



# 基于先进绝热压缩空气储能的区域综合能源系统优化策略

## 摘要

先进绝热压缩空气储能(AA-CAES)装置作为目前最具潜力的储能装置,能更好地促进区域综合能源系统对新能源的消纳、传统能源的高效利用并降低环境污染。本文建立了一种含先进绝热压缩空气储能装置的区域综合能源系统供能优化模型,分析了先进绝热压缩空气储能装置的储能特性以及区域综合能源系统的电功率平衡、热功率平衡和各类供能装置的运行约束。利用GAMS优化软件求解传统区域综合能源系统模型和本文所建立模型在日周期内的运行成本,从环保性和经济性两个方面进行比较,结果表明本文所建立的模型在降低成本、促进新能源消纳和节能减排方面是有效且可行的。

## 关键词

区域综合能源系统;先进绝热压缩空气储能;经济运行;多能互补;节能减排

中图分类号 TM743

文献标志码 A

收稿日期 2021-04-16

资助项目 国家自然科学基金(61833005)

作者简介

门家凯,男,硕士生,研究方向为新能源并网和综合能源系统规划. jiakai1011men@163.com

邱建龙(通信作者),男,博士,教授,研究方向为智能电网控制. qujianlong@lyu.edu.cn

<sup>1</sup> 临沂大学 自动化与电气工程学院,临沂,276005

## 0 引言

目前,化石燃料供应短缺以及过度使用化石燃料造成的环境污染问题严重威胁着国家经济社会的发展。世界各国都积极将分布式可再生能源、高效储能装置、能量转换装置整合到区域综合能源系统中,以达到减缓能源枯竭与环境保护的目的<sup>[1]</sup>。储能装置在促进区域综合能源系统优化能源调度、改善供电供热方式等方面起着至关重要的作用,但传统储能装置易受地理位置、空间大小或设备制造难度等因素的限制,难以满足结构愈加复杂的区域综合能源系统的需求。因此,压缩空气储能装置<sup>[2]</sup>逐渐受到研究人员的关注。

现阶段压缩空气储能装置主要被用于对单一分布式能源的优化研究;在电能互补利用方面,文献[3]利用压缩空气储能装置变工况运行特性,建立了风储协同系统模型,文献[4]分析了风力发电的随机性与压缩空气储能装置的运行特性,构建了压缩空气储能装置运行与风力发电装置发电功率模型;在能源耦合分析方面,文献[5]基于压缩空气储能装置的热力学特性分析了4种不同的压缩空气储能与燃气轮机热电联供耦合系统模型,文献[6]以小型燃气轮机为核心,建立了耦合压缩空气储能的分布式热电联供系统;在能源系统优化方面,文献[7]研究了各参数对含压缩空气储能的综合能源系统运行效率的影响,文献[8]以输出功率最优作为目标设计了一种综合能源系统运行模型。但上述文献未涉及压缩空气储能装置应用于区域综合能源系统后对其运行成本等经济性方面的研究。

本文选用先进的绝热压缩空气储能(Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage, AA-CAES)装置,建立了一种包含AA-CAES装置的新型区域综合能源系统模型。AA-CAES装置的发展目标主要以能源高效化与绿色化为主,旨在促进电能充分利用,降低外电网购电成本<sup>[9]</sup>。因此,将AA-CAES装置加入到区域综合能源系统中,可以达到提高效率、降低运行成本的目的。压缩空气储能装置相较于传统储能装置具有容量更大、储能周期更长、转化周期更短、使用时限更长、投资更小的特点,尤其是目前研发的AA-CAES装置,不再依靠化石燃料实现能量转换,真正意义上成为了零排放储能装置,为区域综合能源系统提供了一种理想储能装置<sup>[10-11]</sup>。

在本文所建区域综合能源系统模型的基础上, 分别对模型内各装置建立相应的数学模型, 再以区域综合能源系统内各供能装置的出力特性、功率波动和运行约束为基础, 建立包括 AA-CAES 装置在内的能量流动模型, 充分耦合电、气、热多种能量. 在区域综合能源系统协调运行优化技术的支持下, 降低其运行成本, 提高其能量利用效率. 采用 GAMS 优化软件求得网内各单元最佳出力功率、运行成本以及环境成本, 并与传统模型进行了比较分析, 结果表明本文所建立的模型在降低成本、促进新能源消纳和节能减排方面是有效且可行的.

