

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.

G21D 3/00 (2006.01)

F02C 7/27 (2006.01)

F02C 1/05 (2006.01)



[12] 发明专利说明书

专利号 ZL 02807520. X

[45] 授权公告日 2006 年 2 月 1 日

[11] 授权公告号 CN 1240079C

[22] 申请日 2002.5.22 [21] 申请号 02807520. X

[30] 优先权

[32] 2001.5.25 [33] ZA [31] 2001/4319

[86] 国际申请 PCT/IB2002/001754 2002.5.22

[87] 国际公布 WO2002/095768 英 2002.11.28

[85] 进入国家阶段日期 2003.9.28

[71] 专利权人 球床模件反应堆(专有)有限公司

地址 南非圣丘苑

[72] 发明人 迈克尔·科雷亚

威廉·阿德里安·奥登达尔·克里尔

审查员 曲新兴

[74] 专利代理机构 中原信达知识产权代理有限责任公司

代理人 林 潮 顾红霞

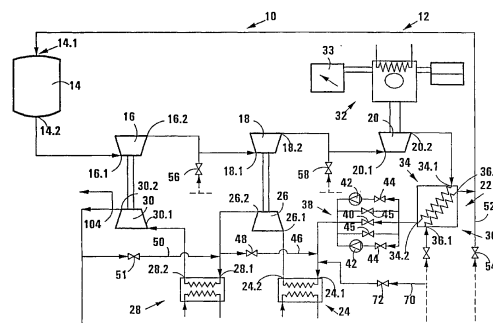
权利要求书 4 页 说明书 10 页 附图 1 页

[54] 发明名称

布雷顿循环核电站以及启动布雷顿循环的方法

[57] 摘要

一种核电站，该核电站包括一个闭合循环发电回路，其利用布雷顿循环作为热力学转换循环。该核电站还包括启动增压系统，该系统具有轴阀，以及与该轴阀并联连接的增压器。而且，常闭增压器隔离阀与增压器以及与该增压器并联的增压器旁路结构串联设置。一种启动布雷顿循环的方法包括：将发电回路切换到备用模式，在该模式下，氦依靠启动增压系统和在回路中所产生的增加的电能而环绕发电回路循环，直到氦依靠独立于启动增压系统的压缩机而围绕发电回路循环。



1. 一种在核电站中启动布雷顿循环的方法，其中该核电站使用氮作为工作流体并具有闭合循环发电回路，所述发电回路利用布雷顿循环作为热力学转换循环并且包括：具有入口和出口的核反应堆；透平装置，其上游侧连接到反应堆出口，该透平装置包括发电透平；至少一个压缩机，所述透平装置传动上连接于所述至少一个压缩机；以及至少一个热交换器；该方法包括下列步骤：

