

# Characteristics Analysis of Compressed Air Energy Storage System Coupled with the Solar Energy

Danxi Liang<sup>1</sup>, Jie Song<sup>1</sup>, Liqiang Duan<sup>2\*</sup>, Hao Lu<sup>2</sup>, Kun Xie<sup>2</sup>, Jingkai Ma<sup>2</sup>, Zhipeng Lv<sup>2</sup>, Mingye Yuan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Global Energy Interconnection Research Institute, Beijing

<sup>2</sup>School of Energy Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing  
Email: \*dlq-1973@163.com

Received: Aug. 23<sup>rd</sup>, 2016; accepted: Sep. 11<sup>th</sup>, 2016; published: Sep. 14<sup>th</sup>, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## Abstract

The utilization of compressed air energy storage system can effectively recover the discarded solar energy and improve the power utilization rate of the power grid. At the same time, the compressed air energy storage system can solve the instability and intermittent problems of solar energy. So it is necessary to make a more reasonable use of solar energy on the base of the characteristics of compressed air energy storage system. This paper studies the thermal characteristics of the compressed air energy storage system integrated with the solar energy and the effects of the key parameters such as the inputted solar energy amount and turbine inlet pressure on the system performances of two kinds of operation situations with the constant stored air pressure and the constant stored air tank volume. The results show that the compressed air energy storage system under the operation situation with the constant stored air pressure has better performances than the compressed air energy storage system under the operation situation with the constant stored air tank volume.

## Keywords

Solar Energy, Compressed Air Energy Storage System, Thermal Characteristics

# 耦合太阳能的压缩空气储能系统特性分析

梁丹曦<sup>1</sup>, 宋洁<sup>1</sup>, 段立强<sup>2\*</sup>, 陆浩<sup>2</sup>, 谢坤<sup>2</sup>, 马敬凯<sup>2</sup>, 吕志鹏<sup>2</sup>, 袁明野<sup>2</sup>

\*通讯作者。

文章引用: 梁丹曦, 宋洁, 段立强, 陆浩, 谢坤, 马敬凯, 吕志鹏, 袁明野. 耦合太阳能的压缩空气储能系统特性分析[J]. 可持续能源, 2016, 6(4): 69-78. <http://dx.doi.org/10.12677/se.2016.64008>

<sup>1</sup>全球能源互联网研究院, 北京

<sup>2</sup>华北电力大学能源动力与机械工程学院, 北京

Email: \*dlq-1973@163.com

收稿日期: 2016年8月23日; 录用日期: 2016年9月11日; 发布日期: 2016年9月14日

## 摘要

利用压缩空气储能系统可有效消纳太阳能的废弃能量, 提高电网的电能利用率。同时, 压缩空气储能系统可解决太阳能自身的不稳定性和间歇性。所以有必要利用压缩空气储能系统的特点对太阳能热进行更合理的利用。本文针对耦合太阳能的压缩空气储能系统开展研究, 分析了系统的热力特性。研究了恒压和恒容两种运行条件下在不同太阳能输入热量、透平入口压力等关键参数变化时对系统性能影响规律, 结果表明, 恒压储气罐运行条件下系统具有更明显性能优势。

## 关键词

太阳能, 压缩空气储能系统, 热力特性

## 1. 引言

随着国民经济和社会经济的快速发展, 我国面临的能源短缺、环境恶化问题日益突出。因此, 大规模开发利用可再生能源与提高化石能源利用效率已成为能源行业发展的当务之急。众所周知, 太阳能是取之不尽、用之不竭的清洁可再生能源。目前, 国内外很多学者认为太阳能发电是解决未来能源问题的最有前景技术, 有可能成为中长期的主力能源, 在可再生能源开发利用中占重要地位[1]。

在太阳能发电技术中, 太阳能光伏发电技术相比于太阳能光热技术, 光伏发电技术日趋成熟, 已实现商业化。由于其电能难以储存, 太阳光的不稳定性对电网产生冲击。而太阳能光热发电技术由于其系统可储热、可调峰、可连续发电的优点, 成为国内外学者的研究重点[2]。虽然目前已经有太阳能槽式线聚焦光热发电系统实现了商业化, 独立太阳能热发电技术仍然存在不稳定性、间歇性、需要储热系统成本高等问题。因此, 可将太阳能与其它能源集合组成互补系统使得太阳能高效以及大规模应用, 如太阳能与传统燃煤电站互补系统、太阳能与燃气-蒸汽联合循环系统互补。将太阳能与大规模储能系统相结合是规模化发展太阳能的重要手段。

