

DOI:10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.220772

# 先进绝热压缩空气储能多能流优化调度模型

徐卫君<sup>1</sup> 张伟<sup>2</sup> 胡宇涛<sup>3</sup> 尹俊杰<sup>4</sup> 王建华<sup>4</sup>

(1. 国网江苏省电力有限公司常州市金坛区供电分公司 常州 213164

2. 国网江苏省电力有限公司常州市供电分公司 常州 213164

3. 东南大学软件学院 苏州 215000 4. 东南大学电气工程学院 南京 210000)

**摘要** 先进绝热压缩空气储能(AA-CAES)是一种可实现大容量和长时间电能存储的电力储能系统,其储能的过程中会伴随产生额外的多种能流,若将运行中产生的额外能流收集起来,AA-CAES可作为微型综合能源系统进行使用。该文通过基于能源集线器(EH)构建通用能量交换分析模型,针对AA-CAES内部组件压缩机、透平机、换热器等部件进行模块化矩阵建模,分析其热力学特性和能流产生效率,研究AA-CAES的多能流联供调度策略。以最大化经济性运行为目标,提出了一种基于能源集线器矩阵化建模的AA-CAES多能流优化调度模型,并采用典型的压缩空气储能系统设备数据,进行仿真验证。仿真结果表明,AA-CAES作为微型综合能源系统具有较好的经济性,并且可以实现日常的热电联供,减少或降低其他供热系统的能耗,提高区域的能量利用效率。

**关键词:** 微型综合能源系统 先进绝热压缩空气储能(AA-CAES) 能源集线器(EH) 矩阵化 多能流

**中图分类号:** TM732

## Multi Energy Flow Optimal Scheduling Model of Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage

Xu Weijun<sup>1</sup> Zhang Wei<sup>2</sup> Hu Yutao<sup>3</sup> Yin Junjie<sup>4</sup> Wang Jianhua<sup>4</sup>

(1. Changzhou Jintan District Power Supply Branch State Grid Jiangsu Electric Power Co. Ltd  
Changzhou 213164 China

2. Changzhou Power Supply Company of State Grid Jiangsu Electric Power Co. Ltd  
Changzhou 213164 China

3. School of Software Southeast University Suzhou 215000 China

4. School of Electrical Engineering Southeast University Nanjing 210000 China)

**Abstract** Advanced adiabatic compressed air energy storage(AA-CAES) is an electric energy storage system that can realize large capacity and long-time electric energy storage. In the process of energy storage, it will produce additional energy flows, which can be used as a micro integrated energy system. This paper constructs a general energy exchange analysis model based on the energy hub(EH), carries out modular matrix modeling for the internal components of AA-CAES, such as compressor, turbine and heat exchanger, and analyzes its thermodynamic characteristics and energy flow generation efficiency to study the multi energy flow supply scheduling strategy of AA-CAES. Finally, for the purpose of maximizing economical operation, an AA-CAES multi-energy flow optimization scheduling model based on energy hub matrix modeling is proposed, and the typical compressed air energy storage

system equipment data is used for simulation verification. The simulation results show that AA-CAES as a micro integrated energy system has good economy, and can realize daily cogeneration, reduce the energy consumption of other heating systems, and improve the regional energy utilization efficiency.

**Keywords:** Micro integrated energy system, advanced adiabatic compressed air energy storage (AA-CAES), energy hub (EH), matrix, multi energy flow

## 0 引言

随着化石能源枯竭和环境污染问题的日益严重,大力发展分布式可再生能源,提高综合能源利用效率,已成为各国政府、企业和民众的共识<sup>[1-2]</sup>。我国目前已经开始大力发展清洁能源,由于风电、光伏等新能源发电具有波动性、不确定性,其大规模并网将对电网的安全和稳定运行产生冲击<sup>[3]</sup>。而储能装置由于具有对功率和能量的时间迁移能力,其应用可以使原本刚性连接的电力系统呈现柔性,从而为大规模风电、光伏等新能源发电并网问题的解决,提供技术解决方案<sup>[4]</sup>。其中先进绝热压缩空气储能(Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage, AA-CAES),由于存储量大、转换效率高,具有良好的应用前景,近些年来受到国内外学者的广泛关注,被认为是当今具发展潜力的大规模储能技术之一<sup>[5]</sup>。AA-CAES 电站不但可为系统提供调峰、备用、无功调节等多类型辅助服务<sup>[6-8]</sup>,还有一项具有显著优势的特性——冷热电联供特性<sup>[9]</sup>,该特性可使 AA-CAES 作为微型综合能源系统使用,通过能量梯级利用和灵活的能源利用模式,实现对输入能源高达 90% 的一次能源利用率<sup>[10-11]</sup>。

综合能源系统的规划和运行是以各个能源网络的建模和分析为基础的<sup>[12]</sup>,为了对具有不同物理本质的能源系统进行统一规划调度,已有学者开展了大量研究。文献[13]建立了多能源网络支路层能量流的统一数学方程,通过拉普拉斯变换和戴维南等值定理,将多能源网络在时域的复杂传输特性转换为拉普拉斯域简单的代数问题。文献[12]提出直观的统一能路方法论,并以天然气网络、热力网络为研究对象,推导了统一能路理论中的气路、水路与热路模型。这些研究和方法论对数学化研究综合能源系统提出了一定的指导意见。

国内外在综合能源系统矩阵化建模方面也有较为深入的研究。苏黎世联邦理工学院 P. Favre-Perrod 教授团队于 2005 年提出能源集线器(Energy Hub, EH)概念。EH 是一种用来表示不同能源载体输入、输出、转换、存储的多端口装置<sup>[14]</sup>,并于 2007 年首次提出通过耦合矩阵描述 EH 内部的能源分配和转

换关系<sup>[15]</sup>。EH 可以将电、热、冷等多种能源进行相互耦合并整合到一个微型综合能源系统中,通过对 EH 进行矩阵化建模,可以对微型综合能源系统的运行机理进行详细研究<sup>[16]</sup>。

目前国内外学者已经在 AA-CAES 多能流联供和优化调度方面开展了大量研究。文献[17]将 AA-CAES 与风电场相结合,研究在 AA-CAES 在变工状态下的运行特性,并给出一种混合整数线性规划模型来描述变工状态下的 AA-CAES;文献[18]通过对文献[19-21]的分析,提出一种考虑 AA-CAES 装置参与热电联供/供的微型综合能源系统优化运行策略,并通过经济性角度分析得出该优化调度模型可以削减微型综合能源系统的运行成本。

本文提出一种基于能源集线器矩阵化建模的压缩空气储能多能流优化调度模型。该模型通过矩阵化建模方式,对 AA-CAES 系统进行简化,通过建立分配矩阵和效率矩阵对各能流之间相互转换关系进行描述。最后从经济性的角度进行建模分析,提出基于 AA-CAES 的微型综合能源系统调度策略,充分发挥其在多能流联供方面的优越性能。

