



基于抽水压缩空气储能的综合能源系统优化配置和运行策略研究

孙昊¹, 李瑞雄^{1,2}, 郭子奥¹, 丁义博¹, 蔡旭超^{1,2}, 孙旭杰¹, 王焕然^{1,2}

(¹西安交通大学能源与动力工程学院, ²西安交通大学未来技术学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 为提高综合能源系统内能源利用效率, 促进发电侧新能源技术应用, 更好地满足用能需求, 本工作构建了含有抽水压缩空气储能模块的综合能源系统模型, 基于某地区典型日运行数据, 给出2种运行模式, 分析综合能源系统的运行特性, 并依据性能评价指标探究储能系统内各模块的容量配置对系统运行的影响。研究结果表明, 在园区内配置含有抽水压缩空气储能模块的储能系统, 能有效提高园区内能量自足率, 峰放谷存模式下可达到最大值约98%, 而在内部供电优先模式下可达到100%, 实现完全自给自足, 不向外部电网取电; 然而, 储能模块容量的增加会导致储能系统综合效率下降。以电池模块容量为300 kWh为例, 峰放谷存模式下, 储能系统综合效率为88.8%~68.6%, 内部供电优先模式下, 储能系统综合效率为88.9%~73.1%; 在该典型日下, 采用峰放谷存模式相较于内部供电优先模式, 能获得更高的盈利水平, 前者最大盈利为4817.51元, 后者则为4407.47元。本研究旨在为综合能源系统建设提供一条新的思路, 为抽水压缩空气储能技术的应用和配置提供新的方法。

关键词: 综合能源系统; 抽水压缩空气储能; 运行特性; 容量配置

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.1070

中图分类号: TK 02

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 04-1346-11

Study on the optimal configuration and operation strategy of the integrated energy system based on pumped hydraulic compressed air energy storage

SUN Hao¹, LI Ruixiong^{1,2}, GUO Zi'ao¹, DING Yibo¹, CAI Xuchao^{1,2}, SUN Xujie¹,
WANG Huanran^{1,2}

(¹School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, ²School of Future Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi, China)

Abstract: To enhance energy utilization efficiency within an integrated energy system (IES), promote the application of new energy technologies on the power generation side, and better meet energy demand, an IES model incorporating a pumped hydraulic compressed air energy storage (PH-CAES) module was developed. Based on typical daily operation data from an industrial park, two operation modes were proposed, and the operational characteristics of the IES were analyzed. In addition, the influence of capacity configuration of each module within the energy storage system on overall system performance was investigated using performance evaluation indicators. The results show that incorporating a PH-CAES-based

收稿日期: 2025-12-01; 修改稿日期: 2025-12-19。

第一作者: 孙昊 (1994—), 男, 博士研究生, 研究方向为先进物理储能, E-mail: hallesun@stu.xjtu.edu.cn; 通信作者: 李瑞雄, 副教授, 研究方向为先进物理储能、流动减阻, E-mail: ruixiong.li@xjtu.edu.cn。

引用本文: 孙昊, 李瑞雄, 郭子奥, 等. 基于抽水压缩空气储能的综合能源系统优化配置和运行策略研究[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(4): 1346-1356.

Citation: SUN Hao, LI Ruixiong, GUO Zi'ao, et al. Study on the optimal configuration and operation strategy of the integrated energy system based on pumped hydraulic compressed air energy storage[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(4): 1346-1356.

energy storage system in the industrial park can effectively improve the park's energy self-sufficiency rate. Under the peak-load shifting and valley charging mode, the maximum self-sufficiency rate can reach approximately 98%, while under the internal power supply priority mode, it can reach 100%, achieving complete self-sufficiency without relying on the external grid. However, increasing the capacity of energy storage modules leads to a reduction in the overall efficiency of the energy storage system. Taking a battery module capacity of 300 kWh as an example, the overall efficiency of the energy storage system under the peak-load shifting and valley charging mode ranges from 88.8%—68.6%, while under the internal power supply priority mode, it ranges from 88.9%—73.1%. For the selected typical day, the peak-load shifting and valley charging mode yields higher economic benefits than the internal power supply priority mode. The maximum profit under the former mode is 4817.51 yuan, whereas that under the latter mode is 4407.47 yuan. This study provides a new approach for the construction of integrated energy systems and offers a reference for the application and capacity configuration of PH-CAES technology.

Keywords: integrated energy system(IES); pumped hydraulic compressed air energy storage (PH-CAES); operational characteristics; capacity configuration

当前, 日益严峻的能源危机和环境问题正在引发全球性能源革命^[1-2]。综合能源系统(integrated energy system, IES)指在一定的区域内整合多种能源并利用先进的管理模式, 实现多种能源在同一个能源系统下的协调、优化运行^[3-4], 以此提升系统内的能源利用效率, 促进同一个区域内各能源子系统间的协调发展, 更好地满足用能需求。综合能源系统建设目前正处于快速发展期^[5-6], 其中含有可再生能源的综合能源系统需配置储能系统以实现高效运行。目前, 与之匹配的储能系统容量优化配置理论处于积极探索和研究阶段。

在所有种类的储能系统中, 目前只有压缩空气储能(compressed air energy storage, CAES)系统和抽水蓄能系统可适用于较大规模长时储能的场景^[7-11]。其中, CAES系统具有成本低、对生态环境影响小等优点, 受到了越来越多的关注^[12-13]。但其也具有效率较低、发热量大、变工况运行困难等缺点。国内外学者将CAES技术与抽水蓄能技术相结合提出抽水压缩空气储能(pumped hydraulic compressed air energy storage, PH-CAES)系统^[14-16], 其作为一种新型压缩空气储能技术, 具有较传统CAES系统更高的效率和更广的适用范围, 在综合能源系统中的应用前景非常乐观。

