

面向绿色海岛微型综合能源系统的储能系统容量规划方法

宁光涛¹,李琳玮¹,何礼鹏¹,陈明帆¹,郑柱²

(1. 海南电网有限责任公司,海南 海口 570204;2. 北京清软创新科技股份有限公司,北京 100085)

摘要:发展微型综合能源系统,合理配置储能装置,是实现大幅提高清洁能源比重、提升综合能源利用效率、构建“清洁能源岛”目标的重要手段。为此,在对比分析了不同类型储能技术运行特性的基础上,充分考虑了非补燃式压缩空气储能(NSF-CAES)在综合能源系统中的应用优势,以NSF-CAES技术为代表,研究了面向微型综合能源系统的储能系统容量规划方法。首先,面向优化规划问题,考虑NSF-CAES系统的热电联储/联供特性,构建了NSF-CAES系统的运行约束集合;在此基础上,面向微型综合能源系统,以最大化NSF-CAES为系统带来的净效益为目标,提出了NSF-CAES系统的容量规划方法;然后,通过等价线性转换的方法,将所建规划模型转换为便于求解的混合整数线性规划模型;最后,通过仿真算例验证了所建模型的有效性。仿真结果表明:虽然NSF-CAES电站的总投资成本较高,但由于其具有寿命长的优势和热电联储/联供能力,配置NSF-CAES系统能为微型综合能源系统带来明显的经济效益。

关键词:微型综合能源系统;热电联储/联供;非补燃式压缩空气储能系统;容量规划

中图分类号:TM 715;TK 01

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202011024

0 引言

随着全球能源生产和消费的持续增长,化石燃料短缺问题已成为世界范围内面临的共同难题,对人类的生存和发展构成了严重的威胁^[1]。面对以上挑战,各国都在积极发展清洁能源技术,以期利用清洁能源全面取代化石能源^[2]。2019年5月,中共中央办公厅、国务院办公厅印发了《国家生态文明试验区(海南)实施方案》,方案中明确指出:海南要建设“清洁能源岛”,大幅提高清洁能源比重,提升能源利用效率,构建安全、绿色、集约、高效的清洁能源供应体系^[3]。然而,风电、光伏等清洁可再生电源的大量接入给电网的安全、稳定运行带来了严峻的挑战,严重影响了“绿色海岛”的建设进程。为此,学者们开展了大量的研究。其中,构建面向工业园区、楼宇、校园等应用场景的微型综合能源系统,能实现电、热、气等多种能源形式的综合利用,被认为是提升能源利用效率、促进可再生能源消纳的有效途径之一。

储能装置具有能量时移的功能,可以有效地提升微型综合能源系统中分布式电源的消纳水平和系统的运行灵活性,被认为是综合能源系统中的关键设备之一^[4]。因此,合理配置储能系统尤为关键。在诸多储能技术中,电池储能是目前最常见的储能形式之一,其具有响应速度快、功率和能量可根据不同的应用需求灵活配置、不受地理/资源等外部条件限制、适合批量化生产等优势^[5]。近年来,随着电

池制造与应用相关技术的不断完善,电池储能技术受到了广泛的关注,成为目前发展最为迅速的储能类型^[5]。然而,虽然电池储能技术的成本和寿命指标近年来已有明显的改善,但其投资和回收成本仍相对高昂,且在回收过程中还存在潜在的环境污染问题。上述缺点在一定程度上限制了电池储能的规模化应用进程。

除了电化学储能技术之外,物理储能技术也是目前最受关注的储能形式之一,其中非补燃式压缩空气储能NSF-CAES(Non-Supplementary Fired Compressed Air Energy Storage)技术是物理储能技术的重要代表之一^[6]。相较于电池储能技术,虽然NSF-CAES技术在“电换电”效率、动态响应速度及能量密度等方面略逊一筹,但其具有容量成本更低(可低至约1000元/(kW·h))、运行寿命更长(可达20~40 a)、能提供同步惯量等优点。此外,NSF-CAES技术具有热电联储/联供的独特优势,被认为在综合能源系统中独具优势,其综合能源利用效率能够达到70%以上^[6]。近年来,我国已相继建成多座微型或小型NSF-CAES示范平台,这些示范平台的建成与运行推动了该技术在微型综合能源系统中的应用进程^[6]。因此,亟待研究NSF-CAES在微型综合能源系统中的容量规划方法。