## 1 基于能源集线器概念的通用能量交换分析模型

能源集线器概念是苏黎世联邦理工学院 P. Favre-Perrod 教授团队,于 2005 年提出的一种描述不同能源载体输入、输出、转换的多端口装置。可基于能源集线器概念,提出一种通用能量交换分析模型,该模型对 AA-CAES 模型的多能流联供特性进行简化,弱化了 AA-CAES 内部的复杂变化,通过分配矩阵和效率矩阵对 AA-CAES 内部的能量转换进行描述。通用能量交换分析模型的耦合矩阵描述了能流从集线器的输入到输出的转换,元素可从集线器的转换器结构和转换器的效率特性中得出。该模型对电、气、热等各种能量流均可使用,适用的程度取决于所进行的研究类型。该模型由三个模块构成,分别为能量输入端、能量输出端和能量转换模块,如图 1 所示。

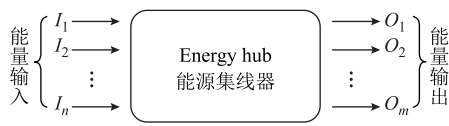


图1 通用能量交换分析模型

Fig.1 General energy exchange analysis model

通用能量交换分析模型的左端由多种初始能量输入  $I$  构成；能量  $I$  经过能源集线器内部转换后，变成多种能量  $O$  向外输出；在数学上通用能量交换分析模型可用映射函数进行表示，即

$$O = f(I) \tag{1}$$

式中，函数  $f(\cdot)$  可以考虑到各种形式能源的传输、转换、存储等环节。因此可以利用一个耦合矩阵描述输入-输出之间的关系，有

$$\begin{bmatrix} O_1 \\ O_2 \\ \vdots \\ O_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{m1} & c_{m2} & \cdots & c_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} \tag{2}$$

式中， $c_{mn}$  为耦合因子，表示第  $m$  种形式能源输出与第  $n$  种形式能源输入的比值。各种形式能源的输入到输出可以分为两个步骤：能源分配和能源传输或转换。能源分配是指各种能源以一定的比例分配到不同能源传输或转换设备。能源传输或转换是指能源输入到该设备后通过机械、化学等途径进行转换，具有一定的转换效率。所以可以将式(2)中的耦合矩阵进一步分解为

$$\begin{bmatrix} I'_1 \\ I'_2 \\ \vdots \\ I'_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{m1} & d_{m2} & \cdots & d_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} O_1 \\ O_2 \\ \vdots \\ O_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \eta_{11} & \eta_{12} & \cdots & \eta_{1k} \\ \eta_{21} & \eta_{22} & \cdots & \eta_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \eta_{m1} & \eta_{m2} & \cdots & \eta_{mk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I'_1 \\ I'_2 \\ \vdots \\ I'_k \end{bmatrix} \tag{3}$$

可以简记为

$$O = \eta NI = CI \tag{4}$$

式中， $d_{mn}$  为分配因子，表示第  $m$  种形式能源输入分配到用于转换为第  $n$  种形式能源的比例，对应符号为  $N$  的分配矩阵； $\eta_{mk}$  为效率因子，表示  $m$  种形式能源转换为第  $k$  种形式能源的效率，对应符号为  $\eta$  的效率矩阵。

## 2 基于能量集线器的 AA-CAES 的多能流架构

### 2.1 AA-CAES 系统内部矩阵化建模

基于 EH 的 AA-CAES 系统及内部元件示意图如图 2 所示。该系统由压缩系统、储气系统、透平系统和能流收集系统四部分构成。其中压缩系统和透平系统均由分段式压缩机和透平机组成，并采用“多级压缩、级间冷却”和“多级膨胀、级间再热”结构。系统的输入端由新能源发电产生的弃电和常温空气构成，分别记为  $I_c$ 、 $I_a$ ；系统输出端由机械能  $O_m$ 、电负荷  $O_e$ 、热负荷  $O_h$ 、冷负荷  $O_c$  四种能流构成，机械能从系统输出后会立刻进入发电机进行发电，发电机产生的电能会和 AA-CAES 系统输出的能流共同作用于外部的电负荷、冷负荷和热负荷。并且对于外部的负荷需求，基于 EH 的 AA-CAES 系统可以做到实时优化，当内部能源充足时，完全由 AA-CAES 接管外部的负荷需求，当不能完全响应外部负荷需求时，还可以通过引入其他地区的能源进行补充。

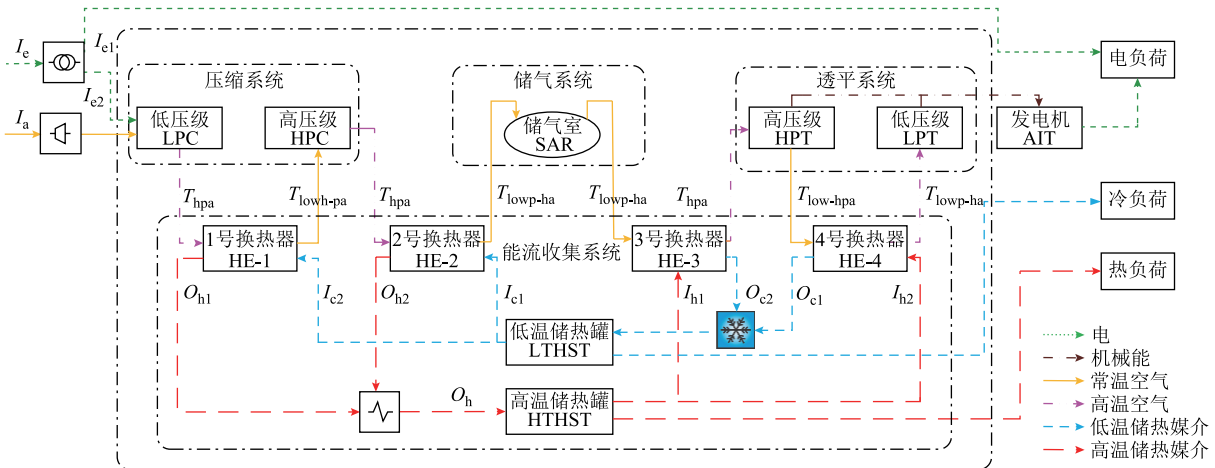


图2 基于EH的AA-CAES系统及内部元件示意图

Fig.2 AA-CAES system and its internal components base on EH

系统输入的电能  $I_e$  由新能源发电产生的弃风电、弃光电等弃电构成；空气  $I_a$  由环境常温常压空气构成。二者共同作为输入进入系统后，一部分电能直接用于外部的电负荷，电能传输过程中的损耗忽略不计，另一部分用于多级空气压缩机进行空气压缩，用矩阵表示描述为

$$I_e N_e = I_e \begin{bmatrix} d_{e1} \\ d_{e2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{e1} \\ I_{e2} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中，输入电能  $I_e$  经分配矩阵  $N_e$  作用后，被划分为  $I_{e1}$  和  $I_{e2}$  两部分； $d_{e1}$ 、 $d_{e2}$  为分配比例， $d_{e1} + d_{e2} = 1$ 。

$$I_{e2} N_e^{LPC} = I_{e2} \begin{bmatrix} d_{e1}^{LPC} \\ d_{e2}^{LPC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{e3} \\ I_{e4} \end{bmatrix} \quad (6)$$

电能  $I_{e2}$  会在多级压缩机中进行二次分配，将电能通过分配矩阵  $N_e^{LPC}$  按比例分配给低压压缩机  $I_{e3}$  和高压压缩机  $I_{e4}$ 。 $d_{e1}^{LPC}$  和  $d_{e2}^{LPC}$  为电能分配比例参数， $d_{e1}^{LPC} + d_{e2}^{LPC} = 1$ 。

