

水电洞室压缩空气储能地下储气库可行性分析

蒋志容¹, 侯彦硕¹, 丁平¹, 刘亚轩², 邓科¹

(1. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 611130;

2. 华北电力大学, 河北 保定 071003)

摘要:随着“双碳”政策的推进, 储能系统已经受到越来越多社会及学者的关注。笔者从压缩空气储能的技术现状及其系统原理着手, 介绍了压缩空气储能系统应用环境。结合水电站自身特点, 分析水电站地下洞室作为压缩空气储能系统储气室的可能性以及关键点并提出相关建议。基于水风光蓄储一体化新能源开发模式, 从水电站地下洞室资源储量、洞室地质条件、洞型与储气库的断面设计类型及其特点等方面, 深入分析利用水电站地下洞室建设压缩空气储能电站的优劣势, 总结了水电洞室初步利用的评估原则, 并展望了利用水电站地下洞室建设压缩空气储能项目的发展与技术突破方向。

关键词:压缩空气储能; 水电站地下洞室; 断面设计

中图分类号: TF734.62+1

文献标志码: A

文章编号: 1001-2184(2023)增 1-0022-07

Feasibility Analysis of Underground Gas Storage for Compressed Air Energy Storage in Hydropower Caverns

JIANG Zhirong¹, HOU Yanshuo¹, DIN Ping¹, LIU Yaxuan², DENG Ke¹

(1. PowerChina Chengdu Engineering Co., Ltd., Chengdu Sichuan, 611130;

2. North China Electric Power University, Baoding Hebei 071003)

Abstract: With the promotion of the "dual carbon" policy, energy storage systems have attracted more and more attention from society and scholars. Starting from the current technological status and system principles of compressed air energy storage, the article introduces the application environment of compressed air energy storage systems. Based on the characteristics of hydropower stations, the possibility and key points of using underground caverns as compressed air energy storage system are analyzed, and relevant suggestions are proposed. Based on the renewable energy development mode of integration of water, wind, solar and storage, the advantages and disadvantages of using hydropower station underground caverns to build compressed air energy storage power stations are analyzed in depth from the aspects of resource reserves, geological conditions of caverns, tunnel type and section design type and characteristics of gas storage. The evaluation principles of preliminary utilization of hydropower caverns are summarized, and the development and technological breakthrough direction by using underground caverns of hydropower stations to construct compressed air energy storage projects are also anticipated.

Keywords: Compressed air energy storage; Underground caverns of hydropower stations; Section design

0 引言

国家为实现双碳目标建立了以新能源为基础的新型电力系统。如今, 国家已经颁布《关于加快推动新型储能发展的指导意见》《“十四五”新型储能发展实施方案》等一系列政策^[1-2]。储能的发展与应用可促进新能源系统的消纳, 起到移峰填谷的作用, 进一步加强我国能源系统的灵活性、安全性以及可靠性。压缩空气储能系统建造周期短, 装置简单, 对于地理环境要求低, 系统寿命长,

循环次数多, 并且对周围环境无污染, 同时压缩空气储能系统放电时间可控且稳定, 可以与多种不同能源形势耦合并起到移峰填谷的作用, 因此压缩空气储能的应用可以匹配多种能源应用场景。大规模压缩空气储能电站对储气库的需求高达几十万 m³, 因此储气库的性能是压储电站建设的先决条件。随着水风光蓄储新能源一体化开发规划的实施, 利用水电地下洞室建设大规模压储电站以“储”的形式参与其中具有重要意义。在西南地区新能源送出受限, 利用水电送出新能源, 以大规模

收稿日期: 2023-06-16

模压储电站调节新能源消纳,对促进新能源的大力开发创造更大的空间。此外,水电站地下洞室空间高达千万 m^3 ,具备建设大规模压储电站的天然优势。

通过对压缩空气储能系统发展现状与技术原理的分析,结合对水电站地下洞室的深入研究,笔者对水电地下洞室储气库的资源情况做了详细的分析,给出了水电地下洞室利用的初步设计方案,并对水电洞室压缩空气储能电站的限制因素进行了梳理,为水电洞室压缩空气储能项目前期分析提供一定借鉴。

1 压缩空气储能技术发展及其应用

1.1 压缩空气储能技术的发展现状

20世纪中旬,德国首次提出压缩空气储能的概念,并于20世纪70年代末在德国 Huntorf 建立世界上首座压缩空气储能电站,该储能电站容量为 290 MW。20世纪末,美国阿拉巴马电力公司在阿拉巴马州建成了世界上第二座压缩空气储能电站,该电站容量为 110 MW,电站的储气洞穴在地下 450 m,总容积为 $5.6 \times 10^5 \text{ m}^3$,压缩空气储气压力为 7.5 MPa,可以为 11 000 个家庭供电一天,机组从启动到满负荷约 9 min^[3]。