如果发电回路尚未处于备用模式，则将其设置到备用模式，其中借助于启动增压系统氮环绕发电回路循环；以及

向发电透平施加负载并调节发电透平的转速，使其转速低于发电透平的正常运转转速；

减少所施加负载，以使发电透平的转速增加到发电透平的正常运转转速；以及

增加发电回路所发电能，直到至少一个压缩机能够使氮环绕发电回路循环而不需要启动增压系统的帮助。

2. 根据权利要求 1 所述的方法，其特征在于，当核电站包括透平装置传动上与其连接的发电机时，该方法包括下列步骤：

使发电机的输出与配电网同步；以及

在发电机的输出与电网保持同步时，增加发电透平的电力输出。

3. 根据权利要求 2 所述的方法，其特征在于通过与发电机相连接的可变电阻器向发电透平施加负载。

4. 根据权利要求 3 所述的方法，其特征在于所施加负载的减少是通过减少可变电阻器组的电阻而实现的。

5. 根据权利要求 3 或 4 所述的方法，其特征在于包括在发电机输出已经与配电网同步并且发电回路已经稳定后，将可变电阻器组与

发电机断开。

6. 根据权利要求 2 到 4 任一项所述的方法，其特征在于减少所施加的负载包括将负载从 1MW 减少到 300kW。

5

7. 根据权利要求 1 到 4 中任一项所述的方法，其特征在于包括将发电透平的转速调节到正常运转转速的 55%到 65%之间的一个转速。

10

8. 根据权利要求 1 到 4 中任一项所述的方法，其特征在于包括当透平的正常运转转速为 3000rpm 时，调节发电透平转速到约 1800rpm。

15

9. 根据权利要求 1 到 4 任一项所述的方法，其特征在于，发电回路包括低压压缩机和高压压缩机，而透平装置包括分别传动上连接到低压压缩机和高压压缩机的低压透平和高压透平，并且发电回路包括其中安装有低压再循环阀的低压再循环管线以及其中安装有高压再循环阀的高压再循环管线，低压和高压再循环管线分别从低压和高压压缩机的下游位置延伸到其上游位置，在上述情形下，该方法包括利用低压和高压再循环阀中的至少一个稳定发电回路。

20

10. 根据权利要求 9 所述的方法，其特征在于，发电回路包括具有高压侧和低压侧的同流换热器，从同流换热器高压侧的上游位置向其下游位置延伸的同流换热器旁路管线，以及安装在同流换热器旁路管线中用于调节流经其中的氦流量的同流换热器旁路阀，在此情形下，增加由发电回路产生的电能包括将再循环阀中的至少一个和旁路阀从开启位置移向关闭位置。

25

11. 根据权利要求 1 到 4 中任一项所述的方法，其特征在于，在布雷顿循环开始自保持时，关闭启动增压系统。

30

12. 根据权利要求 11 所述的方法，其特征在于，启动增压系统包括并联设置的至少一个增压器和启动增压系统轴阀，以及与增压器相串联的增压器隔离阀，在此情形下，关闭启动增压系统包括开启启动增压系统轴阀，停止增压器的运行和关闭增压器隔离阀。

13. 一种核电站，包括
闭合循环发电回路，该发电回路包括：具有入口和出口的反应堆；透平装置，其上游侧连接到反应堆出口；同流换热器，其具有低压侧和高压侧，同流换热器的各侧具有入口和出口；至少一个压缩机，所述透平装置传动上连接于所述至少一个压缩机；以及至少一个热交换器，该闭合循环发电回路被设置为利用布雷顿循环作为热力学转换循环；

发电机，所述透平装置传动上连接于该发电机；
以可断开的方式与发电机相连接的可变电阻器组；以及
启动增压系统，该启动增压系统包括
常开轴阀；
至少一个与该轴阀并联连接的增压器；
与所述增压器相串联的常闭增压器隔离阀；以及
与发电回路和所述增压器并联的增压器旁路装置。

14. 根据权利要求 13 所述的核电站，其特征在于发电回路包括高压压缩机和低压压缩机，以及透平装置，该透平装置包括传动上连接到高压压缩机的高压透平，传动上连接到低压压缩机的低压透平，以及传动上连接到发电机的发电透平。

15. 根据权利要求 14 所述的核电站，其特征在于，发电回路包括连接在同流换热器低压侧出口和低压压缩机入口之间的预冷却器，以及连接在低压压缩机出口和高压压缩机入口之间的中间冷却器。

16. 根据权利要求 15 所述的核电站，其特征在于，启动增压系统设置在同流换热器低压侧和预冷却器之间。

5 17. 根据权利要求 15 或 16 所述的核电站，其特征在于，发电回路包括其中安装有低压再循环阀的低压压缩机再循环管线，该低压再循环管线从低压压缩机下游侧和中间冷却器入口之间的位置延伸到启动增压系统和预冷却器入口之间的位置。

10 18. 根据权利要求 15 或 16 所述的核电站，其特征在于，发电回路包括其中安装有高压压缩机再循环阀的高压压缩机再循环管线，该管线从高压压缩机下游侧和同流换热器高压侧入口之间的位置延伸到低压压缩机出口和中间冷却器入口之间的位置。

15 19. 根据权利要求 15 或 16 所述的核电站，其特征在于，发电回路包括其中安装有同流换热器旁路阀的同流换热器旁路管线，同流换热器旁路管线从同流换热器高压侧入口的上游位置延伸到同流换热器高压侧出口的下游位置。