电能  $I_{e3}$  和常温常压空气  $I_a$  进入低压压缩机进行空气压缩。在低压压缩机中电能一部分会转换为高压空气内能，另一部分会转换为热能，最终以高温高压气体的形式从低压压缩机的输出端流出，其内部转换流程如式 (7) 所示。

$$\begin{cases} I_{in}^{LPC} = \begin{bmatrix} I_{e3} \\ I_a \end{bmatrix} \\ I_{out}^{LPC} = I_{in}^{LPC} \eta^{LPC} = \begin{bmatrix} O_h \\ O_{pa} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (7)$$

式中，进入低压压缩机的常温常压空气  $I_a$  和电能  $I_{e3}$  经过效率矩阵  $\eta^{LPC}$  作用后，将电能转换为热能  $O_h$  和高压空气  $O_{pa}$ ，两者可用高温高压气体  $T_{hpa}$  进行表示。

高温高压气体  $T_{hpa}$  从低压压缩机输出端口流出后会立即进入一号换热器，在一号换热器中和低温储热罐  $I_c^{LTHST}$  分配来的冷能  $I_{c1}$  共同作用，将  $T_{hpa}$  所携带的热能从气体中换出，产生热能  $O_{h1}$  和较低温的高压气体  $T_{lowh-pa}$ ，其过程为

$$\begin{cases} I_{in}^{HE-1} = \begin{bmatrix} T_{hpa} \\ I_{c1} \end{bmatrix} \\ I_{out}^{HE-1} = I_{in}^{HE-1} \eta^{HE-1} = \begin{bmatrix} O_{h1} \\ T_{lowh-pa} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (8)$$

式中， $I_{in}^{HE-1}$  为一号换热器输入； $I_{out}^{HE-1}$  为一号换热器的输出。其中冷能  $I_c$  是低温储热罐经过分配矩阵

$N_c^{LTHST}$  分配而来，其过程如式 (9) 所示，分配后的冷能一部分流入一号换热器，一部分流入二号换热器。

$$I_c N_c^{LTHST} = I_c \begin{bmatrix} d_{c1}^{LTHST} \\ d_{c2}^{LTHST} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{c1} \\ I_{c2} \end{bmatrix} \quad (9)$$

从一号换热器输出端流出的较低温的高压气体  $T_{lowh-pa}$  会立即进入高压压缩机进行二次压缩，其过程为

$$\begin{cases} I_{in}^{HPC} = \begin{bmatrix} I_{e4} \\ T_{lowh-pa} \end{bmatrix} \\ I_{out}^{HPC} = I_{in}^{HPC} \eta^{HPC} = \begin{bmatrix} O_h \\ O_{pa} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (10)$$

高压压缩机的输入端  $I_{in}^{HPC}$  由  $I_{e2}$  经过二次分配的  $I_{e4}$  和较低温的高压气体  $T_{lowh-pa}$  构成，在高压压缩机内部，电能一部分转换为热能，另一部分继续转换为高压气体内能。输出端  $I_{out}^{HPC}$  由带高温的高压气体  $T_{hpa}$  构成，并随后立即流入二号换热器。

$$\begin{cases} I_{in}^{HE-2} = \begin{bmatrix} T_{hpa} \\ I_{c2} \end{bmatrix} \\ I_{out}^{HE-2} = I_{in}^{HE-2} \eta^{HE-2} = \begin{bmatrix} O_{h2} \\ T_{lowh-pa} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (11)$$

在二号换热器中，其输入端  $I_{in}^{HE-2}$  由高压压缩机中流出的高温高压气体  $T_{hpa}$  和从低温储热器中分配过来的冷能  $I_{c2}$  共同作用，通过能量交换将  $T_{hpa}$  携带的热能进行换出。随后从二号换热器的输出端口中流出热能  $O_{h2}$  和较低温的高压气体  $T_{lowh-pa}$ ， $T_{lowh-pa}$  会进入储气系统，在储气系统中忽略传输和存储过程中对高压气体的损耗，可得储气系统的输入矩阵  $I_{in}^{SAR}$ 、输出矩阵  $I_{out}^{SAR}$  为

$$I_{in}^{SAR} = I_{out}^{SAR} = T_{lowh-pa} \quad (12)$$

并且一号换热器和二号换热器在工作中所置换出的热量会被共同收集到高温储热器中进行存储。

$$I_{in}^{HTHST} = O_{h1} + O_{h2} \quad (13)$$

当需要将存储的高压气体转换为电力对外部进行供应时，需要将储气室中存储的较低温的高压气体进行释放和透平。为了获得更好的透平效果，需要采用“多级膨胀、级间加热”的透平模式。在进入高压透平机前，将较低温的高压气体  $T_{lowh-pa}$  流入换热器中进行加热，三号换热器的输入端  $I_{in}^{HE-3}$  由储气室中流出的较低温的高压气体  $T_{lowh-pa}$  和高温储热室

中流出的热能  $I_h$  构成。高温储热室  $I^{HTHST}$  输出的热能会经过分配矩阵  $N_c^{HTHST}$  分配为两部分热能，一部分流向三号换热器，另一部分流向四号换热器，其过程为

$$I_h N_c^{HTHST} = I_h \begin{bmatrix} d_{c1}^{HTHST} \\ d_{c2}^{HTHST} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{h1} \\ I_{h2} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\begin{cases} I_{in}^{HE-3} = \begin{bmatrix} T_{low-hpa} \\ I_{h1} \end{bmatrix} \\ I_{out}^{HE-3} = I_{in}^{HE-3} \eta^{HE-3} = \begin{bmatrix} O_{c1} \\ T_{hpa} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (15)$$

式(15)中，从高温储热器中分配来的热能  $I_{h1}$  和储气室中流出的较低温高压气体  $T_{low-hpa}$  共同作为输入端流入三号换热器。在三号换热器中，热能用于提高气体温度，产生高温高压气体  $T_{hpa}$  和冷能  $O_{c1}$ 。随后高温高压气体  $T_{hpa}$  流向高压透平机，冷能流向低温储热器进行存储。

$$\begin{cases} I_{in}^{HPT} = T_{hpa} \\ I_{out}^{HPT} = I_{in}^{HPT} \eta^{HPT} = \begin{bmatrix} O_{m1} \\ T_{low-hpa} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (16)$$

式中，三号换热器产生的高温高压气体  $T_{hpa}$  作为输入端流入高压透平机，在高压透平机内部，经过效率矩阵  $\eta^{HPT}$  的作用。气体内能将会被转换为机械能  $O_{m1}$  和低温低压气体  $T_{low-hpa}$ ，其中机械能  $O_{m1}$  将会和低压透平机工作产生的机械能  $O_{m2}$  共同作用于发电机进行发电。当高压透平机输出端流出低温低压气体  $T_{low-hpa}$  后，需要将其流入四号换热器进行最后一次加热。四号换热器和三号换热器同理，输入端由低温低压气体  $T_{low-hpa}$  和热能  $I_{h2}$  构成，在四号换热器中，低温低压气体  $T_{low-hpa}$  通过与高温储热室分配而来的热能  $I_{h2}$  进行换热，产生冷能  $O_{c2}$  和高温较低压气体  $T_{lowp-ha}$ ，其过程为

$$\begin{cases} I_{in}^{HE-4} = \begin{bmatrix} T_{low-hpa} \\ I_{h2} \end{bmatrix} \\ I_{out}^{HE-4} = I_{in}^{HE-4} \eta^{HE-4} = \begin{bmatrix} O_{c2} \\ T_{lowp-ha} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (17)$$

