

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

李姚旺, 苗世洪, 尹斌鑫, 张世旭, 张松岩

(强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学电气与电子工程学院), 湖北省 武汉市 430074)

Optimal Dispatch Model for Micro Integrated Energy System Considering Multi-carrier Energy Generation Characteristic of Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage

LI Yaowang, MIAO Shihong, YIN Binxin, ZHANG Shixu, ZHANG Songyan

(State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology (School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, Hubei Province, China)

摘要: 先进绝热压缩空气储能 (Advanced adiabatic compressed air energy storage, AA-CAES) 是一种清洁的大规模物理储能技术。相对于其他类型的储能技术, AA-CAES 技术具有多能流联供的独特特性, 这一特性使得其在微型综合能源系统中具有广阔的应用前景。考虑 AA-CAES 电站的多能联供特性, 研究了含 AA-CAES 电站的微型综合能源系统优化调度策略。介绍了含 AA-CAES 电站的微型综合能源系统基本构成; 基于 AA-CAES 电站的实际热力学过程, 构建 AA-CAES 电站的冷热电多能流联合调度约束模型; 在此基础上, 以最小化系统运行成本为目标, 建立含 AA-CAES 电站的微型综合能源系统优化调度模型; 最后, 采用天津中新生态城的数据进行模型验证。

关键词: 微型综合能源系统; 先进绝热压缩空气储能 (AA-CAES); 多能流; 优化调度

ABSTRACT: Advanced adiabatic compressed air energy storage (AA-CAES) is a clean large-scale physical energy storage technology. Compared with other energy storage technologies, AA-CAES can supply and store multi-carrier energy, which makes it have abroad prospective in the application in micro integrated energy system. Considering the multi-carrier energy generation characteristic of AA-CAES power plant, the optimal dispatch strategy of micro integrated energy system with AA-CAES power plant

was studied. The basic composition of the micro integrated energy system with AA-CAES power plant was introduced. Based on the actual thermodynamic process of the AA-CAES power plant, a combined dispatch model of multi-carrier energy flow of cooling, heating and power was established. On this basis, the optimal dispatch model of micro integrated energy system with AA-CAES power plant was established to minimize the operating cost of the system. In the end, based on the operation data of Sino-Singapore ecologic town in Tianjin, the simulation test was carried out for model validation.

KEY WORDS: micro integrated energy system; advanced adiabatic compressed air energy storage (AA-CAES); multi-carrier energy; optimal dispatch

0 引言

随着化石燃料枯竭和环境污染问题的日益严重, 积极发展分布式可再生电源, 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^[1]。微型综合能源系统能够将分布式电源、燃气、供冷/供热等能源环节有机结合, 为工业园区、公共、商业和民用建筑提供综合能源服务; 微型综合能源系统还能够通过能量梯级利用和灵活的能源利用模式, 实现高达 90% 的一次能源利用率^[2]。近年来, 微型综合能源系统在国内外引起了广泛的关注。相对于传统的单一能源系统, 微型综合能源系统内的设备种类更加丰富, 运行特性更为复杂, 且不同能源系统间相互影响^[3]。因此, 研究

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0903601); 国家自然科学基金项目(51777088)。

Project Supported by National Key Research and Development Program of China (2017YFB0903601); National Natural Science Foundation of China (51777088)

微型综合能源系统的优化运行技术，提升系统安全经济运行水平，已成为近年来的研究热点之一。

在微型综合能源系统中，储能单元被认为是其中的重要核心单元之一^[4]。目前，在诸多研究中，均已将电池储能技术和蓄热技术考虑在微型综合能源系统的应用中^[1,3-5]。在现有储能技术中，先进绝热压缩空气储能 (advanced adiabatic compressed air energy storage, AA-CAES) 因其成本低、寿命长、清洁环保等优点而日渐受到关注^[6]。此外，相对于其他类型的储能技术，AA-CAES 有一项显著优势——冷热电联供特性^[7]。这一特性使得 AA-CAES 技术在微型综合能源系统中独具优势，具有广阔的发展应用前景^[7]。

目前，学者们已在 AA-CAES 系统效益评估、优化规划和优化调度方面开展了大量研究。文献[8]评估了传统 CAES 电站和 AA-CAES 电站在美国电能市场和备用市场中的效益情况。文献[9]提出了面向微电网的小型 AA-CAES 系统容量规划方法。文献[6]构建了 AA-CAES 电站的详细备用模型，提出了考虑 AA-CAES 电站的电能与备用联合优化调度模型。文献[10]考虑 AA-CAES 电站的变工况特性，构建了 AA-CAES 电站的实时优化调度模型，并提出了含 AA-CAES 电站的电力系统优化调度策略。文献[11]建立了 AA-CAES 电站的变工况运行模型，并提出了 AA-CAES 与风电耦合的风储系统优化运行策略。上述文献主要面向 AA-CAES 电站参与电力系统的优化规划与运行开展研究，并未考虑其在多能流系统中的调度运行。