国内外在综合能源系统的研究、工程建设方面, 以及对于其中储能系统的研究方面已经进行了

卓有成效的工作。Yin等^[17]提出了一种面向城市综合能源系统的蓄热绝热压缩空气储能(A-CAES)经济性与可靠性联合优化双层规划模型, 构建了同时包含运行成本与可靠性成本的新型综合可靠性评价指标, 并通过规划-调度两级优化及多场景对比分析, 证明在引入A-CAES及冷热储能后, 可在满足系统供能可靠性的前提下显著降低经济成本和总成本, 实现城市综合能源系统经济性与可靠性的协调提升。Venkataramani等^[18]构建了面向集成电力与供热系统的热电联产调度模型, 将具备非设计运行特性的先进绝热压缩空气储能(AA-CAES)、电热器及风电场统一纳入框架中, 采用基于模糊机会约束的混合整数线性规划方法来表征风电输出和负荷的不确定性, 并刻画AA-CAES在电-热双侧的储放过程及其旋转备用能力。基于改进IEEE 118节点系统的算例表明, 引入AA-CAES及配套电热设备后, 在满足功率平衡、旋转备用与设备运行约束的前提下, 可显著降低系统运行成本, 不同场景下总成本最高减少约44533美元, 风电削减罚金最多降低63.4%, 从而有效提升风电消纳水平并增强综合电热系统的运行灵活性与可靠性。Rouindej等^[19]提出了一种基于用户中心设计(UCD)方法的CAES系统设计方案, 旨在优化压缩空气储能系统在未来电网中的应用。该研究主要通过分析加拿大安大略省电网的负荷特性, 提出了“CAES-by-design”的系

统方法,探讨了压缩空气储能系统如何根据电网需求和供应的变化进行定制设计。研究表明,采用此方法设计的A-CAES系统能够有效匹配电网负荷,满足充放电需求,提升了系统的运行灵活性和效率,尤其是在风能等可再生能源的整合过程中。具体而言,研究发现,在特定的负荷需求下,压缩机和涡轮机的容量能够根据实际需求优化配置,提高了系统的经济性和可靠性。Heidari等^[20]构建了多级准等温压缩空气储能(I-CAES)与分布式光伏微电网耦合的时变热力学-技术经济一体化模型,并在瑞士多户住宅场景下利用遗传算法同时优化I-CAES的功率/容量配置及运行策略,以系统研究提升光伏自发自用与移峰填谷的应用潜力。研究表明,在典型多户住宅中,当I-CAES额定功率低于约50 kW时难以实现经济可行,但在高光伏渗透率、需长时段储能的微电网中,得益于功率与能量解耦以及较低的能量相关成本,接近5 kW/30 kWh的优化配置可获得78%~81%的往返效率,并有望相对电池展现出更具成本优势的中长期储能方案。Chen等^[21]设计并实验研究了常压PH-CAES系统,通过实验与理论分析评估了其热性能和效率。研究表明,常压PH-CAES系统在放电阶段的电往返效率为51%,能量密度为0.33 kWh/m³,主要能量损失来自水轮机-发电机单元,其损失占总损失的22%。通过提升水轮机-发电机效率至90%,系统的往返效率可提升至63%。目前综合能源系统概念和PH-CAES技术提出时间不长,研究正处于发展阶段,在综合能源系统与PH-CAES技术的交叉研究领域,存在若干亟待突破的科学瓶颈。从热力学视角分析,现有研究多聚焦于系统经济性优化与结构设计,却忽视了负荷侧动态特性与PH-CAES系统热力学特性的耦合机理。PH-CAES系统的热力学规律对储能单元的多工况适配性与能量转化效率具有决定性影响。在系统架构层面,PH-CAES与综合能源系统的深度集成需突破多能流耦合的技术难题,其内部能源应满足负荷侧需求是必须满足的重要前提之一,这就要求构建出完整的PH-CAES系统能量转换的热力学动态模型,及其与源侧、其他储能模块及负荷侧需求间的动态匹配机制,进而研究综合能源系统整体的运行和优化策略。此类研究的突破将为新型电力系统背景下综合能源系统和PH-CAES技术的工程实践提供理论支撑,不仅有助于

政府部门制定相关政策,推动综合能源系统的建设和应用,也有助于相关的企业和研究机构针对综合能源系统提前布局。

本工作针对国内某一园区特点,提出一种基于抽水压缩空气储能的综合能源系统架构,结合园区新能源发电侧和用户侧负载数据对其中的储能系统进行配置,并结合热力学模型对其进行运行方式分析,验证PH-CAES与化学电池组成的储能系统应用于综合能源系统的可行性,进一步研究储能系统存储容量对综合能源系统关键运行指标的影响。该设计将综合能源系统概念与园区型微网的实际数据相结合,充分发挥PH-CAES技术的独特优势,有效提高园区内的能量自足率;同时,通过采用不同运行方式,系统可以在追求更高盈利水平与实现更高能量自足率之间找到有效平衡,为未来综合能源系统的建设提供一定的参考和借鉴。

1 系统描述和PH-CAES模块

含有PH-CAES模块的综合能源系统组成如图1所示。发电系统包括光伏发电模块、风电发电模块。储能系统由电池储能模块、PH-CAES模块组成。另外,该综合能源系统还通过交流母线与外部电网连通。在内部电力供应不满足负荷时,可以从外部电网取电;相似地,在内部电力供应富余时,可以向外部电网供电。

1.1 抽水压缩空气储能模块

抽水压缩空气储能模块主要由压缩机、泵、压力容器、水轮机和储水池组成,如图2所示。该模

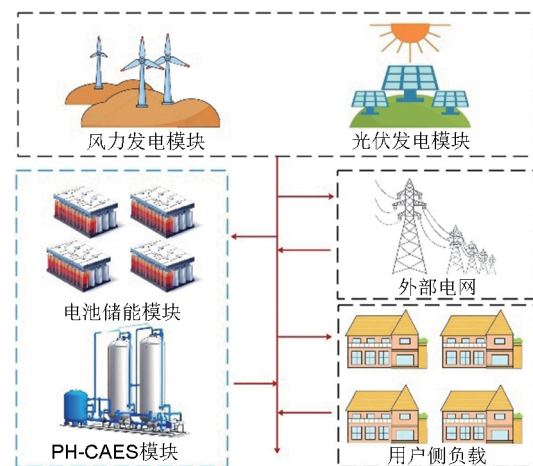


图1 综合能源系统

Fig. 1 Integrated energy system

块的运行分为4个阶段：黑启动阶段、充电阶段、放电阶段和保持阶段。黑启动阶段，压缩机将环境空气压缩到压力容器中。当压力容器内的空气压力达到设计压力时，压缩空气储能准备阶段结束。黑启动阶段只在系统正式投产前运行，并在 PH-CAES 调试或维护后使用。在充电阶段，泵消耗电力，将储水池中的水泵入压力容器。在这一阶段，压力容器内的空气被水推动，体积减小、压力增大。当压力容器的水位达到设计值时，充电阶段结束。当有电力需求时，在高压空气的推动下，压力容器中的带压水被推入水轮机，水轮机推动发电机向外发出电力。当压力容器的水量降到设定值时，放电阶段结束。保持阶段，即抽水压缩空气储能系统处于不充电也不向外放电的状态，此时泵和水轮机都不工作，压力容器内的水位保持稳定。实际运行过程中，可通过储水池中水位获知压力容器内水位，从而控制模块工作状态。

