

350MW 中温、高温绝热压缩空气储能系统设计研究

王雨萌 刘天奇

山东电力工程咨询院有限公司 山东省济南市 250013

摘 要: 压缩空气储能具备寿命长、储能的容量大、对环境无污染(运行过程没有任何化学反应)、选址灵活及安全性高(存储介质为不可燃的空气,运行不会发生爆炸)等显著优点。本文将利用 THERMOFLOW 软件对 350MW 级 CAES 系统进行建模,针对不同系统选定合适的各部件参数及热力系统流程,利用 THERMOFLOW 进行建模,对中温、高温 CAES 系统给出了设计方案,两种系统均按 $2 \times 50\%$ 方案进行运行:中温系统下按 5 级压缩,级间 2 台换热器换热(其中包括一台冷却器),压缩过程设置为四级压缩,每级后配置一台汽水换热器;高温系统下按 3 级压缩设定,前两级出口温度较高,设三个换热器(其中包括一台冷却器),最后一级只设冷却器,空气透平机设计为 2 级透平,级后均设 2 台换热器。并对不同释能时间下的此系统进行分析 and 对比,为日后压缩空气的研发和设计打下基础。

关键词: 先进绝热压缩空气储能; THERMOFLOW; 350MW 压缩空气储能

当前我国已成为全球碳排放总量最高的国家,电力生产及金属冶炼行业构成主要碳排放源,作为碳减排关键领域,电力系统亟需通过技术革新实现低碳转型^[1-2]。近几年来,由于双碳政策的实施,可再生能源极速发展,为完成二氧化碳的减少排放给予了重要的支撑^[3-4]。然而,此类能源固有的随机波动特性导致电网稳定性面临挑战,基于此环境之下,具有可观的储能容量及调节电网功能等优点的,CAES 成为破解新能源并网稳定性差难题的有效方案^[5-6, 11]。

压缩空气储能在原理上,是通过压缩自然环境中的空气,来实现能量的转变,具备储能容量大(百兆瓦级)、循环寿命长(30 年以上)、环境友好、选址灵活、安全性高以及使用寿命长等显著优势^[6-7,9]。

CAES 是压缩空气到高压参数,通过过程中的电能与势能的相互转化实现电力调蓄。近些年来,国内外的诸多学者,均针对此种储能的技术展开研究,同时实践也紧跟科研研究的步伐,截止目前,已经完成多座压缩空气储能系统的示范项目的建设,也是 CAES 由研究转至落地的重要步骤,也证明了此储能方式的可行性。我国 CAES 技术研发已进入工程化应用阶段,中科院合作下的:贵州毕节 10MW 及山东肥城 10MW,青海西宁 100kW 光储互补示范项,河北张家口 100MW、河北平顶山 100MW 均在规划建设或已建成。值得注意的是,当前已进入可行性研究阶段的规模化项目呈现显著集聚态势,包括肥城二期(300MW)、平顶山(200MW)、

泰安(300MW)等在内的六个百兆瓦级 CAES 项目均已完成前期论证,也证明着此技术正加速推进至商业化应用。

综合以上背景,本文将利用 THERMOFLOW 软件对 350MW 级 CAES 系统进行建模,建立热力系统的平衡,进行研究分析及对比,选用目前最为常用,研究最多,且效率较高的 AA-CAES 进行建模分析,对中、高温压储系统给出了设计方案及合适的系统流程,为日后压缩空气的研发和设计打下基础。

1. 系统模型

1.1 压缩空气储能系统

该系统的流程可总结至下方的四大功能模块:

压缩模块:采用了多级的压缩机实现空气逐步增压,通过每级压缩间的冷却器、换热器控制过程中的温度变化;

储热、换热的模块(高、低温储罐);

储气模块:依托盐穴构造或人工压力容器存储 5~12MPa 高压空气;

膨胀发电模块:高压空气经级间再热器加热后驱动多级透平膨胀做功,通过发电机可以实现电能输出。

1.2 压缩空气储能系统模型

本节对 CAEA 系统进行热力学特性的分析,首先对此系统的关键部件进行建模^[9]:

(1) 压缩机模块

压缩机实际耗功

$$w_c = \frac{1}{\eta_{cs}} \frac{k}{k-1} R_g T_i \left[\left(\frac{p_{i+1}}{p_i} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]$$

压缩机出口温度

$$T_{c,i+1} = T_{c,i} \left\{ 1 + \frac{1}{\eta_{cs}} \left[\left(\frac{p_{c,i+1}}{p_{c,i}} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \right\}$$

(2) 膨胀机模块

膨胀机对外实际做功

$$w_t = \frac{1}{\eta_{ri}} \frac{k}{k-1} R_g T_{t,i} \left[1 - \left(\frac{p_{t,i+1}}{p_{t,i}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]$$

膨胀机排气温度

$$T_{t,i+1} = T_{t,i} \left\{ 1 + \frac{1}{\eta_{ri}} \left[1 - \left(\frac{p_{t,i+1}}{p_{t,i}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \right\}$$

式中各符号含义如下表所示:

表 1 数学模型中符号含义

符号	含义	单位
w_c / w_t	压缩机耗功 / 膨胀机做功	MW
η_{cs} / η_{ri}	压缩机 / 膨胀机绝热效率	/
k	空气绝热系数	/
R_g	理想气体常数	J/(kg · K)
$T_{c,i} / T_{t,i}$	第 i 级压缩机 / 膨胀机入口空气温度	K
$p_{c,i} / p_{t,i}$	第 i 级压缩机 / 膨胀机入口空气压力	MPa

2. 中温压缩空气储罐系统参数

2.1 中温绝热压缩空气储能系统模型

350MW 压缩空气储能电站需要高压、大流量的压缩空气,考虑到现有空气压缩机的制造水平,需按 2×50% 方案进行研制,压缩机采用 5 级压缩,2 台机组串联;350MW 压缩空气储能站的空气流量大,对每级换热器的压损有严格要求,每级换热可以由 2 台换热器并联,增加一台冷却器;储能时间设置为 8 小时。释能阶段,释能压强设置为 150bar;空气透平机设计为 4 级透平,同时搭配 4 级换热器对其进行热量的交换,且在过程中存在些许压降,压缩空气侧压力较高,板式换热器的换热壁面难以承受大面积的高压差,本文选管壳式换热器。采用四级压缩机组,每级后配置换热器回收压缩而产生的热量,高温段热量储存于热水罐中,低温段释放至冷却塔中,实现热量按需调度。

换热器及冷却器具体参数设计如下:1#-4# 气水换热器空气流量为 323.00kg/s,入口温度为 172.9、189.4、189.6、

184.4℃;入口压力为 0.41、1.3、4.31、13.97MPa;水侧流量为 80.28、76.22、81.28、87.14kg/s;出口温度为 162.9、179.4、179.6、174.5℃。

压缩侧 1-4# 气水换热器冷却器空气侧入口压力 0.4、1.3、4.31、5.2、15.3MPa;空气侧流量为 323kg/s;水侧流量为 65.80、84.94、80.14、75.96、76.30kg/s;水侧入口压力 0.19、0.19、0.19、2.03、2.03MPa。

透平侧空气流量为 645.90kg/s;空气入口压力 15、4、1.2、0.36MPa;水侧流量为 169.60、160.60、156.60、155.80kg/s;入口温度均为 174℃,出口为 50、54、57.71、58.09℃。

2.2 高温绝热压缩空气储能系统模型

高温压储采用两套压缩机组并联的方案,需按 2×50% 方案进行研制,每套压缩机组由三台机组串联组成;储能时间设置为 8 小时,储能阶段各部件具体参数设计如下。

储能阶段压比逐级降低,分别为:12.635、8.42、1.659;排气压力分别为 12.635、94.51、150.4bar;空气流量均为 168.3kg/s,为保此系统稳定运行,排气压力逐步升高;在释能 4 小时下,空气每小时进气量为 168.3kg/s;本模型储气罐设为常压,保持 15MPa。

释能阶段压强同样设置为 150bar,空气透平机设计为 2 级透平,透平机间设置 4 级换热器换热,换热过程存在压降,压缩空气系统各部件具体参数设计如下。

膨胀比两级近似,均为 11-12 之间,分别为 11.9、12.24;排气压力各级为:12.52、1bar;膨胀机绝热效率设置为:0.83、0.86;膨胀机入口空气温度为 300℃。为释能时间达到 4 小时,空气流量为 673.2kg/s。:

在压缩过程中,前两级出口温度较高,为 340℃左右,为了充分利用压缩热,在换热器中分与熔盐、水进行梯级热量交换。熔盐和水吸热后分别储存在热熔融盐罐和热水罐内,前两级换热由 3 台换热器并联:与熔盐换热后空气温度降至 193℃左右,之后空气与水进行换热,温度降至 78℃;最后冷却后的空气进入最后一级压缩机,此级出口空气温度较低,可直接采用循环水冷却,温度降至 40℃排出。

释能过程中,采用了中间再热的形式,利用储热装置加热透平的排气,高压空气先被热水加热至 156℃,再由热熔融盐加热至 300℃,推动透平膨胀做功,从而带动发电机产生电能。换热器、冷却器具体参数设计如下。

压缩侧按 1# 压缩机气熔盐换热器、1# 压缩机气水换热

器、1# 压缩机冷却器、2# 压缩机气熔盐换热器、2# 压缩机气水换热器、2# 压缩机冷却器、3# 压缩机冷却器此顺序表述参数：空气侧出口温度分别为 193、78、40、194、78、40、40℃；入口压力分别为 1.26、1.2、11.55、9.45、9.14、9.122、15Mpa；空气流量为 168.30kg/s；壳侧为熔盐或水，入口温度分别为 176、58、25.86、176、58、25.86、25.86℃；入口压力分别为 3.02、3、0.19、3.02、3.01、0.19、0.19；流量为 121.00、39.22、54.19、122.90、42.57、62.47、47.30kg/s。