文献[12]以提高能源利用率与能量梯级利用为目标，设计了一种含 AA-CAES 的新型冷热电联供微网结构，并从流程设计的角度，优化了 AA-CAES 在冷热电联供微网中的工作模式。文献[13]提出了一种反映 AA-CAES 功率约束和储能状态约束的运行可行域刻画方法，并探讨了运行可行域作为分析工具在实时调度中的应用。上述文献在 AA-CAES 参与多能流系统的优化调度运行方面开展了研究，具有良好的启发意义。但在同时计及 AA-CAES 冷热电联供特性的调度建模方面，以及含 AA-CAES 电站的微型综合能源

系统优化调度运行方面，目前还鲜有报道。

为此，本文考虑 AA-CAES 电站的多能联供特性，构建了 AA-CAES 电站的冷热电多能流联合调度约束模型。在此基础上，以最小化系统运行成本为目标，建立了含 AA-CAES 电站的微型综合能源系统优化调度模型。最后，通过算例分析进行模型验证。

1 微型综合能源系统构成

本文研究的微型综合能源系统包含冷、热、电和气 4 种能源形式，系统结构如图 1 所示。该系统通过集中式电力母线与电网交换电功率^[4]。系统内的主要设备包括：微型燃气轮机、风电机组、余热回收锅炉、燃气锅炉、电制冷机、吸附式制冷机和 AA-CAES 装置。其中，微型燃气轮机和风电作为系统内的主要电源；余热回收锅炉和燃气锅炉作为系统内的主要供热源；电制冷机、吸附式制冷机和 AA-CAES 装置作为系统内的主要供冷源。需要说明的是，AA-CAES 装置还作为系统内的主要储热/电装置。

由图 1 可以看出，AA-CAES 装置可以同时参与冷、热、电 3 种能流形式的系统运行优化，且具有热电联储/联供特性。因此，其在微型综合能源系统中具有重要地位。AA-CAES 装置是一

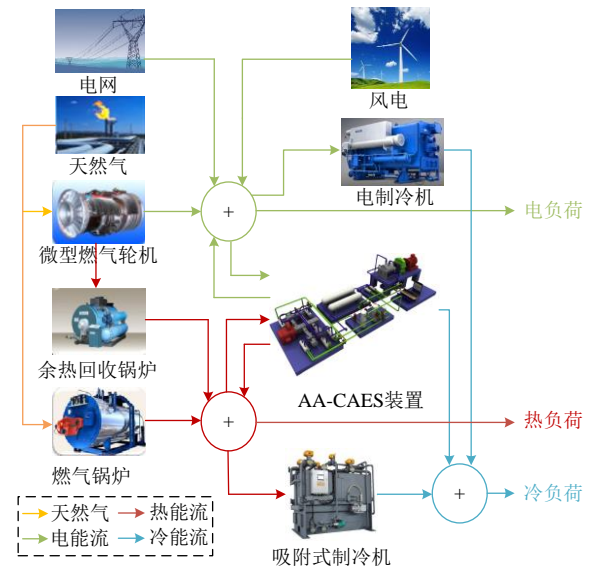


图 1 微型综合能源系统构成示意图

Fig. 1 Schematic diagram of micro integrated energy system

个包含压缩/膨胀、储热/释热等多物理过程的复杂系统，其系统结构如图 2 所示。

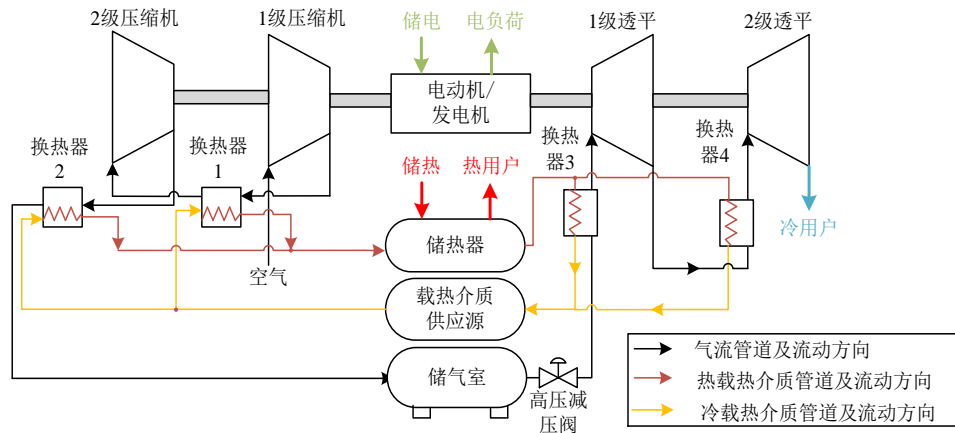


图 2 面向冷热电联产的 AA-CAES 装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of AA-CAES device for CCHP