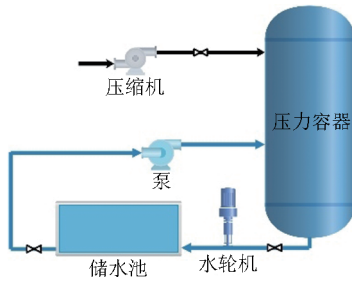


图2 PH-CAES 模块
Fig. 2 PH-CAES module

1.2 充电阶段能量和传热模型

在充电阶段，泵把环境水泵入压力容器，使压力容器内的空气被压缩。此过程中，电能被转换为空气压力势能和储存在水与空气中的热量。流过泵的流量为^[22]：

$$Q_p = P_p \eta_p / (9.81 H_p) \quad (1)$$

式中， Q_p 为水体积流量， m^3/s ； P_p 为泵功率， kW ； η_p 为泵效率； H_p 为扬程， m 。

在压力容器内，空气被水压缩，压强增大，温度上升，传热模型如图3所示。

对于压力容器内的气体，其能量方程式为^[23]

$$m_a c_{v,a} \frac{dT_a}{dt} = -h_{a,w} A_{a,w} (T_a - T_w) - UA_a (T_a - T_{amb}) - p_a \frac{dV_a}{dt} \quad (2)$$

$$UA_a = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_{i,a} A_{i,a}}\right) + \left(\frac{t_T}{k_T A_{ave,a}}\right) + \left(\frac{1}{h_o A_{o,a}}\right)} \quad (3)$$

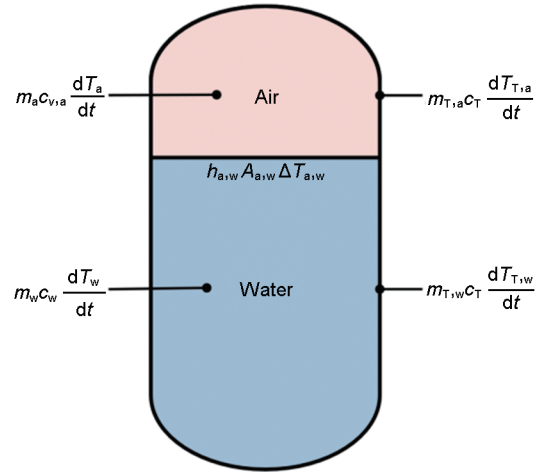


图3 传热模型
Fig. 3 Heat transfer model

式中， m_a 为空气质量， kg ； $c_{v,a}$ 为空气比热容， $J/(kg \cdot K)$ ； T_a 为空气温度， K ； $A_{a,w}$ 为水-气接触面积， m^2 ； $h_{a,w}$ 为水-气传热系数， $W/(m^2 \cdot K)$ ； T_w 为水温， K ； T_{amb} 为环境温度， K ； p_a 为空气压力， Pa ； V_a 为空气体积， m^3 ； $A_{i,a}$ 与 $A_{o,a}$ 分别为空气与液体活塞内壁面和外壁面的接触面积， m^2 ； $h_{i,a}$ 和 h_o 分别为液体活塞内壁面和外壁面与空气的传热系数， $W/(m^2 \cdot K)$ ； t_T 为液体活塞壁面厚度， m ； k_T 为液体活塞壁面热导率， $W/(m \cdot K)$ ； $A_{ave,a}$ 为液体活塞内壁面和外壁面与空气的平均接触面积， m^2 。

对于压力容器内的液体，其能量方程式为

$$m_w c_w \frac{dT_w}{dt} = -h_{a,w} A_{a,w} (T_w - T_a) - UA_w (T_w - T_{amb}) + \dot{m}_w c_w (T_{amb} - T_w) \quad (4)$$

$$UA_w = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_{i,w} A_{i,w}}\right) + \left(\frac{t_T}{k_T A_{ave,w}}\right) + \left(\frac{1}{h_o A_{o,w}}\right)} \quad (5)$$

式中， m_w 为水质量， kg ； c_w 为水比热容， $J/(kg \cdot K)$ ； $A_{i,w}$ 与 $A_{o,w}$ 分别为水与液体活塞内壁面和外壁面的接触面积， m^2 ； $h_{i,w}$ 和 h_o 分别为液体活塞内壁面和外壁面与水的传热系数， $W/(m^2 \cdot K)$ ； $A_{ave,w}$ 为液体活塞内壁面和外壁面与水的平均接触面积， m^2 。

压力容器罐壁与气体接触的能量方程式为

$$m_{T,a} c_T \frac{dT_{T,a}}{dt} = h_{i,a} A_{i,a} (T_a - T_{T,a}) - h_o A_{o,a} (T_{T,a} - T_{amb}) \quad (6)$$

式中，左边项是 t 时刻对应质量中包含能量的时间变化率，右边第 1 项是能量通过内部气体热传

递的净速率,右边第2项是能量通过与外部环境空气热传递的净速率。

相似地,与液体接触的罐壁能量方程式为

$$m_{T,w}c_T \frac{dT_{T,w}}{dt} = h_{i,w}A_{i,w}(T_w - T_{T,w}) - h_oA_{o,w}(T_{T,w} - T_{amb}) \quad (7)$$

其中,左边项是 t 时刻对应质量中包含的能量时间变化率,右边第1项是能量通过内部液体的热传递的净速率,右边第2项是能量通过与外部环境空气的热传递的净速率。

1.3 放电阶段能量和传热模型

在放电阶段,压力容器内的液体被高压空气压入水轮机内,推动水轮机透平转动,带动发电机发电。在该过程中,压力容器内空气压力降低。流过水轮机的流量为^[24]

$$Q_{ht} = P_{ht}/(9.81H_{ht}\eta_{ht}) \quad (8)$$

式中, Q_{ht} 为水流量, m^3/s ; P_{ht} 为水轮机功率, kW ; H_{ht} 为水头, m ; η_{ht} 为水轮机效率。

在该阶段,压力容器内的传热方程与充电阶段相似。

1.4 保持阶段能量和传热模型

在保持阶段,泵与水轮机停止工作,压力容器内气体与液体体积均保持恒定。此时能量流动仅限于热量传递,包括气体与液体之间、气体与压力容器壁面之间,以及液体与压力容器壁面之间的传热。这些传热方程式与充放电阶段相似。