目前,学者们已针对NSF-CAES电站的规划与运行策略开展了一定的研究。文献[7]考虑NSF-CAES系统参与微电网运行,提出了含NSF-CAES微电网的容量优化规划策略;文献[8]构建了NSF-CAES和风电系统的联合发电模型,并开展了联合发电系统的成本和供电可靠性评估;文献[9]提出了考虑压缩机和膨胀机变寿命特性的NSF-CAES系统的

收稿日期:2020-04-25;修回日期:2020-09-19

基金项目:海南电网有限责任公司科技项目(070000KK52190003)

Project supported by the Science and Technology Program of Hainan Power Grid Co.,Ltd.(070000KK52190003)

容量规划方法;文献[10]以 NSF-CAES 为代表,提出了面向垄断电力市场的 NSF-CAES 电站的经济性评估模型,并分析了 NSF-CAES 对电力系统煤耗量、排污量的影响。上述文献研究了 NSF-CAES 系统在电能流应用场景下的规划、调度与经济性分析方法,但未考虑 NSF-CAES 电站的热电联储/联供能力。

近年来,学者们越来越关注 NSF-CAES 电站的多能流联储/联供能力^[6]。文献[11]考虑微型 NSF-CAES 电站的热电联供能力,建立了 NSF-CAES 系统的优化调度模型,提出了含 NSF-CAES 电站的微型能源互联网的优化调度方法;文献[12]类比热电联产机组的热电出力可行域计算模型,研究并提出了 NSF-CAES 系统热电联合出力的可行域计算方法;文献[13]提出了 NSF-CAES 电站的冷热电联供模型,并提出了面向冷热电联供微网的 NSF-CAES 系统的优化调度模型。然而,上述文献主要针对 NSF-CAES 电站在综合能源系统中的优化调度策略进行研究。目前,关于 NSF-CAES 电站在微型综合能源系统中的容量优化规划策略的研究还未见报道。

为此,本文针对微型综合能源系统中的 NSF-CAES 电站容量优化规划问题进行研究,主要创新之处在于:考虑了 NSF-CAES 系统的热电联储/联供特性,面向微型综合能源系统建立了基于混合整数线性规划的 NSF-CAES 系统的容量优化规划模型。首先,构建了考虑 NSF-CAES 电站热电联储/联供特性的储能运行模型;然后,面向典型绿色海岛综合能源系统,提出了 NSF-CAES 电站的容量规划模型,并通过等价线性转换的方法,将所提规划模型转换为便于求解的混合整数线性规划模型;最后,通过仿真算例对比验证了所提优化规划模型的有效性。

1 考虑热电联储/联供特性的 NSF-CAES 系统的运行模型

1.1 NSF-CAES 系统的结构

典型 NSF-CAES 系统的压缩过程和发电过程示意图分别如附录中图 A1(a)和图 A1(b)所示^[2,6]。NSF-CAES 系统主要包括压缩机组、膨胀机组、电动机、发电机、热/冷水罐、储气室、换热器等关键部件^[14]。

在热电联储/联供模式中,NSF-CAES 系统的基本运行过程可以大致分为压缩过程、发电过程、储热过程、供热过程这 4 类。其中,压缩/发电过程和储热/供热过程相对独立。

4 类运行过程的基本运行原理如下:

(1)在压缩过程中,气体进入多级压缩机组中,被压缩至高温高压状态,通过冷水将压缩后的高温高压气体在换热器中降温至低温高压状态,并存储于储气室中,同时被高温气体加热后的热水存储于

热水罐中;

(2)在发电过程中,高压气体从储气室中释放,热水和低温高压气体在换热器中进行换热,常温高压气体被加热至高温状态,并进入膨胀机组进行膨胀做功,降温后的热水存储于冷水罐中;

