热器的热侧出口分别连接有预冷器和再压缩机，预冷器的出口连接有主压缩机的入口，主压缩机的出口连接有低温回热器的冷侧入口，低温回热器的冷侧出口和再压缩机的出口汇合后，分别和低温氦-超临界二氧化碳换热器的冷侧入口以及高温回热器的冷侧入口连接，所述高温回热器的冷侧出口和高温氦-超临界二氧化碳换热器的冷侧出口连接；

[0009] 所述低温氦-超临界二氧化碳换热器的冷侧出口连接有低温透平，所述低温透平的出口汇入至低温回热器的热侧入口。

[0010] 本发明的进一步改进在于：

[0011] 优选的，所述反应堆的出口和高温氦-超临界二氧化碳换热器的热侧入口连接，高温氦-超临界二氧化碳换热器的热侧出口和低温氦-超临界二氧化碳换热器的热侧入口连接，低温氦-超临界二氧化碳换热器的热侧出口和反应堆的入口连接。

[0012] 优选的，所述低温回热器的热侧出口和再压缩机之间设置有低温流量调节阀。

[0013] 优选的，所述主压缩机的工作压力和温度在二氧化碳临界点附近。

[0014] 优选的，所述低温回热器的冷侧出口和低温氦-超临界二氧化碳的冷侧入口之间设置有高温流量调节阀。

[0015] 优选的，所述主压缩机、再压缩机、低温透平和高温透平同轴布置，共同驱动电机。

[0016] 优选的，所述低温回热器、高温回热器、高温氦-超临界二氧化碳换热器和低温氦-超临界二氧化碳换热器均为印刷电路板式换热器。

[0017] 一种上述的高效超临界二氧化碳高温气冷堆系统的运行方法，反应堆输出高温氦气依次通过高温氦-超临界二氧化碳换热器和低温氦-超临界二氧化碳换热器释放热量后，回到反应堆中；

[0018] 从高温氦-超临界二氧化碳换热器输出的超临界二氧化碳输出至高温透平膨胀做功后，进入高温回热器中作为热侧释放热量，从高温回热器热侧输出的超临界二氧化碳进入低温回热器作为热侧降温，超临界二氧化碳在低温回热器降温后分为两路，一路在预冷器降温后进入主压缩机升压，另一路则直接进入再压缩机升压，从主压缩机输出的超临界二氧化碳进入低温回热器作为冷侧升温后，与再压缩机输出的超临界二氧化碳汇合后分为两部分，一部分进入高温回热器作为冷侧升温，另一部分进入低温氦-超临界二氧化碳的冷侧进行升温；高温回热器输出的超临界二氧化碳进入高温氦-超临界二氧化碳换热器的冷侧进行升温，升温后的超临界二氧化碳进入高温透平；

[0019] 所述低温氦-超临界二氧化碳输出的超临界二氧化碳进入低温透平，超临界二氧化碳在低温透平膨胀做功后汇入至低温回热器的热侧入口。

[0020] 与现有技术相比，本发明具有以下有益效果：

[0021] 本发明公开了一种高效超临界二氧化碳高温气冷堆系统，该系统包括预冷器、主压缩机、再压缩机、高温透平、低温回热器、高温回热器、高温氦-超临界二氧化碳换热器、低温氦-超临界二氧化碳换热器和反应堆。本发明提出了包含高温分流再压缩循环回路和低温再分流再热膨胀循环回路的两级分流超临界二氧化碳循环的发电系统，通过布置发电系

统中的高温氦-超临界二氧化碳换热器和低温氦-超临界二氧化碳换热器,确保氦气回路放热温度窗口与超临界二氧化碳动力循环回路吸热温度窗口的良好匹配,实现了高温气冷堆氦气回路大跨度温度区间热量的高效梯级利用;另外,该系统中的超临界二氧化碳发电系统设备紧凑,占地空间小,降低了高温气冷堆机组的整体体积和成本。

[0022] 本发明还公开了一种高效超临界二氧化碳高温气冷堆系统的运行方法,该方法通过高温分流再压缩超临界二氧化碳循环和低温再分流再热膨胀超临界二氧化碳循环实现了分级换热,实现高温气冷堆大跨度温度区间热量梯级利用;通过调节分流和再分流装置处的流量分配,保证设计工况和变工况下高温气冷堆热量的高效利用,实现高效发电。

