



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 115333249 B

(45) 授权公告日 2023.01.13

(21) 申请号 202211252426.7

F04B 41/02 (2006.01)

(22) 申请日 2022.10.13

F01B 23/10 (2006.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 115333249 A

(56) 对比文件

CN 216589029 U, 2022.05.24

CN 113464345 A, 2021.10.01

(43) 申请公布日 2022.11.11

CN 108930627 A, 2018.12.04

(73) 专利权人 中国科学院电工研究所

CN 115059603 A, 2022.09.16

地址 100190 北京市海淀区中关村北二条6号

CN 112952871 A, 2021.06.11

CN 111396288 A, 2020.07.10

(72) 发明人 肖立业 聂子攀 张京业 邱清泉

US 2015075173 A1, 2015.03.19

US 2016326958 A1, 2016.11.10

(74) 专利代理机构 北京瀚仁知识产权代理事务所(普通合伙) 11482

肖立业等. 地下储能工程.《电工电能新技术》.2022,第41卷(第2期),

专利代理师 屠晓旭 宋宝库

姚尔人等. 一种新型压缩空气与抽水复合储能系统的热力学分析.《西安交通大学学报》.2017,(第03期),全文.

(51) Int. Cl.

H02J 15/00 (2006.01)

H02J 3/24 (2006.01)

F03B 13/06 (2006.01)

F01K 3/00 (2006.01)

审查员 张震

权利要求书3页 说明书14页 附图10页

(54) 发明名称

混合工况压缩空气储能系统的控制方法

(57) 摘要

本发明属于压缩空气储能系统控制领域,具体涉及了一种混合工况压缩空气储能系统的控制方法,旨在解决现有压缩空气储能系统在单一工况下,效率低、经济性低,不适用于调频和平滑功率波动的应用场景的问题。本发明包括:压缩空气储能机组、蓄热系统、储气室、水库、水泵/水泵-水轮机机组、可控压力阀门,及控制装置。通过水泵向储气室提供虚拟落差或者通过自然落差来维持储气室的恒压工况;通过切换压缩空气储能系统机组、水库、水泵/水泵-水轮机机组、储气室和可控压力阀门等的工作状态,使储能系统处于混合工况。本发明充分利用储气室的储能容量,又保障了系统的效率和经济性,且可以使总输出功率在一定范围内进行调节,参与电网一次调频。



1. 一种混合工况压缩空气储能系统的控制方法,所述混合工况压缩空气储能系统包括压缩空气储能机组、蓄热系统、储气室、水库、水泵/水泵-水轮机机组、可控压力阀门、系统总体控制装置、压缩空气储能机组控制装置、水泵/水泵-水轮机机组控制装置,其特征在于,所述控制方法包括针对单储气室的第一控制模式和针对多个储气室的第二控制模式:

针对单储气室的系统,将所述储气室的额定压力状态设为压力状态A、恒定压力状态设为压力状态B;

所述第一控制模式为:所述储气室初始压力状态为一个大气压,通过所述压缩空气储能机组往所述储气室进行注气储能,直至所述储气室达到压力状态A,完成第一储能操作;释能时,通过所述压缩空气储能机组发电,所述储气室由压力状态A降至压力状态B时,再由压力水泵/水泵-水轮机机组和/或水库与储气室之间的虚拟落差和/或落差共同使所述储气室维持压力状态B,直至所述储气室的气体能量释放完毕,完成第一释能操作;再次储能时,通过所述压缩空气储能机组进行注气储能,并由压力水泵/水泵-水轮机机组和/或水库与储气室之间的虚拟落差和/或落差共同使所述储气室维持压力状态B,当所述储气室的水被排空后,关闭连接于水库和储气室之间的压力阀门,由压缩空气储能机组继续往储气室内注气加压至压力状态A,完成第二储能操作;释能时,由储气室经压缩空气机组释气发电,至储气室的压力回到压力状态B时,再由压力水泵/水泵-水轮机机组和/或水库与储气室之间的虚拟落差和/或落差共同使所述储气室维持压力状态B,完成第二释能操作;之后重复进行第二储能操作和第二释能操作,所述储气室的压力在压力状态A和压力状态B之间循环;所述第一储能操作之后的储能操作记为后续储能操作,所述第一释能操作之后的释能操作记为后续释能操作;

在后续释能操作完成、再次储能之前,也可以设置有泄水操作:

将储气室内的水泄放至泄水池或下游水库,压力释放过程中,水中的空气释出使所述储气室内保留残余压力状态,再次进行储能时,由压缩空气储能机组给所述储气室注气加压至压力状态A,重复进行释能、泄水、储能操作时,所述储气室的压力在残余气压、压力状态A和压力状态B之间循环;

针对多个储气室的系统,将多个所述储气室的额定压力状态分别设为压力状态 $C_1, C_2, \dots, C_M$ 、恒定压力状态分别设为压力状态 $C_{10}, C_{20}, \dots, C_{M0}$ ,M为多个储气室的系统中储气室的数量,所述多个储气室分别记作第一储气室、第二储气室、……、第M储气室;

所述第二控制模式为:所述储气室初始压力状态为一个大气压,通过所述压缩空气储能机组进行储能,依次使多个所述储气室达到压力状态 $C_1, C_2, \dots, C_M$ ,完成多个储气室的第一储能操作;若所述压力水泵/水泵-水轮机机组和/或水库与储气室之间的虚拟落差和/或落差使所述第一储气室维持压力状态 $C_1$ ,则采用恒压方式发电,否则通过所述压缩空气储能机组发电,直至所述第一储气室压力状态由压力状态 $C_1$ 降至压力状态 $C_{10}$ 时,由所述压力水泵/水泵-水轮机机组和/或水库与储气室之间的虚拟落差和/或落差使所述第一储气室维持压力状态 $C_{10}$ ,直至所述第一储气室的气体能量释放完毕,并通过上述过程依次进行其他储气室的释能发电,完成多个储气室的第一释能操作;从第二次储能操作开始,所述储气室初始状态为被水充满,所述压力水泵/水泵-水轮机机组和/或水库与储气室之间的虚拟落差和/或落差使所述第一储气室维持恒压力状态 $C_{10}$ ,采用恒压方式储能,当通过压缩空气储能机组注气储能排空第一储气室中的水时,若压力状态 $C_{10}$ 对应压强小于压力状态 $C_1$ ,则

关闭连接于所述水库与所述第一储气室的压力阀门,继续由压缩空气储能机组向所述第一储气室注气加压直至压力状态达到 $C_1$ ,第一储气室储能结束,并通过上述过程依次进行其他储气室的储能,完成多个储气室的第二储能操作;多个储气室的第二释能操作与第一释能操作相同;重复进行第二储能操作与第二释能操作,多个储气室的压力分别在 $(C_1-C_{10})$ , $(C_2-C_{20})$ , $\dots$ , $(C_M-C_{M0})$ 之间循环;

若水库与多个储气室中部分储气室之间的落差对应压强超过储气室的额定压力状态时,可以利用储气室之间的落差和/或压力水泵/水泵-水轮机机组的虚拟落差来维持下部储气室的恒定压力,该模式可为阶梯储能/释能的控制模式,所述阶梯储能/释能的控制模式为:当系统上部储气室释能完毕时,内部充满水,可作为系统下部储气室的水库,直至完成最低处储气室的释能;当下部储气室储能完毕时,水被压入上部储气室,直至完成最上部储气室的储能,水进入水库。

2. 根据权利要求1所述的混合工况压缩空气储能系统的控制方法,其特征在于,所述第一释能、所述第二储能和所述第二释能及其后续过程,其过程中可通过水泵/水泵-水轮机机组控制装置调节所述水泵/水泵-水轮机机组的功率,以实现系统的功率灵活性调节,实现交流电网一次调频,或响应直流电网快速功率变化/平滑新能源短时功率波动。

3. 根据权利要求2所述的混合工况压缩空气储能系统的控制方法,其特征在于,所述水泵/水泵-水轮机机组向所述储气室补水,或所述水泵/水泵-水轮机机组由储气室出水,以维持所述储气室的压力状态时,若补水/出水速度对所述储气室的压力影响小于设定阈值时,通过短时调节所述水泵/水泵-水轮机机组的功率,以实现交流电网一次调频,或响应直流电网快速功率变化/平滑新能源短时功率波动。

4. 根据权利要求1所述的混合工况压缩空气储能系统的控制方法,其特征在于,所述第一释能操作、后续释能操作为:

若所述水库和所述储气室之间无落差或为负落差,则由压力水泵使所述储气室维持压力状态B,直至所述储气室的气体能量释放完毕并关闭所述压缩空气储能机组,完成第一释能操作、后续释能操作。

5. 根据权利要求4所述的混合工况压缩空气储能系统的控制方法,其特征在于,所述第二储能操作、后续储能操作为:

在第一释能、后续释能过程结束后,关闭所述储气室和所述水库之间的压力水泵和可控压力阀门,将所述储气室内的水排泄掉,压力释放过程中,水中的空气释出使所述储气室内保留残余压力状态,残余气压推动水泵/水泵-水轮机机组做功并将所述储气室的水挤出至所述水库或泄水池,当所述储气室内的水被挤出后,所述储气室中保留部分残余气压,关闭连接于所述水库和所述储气室的可控压力阀门,所述压缩空气储能系统继续向所述储气室注气加压,直至所述储气室达到压力状态A,所述压缩空气储能机组停止注气,完成第二储能操作、后续储能操作。

6. 根据权利要求1所述的混合工况压缩空气储能系统的控制方法,其特征在于,通过所述混合工况压缩空气储能系统进行新能源电源和电网之间的功率供需偏差调节;

所述新能源电源的输出功率为 $P_{renew}$ , $P_{renew}$ 的波动性较强;

所述电网的需求功率为 $P_{Grid}$ , $P_{Grid}$ 的功率平滑、波动性小;

所述功率供需偏差调节的调节功率为 $P_{storage}$ ，所述 $P_{storage}$ ，其功率曲线包括长时间尺度的功率成分 $P_{Lf}$ 和短时间尺度的功率成分 $P_{Hf}$ ；

所述长时间尺度的功率成分 $P_{Lf}$ 响应电网调峰或AGC指令，用于表示电网对储能系统功率需求的总变化趋势；

所述短时间尺度的功率成分 $P_{Hf}$ 响应电网调频、短时功率响应指令，用于表示电网对短时间尺度功率变化的需求。

7. 根据权利要求6所述的混合工况压缩空气储能系统的控制方法，其特征在于，通过所述压缩空气储能机组跟踪响应所述长时间尺度的功率成分 $P_{Lf}$ 对应的指令，通过所述水泵/水泵-水轮机机组跟踪响应所述短时间尺度的功率成分 $P_{Hf}$ 对应的指令；

按照各机组无功容量大小，将电网所需的静态无功补偿容量 $Q_{Grid}$ 按比例分配给所述压缩空气储能机组 $Q_{Gaset}$ 、水泵/水泵-水轮机机组 $Q_{Gwset}$ 。

8. 根据权利要求1所述的混合工况压缩空气储能系统的控制方法，其特征在于，针对单储气室的系统：

所述水库设置于山上或地面或由储气室开挖过程中的石材阻挡附近河流形成的堰塞湖构成或利用现有的抽水储能电站的上库作为水库；

所述储气室浅埋于山下或露天建造于山下或向山体深处挖掘而成；

所述压缩空气储能机组，其厂房处于水库和储气室之间并靠近储气室建设，所述压缩空气储能机组和所述水泵/水泵-水轮机机组位于同一厂房；

针对多个储气室的系统：

通过改造废弃煤矿井、金属矿井、油气井和其他废弃地下空间，获得位于地下不同埋深的多个阶梯状储气室。

## 混合工况压缩空气储能系统的控制方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于压缩空气储能系统控制领域,具体涉及了一种混合工况压缩空气储能系统的控制方法。

### 背景技术

[0002] 储能是构建以新能源为主的新型电力系统的关键技术,由于以光伏和风能为主的新能源电源具有随机性、波动性、间歇性的特点,需要储能系统提供调峰、功率平滑以及调频等功能,从而支撑新型电力系统对新能源的消纳。