1.5 能量自足率

能量自足率为

$$\varepsilon = \frac{W_1}{W_L} \quad (9)$$

式中, W_1 为综合能源系统内部向负载供电量(在含有储能模块时,储能模块向负载供电也视为系统内部向负载供电), kWh ; W_L 为综合能源系统内负载消耗电量, kWh 。

1.6 储能系统综合效率

储能系统综合效率为^[25-26]

$$\eta_s = \frac{W_{s,out}}{W_{s,in}} \quad (10)$$

式中, $W_{s,in}$ 为储能系统消耗电量, kWh ; $W_{s,out}$ 为储能系统可输出电量, kWh 。

储能系统消耗电量为

$$W_{s,in} = W_{B,in} + W_{P,in} \quad (11)$$

式中, $W_{B,in}$ 为化学电池模块消耗电量, kWh ; $W_{P,in}$ 为PH-CAES模块消耗电量, kWh 。

相似地,储能系统可输出电量为

$$W_{s,out} = W_{B,out} + W_{B,s}\eta_{B,out} + W_{P,out} + W_{P,s}\eta_{P,out} \quad (12)$$

式中, $W_{B,out}$ 为化学电池模块输出电量, kWh ; $W_{B,s}$ 为化学电池模块剩余电量, kWh ; $\eta_{B,out}$ 为化学电池放电效率; $W_{P,out}$ 为PH-CAES模块输出电量, kWh ; $W_{P,s}$ 为PH-CAES模块剩余电量, kWh ; $\eta_{P,out}$ 为PH-CAES系统放电效率。

1.7 综合能源系统运行模式

目前,已建成的综合能源系统依据建设目的不同,主要有2种运行模式,分别为峰放谷存模式和系统内部供电优先模式。

在峰放谷存模式下,储能系统在低谷电价时优先保持最大功率充电,直至储能系统电量达到最大值;在平峰电价时,储能系统优先保证负载需求;在高峰电价时,储能系统在保证负载需求的前提下,向外部电网供电。该运行模式常见于追求更高盈利水平的综合能源系统中。

在系统内部供电优先模式下,储能系统在任何时间都尽量减少从主电网取/放电。在低谷电价时,仅储能系统电量不足最大值,且综合能源系统内部发电功率小于储能系统最小充电功率时,储能系统从外部电网取电。该运行模式常见于以削峰填谷、减少对外部电网冲击为目标的综合能源系统中。

在追求更高盈利水平的综合能源系统中,常用峰放谷存模式,旨在优化能源利用效率和经济效益。而在以减少对外部电网冲击为目标的综合能源系统中,系统内部供电优先模式则被广泛应用,以实现削峰填谷和提升电网稳定性的目标。也有部分综合能源系统会根据实际需求,在不同时间段灵活切换至不同的运行模式。不管采用何种运行模式,当综合能源系统内部发电系统和储能系统放电总功率不满足负载需求时,均需要从外部电网取电。受限于压缩空气储能系统工作特性,在必要时,储能系统内部的电池模块会向压缩空气储能模块供电,以确保功率相对稳定。在本工作中,只评价综合能源系统的相关运行和配置,不考虑综合能源系统受政策等影响造成的与外部电网相关的供/取电限制。

2 结果和分析

选取华东某地一风电-光伏园区典型日实际出力数据(如图4所示)进行分析,该地位于华东沿海地区。所选取典型日光伏出力符合光伏典型输出曲线

形状，为近抛物线形状，正午达到最大输出，光伏出力最大值出现在 12:00 前后，约为 600 kW，光伏发电量为 4464.11 kWh。由于地处沿海地区，风力资源较为丰富，但波动较大。在该典型日中，风电出力有较大波动，但大部分时间内风电出力在 200~600 kW 区间内，风电出力最大值在 22:00 前后，峰值约 1350 kW，风电发电总量为 9307.33 kWh。全日约 75% 的时间内风光出力在 400 kW 以上，风光总发电量为 13771.44 kWh。

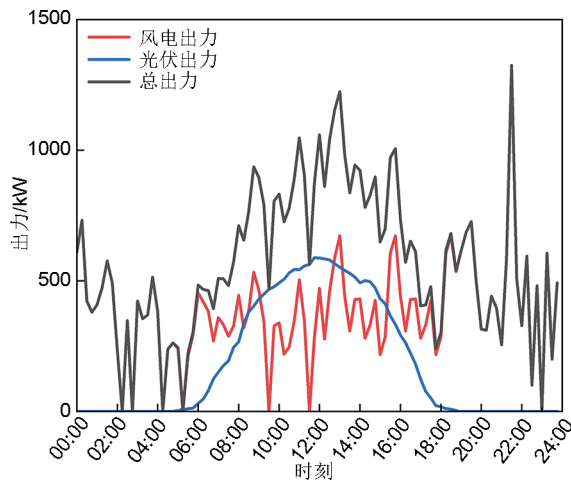


图 4 光伏和风电出力

Fig. 4 Photovoltaic and wind power generation

该园区所在地采取峰谷电价计价模式，为便于计算，本工作上网电价也按此价格计算，具体为：低谷时段，0:00—8:00、22:00—24:00，0.3453 元/kWh；平峰时段，12:00—18:00，0.7674 元/kWh；高峰时段，8:00—12:00、18:00—22:00，1.1512 元/kWh。

未配置储能系统时，该典型日的园区负载和接入外部电网功率数据如图 5 所示。可以看出该园区负载情况呈现出典型的以居民区为主类型，负载出现早中晚 3 个高峰，日间负载高于夜间负载。负载最大值出现在 20:00 前后，负载峰值超过 400 kW。根据电网数据可以看出，受风电波动影响，未配置储能系统时，电网功率波动显著。功率正值表示向外部电网供(送)电，负值则表示从外部电网取电。在该典型日运行中，负载消耗电量总计 8177.21 kWh，系统向外部电网供电 6491.04 kWh 并从外部电网取电 896.81 kWh，能量自足率约为 89.03%，实现盈利 4419.52 元。