### 1 区域综合能源系统物理模型

本文所建区域综合能源系统模型如图 1 所示. 模型主要组成部分包括风电机组 (wind turbine)、燃气轮机 (gas turbine)、电锅炉 (electric boiler)、AA-CAES 装置等. 其中, 系统内部电源为风电机组和燃气轮机, 系统内部热源为燃气轮机和电锅炉. 外电网、外热网以及天然气供应网与区域综合能源系统相联接, 由此构建含 AA-CAES 装置的区域综合能源系统模型.

本文所建立的系统模型将多种分布式能源进行关联耦合, 促进了区域综合能源系统对清洁能源的消纳, 降低了对化石能源的使用, 同时也达到节约成本的目的. 燃气轮机是一种将空气与气体燃料混合后连续燃烧产生高温高压燃气推动涡轮叶片高速旋转, 从而将燃料内能转换为机械能的热力机械<sup>[12]</sup>. 电锅炉是一种高效低耗、节能环保的新型以电供热装置, 在当前的区域综合能源系统中, 主要用于协助新

能源过剩电力的消纳, 同时在低电价时段提高电锅炉功率, 通过降低天然气和煤炭等传统供热燃料的使用量, 从而起到减轻环境压力和清洁能源消纳的作用<sup>[13]</sup>. 风电机组作为能源系统中的清洁能源装置, 能够提高系统运行的经济性能<sup>[14]</sup>.

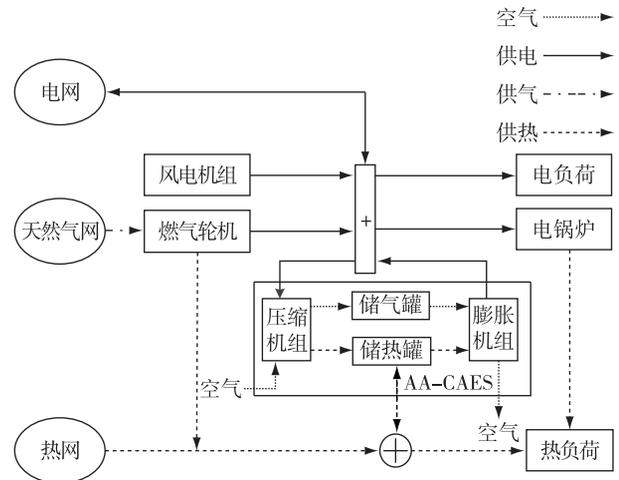


图 1 区域综合能源系统模型  
Fig. 1 Regional integrated energy system

先进绝热压缩空气储能系统结构如图 2 所示, 它满足综合能源系统对电热联储的要求. AA-CAES 系统采用“多级压缩, 存储空气”和“多级膨胀, 释放空气”的方式对电能存储和释放, 分别需要借助压缩机组和膨胀机组完成, 压缩机组工作于电动机状态进行储电, 膨胀机组工作于发电机状态进行供电, 储电和供电过程不能同时进行.

AA-CAES 装置处于电动机工作状态时, 通过消耗电能压缩空气, 将电能转换为高压空气的势能, 压

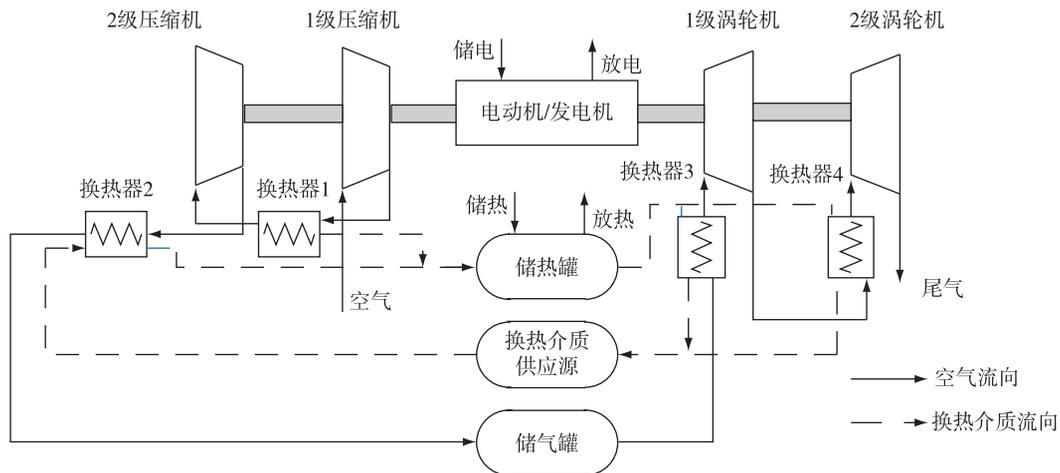


图 2 AA-CAES 装置结构  
Fig. 2 Schematic diagram of AA-CAES

压缩机运行时的数学模型<sup>[15-16]</sup>如下:

$$P_{CAESC,t} \eta_c = m_{c,t} \frac{\gamma}{\gamma-1} R_g \left[ \sum_{k=1}^{n-1} T_{c,k,in} (\beta_{c,k}^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1) + T_{c,n,in} (\beta_{c,n,t}^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1) \right], \quad (1)$$

式中: $P_{CAESC,t}$ 表示压缩机在 $t$ 时段内的工作功率; $\eta_c$ 表示压缩机的运行效率; $m_{c,t}$ 表示压缩机在 $t$ 时段内通过的空气的流量; $\gamma$ 表示理想空气的比热容比; $R_g$ 表示理想空气常数; $n$ 表示压缩机和膨胀机的级数; $T_{c,k,in}$ , $T_{c,n,in}$ 分别表示 $k$ 级和末级压缩机入口处理理想空气的温度; $\beta_{c,k}$ 表示额定运行状态下的 $k$ 级压缩机的压缩比; $\beta_{c,n,t}$ 表示末级压缩机在 $t$ 时段内的压缩比。

AA-CAES装置处于发电机工作状态时,通过释放高压空气,将高压空气的势能转换为电能,膨胀机运行时的数学模型<sup>[16-17]</sup>如下:

$$P_{CAESG,t} = \eta_g m_{g,t} \frac{\gamma}{\gamma-1} R_g \sum_{j=1}^n T_{g,j,in,t} (1 - \beta_{g,j}^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}), \quad (2)$$

式中: $P_{CAESG,t}$ 表示膨胀机在 $t$ 时段内的工作功率; $\eta_g$ 表示膨胀机的运行效率; $m_{g,t}$ 表示膨胀机在 $t$ 时段内通过的空气的流量; $T_{g,j,in,t}$ 表示 $j$ 级膨胀机入口处理理想空气的温度,它与储气罐的气体温度有关; $\beta_{g,j}$ 表示额定运行状态下的 $j$ 级膨胀机的膨胀比。

储气罐在遵从能量守恒与质量守恒的前提下,对空气进行处理,且在某时刻只能进行储气或放气.储气罐内空气气压变化数学模型<sup>[18]</sup>如下:

$$p_{st,t} = \frac{R_g T_{st,in} \gamma}{V_{st}} m_{c,t} - \frac{R_g T_{st,t} \gamma}{V_{st}} m_{g,t} - (\theta + \delta |m_{c,t} - m_{g,t}|^{0.8})(T_{st,t} - T_{wall}), \quad (3)$$

式中: $p_{st,t}$ 表示储气罐在 $t$ 时段内的气压变化率; $T_{st,in}$ 和 $T_{st,t}$ 分别表示储气罐进气口气温和储气罐内气温; $V_{st}$ 表示储气罐体积; $\theta$ 和 $\delta$ 分别表示由自然对流和强制对流引起的传热系数; $T_{wall}$ 表示储气罐壁的温度; $p_{st,0}$ 表示储气罐初始气压。

AA-CAES装置主要通过换热器进行储热罐和压缩机、膨胀机之间的热能交换.在储热放热过程中,换热器的放热和吸热功率数学模型<sup>[7,14]</sup>如下:

$$P_{Qc,t} = m_{c,t} c_{p,air} \varepsilon \cdot \left( \sum_{k=1}^{n_c-1} T_{c,k,in} \beta_{c,k}^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} + T_{c,n_c-1,in} \cdot \beta_{c,n_c,t}^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - n_c T_{cold} \right), \quad (4)$$

$$P_{Qg,t} = m_{g,t} c_{p,air} \varepsilon \cdot \left( n_g T_{hot} - T_{st,t} - \sum_{j=1}^{n_g-1} T_{g,j,in,t} \beta_{g,j}^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right), \quad (5)$$