2017年5月27日,国家能源局批复立项了江苏金坛 60 MW/300 MWh 盐穴压缩空气储能发电国家示范项目。项目一期建设 60 MW/300 MWh 盐穴压缩空气储能电站,于2021年9月30日实现并网发电,江苏金坛 60 MW/300 MWh 盐穴压缩空气储能发电国家示范项目的投产运行,实现了我国在压缩空气储能领域商业运行的零突破,也是国际上首座实现商业运行的非补燃压缩空气储能工业电站^[4]。

2018年,张家口百兆瓦先进压缩空气储能示范项目立项,于2021年12月31日成功实现并网,并正式进入系统带电调试阶段,建成投运后为北京冬奥会场馆提供绿色电能。该项目是国际首套 100 MW 级压缩空气储能示范项目,其投运标志着我国压缩空气储能项目迈进百兆瓦级新台阶。

1.2 压缩空气储能技术原理

压缩空气储能系统的运行分为两个阶段,分别是储能与释能阶段。在储能阶段中,利用电能带动系统中的压缩机做功,将常温常压的空气转

化为高压空气并将其存储在储气室中待用;在释能阶段中,利用储气室中的高压空气推动透平膨胀做功带动发电机发电。按照压缩空气储能系统的热量来源以及空气在系统中的存储状态,可以将压缩空气储能系统分为补燃式压缩空气储能、非补燃式压缩空气储能、绝热压缩空气储能、等温压缩空气储能等^[5]。

补燃式压缩空气储能指在储气室之后,透平之前的位置增加燃烧室,引入天然气或其他化石燃料进行燃烧,将高压空气变为高温高压空气进入透平做功,燃烧为了提高压缩空气储能系统的做功效率,但该过程仍然会向环境排放二氧化碳,对环境造成一定污染。因此与其相反的非补燃式压缩空气储能更符合我国能源行业向绿色低碳方向转型,同时该方式的装置更为简单。

绝热压缩空气储能技术在目前工程应用较多,技术相对成熟的非补燃压缩空气储能,其工作原理与普通的补燃式压缩空气储能不同的地方在于其在储能阶段的压缩过程中利用换热器收集并储存每级压缩后产生的压缩热,在释能阶段中将回收的压缩热逐步释放给高压空气,使其生成高温高压空气后膨胀做功,该做法可以有效改善非补燃压缩空气储能没有高温补燃的缺点,有效提高热效率,同时系统并不产生任何碳排放^[6]。

等温压缩空气是指使用控温手段,将空气的温度控制在一定范围内进行压缩和膨胀^[7]。该方式可以进一步提高系统热效率,系统发展潜力较大,但是控制温度的手段目前尚不成熟,无法适用于大规模储能机组。其他压缩空气储能手段比如超临界压缩空气储能以及液态压缩空气储能目前发展尚不成熟^[8-9]。

1.3 压缩空气储能系统组成

绝热式压缩空气储能系统主要由压缩系统、换热系统、储热系统、膨胀系统以及储气装置等组成。其中压缩机、膨胀机与系统设计功率相关,储热系统以及储气装置的大小与储能容量相关,当功率一定时,增加储能时长仅仅增加储热装置与储气库的投资。同时储气库的投资很大程度上影响着压缩空气储能电站的经济性,因此选择优质投资低的储气库是降低压缩空气储能电站建设的途径之一。

目前,资源条件已有的压缩空气储气库包括

压力容器储罐、废旧矿洞、新建洞穴、盐穴等多种形式。其中压力容器储罐布置在地面以上,选址灵活;但建设成本较高,占地面积大,不利于规模化应用。盐穴本身密封性很好,建设成本低,但盐穴资源富集区可再生资源匮乏,附近无大的电源形式可搭载。废弃矿洞能够节约地表土地资源,但矿洞尤其是煤矿开采区围岩等级较差,巷道又储气空间有限,也不利于规模化应用。

提出将水电站地下洞室用作压缩空气储气库,实现传统水电技术与新型储能技术融合。水电站拥有大规模的地下洞室群,除永久性洞室外,还有导流洞、施工洞等大量临时性洞室,在埋深以及围岩条件适合情况下部分可用作地下储气库。除地下空间大外,水电站地下洞室还拥有地质条件优,造价成本低,可共用水电站送出通道等优势。压缩空气储能电站系统组成见图 1。