储能系统是通过一定介质将电能以某种能量形式储存起来, 在需要时将所存能量释放转化为电能。但由于功率等级、容量等级、储能周期、能量密度、寿命、环保等因素限制, 现如今只有抽水蓄能电站和压缩空气储能两种储能方式能实现大规模商业运行[3]-[5]。其中, 抽水蓄能电站技术发展成熟、效率高、容量等级大、储能周期长, 是目前应用最广泛的大规模储能系统。但抽水蓄能电站受到地理条件、建设周期、成本、安全等因素限制, 使抽水蓄能电站技术的开发与利用受到很大影响[6]。

压缩空气储能是抽水蓄能之外另一种投资风险小、成熟度比较高的大规模储能方式。在成本方面, 压缩空气储能与抽水蓄能都是最便宜的储能技术。在用地和用水方面, 压缩空气则非常环保, 在国外很受重视。对于储能系统来说, 抽水蓄能具备最长的寿命(50年), 大规模压缩空气和液态压缩空气储能的寿命一般为20~40年。大规模压缩空气储能电站的释能效率(已储存的压缩空气转换为电能的效率)一般为70%~79%; 小规模压缩空气储能的释能效率为75%~90%。目前投入运行的两座大型压缩空气储能电站的整体效率分别为42%(德国的Huntorf电站)和54%(美国的McIntosh电站), 采用先进绝热压缩空气

储能技术可将整体效率提高至 70% [7]-[11]。而随着可再生能源的大规模开发利用,需要在太阳能发电系统以及风能发电系统中安装储能装置。储能系统可调整机组出力,解决可再生能源自身的不稳定性、间歇性对电网的冲击问题。因此,本文基于太阳能与压缩空气储能系统的特性,在传统压缩空气储能系统的基础上提出一种耦合太阳能的压缩空气储能系统,并对其进行热力性能特性分析,研究了恒压和恒容两种运行条件下在不同太阳能输入热量、透平入口压力等关键参数变化时对系统性能影响规律。

## 2. 系统描述

### 2.1. 先进绝热压缩空气储能 AA-CAES 系统(基准系统)

先进绝热压缩空气储能系统(AA-CAES)是传统的空气压缩储能系统与储热蓄能的结合,去除了燃烧室,将空气压缩过程中的压缩热储存起来,在高压空气膨胀做功时对其进行加热,系统如图 1 所示。

理论上,将空气压缩至 10 MP,温度将达到 650℃ [12],因为系统没有燃烧室,为了达到要求的功率,压缩机需要更大的压比,同时为了使膨胀机进口温度不致过高,需要尽可能增大进气流量。由于充分利用了空气压缩时的压缩热,极大地提高了系统效率,随着对绝热压缩空气储能系统不断深入研究,目前先进绝热压缩空气储能系统效率已达到 70%。同时系统摆脱了对化石燃料的依赖,实现了绿色环保的要求。

### 2.2. 耦合太阳能的先进压缩空气储能系统(新系统)

空气在绝热压缩过程中,要消耗更多的压缩功,在一定程度上降低了储能系统的效率。所以通过存储外来热源代替燃烧室燃料的热量,可以进一步提高储能系统的效率。这种系统可以利用太阳能热,电力、化工等行业的余热以及生活废热作为储能系统的外来热源,具有广泛的适用性[13]。本文基于太阳能与压缩空气储能系统的特性,将太阳能热储存在压缩空气储能系统的储热装置中,构成耦合太阳能的先进压缩空气储能系统,系统流程如图 2 所示,在压缩空气进入涡轮机做功前加热压缩空气,驱动膨胀机做功。本系统既解决了太阳能不稳定和间歇性的问题,又为压缩空气储能系统提供了热量,提高了系统效率。

## 3. 系统热力特性分析

### 3.1. 系统热力学模拟

本文采用 ASPEN PLUS 软件对耦合太阳能的先进压缩空气系统进行模拟计算,模拟系统采用两级间冷压缩机、两级透平膨胀机,采用槽式太阳能集热蓄热系统,槽式太阳能使用导热油作为换热工质。ASPEN PLUS 软件提供了多种物性方法,本文模拟的工质均属于非极性体系的物质,可选用 PENG-ROB 物性方法。本文首先对 AA-CAES 基准恒压系统进行初步研究。系统初始参数及模拟结果(恒压)如表 1 和表 2 所示:压气机耗功 54.15 MW,透平输出功率 38.45 MW,计算出系统效率为 71.0%,与理论上 AA-CEAS 效率在 70% [7]-[9]左右相符合,表明本文采用的模拟方法和参考数据较为合理。