基于气象数据，在该园区中配置含有 PH-CAES 模块的储能系统，并将园区电网整合为综合

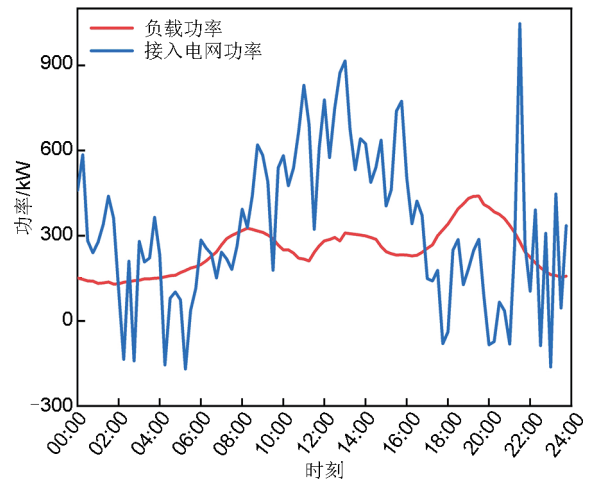


图 5 负载和接入电网功率

Fig. 5 Load and grid-connected power

能源系统的应用平台。结合气象与负载数据，为其配置的储能系统主要输入参数如表 1 所示。

表 1 储能系统主要输入参数

Table 1 The main input parameters of the energy storage system

名称	参数值
PH-CAES 模块输入功率/kW	200
PH-CAES 模块输出功率/kW	200
PH-CAES 模块最大容量/(kWh)	1000
电池模块最大输入功率/kW	200
电池模块最大输出功率/kW	200
电池模块最大容量/(kWh)	1000
压力容器内初始气压/Pa	1000000
压力容器内初始水位/m	2
压力容器内初始气温/K	293.15
压力容器内初始水温/K	293.15
环境大气压/Pa	101325
环境温度/K	293.15

综合能源系统发电功率和接入电网功率数据如图 6 所示。其中，图 6(a)为峰放谷存模式，在该典型日运行中，共向外部电网送电 4719.10 kWh、取电 74.92 kWh，能量自足率为 98%，盈利 4645.01 元。图 6(b)为系统内部供电优先模式，在该典型日运行中，共向外部电网送电 4349.92 kWh、取电 0 kWh，能量自足率为 100%，盈利 3819.04 元。

综合能源系统内配置储能系统功率如图 7 所示。其中，图 7(a)为峰放谷存模式，在该典型日运行中，化学电池模块消耗电量 1843.83 kWh、输出电量 621.78 kWh、剩余电量 1097.13 kWh，PH-CAES 模块消耗电量 2243.78 kWh、输出电量

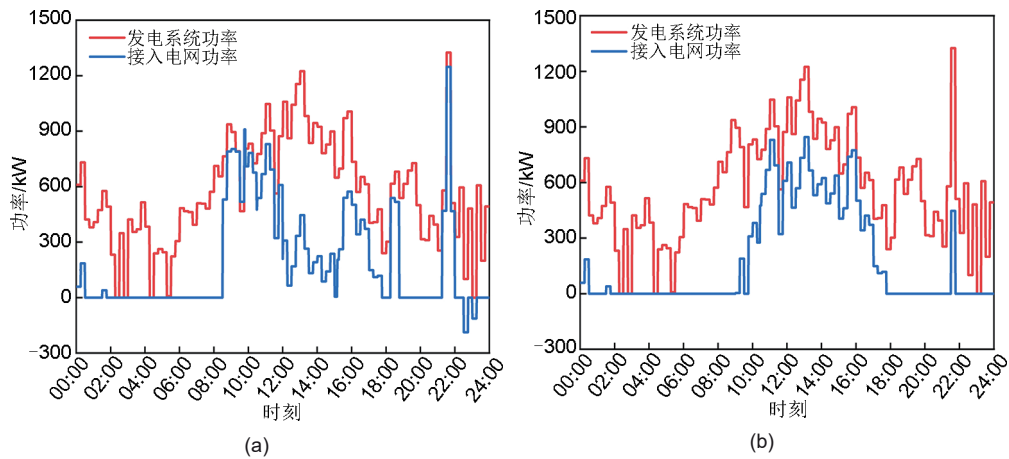


图6 综合能源系统发电系统功率和接入电网功率曲线

Fig. 6 Power of the IES's power system and grid-connected power

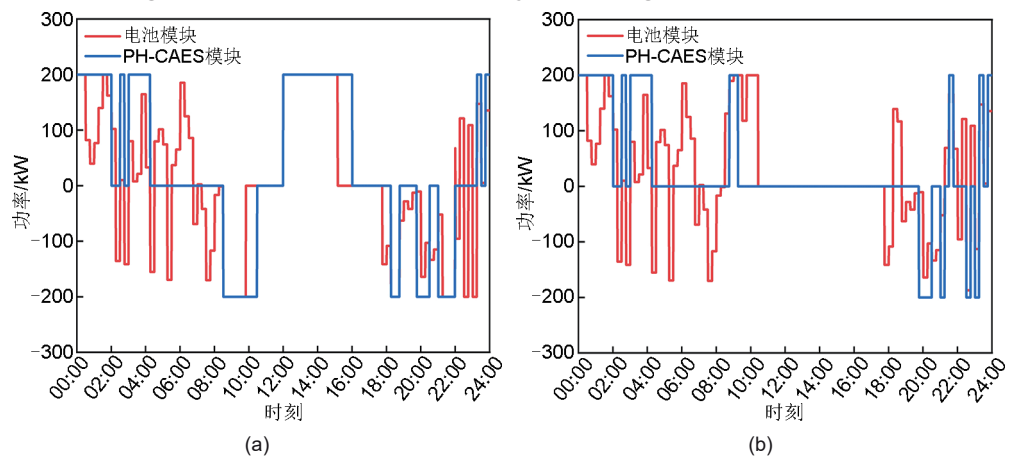


图7 储能系统各模块功率

Fig. 7 Power of each module in the energy storage system

200.11 kWh、剩余电量 1416.02 kWh，储能系统综合效率为 72.12%。图 7(b)为系统内部供电优先模式，在该典型日运行中，化学电池模块消耗电量 1191.12 kWh、输出电量 596.81 kWh、剩余电量 503.34 kWh，PH-CAES 模块消耗电量 950.00 kWh、输出电量 300.00 kWh、剩余电量 312.50 kWh，储能系统综合效率为 75.63%。

PH-CAES 模块的典型日运行情况如图 8 所示。其中，图 8(a)为峰放谷存模式，在该模式下约 16:00，压力容器内达到最高水位为 8.08 m，最大压强约为 4.51 MPa。图 8(b)为系统内部供电优先模式，在该模式下约 9:15，压力容器内达到最高水位为 7.60 m，最大压强约为 3.49 MPa。