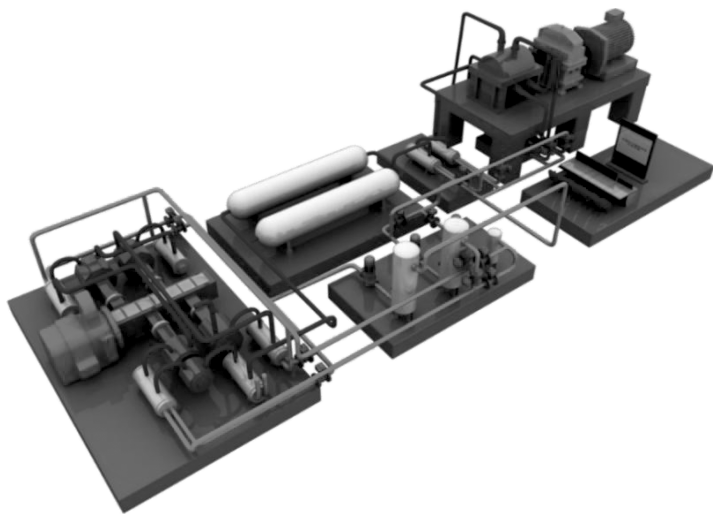


图 1 压缩空气储能电站系统组成图

1.4 压缩空气储能应用场景

除已经建成运行的大规模压缩空气储能系统外,近两年陆续立项开工多个 100~300 MW 的大规模压缩空气储能项目,其储能时长为 4~8 h。总体国内压缩空气储能不断向大规模、长时储能发展,其技术已走在世界前沿,未来压缩空气储能系统将会适用于多种不同的应用场景。

1.4.1 削峰填谷的应用

随着我国工业化发展,电网规模逐步增大,且发电类型多种多样,全天用电时间集中且相对较短,导致电网系统调度复杂性加大。压缩空气储能系统与抽水蓄能系统类似,可以在该时间段将多余电量吸纳,缓解电网用电高峰时的压力,同时该系统可以在供电设备出现事故的时候充当备用电源使用,上述已经建成的压缩空气储能系统均起到削峰填谷的作用。

1.4.2 各类新能源发电装置与压缩空气储能的耦合

我国地大物博,风、光资源丰富,十分适合大范围布置风力发电、光伏发电等新能源装置,但这

两类装置的发电时间无法人为控制,且风、光资源大多处于西北地区,当地电能消耗能力较低,网架有限,导致风、光等新能源产生的电能难以并网,所以会造成电能浪费,因此将压缩空气储能系统与新能源发电系统耦合成为研究热点之一。

孙晓霞等人建立绝热压缩空气储能系统,模拟系统充释能过程以获得系统的能量产出特性,研究了压缩空气储能—风/光耦合系统、压缩空气储能—生物质能耦合系统、压缩空气储能—氢能耦合系统、压缩空气储能—地热能耦合系统等,总结了各种耦合系统的工作原理、性能参数,为大规模压缩空气储能系统与可再生能源系统耦合提供了参考^[10]。李广阔等人以风储系统运行收益最大化为目标,建立了考虑压缩空气储能变工况特性的运行优化模型,采用一种分段线性化方法拟合风储系统变工况特性并设计优化运行策略^[11]。

1.4.3 传统火电厂耦合压缩空气储能

压缩空气储能系统与传统发电系统耦合,可以有效提升传统发电系统冷、热、电等联供系统能源利用效率,该耦合方式也是未来研究趋势之一。

赫广迅等人将压缩空气储能系统与630 MW煤电机组耦合进行调峰,机组调峰能力增加2.17%^[12]。田园沐雪将压缩空气储能系统与NGCC系统耦合,利用ebsilon软件模拟寻找最优耦合方案,结果表明,最佳耦合方案为一在储能阶段,抽取凝结水泵出口凝结水来吸收压缩热,再返回除氧器出口利用^[13]。

2 压缩空气储能天然的储气库—水电站地下洞室

基于水风光蓄储一体化新能源开发的基础上,压缩空气储能是“储”的最佳的方式,压缩空气储能以大规模、长时间、清洁无污染且寿命长、安全可靠的特点,在新能源风光规模较大的一体化开发模式中具有非常显著的优势。同时,水电站地下洞室作为人工内衬洞室,突破了地下储气库地理条件因素的限制,是建设大型地下储气库的理想空间,能够实现水电站地下洞室再利用。

新能源开发根据地方政策不同需按一定比例配置储能,而在水风光蓄储一体化开发模式中,由于新能源风、光规模较大,仅靠水电调节远远不够,而采用电化学储能则根据其使用次数的上限,在新能源运行周期中不仅需要更换更大的问题是大规模的废弃化学电池的处理。此外,水电同风电、光伏一样在一定程度上受气候的影响较大,特别是在丰水期与枯水期,其自身的调节能力有限,在大规模能源基地的开发中单一的抽蓄存在一定的不可控因素。而水电站地下洞室较多且地质条件较好,合理利用水电站地下洞室建设压缩空气储能项目即是对抽蓄的互补更有利于促进新能源的开发,提高整体新能源开发的经济性与能源电力的品质。