为了达到更高的循环效率和热利用率，AA-CAES 电站通常采用“多级压缩、级间冷却”和“多级膨胀、级间再热”模式^[10](图 2 中以 2 级压缩和 2 级膨胀为例)。AA-CAES 装置的运行原理如下：1) 在储能过程中，压缩机利用富裕电能压缩至高温高压状态，通过换热器将压缩热回收并存储在储热器中，降温后的高压空气存储在储气室中；2) 在释能过程中，储气室中的高压气体释放，在换热器中利用压缩热或从微型综合能源系统中存储的热量加热升温，之后通过透平膨胀做功，带动发电机发电；3) 在冷热电联产场景下，AA-CAES 装置的储热器不但能够存储压缩热，还能够存储来自外界热源的热量，此外，存储在储热器中的热量不但能够用于加热高压空气，还能够为热用户供热^[7,12]；4) 在冷热电联供场景下，末级透平的出口温度通常低于环境温度，透平出气可用于供冷。

由于水具有相对较高的比热容，能够在较少的温度变化范围内存储较多的热量，因此，其常被用作 AA-CAES 系统中的载热介质^[14-15]。本文同样采用水作为 AA-CAES 系统中的载热介质。

2 AA-CAES 多能流联合调度约束建模

考虑 AA-CAES 电站采用“多级压缩、级间冷却”和“多级膨胀、级间再热”模式，并忽略 AA-CAES 在非额定工况下的参数变化，压缩过程空气质量流量和压缩功率的关系，及发电过程

空气质量流量和发电功率的关系，均可由理想绝热压缩/膨胀过程表示，具体表达式见文献[6]。

采用等温储气室模型描述 AA-CAES 电站的储气室气压与进出口质量流量的关系，如式(1)所示。储气室气压可由式(2)计算得到^[11,16]。

$$\dot{p}_{st,t} = \frac{R_g T_{st,in}}{V_{st}} \dot{m}_{c,t} - \frac{R_g T_{st}}{V_{st}} \dot{m}_{g,t} \quad (1)$$

$$p_{st,t} = p_{st,0} + \sum_{\tau=1}^t \dot{p}_{st,\tau} \Delta t \quad (2)$$

式中： $p_{st,t}$ 和 $\dot{p}_{st,t}$ 分别为储气室在时段 t 的气压和气压变化率； $\dot{m}_{c,t}$ 和 $\dot{m}_{g,t}$ 分别为时段 t 流入压缩机和流出膨胀机的空气质量流量； $T_{st,in}$ 和 T_{st} 分别为储气室进口气温和储气室内气温； R_g 为理想气体常数； V_{st} 为储气室体积； Δt 为单位调度时长； $p_{st,0}$ 为储气室初始气压，其等于上一个调度周期结束时的储气室气压。

在换热过程中，引入换热器能效参数^[17]，并假设 AA-CAES 电站控制系统使换热器中热流体和冷流体的热容量相等，换热器吸热功率和放热功率表达式见文献[6]。

考虑储热器能够参与储热和向热用户供热后，储热器的储热量可由式(3)计算得到。

$$Q_{HS,t} = Q_{HS,0} + \sum_{\tau=1}^t P_{Qc,\tau} \Delta t - \sum_{\tau=1}^t P_{Qg,\tau} \Delta t + H_{CAES,st,t} \Delta t - H_{CAES,sp,t} \Delta t \quad (3)$$

式中： $Q_{HS,t}$ 为储热器在时段 t 的储热量； $Q_{HS,0}$ 为储热器的初始储热量，其等于上一个调度周期结束时的储热器储热量； $P_{Qc,\tau}$ 和 $P_{Qg,\tau}$ 分别为换热器在时段 τ 的吸热功率和放热功率； $H_{CAES,st}$ 和 $H_{CAES,sp,t}$ 分别为AA-CAES电站在 t 时段的储热功率和供热功率。

AA-CAES 电站单位时段 t 的最大供冷量可表示为：

$$\bar{C}_{CAES,t} = \dot{m}_{g,t} c_{p,air} (T_{g,n_g,in} \beta_{g,n_g}^{\gamma-1/\gamma} - T_0) \quad (4)$$

式中： $c_{p,air}$ 为空气的等压比热容； γ 为空气的比热比； n_g 为透平膨胀机级数； $T_{g,n_g,in}$ 为进入末级膨胀机的空气温度； β_{g,n_g} 为末级膨胀机的膨胀比； T_0 为环境温度。式(4)中的最大供冷量表示末级透平排出的冷气完全用于供冷时的供冷量^[18]。

多能联供模式下，AA-CAES 电站的运行约束包括压缩功率上下限约束、发电功率上下限约束、运行工况约束、储气室气压上下限约束和储热器储热量上下限约束，具体表达式见文献[6]。此外，还包括储热功率上限约束、供热功率上限约束、供冷功率上限约束，分别如式(5)–(7)所示。

$$0 \leq H_{CAES,st,t} \leq \bar{H}_{CAES,st} \quad (5)$$

$$0 \leq H_{CAES,sp,t} \leq \bar{H}_{CAES,sp} \quad (6)$$

$$0 \leq C_{CAES,t} \leq \bar{C}_{CAES} \quad (7)$$

式中： $\bar{H}_{CAES,st}$ 、 $\bar{H}_{CAES,sp}$ 、 \bar{C}_{CAES} 分别为AA-CAES电站的最大储热功率、供热功率、供冷功率； $C_{CAES,t}$ 为AA-CAES电站在时段 t 的供冷功率。