在综合能源系统中配置储能系统，其内部 PH-CAES 模块和电池模块容量是需要考虑的关键参数之一。为了深入分析并对比不同储能容量配置对综

合能源系统的影响，本工作给出储能系统内各模块对系统关键参数的影响。

储能系统内 PH-CAES 模块和电池模块容量与能量自足率如图 9 所示。PH-CAES 模块和电池模块容量与综合能源系统能量自足率均呈现出明显的正相关趋势。其中，图 9(a)为峰放谷存模式，在该模式下所能达到的最大值约为 98%，当电池模块容量大于一定数值时，随 PH-CAES 模块容量的增加，能量自足率有小幅下降。这主要是由于在系统运行过程中，为确保系统的稳定运行，有时需要电池模块向 PH-CAES 模块供电。由于 PH-CAES 模块的充/放电效率均低于电池模块，因此会产生一定的能量损失，从而储能模块向负载放出的电量略有减少。选取电池模块容量为 360 kWh 时，PH-CAES 模块容量大于等于 380 kWh 时可达到最高能量自足率，约为 98%。图 9(b)为系统内部供电优先

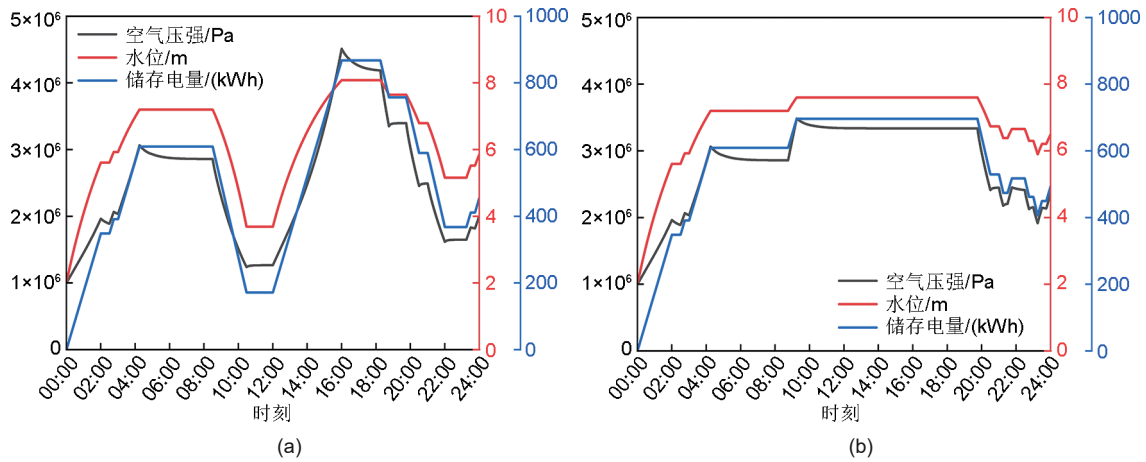


图 8 PH-CAES 模块运行情况
Fig. 8 Operational status of the PH-CAES module

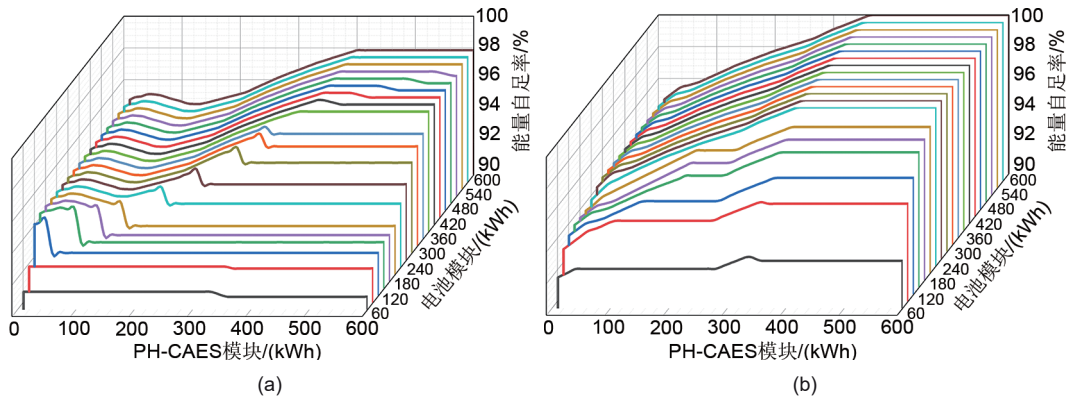


图 9 储能系统容量与能量自足率
Fig. 9 Energy storage system capacity and energy self-sufficiency rate

模式，选取电池模块容量为 360 kWh 时，PH-CAES 模块容量大于等于 330 kWh 时可达最高能量自足率，为 100%。在能量自足率达到 100% 时，综合能源系统在该典型日运行中不从外部电网取电。

储能系统内 PH-CAES 模块和电池模块容量与储能系统综合效率如图 10 所示。其中，图 10(a) 为峰放谷存模式，选取电池模块容量为 300 kWh 时，随着 PH-CAES 模块容量由 0 kWh 增大至 600 kWh，储能系统综合效率由 88.76% 降低至 68.63%。图 10(b) 为内部供电优先模式，选取电池模块容量为 300 kWh 时，随着 PH-CAES 模块容量由 0 kWh 增大至 600 kWh，储能系统综合效率由 88.99% 降低至 73.07%。PH-CAES 模块和电池模块容量与综合能源系统效率均呈现出负相关趋势，这主要是由于储能过程中不可避免地存在能量损失，储能容量越大，系统能量损失越多，即系统效

率越低。在储能系统中，电池模块充/放电效率均高于 PH-CAES 模块，因此 PH-CAES 模块容量对储能系统综合效率的影响显著高于电池模块。

储能系统内 PH-CAES 模块和电池模块容量与盈利如图 11 所示。其中，图 11(a) 为峰放谷存模式，图 11(b) 为系统内部供电优先模式。总体而言，两种模式下的盈利情况均呈现波动，但在相同的容量配置下，峰放谷存模式的盈利均高于内部供电优先模式。在峰放谷存模式下，盈利最高点时的容量配置为电池模块 490 kWh、PH-CAES 模块 430 kWh，最大盈利为 4817.51 元；在内部供电优先模式下，盈利最高点时的容量配置为电池模块 310 kWh、PH-CAES 模块 10 kWh，最大盈利为 4407.47 元。