附图说明

[0023] 图1为本发明的整体系统图。

[0024] 其中,1为预冷器、2为主压缩机、3为再压缩机、4为低温透平、5为高温透平、6为低温回热器、7为高温回热器、8为高温氦-超临界二氧化碳换热器、9为低温氦-超临界二氧化碳换热器、10为电机、11为反应堆、12为低温流量调节阀、13为高温流量调节阀。

具体实施方式

[0025] 下面结合附图对本发明做进一步详细描述:

[0026] 在本发明的描述中,需要说明的是,术语“中心”、“上”、“下”、“左”、“右”、“竖直”、“水平”、“内”、“外”等指示的方位或位置关系为基于附图所示的方位或位置关系,仅是为了便于描述本发明和简化描述,而不是指示或暗示所指的装置或元件必须具有特定的方位、以特定的方位构造和操作,因此不能理解为对本发明的限制;术语“第一”、“第二”、“第三”仅用于描述目的,而不能理解为指示或暗示相对重要性;此外,除非另有明确的规定和限定,术语“安装”、“相连”、“连接”应做广义理解,例如,可以是固定连接,也可以是可拆卸连接;可以是直接相连,也可以通过中间媒介间接相连,可以是两个元件内部的连通。对于本领域的普通技术人员而言,可以根据具体情况理解上述术语在本发明中的具体含义。

[0027] 参见图1,本发明的实施例之一为公开了一种两次分流的高效超临界二氧化碳高温气冷堆系统,包括第一回路和第二回路;所述第一回路为反应堆11与高温氦-超临界二氧化碳换热器8和低温氦-超临界二氧化碳换热器9热侧相连接构成的回路;所述第二回路为超临界二氧化碳两级分流循环系统,具体包括高温循环回路和低温循环回路;所述高温循环回路为分流再压缩循环回路;所述低温循环回路为再分流再热膨胀回路。

[0028] 所述高温循环回路具体包括预冷器1、主压缩机2、再压缩机3、高温透平5、低温回热器6、高温回热器7、高温氦-超临界二氧化碳换热器8、低温流量调节阀12;所述低温循环回路具体包括低温透平4、低温氦-超临界二氧化碳换热器9、高温流量调节阀13。所述第二回路还包括发电机10。

[0029] 所述高温循环回路通过高温氦-超临界二氧化碳换热器8从反应堆11中吸收高品位热量并实现热功转换。所述低温循环回路通过低温氦-超临界二氧化碳换热器9从反应堆11中吸收低品位热量并实现热功转换。

[0030] 第一回路中,高温氦-超临界二氧化碳换热器8热侧出口与低温氦-超临界二氧化碳9热侧入口连通,低温氦-超临界二氧化碳9的热侧出口和反应堆11的热量输入口连接,反

应堆11的热量输出口和高温氦-超临界二氧化碳换热器8的热侧入口连接。

[0031] 第二回路中,高温氦-超临界二氧化碳换热器8冷侧出口与高温透平5入口相连接,高温透平5出口与高温回热器7热侧入口连通,高温回热器7热侧出口与低温透平4出口汇合后与低温回热器6热侧入口连通,低温回热器6热侧出口分流为两路,一路通过预冷器1热侧与主压缩机2入口连通,另一路经过低温流量调节阀12与再压缩机3入口连通。主压缩机2出口与低温回热器6的冷侧入口连通,低温回热器6的冷侧出口与再压缩机3出口汇合后分为两个支路,一个支路与高温回热器7冷侧入口连接,高温回热器7冷侧出口与高温氦-超临界二氧化碳换热器8冷侧入口连通,另一个支路和低温氦-超临界二氧化碳换热器9的冷侧入口连接,该支路上设置有高温流量调节阀13,低温氦-超临界二氧化碳换热器9冷侧出口与低温透平4入口连通,第二回路构成了完整的闭式两级分流超临界二氧化碳动力循环。

[0032] 主压缩机2、再压缩机3、低温透平4、高温透平5和发电机10同轴布置;主压缩机2、再压缩机3、低温透平4和高温透平5共同为发电机10提供动力。

[0033] 作为本发明的优选实施方式,所述预冷器1、低温回热器6、高温回热器7、高温氦-超临界二氧化碳换热器8、低温氦-超临界二氧化碳换热器9采用印刷电路板式换热器(PCHE),以实现大换热量条件下超临界二氧化碳布雷顿循环换热器的紧凑、低阻和高效;所述主压缩机2工作在二氧化碳临界点附近,确保超临界二氧化碳布雷顿循环拥有较高的循环效率。

[0034] 本发明的具体工作过程为:

[0035] 第一回路中,来自反应堆11的高温氦气依次流经高温氦-超临界二氧化碳换热器8、低温氦-超临界二氧化碳换热器9热侧,将不同温度区间的热量分别传递给第二回路中的高温循环回路、低温循环回路。

[0036] 第二回路中,一路超临界二氧化碳经过高温氦-超临界二氧化碳换热器8冷侧升温后,进入高温透平5膨胀做功,随后通过高温回热器7热侧降温,与另一路经过低温透平4膨胀做功的超临界二氧化碳汇合,随后进入低温回热器6热侧降温;降温后的超临界二氧化碳分流为两路,一路在预冷器1冷却后经过主压缩机2升压,随后进入低温回热器6冷侧升温,另一路则经过低温流量调节阀12,随后进入再压缩机3升压;再压缩机3的出口和低温回热器6的出口,两路超临界二氧化碳汇合后,再分流为两路,一路经过高温流量调节阀13后进入低温氦-超临界二氧化碳换热器9冷侧升温,另一路则进入高温回热器冷侧7冷侧升温,随后经过高温氦-超临界二氧化碳换热器8冷侧升温。至此,第二回路构成了完整的闭式两级分流超临界二氧化碳动力循环。

[0037] 第二回路中通过低温流量调节阀12和高温流量调节阀13可实现高温循环回路和低温循环回路流量分配比例的灵活调节。

[0038] 采用上述具体操作时,通过该发电系统中的高温氦-超临界二氧化碳换热器、低温氦-超临界二氧化碳换热器,确保氦气回路放热温度窗口与第二回路超临界二氧化碳动力循环回路吸热温度窗口的良好匹配,实现了高温气冷堆大跨度温度区间热量的高效梯级利用;通过调节分流和再分流装置处的流量分配,保证了设计工况和变工况下高温气冷堆热量的高效利用,实现了高效发电。

[0039] 以上所述仅为本发明的较佳实施例而已,并不用以限制本发明,凡在本发明的精神和原则之内,所作的任何修改、等同替换、改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

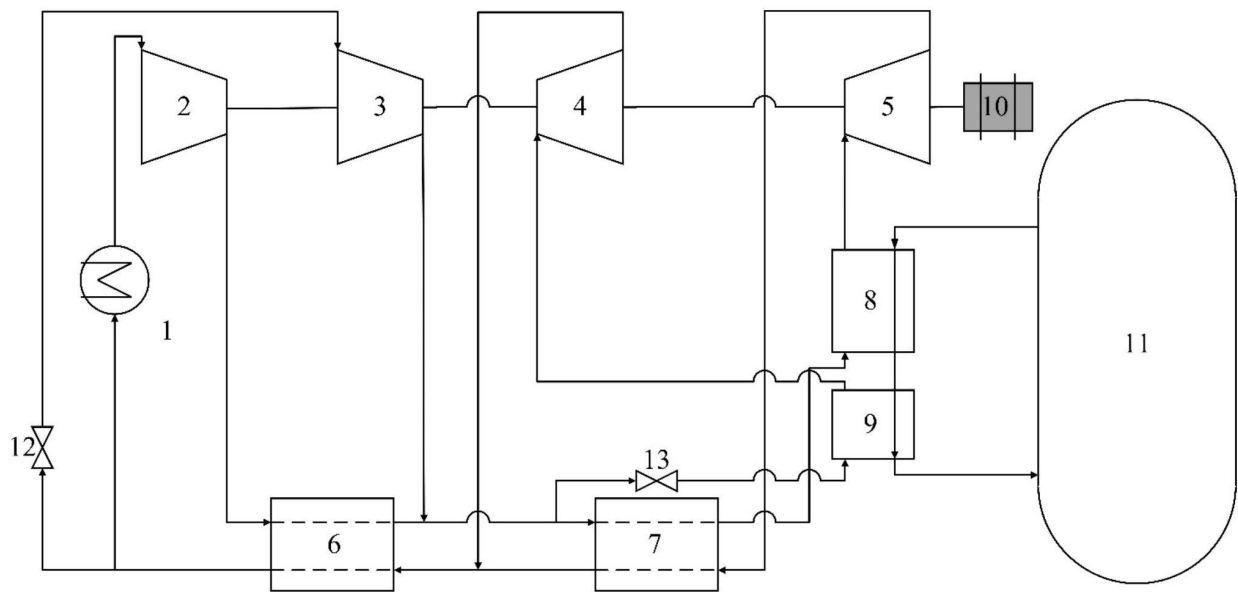


图1