2.1 水电站地下洞室资源分析

水电站建设大多位于两岸山体之间的峡谷中,左右岸地势陡峭,而水电站设备安置在地下,因水电站装机较大,其地下施工建设工程量巨大。一般小型到大型水电站其地下施工、交通、引水及泄洪等隧道少则几十条多则上百条,因此每一个水电站都有相当富集的洞室群,而在水电站修建结束,投运之后其大量的隧道处于闲置状态,未被很好地利用起来。

据统计,全国大小型水电站约10万座,经过50多年的开发建设,单站装机规模在5万kW及

以上的大中型水电站有230余座,百万kW级以上的水电站有25座,50万kW以上的水电站有40余座^[14]。在这些大中型水电站中有上万条地质条件较好的洞室群,这些洞室群已经做过初步的支护、衬砌工作,是相对经济且便利的储气库资源。

2.2 水电站地下洞室地质条件分析

水电站建设初期对电站地质分析要求极高,在水电站建设中对地质结构、地层岩性、岩体风化、洞穴的发育层位等做了详细而准确分析,同时对各类岩体的物理力学参数进行相应的试验验证,明确隧洞上覆岩土层类型、厚度和岩体应力状态及岩土体的含水特性和渗透性等,并对各隧洞的围岩稳定性、围岩硬度及岩体完整度等做分析,这一系列地质分析工作在利用水电站地下洞室作为储气库的应用中可参考,降低了地质分析的投入与工作时间^[15-16]。

根据水电站《水利水电工程地质勘察规范》(GB 50487-2008)要求,围岩等级初步分类见表1。

根据水电站围岩等级分类,了解到水电站绝大部分洞室的围岩等级在Ⅲ类及以上,岩体较完整,地质条件较好,且洞室埋深在250 m以上的空间较大。而满足该条件的洞室都是作为压缩空气储能的优质储气库资源。

2.3 水电站地下洞室储气库库型设计分析

水电站地下洞室其断面设计一般包括圆拱直墙型、三心圆型、城门洞型以及圆型等,洞室断面面积较大,一般在13~170 m²,由于其断面较大在储气库改造时便于施工设计,因水电站地下洞室相对规则,因此对选定的储气库的投资相对较低且根据洞型特点设计相应的储气库形状可最大程度利用储气空间或降低投资,以三心圆型储气库为例设计其洞型改造方案。

图2为水电站地下洞室中典型的三心圆剖面图,从图中可知水电地下洞室以钢筋混凝土作为衬砌,具备良好的支护条件,中间夹层已做防水带,路面为水泥硬化路面。因此,再利用洞室时可从多方面考虑设计洞型的改造。

考虑到圆形断面在结构稳定性、受力均匀性及密封性等方面相对于其他形式的断面存在一定的优势,因此初步方案以圆形断面设计改造为主。

方案1在图2的基础上做内切圆改造,不开

表 1 围岩等级初步分类

围岩类别	岩质类型	岩体完整程度	岩体结构类型	围岩分类说明
I、II		完整	整体或巨厚层状结构	坚硬岩岩定 I 类, 中硬岩定 II 类
II、III		较完整	块状或次块状结构厚层或中厚层状结构、 层面结合牢固的薄层状结构	坚硬岩岩定 II 类, 中硬岩及薄层状定 III 类
II、III				
III、IV	硬质岩	完整性差	互层状结构	洞轴向与岩层走向夹角小于 30° 时定 IV 类
III、IV			薄层状结构	岩质均一且无软弱夹层时定 III 类
III			镶嵌结构	—
IV、V			碎裂结构	有地下水活动时定 IV 类
V		破碎	碎裂或碎块状散体结构	—
III、V	软质岩	完整	整体或巨厚层结构	较软岩定 III 类, 软岩定 IV 类
		较完整	块状或次块状结构 厚层、中厚层或互层状	较软岩定 IV 类, 软岩定 V 类
IV、V		完整性差	薄层状结构	较软岩无夹层时定 IV 类
		较破碎	碎裂结构	较软岩定 V 类
		破碎	碎裂或碎块状散体结构	—