在峰放谷存模式下，若电池模块容量为特定数值时，随 PH-CAES 模块容量的增大，盈利会先经历小幅下滑随后再逐步上升最后再小幅下降。这主

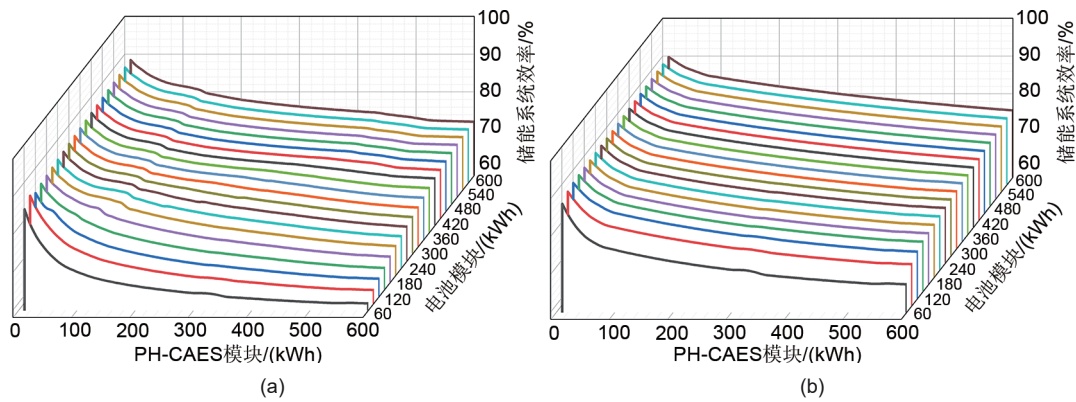


图10 储能系统容量与储能系统综合效率

Fig. 10 Energy storage system capacity and energy storage system efficiency

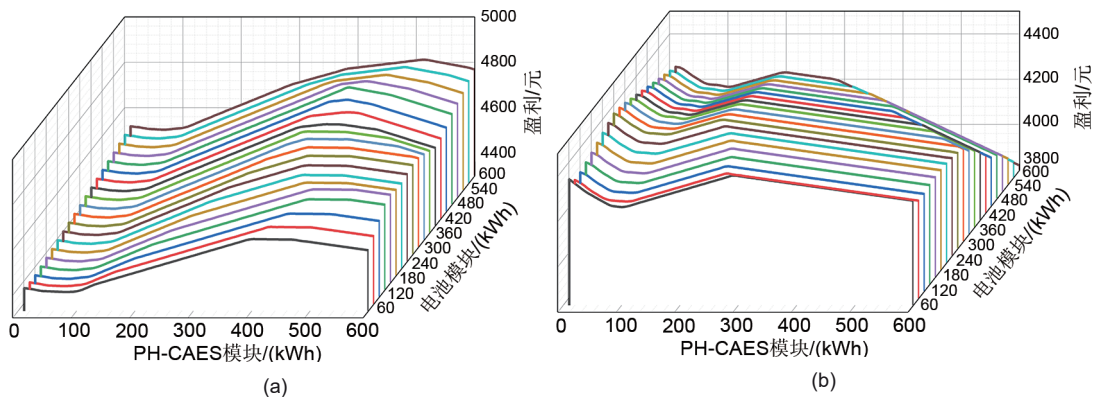


图11 储能系统容量与盈利

Fig. 11 Energy storage system capacity and profitability

要是由于在系统运行过程中,为保证系统的稳定运行,电池模块有时会向PH-CAES模块供电,然而,PH-CAES模块的效率低于电池模块,因此该过程会产生一定的能量损失,进而影响整个综合能源系统向外部电网的供电能力。

在内部供电优先模式下,盈利随各储能模块容量的增加呈现出先增加后减小的趋势。先增加的趋势是由于在一定范围内,储能系统容量的增加可以满足综合能源系统内部削峰填谷的需求,减少高峰电费时段从电网买电。而在储能模块容量达到一定规模后盈利减少,主要是由于此时储能系统容量已经满足削峰填谷的需求,在该模式下设置为尽量减少与外部电网的取/送电,综合能源系统内的富余电量有相当一部分被储存在各储能模块中作为备用,并未向外部电网送电,影响盈利能力。

3 结论

本工作针对综合能源系统中的储能系统配置需

求,根据实际负荷情况对系统中的主要设备和子系统进行了基于热力学的能量评估和容量配置,同时分析了不同运行模式下的储能特性,给出并比较了两种不同的运行模式,结论如下。

(1) 本工作提出的含有抽水压缩空气储能系统的综合能源系统,基于某地园区实际数据,论证了该综合能源系统方案的可行性。在典型日运行中,相比于未配置储能系统,配置容量各1000 kWh的电池模块以及PH-CAES模块,能量自足率由89.03%提高至100%,最大盈利由4419.52元提高至4645.01元。

(2) 在峰放谷存模式下,随着各储能模块容量的增加,系统能量自足率提高,例如当电池模块容量为360 kWh时,PH-CAES模块容量大于380 kWh时可达到最高能量自足率,约为98%;然而,各储能模块容量与储能系统综合效率呈负相关趋势。例如电池模块容量为10 kWh、PH-CAES模块容量为600 kWh时,效率最低约为59.09%;根

据相关计算结果分析,在该模式下运行可以获得更高的盈利水平,最大盈利点为电池模块210 kWh、PH-CAES模块130 kWh时的4817.51元。

(3) 在内部供电优先模式下,系统能量自足率更高。例如当电池模块容量为360 kWh时,PH-CAES模块容量大于等于330 kWh时即可达到最高能量自足率,约为100%;在该模式下各储能模块容量与储能系统综合效率同样呈负相关趋势,例如电池模块容量为10 kWh、PH-CAES模块容量为600 kWh时,效率最低约为61.74%;在该模式下最大盈利点为电池模块310 kWh、PH-CAES模块10 kWh,最大盈利为4407.47元。