[0003] 抽水储能和压缩空气储能是两种已经商业化且满足电网级规模的储能系统。对于储气室容量不变的压缩空气储能电站,压缩空气储存在地下盐穴,人造地下洞穴或者人造储气罐中,储能和发电的过程中压缩空气储能系统工作在变工况下,为了保证系统能量循环效率,储气室内有一定压缩空气维持基础压强而不用于发电,压强波动变化一般维持在一定范围内(如7MPa~10MPa),因此,一般储气室内只有部分气体被用来发电。为了提高压缩空气储气室的利用率,可以通过一定高差的水柱形成的液压差维持压缩空气储能电站的储气室等压强,如专利ZL202123066536.8,一种依托自然条件的等压强压缩空气储能系统,专利CN202010820787.1,一种基于废弃矿井的地下恒压压缩空气复合抽水储能系统及方法,以及专利CN202210226000.8,隧道斜井储热等压强压缩空气储能系统,储气空间的利用率基本可达100%,其水柱高度 $h$ 对应储气室的压强为 $p_0$ ,压缩空气储能系统运行在等压强工况下。

[0004] 等压强压缩空气储能电站储气室的利用率高,储能量大。但是,当水柱高度对应的压强较小时,无法保障系统的经济性;此外,从运行角度而言,以往的压缩空气储能机组的输出功率调节不够灵活,即太不适合于调频和平滑功率波动的应用场景。

[0005] 因此,本发明提出一种混合工况压缩空气储能系统的控制方法,用于解决以上所述的压缩空气储能系统的问题。

### 发明内容

[0006] 为了解决现有技术中的上述问题,即现有压缩空气储能系统在单一工况下,无法控制系统高效运行,且无法保障系统经济性,不适用于调频和平滑功率波动的应用场景的问题,本发明提供了一种混合工况压缩空气储能系统的控制方法,所述混合工况压缩空气储能系统包括压缩空气储能机组、蓄热系统、储气室、水库、水泵/水泵-水轮机机组、可控压力阀门、系统总体控制装置、压缩空气储能机组控制装置、水泵/水泵-水轮机机组控制装置,所述控制方法包括针对单储气室的第一控制模式和针对多个储气室的第二控制模式:

[0007] 针对单储气室的系统,将所述储气室的额定压力状态设为压力状态A、恒定压力状态设为压力状态B;

[0008] 所述第一控制模式为:所述储气室初始压力状态为一个大气压,通过所述压缩空气储能机组往所述储气室进行注气储能,直至所述储气室达到压力状态A,完成第一储能操

作;释能时,通过所述压缩空气储能机组发电,所述储气室由压力状态A降至压力状态B时,再由压力水泵/水泵-水轮机机组和/或水库与储气室之间的虚拟落差和/或落差共同使所述储气室维持压力状态B,直至所述储气室的气体能量释放完毕,完成第一释能操作;再次储能时,通过所述压缩空气储能机组进行注气储能,并由压力水泵/水泵-水轮机机组和/或水库与储气室之间的虚拟落差和/或落差共同使所述储气室维持压力状态B,当所述储气室的水被排空后,关闭连接于水库和储气室之间的压力阀门,由压缩空气储能机组继续往储气室内注气加压至压力状态A,完成第二储能操作;释能时,由储气室经压缩空气机组释气发电,至储气室的压力回到压力状态B时,再由压力水泵/水泵-水轮机机组和/或水库与储气室之间的虚拟落差和/或落差共同使所述储气室维持压力状态B,完成第二释能操作;之后重复进行第二储能操作和第二释能操作,所述储气室的压力在压力状态A和压力状态B之间循环;所述第一储能操作之后的储能操作记为后续储能操作,所述第一释能操作之后的释能操作记为后续释能操作;

[0009] 在后续释能操作完成、再次储能之前,也可以设置有泄水操作:

[0010] 将储气室内的水泄放至泄水池或下游水库,压力释放过程中,水中的空气释出使所述储气室内保留残余压力状态,再次进行储能时,由压缩空气储能机组给所述储气室注气加压至压力状态A,重复进行释能、泄水、储能操作时,所述储气室的压力在残余气压、压力状态A和压力状态B之间循环;

[0011] 储气室初始态为自然状态(即内部只有1个大气压),储气室预留部分基础水位,需要指出的是,储气室的进水口与基础水位应保证适当的高差,以防止水流内吸入空气,可在储气室内设计一个凹形槽,储气室的进出水管置于凹形槽底部,通过水泵连接水库的压力阀门处于关闭状态。

[0012] 针对多个储气室的系统,将多个所述储气室的额定压力状态分别设为压力状态 $C_1, C_2, \dots, C_M$ 、恒定压力状态分别设为压力状态 $C_{10}, C_{20}, \dots, C_{M0}$ ,M为多个储气室的系统中储气室的数量;

[0013] 所述第二控制模式为:所述储气室初始压力状态为一个大气压,通过所述压缩空气储能机组进行储能,依次使多个所述储气室达到压力状态 $C_1, C_2, \dots, C_M$ ,完成多个储气室的第一储能操作;若所述压力水泵/水泵-水轮机机组和/或水库与储气室之间的虚拟落差和/或落差使所述第一储气室维持压力状态 $C_1$ ,则采用恒压方式发电,否则通过所述压缩空气储能机组发电,直至所述第一储气室压力状态由压力状态 $C_1$ 降至压力状态 $C_{10}$ 时,由所述压力水泵/水泵-水轮机机组和/或水库与储气室之间的虚拟落差和/或落差使所述第一储气室维持压力状态 $C_{10}$ ,直至所述第一储气室的气体能量释放完毕,并通过上述过程依次进行其他储气室的释能发电,完成多个储气室的第一释能操作;从第二次储能操作开始,所述储气室初始状态为被水充满,所述压力水泵/水泵-水轮机机组和/或水库与储气室之间的虚拟落差和/或落差使所述第一储气室维持恒压力状态 $C_{10}$ ,采用恒压方式储能,当通过压缩空气储能机组注气储能排空第一储气室中的水时,若压力状态 $C_{10}$ 对应压强小于压力状态 $C_1$ ,则关闭连接于所述水库与所述第一储气室的压力阀门,继续由压缩空气储能机组向所述第一储气室注气加压直至压力状态达到 $C_1$ ,第一储气室储能结束,并通过上述过程依次进行其他储气室的储能,完成多个储气室的第二储能操作;多个储气室的第二释能操作与第一释能操作相同;重复进行第二储能操作与第二释能操作,多个储气室的压力分别在

$(C_1-C_{10})$ ,  $(C_2-C_{20})$ , ...,  $(C_M-C_{M0})$  之间循环;

[0014] 若水库与多个储气室中部分储气室之间的落差对应压强超过储气室的额定压力状态时,可以利用储气室之间的落差和/或压力水泵/水泵-水轮机机组的虚拟落差来维持下部储气室的恒定压力,该模式可为阶梯储能/释能的控制模式,所述阶梯储能/释能的控制模式为:当系统上部储气室释能完毕时,内部充满水,可作为系统下部储气室的水库,直至完成最低处储气室的释能;当下部储气室储能完毕时,水被压入上部储气室,直至完成最上部储气室的储能,水进入水库。

[0015] 针对多个储气室的系统(以两层巷道为例,多层巷道以此类推),假设利用废弃地下空间的上下两个巷道分别建设有两个不同的储气室,地面建设有水库。当地面水库与两个储气室高度差对应的水柱压力分别在储气室经济性许可设计范围内时,两个储气室可以分别对应水库构成等压强压缩空气储能系统,其储气室压力状态分别对应各自与水库的高度差。此种情况下,压缩空气储能机组将分别先后工作于多种恒压压力状态。如果地面水库与下储气室高度差对应的压力状态超过其经济许可压力设计值时,可以通过上下储气室间的水柱落差为下储气室维持恒压工作状态,而通过地面水库和上储气室的水柱落差为上储气室维持恒压工作状态。多个储气室阶梯储能/释能的控制模式以此类推。

[0016] 工作过程描述如下:

[0017] 上下储气室初始态为自然状态(即内部只有1个大气压),储气室预留基础水位。

[0018] 首先,通过地面压缩空气储能系统的机组向上储气室注气加压,达到上储气室额定压力状态 $C_1$ 时,压缩空气储能系统的机组停止注气,然后,通过空气压缩机向下储气室注气加压,达到下储气室额定压力状态 $C_2$ 时,压缩空气储能系统的机组停止注气,首次储能过程结束。

[0019] 释能时,如果地面水库与上储气室之间水柱高度差能够维持储气室为恒定压力状态 $C_1$ ,则可以采用恒压方式发电,否则上储气室高压空气先通过压缩空气储能系统发电,至其内部压力降到 $C_{10}$ 时,则由地面水库和上储气室之间的水柱维持上储气室的恒定压力状态 $C_{10}$ ,直至上储气室的气体能量释放完毕,此时,上储气室内被水充满。当然,这种情况下,如果压力不足,同样也可采用水泵增压的方式使储气室的压力维持为 $C_1$ 或者 $C_{10}$ 。下储气室的释能过程与上储气室相同,只是其压力状态不同而已。

[0020] 如果地面水库与下储气室的落差太大,以至于下储气室的改造代价太大,则可以利用上储气室和下储气室的落差来维持下储气室的恒压压力状态。首先,通过地面压缩空气储能系统分别向上下储气室注气加压至设计压力,完成储能。释能时,首先由地面水库和上储气室之间的水柱维持恒压,对上储气室进行释能,释能完成后,上储气室被水充满,连接上储气室与外界的可控压力阀门打开,使其与外界大气压相通。此后,由上储气室与下储气室之间水柱高度差维持下储气室的恒定压力状态 $C_2$ 并进行释能,直如下储气室的气体能量释放完毕,此时下储气室内被水充满。再次储能时,首先,压缩空气储能系统向下储气室注气加压,继续由上下储气室之间的水柱维持恒定压力状态 $C_2$ ,当下储气室的水全部被挤出到上储气室时,关闭连接于下储气室的空气压力阀门和水柱压力阀门,然后,压缩空气储能系统对上储气室注气加压,并通过地面水库和上储气室之间的水柱维持恒定压力状态 $C_1$ ,当上储气室的水全部被挤出到地面水库时,关闭压缩空气储能系统,再次完成对上储气室储能。以后上下储气室分别以 $C_1$ 和 $C_2$ 压力状态工作,完成储能和释能的循环过程。当然,这

种情况下,如果压力不足,同样也可采用水泵增压的方式使储气室的压力维持恒压。

[0021] 在一些优选的实施例中,所述第一释能、所述第二储能和所述第二释能及其后续过程,其过程中可通过水泵/水泵-水轮机机组控制装置调节所述水泵/水泵-水轮机机组的功率,以实现系统的功率灵活性调节,实现交流电网一次调频,或响应直流电网快速功率变化/平滑新能源短时功率波动。

[0022] 在一些优选的实施例中,所述水泵/水泵-水轮机机组向所述储气室补水,或所述水泵/水泵-水轮机机组由储气室出水,以维持所述储气室的压力状态时,若补水/出水速度对所述储气室的压力影响小于设定阈值时,通过短时调节所述水泵/水泵-水轮机机组的功率,以实现交流电网一次调频,或响应直流电网快速功率变化/平滑新能源短时功率波动。

[0023] 具体实施方式为:

[0024] 储能时,压缩空气储能机组从大气环境向储气室内注入压缩空气,储气室内的空气压力由水库与储气室之间的水柱和水泵-水轮机机组虚拟的水柱压力共同提供,保持储气室内压缩空气压力状态不变。在储气室压缩空气压力下水经过水泵-水轮机机组从储气室压入水库,克服水泵-水轮机机组压力做功,带动水泵-水轮机机组发电。在此过程中,压缩空气储能机组和水泵-水轮机机组均能够响应电网对于功率变化的需求,考虑运行经济性,压缩空气储能机组功率变化速度慢,用于跟踪长时间尺度的电网调峰或者AGC功率的变化需求,水泵-水轮机机组功率变化速度快,用于响应电网短时间尺度的功率变化的需求,如交流电网的一次调频,直流电网的快速功率响应或者平滑新能源电源短时功率波动,从而使该系统在储能时的总功率既能满足电网调峰和AGC功率的变化需求,又能满足短时间尺度电网调节功率的变化需求。

[0025] 释能时,储气室内的压缩空气膨胀并进入大气环境做功发电,水库和储气室之间的落差对应的水柱提供一部分压力,水泵-水轮机机组虚拟一定高度的水柱提供一部分压力,两者提供的压力相加为储气室内的气体压力,该压力状态保持不变。水泵-水轮机机组工作在电动状态,做功将水压入储气室以填补压缩空气膨胀发电后的储气室腾出空间,同理,考虑运行经济性,压缩空气储能机组功率变化响应速度慢,用于跟踪长时间尺度电网调峰和AGC功率的变化需求,水泵-水轮机机组功率变化速度快,用于响应电网短时间尺度功率变化的需求,如交流电网的一次调频,直流电网的快速功率响应或者平滑新能源电源短时功率波动,从而使该系统在释能时的总输出功率既能满足电网调峰功率的变化需求,又能满足短时间内电网调节功率的变化需求。

[0026] 根据水泵/水泵-水轮机机组工作模式,设计水泵/水泵-水轮机机组控制装置,由外控制环和内控制环组成,其中外控制环参考信号为储气室压强 $P_{airset}$ ,反馈信号为实际检测的储气室压强,储气室压力控制器的输出信号 $P_{Gwset}$ 为功率指令信号,从而控制储能/释能过程中储气室的出水/补水功率(实际反映为水量)能够匹配储气室注气/出气的速度,保持储气室压力状态不变,辅助压缩空气储能机组跟踪响应电网调峰等长时间尺度功率曲线的需求;内控制环可以控制并快速改变水泵/水泵-水轮机机组短时间尺度的功率,从而响应电网短时间的功率变化需求,其中,通过测量交流电网频率 $f_G$ 并经过电网一次调频控制器(一般为下垂控制策略),得到电网一次调频功率指令 $P_{1st}$ ,另外,加入储能系统短时间尺度功



率指令 $P_{Hf}$ ,两种短时间尺度的功率控制信号 $P_{1st}$ 和 $P_{Hf}$ 叠加在外控制环控制信号 $P_{Gwset}$ 的大变化趋势之上,对储气室压强的影响极其有限,不会影响压缩空气储能机组的运行,但是,通过控制短时间尺度水泵-水轮机机组的功率变化,可以实现响应电网短时间尺度功率变化的需求。根据外控制环和内控制环的功能需求,外控制环的时间常数大,响应速度慢,内控制环的时间常数小,响应速度快。

[0027] 在一些优选的实施例中,所述第一释能操作、后续释能操作为:

[0028] 若所述水库和所述储气室之间无落差或为负落差,则由压力水泵使所述储气室维持压力状态B,直至所述储气室的气体能量释放完毕并关闭所述压缩空气储能机组,完成第一释能操作、后续释能操作。

[0029] 在一些优选的实施例中,所述第二储能操作、后续储能操作为:

[0030] 在第一释能、后续释能过程结束后,关闭所述储气室和所述水库之间的压力水泵和可控压力阀门,将所述储气室内的水排泄掉,压力释放过程中,水中的空气释出使所述储气室内保留残余压力状态,残余气压推动水泵/水泵-水轮机机组做功并将所述储气室的水挤出至所述水库或泄水池,当所述储气室内的水被挤出后,所述储气室中保留部分残余气压,关闭连接于所述水库和所述储气室的可控压力阀门,所述压缩空气储能系统继续向所述储气室注气加压,直至所述储气室达到压力状态A,所述压缩空气储能机组停止注气,完成第二储能操作、后续储能操作。

[0031] 在一些优选的实施例中,通过所述混合工况压缩空气储能系统进行新能源电源和电网之间的功率供需偏差调节;

[0032] 所述新能源电源的输出功率为 $P_{renew}$ , $P_{renew}$ 的波动性较强;

[0033] 所述电网的需求功率为 $P_{Grid}$ , $P_{Grid}$ 的功率平滑、波动性小;

[0034] 所述功率供需偏差调节的调节功率为 $P_{storage}$ ,所述 $P_{storage}$ ,其功率曲线包括长时间尺度的功率成分 $P_{Lf}$ 和短时间尺度的功率成分 $P_{Hf}$ ;

[0035] 所述长时间尺度的功率成分 $P_{Lf}$ 响应电网调峰或AGC指令,用于表示电网对储能系统功率需求的总变化趋势;

[0036] 所述短时间尺度的功率成分 $P_{Hf}$ 响应电网调频、短时功率响应指令,用于表示电网对短时间尺度功率变化的需求。

[0037] 在一些优选的实施例中,通过所述压缩空气储能机组跟踪响应所述长时间尺度的功率成分 $P_{Lf}$ 对应的指令,通过所述水泵/水泵-水轮机机组跟踪响应所述短时间尺度的功率成分 $P_{Hf}$ 对应的指令;

[0038] 按照各机组无功容量大小,将电网所需的静态无功补偿容量 $Q_{Grid}$ 等比例分配给所述压缩空气储能机组 $Q_{Gaset}$ 、水泵/水泵-水轮机机组 $Q_{Gwset}$ 。

[0039] 在一些优选的实施例中,针对单储气室的系统:

[0040] 所述水库设置于山上或地面或由储气室开挖过程中的石材阻挡附近河流形成的堰塞湖构成或利用现有的抽水储能电站的上库作为水库;

[0041] 所述储气室浅埋于山下或露天建造于山下或向山体深处挖掘而成；

[0042] 所述压缩空气储能机组，其厂房处于水库和储气室之间并靠近储气室建设，所述压缩空气储能机组和所述水泵/水泵-水轮机机组位于同一厂房；

[0043] 针对多个储气室的系统：

[0044] 通过改造废弃煤矿井、金属矿井、油气井和其他废弃地下空间，获得位于地下不同埋深的多个阶梯状储气室。

[0045] 本发明的有益效果：

[0046] (1) 本发明混合工况压缩空气储能系统的控制方法，其混合工况压缩空气储能系统包括压缩空气储能机组、蓄热系统、储气室、水库、水泵/者水泵-水轮机机组、可控压力阀门等。可以通过水泵向储气室提供虚拟落差或者通过自然落差来维持储气室的恒压工况，以及通过合理切换压缩空气储能系统机组、水库、水泵/水泵-水轮机机组、储气室和可控压力阀门等的工作状态，使压缩空气储能系统处于混合工况运行模式。一方面充分利用储气室的储能容量，另一方面又保障了系统的效率和经济性，而且可以使该系统的总输出功率在一定范围内进行调节，并可以参与电网一次调频。

[0047] (2) 本发明混合工况压缩空气储能系统的控制方法，储气室无需保留基础气压，储气室得到了更为充分的利用，同时也保障了系统效率。

[0048] (3) 本发明混合工况压缩空气储能系统的控制方法，无需建设具备适当落差的上下水库，通过水压补偿的等压强压缩空气储能，充分利用储气室，并保障了系统的经济性。

[0049] (4) 本发明混合工况压缩空气储能系统的控制方法，压缩空气储能机组的输出功率调节灵活，适合于调频和平滑功率波动的应用场景。

## 附图说明

[0050] 通过阅读参照以下附图所作的对非限制性实施例所作的详细描述，本申请的其它特征、目的和优点将会变得更明显：

[0051] 图1是储气室等容量和储气室等压强两种不同的压缩空气储能系统在储能和发电过程中储气室压强的变化情况示意图；

[0052] 图2是抽水储能电站水库单位体积储能量和等压强压缩空气储能电站储气室单位体积储能量比较图；

[0053] 图3是本发明混合工况压缩空气储能系统的控制方法的第一控制模式第一方面原理图；

[0054] 图4是本发明混合工况压缩空气储能系统的控制方法的第一控制模式第一方面的水泵机组增压情况下储气室压力变化情况；

[0055] 图5是本发明混合工况压缩空气储能系统的控制方法的第一控制模式第一方面的水泵-水轮机机组增压情况下储气室压力变化情况；

[0056] 图6是本发明混合工况压缩空气储能系统的控制方法的第一控制模式第一方面的水泵-水轮机机组控制原理图；

[0057] 图7是本发明混合工况压缩空气储能系统的控制方法的第一控制模式第一方面的总体控制原理图；

[0058] 图8是本发明混合工况压缩空气储能系统的控制方法的第一控制模式第一方面的

压缩空气储能机组控制原理图；

[0059] 图9是本发明混合工况压缩空气储能系统的控制方法的第一控制模式第二方面原理图；

[0060] 图10是本发明混合工况压缩空气储能系统的控制方法的第一控制模式第二方面的储气室压力变化情况；

[0061] 图11是本发明混合工况压缩空气储能系统的控制方法的第二控制模式原理图；

[0062] 图12是本发明混合工况压缩空气储能系统的控制方法的第二控制模式的储气室压力变化情况；

[0063] 图13是本发明混合工况压缩空气储能系统的控制方法实施例一的系统组成；

[0064] 图14是本发明混合工况压缩空气储能系统的控制方法实施例二的系统组成；

[0065] 图15是本发明混合工况压缩空气储能系统的控制方法实施例三的系统组成；

[0066] 图16是本发明混合工况压缩空气储能系统的控制方法实施例四的系统组成。

### 具体实施方式

[0067] 下面结合附图和实施例对本申请作进一步的详细说明。可以理解的是，此处所描述的具体实施例仅用于解释相关发明，而非对该发明的限定。另外还需要说明的是，为了便于描述，附图中仅示出了与有关发明相关的部分。

[0068] 需要说明的是，在不冲突的情况下，本申请中的实施例及实施例中的特征可以相互组合。下面将参考附图并结合实施例来详细说明本申请。

[0069] 本发明提供一种混合工况压缩空气储能系统的控制方法，本方法应用于混合工况压缩空气储能系统，所述混合工况压缩空气储能系统包括压缩空气储能机组、蓄热系统、储气室、水库、水泵/水泵-水轮机机组、可控压力阀门、系统总体控制装置、压缩空气储能机组控制装置、水泵/水泵-水轮机机组控制装置，所述控制方法包括针对单储气室的第一控制模式和针对多个储气室的第二控制模式：

[0070] 针对单储气室的系统，将所述储气室的额定压力状态设为压力状态A、恒定压力状态设为压力状态B；

[0071] 所述第一控制模式为：所述储气室初始压力状态为一个大气压，通过所述压缩空气储能机组往所述储气室进行注气储能，直至所述储气室达到压力状态A，完成第一储能操作；释能时，通过所述压缩空气储能机组发电，所述储气室由压力状态A降至压力状态B时，再由压力水泵/水泵-水轮机机组和/或水库与储气室之间的虚拟落差和/或落差共同使所述储气室维持压力状态B，直至所述储气室的气体能量释放完毕，完成第一释能操作；再次储能时，通过所述压缩空气储能机组进行注气储能，并由压力水泵/水泵-水轮机机组和/或水库与储气室之间的虚拟落差和/或落差共同使所述储气室维持压力状态B，当所述储气室的水被排空后，关闭连接于水库和储气室之间的压力阀门，由压缩空气储能机组继续往储气室内注气加压至压力状态A，完成第二储能操作；释能时，由储气室经压缩空气机组释气发电，至储气室的压力回到压力状态B时，再由压力水泵/水泵-水轮机机组和/或水库与储气室之间的虚拟落差和/或落差共同使所述储气室维持压力状态B，完成第二释能操作；之后重复进行第二储能操作和第二释能操作，所述储气室的压力在压力状态A和压力状态B之间循环；所述第一储能操作之后的储能操作记为后续储能操作，所述第一释能操作之后的