最后将高温较低压气体  $T_{lowp-ha}$  流入低压透平进行最后一次透平。在低压透平机中，将高温较低压气体  $T_{lowp-ha}$  的内能转换为机械能  $O_{m2}$  和较低温常压空气，该气体直接排入空气中，而机械能  $O_{m2}$  将会和

$O_{m1}$  一起流入发电机中进行发电。

$$\begin{cases} I_{in}^{ALT} = O_m = O_{m1} + O_{m2} \\ I_{out}^{ALT} = I_{in}^{ALT} \eta^{ALT} = O_{e1} \end{cases} \quad (18)$$

式中，发电机的输入端  $I_{in}^{ALT}$  由高压透平机和低压透平机产生的机械能  $O_{m1}$  和机械能  $O_{m2}$  构成，经过效率矩阵  $\eta^{ALT}$  的作用后产生电能  $O_{e1}$ 。

### 2.2 系统输入输出矩阵化建模

根据通用能量交换分析模型，输入端如式(19)所示，由弃电  $I_c$  和常温常压空气  $I_a$  构成。输出端如式(20)所示，由发电机产生的电能  $O_{e1}$  及压缩系统和透平系统产生的热能差值  $O_h$  和  $O_c$  构成。

$$I = \begin{bmatrix} I_c \\ I_a \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$O = \begin{bmatrix} O_e \\ O_h \\ O_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{e1} + O_{e1} \\ O_{h1} + O_{h2} - I_{h1} - I_{h2} \\ O_{c1} + O_{c2} - I_{c1} - I_{c2} \end{bmatrix} \quad (20)$$

整个系统分配矩阵为

$$I' = \begin{bmatrix} N_c & 0 \\ 0 & N_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_c \\ I_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{e1} & \vdots \\ & I_{e2} & \vdots \\ & & I_{e3} & \vdots \\ & & & I_{e4} & \vdots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ & & & & I_a \end{bmatrix} \quad (21)$$

由此可知，整个系统的电能输入  $P_{in}^E$  和输出  $P_{out}^E$  为

$$\begin{cases} P_{in}^E = I_c \\ P_{out}^E = I_{e1} + O_{e1} \end{cases} \quad (22)$$

系统对外供应的冷能  $P_{out}^C$  和热能  $P_{out}^H$  为

$$\begin{cases} P_{out}^H = O_{h1} + O_{h2} - I_{h1} - I_{h2} \\ P_{out}^C = O_{c1} + O_{c2} - I_{c1} - I_{c2} \end{cases} \quad (23)$$

### 2.3 系统组件热力学特性

在本系统中，将系统内部视为理想状态，换热器工作过程中的能量消耗忽略不计；储气系统的储气和放气的能量消耗忽略不计；低温储热器和高温储热器的能量损失不计。整个系统仅在压缩机处考虑外部供给能量消耗。

### 2.3.1 压缩机和透平机

文献[17]提出一种计算压缩机和透平机功-能转换关系公式, 即

$$T_{c,i}^{Out} = \frac{1}{\eta_{c,i}} T_{c,i}^{in} \left( \beta_{c,i}^{\frac{k-1}{k}} + \eta_{c,i} - 1 \right) \quad (24)$$

$$P_{c,i}^{out} = P_{c,i}^{in} \beta_{c,i} \quad (25)$$

式中,  $\eta_{c,i}$  为第  $i$  级压缩机的等熵效率;  $\beta_{c,i}$  为压缩机的压缩比;  $T_{c,i}^{in}$  和  $T_{c,i}^{Out}$  分别为进口和出口空气温度;  $P_{c,i}^{in}$  和  $P_{c,i}^{out}$  分别为第  $i$  级压缩机的进口和出口空气压力;  $k$  为空气绝热指数。

第  $i$  级压缩机压缩功率为

$$P_{c,i} = \dot{m}_c c_p^a (T_{c,i}^{out} - T_{c,i}^{in}) \quad (26)$$

式中,  $\dot{m}_c$  为空气质量流率;  $c_p^a$  为空气比定压热容, 一般假定为定值。相应地, 透平膨胀机亦存在类似的功-能转换关系。

### 2.3.2 换热器

文献中[17]提出一种换热器的功能转换关系公式。第  $i$  级换热器出口侧空气温度  $T_{c,HE,i}^{a,out}$  和载热介质温度  $T_{c,HE,i}^{HTF,out}$  分别为

$$T_{c,HE,i}^{a,out} = T_{c,HE,i}^{a,in} - \frac{\phi_{c,HE,i}}{c_p^a \dot{m}_c} \quad (27)$$

$$T_{c,HE,i}^{HTF,out} = T_{c,HE,i}^{HTF,in} + \frac{\phi_{c,HE,i}}{c_p^{HTF} \dot{m}_{c,i}^{HTF}} \quad (28)$$

式中,  $T_{c,HE,i}^{a,in}$  和  $T_{c,HE,i}^{HTF,in}$  分别为第  $i$  级换热器的空气入口温度和载热工质的入口温度;  $\phi_{c,HE,i}$  为第  $i$  级换热器部分负载运行时的换热功率;  $\dot{m}_{c,i}^{HTF}$  为第  $i$  级换热器载热工质的质量流率;  $c_p^{HTF}$  为载热工质比定压热容。

换热器换热功率  $\phi_{c,HE,i}$  为

$$\phi_{c,HE,i} = \delta_{c,i} C_{c,i}^{\min} (T_{c,HE,i}^{a,in} - T_{c,HE,i}^{HTF,in}) \quad (29)$$

式中,  $C_{c,i}^{\min}$  为换热器两侧载热流体最小热容,  $C_{c,i}^{\min} = \min(c_p^a \dot{m}_c, c_p^{HTF} \dot{m}_{c,i}^{HTF})$ ;  $\delta_{c,i}$  为换热器效能, 其计算方法视换热器类型而定, 本系统采用逆流换热器, 其换热效能满足

$$\delta_{c,i} = \frac{1 - \exp[-U_{c,i}(1 - C_{c,HE,i})]}{1 - C_{c,HE,i} \exp[-U_{c,i}(1 - C_{c,HE,i})]} \quad (30)$$

式中,  $U_{c,i}$  和  $C_{c,HE,i}$  分别为传热单元数和热容比。

### 2.4 优化目标与约束条件

优化目标: 对于一个典型的 AA-CAES 系统, 可以对外供应电能和热能, 通过在电价便宜时进行压缩储气, 将电能转换为气体内能, 在电价较高时进行透平发电, 将气体内能转换为电能, 并同时对外

供应系统内未消耗完的热能, 在满足用户负荷需求的情况下, 实现盈利最大化。

约束条件: ①每小时内各能源分配比例都在其合理的运行区间内动态调整, 但是满足总分配比例和为 1; ②压缩机和透平机仅在规定的功率范围内运行; ③转换效率和分配矩阵需要在合理的范围内变化; ④满足能源集线器内部能流转换的等式约束, 如式 (31) 所示。