日前调度完成后，储气室和储热器内需要维持一定量的储气气压和储热量以保障未来24h后的系统运行。因此，设置约束如式(8)、(9)所示，即调度末时段的储气室气压 $p_{st,T}$ 和储热器储热量 $Q_{HS,T}$ 分别等于初始时段的储气室气压 p_0 和储热器储热量 $Q_{HS,0}$ 。

$$p_{st,T} = p_0 \quad (8)$$

$$Q_{HS,T} = Q_{HS,0} \quad (9)$$

3 微型综合能源系统优化调度模型

本文所提出的微型综合能源系统优化调度模

型需要能够制定次日24时段各调度资源的出力计划，包括燃气轮机的发电出力计划、风电出力计划(允许弃风)、电网购电功率计划、电制冷机制冷功率计划、燃气锅炉供热功率计划、余热回收锅炉供热计划、吸附式制冷机供冷功率计划、AA-CAES 储能的压缩/发电功率计划以及储热/供热功率计划。

需要说明的是，本文假设微型综合能源系统尽量满足自给自足，并不向外售电。

3.1 目标函数

本文以最小化微型综合能源系统的总运行成本为目标函数，微型综合能源系统的总运行成本由购电成本 C_{Ele} 和天然气购置成本 C_{Gas} 组成。本文调度模型的目标函数表示如下：

$$\min(C_{Ele} + C_{Gas}) \quad (10)$$

$$C_{Ele} = \sum_{t=1}^T P_{Grid,t} \cdot p_{Ele} \cdot \Delta t \quad (11)$$

$$C_{Gas} = \sum_{t=1}^T (F_{mt,t} + F_{bt,t}) \cdot p_{Gas} \cdot \Delta t \quad (12)$$

式中： T 为总调度时段数； $P_{Grid,t}$ 为 t 时段从电网购电的电功率； $F_{mt,t}$ 和 $F_{bt,t}$ 分别表示微型燃气轮机和燃气锅炉在 t 时段的天然气耗量； p_{Ele} 和 p_{Gas} 分别为电价和天然气价格。

3.2 约束条件

1) 系统约束。

系统约束主要包含冷、热、电3种能流的功率平衡约束，表达式分别如下：

$$C_{ec,t} + C_{ac,t} + C_{CAES,t} = C_{L,t} \quad (13)$$

$$H_{wh,t} + H_{bt,t} + H_{CAES,sp,t} = H_{CAES,st,t} + H_{L,t} + H_{ac,t} \quad (14)$$

$$P_{Grid,t} + P_{WT,t} + P_{CAESG,t} + P_{mt,t} = P_{CAESC,t} + P_{ec,t} + P_{L,t} \quad (15)$$

式中： $C_{ec,t}$ 和 $C_{ac,t}$ 分别为 t 时段电制冷机和吸附式制冷机的供冷功率； $C_{L,t}$ 为 t 时段的冷负荷； $H_{wh,t}$ 和 $H_{bt,t}$ 分别为 t 时段余热回收锅炉和燃气锅炉的释热功率； $H_{L,t}$ 为 t 时段的热负荷； $H_{ac,t}$ 为 t 时段吸附式制冷机的耗热功率； $P_{WT,t}$ 和 $P_{mt,t}$ 分别表示 t 时段的风电出力和燃气轮机出力； $P_{ec,t}$ 为电制冷机在 t 时段的耗电功率； $P_{L,t}$ 为 t 时段的电负

荷; $P_{CAESG,t}$ 、 $P_{CAESC,t}$ 分别为 A-CAES 电站在 t 时段的发电功率和压缩功率。

由于微型综合能源系统通常容量较小, 电网可以直接作为其备用电源, 以应对由风电和负荷预测误差带来的功率不平衡, 因此, 本文调度模型中不考虑系统备用容量约束。

2) 微型燃气轮机约束。

微型燃气轮机是实现冷热电联供型微电网的核心设备之一, 微型燃气轮机的燃料耗费可直接用一次函数^[1]近似表示:

$$F_{mt,t} = \alpha P_{mt,t} + \beta u_{mt,t} \quad (16)$$

式中: α 和 β 均为燃气轮机的天然气耗量系数;

$u_{mt,t}$ 为微型燃气轮机启停状态的二进制变量,

$u_{mt,t} = 1, 0$ 分别表示微型燃气轮机运行、停止。

微型燃气轮机的单位时间排气余热回收量^[1]表示为:

$$H_{mt,t} = P_{mt,t} \eta_{re} / \eta_c \quad (17)$$

式中: $H_{mt,t}$ 为 t 时段微型燃气轮机的单位时间余热回收量; η_{re} 和 η_c 分别为微型燃气轮机的余热回收效率和燃气轮机发电效率。

微型燃气轮机出力上下限约束表示为:

$$u_{mt,t} P_{mt} \leq P_{mt,t} \leq u_{mt,t} \bar{P}_{mt} \quad (18)$$

式中 P_{mt} 和 \bar{P}_{mt} 分别为微型燃气轮机的出力下限和上限。

3) 燃气锅炉约束。

燃气锅炉耗气量与释热量间的关系如式(19)所示; 燃气锅炉的出力上下限约束如式(20)所示。

$$H_{b,t} = F_{b,t} a_b \quad (19)$$

$$0 \leq H_{b,t} \leq \bar{H}_b \quad (20)$$

式中: $F_{b,t}$ 为 t 时段燃气锅炉的天然气耗气量; a_b 为燃气锅炉的释热系数; \bar{H}_b 为燃气锅炉的释热功率上限。

4) 余热回收锅炉约束。

余热锅炉将燃气轮机产生的余热收集起来, 其输出功率与燃气轮机排气热量有关。

$$\bar{H}_{wh,t} = H_{mt,t} \eta_{wh} \quad (21)$$

$$0 \leq H_{wh,t} \leq \bar{H}_{wh,t} \quad (22)$$

式中: η_{wh} 为余热回收锅炉的集热效率; $\bar{H}_{wh,t}$ 为余热回收锅炉的释热功率上限。

5) 电制冷机约束。

电制冷机制冷功率和输入电功率间的关系如式(23)所示; 制冷功率上下限约束如式(24)所示。

$$C_{ec,t} = P_{ec,t} \eta_{ec} \quad (23)$$

$$0 \leq P_{ec,t} \leq \bar{P}_{ec} \quad (24)$$

式中: η_{ec} 为电制冷机的制冷效率; \bar{P}_{ec} 为电制冷机的输入功率上限。

6) 吸附式制冷机约束。

吸附式制冷机的供冷功率可由式(25)计算得到; 供冷功率上下限约束如式(26)所示。

$$C_{ac,t} = H_{ac,t} \eta_{ac} \quad (25)$$

$$0 \leq C_{ac,t} \leq \bar{C}_{ac} \quad (26)$$

式中: η_{ac} 为吸附式制冷机效率; \bar{C}_{ac} 为吸附式制冷机的供冷功率上限。

此外, AA-CAES 电站的调度约束也需要在调度模型中被考虑。

本文所提出的微型综合能源系统优化调度问题为混合整数线性规划问题, 本文采用 CPLEX 对该问题进行求解。

4 算例分析

4.1 算例参数

本文基于天津中新生态城智能电网园区内的冷热电负荷数据开展算例分析。日前冷热电负荷预测曲线如图3所示, 系统日前风电出力预测曲

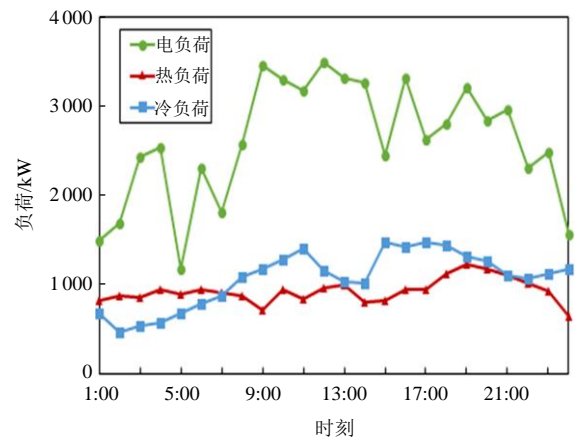


图3 冷热电负荷预测曲线

Fig. 3 Forecast curves of cooling, heating and power load

线如图 4 所示。系统调度资源的调度参数^[4,19]如表 1 所示，AA-CAES 电站的调度参数^[14]如表 2 所示。本文电价采用峰谷电价，系统夜晚 0:00 至 8:00 时售电价格较低，为 0.2 元/(kW·h)，其余时间段售电价格为 0.5 元/(kW·h)。天然气的价格为 2.20 元/m³^[1]。

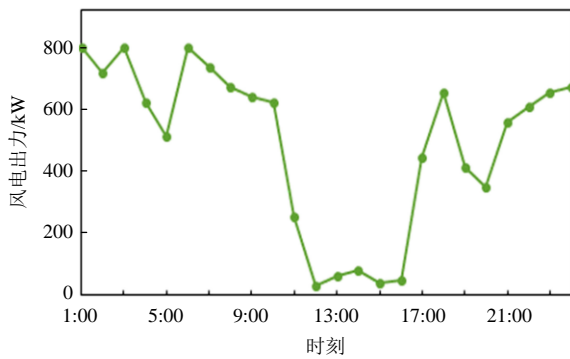


图 4 风电出力预测曲线

Fig. 4 Forecast curves of wind power output

表 1 系统调度资源参数

Fig. 1 Parameters of system scheduling resources

参数	数值	参数	数值
\bar{P}_{mt} /kW	1 000	a_b /(kW·m ⁻³)	8.73
P_{mt} /kW	100	\bar{H}_b /kW	1 000
α /(kW·m ⁻³)	2.67	η_{ec}	2.6
β /m ³	11.43	η_{wh}	0.8
η_{re}	0.8	\bar{C}_{ac} /kW	600
η_{ac}	1.2	\bar{P}_{ec} /kW	400
η_c	0.8		