释能操作记为后续释能操作；

[0072] 在后续释能操作完成、再次储能之前，也可以设置有泄水操作；

[0073] 将储气室内的水泄放至泄水池或下游水库，压力释放过程中，水中的空气释出使所述储气室内保留残余压力状态，再次进行储能时，由压缩空气储能机组给所述储气室注气加压至压力状态A，重复进行释能、泄水、储能操作时，所述储气室的压力在残余气压、压力状态A和压力状态B之间循环；

[0074] 针对多个储气室的系统，将多个所述储气室的额定压力状态分别设为压力状态 $C_1, C_2, \dots, C_M$ 、恒定压力状态分别设为压力状态 $C_{10}, C_{20}, \dots, C_{M0}$ ，M为多个储气室的系统中储气室的数量；

[0075] 所述第二控制模式为：所述储气室初始压力状态为一个大气压，通过所述压缩空气储能机组进行储能，依次使多个所述储气室达到压力状态 $C_1, C_2, \dots, C_M$ ，完成多个储气室的第一储能操作；若所述压力水泵/水泵-水轮机机组和/或水库与储气室之间的虚拟落差和/或落差使所述第一储气室维持压力状态 $C_1$ ，则采用恒压方式发电，否则通过所述压缩空气储能机组发电，直至所述第一储气室压力状态由压力状态 $C_1$ 降至压力状态 $C_{10}$ 时，由所述压力水泵/水泵-水轮机机组和/或水库与储气室之间的虚拟落差和/或落差使所述第一储气室维持压力状态 $C_{10}$ ，直至所述第一储气室的气体能量释放完毕，并通过上述过程依次进行其他储气室的释能发电，完成多个储气室的第一释能操作；从第二次储能操作开始，所述储气室初始状态为被水充满，所述压力水泵/水泵-水轮机机组和/或水库与储气室之间的虚拟落差和/或落差使所述第一储气室维持恒压力状态 $C_{10}$ ，采用恒压方式储能，当通过压缩空气储能机组注气储能排空第一储气室中的水时，若压力状态 $C_{10}$ 对应压强小于压力状态 $C_1$ ，则关闭连接于所述水库与所述第一储气室的压力阀门，继续由压缩空气储能机组向所述第一储气室注气加压直至压力状态达到 $C_1$ ，第一储气室储能结束，并通过上述过程依次进行其他储气室的储能，完成多个储气室的第二储能操作；多个储气室的第二释能操作与第一释能操作相同；重复进行第二储能操作与第二释能操作，多个储气室的压力分别在 $(C_1 - C_{10}), (C_2 - C_{20}), \dots, (C_M - C_{M0})$ 之间循环；

[0076] 若水库与多个储气室中部分储气室之间的落差对应压强超过储气室的额定压力状态时，可以利用储气室之间的落差和/或压力水泵/水泵-水轮机机组的虚拟落差来维持下部储气室的恒定压力，该模式可为阶梯储能/释能的控制模式，所述阶梯储能/释能的控制模式为：当系统上部储气室释能完毕时，内部充满水，可作为系统下部储气室的水库，直至完成最低处储气室的释能；当下部储气室储能完毕时，水被压入上部储气室，直至完成最上部储气室的储能，水进入水库。

[0077] 现有技术中，在忽略储能和发电过程损耗的前提下，抽水储能电站的储能量可用 $mgh$ 表示，其中 $m$ 为水的质量， $g$ 是重力加速度时间常数， $h$ 是抽水储能平均水头，决定抽水储能水库储能密度（即单位体积储能量）的是平均水头 $h$ 。假设空气的压缩和膨胀过程均为等温过程，压缩空气储能电站的储能量可用以下公式表示：

$$[0078] \quad W = p_B V_B \ln \frac{p_A}{p_B} + (p_B - p_A) V_B \quad (1)$$

[0079] 其中， $p_A$ 是气体初始压强（即标准大气压）， $p_B$ 是气体压缩后压强， $V_B$ 是压缩后气体的体积。

[0080] 储气室等容量和储气室等压强两种不同的压缩空气储能系统在储能和发电过程中储气室压强的变化情况如图1所示,前者的压强在一定范围之间变化,后者维持储气室压强不变。

[0081] 相同水柱落差情况下,比较抽水储能电站水库单位体积储能量和等压强压缩空气储能电站储气室单位体积储能量如2所示。

[0082] 从图2可见,例如在1000米水柱条件下,对应压缩空气储气室压强为10MPa,等压强压缩空气储能电站储气室储能密度是抽水储能电站水库储能密度的约3倍。此外,相较于储气室容量不变的压缩空气储能电站70%的设计能量循环效率,由于等压强压缩空气储能电站在储能和发电过程中储气室压强保持不变,其设计能量循环效率有望超过70%甚至达到75%,接近抽水储能电站的能量循环效率。

[0083] 虽然,专利201110449390.7,水-气共容舱电力储能系统,提到了使用空气压缩机和水泵水轮机的储能系统的发明。但是,其本质上是一种抽水储能系统而不是压缩空气储能系统。其空气压缩机的作用只是为水-气共容舱提供一个预置压强,之后便不参与工作。在水泵-水轮机储能过程中,预置气体被继续压缩,其压强可提升至初始状态的约两倍,此过程中,空气压缩产生热量造成能量损失,而且,随着气体压强的成倍变化,水泵水轮机将工作在变水头的工况,造成能量循环效率的显著降低。虽然,专利201410312066.4,用高压储气罐恒压的水-气共容舱电力储能系统,压缩空气机组在储能和发电过程中作为辅助设备同时运行,解决了维持水泵水轮机组水头恒定的问题。但是,根据前面描述的等压强压缩空气储能密度与抽水储能密度的关系,以一定的压强向水-气共容舱内打入单位体积压缩空气对应的能耗,是以相同压强泵入同等体积水所需能耗的3倍,即意味着作为维持水泵水轮机水头不变的辅助系统,压缩空气机组的能耗可能会很高而不利于储能。至于专利201210099690.1,恒压水-气共容舱电力储能系统,提到的用蒸汽锅炉维持水压不变,代价就更加高昂。

[0084] 总的说来,对于以往的变工况压缩空气储能系统,为了保障系统效率,储气室应保留一个基础气压,因而储气室未能得到充分利用;对于水压补偿的等压强压缩空气储能,虽然储气室得到了充分利用,但需要建设适当落差的上下水库,其中下库同时用做储气室,当上下水库的落差较小时,无法保障系统的经济性;从运行角度而言,以往的压缩空气储能机组的输出功率调节不够灵活,即太不适合于调频和平滑功率波动的应用场景。

[0085] 为了更清晰地对本发明混合工况压缩空气储能系统的控制方法进行说明,下面结合附图对本发明实施例中各步骤展开详述。

[0086] 如图3所示,本发明混合工况压缩空气储能系统的控制方法的第一控制模式第一方面包括:

[0087] 储气室101设置额定压力为压力状态A,恒定压力工作状态为压力状态B,水库102与储气室101之间通过输水管道103连接。

[0088] 如果水库102与储气室101的落差不足以维持压力状态B时,可以通过水泵104增压的方式,可以虚拟一个落差,从而使储气室的压力维持在状态B。

[0089] 其具体运行过程为:

[0090] 储气室101初始态为自然状态(即内部只有1个大气压),储气室预留部分基础水位,储气室101通过水泵104连接水库的压力阀门105处于关闭状态。

[0091] 首先,空气阀门108开启,通过电动机106带动空气压缩机107向储气室101注气加压,压缩空气产生的热量通过热交换器109收集,加热从储冷罐110中泵出的储热介质并将加热后的介质存储到储热罐111中。当储气室101的压力达到其额定压力(压力状态A)时,空气压缩机107机停止注气,首次储能过程结束。

[0092] 释能时,高压空气先通过空气膨胀机112带动发电机113发电,压缩空气膨胀过程中产生的热量经过热交换器存储至储冷罐110。当储气室101的压力释放到压力状态B时,启动压力水泵104并打开连接水库102和储气室101的压力阀门105,由压力水泵104和水库102与储气室101之间的水柱一同维持储气室101的恒定压力状态B,直至储气室101的气体能量释放完毕。

[0093] 此后,再关闭储气室101和水库102之间的压力阀门105,打开阀门115,储气室101内残余气压将水挤出至泄水池116(或者下游水库),当所述储气室内的水被挤出后,仍保留部分残余气压,关闭压力阀门115,以备再次充电之用。

[0094] 如果水库102和储气室101没有落差甚至水库102位置略低于储气室101时,水库102和泄水池116可以共用,在泄水过程中,打开压力阀门105,储气室101内残余气压推动水轮机机组104(水泵-水轮机具有水泵和水轮机两种工作状态)做功并将所述储气室的水挤出至所述水库或泄水池102,当所述储气室内的水被挤出后,将仍保留部分残余气压,关闭压力阀门105,以备再次充电之用。

[0095] 如果水库102和储气室101没有落差甚至水库102位置略低于储气室101时,储气室压力状态B将完全由水泵104提供,整个过程储气室压力变化情况如图4所示。对于此种情形,在释能过程中,可以调节水泵机组104的功率以参与调频。

[0096] 在水库的高度高于储气室但无法维持储气室的压力至压力状态B的情况下,也可以用水泵-水轮机机组替代水泵104:

[0097] 在首次释能完成后,并不需要泄放储气室101内的水。当再次注气储能时,在气压的推动下,压力水推动水轮机104做功并将储气室101的水挤出至水库102,需要指出的是,图中储气室的进水口与基础水位应保证适当的高差,以防止水流内吸入空气,可在储气室内设计一个凹形槽,储气室的进水管置于凹形槽底部。

[0098] 当储气室101内的水被挤出后,关闭连接于水库102和储气室101的压力阀门105,压缩空气储能系统继续向储气室101注气加压至压力状态A。

[0099] 当再次释放至储气室101的压力回到B时,打开储气室101和水库102之间的压力阀门105,并由水泵-水轮机机组104提供压力补偿以维持压力状态B,直至储气室101的能量释放完毕。

[0100] 整个过程储气室压力变化情况如图5所示。对于此种情形,在储能和释能过程中,可以调节水泵-水轮机机组104的功率以参与调频。

[0101] 水泵/水泵-水轮机机组向/由储气室补水/出水以维持储气室的压力状态时,由于储气室的容积较大,其短时补水/出水速度对储气室的压力影响较小,因此可以短时调节水泵/水泵-水轮机机组的功率从而进行交流电网一次调频,响应直流电网快速功率变化或者平滑新能源短时功率波动。

[0102] 具体实施方式为:

[0103] 储能时,压缩空气储能机组从大气环境向储气室内注入压缩空气,储气室内的空

气压力由水库与储气室之间的水柱和水泵-水轮机机组虚拟的水柱压力共同提供,保持储气室内压缩空气压力状态不变。在储气室压缩空气压力下水经过水泵-水轮机机组从储气室压入水库,克服水泵-水轮机机组压力做功,带动水泵-水轮机机组发电。在此过程中,压缩空气储能机组和水泵-水轮机机组均能够响应电网对于功率变化的需求,考虑运行经济性,压缩空气储能机组功率变化速度慢,用于跟踪长时间尺度的电网调峰或者AGC功率的变化需求,水泵-水轮机机组功率变化速度快,用于响应电网短时间尺度的功率变化的需求,如交流电网的一次调频,直流电网的快速功率响应或者平滑新能源电源短时功率波动,从而使该系统在储能时的总功率既能满足电网调峰和AGC功率的变化需求,又能满足短时间尺度电网调节功率的变化需求。