20 20. 根据权利要求 15 或 16 所述的核电站，其特征在于，发电回路包括高压冷却剂阀和低压冷却剂阀，高压冷却剂阀被构造为，在其开启时提供从高压压缩机的高压侧到低压透平入口的氦的旁路，而低压冷却剂阀被构造为提供从高压压缩机的高压侧到发电透平入口的氦的旁路。

25 21. 根据权利要求 13 到 16 中任一项所述的核电站，其特征在于该反应堆为球床型。

30 22. 根据权利要求 13 到 16 中任一项所述的核电站，其特征在于，启动增压系统包括两个与启动增压器轴阀并联的增压器以及一个与各增压器相关联的增压器隔离阀。

布雷顿循环核电站以及启动布雷顿循环的方法

5 本发明涉及一种核电站。特别是，其涉及一种利用布雷顿循环作为热力学转换循环的核电站，并涉及一种启动布雷顿循环的方法。

 在包括一个闭合循环发电回路的核电站中，该发电回路利用布雷顿循环作为热力学转换循环，它所遇到的一个问题在于，布雷顿循环
10 不是从零质量流量自行启动。

 根据本发明的一个方面，在使用氦作为工作流体并具有闭合循环发电回路的核电站中，其中该发电回路利用布雷顿循环作为热力学转换循环，并包括具有入口和出口的核反应堆；透平装置，该透平装置
15 的上游侧连接到反应堆出口；至少一个压缩机，透平装置传动地连接于其上；以及至少一个热交换器，提供了一种启动布雷顿循环的方法，该方法包括下述步骤：

 如果发电回路不处于备用模式，则将其切换到备用模式，在该模式下，氦依靠启动增压系统环绕发电回路循环；以及
20 增加在发电回路中所产生的电能，直到至少一个压缩机能够不依靠启动增压系统的帮助而使氦在发电回路中环绕。

 当该核电站包括发电机并且透平装置包括传动上连接到发电机的发电透平时，该方法可以包括下述步骤：

25 向发电透平施加负载，并调节发电透平的转速，使其转速低于发电透平的正常运转转速；

 减少所施加的负载，以使发电透平的转速增加到发电透平的正常运转转速；

 使发电机的输出与配电网同步；

30 当发电机输出与电网保持同步时，增加发电透平的电力输出。

可以通过连接到发电机的可变电阻器组向发电透平施加负载。

通过减少可变电阻器组的电阻可以实现减少所施加的负载。

5

该方法可以包括，在发电机输出已经与配电网同步并且发电回路已经稳定后，将可变电阻器组与发电机断开。

减少所施加的负载可以包括将负载从约 1MW 减少到约 300MW。

10

该方法可以包括调节发电透平的转速到正常运转转速的 55% 到 65% 之间。

当发电透平的正常运转转速为 3000rpm 时，该方法可以包括调节发电透平的转速到约 1800rpm。

15

当发电回路包括低压压缩机和高压压缩机，而透平装置包括分别传动上连接到低压压缩机和高压压缩机的低压透平和高压透平，并且发电回路包括其中安装有低压再循环阀的低压再循环管线，以及其中安装有高压再循环阀的高压再循环管线，低压和高压再循环管线分别从低压和高压压缩机的下游位置延伸到其上游位置，在此情形下，该方法可以包括利用低压和高压再循环阀中的至少一个来稳定发电回路。

20

当发电回路包括同流换热器，该同流换热器具有高压侧和低压侧，从同流换热器高压侧的上游位置延伸到下游位置的同流换热器旁路管线，以及安装在同流换热器旁路管线中用于调节流经其中的氦流量的同流换热器旁路阀，在此情形下，增加由发电回路所发电能可以包括将同流换热器中的至少一个和旁路阀从开启位置移向关闭位置。阀的关闭导致布雷顿循环的效率的明显增加。

25

30

一旦启动，布雷顿循环可以自保持，而发电回路中氦的循环将由压缩机实现。

5 该方法可以包括在布雷顿循环变为自保持的时候关闭该启动增压系统。一种用于确定布雷顿循环何时变为自保持的方法，是当启动增压系统两侧的压差降低到低于预定压差以下时，通常，该预定压差为20kPa。