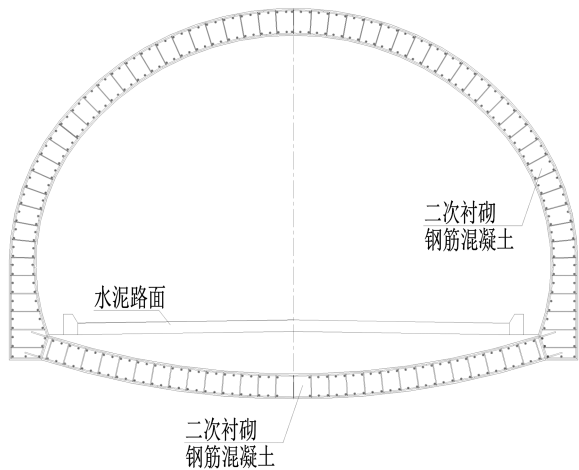


图 2 典型三心圆衬砌钢筋图剖面

挖水泥路面, 衬砌为圆形的储气库, 以洞室水泥路面与拱顶的距离为圆的直径; 从图 3 中可以看出, 该方案回填混凝土量大, 与原洞室相比, 衬后可利用断面面积小, 极大的降低了储气库容积, 不具备绝对的经济性。但是该方案易于实现储气库气密性设计以及施工。方案 1 储气库内切圆改造示意图见图 3

方案 2 在原来的钢筋混凝土衬砌的洞室内侧保留现有断面的边墙及顶拱不变, 开挖水泥路面至钢筋混凝土底板处, 以钢筋混凝土底板到拱顶内侧距离为直径形成圆形断面储气库, 方案 2 储气库内切圆改造示意图见图 4。该方案较方案 1 虽有所扩大有效容积, 但回填混凝土量仍较大, 衬后

可利用断面面积较小, 同时还需要开挖水泥路面, 需进一步计算增加的工程量与增加的有效容积的经济性。

方案 3 则是在原有洞型的基础上, 以现有断面的边墙及顶拱不变, 向下扩挖钢筋混凝土底板, 以路面向下直至形成圆形断面储气库, 方案 3 储气库内圆截面改造示意图见图 5。该方案回填混凝土量很小, 衬后可利用断面面积较大, 但开挖底板相对困难, 且开挖后破坏现有围岩及已有衬砌结构的稳定性, 需增加新的衬砌结构即增加相对较多的工程量与投资。

分析了方案 1~3 圆形断面的改造设计, 其不同的设计存在自身的优劣, 此外在方案 4 中则考虑在现有断面不变的情况下, 能否利用异形断面作为储气库的设计, 方案 4 储气库异形断面利用示意图见图 6。该方案设计为挖除水泥路面, 将边墙底角进行倒圆, 按照现有断面形状衬砌为三心圆断面, 并进行应力疲劳、密封及稳定性分析。该方案充分利用现有断面的衬砌支护, 回填量很小, 衬后可利用断面面积大, 相较于其他圆形断面的工程量小, 但该方案的力学性能与密封设计应用还在进一步研究与实验论证中。