透平膨胀侧按高压透平气水换热器、高压透平气熔盐换热器、低压透平气水换热器、低压透平气熔盐换热器顺序叙述：空气侧入口温度分别为 40、156、46.25、156℃；入口压力分别为 15、15、1.25、1.24Mpa；空气流量为 673.2kg/s；壳侧介质为水或熔盐，出口温度分别为 55、176、62.25、176℃；流量分别为：169.70、498.20、57.40、480.00kg/s。

3. 储能方案对比分析

首先，对高温压缩空气储能系统和高温压缩空气储能系统作对比，根据此模型计算结果，中温压缩空气储能（CAES）系统的电转化效率为 71.77%，而高温压缩空气储能系统（CAES）的电转化效率为 71.54%，两种储能形式效率相似。

3.1 压缩机对比：

由于实际操作中，压缩空气储能系统的压缩和膨胀时间是不固定的，本节按压缩膨胀时间不同分为不同方案：压八释四、压八释五、压八释六，参数差别见图 1，可以看到：随着释能时间变长，所需储能阶段空气量呈增长趋势；且高温系统所需空气量大于中温系统；随释能时间变长差距越小，说明释能时间越长，两个系统差距越小。

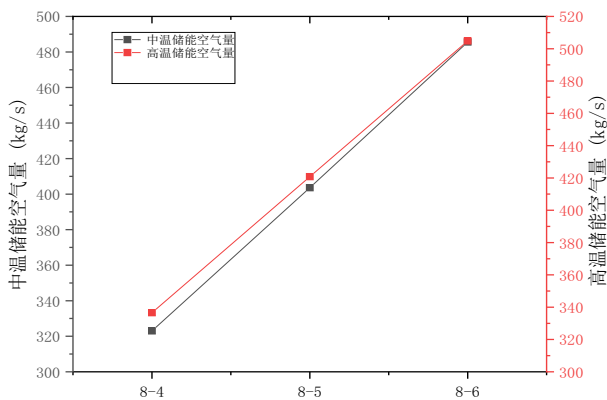


图 1 不同释能时间对两个系统的影响

3.2 透平机分析：

针对此文中建立的中温压缩空气系统模型为例进行分析，分析当透平机进口压力变化时，具体变化趋势如下：当压力为 140、130、120、110 bar 时，进口流量分别为：645.8、644.9、648.4、659.6kg/s；出口温度分别为：42.97、42.98、45.67、63.05℃。可以看出随着进口压力增加，流量及出口温度成降低趋势，也就是相同条件下高压等级的空气发电效率更高。

4. 结论

本文提出了中、高温 350MW 压缩空气储能模型的建立，针对不同的系统，选用不同的组件，设计不同的热力系统流程，得到了运行方案：

中温系统下按 $2 \times 50\%$ 方案进行运行，压缩机采用 5 级压缩；2 台换热器并联，增加一台冷却器；压缩过程为四级压缩，每级后配置一台换热器。

高温系统下按 $2 \times 50\%$ 方案进行运行，三台机组串联组成，前两级出口温度较高，设三个换热器；空气透平机设计为 2 级透平，没级后均设 2 台换热器。

同时对不同的热力过程和技术参数进行了分析，得出结论两种换热系统电转换效率相似，可以在可以就经济性进行选择。

参考文献：

- [1] 李晖, 刘栋, 姚丹阳. 面向碳达峰碳中和目标的我国电力系统发展研判 [J]. 中国电机工程学报, 2021,41(18): 6245-6259
- [2] 能源电力说生态环境部. 盘点：31 个省市“双碳”目标及规划 [EB/OL]. (2021-05-26).[2022-03-15]. <https://www.chndaqi.com/news/324001.html>.
- [3] Li Q. The view of technological innovation in coal industry under the vision of carbon neutralization [J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2021,8(6): 1197 - 1207.
- [4] 毛永清. 中国电力行业实现低碳化发展的途径与措施研究 [D]. 北京：华北电力大学, 2012
- [5] 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).[2022-03-15]. <http://zfxxgk.nea.gov.cn>.
- [6] 陈海生. “双碳”目标下的储能发展 [J]. 中国电力企业管理, 2021(22): 23-24

[7] 韩中合,周权,王营营,等.先进绝热压缩空气储能(AA-CAES)系统一种结构优化方案[J].太阳能学报,2016,37(03): 629-635

[8] X.D. Xue, S.X. Wang, X.L. Zhang, et al.Thermodynamic Analysis of a Novel Liquid Air Energy Storage System[J]. Physics Procedia, 2015,67(C): 733-738

[9] 李斌,陈吉玲,李晨昕,等.压缩空气储能系统与火发电机组的耦合方案研究[J].动力工程学报,2021,41(3):244-250

[10] 王雨萌.基于压缩空气储能的“光火储”一体化发电系统[D].保定:华北电力大学,2022

^[11] 郭欢.新型压缩空气储能系统性能研究[D].北京:中国科学院研究生院(工程热物理研究所),2013

作者简介:王雨萌,1997.11.22,女,汉,山东省济宁市,硕士,中级,研究方向:火电厂设计、压缩空气储能研究

刘天奇:1995.08.10,男,汉,山东沂水,硕士研究生,中级,火电厂设计、压缩空气储能研究