(3)在储热过程中,通过外部热源(如燃气轮机余热、热泵产热等)加热低温水,并将其存储于 NSF-CAES 系统的储热器中;

(4)在供热过程中,储热器中存储的热水(来源于压缩热和外部热源)用于供给热负荷。

需要说明的是:由于水具有相对较高的比热容,能够在较小的温差内存储较多的热量,且其成本低、易获取^[14],因此,目前诸多 NSF-CAES 示范电站均采用水作为储热介质,例如我国的“TICC-500”示范系统等^[15]。此外,图 A1 中的 NSF-CAES 系统采用“双罐储热”方式,分别采用热水罐和冷水罐存储高温水和常温水。考虑到成本因素,在通常情况下,热水罐会加装隔热材料,其运行过程类似于绝热过程,且在实际的运行过程中,热水罐水温的变化范围通常不大^[15],因此,在规划问题中认为热水罐内的水温近似等于额定状态下的热水水温。而冷水罐则运行于非绝热状态,冷水罐的水温在运行模型中可认为近似等于环境温度^[16]。

NSF-CAES 系统的储能状态主要取决于储气室的气压和热水罐内的储水量,其中 NSF-CAES 系统的储电量由储气室的气压和热水罐内的储水量共同决定,而储热量主要取决于热水罐内的储水量。因此,在规划问题中,NSF-CAES 系统的储能容量规划主要取决于储气室体积的规划和热水罐体积的规划。

1.2 考虑热电联储/联供特性的 NSF-CAES 系统的运行约束集合建模

储气室的气压和热水罐内的储水量可分别根据式(1)和式(2)计算得到。

$$p_{st,t} = p_{st,t-1} + \dot{p}_{st,t} \Delta t \quad (1)$$

$$m_{HW,t} = m_{HW,t-1} + \dot{m}_{HW,t} \Delta t \quad (2)$$

其中, $p_{st,t-1}$ 、 $m_{HW,t-1}$ 和 $p_{st,t}$ 、 $m_{HW,t}$ 分别为 $t-1$ 时段和 t 时段储气室的气压、热水罐内的储水量; $\dot{p}_{st,t}$ 、 $\dot{m}_{HW,t}$ 分别为 t 时段储气室的气压变化率、热水罐内储水量的变化率; Δt 为单位调度时段时长。

储气室的气压变化率和热水罐内储水量的变化率与 NSF-CAES 系统的压缩功率、发电功率、储热功率、供热功率之间的关系式可表示为:

$$\begin{bmatrix} \dot{p}_{st,t} \\ \dot{m}_{HW,t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{\dot{p}m}^c k_{\dot{m}p}^c & -k_{\dot{p}m}^g k_{\dot{m}p}^g & 0 & 0 \\ k_{\dot{m}m}^c k_{\dot{m}p}^c & -k_{\dot{m}m}^g k_{\dot{m}p}^g & k_{\dot{m}p}^h & -k_{\dot{m}p}^h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{CAESc,t} \\ P_{CAESg,t} \\ H_{CAEShs,t} \\ H_{CAEShr,t} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, $P_{CAESc,t}$ 、 $P_{CAESg,t}$ 分别为 t 时段 NSF-CAES 系统的

压缩功率、发电功率; $H_{\text{CAEShs},t}$ 、 $H_{\text{CAEShr},t}$ 分别为 t 时段 NSF-CAES 系统的储热功率、供热功率; $k_{\dot{m}_a P_c}$ 为压缩功率与流过压缩机组的空气质量流量之间的关系系数; $k_{\dot{m}_a P_g}$ 为发电功率与流过膨胀机组的空气质量流量之间的关系系数; $k_{\dot{m}_a}$ 为流过压缩机组 / 膨胀机组的空气质量流量与储气室气压变化率之间的关系系数; $k_{\dot{m}_a \dot{m}_a}^c$ 、 $k_{\dot{m}_a \dot{m}_a}^g$ 分别为压缩过程、发电过程中空气质量流量与热水质量变化率间的关系系数; $k_{\dot{m}_a P_h}$ 为储热 / 供热功率与热水质量变化率间的关系系数。