式中: $P_{Qc,t}$ 表示换热器在 $t$ 时段内与压缩机的热交换功率; $P_{Qg,t}$ 表示换热器在 $t$ 时段内与膨胀机的热交换功率; $c_{p,air}$ 表示理想空气的比热容; $\varepsilon$ 表示换热器的工作效率; $T_{cold}$ 表示压缩状态时换热器内载热介质的温度; $T_{hot}$ 表示膨胀状态时换热器内载热介质的温度。

储热罐的热能变化模型可由下式表示:

$$Q_{HS,t} = Q_{HS,0} + \sum_{\tau=1}^t P_{Qc,\tau} \Delta t - \sum_{\tau=1}^t P_{Qg,\tau} \Delta t, \quad (6)$$

式中: $Q_{HS,t}$ 表示储热罐在 $t$ 时段内储热总量; $Q_{HS,0}$ 表示储热罐在起始状态的储热总量,该值为前一个周期调度结束时的储热罐储热总量的值。

## 2 综合能源系统经济模型

本文研究的综合能源系统经济性优化调度的目标建立在各系统装置稳定运行约束的基础上,在优先充分利用系统内部资源的前提下,实现经济成本最优。

$$\min C = \sum_{t=0}^{23} (C_{POWER,t} + C_{HEAT,t} + C_{GT,t} + C_{SS,t} + C_{CO_2,t}), \quad (7)$$

$$C_{POWER,t} = C_{PPower,t} - C_{SPower,t}, \quad (8)$$

式中: $C_{POWER,t}$ 表示 $t$ 时段系统向外电网购售电成本; $C_{GT,t}$ 表示 $t$ 时段燃气轮机的运行成本; $C_{SS,t}$ 表示 $t$ 时段燃气轮机的启停过程总成本; $C_{CO_2,t}$ 表示 $t$ 时段 $CO_2$ 的治理成本; $C_{HEAT,t}$ 表示 $t$ 时段系统向外热网购热成本; $C_{SPower,t}$ 和 $C_{PPower,t}$ 分别表示 $t$ 时段系统向外电网售电量和购电量。

AA-CAES装置的工作状态约束:

$$P_{CAESC,min} v_{c,t} \leq P_{CAESC,t} \leq P_{CAESC,max} v_{c,t}, \quad (9)$$

$$P_{CAESG,min} v_{g,t} \leq P_{CAESG,t} \leq P_{CAESG,max} v_{g,t}, \quad (10)$$

$$p_{st,min} \leq p_{st,t} \leq p_{st,max}, \quad (11)$$

$$0 \leq Q_{HS,t} \leq Q_{HS}, \quad (12)$$

$$v_{c,t} + v_{g,t} \leq 1, \quad (13)$$

式中: $P_{CAESC,min}$ 表示压缩机组工作时的最小功率; $P_{CAESC,max}$ 表示压缩机组工作时的最大功率; $P_{CAESG,min}$ 表示膨胀机组工作时的最小功率; $P_{CAESG,max}$ 表示膨胀机组工作时的最大功率; $p_{st,min}$ 表示储气罐气压的最小值; $p_{st,max}$ 表示储气室气压的最大值; $Q_{HS,t}$ 表示 $t$ 时段内储热罐的储热总量; $Q_{HS}$ 表示储热罐的最大储热量; $v_{c,t}$ 表示控制压缩机组工作状态的变量,用于表示AA-CAES系统是否处于电动机工况,当AA-CAES系统处于电动机工况时, $v_{c,t} = 1$ ,其他工况, $v_{c,t} = 0$ 。

在运行时综合能源系统需要满足功率平衡、热

平衡的运行约束:

$$P_{Load,t} + P_{POWER,t} + P_{CAESC,t} = O_{ac,t}, \quad (14)$$

$$O_{ac,t} = O_{GT,t} + O_{WT,t} + P_{CAESC,t}, \quad (15)$$

$$\frac{H_{Load,t}}{H_{web-eff}} = H_{GT,t} + H_{EB,t} + H_{web,t} + H_{PG,t} + H_{Qcg,t}, \quad (16)$$

$$H_{Qcg,t} = P_{Qg,t} - P_{Qc,t}, \quad (17)$$

式中:  $P_{Load,t}$  表示  $t$  时段内电需求负荷功率;  $P_{POWER,t}$  表示  $t$  时段内向外电网的购电功率;  $O_{ac,t}$  表示  $t$  时段内由网络内的发电装置向综合能源微网供电功率;  $H_{Load,t}$  表示  $t$  时段内综合能源微网的热需求负荷功率;  $H_{web,t}$  表示  $t$  时段内向外热网购热量;  $H_{Qcg,t}$  表示  $t$  时段内 AA-CAES 系统储热罐的热功率变化;  $H_{web-eff}$  表示外热网向微网内热需求负荷供热的效率。