在耦合太阳能的压缩空气储能新系统中所用的槽式太阳能热发电系统由于其结构简单、温度及压力需求较低、技术风险低,因此较早的实现了大规模的商业化应用。目前槽式的聚光比在 10~100 的范围内,通常在 50 左右,而温度可达到 400℃左右。由于槽式太阳能集热系统采用导热油作为传热工质,所以系统工作温度在导热油工作温度的限制下不会超过 400℃。如位于美国加州 Mojave 沙漠地区的世界上最著名的商业化槽式太阳能电站 SEGS (Solar Electric Generating Systems)系列电站,其 SEGS I 电站的集热器出口温度为 307℃,SEGS II 电站的出口温度为 349℃ [14]。

压缩空气储能系统储气罐一般有两种工作状态:恒容工作状态和恒压工作状态。恒容工作状态,即

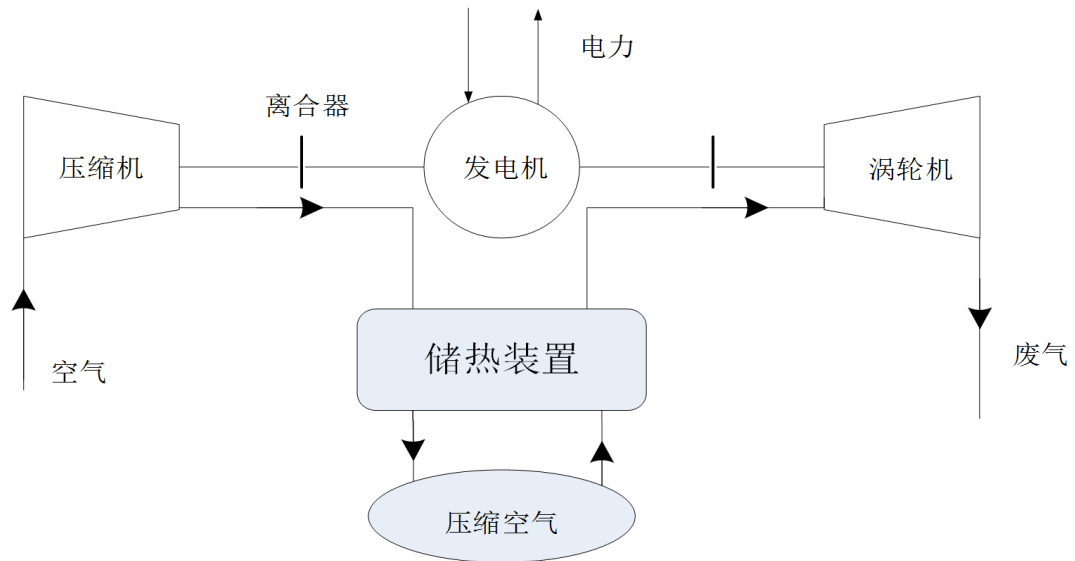


Figure 1. Flowchart of advanced adiabatic compressed air energy storage (AA-CAES) system

图 1. 先进绝热压缩空气储能系统流程图

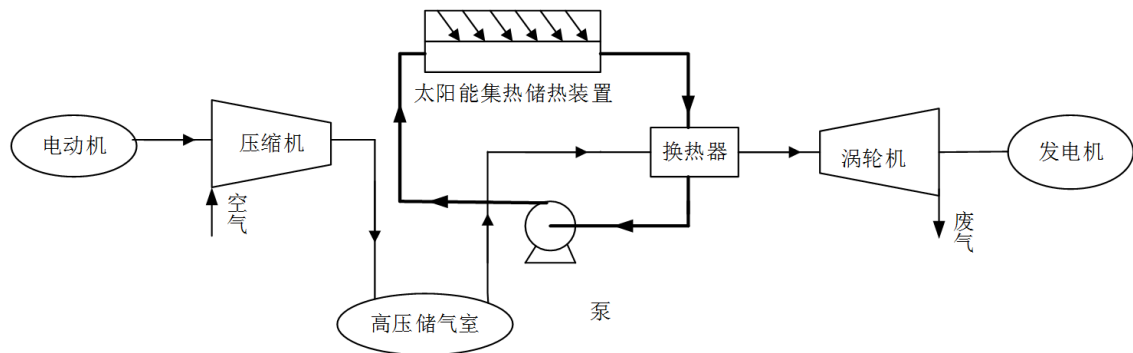


Figure 2. Flowchart of advanced compressed air energy storage system coupled with the solar energy