NSF-CAES 系统中的压缩机组和膨胀机组通常分别采用“多级压缩、级间冷却”和“多级膨胀、级间再热”模式(如图 A1 所示)。关系系数 $k_{\dot{m}_a P_c}$ 和 $k_{\dot{m}_a P_g}$ 与各级压缩机组的压缩比 / 膨胀机组的膨胀比、入口温度、等熵效率等参数有关,计算公式分别如式(4)和式(5)所示^[16]。

$$k_{\dot{m}_a P_c} = \frac{\eta_c}{c_{p,a} n_c T_{c,\text{in}} [\beta_c^{(\gamma-1)/\gamma} - 1]} \quad (4)$$

$$k_{\dot{m}_a P_g} = \frac{1}{\eta_g c_{p,a} n_g T_{g,\text{in}} [1 - \beta_g^{-(\gamma-1)/\gamma}]} \quad (5)$$

其中, η_c 、 η_g 分别为压缩过程、发电过程的等熵效率; $T_{c,\text{in}}$ 、 $T_{g,\text{in}}$ 分别为进入各级压缩机组、各级膨胀机组的空气温度; n_c 、 n_g 分别为压缩机组、膨胀机组的级数; β_c 、 β_g 分别为多级压缩机组的理想压缩比、多级膨胀机组的理想膨胀比; $c_{p,a}$ 为空气的比热容; γ 为空气的绝热指数。

在规划问题中,由于压缩机组和膨胀机组的型号通常没有完全选定,机组的特性参数未完全确定,因此在计算系数 $k_{\dot{m}_a P_c}$ 和 $k_{\dot{m}_a P_g}$ 时,需先初步估算压缩机组和膨胀机组的级数,估算方法的具体步骤如下:

(1) 根据储气罐允许的气压范围,确定 NSF-CAES 系统的总压缩比和总膨胀比;

(2) 根据多级压缩机组的理想压缩比和多级膨胀机组的理想膨胀比的计算公式,估算各级压缩机组的压缩比和各级膨胀机组的膨胀比;

(3) 根据各级压缩机组的压缩比和各级膨胀机组的膨胀比计算得到各级压缩机组和膨胀机组的出口气体温度,考虑储热介质的温度变化范围、换热器的能效系数等参数,判断各级压缩机组和膨胀机组的出口温度是否在合适的范围内;

(4) 寻找并获得满足要求的压缩机组和膨胀机组的级数。

目前,储气钢瓶是小型 NSF-CAES 系统中最为常用的储气装置之一。由于储气钢瓶的隔热性能较差,换热系数较高,因此在本文的规划问题中,考虑采用等温模型近似描述 NSF-CAES 系统的储气室,系数 $k_{\dot{p}_{\text{st}}}$ 可由式(6)计算得到。

$$k_{\dot{p}_{\text{st}}} = R_g T_{\text{st}} / V_{\text{st}} \quad (6)$$

其中, R_g 为理想气体常数; T_{st} 为流入 / 流出储气室的气体温度,假设其近似等于环境温度; V_{st} 为储气室的体积。

根据能量守恒定律, $k_{\dot{m}_a \dot{m}_a}^c$ 和 $k_{\dot{m}_a \dot{m}_a}^g$ 可分别由式(7)和式(8)计算得到。

$$k_{\dot{m}_a \dot{m}_a}^c = n_c \frac{c_{p,a} (T_{c,\text{out}} - T_{c,\text{in}})}{c_{p,w} (T_{\text{hw}} - T_{\text{cw}})} \quad (7)$$

$$k_{\dot{m}_a \dot{m}_a}^g = n_g \frac{c_{p,a} (T_{g,\text{in}} - T_{g,\text{out}})}{c_{p,w} (T_{\text{hw}} - T_{\text{cw},g})} \quad (8)$$