通过对水电站地下洞室的改造分析, 可明确水电站地下洞室作为压缩空气储能的储气库具备竞争性优势, 且洞型改造可根据多方因素考虑, 如

储气库空间、投资、工程量等,设计改造灵活,可利用性强。

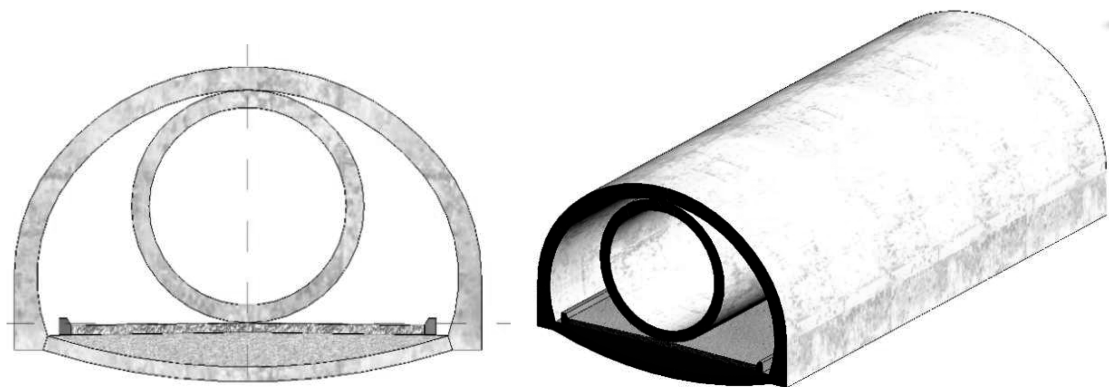


图3 方案1储气库内切圆改造示意图

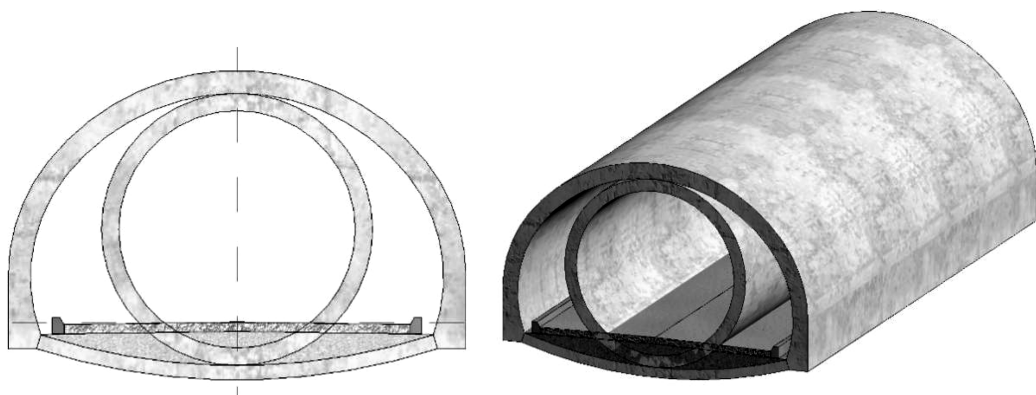


图4 方案2储气库内切圆改造示意图

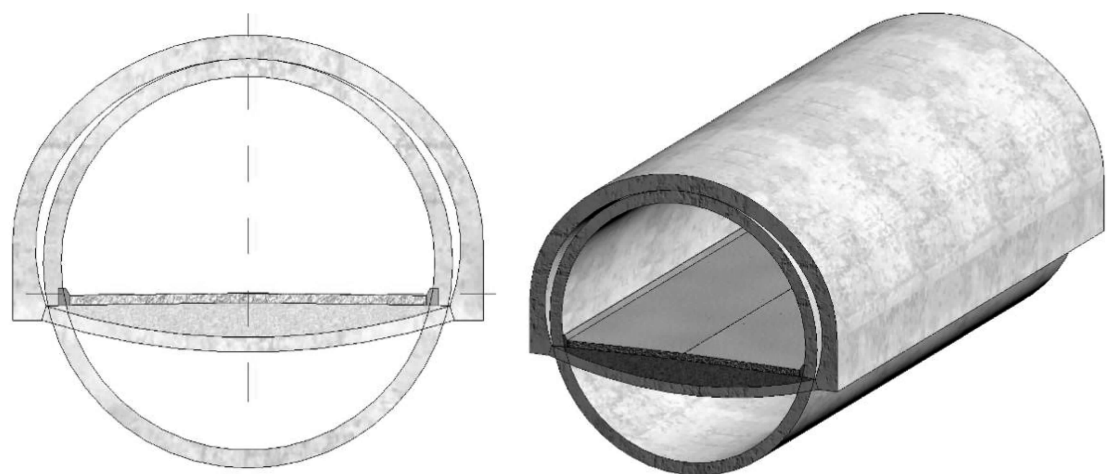


图5 方案3储气库内圆截面改造示意图

2.4 水电地下洞室储气库建设条件

压缩空气储能的储气库存储的高压空气,因此根据设计一般对岩体的承压能力要求较高。根据地质围岩及混凝土衬砌的承载能力研究,利用水电地下洞室作为储气库时,在满足储气库岩壁承压在6 MPa左右时,取1.05的安全裕度,根据

抗台准则式(1)计算,一般要求安全埋深不低于250 m的洞室具备修建地下储气库的初步条件。

$$H = \frac{pF}{\gamma_R \cos\alpha} \quad (1)$$

式中 H 为岩体最小覆盖厚度, m; p 为洞室气压, kPa; γ_R 为岩体重度, kN/m^3 ; α 为地面倾角; F

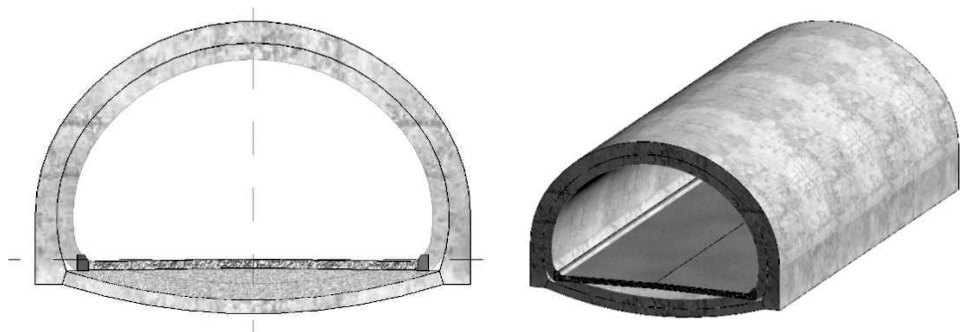


图 6 方案 4 储气库异形断面利用示意图

为经验系数,一般取值 1.05~1.10。

2.5 水电地下洞室储气库建设压缩空气储能的优劣势

水电站地下洞室群可利用空间多,且洞室地质条件较优,可规模化开发建设压缩空气储能项目,因水电站建设初期对洞室已完成衬砌和支护工作,其再利用改造成本相对较低。此外,利用水电地下洞室建设储能项目能较好地协同水电参与深度调峰调频,促进新能源消纳,推动水风光蓄储一体化开发,实现水电站地下闲置洞室再利用,既提高电站效益又增加新的收益。因此,利用水电地下洞室作为压缩空气储能的储气库具有一定优势。