图 2. 耦合太阳能的先进压缩空气储能系统流程图

Table 1. The initial parameters of the base system

表 1. 基准系统初始参数

|           |                                        |
|-----------|----------------------------------------|
| 进口空气      | 15°C, 0.1 MPa, 100 kg/s                |
| 压缩机出口压力   | 5 MPa                                  |
| 管道压损      | 0.003 MPa                              |
| 储气罐       | 30°C, 5 MPa, 3600 m <sup>3</sup> , 2 h |
| 储气室排气压力   | 5 MPa                                  |
| 透平膨胀出口压力  | 0.1 MPa                                |
| 导热工质压力    | 1 MPa                                  |
| 换热器热端端差   | 6°C                                    |
| 空气压缩机等熵效率 | 0.84                                   |
| 透平等熵效率    | 0.85                                   |

**Table 2.** The simulation results of the base system  
**表 2.** 基准系统模拟结果

|                           |                     |
|---------------------------|---------------------|
| 低温热罐出口流量                  | 118.41 kg/s         |
| 高温热罐进口                    | 279.4℃, 118.41 kg/s |
| 高温热罐出口                    | 279.2℃, 118.41 kg/s |
| 低温热罐进口流量                  | 62.1℃, 115.75 kg/s  |
| 压缩机耗功                     | 54.15 MW            |
| 透平输出功率                    | 38.45 MW            |
| 透平出口温度                    | 77℃                 |
| 储能效率                      | 71.0%               |
| 储能密度(kWh/m <sup>3</sup> ) | 21.36               |

保持储气罐的体积不变, 储气罐释放压力不断变化, 然后通过节流阀控制透平进口压力; 恒压工作状态, 即储气罐释放空气压力恒定不变, 储气罐的体积发生变化, 这种储气装置尚处于研发阶段。本文对恒压和恒容这两种运行方式分别进行分析。

### 3.2. 储能系统的性能评价指标[15]

$$\eta_{en} = \frac{W_{out}}{W_{in} + Q_{solar}} \quad (1)$$

式中:  $\eta_{en}$  为基于热力学第一定律的系统效率;  $W_{out}$  为透平输出的总功;  $W_{in}$  为压气机的耗功;  $Q_{solar}$  为输入系统中的太阳能热量;

$$\eta_{es} = \frac{W_{out} - W_{solar}}{W_{in}} \quad (2)$$

$$W_{solar} = \frac{\eta_{solar} Q_{solar}}{\eta_{collector}} \quad (3)$$

式中:  $\eta_{es}$  为储能效率;  $W_{solar}$  为太阳能折算功, 即根据目前太阳能热发电技术水平, 将系统中利用的太阳能折算成太阳能所发出的电;  $\eta_{solar}$  为太阳能热发电效率;  $\eta_{collector}$  为太阳能集热效率;

$$ED = \frac{W_{out}}{V_s} \quad (4)$$

式中:  $ED$  为储能密度;  $V_s$  为储气罐容积。

### 3.3. 恒压储气罐运行条件下系统特性

影响系统的热力学性能参数主要有压气机和透平膨胀机的效率、透平进口压力和进口温度、高压储气罐压力、换热器的效能、压气机和透平膨胀机的级数等, 本文特性分析保持压气机的效率为 84%, 透平膨胀机效率为 85%, 及换热器的热端端差为 6℃不变, 并假定系统总散热损失为 5%, 系统总散热损失包括蓄热/换热单元和储气单元的散热损失, 系统散热损失对效率有较大影响。研究透平进口压力对储能特性的影响及耦合太阳能后的系统特性。

图 3 表示透平进口温度随储气罐压力(透平进口压力)和输入太阳能的热量变化情况, 表明: 随着储气罐压力的升高, 透平进口温度逐渐提高, 但提高的幅度逐渐趋于平缓。并且在一定的压力条件下, 太阳能热量输入越多, 透平进口温度越高, 基本呈现正比例的关系。

图 4 所示为系统效率随储气罐压力和太阳能热输入量变化的情况。当无太阳能热量输入时，即  $Q_{solar} = 0$ ，此时系统为 AA-CAES 绝热系统，系统效率随着压力的增大先逐渐增大，到 6 MPa 左右时达到最大，后逐渐趋于减小。这是由于当储气罐压力增大时，空气压缩机间冷换热热量也逐渐增加，系统回收的热量增加，但由于系统处于绝热状态，换热时热量的损失及部分热量储存在高温热罐中，使得透平进口温度增幅下降，导致透平的膨胀做功能力相对于压缩机耗功减小，从而系统效率下降。随着输入太阳能热量的增加，系统的效率逐渐降低，并且在压力较小时系统效率降幅比较大。这是因为太阳能的品位较低，当压力增大时，输入系统中低品位太阳能对系统效率的影响降低。