### 3 算例分析

#### 3.1 基本参数设定

本文拟选用冬季某日我国北方某工业园区作为研究对象,参考其一天内的用电负荷和用热负荷数据,设置了算例中区域综合能源系统在一天内的电热负荷数据和风电机组出力数据曲线如图 3 所示。

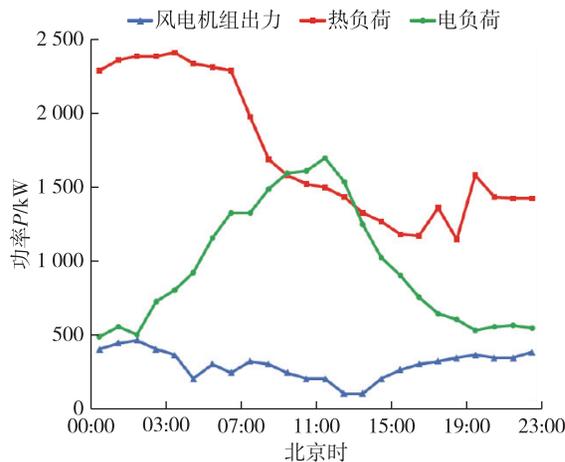


图 3 电热负荷及风电机组出力曲线

Fig. 3 Electric load (green), thermal load (red), and wind turbine output (blue) curves

本文按照峰谷分时计费的原则,划分不同时段内的区域综合能源系统向外电网购售电价格,具体如表 1 所示。

AA-CAES 装置运行参数如表 2 所示。在保证模型科学性和结果正确性的基础上,简化部分对模型影响极小的因素。参数设置前提:1) 空气处于理想气体状态;2) AA-CAES 各装置在运行过程中不存在漏气漏液现象;3) 单位时间内压缩机和膨胀机中的介

表 1 外电网购售电情况

时间	外电网购电价	外电网售电价
00:00—06:00	0.17	0.13
07:00—10:00	0.49	0.38
11:00—15:00	0.83	0.65
16:00—18:00	0.49	0.38
19:00—22:00	0.83	0.65
23:00—00:00	0.49	0.38

质流量无损耗;4) 工作过程在绝热环境中进行。同时,将 AA-CAES 装置设置为“多级压缩、级减冷却”和“多级膨胀、级间再热”的工作模式,从而达到提高空气循环效率和利用率的目的。

表 2 AA-CAES 装置参数

参数	数值	单位
空气的比热容比 $\gamma$	1.4	
电动机效率 $\eta_e$	0.9	
理想空气数 $R_g$	8.3	$\text{m}^3 \cdot \text{Pa} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
理想空气温度 $T_{air}$	298	K
压缩机空气流量 $m_{c,t}$	33	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
第 $k$ 级压缩机压缩比 $\beta_{c,k}$	2.75	
发电机效率 $\eta_g$	0.9	
膨胀机出口流量 $m_{g,t}$	66	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
第 $k$ 级膨胀机膨胀比 $\beta_{g,k}$	2.55	
第 $k$ 级压缩机出口温度 $T_{c,k,out}$	323	K

#### 3.2 综合能源系统运行结果分析

为验证基于先进绝热压缩空气储能装置的区域综合能源系统的优势和不同工作特性的 AA-CAES 装置对系统运行成本的影响,设计以下 4 种区域综合能源系统运行模式进行对比分析。模式 1: AA-CAES 装置未运行,系统为电热分储运行模式,区域综合能源系统富余热电分别储存到蓄电池和储热罐中,优化系统供给侧设备出力。模式 2—4: AA-CAES 装置运行,系统为电热联储运行模式,区域综合能源系统富余热电储存至 AA-CAES 装置中,提高能量循环效率和利用率,优化系统储能设备响应和供给侧设备出力。

区域综合能源系统在不同模式下的运行结果如图 4 所示。对结果进行分析如下:

1) 模式 1. 系统在用电低谷时段,燃气轮机和风电供电比例较高;在用电高峰时段,外电网供电比例

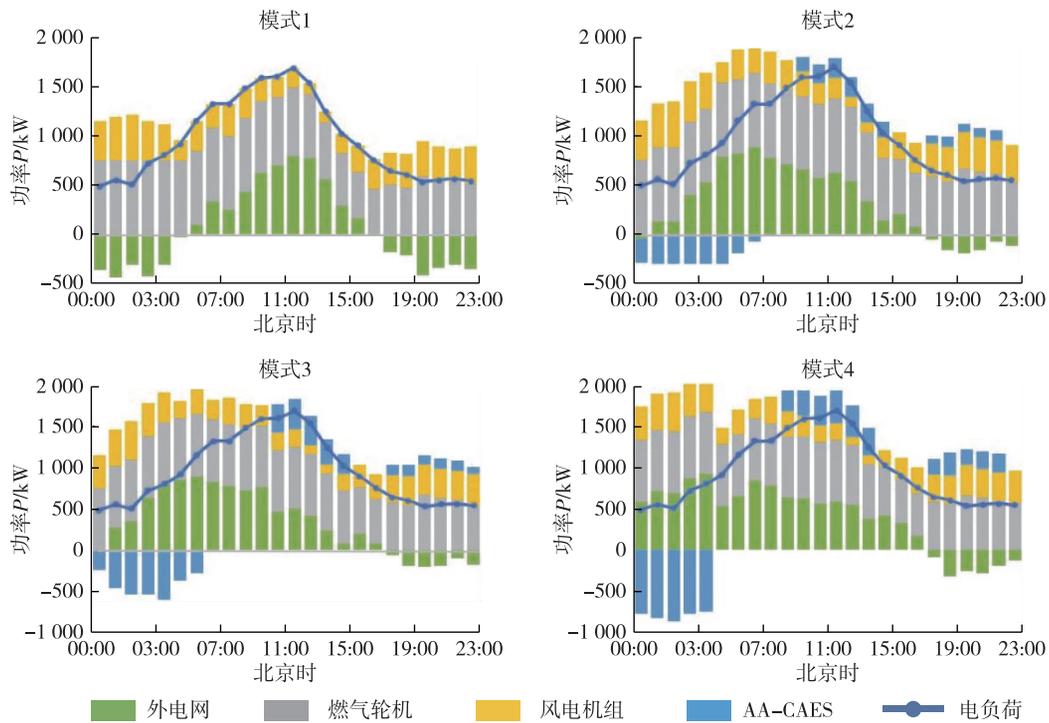


图4 综合能源系统电能运行

Fig. 4 Electricity supply cycles of integrated energy system under different operation modes

提高.

2) 模式 2.系统在用电低谷时段,外电网供电比例提高,AA-CAES 装置用电;在用电高峰时段,外电网供电比例降低,AA-CAES 装置供电,燃气轮机额定运行时间减少.

3) 模式 3.系统在用电低谷时段,外电网供电比例提高,AA-CAES 装置用电量增多;在用电高峰时段,外电网出力比例降低,AA-CAES 装置供电量增多,燃气轮机运行功率降低.

4) 模式 4.系统在用电低谷时段,外电网供电比例提高,AA-CAES 装置用电量增多且用电时间减少;在用电高峰时段,外电网供电功率较为稳定,AA-CAES 装置供电量增多,燃气轮机运行功率降低.

4 种运行模式下的区域综合能源系统运行成本如表 3 所示.在模式 1 中,各时刻系统电能由外电网

以及内部电源满足,在保证总电负荷平衡的前提下,不可避免地出现系统在峰电价时段购电,谷电价时段售电的现象,因此向外电网购售电成本较高(6 208.65 元),系统运行总成本为 26 919.52 元.模式 2 在模式 1 的基础上,在系统内增加 AA-CAES 装置,在谷电价时段进行储能,电能由燃气轮机、风电机组和外电网满足,燃气轮机出力增多,天然气成本达到 17 505.21 元.在峰电价时段进行释能,减小供给侧设备的输出功率,从而降低向外电网购售电成本(3 676.45 元),系统运行总成本为 24 614.71 元.模式 3 和 4 在模式 2 的基础上提高了 AA-CAES 装置的储能容量及压缩机组和膨胀机组的运行功率.模式 3 中的 AA-CAES 装置的功率和储能容量增加,更大程度地减小系统向外电网购售电成本(3 353.50 元),系统总运行成本为 23 420.84 元.模