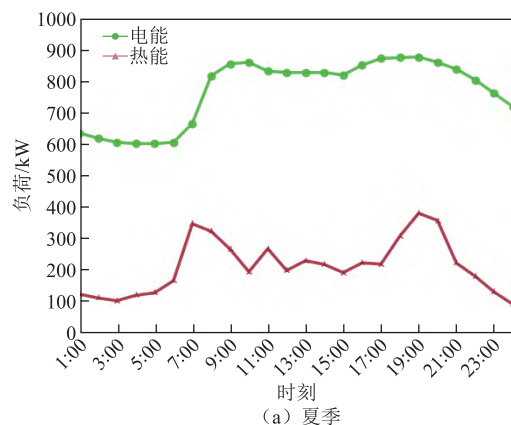
$$\begin{aligned} \max \quad & \pi = \sum S - c = \sum_{output} L\alpha - \sum_{input} P\beta \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} \sum d_m = 1 & \forall m \in \mathcal{M} \\ P_{\min} \leq P_i \leq P_{\max} & \forall i \\ \eta_{\min} \leq \eta_i \leq \eta_{\max} & \forall i \end{cases} \end{aligned} \quad (31)$$

式中,  $L$  为每小时对外售出能源的总功率;  $P$  为每小时系统内所消耗外界能源的总功率, 其中功率乘时间等于能量, 即  $Pt=E$ , 本文所考虑的时间间隔均为 1h;  $\alpha$  为 AA-CAES 向用户出售能源的单价;  $\beta$  为 AA-CAES 从其他电站购入能源的单价。

本文最小时间单位为 h, 系统和各个器件的运行情况每 1h 一变。式 (31) 表示每天的最大利润  $\pi$  等于每小时售出价格  $S$  减去成本  $c$ 。AA-CAES 系统中消耗的电能直接从其他电站购买, 且电能价格为分时电价。售出能源价格在市场平均电力价格的基础上随当天的情况进行波动。本文所提出的 AA-CAES 收益最大化电站运行方式算例为线性规划问题, 本文采用 Matlab-Yalmip 编写仿真项目进行验证。

## 3 AA-CAES 电站多能流矩阵化建模

本文基于常州某小区夏季和冬季典型电热负荷数据开展算例分析。因冷能的收集和 AA-CAES 电站的整体参数有关, 故在本文的算例分析中不考虑对外供应冷能。日前常州某小区夏季和冬季电热负荷预测曲线如图 3 所示。



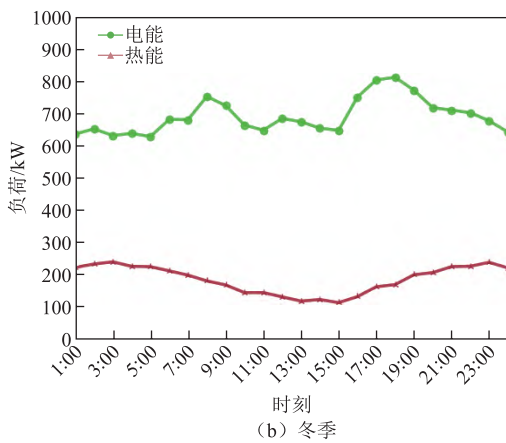


图3 常州某一小区夏季和冬季电热负荷预测曲线

Fig.3 Heating load forecasting curve of a residential area in Changzhou in summer and winter

一个典型压缩空气储能电站系统调度参数见表1<sup>[22]</sup>。

表1 AA-CAES 电站调度参数

Tab.1 Scheduling parameters of AA-CAES plant

参数	数值
最大(最小)压缩功率/kW	2 000 (800)
最大(最小)发电功率/kW	1 200 (480)
最大储热功率/kW	500
最大释热功率/kW	300
压缩机(膨胀机)级数	4
压缩机(膨胀机)效率(%)	85
换热器能效	0.7
系统额定工况电到电效率(%)	53
各级压缩机入口额定温度/K	312
各级膨胀机入口额定温度/K	363
环境温度/K	298
储气室内气压下限(上限)/MPa	4 (5.5)
储热器内储热量下限(上限)/(kW·h)	0 (12 000)
储气室体积/m <sup>3</sup>	7 200

本算例中的压缩空气储能电站的压缩机和透平机均采用两级压缩透平结构。电价采用分时电价,夏季和冬季销售价格 $\alpha$ 和购买价格 $\beta$ 见表2。在当前能源紧张的国际大背景下,购买价格和销售价格可能会随着多种因素产生波动。因此在算例分析中

表2 能源购入和售出单价

Tab.2 Unit price of energy purchased and sold

季节	(单位:元/(kW·h))			
	$\alpha_e$ 谷	$\alpha_h$ 峰	$\beta_e$ 谷	$\beta_h$ 峰
夏季	0.60	1.04	0.27	0.29
冬季	0.60	0.98	0.20	0.22

各个能源的价格每小时内随机波动 $\pm 5\%$ 。

### 3.1 压缩空气储能电站经济性结果分析

本文设置了三个场景对比和分析压缩空气储能多能流系统的经济效益。场景1, AA-CAES 在夜间 23:00~7:00 使用谷电进行充电,白天 8:00~16:00,按照用户实际电负荷对外进行透平供电;场景2, AA-CAES 电站在夜间 23:00~7:00 使用谷电进行充电,白天 10:00~14:00,按照用户实际需求对外进行供电供热;场景3,电站 24h 工作,仅在晚间 23:00~7:00 进行充电,白天在 9:00~16:00 进行透平,然后对外进行供电供热,其余时间直接购买其他电站的电力,按照用户实际负荷对外供电。本次仿真借助 Matlab-Yalmip 求解器对三种场景的运行情况进行求解,三种场景的计算结果均在 0.2s 内完成。三种场景夏季和冬季利润对比如图4所示。

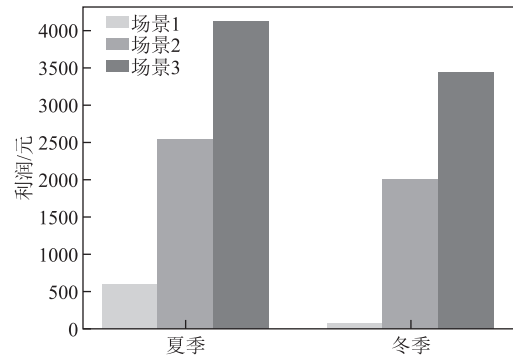


图4 三种场景夏季和冬季利润对比

Fig.4 Comparison of profits of three scenarios in summer and winter

可以看出随着对外供应能源的增加和供应时长的增加,其利润不断上升。场景1在冬季利润收益最低,因为冬季电力谷峰价格较夏季有所下降,并且冬季电力负荷小于夏季,以上结果导致场景1的利润在三种场景里最低。场景2夏季收益较冬季增长 22%,较同期场景1夏季利润增长 428%,利润收益的增长点主要来自于热能的对外供应。场景3,夏季利润收益较冬季增加 17%,小于场景2的收益上升程度,但是场景3较场景2利润增加了 162%,利润主要增长点来自于供电和供热时长的增加。

三种场景全年平均收益如图5所示。场景1由于仅出售电能,其平均年利润最低,在平均收益中购电成本占绝大部分,小型 AA-CAES 电站在仅靠电能差价进行获利方面不具有较大的经济性,日利润无法覆盖其建造成本。场景2在场景1的基础上额外出售热能,利润比例在收益的占比中大幅上升,热能的利润对冲了大量的购电成本,使得整体收益