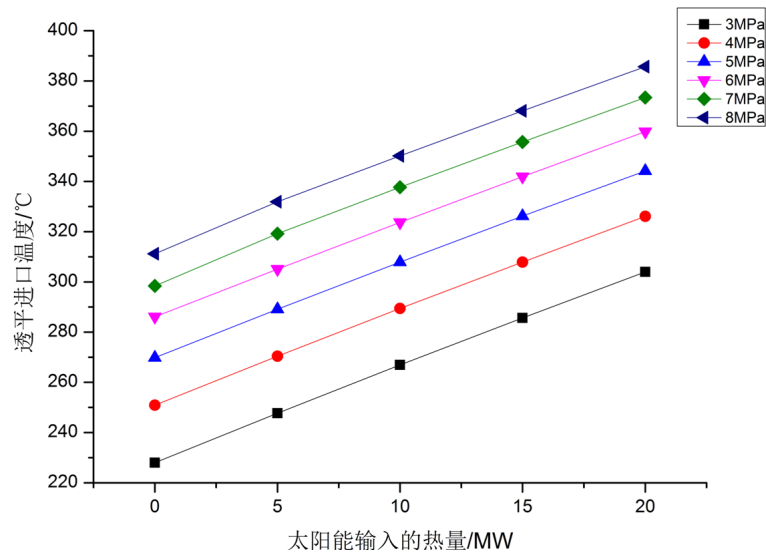


Figure 3. Effect of the inputted solar energy amount on turbine inlet temperature under different turbine inlet pressure

图 3. 太阳能输入热量与透平进口温度的变化关系

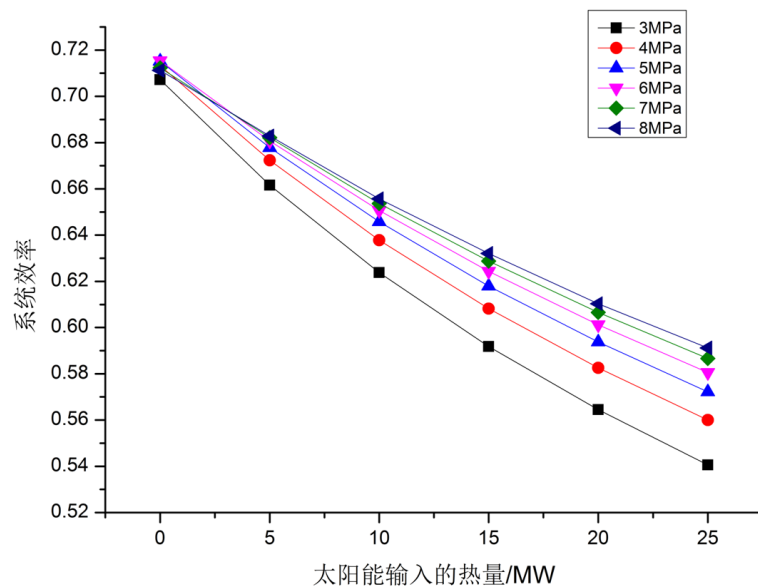


Figure 4. Effect of the inputted solar energy amount on the system thermal efficiency under different turbine inlet pressures

图 4. 太阳能输入热量与系统效率的变化关系



图 5 为系统储能效率随储气压力和太阳能输入量的变化曲线。计算中取太阳能的集热效率  $\eta_{collector}$  为 60%，热发电效率  $\eta_{solar}$  为 20% [15]。 $Q_{solar} = 0$  时，系统的储能效率即为系统效率。当储气罐处于一定压力时，系统储能效率随着太阳能输入量的增加而降低。当系统输入的太阳能较多时(大于 10 MPa)，储能效率随着储气罐压力的增大而增大，而输入的太阳能较少时，储能效率存在一个极大值。这是由于在公式(2)的储能效率定义中，太阳能是以折算功的形式计算，较少的太阳能输入热量对系统的储能效率影响不大，太阳能输入越低越接近 AA-CEAS 系统效率(绝热系统的储能效率与系统效率相等)。同样，储气罐处于高压时，太阳能输入对储能效率的影响也降低，导致储能效率增大不明显。