表 3 综合能源系统运行成本

Table 3 Operation costs of integrated energy system

元

模式	购售电成本	购热成本	AA-CAES 运行成本	天然气成本	CO <sub>2</sub> 治理成本	系统总成本
1	6 208.65	1 994.46		17 865.70	850.71	26 919.52
2	3 676.45	2 183.69	286.12	17 505.21	807.90	24 614.71
3	3 353.50	2 136.66	429.18	17 549.92	809.92	23 420.84
4	5 041.10	1 839.09	572.24	17 385.07	802.32	24 495.34

式4中AA-CAES装置的储能容量及压缩机组和膨胀机组的运行功率过高,在谷电价时段消耗大量电能,同时向系统供热明显增多,系统内部热源和外热网出力减小,使其购热成本减少至1 839.09元,向外电网购售电成本则增加至5 041.10元,系统总运行成本为24 495.34元。

#### 4 结语

本文研究了AA-CAES装置的储能特性,并设计了一种基于AA-CAES装置的区域综合能源系统结构模型,通过分析不同模式下的仿真算例结果,得到以下结论:

1) AA-CAES装置具备优越的储能释能特性,适用于调节综合能源系统电能热能运行。且AA-CAES装置基于成熟热力学常规技术,因此区域综合能源系统运行模式切实可行。绝热压缩空气储能方式解决了传统空气储能装置对天然气等燃料依赖的问题,降低了综合能源系统的运行成本,提高了系统运行的安全性和可靠性。

2) 本文所提出的基于先进绝热压缩储能装置的综合能源系统模型能够明显降低系统向外电网购售电成本。由于AA-CAES装置的“电转热”的效率较低,“电到电”的效率较高,它主要参与系统电能运行,向外热网购热量有所增加,有利于降低系统内部以“电转热”方式运行的供热设备在峰电价时段的用电成本。同时,系统在谷电价时段总耗电量与传统系统相比有所增加,一定程度上减小了系统在峰电价时段对外电网的依赖。

3) 适当地增加AA-CAES装置功率以及储能容量能够获得更高的电热能运行效率和更低的系统运行成本。当AA-CAES装置功率和储能容量与系统内各设备不匹配时,它对系统运行的优化效果随之减小,因此合理选择AA-CAES装置功率和储能容量是一个关键问题。

#### 参考文献

##### References

- [ 1 ] 隆重,戴宇辰,杨成顺,等. 孤岛分布式能源系统的反步控制策略研究[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版),2018,10(2):178-184  
LONG Zhong, DAI Yuchen, YANG Chengshun, et al. Backstepping control strategy for islanded distributed energy resource system[J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition), 2018, 10(2): 178-184
- [ 2 ] 王丹,张甜甜,吴嘉禾,等. 大规模压缩空气储能系统发电方式与运行控制分析与构想[J]. 电力系统自动化,2019,43(24):13-22  
WANG Dan, ZHANG Tiantian, WU Jiahe, et al. Analysis and conception of power generation mode and operation control of large-scale compressed air energy storage system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(24): 13-22
- [ 3 ] 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 Laijun, 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
- [ 4 ] 吴晨曦,陈泽昊,张杰,等. 考虑先进绝热压缩空气储能的风力发电系统成本/供电可靠性评估[J]. 电力自动化设备,2020,40(2):62-71,75  
WU Chenxi, CHEN Zehao, ZHANG Jie, et al. Cost/power supply reliability assessment of wind power generation system considering advanced adiabatic compressed air energy storage [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(2): 62-71, 75
- [ 5 ] 张远. 风电与先进绝热压缩空气储能技术的系统集成与仿真研究[D]. 北京:中国科学院大学,2014  
ZHANG Yuan. Study on system integration and simulation of wind power and advanced adiabatic compressed air energy storage technology[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014
- [ 6 ] 杨海洋. 基于压缩空气储能的新型燃气轮机联供系统研究[D]. 济南:山东大学,2020  
YANG Haiyang. Research on new gas turbine cogeneration system based on compressed air energy storage[D]. Jinan: Shandong University, 2020
- [ 7 ] 李姚旺,苗世洪,尹斌鑫,等. 含先进绝热压缩空气储能电站的电力系统实时调度模型[J]. 电工技术学报,2019,34(2):387-397  
LI Yaowang, MIAO Shihong, YIN Binxin, et al. Real-time dispatch model for power system with advanced adiabatic compressed air energy storage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(2): 387-397
- [ 8 ] 侯健敏,周德群,张慧明. 分布式能源系统与电网的区域合作仿真[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版),2011,3(3):270-274  
HOU Jianmin, ZHOU Dequn, ZHANG Huiming. Modeling of regional cooperation between distributed energy systems and power grid[J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition), 2011, 3(3): 270-274
- [ 9 ] 薛小代,梅生伟,林其友,等. 面向能源互联网的非补燃压缩空气储能及应用前景初探[J]. 电网技术,2016,40(1):164-171  
XUE Xiaodai, MEI Shengwei, LIN Qiyu, et al. Energy internet oriented non-supplementary fired compressed air energy storage and prospective of application[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 164-171