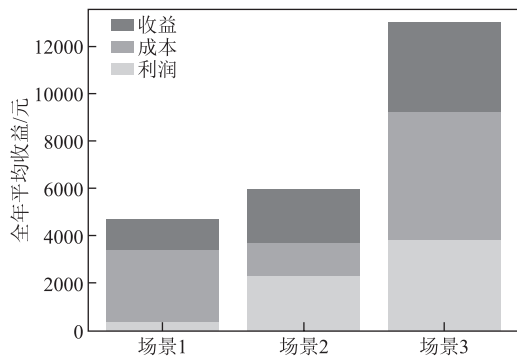


图 5 三种场景全年平均收益对比

Fig.5 Comparison of annual average income of three scenarios

上升。场景 3 中由于 AA-CAES 电站 24h 运行，其整体运行成本较前两种场景大幅度上升，利润有所增加，但较场景 2 的增幅比例不高，其原因是因为我国电价是具有惠民政策的，谷峰电价不具有较大差值，电力价格无法反映其商品属性，仅靠电能的产出和售卖差价无法获得高额利润。在本文设计的三种场景中，均未考虑冷能的出售，冷能由于温度的不同，所出售的价格也不同，但是在实际情况中，冷能的对外供应主要由透平机的出口空气温度产生。因此若 AA-CAES 系统旁拥有需要大量的冷能系统，那么 AA-CAES 系统的经济效益将进一步提升。

AA-CAES 电站一旦建成，可以持续运行 30~50 年，其成本主要由建设成本和运行成本两部分构成。在当今碳达峰、碳中和的背景下，政府出台了多项政策，助力新型储能装备发展，不但有银行提供的低息贷款，还有相关部门提供的资金补贴，可大大减少投资建设的压力。因此在本算例中不考虑建设成本，仅考虑 AA-CAES 电站的日常运行成本。对于 AA-CAES 电站来说，其日常运行成本主要由购电成本组成，其成本大小由实际运行中的利用率决定，每天充放电次数和运营时间越高，成本越低。AA-CAES 电站作为一个新型电力负荷储能装置，对于外部电负荷的需求是需要完全响应的。因此，日常运行成本包括夜间谷电充电的成本和白天为了满足外部电负荷所额外购买的电能成本，对于 AA-CAES 电站来说，对外供热并不是其主要用途。因此在本算例的三种场景中，仅对外供应充能过程中产生的热能，不额外购买其他热能对外供应，其余的热能负荷缺口由区域内其他设备提供。

在本仿真中，通过引入电力价格随机波动±5%的限制，可以更好地研究 AA-CAES 电站的年平均利润情况，在本仿真算例中每日价格波动情况如图 6 所示。

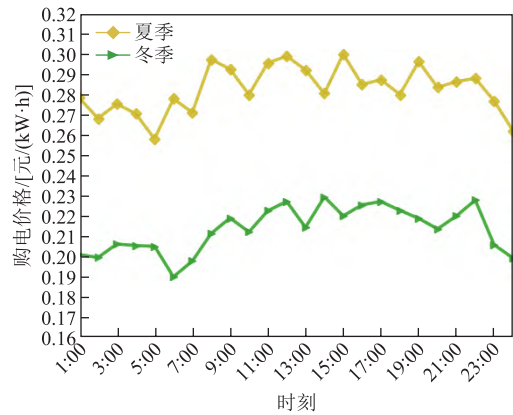


图 6 在随机波动 5% 的情况下夏季和冬季购电价格曲线

Fig.6 Summer and winter power purchase price curve with 5% fluctuation at any time

对于经济优化调度而言，购电价格与求解结果存在直接的影响。AA-CAES 电站的主要盈利点为电价的谷峰套利和热能的对外供应，本仿真部分的 AA-CAES 电站“电到电”效率为 53%，每购买 1kW 电能，实际仅能出售 0.53kW 电能，导致 1kW 电能的实际售价在价格不波动时仅为 0.318 元。在价格不波动情况下的谷峰套利区间如图 7 所示。由图 7 可知当谷电价格大于 0.318 元时，购电成本大于售电价格，AA-CAES 不再具有谷峰套利的利润点。

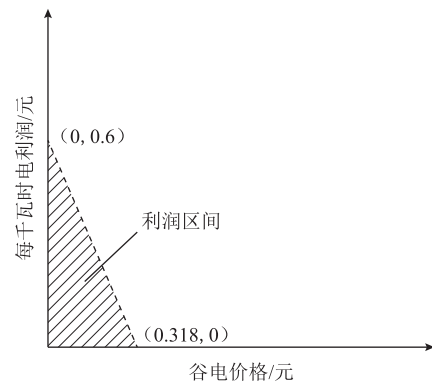


图 7 在价格不波动情况下的谷峰套利区间

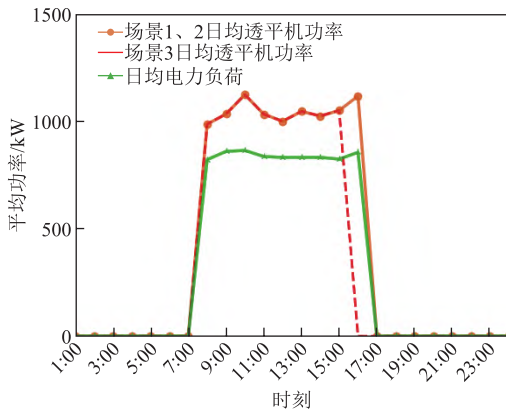
Fig.7 The valley-peak arbitrage range under the condition that the price does not fluctuate

### 3.2 内部运行情况结果分析

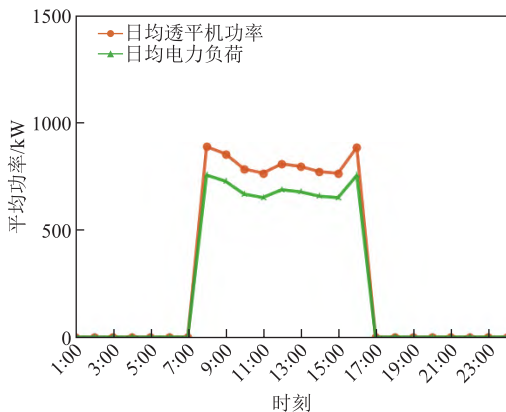
在本仿真所设计的三种场景中，AA-CAES 电站仅在电力负荷较高且波动较小的时间段，通过透平发电对外供应电能，其运行日均功率如图 8 所示。

在冬季，透平机功率曲线和实际电负荷曲线保持相同的变化关系，说明 AA-CAES 电站完全接管了外部电力负荷需求，并且稳定供应。但是在夏季时，场景 3 中透平机功率在下午 16:00 从运行高峰迅速下降，其原因在于高温储热罐中存储的热能已