其中, $c_{p,w}$ 为水的比热容; T_{hw} 、 T_{cw} 分别为热水罐、冷水罐内的水温; $T_{\text{cw},g}$ 为膨胀过程中热水在换热后的温度; $T_{c,\text{out}}$ 、 $T_{g,\text{out}}$ 分别为各级压缩机组、各级膨胀机组出口处的空气温度。

同理,根据能量守恒定律, $k_{\dot{m}_a P_h}$ 可由式(9)计算得到。

$$k_{\dot{m}_a P_h} = \frac{1}{c_{p,w} (T_{\text{hw}} - T_{\text{rt}})} \quad (9)$$

其中, T_{rt} 为热水在供热后的回水温度。

在 NSF-CAES 系统的运行过程中,还需要考虑压缩功率约束、发电功率约束、储热功率约束、供热功率约束、运行工况约束、储气室的气压约束和热水罐内的储水量约束,分别如式(10)~(16)所示。

$$u_{\text{CAESc},t} \bar{P}_{\text{CAESc}} k_{\text{CAESc}} \leq P_{\text{CAESc},t} \leq u_{\text{CAESc},t} \bar{P}_{\text{CAESc}} \quad (10)$$

$$u_{\text{CAESg},t} \bar{P}_{\text{CAESg}} k_{\text{CAESg}} \leq P_{\text{CAESg},t} \leq u_{\text{CAESg},t} \bar{P}_{\text{CAESg}} \quad (11)$$

$$0 \leq H_{\text{CAEShs},t} \leq u_{\text{CAEShs},t} \bar{H}_{\text{CAEShs}} \quad (12)$$

$$0 \leq H_{\text{CAEShr},t} \leq u_{\text{CAEShr},t} \bar{H}_{\text{CAEShr}} \quad (13)$$

$$\begin{cases} u_{\text{CAESc},t} + u_{\text{CAESg},t} \leq 1 \\ u_{\text{CAEShs},t} + u_{\text{CAEShr},t} \leq 1 \end{cases} \quad (14)$$

$$\underline{p}_{\text{st}} \leq p_{\text{st},t} \leq \bar{p}_{\text{st}} \quad (15)$$

$$0 \leq m_{\text{HW},t} \leq \rho_w V_{\text{HW}} \quad (16)$$

其中, $u_{\text{CAESc},t}$ 、 $u_{\text{CAESg},t}$ 、 $u_{\text{CAEShs},t}$ 、 $u_{\text{CAEShr},t}$ 分别为用于指示 t 时段 NSF-CAES 系统是否处于压缩工况、发电工况、储热工况、供热工况的二进制状态变量,若处于则取值为 1,若不处于则取值为 0; \bar{P}_{CAESc} 、 \bar{P}_{CAESg} 、 \bar{H}_{CAEShs} 、 \bar{H}_{CAEShr} 分别为 NSF-CAES 系统的压缩功率容量、发电功率容量、储热功率容量、供热功率容量; k_{CAESc} 、 k_{CAESg} 分别为压缩机组、膨胀机组的宽工况运行范围; \bar{p}_{st} 、 $\underline{p}_{\text{st}}$ 分别为储气室气压的上、下限; ρ_w 为水的密度; V_{HW} 为热水罐的体积。

2 面向绿色海岛微型综合能源系统的 NSF-CAES 系统的容量优化配置模型

本文所研究的典型绿色海岛微型综合能源系统的结构示意图如图 1 所示,基于该系统研究 NSF-CAES 系统的容量优化规划方法,系统所包含的调度

资源为燃气轮机、余热回收锅炉、风电、热泵和 NSF-CAES 电站。

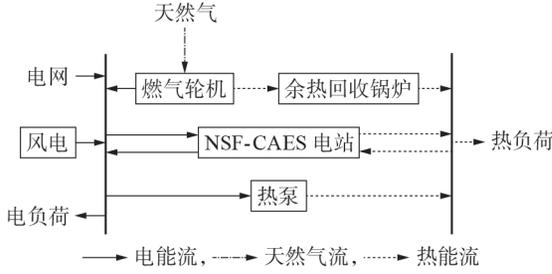


图1 典型绿色海岛微型综合能源系统的结构示意图

Fig.1 Structure diagram of typical micro integrated energy system in environmental friendly island