但是,众所周知,水电站建设的地点一般处在深切峡谷之中,很难有大面积的平坦空地用于储能电站的地面设备布置。因此,利用水电地下洞室建设储能很大程度上受地面设备布置的限制。

3 结语

压缩空气储能在近两年频频推进,全国各地不断推出 100~300 MW 不等规模的压缩空气储能项目的工作计划,但部分项目因地质条件、应用场景、储气库改造及投资等原因并未完全开工建设。利用水电地下洞室建设压缩空气储能项目有应用场景、有地质条件较好的已建洞室,其投资造价很大程度上得到缩减,且实现闲置洞室再利用,是对资源的进一步整合,具有较好的发展空间,可在全国范围内推进水电站洞室群储能项目。但水电站储能的地面电站建设场地,有一定的局限性,同时水电洞室的埋深、储气空间断面设计以及密封材料等还需进一步研究突破。

参考文献:

[1] 国家发展改革委,国家能源局. 国家发展改革委 国家能源

局关于加快推动新型储能发展的指导意见[EB/OL]. [2021-07-15]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-07/24/content_5627088.htm.

- [2] 国家发展改革委,国家能源局. 国家发展改革委 国家能源局关于印发《“十四五”新型储能发展实施方案》的通知[EB/OL]. [2022-01-29]. https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202203/t20220321_1319773.html?code=&state=123.
- [3] ALFRED CAVALLO. Energy storage technologies for utility scale intermittent renewable energy systems[J]. Sol Energy Eng, 2001, 123(3): 1-3.
- [4] 梅生伟,张通,张学林,等. 非补燃压缩空气储能研究及工程实践——以金坛国家示范项目为例[J]. 实验技术与管理, 2022, 39(05): 1-8+14. DOI: 10.16791/j.cnki.sjg.2022.05.001.
- [5] 李季,黄恩和,范仁东,等. 压缩空气储能技术研究现状与展望[J]. 汽轮机技术, 2021, 63(02): 86-89+126.
- [6] AGYENIM F, HEWITT N, EAMES P, et al. A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHT-ESS) [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14(2): 615-628.
- [7] 杨科,张远,李雪梅,等. 先进绝热压缩空气储能系统的设计计算[J]. 工程热物理学报, 2012, 33(5): 725-728.
- [8] MCBRIDE T O, BELL A, BOLLINGER B R. Forming liquid sprays in compressed-gas energy storage systems for effective heat exchange: US, Patent 8,234,863[P]. 2012-08-07.
- [9] 郭丁彰,尹钊,周学志,等. 压缩空气储能系统储气装置研究现状与发展趋势[J]. 储能科学与技术, 2021, 10(05): 1486-1493. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0356.
- [10] 孙晓霞,桂中华,张新敬,等. 压缩空气储能与可再生能源耦合研究进展[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-20 [2023-06-04]. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.221437.
- [11] 李广阔,陈来军,谢毓广,等. 考虑压缩空气储能变工况特性的风储联合系统运行优化策略[J]. 高电压技术, 2020, 46(02): 511-518. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20200131015.

(下转第 35 页)