10 启动增压系统可以包括，并联的至少一个增压器和启动增压系统轴阀，以及与增压器相串联的增压器隔离阀。在备用模式，发电回路这样构造，以使得启动增压器轴阀关闭，该增压器或每个增压器隔离阀开启，并且该增压器或每个增压器都运行。于是，增压器使氦在发电回路中循环。关闭启动增压系统可以包括启动增压系统轴阀的开启，
15 增压器的停止运转以及增压器隔离阀的关闭。

根据本发明的另一个方面，提供了一种核电站，其包括：

闭合循环发电回路；以及

启动增压系统，该系统包括

20 常开轴阀；

至少一个与轴阀并联连接的增压器；

与该或各个增压器串联的常闭增压器隔离阀；以及

与该或每个增压器并联的增压器旁路装置。

25 闭合循环发电回路可以包括具有入口和出口的核反应堆，其上游侧连接到反应堆出口的透平装置，具有低压侧和高压侧并且其每侧都具有入口和出口的同流换热器，透平装置传动上与其连接的至少一个压缩机，以及至少一个热交换器，闭合循环发电回路被设置为利用布雷顿循环作为热力学转换循环，该核电站还包括透平装置传动上与其
30 连接的发电机，以及以可断开的方式与该发电机相连接的可变电阻器

组。

5 发电回路可以包括高压压缩机和低压压缩机，透平装置，该透平装置包括与高压压缩机传动上相连接的高压透平，与低压压缩机传动上相连接的低压透平，以及与发电机传动上相连接的发电透平。

10 发电回路可以包括连接在同流换热器低压侧出口和低压压缩机入口之间的预冷却器，以及连接在低压压缩机出口和高压压缩机入口之间的中间冷却器。

启动增压系统可以设置于同流换热器低压侧和预冷却器之间。

15 发电回路可以包括其中安装有低压再循环阀的低压压缩机循环管线，低压再循环管线从低压压缩机下游侧和中间冷却器入口之间的位置延伸到启动增压系统和预冷却器入口之间的位置。

20 发电回路可以包括其中安装有高压压缩机再循环阀的高压压缩机再循环管线，该管线从高压压缩机下游侧和同流换热器高压侧入口之间的位置延伸到低压压缩机出口和中间冷却器入口之间的位置。

发电回路可以包括其中安装有同流换热器旁路阀的同流换热器旁路管线，该同流换热器旁路管线从同流换热器高压侧入口的上游位置延伸到同流换热器高压侧出口的下游位置。

25 发电回路还可以包括高压冷却剂阀和低压冷却剂阀，高压冷却剂阀被构造为在其开启时提供从高压压缩机高压侧到低压透平入口的氦的旁路，而低压冷却剂阀被构造为提供从高压压缩机高压侧到发电透平入口的氦的旁路。

30 该反应堆可以是利用球形燃料元件的球床型。

启动增压系统可以包括两个与启动增压器轴阀并联的增压器以及一个与各增压器相关联的增压器隔离阀。

5 增压器旁路阀用于避免增压器的压力骤增。

在备用模式下，同流换热器旁路阀运行以将反应堆入口温度保持在一个这样的水平，以使得启动增压系统的出口温度低于预定温度，通常，该预定温度为 250℃。高压冷却剂阀和低压冷却剂阀运行以确
10 保同流换热器的最高温度保持在预定温度之下，通常，该预定温度为 600℃。高压压缩机再循环阀和低压压缩机再循环阀运行以调节发电透平所产生的电能。

而且，反应堆出口温度被调节到 750℃和 900℃之间的温度。预
15 冷却器和中间冷却器确保进入低压和高压压缩机的氦处于大约 30℃的温度。在发电回路中氦的压力保持在 20 到 50bar 之间。

本发明将在此参考所附简图、以示例的方式进行说明。该图示出了根据本发明的核电站的示意表示图。

20

在附图中，参考标号 10 表示根据本发明的核电站的一部分。

核电站 10 包括以参考标号 12 表示的闭合循环发电回路。发电回路 12 包括反应堆 14，高压透平 16，低压透平 18，发电透平 20，同
25 流换热器 22，预冷却器 24，低压压缩机 26，中间冷却器 28 以及高压压缩机 30。