[0104] 释能时,储气室内的压缩空气膨胀并进入大气环境做功发电,水库和储气室之间的落差对应的水柱提供一部分压力,水泵-水轮机机组虚拟一定高度的水柱提供一部分压力,两者提供的压力相加为储气室内的气体压力,该压力状态保持不变。水泵-水轮机机组工作在电动状态,做功将水压入储气室以填补压缩空气膨胀发电后的储气室腾出空间,同理,考虑运行经济性,压缩空气储能机组功率变化响应速度慢,用于跟踪长时间尺度电网调峰和AGC功率的变化需求,水泵-水轮机机组功率变化速度快,用于响应电网短时间尺度功率变化的需求,如交流电网的一次调频,直流电网的快速功率响应或者平滑新能源电源短时功率波动,从而使该系统在释能时的总输出功率既能满足电网调峰功率的变化需求,又能满足短时间内电网调节功率的变化需求。

[0105] 根据水泵/水泵-水轮机机组工作模式,设计水泵/水泵-水轮机机组控制装置,由外控制环和内控制环组成,其中外控制环参考信号为储气室压强 $P_{airset}$ ,反馈信号为实际检测的储气室压强,储气室压力控制器的输出信号 $P_{Gwset}$ 为功率指令信号,从而控制储能/释能过程中储气室的出水/补水功率(实际反映为水量)能够匹配储气室注气/出气的速度,保持储气室压力状态不变,辅助压缩空气储能机组跟踪响应电网调峰等长时间尺度功率曲线的需求;内控制环可以控制并快速改变水泵/水泵-水轮机机组短时间尺度的功率,从而响应电网短时间的功率变化需求,其中,通过测量交流电网频率 $f_G$ 并经过电网一次调频控制器(一般为下垂控制策略),得到电网一次调频功率指令 $P_{1st}$ ,另外,加入储能系统短时间尺度功率指令 $P_{Hf}$ ,两种短时间尺度的功率控制信号 $P_{1st}$ 和 $P_{Hf}$ 叠加在外控制环控制信号 $P_{Gwset}$ 的大变化趋势之上,如图6所示,对储气室压强的影响极其有限,不会影响压缩空气储能机组的运行,但是,通过控制短时间尺度水泵-水轮机机组的功率变化,可以实现响应电网短时间尺度功率变化的需求。根据外控制环和内控制环的功能需求,外控制环的时间常数大,响应速度慢,内控制环的时间常数小,响应速度快。

[0106] 本发明混合工况压缩空气储能系统第一控制模式的第一方面总体控制装置原理如图7所示,以光伏和风力发电为主的新能源电源通过最大功率点跟踪控制方法,其输出功率为 $P_{renew}$ ,具有很强的波动性;电网对新能源电源的需求功率为 $P_{Grid}$ ,具有功率平滑,波动性小的特征,与新能源电源的波动特性相解耦,两者之间的功率供需偏差通过本发明的储能系统进行调节,调节功率为 $P_{storage}$ ,从而最终使电网获得所需功率。其中, $P_{storage}$ 功率曲线

可以分解为两部分,一部分是长时间尺度的功率成分 $P_{Lf}$ ,代表电网对储能系统功率需求的总变化趋势,对应电网调峰或AGC指令;另一部分是短时间尺度的功率成分 $P_{Hf}$ ,代表电网对短时间尺度功率变化的需求,如交流电网的一次调频,直流电网的快速功率响应或者平滑新能源电源短时功率波动,对应电网调频、短时功率响应等指令。通过压缩空气储能机组跟踪响应 $P_{Lf}$ 指令,通过水泵/者水泵-水轮机机组跟踪响应 $P_{Hf}$ 指令。同时电网所需的静态无功补偿容量 $Q_{Grid}$ ,按照机组无功容量大小等比例分配给压缩空气储能机组 $Q_{Gaset}$ ,水泵/者水泵-水轮机机组 $Q_{Gwset}$ 。

[0107] 如图8所示,压缩空气储能机组控制装置接收来自系统总体控制装置的功率指令 $P_{Lf}$ ,对应电网调峰或AGC指令,通过调节压缩空气阀门和同步发电机/同步电动机的励磁系统控制压缩空气储能机组的功率,其实际功率为 $P_{Ga}$ 。由于水泵/水泵-水轮机机组参与辅助运行维持储气室压强的过程中,压缩空气储能机组发电时,水泵机组耗能;压缩空气储能机组储能时,水轮机发电;水泵/水泵-水轮机机组功率与压缩空气储能机组功率相反。因此,系统总的调峰或AGC功率控制,实际上是控制压缩空气储能机组功率与水泵/水泵-水轮机机组功率差值 $P_{Ga} - P_{Gwest}$ ,使其跟踪响应 $P_{Lf}$ 。其中,选择 $P_{Gwest}$ 作为水泵/水泵-水轮机机组功率参考值的原因在于:压缩空气储能机组控制的目的在于控制长时间尺度的调峰或者AGC功率,排除短时间尺度功率波动成分 $P_{1st}$ 和 $P_{Hf}$ 的影响。此外,根据电网检测电压 $v_G$ 和电网调压控制器,压缩空气储能机组可提供动态无功补偿 $Q_{Avolt}$ ,控制并稳定电网电压。

[0108] 如图9所示,本发明混合工况压缩空气储能系统的控制方法的第一控制模式第二方面包括:

[0109] 储气室101初始态为自然状态(即内部只有1个大气压),储气室101连接水库102的压力阀门105处于关闭状态。

[0110] 首先,通过空气压缩机向储气室注气加压。当储气室101的压力达到其额定压力(压力状态A)时,空气压缩机停止注气,首次储能过程结束。

[0111] 释能时,高压空气先通过空气膨胀机发电,当储气室101的压力释放到压力状态B时,打开连接水库102和储气室101的压力阀门105,由水柱维持储气室101的恒定压力状态B,直至储气室101的气体能量释放完毕。

[0112] 再次充电时,空气压缩机向储气室101注气,继续由水柱维持恒定压力状态B,当储气室101的水被挤出时,关闭连接水库102和储气室101的压力阀门105,由压缩空气储能系统继续向储气室101注气到压力状态A,再次完成储能。

[0113] 以后储气室101的压力就在A和B之间循环,并完成储能和释能过程。整个过程储气室压力变化情况如图10所示。

[0114] 如图11所示,本发明混合工况压缩空气储能系统的控制方法的第二控制模式包括:

[0115] 以两层巷道为例,多层巷道以此类推:假设利用废弃地下空间的上下两个巷道分别建设有上储气室201和下储气室202,地面建设有水库203,压缩空气储能机组厂房204,压



压缩空气储能机组204分别与上储气室201和下储气室202通过输气管道205连接,分别通过阀门206和207控制,水库203分别与上储气室201和下储气室202通过输水管道208连接,分别通过阀门209和210控制,水库203出水口处有阀门211,上储气室201与外界大气压的连通状态由阀门212控制。

[0116] 当水库203与两个储气室201,202高度差对应的水柱压力分别在储气室额定压力经济性设计范围内,两个储气室可以分别对应水库构成等压强压缩空气储能系统,其储气室压力状态分别对应各自与水库的高度差。当然,这种情况下,如果压力不足,同样也可采用水泵增压的方式使储气室的压力维持在两个储气室的额定设计压力状态。通过水泵213为上储气室增压,通过水泵214为下储气室增压,下储气室的释能过程与上储气室相同,只是其压力状态有可能不同而已。

[0117] 如果水库203与下储气室202高度差对应的压力状态超过其额定压力经济性设计值,采用阶梯储能/释能的控制模式,可以通过上储气室201作为下储气室202的水库提供恒压源。

[0118] 上下储气室初始态为自然状态(即内部只有1个大气压),首先,关闭阀门209,210,207,212,211,打开阀门206,通过空气压缩机向上储气室201注气加压,达到上储气室201额定压力状态 $C_1$ 时,空气压缩机停止注气,然后,关闭阀门209,210,206,212,211,打开阀门207,通过空气压缩机向下储气室202注气加压,达到下储气室202额定压力状态 $C_2$ 时,空气压缩机停止注气,首次储能过程结束。

[0119] 释能时,首先,关闭阀门207,212,210,打开阀门206,211,209,上储气室201高压空气先通过空气膨胀机发电,水库203与上储气室201之间水柱高度差对应上储气室201额定压力状态 $C_1$ ,此时,由水柱维持上储气室201的恒定压力状态 $C_1$ ,直至上储气室201的气体能量释放完毕,此时,上储气室201内充满水。

[0120] 之后,关闭阀门211,206,打开阀门207,212,209,210,下储气室202高压空气通过空气膨胀机发电,上储气室201与外界大气压相通,上储气室201与下储气室202之间水柱高度差对应下储气室202额定压力状态 $C_2$ ,此时,由水柱维持下储气室202的恒定压力状态 $C_2$ ,直至下储气室202的气体能量释放完毕,此时下储气室202内充满水,上储气室201内气压状态为1个大气压。

[0121] 再次充电时,首先,关闭阀门211,206,打开阀门207,212,209,210,空气压缩机向下储气室202注气,上储气室201与大气压相通,由上下储气室之间的水柱维持恒定压力状态 $C_2$ ,当下储气室202的水全部被挤出到上储气室201时,关闭压缩机,然后,关闭阀门212,207,210,打开阀门206,209,211,上储气室201封闭,空气压缩机向上储气室201注气,通过水库203和上储气室201之间的水柱维持恒定压力状态 $C_1$ ,当上储气室201的水全部被挤出到水库203时,关闭压缩机,再次完成储能。

[0122] 以后上下储气室分别以 $C_1$ 和 $C_2$ 压力状态工作,完成储能和势能的循环过程。当然,这种情况下,如果压力不足,同样也可采用水泵增压的方式使储气室的压力维持在两个储气室的额定设计压力状态。通过水泵213为上储气室增压,通过水泵214为下储气室增压。整个过程压缩空气储能机组压力变化情况如图12所示。多个储气室阶梯储能/释能的控制模式以此类推。

[0123] 实施例一:

[0124] 如图13所示,水库可以位于山上,储气室可以浅埋于山下或者在山下露天建造,压缩空气储能机组厂房靠近储气室建设。此外水库也可建于地面,而储气室可以通过挖掘地下空间建造。此时采用第一控制模式第一方面或第一控制模式第二方面进行系统控制。

[0125] 实施例二:

[0126] 如图14所示,储气室可以通过向山体深处挖掘而成,水库可以由储气室开挖过程中的石材阻挡附近河流形成的堰塞湖构成,压缩空气储能机组和水泵机组位于同一厂房内,建于水库和储气室之间。此种情况下,储气室与水库之间可能无落差或者储气室高于水库。此时采用第一控制模式第一方面进行系统控制。

[0127] 实施例三:

[0128] 如图15所示,可以利用现有的抽水储能电站的上库的部分容量作为该系统的水库,储气室可以通过向山体深处挖掘而成,也可在山下浅埋建造。此时采用第一控制模式第一方面或第一控制模式第二方面进行系统控制。

[0129] 假设存在一个抽水储能电站,其上库与山脚下某处高度差为400米,在山脚下的浅埋岩层(地下200m)通过硬岩掘进机开挖储气室,则水库与储气室之间的水柱高600米,对应压强6MPa,该系统等压强工况的工作压强为6MPa,设计储气室工作压强10MPa,则等容量工况的工作压强变化范围为10MPa~6MPa。选择压缩空气储能机组总容量120万千瓦,储能时长4小时,对应储能量为480万千瓦时,需要开挖储气室约50万立方,同时需要水库提供50万立方的水容量与该系统配套,设计能量循环效率约75%。

[0130] 实施例四:

[0131] 如图16所示,通过改造废弃煤矿井、金属矿井、油气井和其他废弃地下空间等,获得位于地下不同埋深的多个阶梯状储气室,实现储能。此时采用第二控制模式进行系统控制。