表 2 AA-CAES 电站调度参数

Fig. 2 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 ³	7 200

4.2 结果分析

本文设置了 4 个场景来对比分析 AA-CAES 电站为微型综合能源系统带来的效益。场景 1，假设系统中不含 AA-CAES 电站；场景 2，假设系统含 AA-CAES 电站，但 AA-CAES 电站只参与电能流优化调度；场景 3，假设系统含 AA-CAES 电站，且 AA-CAES 电站能参与热、电双能流的优化调度；场景 4，假设系统含 AA-CAES 电站，且 AA-CAES 电站能够同时参与冷、热、电 3 种能流形式的优化调度。

表 3 为 4 种场景下的各项成本。由表 3 可以看出，当 AA-CAES 电站参与微型综合能源系统优化后，系统总运行成本显著降低：当 AA-CAES 电站分别参与电能流、电热双能流和冷热电三能流的优化调度后，系统总运行成本分别下降了 1.94%、32.03% 和 36.38%。这表明，AA-CAES 电站的热电联储/联供能力及其供冷能力能够有效提升微型综合能源系统的运行经济性。需要说明的是，由于 AA-CAES 电站的循环效率较低(约 53%)，且系统未出现弃风问题，因此，当 AA-CAES 电站仅参与电能流优化调度时，系统总能耗有所增加，其带来的经济效益并不明显。

表 3 各场景下的各项成本

Fig. 3 Costs of each scenario

场景	购电成本/元	购天然气成本/元	总成本/元
1	23 967	25 580	49 547
2	23 006	25 580	48 586
3	25 351	8 325	33 676
4	25 512	6 009	31 521

图 5—7 分别展示了一天中各场景下各资源的电耗能、热供能和冷供能分布情况。由图 5 可以看出，当 AA-CAES 参与系统优化调度后，系统总的电耗能明显上升，场景 2、3、4 中的全天总电耗能分别比场景 1 高 3.32、5.63、5.49 MW·h，这主要是由于 AA-CAES 电站的“电到电”效率相对较低，因此，AA-CAES 电站参与系统优化调度后，系统的总电耗能可能会有一定程度的增加。但是由于系统实行峰谷电价，AA-CAES 可以通过“低价储能、高价释能”的方式使得系统获得经济效益，因此，虽然 AA-CAES 参与调度后，系统总电耗能增加，但系统总运行成本有所

降低(如表 3 所示)。

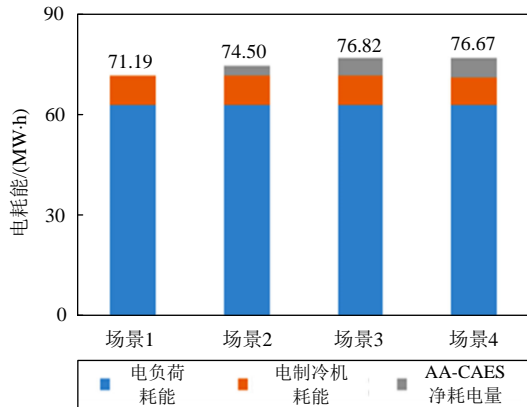


图 5 一天中各场景下各资源的电耗能

Fig. 5 Power consumption of resources in each scenario throughout the day

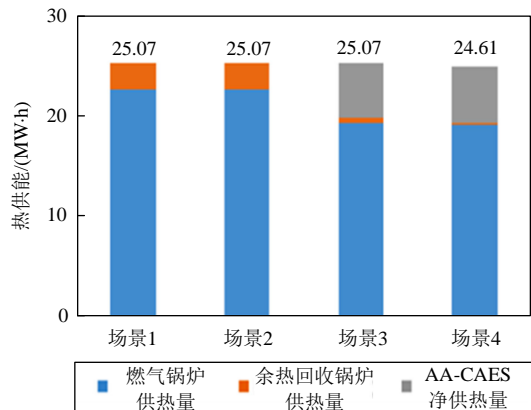


图 6 一天中各场景下各资源的热供能

Fig. 6 Heat supply of resources in each scenario throughout the day

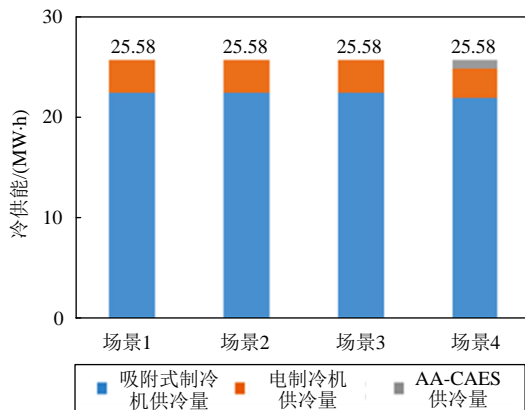


图 7 一天中各场景下各资源的冷供能

Fig. 7 Cool supply of resources in each scenario throughout the day

此外,由图 5 还可以看出,当 AA-CAES 参与热能流和冷能流调度后,AA-CAES 电站的净

耗电量增加了。这主要是由于 AA-CAES 系统储热器的主要热量来源之一是空气压缩过程的压缩热,因此,为了提升 AA-CAES 电站的供热能力,以降低微型综合能源系统运行成本,AA-CAES 系统需要更长时间的压缩来获得更多压缩热。