反应堆 14 为使用球状燃料元件的球床型反应堆。反应堆 14 具有入口 14.1，通过该入口氦形式的工作流体能够被引入反应堆 14 和出
30 口 14.2。

高压透平 16 传动上连接到高压压缩机 30，并具有上游侧或入口 16.1 以及下游侧或出口 16.2，入口 16.1 连接到反应堆 14 的出口 14.2。

5 低压透平 18 传动上连接到低压压缩机 26，并具有上游侧或入口 18.1 以及下游侧或出口 18.2。入口 18.1 连接到高压透平 16 的出口 16.2。

10 发电透平 20 传动上连接到发电机 32。发电透平 20 包括上游侧或入口 20.1 以及下游侧或出口 20.2。发电透平 20 的入口 20.1 连接到低压透平 18 的出口 18.2。

该核电站还包括可变电阻器组 33，该可变电阻器组以可断开的方式连接到发电机 32。

15 同流换热器 22 具有热或低压侧 34 以及冷或高压侧 36。同流换热器 34 的低压侧具有入口 34.1 和出口 34.2。低压侧的入口 34.1 连接到发电透平 20 的出口 20.2。

20 预冷却器 24 为氦-水热交换器并包括氦入口 24.1 和氦出口 24.2。预冷却器 24 的入口 24.1 连接到同流换热器 22 的低压侧 34 的出口 34.2。

25 低压压缩机 26 具有上游侧或入口 26.1 以及下游侧或出口 26.2。低压压缩机 26 的入口 26.1 连接到预冷却器 24 的氦出口 24.2。

中间冷却器 28 为氦-水热交换器，并包括氦入口 28.1 和氦出口 28.2。氦入口 28.1 连接到低压压缩机 26 的出口 26.2。

30 高压压缩机 30 包括上游侧和入口 30.1 以及下游侧或出口 30.2。高压压缩机 30 的入口 30.1 连接到中间冷却器 28 的氦出口 28.2。高压

压缩机 30 的出口 30.2 连接到同流换热器 22 高压侧的入口 36.1。同流换热器 22 高压侧的出口 36.2 连接到反应堆 14 的入口 14.1。

5 核电站 10 包括由参考标号 38 表示的启动增压系统，该系统连接到同流换热器 22 低压侧 34 的出口 34.2 和预冷却器 24 的入口 24.1 之间。

启动增压系统 38 包括常开启动增压系统轴阀 40，该阀连接在同流换热器低压侧出口 34.2 和预冷却器 24 的入口 24.1 之间的管线中。
10 两个增压器 42 与启动增压系统轴阀 40 并联连接，而常闭隔离阀 44 与各增压器 42 相关联并与各增压器串联连接。另外，增压器旁路阀装置 45 与各增压器 44 相关联并与各增压器并联连接。每个增压器旁路阀装置 45 可以包括一个或多个能够被独立地控制的旁路阀。应当理解，增压器旁路阀装置 45 能够由用于两个增压器的一个单个的阀
15 构成。

低压压缩机再循环管线 46 从低压压缩机 26 的出口或下游侧 26.2 和中间冷却器 28 的入口 28.1 之间的位置延伸到启动增压系统 38 和预冷却器 24 的入口 24.1 之间的位置。常闭低压再循环阀 48 安装在低压
20 压缩机再循环管线 46 中。

高压压缩机再循环管线 50 从高压压缩机的出口或下游侧 30.2 和同流换热器 22 高压侧 36 的入口 36.1 之间的位置延伸到低压压缩机 26 的出口或下游侧 26.2 和中间冷却器 28 的入口 28.1 之间的位置。常闭
25 高压再循环阀 51 安装在高压压缩机再循环管线 50 中。

同流换热器旁路管线 52 从同流换热器 22 高压侧 36 入口 36.1 的上游位置延伸到同流换热器 22 高压侧 36 出口 36.2 的下游位置。常闭同流换热器旁路阀 54 安装在同流换热器旁路管线 52 中。
30