[0132] 术语“第一”、“第二”等是用于区别类似的对象,而不是用于描述或表示特定的顺序或先后次序。

[0133] 术语“包括”或者任何其它类似用语旨在涵盖非排他性的包含,从而使得包括一系列要素的过程、方法、物品或者设备/装置不仅包括那些要素,而且还包括没有明确列出的其它要素,或者还包括这些过程、方法、物品或者设备/装置所固有的要素。

[0134] 至此,已经结合附图所示的优选实施方式描述了本发明的技术方案,但是,本领域技术人员容易理解的是,本发明的保护范围显然不局限于这些具体实施方式。在不偏离本发明的原理的前提下,本领域技术人员可以对相关技术特征做出等同的更改或替换,这些更改或替换之后的技术方案都将落入本发明的保护范围之内。

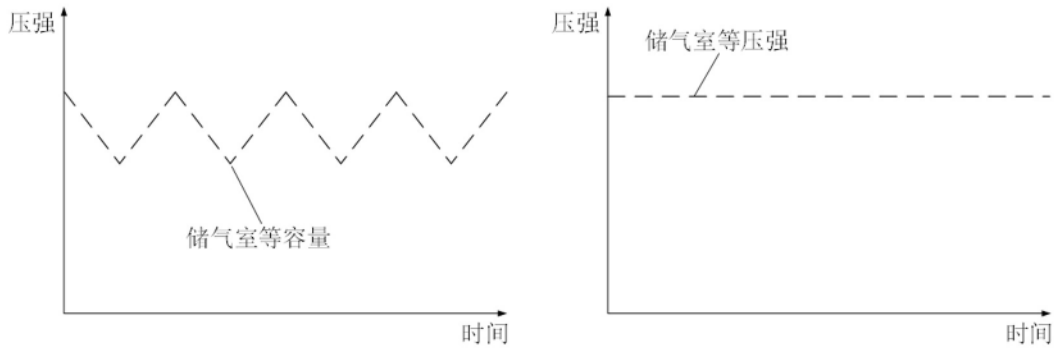