2.1 目标函数

本文所提 NSF-CAES 系统的容量优化配置模型旨在通过合理配置 NSF-CAES 系统的压缩功率容量、发电功率容量、储热功率容量、供热功率容量、储气室的体积和储热水罐的体积,以降低微型综合能源系统的用能成本,从而获得经济效益。

模型的目标函数为最大化 NSF-CAES 系统为微型综合能源系统带来的净效益 B_{benefit} , 如式(17)所示。

$$\max B_{\text{benefit}} = \Delta C_{\text{Fuel}} - C_{\text{TCC}} - C_{\text{O\&M}} \quad (17)$$

其中, ΔC_{Fuel} 为配置 NSF-CAES 系统后能够节省的系统年用能成本; C_{TCC} 为 NSF-CAES 系统的年化投资成本; $C_{\text{O\&M}}$ 为 NSF-CAES 系统的年化运行与维护成本。

本文采用典型日的运行成本来估算配置 NSF-CAES 系统后能够为微型综合能源系统节省的年用能成本, 则 ΔC_{Fuel} 的计算式为:

$$\Delta C_{\text{Fuel}} = C_{\text{Fuel, noES}} - 365 \sum_{i=1}^T (c_{\text{ele}, t} P_{\text{grid}, t} + c_{\text{gas}} F_{\text{GT}, t}) \quad (18)$$

其中, T 为单个典型日的调度总时段数; $c_{\text{ele}, t}$ 为 t 时段的电价; c_{gas} 为天然气的价格; $P_{\text{grid}, t}$ 为 t 时段从电网购买的电能; $F_{\text{GT}, t}$ 为 t 时段的燃气耗量; $C_{\text{Fuel, noES}}$ 为未安装 NSF-CAES 系统时系统的总用能成本。

NSF-CAES 系统的年化投资成本 C_{TCC} 主要来自于能量转换单元的投资成本和储能单元容量的投资成本^[8], 其计算式为:

$$C_{\text{TCC}} = (\bar{P}_{\text{CAESc}} c_{\text{PSCc}} + \bar{P}_{\text{CAESg}} c_{\text{PSCg}} + \bar{H}_{\text{CAEShs}} c_{\text{PSChs}} + \bar{H}_{\text{CAEShr}} c_{\text{PSChr}} + V_{\text{st}} c_{\text{ESa}} + V_{\text{HW}} c_{\text{ESw}}) \frac{i(1+i)^{T_{\text{CAES}}}}{(1+i)^{T_{\text{CAES}}} - 1} \quad (19)$$

其中, c_{PSCc} 、 c_{PSCg} 、 c_{PSChs} 、 c_{PSChr} 、 c_{ESa} 和 c_{ESw} 分别为单位压缩功率的投资成本、单位发电功率的投资成本、单位储热功率的投资成本、单位供热功率的投资成本、单位体积储气室的投资成本、单位体积热水罐的投资成本; i 为贴现率; T_{CAES} 为 NSF-CAES 系统的寿命。

NSF-CAES 系统的年运行与维护成本 $C_{\text{O\&M}}$ 的计算式为^[9]:

$$C_{\text{O\&M}} = C_{\text{O\&M}}^{\text{E}} (\bar{P}_{\text{CAESc}} + \bar{P}_{\text{CAESg}}) \quad (20)$$

其中, $C_{\text{O\&M}}^{\text{E}}$ 为 NSF-CAES 系统单位功率的年运行与维护成本。

2.2 约束条件

在本文所提规划模型中, NSF-CAES 系统待规划量的上下限约束如式(21)所示。

$$\underline{X}_{\text{CAES}} \leq x_{\text{CAES}} \leq \bar{X}_{\text{CAES}} \quad (21)$$