核电站 10 包括高压冷却剂阀 56 和低压冷却剂阀 58。高压冷却剂阀 56 被构造为当其开启时提供从高压压缩机 30 的高压侧或出口 30.2 到低压透平 18 的入口或低压侧 18.1 的氨的旁路。低压冷却剂阀 58 被构造为，当其开启时，提供从高压压缩机 30 的高压侧或出口 30.2 到发电透平 20 的入口 20.1 的氨的旁路。

发电回路 12 被构造为工作在作为热力学转换循环的布雷顿循环中。当布雷顿循环运行时，发电回路中的循环流量由压缩机 26、30 提供。

在应用中，为启动布雷顿循环，通过启动增压系统 38 获得环绕发电回路的质量流量。更具体地说，启动增压系统轴阀 40 关闭，隔离阀 44 开启而增压器 42 运行。在增压器 42 运行时，利用增压器旁路阀装置 45 以避免增压器 42 的压力骤增。

在开始启动布雷顿循环的操作之前，如果发电回路没有处于备用模式，其将被切换到备用模式。备用模式的主要特征是增压器 42 在运行。

为降低损坏增压器 42 的风险，重要的是将增压器中的最高温度保持在预定温度以下，典型地，该预定温度为 250℃。基于此种考虑，运行同流换热器旁路阀 54，以控制堆芯入口温度，并因此间接地控制启动增压系统 38 的最高温度。另外，如上述提及的，增压器旁路阀装置 45 用来避免增压器 44 的压力骤增，并从而把对其造成损坏的风险减到最小。

而且，为调节同流换热器 22 中的最高温度，运行高压冷却剂再循环阀 56 和低压冷却剂再循环阀 58 中的一个或两个，以确保同流换热器中的最高温度保持在预定温度以下，典型地，该预定温度为 600℃。

而且，在发电透平中产生的电能通常由运行高压再循环阀 51 和/或低压再循环阀 48 控制，以使得电能不超出预定水平，例如 1MW，而发电透平 20 的转速被转速控制器调节在正常运转转速以下，即，
5 典型地为 1800rpm。

反应堆 14 的出口温度由反应堆出口温度控制器调节到处于 750℃和 900℃之间的一个温度。

10 预冷却器 24 和中间冷却器 28 在其正常运转模式其作用为，确保了低压压缩机 26 和高压压缩机 30 的入口温度大致在 30℃。

而且，发电回路中的压力水平处在 20bar 和 50bar 之间。

15 为启动布雷顿循环，在上述提及的处于其备用模式的核电站中，使用高压再循环阀和低压再循环阀控制由发电机产生的电能，可变电
阻器组 33 连接到发电机 32。转速控制器将透平转速控制在透平的
正常运转转速以下的一个转速，即，大约 1800rpm。

20 当条件稳定时，可变电阻器组 33 的电能从大约 1MW 降至大约 300kW。在电能上的这一减少导致透平 20 转速的升高，并因而使发
电机 32 的转速升高。当透平 20 达到预期运转转速时，典型地，该预期
运转转速为 3000rpm，可变电阻器组的电能再一次增加到预定水平，
典型地为 1MW，而透平转速被转速控制器控制在 3000rpm。

25

在情况稳定后，执行使发电机输出与电网同步的操作。

较短时间后，通常大约 10 分钟，在系统与电网同步并稳定后，
转速控制器关闭，也就是说，可变电阻器组从发电机 32 断开而再循
30 环阀开始关闭。更具体地说，低压再循环阀 48 和高压再循环阀 51 和

同流换热器旁路阀 54 一起关闭。在此过程中,在通过关闭再循环阀 48、51 而使布雷顿循环的性能明显改善的同时,发电透平 20 的输出增加。

在上述一个程序性步骤中,根据系统中的压力和温度,将启动布雷顿循环并接管启动增压系统 38 的压缩机功能。

典型地,当启动增压系统两侧的压差(出口压力减去入口压力)降低到预定水平以下,通常,该预定水平为 20kPa,布雷顿循环的压缩机功能可以自保持。在布雷顿循环自保持之后,启动增压系统将关闭。

上述过程的一个重要特征在于,布雷顿循环的实际启动可以发生在执行上述过程中的任何时刻。它不影响该系统其它的过程步骤的执行,而系统表现也不会受到真正影响。