参考文献

- [1] 董朝阳,赵俊华,福拴,等.从智能电网到能源互联网:基本概念与研究框架[J].电力系统自动化,2014,38(15):1-11. DOI:10.7500/AEPS20140613007.
DONG C Y, ZHAO J H, FU S, et al. From smart grid to energy Internet: Basic concept and research framework[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(15): 1-11. DOI:10.7500/AEPS20140613007.
- [2] SHAN R, REAGAN J, CASTELLANOS S, et al. Evaluating emerging long-duration energy storage technologies[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 159: 112240. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112240.
- [3] 贾宏杰,穆云飞,余晓丹.对我国综合能源系统发展的思考[J].电力建设,2015,36(1):16-25.
JIA H J, MU Y F, YU X D. Thought about the integrated energy system in China[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(1): 16-25.
- [4] 余晓丹,徐宪东,陈硕翼,等.综合能源系统与能源互联网简述[J].电工技术学报,2016,31(1):1-13. DOI:10.3969/j.issn.1000-6753.2016.01.001.
YU X D, XU X D, CHEN S Y, et al. A brief review to integrated energy system and energy Internet[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(1): 1-13. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6753.2016.01.001.
- [5] 吴建中.欧洲综合能源系统发展的驱动与现状[J].电力系统自动化,2016,40(5):1-7. DOI:10.7500/AEPS20150512001.
WU J Z. Drivers and state-of-the-art of integrated energy systems in Europe[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(5): 1-7. DOI:10.7500/AEPS20150512001.
- [6] 田世明,栾文鹏,张东霞,等.能源互联网技术形态与关键技术[J].中国电机工程学报,2015,35(14):3482-3494. DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.2015.14.002.
TIAN S M, LUAN W P, ZHANG D X, et al. Technical forms and key technologies on energy Internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3482-3494. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2015.14.002.
- [7] LEE J Y, RAMASAMY A K, ONG K H, et al. Energy storage systems: A review of its progress and outlook, potential benefits, barriers and solutions within the Malaysian distribution network [J]. Journal of Energy Storage, 2023, 72: 108360. DOI:10.1016/j.est.2023.108360.
- [8] MATOS C R, CARNEIRO J F, SILVA P P. Overview of large-scale underground energy storage technologies for integration of renewable energies and criteria for reservoir identification[J]. Journal of Energy Storage, 2019, 21: 241-258. DOI:10.1016/j.est.2018.11.023.
- [9] ZHAO J F, OH U J, PARK J C, et al. A review of world-wide advanced pumped storage hydropower technologies[J]. IFAC-PapersOnLine, 2022, 55(9): 170-174. DOI:10.1016/j.ifacol.2022.07.030.
- [10] GUO Z A, ZHANG Y F, CAI X C, et al. Comprehensive performance analysis of a trans-critical CO₂ energy storage system with coupled flexible cold energy storage regulation based on entransy analysis[J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 277: 126897. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2025.126897.
- [11] BAZDAR E, SAMETI M, NASIRI F, et al. Compressed air energy storage in integrated energy systems: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 167: 112701. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112701.
- [12] 徐玉杰,陈海生,刘佳,等.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,2012,32(20):88-95,144.
XU Y J, CHEN H S, LIU J, et al. Performance analysis on an integrated system of compressed air energy storage and electricity production with wind-solar complementary method[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(20): 88-95, 144.
- [13] 刘畅,徐玉杰,胡珊,等.压缩空气储能电站技术经济性分析[J].储能科学与技术,2015,4(2):158-168. DOI:10.3969/j.issn.2095-4239.2015.02.006.
LIU C, XU Y J, HU S, et al. Techno-economic analysis of compressed air energy storage power plant[J]. Energy Storage Science and Technology, 2015, 4(2): 158-168. DOI: 10.3969/j.issn.2095-4239.2015.02.006.
- [14] WANG H R, WANG L Q, WANG X B, et al. A novel pumped hydro combined with compressed air energy storage system[J]. Energies, 2013, 6(3): 1554-1567. DOI:10.3390/en6031554.
- [15] ODUKOMAIYA A, KOKOU E, HUSSEIN Z, et al. Near-isothermal-isobaric compressed gas energy storage[J]. Journal of Energy Storage, 2017, 12: 276-287. DOI:10.1016/j.est.2017.05.014.
- [16] ODUKOMAIYA A, ABU-HEIBA A, GRAHAM S, et al. Experimental and analytical evaluation of a hydro-pneumatic compressed-air ground-level integrated diverse energy storage (GLIDES) system[J]. Applied Energy, 2018, 221: 75-85. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.03.110.
- [17] YIN B, LI Y, MIAO S, et al. An economy and reliability co-optimization planning method of adiabatic compressed air energy storage for urban integrated energy system[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 40: 102691. DOI:10.1016/j.est.2021.102691.
- [18] VENKATARAMANI G, RAMALINGAM V. Energy and exergy

- analysis of isothermal compressed air energy storage system[J]. Encyclopedia of Energy Storage, 2022, 1: 215-231. DOI:10.1016/B978-0-12-819723-3.00148-7
- [19] ROUINDEJ K, SAMADANI E, FRASER R A. CAES by design: A user-centered approach to designing compressed air energy storage (CAES) systems for future electrical grid: A case study for Ontario[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2019, 35: 58-72. DOI:10.1016/j.seta.2019.05.008.
- [20] HEIDARI M, PARRA D, PATEL M K. Physical design, techno-economic analysis and optimization of distributed compressed air energy storage for renewable energy integration[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 35: 102268. DOI:10.1016/j.est.2021.10.2268.
- [21] CHEN H, WANG H R, LI R X, et al. Experimental and analytical investigation of near-isothermal pumped hydro-compressed air energy storage system[J]. Energy, 2022, 249: 123607. DOI: 10.1016/j.energy.2022.123607.
- [22] KARASSIK I J, KABBES W, PEIRCE J F, et al. Pumps: Selection, application, operation, and maintenance[M]. Elsevier, 2018.
- [23] ODUKOMAIYA A, ABU-HEIBA A, GLUESENKAMP K R, et al. Thermal analysis of near-isothermal compressed gas energy storage system[J]. Applied Energy, 2016, 179: 948-960. DOI:10.1016/j.apenergy.2016.07.059.
- [24] CHEN H, WANG H R, LI R X, et al. Thermo-dynamic and economic analysis of a novel pumped hydro-compressed air energy storage system combined with compressed air energy storage system as a spray system[J]. Energy, 2023, 280: 128134. DOI:10.1016/j.energy.2023.128134.
- [25] 严毅. 含压缩空气储能的冷热电联供微网优化设计与运行控制研究[D]. 济南: 山东大学, 2019: 29-30.
- YAN Y. Research on optimization design and operation control of the combined cooling, heating and power microgrid with compressed air energy storage[D]. Jinan: Shandong University, 2019: 29-30.
- [26] 薛小代, 刘彬卉, 汪雨辰, 等. 基于压缩空气储能的社区微能源网设计[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(12): 3306-3313. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.160052.
- XUE X D, LIU B H, WANG Y C, et al. Micro energy network design for community based on compressed air energy storage [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(12): 3306-3313. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.160052.