### 3.4. 恒容储气罐运行条件下系统特性

图 6 为在压气机出口压力(储气压力)为 10 MPa 的条件下，改变透平膨胀机的进口压力和太阳能的输入量，系统特性随之变化的曲线。恒容系统中，储气罐中空气压力不断变化，为了保证透平的正常运行，需要在储气罐出口安装节流阀以保证透平进口压力恒定。定义透平进口压力( $P_{s1}$ )与储气罐压力( $P_{s2}$ )之比为  $P_{s1}/P_{s2}$ ，节流时压气机出口压力不变所以耗功不变，压比对系统的影响如图 6 所示，透平做功能力随着压比的增大而增大。压比越大，透平进口压力越大，膨胀做功能力越强。

图 7 和图 8 分别表示透平进口压力节流到 3~9 MPa 时系统的热力特性，系统中设计的储气罐的压力保持 10 MPa 不变，当节流压力增加时，透平做功增加，在节流压力较小时，系统的损失了大量的压力能，对系统的储能效率和系统效率造成了较大的影响，尤其是系统效率，节流压力从 9 MPa 降低到 3 MPa 时，效率降低了将近 14% 的百分点。同时，随着太阳能输入量的增加，由于太阳能的品位低，系统效率随之降低。在节流压力较高时，太阳能的影响也降低，曲线也趋于平缓。

### 3.5. 恒压和恒容储气罐两种运行条件下特性比较

表 3 为恒压储气罐与恒容储气罐两种运行条件下的性能对比。可以看出：当压气机出口压力均是 10 MPa 时，太阳能输入热量相同时，恒容时的系统效率与储能效率均小于恒压时的情况，这主要是因为恒

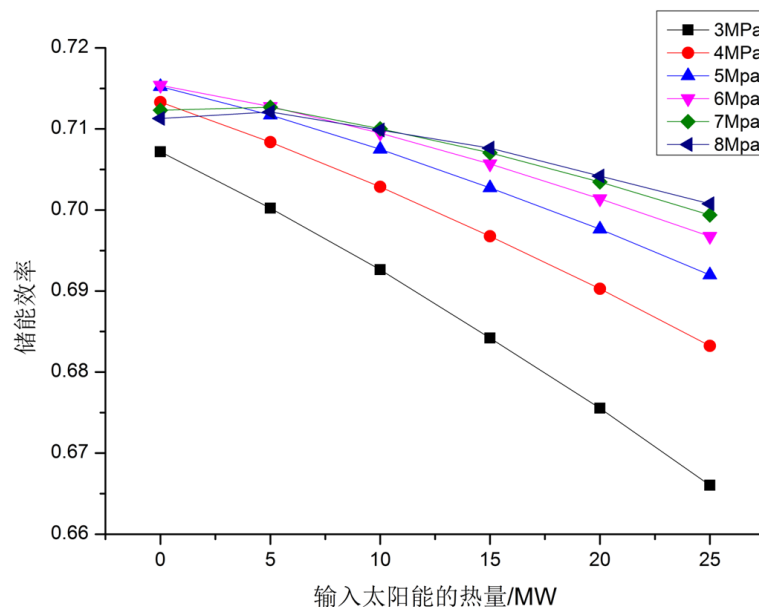


Figure 5. Effect of the inputted solar energy amount on the energy storage efficiency under different turbine inlet pressures

图 5. 太阳能输入热量与储能效率的变化关系

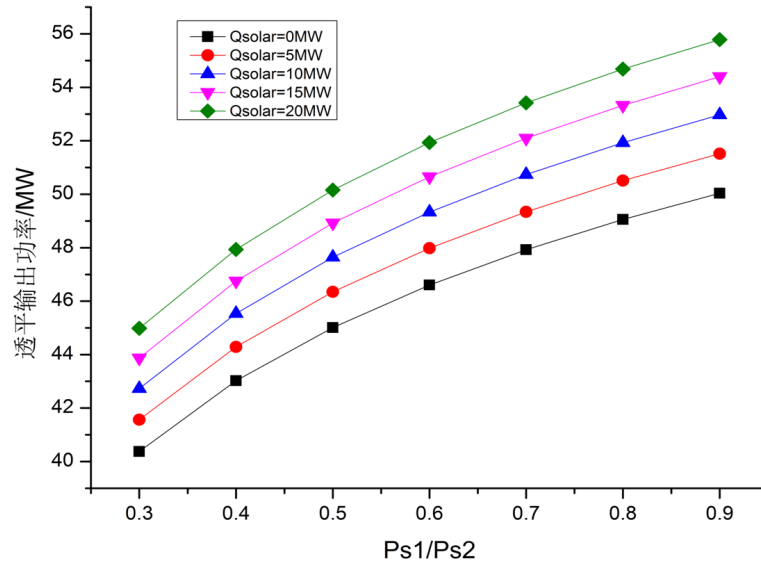


Figure 6. Effect of the ratio of Ps1 to Ps2 on the turbine output power under different inputted solar energy amounts