- [10] 宋权斌,王健为,潘思良,等. 耦合压缩空气储能的冷热电联供系统[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版),2019,16(1):93-101  
SONG Quanbin, WANG Jianwei, PAN Siliang, et al. Combined cooling, heating and power system with coupled compressed air storage[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science),2019,16(1):93-101
- [11] 张远,杨科,李雪梅,等. 基于先进绝热压缩空气储能的冷热电联产系统[J]. 工程热物理学报,2013,34(11):1991-1996  
ZHANG Yuan, YANG Ke, LI Xuemei, et al. A combined cooling, heating and power (CCHP) system based on advanced adiabatic compressed air energy storage (AA-CAES) technology[J]. Journal of Engineering Thermophysics,2013,34(11):1991-1996
- [12] 缪妙,李勇,曹一家,等. 考虑环境因素的多能源系统交直流混合供能优化策略[J]. 电力系统自动化,2018,42(4):128-134  
MIAO Miao, LI Yong, CAO Yijia, et al. Optimization strategy of multi-energy hybrid AC/DC power system considering environmental factors [J]. Automation of Electric Power Systems,2018,42(4):128-134
- [13] 王朋,孙永辉,翟苏巍,等. 基于小波长短期记忆网络的风电功率超短期概率预测[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版),2019,11(4):460-466  
WANG Peng, SUN Yonghui, ZHAI Suwei, et al. Ultra-short-term probability prediction of wind power based on wavelet decomposition and long short-term memory network[J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition),2019,11(4):460-466
- [14] 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
- [15] Luo X, Wang J H, Krupke C, et al. Modelling study, efficiency analysis and optimisation of large-scale adiabatic compressed air energy storage systems with low-temperature thermal storage [J]. Applied Energy, 2016, 162: 589-600
- [16] Raju M, Khaitan K S. Modeling and simulation of compressed air storage in caverns: a case study of the Huntorf plant[J]. Applied Energy,2012,89(1):474-481
- [17] Roushenas R, Razmi A R, Soltani M, et al. Thermo-environmental analysis of a novel cogeneration system based on solid oxide fuel cell (SOFC) and compressed air energy storage (CAES) coupled with turbocharger[J]. Applied Thermal Engineering,2020,181:115978
- [18] Bartela Ł. A hybrid energy storage system using compressed air and hydrogen as the energy carrier[J]. Energy,2020,196:117088

## Integrated energy optimization strategy based on advanced adiabatic compressed air energy storage

MEN Jiakai<sup>1</sup> QIU Jianlong<sup>1</sup> CHEN Xiangyong<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Automation and Electrical Engineering, Linyi University, Linyi 276005

**Abstract** As the most promising energy storage technology at present, the Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage (AA-CAES) can promote the regional integrated energy system to absorb new energy, make efficient use of traditional energy, and reduce environmental pollution. Here, an energy supply optimization strategy for regional integrated energy system is established with the AA-CAES, which can reduce the operation cost of the system in its daily cycle. First, we analyze the energy storage characteristics of the AA-CAES, the electric power balance as well as the thermal power balance of the regional integrated energy system, and the operation constraints of different energy suppliers. Then we use optimization software of GAMS to solve the operation cost of traditional regional integrated energy system and the proposed strategy in their daily cycles. Finally, the comparison in aspects of environmental protection and economic cost verifies the effectiveness and feasibility of the proposed strategy in reducing cost, promoting new energy consumption, and energy conservation & emission reduction.

**Key words** regional integrated energy system; advanced adiabatic compressed air energy storage (AA-CAES); economical operation; multi-energy complementary; energy conservation and emission reduction