其中, x_{CAES} 为 NSF-CAES 系统的待规划量, 包括 \bar{P}_{CAESc} 、 \bar{P}_{CAESg} 、 \bar{H}_{CAEShs} 、 \bar{H}_{CAEShr} 、 V_{st} 和 V_{HW} ; \bar{X}_{CAES} 、 $\underline{X}_{\text{CAES}}$ 分别为 NSF-CAES 系统待规划量的上、下限。

此外, 系统典型日的运行约束主要包括电功率平衡约束、热功率平衡约束、燃气轮机约束、余热回收锅炉约束、热泵约束、购电功率约束和 NSF-CAES 系统约束。

(1) 电功率平衡约束。

$P_{\text{grid}, t} + P_{\text{GT}, t} + P_{\text{WT}, t} + P_{\text{CAESg}, t} = P_{\text{L}, t} + P_{\text{HP}, t} + P_{\text{CAESc}, t}$ (22)
其中, $P_{\text{GT}, t}$ 为 t 时段燃气轮机的出力; $P_{\text{WT}, t}$ 为 t 时段的风电出力; $P_{\text{L}, t}$ 为 t 时段的电负荷功率; $P_{\text{HP}, t}$ 为 t 时段热泵的耗电功率。

(2) 热功率平衡约束。

$$H_{\text{WH}, t} + H_{\text{HP}, t} + H_{\text{CAEShr}, t} = H_{\text{CAEShs}, t} + H_{\text{L}, t} \quad (23)$$

其中, $H_{\text{WH}, t}$ 为 t 时段余热回收锅炉的热出力; $H_{\text{HP}, t}$ 为 t 时段热泵的热出力; $H_{\text{L}, t}$ 为 t 时段的热负荷功率。

(3) 燃气轮机约束。

燃气轮机的燃气耗量可直接用一次函数近似表示, 如式(24)所示; 燃气轮机在单位时段的排气余热回收量如式(25)所示^[17]。

$$F_{\text{GT}, t} = \alpha P_{\text{GT}, t} + \beta u_{\text{GT}, t} \quad (24)$$

$$H_{\text{GT}, t} = P_{\text{GT}, t} \eta_{\text{re}} / \eta_{\text{c}} \quad (25)$$

其中, α 、 β 为燃气轮机的燃气耗量系数; $u_{\text{GT}, t}$ 为指示 t 时段微型燃气轮机启停状态的二进制变量, 处于启动状态则 $u_{\text{GT}, t} = 1$, 处于停机状态则 $u_{\text{GT}, t} = 0$; $H_{\text{GT}, t}$ 为 t 时段微型燃气轮机的余热回收量; η_{re} 、 η_{c} 分别为微型燃气轮机的余热回收效率、发电效率。

微型燃气轮机的出力上下限约束如式(26)所示。

$$u_{\text{GT}, t} \underline{P}_{\text{GT}} \leq P_{\text{GT}, t} \leq u_{\text{GT}, t} \bar{P}_{\text{GT}} \quad (26)$$