图 1

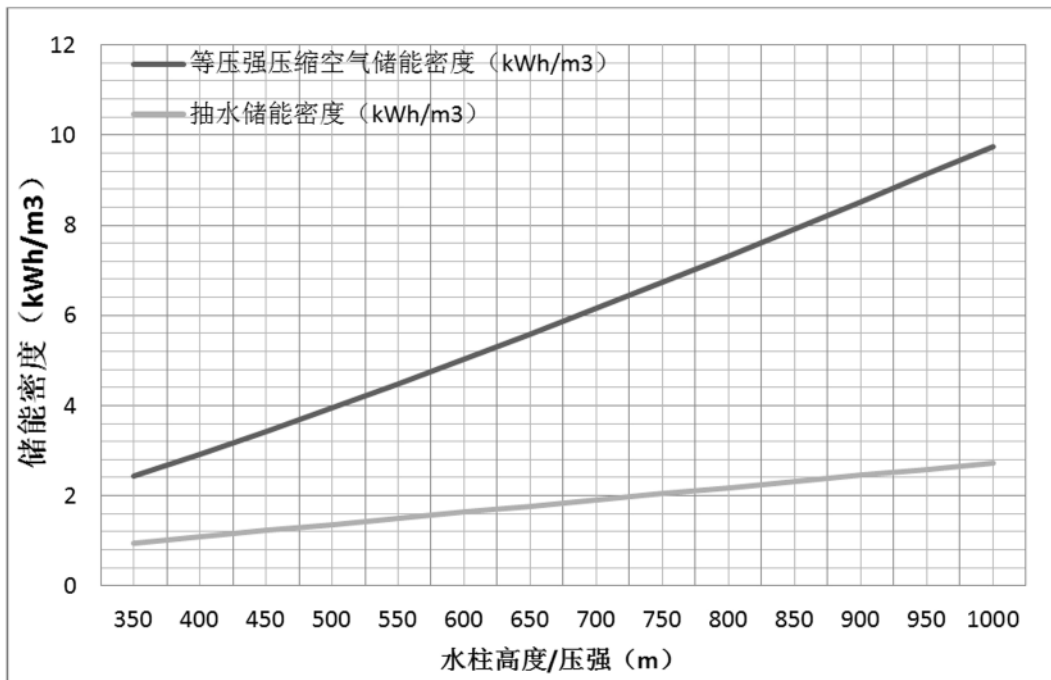


图 2

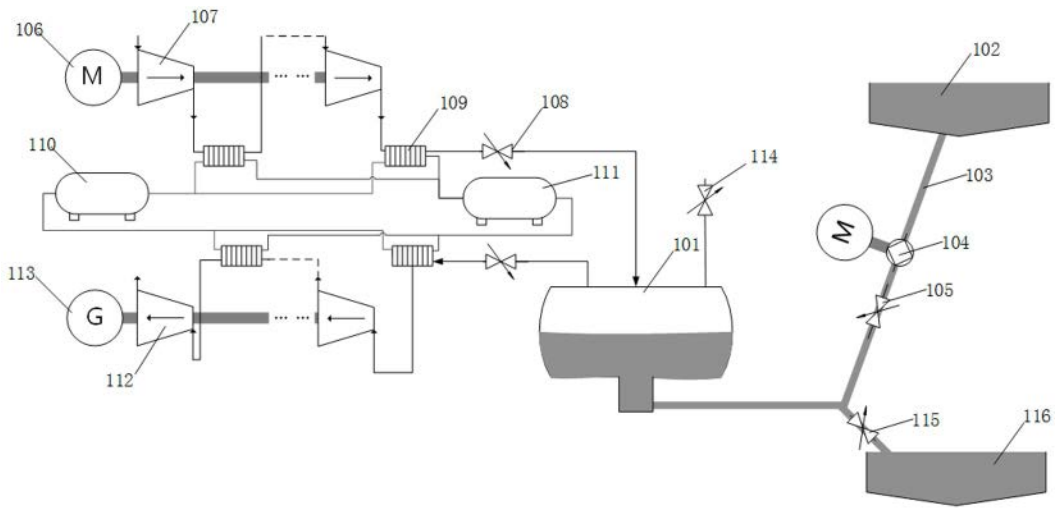


图 3

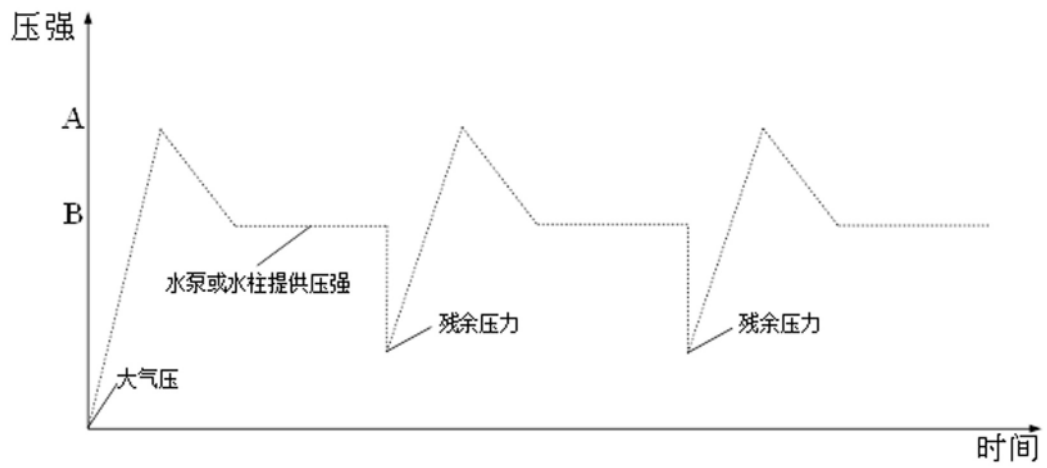


图 4

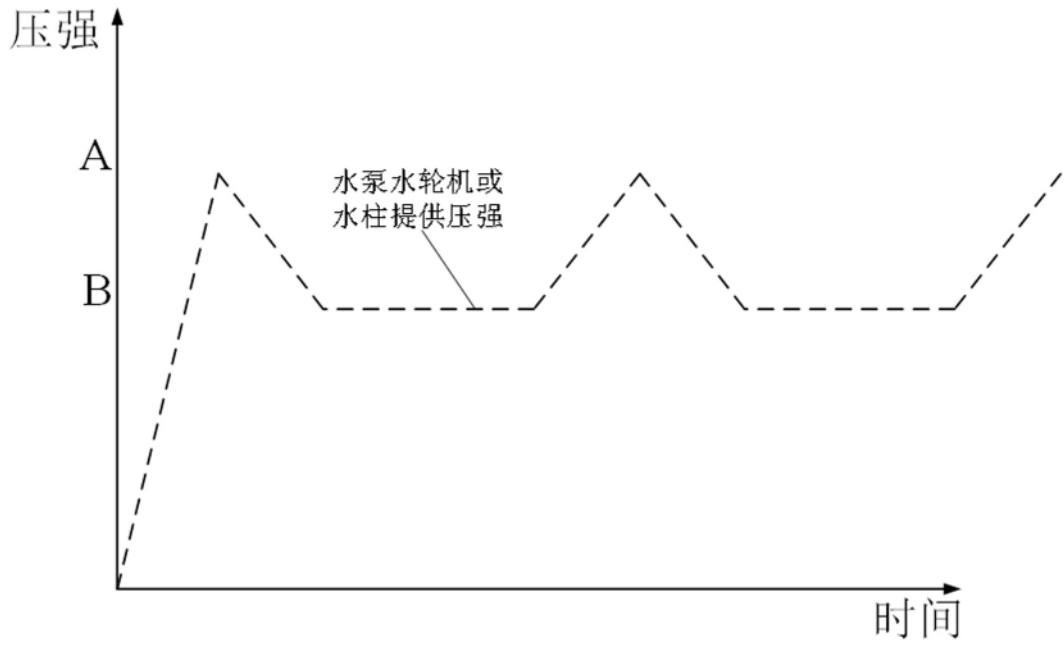


图 5

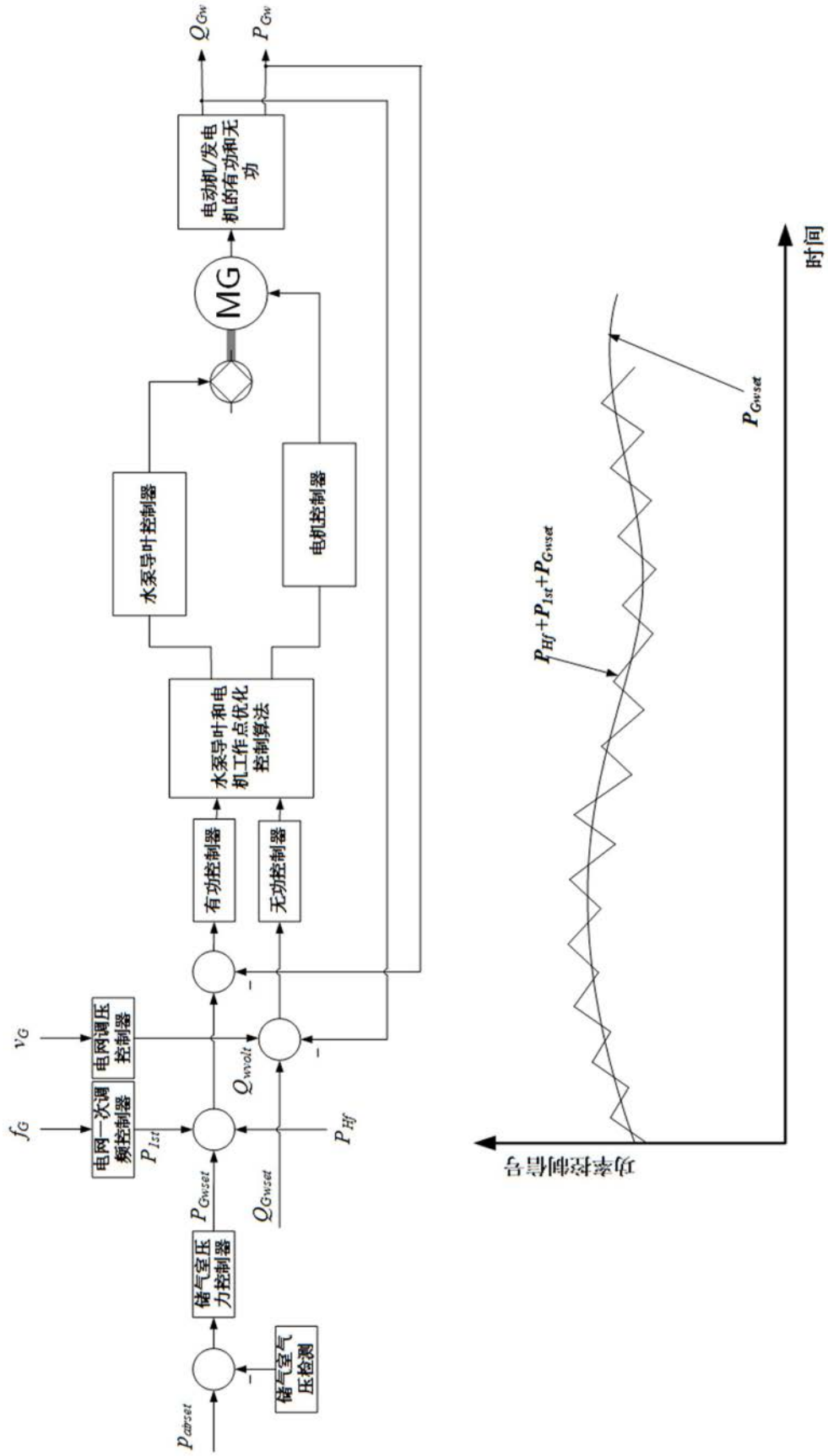


图 6

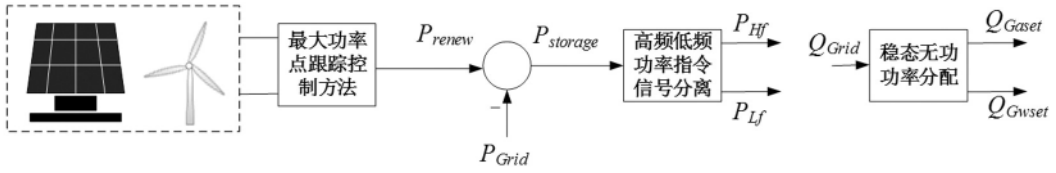


图 7

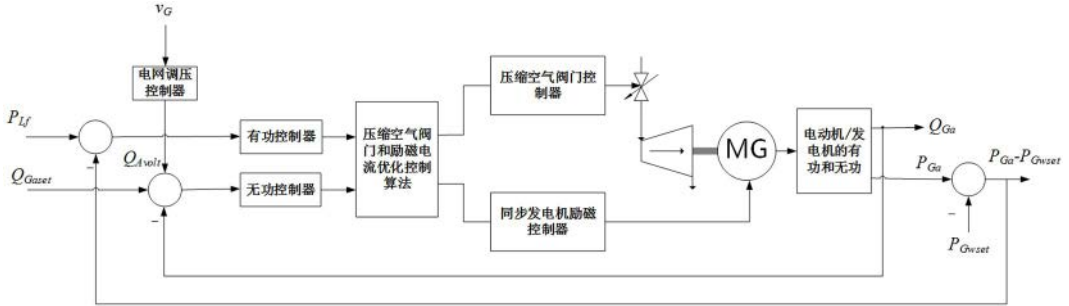


图 8

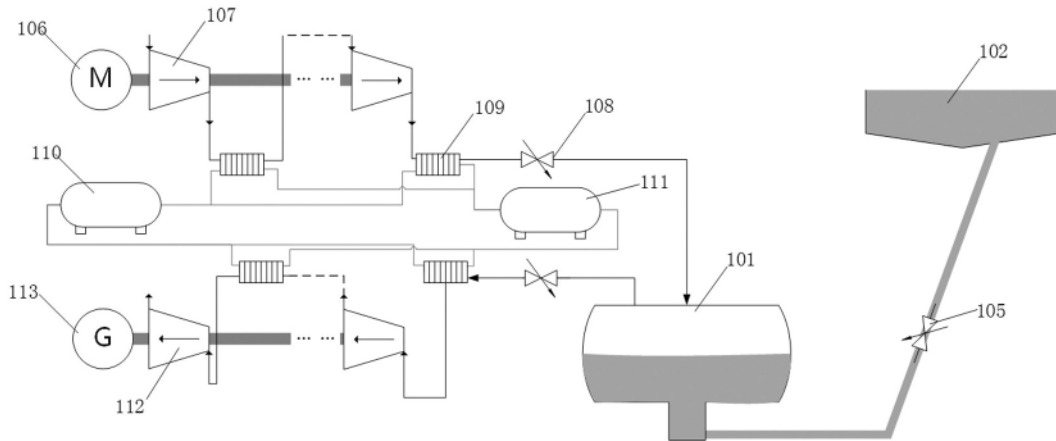