(a) 夏季透平机时均发电功率



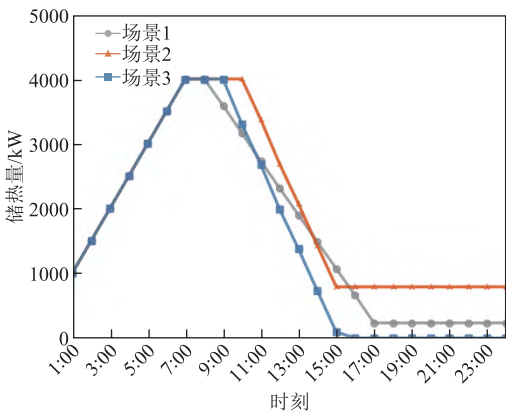
(b) 冬季透平机时均发电功率

图8 夏季和冬季透平机时均发电功率

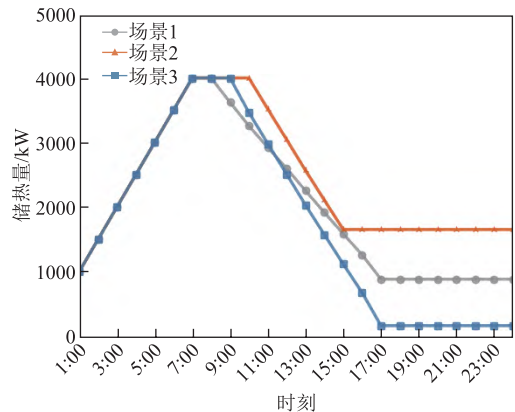
Fig.8 Hourly power generation of turbines in summer and winter

经消耗完，无法将储气室中的高压空气加热至透平机入气口所需温度，根据调度策略，AA-CAES 电站不再接管外部的电力负荷，改从电网直接购买电能对外进行供应，并且对于外部的热负荷，也停止供应，由区域内其他设备提供。

图9展示了冬季和夏季三种场景下，高温储热罐的24h内的余量变化关系。在夜间，高温储热罐的余量由于充电的关系逐步上升。进入白天后，高温储热罐容量根据季节和运行场景的不同，开始在



(a) 夏季日间高温储热罐余量曲线



(b) 冬季日间高温储热罐余量曲线

图9 夏季和冬季高温储热罐储热余量

Fig.9 Heat storage capacity of high temperature heat storage tank in summer and winter

不同时间段减少，由于 AA-CAES 电站仅在外部电力负荷需求稳定时参与供能，所以在日间供能阶段，其余量也按一定比例下降。在夏季场景3中，由于供能时间的延长，高温储热罐在下午 16:00 左右，储热罐存储的热能全部消耗殆尽。

图10展示了AA-CAES 电站从电网购买的电能情况，AA-CAES 电站在 23:00~ 7:00 以压缩机最大功率运行进行充电。在白天，根据运行策略，AA-CAES 电站仅在指定时间段对外供能，所以场景1和场景2仅在夜间消耗电能。由于透平发电需要消耗存储的高压空气和热能，所以场景3受高温储热罐中热能余量的影响，较另外两种场景额外从电网上购买了更多的电能，并且在透平机无法工作的时候，需要额外购买电能以满足对外部电负荷的供应。

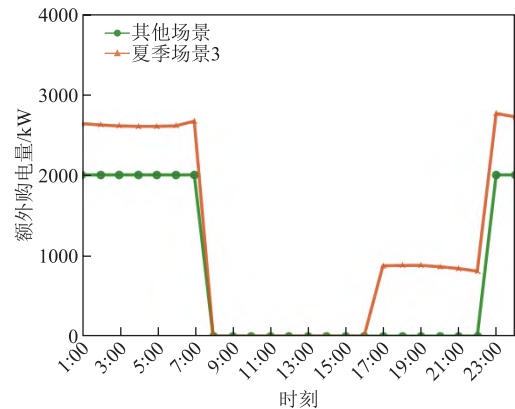


图10 夏季和冬季额外购电曲线

Fig.10 Summer and winter additional power purchase curves

### 3.3 环保能耗和经济性分析

AA-CAES 电站热能的收集仅在充电时段进行，受运行策略限制，AA-CAES 常在夜间谷电时进行充

能,以减少运行成本,但是在夜间外部并无大量的热负荷需求,所以充能所产生的热能仅可以被高温储热罐收集,受高温储热罐容量的影响,每小时最大仅可收集一定容量的热能,在本仿真中,高温储热罐每小时最大仅可收集 500kW 热能。因此在本次仿真的三种场景中,夜间充能共持续 8h,一共可产生 4 000kW 的热能。所需电费见表 3。

表 3 产生 4 000kW 热能所需电费

Tab.3 Electricity bill for generating 4 000kW thermal energy

季节	谷电价格/[元/(kW·h)]	运行时间/h	价格/元
夏季	0.27	8	4 320
冬季	0.22	8	3 200

两种典型化石能源的热值、价格和碳排放系数见表 4。在不考虑 AA-CAES 本身电能消耗和碳排放的情况下,在产生 4000kW 热能的情况下,所需要的化石燃料数据见表 5。

表 4 传统化石能源热值与碳排放系数

Tab.4 Calorific value and carbon emission of traditional fossil energy

化石能源	热值	碳排放系数	价格
煤	7 000kcal/kg	0.68	1.4 元/kg
天然气	9 000kcal/m <sup>3</sup>	0.90	2.89 元/m <sup>3</sup>

表 5 产生 4 000kW 热能所需消耗化石能源

Tab.5 Fossil fuel consumption required to generate 4 000kW of thermal energy

化石能源	消耗/kg	碳排放/kg	价格/元
煤	491.42	334.17	688
天然气	382.22	344	1 104.62

每日 AA-CAES 通过收集压缩过程所产生的热能并对外供应,可减少使用煤约 491kg,天然气约 382m<sup>3</sup>,每日减少碳排放约 340kg。每日减少了约 700~1 100 元的购热成本,每年可减少约 25 万~40 万元的供热成本,并且每日减少了约 0.34t 的碳排放量,年减少约 121.91t 碳排放。

## 4 结论

先进绝热压缩空气储能电站是一种新型的大规模储能装置,与抽水蓄能电站不同,先进绝热压缩空气储能电站不需要特殊的地理环境。其特点在于存储容量大,系统从 0 到满负荷启动迅速,不但可以用于电能存储,还可以对电网进行调峰调相;在

特定时间阶段,AA-CASE 还可以当作黑启动电源,增强电网运行的安全性。若将压缩空气储能电站在运行过程中所产生的额外能流收集起来,不但可以满足自身能量消耗,还可以对外进行稳定供应,提高能源利用率。本文基于 EH 概念提出压缩空气储能多能流系统模型。通过仿真算例表明:

1)AA-CAES 电站单纯的“电到电”效率较低,其经济效益主要靠电价谷峰价格和热能的供应获利,其中谷峰套利,受售出和购买的电能差价与系统“电到电”效率影响,提高系统“电到电”效率或者扩大售电和购电价格差,可增加电价方面的利润。对于热能的供应,需要增加系统内部对热能的收集,热能不但影响 AA-CAES 站的经济收益,还对 AA-CAES 站的正常运行有影响。

2)AA-CAES 具有热电联供的微型综合能源系统特性,通过调整运行方式,可实现日常的热电联供,减少或降低其他供热系统的能耗,提高区域的能量利用效率。

3)AA-CAES 电站建设在区域综合能源系统中,可大大减少为提供热能而消耗的化石燃料数量,有效降低区域内 CO<sub>2</sub> 的排放情况。

4)AA-CAES 主要优势在于对电网的削峰填谷,热能为 AA-CAES 储能、削峰填谷中的额外产物,若以热能供应为主要的利润点,其经济效益不如传统化石燃料经济。

## 参考文献

- [1] 徐青山,李淋,盛业宏,等.冷热电联供型多微网主动配电系统日前优化经济调度[J].电网技术,2018,42(6):1726-1735.  
Xu Qingshan, Li Lin, Sheng Yehong, et al. Day-ahead optimized economic dispatch of active distribution power system with combined cooling, heating and power-based microgrids[J]. Power System Technology, 2018, 42(6): 1726-1735.
- [2] 李勇,姚天宇,乔学博,等.基于联合时序场景和源网荷协同的分布式光伏与储能优化配置[J].电工技术学报,2022,37(13):3289-3303.  
Li Yong, Yao Tianyu, Qiao Xuebo, et al. Optimal configuration of distributed photovoltaic and energy storage system based on joint sequential scenario and source-network-load coordination[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(13): 3289-3303.