图 6. 透平输出功率与 Ps1/Ps2 的变化关系

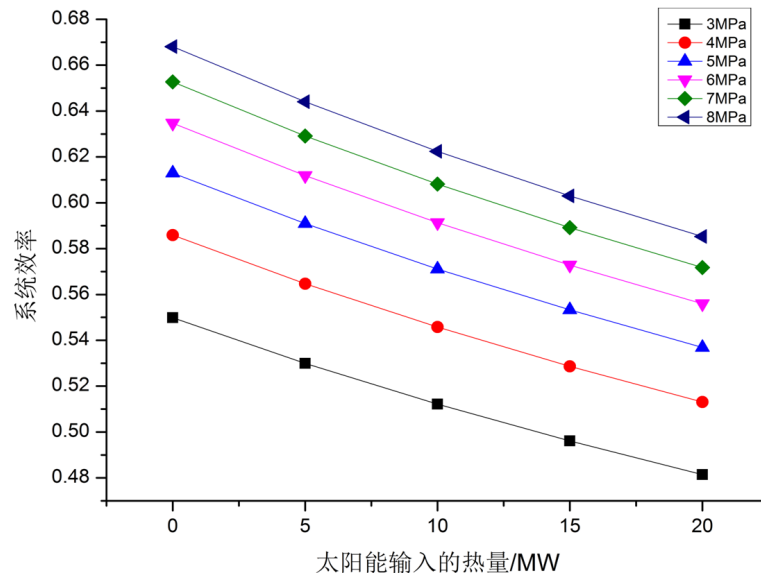


Figure 7. Effect of the inputted solar energy amount on the system thermal efficiency under different turbine inlet throttling pressures

图 7. 太阳能输入热量与系统效率的关系

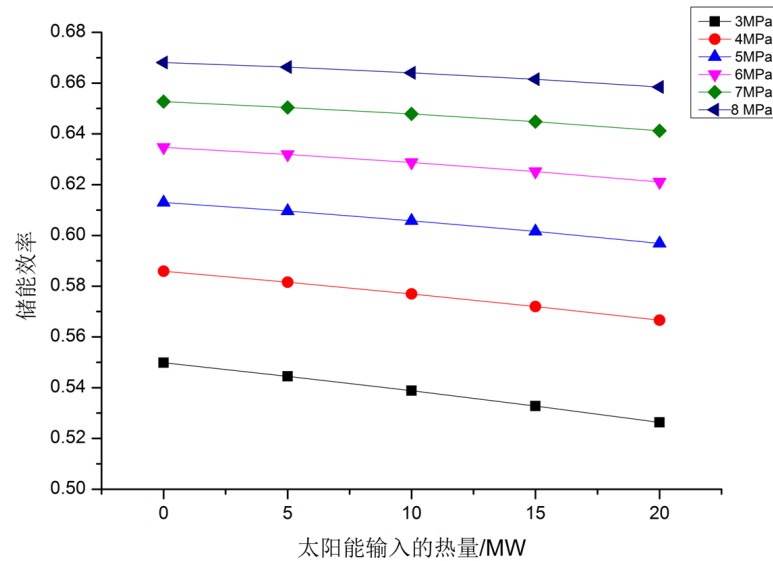
容时损失了大量的压力能。同样，表 3 中的储能效率均大于系统效率，这是由于在计算储能效率时，太阳能是以折算功的形式计算的。

#### 4. 结论

1) 本文利用压缩机级间排热、太阳能替代燃烧室燃料燃烧加热透平进气，提出了一种新型耦合太阳能的压缩空气储能系统，具有高效、环保等优点；

2) 依据不同的评价标准，研究了系统不同工况下的系统特性。在给定压气机等熵效率 84%，透平等熵效率 85% 的条件下，系统效率在 48%~72% 之间，储能效率在 52%~72% 之间；





**Figure 8.** Effect of the inputted solar energy amount on the energy storage efficiency under different turbine inlet throttling pressures

**图 8.** 太阳能输入热量与储能效率的变化关系

**Table 3.** The performances comparisons of the new system under two operation situations with the constant stored air pressure and the constant stored air tank volume