图 9

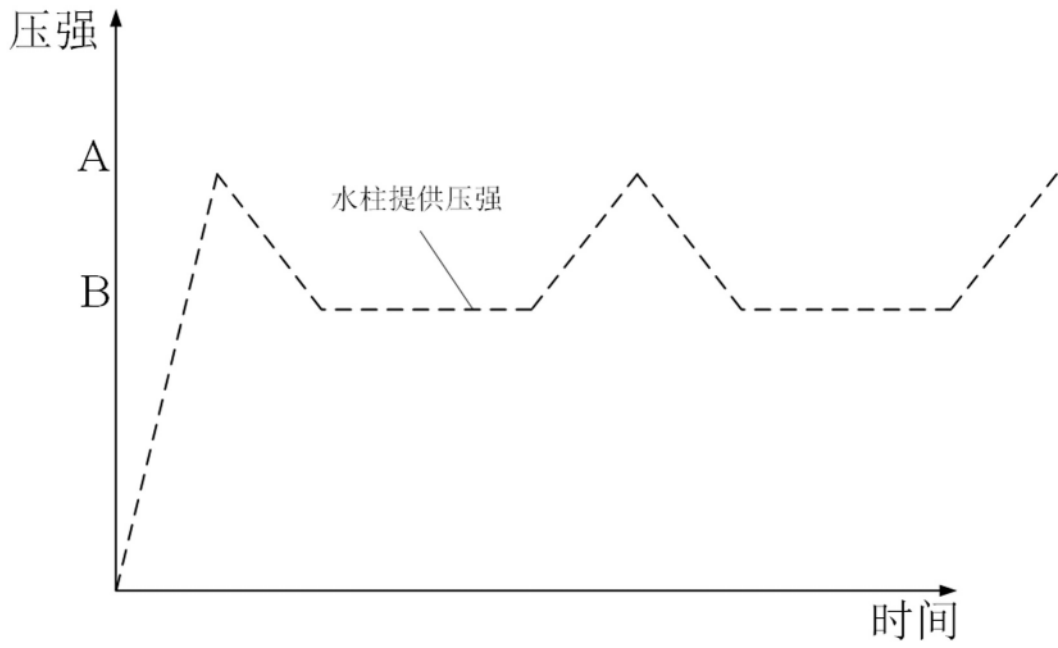


图 10

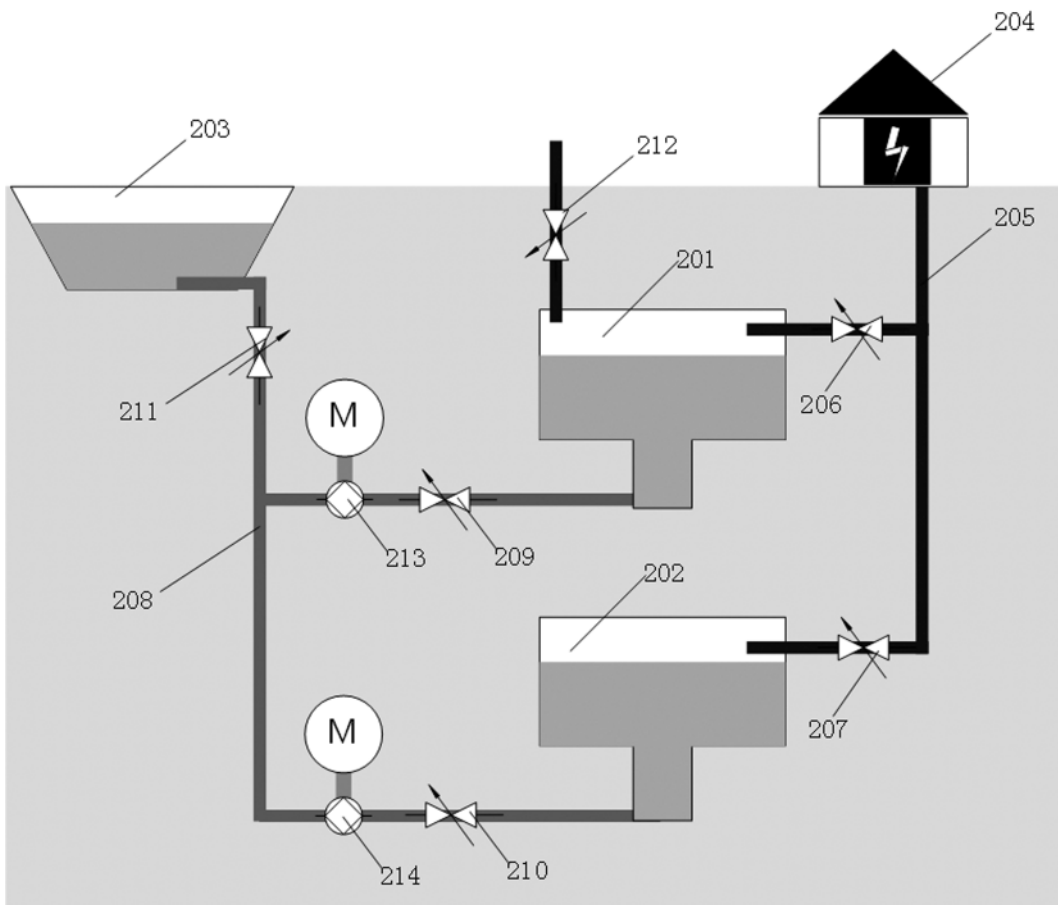


图 11



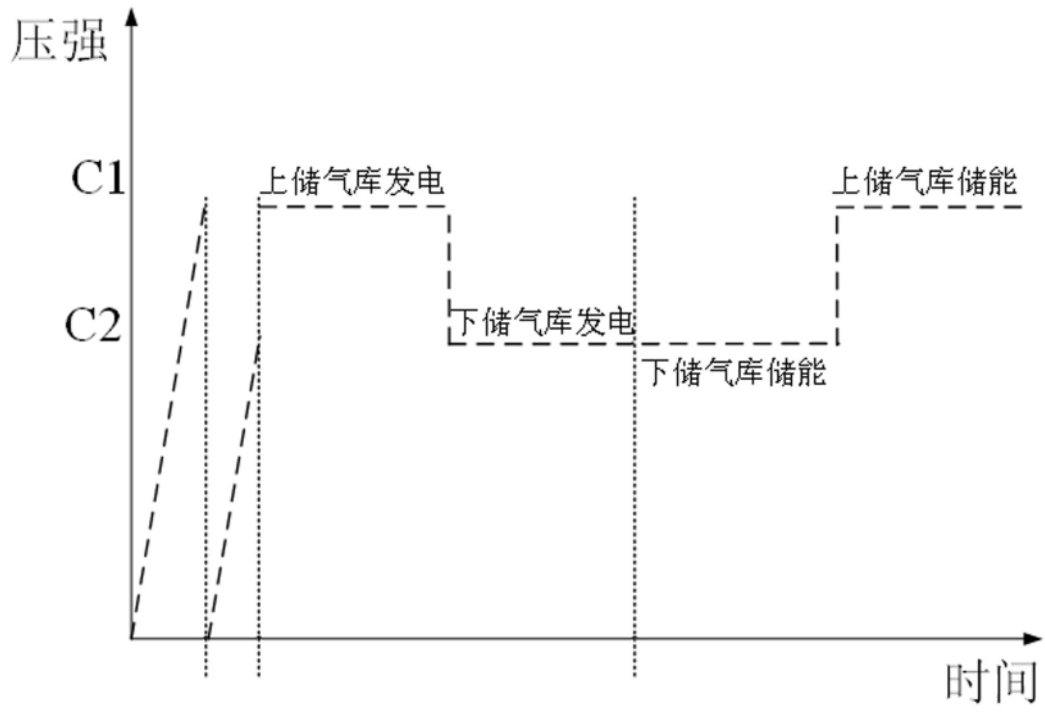


图 12

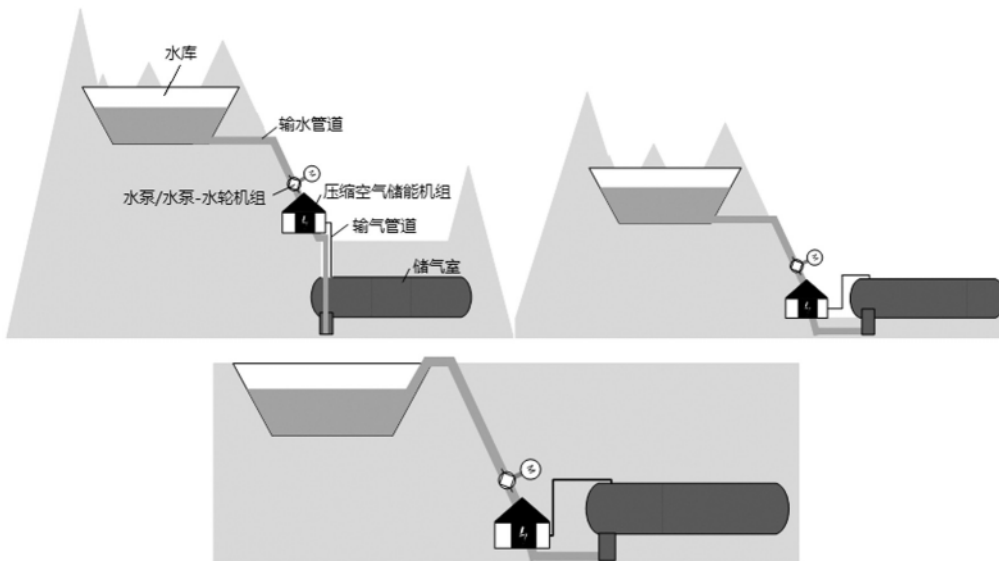


图 13

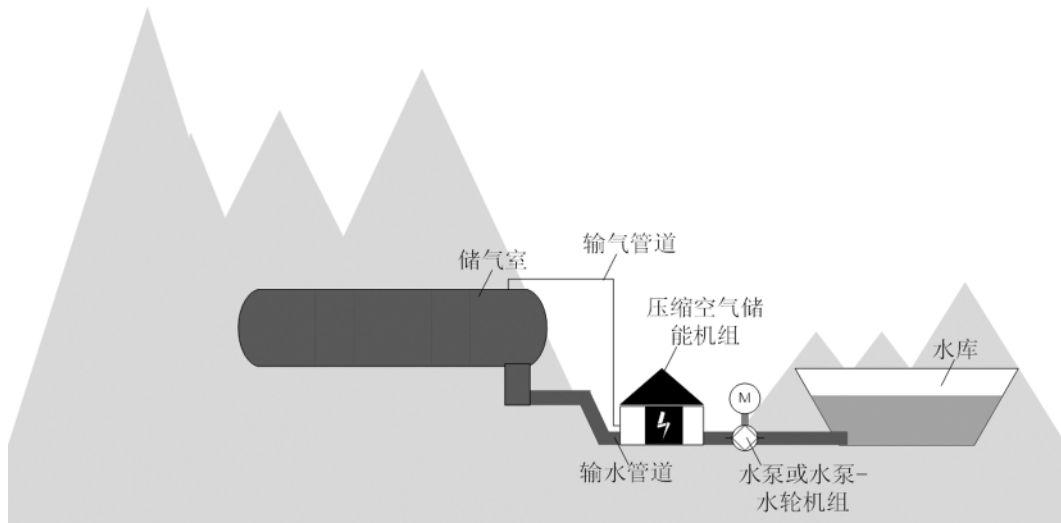


图 14

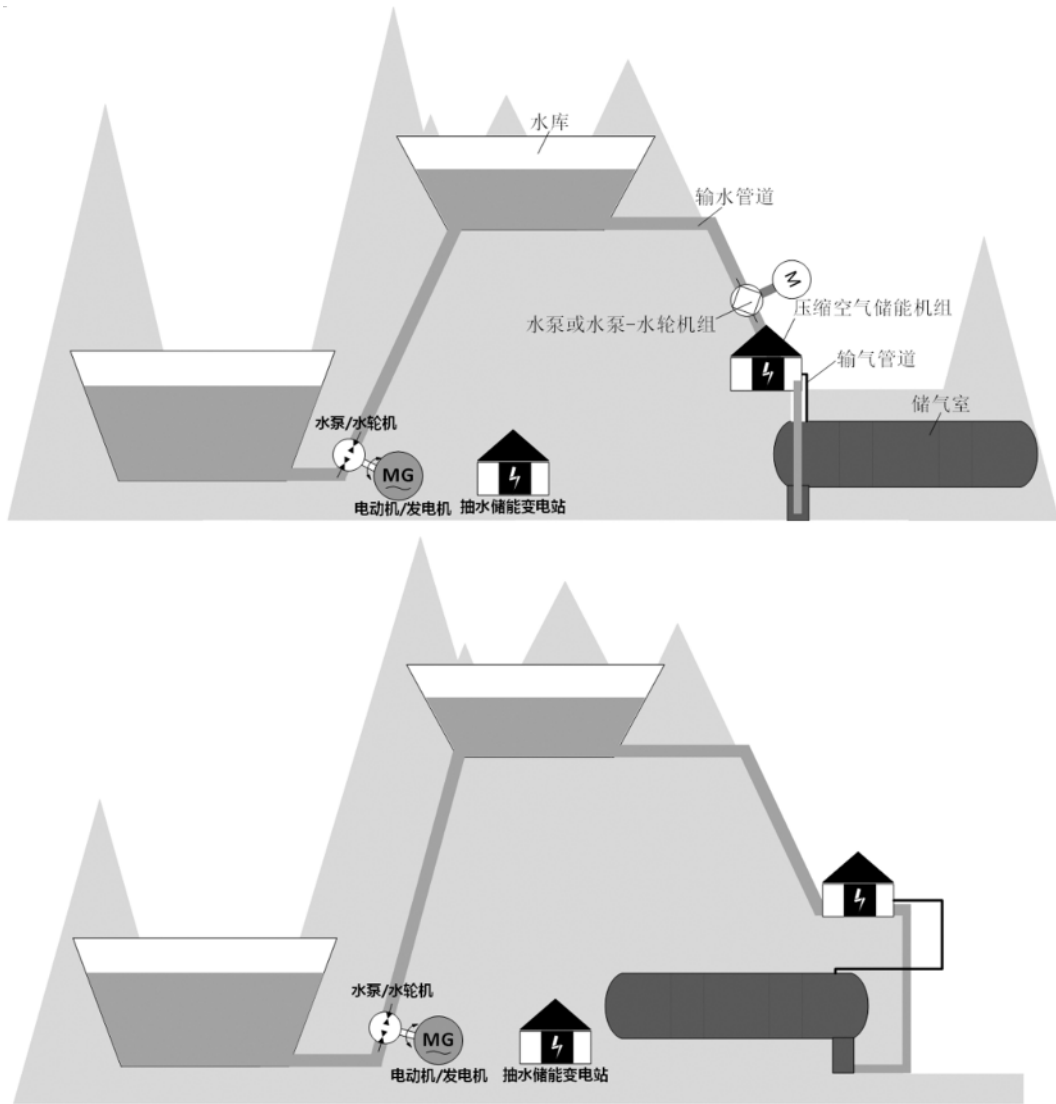


图 15

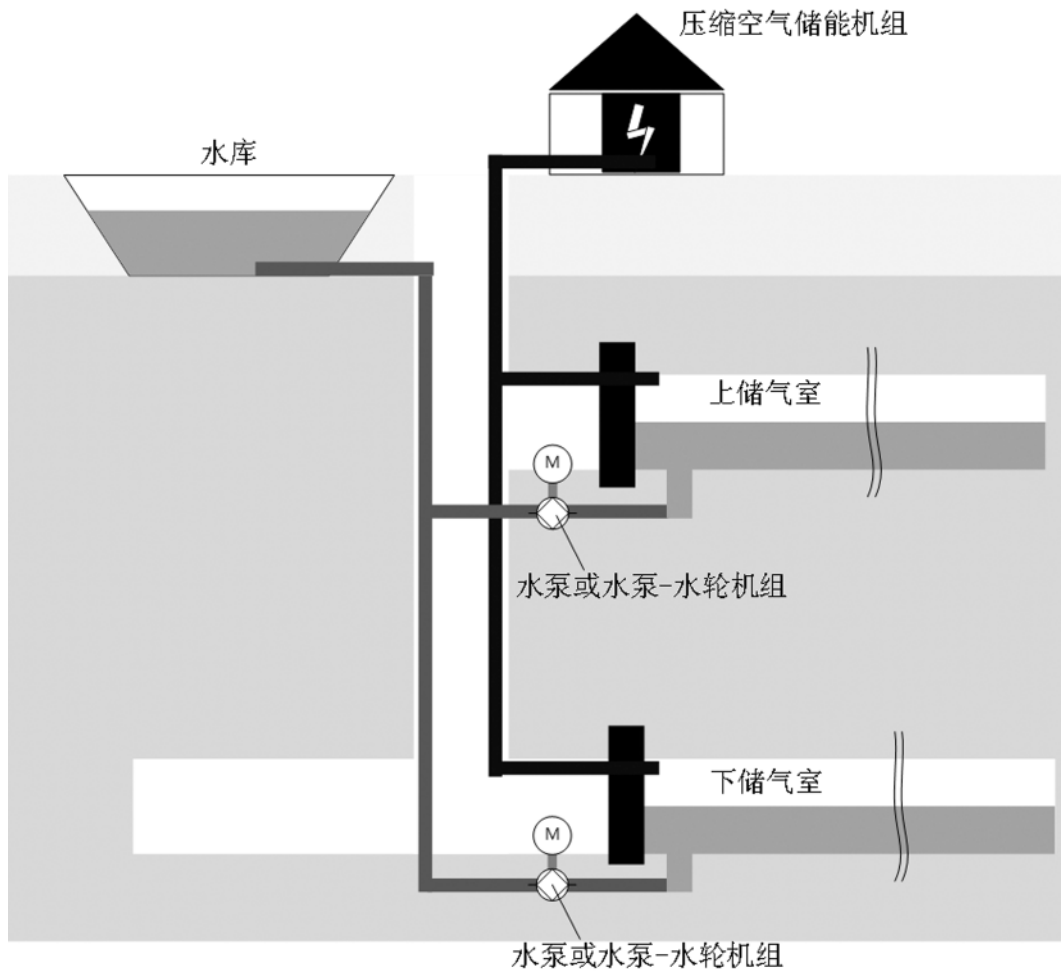


图 16