由图 6 可以看出,当 AA-CAES 参与供热后,燃气锅炉和余热回收装置的供热量均明显降低,因此,场景 3 中的天然气购置成本明显低于场景 1(如表 3 所示)。此外,由于燃气锅炉具有较高的能量转换效率,其单位天然气供热成本较低,因此,燃气锅炉是系统中最主要的热量来源。

由图 7 可以看出,当 AA-CAES 电站参与供冷后,吸附式制冷机和电制冷机的供冷量均有所下降,因此,场景 4 中的电耗能和热耗能均低于场景 3(如图 5、6 所示)。因此,系统总成本进一步降低(如表 3 所示)。

各场景下,AA-CAES 电站的压缩(发电)功率、充放电时换热器的换热功率、储气室气压、储热量、AA-CAES 电站与外界的热量交换功率和供冷功率分别如图 8—13 所示。

图 8 中,负值、正值分别表示 AA-CAES 压缩功率、发电功率;图 9 中,负值、正值分别表示 AA-CAES 电站处于发电、压缩工况时换热器的换热功率;图 12 中,负值表示 AA-CAES 电站从外界热源吸热的功率,正值表示 AA-CAES 电站向外界热负荷供热的功率。

由图 8—13 可以看出,采用本文优化调度模型,AA-CAES 电站能在其正常运行区间内运行。

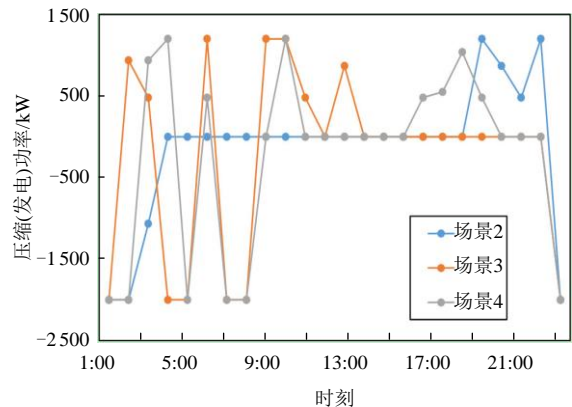


图 8 各场景下 AA-CAES 压缩(发电)功率

Fig. 8 Compression (generation) power of AA-CAES in each scenario

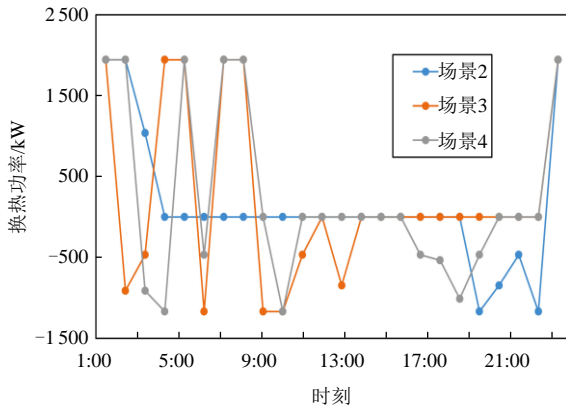


图 9 各场景下换热器的换热功率

Fig. 9 Heat transfer power of heat exchangers in each scenario

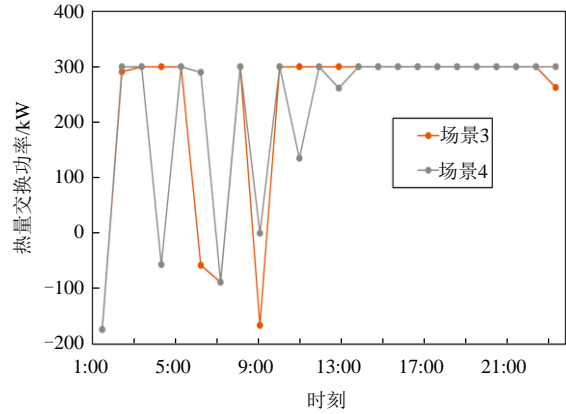


图 12 AA-CAES 与外界的热量交换功率

Fig. 12 Heat exchange power between AA-CAES and the outside

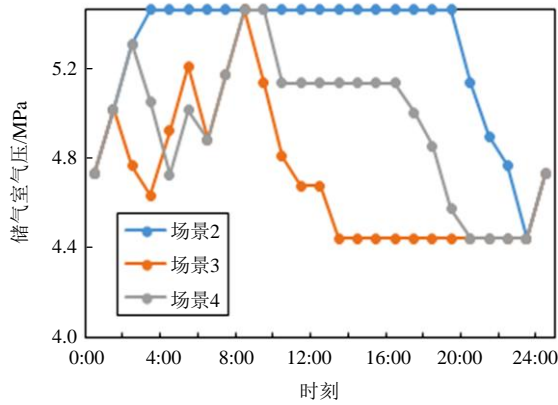


图 10 各场景下 AA-CAES 储气室气压

Fig. 10 Air pressure of AA-CAES gas storage chamber in each scenario

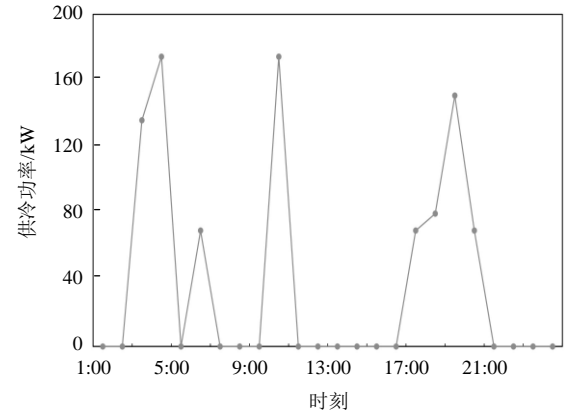


图 13 AA-CAES 供冷功率

Fig. 13 Cool supply power of AA-CAES

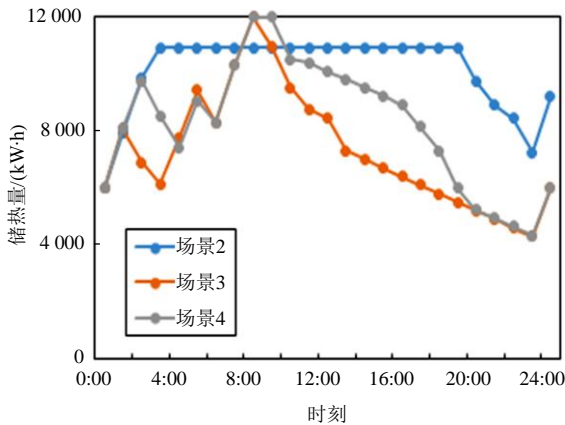


图 11 各场景下 AA-CAES 储热量

Fig. 11 Heat storage of AA-CAES in each scenario

5 结论

基于 AA-CAES 电站的实际热力学过程，构建了 AA-CAES 电站的冷热电多能流联合调度约

束模型。在此基础上，提出了含 AA-CAES 电站的微型综合能源系统优化调度策略。仿真算例结果表明：

1) 由于 AA-CAES 电站的“电到电”效率相对较低，AA-CAES 电站参与系统优化调度后，系统的总电耗能可能会有一定程度的增加。对于无弃风问题的系统，AA-CAES 电站仅参与电能流调度，所带来的经济效益相对较低。

2) AA-CAES 电站具有冷热电联供的独特优势，其参与综合能源系统的优化运行后，能够减少系统其他供热/供冷装置的耗能，提升系统运行经济性。

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): 1726-1734.

- [2] 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): 3150-3160.
- [3] 王灿, 别朝红, 潘超琼, 等. 考虑期望损失的综合能源系统故障智能筛选和排序方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(21): 44-55.