**表 3.** 恒压储气罐和恒容储气罐两种运行条件下系统特性比较

| 参数          | 恒压       | 恒容       | 恒容       | 恒压      | 恒容      | 恒容       |
|-------------|----------|----------|----------|---------|---------|----------|
| 压气机出口压力/MPa | 10       | 10       | 10       | 10      | 10      | 10       |
| 透平进口压力/MPa  | 10       | 3        | 9        | 10      | 3       | 9        |
| 太阳能热量输入/MW  | 10       | 10       | 10       | 20      | 20      | 20       |
| 透平进口温度/°C   | 399.7    | 399.7    | 399.7    | 434     | 434     | 434      |
| 透平输出功率/MW   | 53.903   | 42.7405  | 52.9815  | 56.772  | 44.9825 | 55.784   |
| 系统效率        | 0.646095 | 0.512335 | 0.635075 | 0.60762 | 0.48146 | 0.597075 |
| 储能效率        | 0.690935 | 0.538935 | 0.678395 | 0.68685 | 0.5263  | 0.673455 |

3) 在恒压储气罐运行条件下, 系统效率和储能效率均随着储气压力的增大而增大, 由系统效率和储能效率定义, 太阳能输入热量越多, 系统的效率和储能效率也越小, 但由于太阳能的品位较低, 输入太阳能热量越多, 能量损失越大。在恒容储气罐运行条件下系统的效率和储能效率均低于恒压式, 这是由于恒容式损失了较多的压力能的缘故。因此, 开发恒压式压缩空气储能系统具有更重要的意义。

## 基金项目

国家自然科学基金项目(No. 51576062)。

## 参考文献 (References)

- [1] 杜祥琬. 中国可再生能源发展战略研究丛书[M]. 综合卷. 北京: 中国电力出版社, 2008, 11-32.
- [2] 李琼慧. 太阳能光热发电发展现状与市场前景[J]. 电器工业, 2011(8): 28-31.
- [3] McLarnon, F.R. and Cairns, E.J. (1989) Energy Storage. *Annual Review of Energy*, **14**, 241-271. <http://dx.doi.org/10.1146/annurev.eg.14.110189.001325>

- [4] Chen, H., Cong, T.N., Yang, W., *et al.* (2009) Progress in Electrical Energy Storage System: A Critical Review. *Progress in Natural Science*, **19**, 291-312. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pnsc.2008.07.014>
- [5] Ribeiro, P.F., Johnson, B.K., Crow, M.L., *et al.* (2001) Energy Storage Systems for Advanced Power Applications. *Proceedings of the IEEE*, **89**, 1744-1756. <http://dx.doi.org/10.1109/5.975900>
- [6] Lund, P. and Paatero, J. (2006) Energy Storage Option for Improving Wind Power Quality. *Proceedings of the 3rd Nordic Wind Power Conference*, Espoo, 22-23 May 2006, 7 p.
- [7] Succar, S. and Williams, R.H. (2008) Compressed Air Energy Storage: Theory, Resources, and Applications for Wind Power. PEI, 1-81.
- [8] 张新敬, 陈海生, 刘金超等. 压缩空气储能技术研究进展[J]. 储能科学与技术, 2012, 1(1): 26-40.
- [9] Crotagino, F., Mohmeyer, K.U. and Scharf, R. (2001) Huntorf CAES: More than 20 Years of Successful Operation. *Spring 2001 Meeting*, Orlando, 15-18 April 2001, 6 p.
- [10] 张远, 杨科, 李雪梅, 徐建中. 先进绝热压缩空气蓄能的冷热电输出特性研究[J]. 热能动力工程, 2013, 8(2): 134-138.
- [11] 骆妮, 李建林. 储能技术在电力系统中的研究进展[J]. 电网与清洁能源, 2012, 28(2): 71-79.
- [12] Bullough, C., Gatzert, C., Jakiel, C., *et al.* (2004) Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage for the Integration of Wind Energy. *European Wind Energy Conference*, London, 22-25 November 2004, 8 p.
- [13] Ibrahim, H., Younès, R., Ilinca, A., *et al.* (2010) Study and Design of a Hybrid Wind-Diesel-Compressed Air Energy Storage System for Remote Areas. *Applied Energy*, **87**, 1749-1762. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.10.017>
- [14] 杨敏林, 杨晓西, 林汝谋等. 太阳能热发电技术与系统[J]. 热能动力工程, 2008, 23(3): 221-228.
- [15] 徐玉杰, 陈海生, 刘佳, 谭春青. 风光互补的压缩空气储能与发电一体化系统特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2012(20): 88-95.

**期刊投稿者将享受如下服务:**

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>