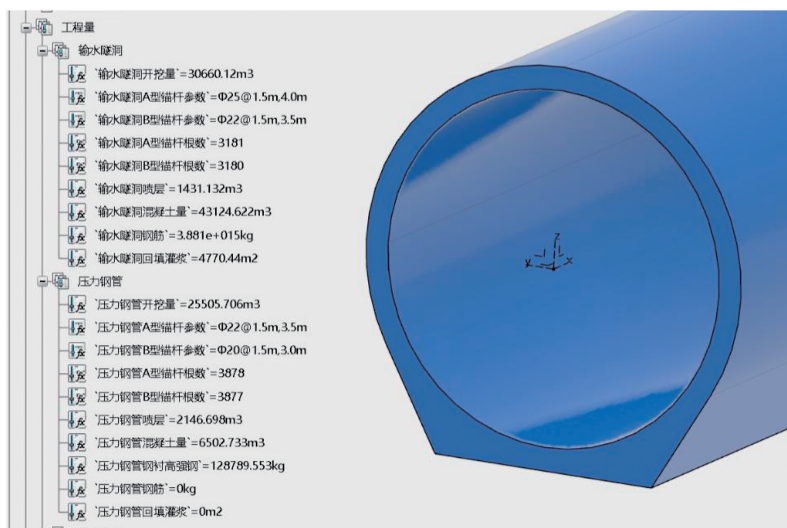


图 11 隧洞工程量

通过对抽水蓄能电站引水系统在预可研阶段设计要点进行归纳总结,结合 3DE 软件的特点,在满足设计要求的前提下,快速实现三维设计模型的生成和主要工程量的提取,相比单纯的把设计模型打包成块这种不考虑设计要点且不管逻辑关联的方式有了较大进步,也为 3DE 软件几何设计模块中增加 BIM 属性的方式提供参考意义。后期将按此思路进一步增加模型的适应性,比如增加平面拐点数量、增加立面层级、增加对调压井设置的智能判断等。

参考文献:

- [1] 水电水利规划设计总院 NB/T 10391—2020 水工隧洞设计规范[S].北京 国家能源局,2021,3~4.
- [2] 张春生,姜忠见.抽水蓄能电站设计[M].上册 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院,2012,333~334.
- [3] 水电水利规划设计总院 NB/T 35056—2015 水电站压力钢管设计规范[S]北京 国家能源局,2015,9~10.
- [4] 赫广迅,余海鹏,孙嘉.燃煤发电机组与压缩空气储能耦合热力系统分析及调峰特性研究[J].电站系统工程,2023,39(02):53-54.
- [5] 田园沐雪.压缩空气储能与燃气—蒸汽联合循环机组最佳耦合方案研究[J].电力科学与工程,2023,39(01):67-78.
- [6] 孟国涛,樊义林,江亚丽,等.白鹤滩水电站巨型地下洞室群关键岩石力学问题与工程对策研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(12):2549-2560. DOI:10.13722/j.cnki.jrme.2016.0791.
- [7] 王广德,石豫川,刘汉超,等.水利水电地下洞室围岩分类[J].水力发电学报,2006(02):123-127.
- [8] 向天兵.大型地下厂房洞室群施工工期动态反馈优化设计方法研究[D].中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究

- [4] 全国一级建造师执业资格考试用书编写委员会 水利水电工程管理与实务[M].中国建筑工业出版社,2021,83~84.
- [5] 张春生,姜忠见.抽水蓄能电站设计[J].上册 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院,2012,335~336.
- [6] 水电水利规划设计总院 NB/T 35056—2015 水电站压力钢管设计规范[S].北京 国家能源局,2015,58~59.
- [7] 张春生,姜忠见.抽水蓄能电站设计[J].上册 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院,2012,375~376.
- [8] 水电水利规划设计总院 NB/T 10391—2020 水工隧洞设计规范[S].北京 国家能源局,2021,20~21.

作者简介:

- 刘超(1980-),男,湖北襄阳人,高级工程师,工程硕士,从事水工结构设计;
- 陈伟(1976-),男,湖北十堰人,工程师,工学学士,从事水电项目工程管理;
- 祝靖(1975-),男,湖北荆门人,高级工程师,工学学士,从事工程造价专业。

(责任编辑:吴永红)

(上接第 28 页)

- [12] 赫广迅,余海鹏,孙嘉.燃煤发电机组与压缩空气储能耦合热力系统分析及调峰特性研究[J].电站系统工程,2023,39(02):53-54.
- [13] 田园沐雪.压缩空气储能与燃气—蒸汽联合循环机组最佳耦合方案研究[J].电力科学与工程,2023,39(01):67-78.
- [14] 孟国涛,樊义林,江亚丽,等.白鹤滩水电站巨型地下洞室群关键岩石力学问题与工程对策研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(12):2549-2560. DOI:10.13722/j.cnki.jrme.2016.0791.
- [15] 王广德,石豫川,刘汉超,等.水利水电地下洞室围岩分类[J].水力发电学报,2006(02):123-127.
- [16] 向天兵.大型地下厂房洞室群施工工期动态反馈优化设计方法研究[D].中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究

所),2010.

作者简介:

- 蒋志容(1993-),女,四川广元人,工程师,硕士,从事新型储能设计工作;
- 侯彦硕(1973-),男,四川乐山人,硕士,从事新能源业务管理工作;
- 丁平(1993-),女,重庆人,工程师,硕士,从事水风光蓄储一体化新能源规划工作;
- 刘亚轩(1997-),男,上海人,研究员,硕士,从事压缩空气储能系统优化研究;
- 邓科(1995-),男,四川内江人,工程师,硕士,从事新能源项目结构设计工作。

(责任编辑:吴永红)