- [4] 吴鸣, 骆钊, 季宇, 等. 基于模型预测控制的冷热电联供型微网动态优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(24): 7174-7184.
- [5] Mohammadi M, Noorollahi Y, Mohammadi-Ivatloo B, et al. Optimal management of energy hubs and smart energy hubs: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 89: 33-50.
- [6] 李姚旺, 苗世洪, 尹斌鑫. 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.
- [7] 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.
- [8] Drury E, Denholm P, Sioshansi R. The value of compressed air energy storage in energy and reserve markets[J]. Energy, 2011, 36(8): 4959-4973.
- [9] Zhang J, Li K J, Wang M, et al. A Bi-level program for the planning of an islanded microgrid including CAES[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(4): 2768-2777.
- [10] 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.
- [11] 李瑞, 陈来军, 梅生伟, 等. 先进绝热压缩空气储能电站日前电力市场主从博弈竞标策略[J]. 控制理论与应用, 2018, 35(5): 662-667.
- [12] 严毅, 张承慧, 李珂, 等. 含压缩空气储能的冷热电联供微网优化运行策略[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(23): 158-170.
- [13] 白珈于, 薛小代, 陈来军, 等. 先进绝热压缩空气储能热电联供模式下的运行可行域分析[J]. 电力自动化设备, 2019(8): 79-112.
- [14] Luo X, Wang J H, Krupke C, et al. Modelling study, efficiency analysis and optimization of large-scale adiabatic compressed air energy storage systems with low-temperature thermal storage[J]. Applied Energy, 2016, 162: 589-600.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 张远, 杨科, 李雪梅, 等. 先进绝热压缩空气储能的冷热电输出特性研究[J]. 热能动力工程, 2013, 28(2): 134-138.
- [19] 徐青山, 曾艾东, 王凯, 等. 基于 Hessian 内点法的微型能源网日前冷热电联供经济优化调度[J]. 电网技术, 2016, 40(6): 1657-1665.

收稿日期: 2019-10-16.

作者简介:



李姚旺

李姚旺(1993), 男, 博士研究生, 研究方向为压缩空气储能系统、电力系统优化调度、综合能源系统, yaowang_li@126.com;



苗世洪

苗世洪(1963), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统保护与控制、压缩空气储能系统, 本文通信作者, shmiao@hust.edu.cn。

(责任编辑 尚彩娟)