- [3] 赵冬梅, 王浩翔, 陶然. 计及风电-负荷不确定性的风-火-核-碳捕集多源协调优化调度[J]. 电工技术学报, 2022, 37(3): 707-718.  
Zhao Dongmei, Wang Haoxiang, Tao Ran. A multi-source coordinated optimal scheduling model considering wind-load uncertainty[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(3): 707-718.
- [4] 梅生伟, 薛小代, 陈来军. 压缩空气储能技术及其应用探讨[J]. 南方电网技术, 2016, 10(3): 11-15, 31, 3.  
Mei Shengwei, Xue Xiaodai, Chen Laijun. Discussion on compressed air energy storage technology and its application[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(3): 11-15, 31, 3.
- [5] Chen Laijun, Zheng Tianwen, Mei Shengwei, et al. Review and prospect of compressed air energy storage system[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2016, 4(4): 529-541.
- [6] Budt M, Wolf D, Span R, et al. A review on compressed air energy storage: basic principles, past milestones and recent developments[J]. Applied Energy, 2016, 170: 250-268.
- [7] 李姚旺, 苗世洪, 尹斌鑫, 等. 考虑先进绝热压缩空气储能电站备用特性的电力系统优化调度策略[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(18): 5392-5404.  
Li Yaowang, Miao Shihong, Yin Binxin, et al. Power system optimal scheduling strategy considering reserve characteristics of advanced adiabatic compressed air energy storage plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(18): 5392-5404.
- [8] Le H T, Santoso S. Operating compressed - air energy storage as dynamic reactive compensator for stabilising wind farms under grid fault conditions[J]. IET Renewable Power Generation, 2013, 7(6): 717-726.
- [9] 梅生伟, 李瑞, 陈来军, 等. 先进绝热压缩空气储能技术研究进展及展望[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(10): 2893-2907, 3140.  
Mei Shengwei, Li Rui, Chen Laijun, et al. An overview and outlook on advanced adiabatic compressed air energy storage technique[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(10): 2893-2907, 3140.
- [10] 金红光, 隋军, 徐聪, 等. 多能源互补的分布式冷热电联产系统理论与方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(12): 3150-3161.  
Jin Hongguang, Sui Jun, Xu Cong, et al. Research on theory and method of Muti-energy complementary distributed CCHP system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(12): 3150-3161.
- [11] 马丽叶, 张涛, 卢志刚, 等. 基于变权可拓云模型的区域综合能源系统综合评价[J]. 电工技术学报, 2022, 37(11): 2789-2799.  
Ma Liye, Zhang Tao, Lu Zhigang, et al. Comprehensive evaluation of regional integrated energy system based on variable weight extension cloud model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(11): 2789-2799.
- [12] 陈彬彬, 孙宏斌, 陈瑜玮, 等. 综合能源系统分析的统一能路理论(一): 气路[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(2): 436-444.  
Chen Binbin, Sun Hongbin, Chen Yuwei, et al. Energy circuit theory of integrated energy system analysis (I): gaseous circuit[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(2): 436-444.
- [13] 杨经纬, 张宁, 康重庆. 多能源网络的广义电路分析理论: (一)支路模型[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(9): 21-32.  
Yang Jingwei, Zhang Ning, Kang Chongqing. Analysis theory of generalized electric circuit for multi-energy networks—part one branch model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(9): 21-32.
- [14] Favre-Perrod P. A vision of future energy networks[C]//2005 IEEE Power Engineering Society Inaugural Conference and Exposition in Africa, Durban, South Africa, 2016: 13-17.
- [15] 高峰, 曾嵘, 屈鲁, 等. 能源互联网概念与特征辨识研究[J]. 中国电力, 2018, 51(8): 10-16.  
Gao Feng, Zeng Rong, Qu Lu, et al. Research on identification of concept and characteristics of energy Internet[J]. Electric Power, 2018, 51(8): 10-16.
- [16] 陈丽萍, 林晓明, 许苑, 等. 基于能源集线器的微能源网建模与多目标优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(6): 9-16.  
Chen Liping, Lin Xiaoming, Xu Yuan, et al. Modeling and multi-objective optimal dispatch of micro energy grid based on energy hub[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(6): 9-16.
- [17] 李瑞, 陈来军, 梅生伟, 等. 先进绝热压缩空气储

- 能变工况运行特性建模及风储协同分析[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(11): 25-33.
- Li Rui, Chen Lajun, Mei Shengwei, et al. Modelling the off-design operation characteristics of advanced adiabatic compressed air energy storage and cooperative analysis of hybrid wind power and energy storage system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(11): 25-33.
- [18] 蔡杰, 张世旭, 廖爽, 等. 考虑 AA-CAES 装置热电联储/供特性的微型综合能源系统优化运行策略[J]. 高电压技术, 2020, 46(2): 480-490.
- Cai Jie, Zhang Shixu, Liao Shuang, et al. Optimal operation strategy of micro-integrated energy system considering heat and power cogeneration characteristics of AA-CAES devices[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(2): 480-490.
- [19] Shafiee S, Zareipour H, Knight A M. Considering thermodynamic characteristics of a CAES facility in self-scheduling in energy and reserve markets[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(4): 3476-3485.
- [20] 李姚旺, 苗世洪, 罗星, 等. 含压缩空气储能电力系统日前 - 日内协调调度策略[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(10): 2849-2860, 3136.
- Li Yaowang, Miao Shihong, Luo Xing, et al. Day-ahead and intra-day time scales coordinative dispatch strategy of power system with compressed air energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(10): 2849-2860, 3136.
- [21] Shafiee S, Zareipour H, Knight A M, et al. Risk-constrained bidding and offering strategy for a merchant compressed air energy storage plant[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(2): 946-957.
- [22] 李姚旺, 苗世洪, 尹斌鑫, 等. 计及先进绝热压缩空气储能多能联供特性的微型综合能源系统优化调度模型[J]. 发电技术, 2020, 41(1): 41-49.
- Li Yaowang, Miao Shihong, Yin Binxin, et al. Optimal dispatch model for micro integrated energy system considering multi-carrier energy generation characteristic of advanced adiabatic compressed air energy storage[J]. Power Generation Technology, 2020, 41(1): 41-49.

---

#### 作者简介

徐卫君 男, 1981 年生, 高级工程师, 研究方向为储能和电网调度。

E-mail: 110408504@qq.com

王建华 男, 1982 年生, 副研究员, 研究生导师, 研究方向为电力电子化电力系统、电气化交通、储能、分布式发电与微网。

E-mail: wangjianhua@seu.edu.cn (通信作者)

(编辑 赫蕾)