其中, \bar{P}_{GT} 、 $\underline{P}_{\text{GT}}$ 分别为微型燃气轮机出力的上、下限。

(4) 余热回收锅炉约束。

余热回收锅炉主要用于回收燃气轮机的排气热量, t 时段回收的排气热量 $H_{\text{WH}, t}$ 的上下限约束如式(27)所示。

$$0 \leq H_{\text{WH}, t} \leq \bar{H}_{\text{WH}, t} \quad (27)$$

$$\bar{H}_{\text{WH}, t} = H_{\text{GT}, t} \eta_{\text{WH}} \quad (28)$$

其中, η_{WH} 为余热回收锅炉的集热效率; $\bar{H}_{\text{WH}, t}$ 为 t 时段余热回收锅炉的供热功率上限。

(5) 热泵约束。

热泵可通过消耗电能将低品位的热能转换成高

品位的电能^[18],其热出力的计算式如式(29)所示,上下限约束如式(30)所示。

$$H_{HP,t} = \eta_{HP} P_{HP,t} \quad (29)$$

$$0 \leq H_{HP,t} \leq \bar{H}_{HP} \quad (30)$$

其中, η_{HP} 为热泵的制热效率; \bar{H}_{HP} 为热泵的供热功率上限。

(6)购电功率约束。

$$-\bar{P}_{grid,sell} \leq P_{grid,t} \leq \bar{P}_{grid,pur} \quad (31)$$

其中, $\bar{P}_{grid,sell}$ 为向电网倒送的最大功率; $\bar{P}_{grid,pur}$ 为从电网购买的最大功率。

(7)NSF-CAES系统运行约束。

NSF-CAES系统的运行约束如式(1)~(16)所示。

3 模型求解

本文所构建优化规划模型的决策变量包括2类:一类变量为NSF-CAES系统的待规划量,包括 \bar{P}_{CAESc} 、 \bar{P}_{CAESg} 、 \bar{H}_{CAEShs} 、 \bar{H}_{CAEShr} 、 V_{st} 、 V_{HW} ,这类变量在优化过程中不但会影响NSF-CAES系统的投资成本,而且会影响系统典型日的优化运行成本;另一类变量主要为系统各调度资源的出力,在优化过程中主要影响系统典型日的优化运行成本。通过求解本文所构建的优化规划模型,可同时计算得到NSF-CAES系统的容量优化配置方案和系统调度资源在典型日场景下的优化调度结果。

优化规划模型中包含以下非线性项:①式(6)中的分母项 V_{st} 为连续决策变量;②式(10)~(13)中包含二进制变量与连续变量的相乘项,如 $u_{CAESc,t} \bar{P}_{CAESc}$ 、 $u_{CAEShs,t} \bar{H}_{CAEShs}$ 等。为了求解本文所构建的优化规划模型,可对上述约束进行线性化处理。

针对式(6)中的非线性项,可以将NSF-CAES系统储气室的气压表达式和气压上下限约束转换为储气室内的储气质量表达式和储气质量上下限约束,并约简系数 k_{pm_a} ,转换后的式(1)、式(3)和式(15)分别为:

$$m_{st,t} = m_{st,t-1} + \dot{m}_{st,t} \Delta t \quad (32)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{m}_{st,t} \\ \dot{m}_{HW,t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{\dot{m}_a P_c} & -k_{\dot{m}_a P_g} & 0 & 0 \\ k_{\dot{m}_w \dot{m}_a}^c & k_{\dot{m}_a P_c} & -k_{\dot{m}_w \dot{m}_a}^g & k_{\dot{m}_a P_g} \\ k_{\dot{m}_w P_h} & -k_{\dot{m}_w P_h} & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{CAESc,t} \\ P_{CAESg,t} \\ H_{CAEShs,t} \\ H_{CAEShr,t} \end{bmatrix} \quad (33)$$

$$\frac{p_{st} V_{st}}{R_g T_{st}} \leq m_{st,t} \leq \frac{\bar{p}_{st} V_{st}}{R_g T_{st}} \quad (34)$$

其中, $m_{st,t}$ 、 $\dot{m}_{st,t}$ 分别为 t 时段储气室内的储气总质量、气体质量变化率。

式(10)~(13)中包含二进制变量与连续变量相乘的非线性项,均可采用大M法^[24]进行线性等价转换。以式(10)为例,采用大M法转换后得到的等效

线性约束如式(35)所示。式(11)~(13)也可采用类似的方法转换为其等效线性表达式,具体不再赘述。

$$\begin{cases} P_{CAESc,t} \leq \bar{P}_{CAESc} + (1 - u_{CAESc,t})M \\ P_{CAESc,t} \geq k_{CAESc} \bar{P}_{CAESc} + (u_{CAESc,t} - 1)M \\ P_{CAESc,t} \leq u_{CAESc,t} M \\ P_{CAESc,t} \geq -u_{CAESc,t} M \end{cases} \quad (35)$$

其中, M 为一个足够大的正数。

采用上述线性化方法处理后,本文所提NSF-CAES系统的容量优化配置模型转化为混合整数线性规划模型,可采用常规的求解器(如CPLEX、Gurobi等)进行求解。本文选择使用CPLEX求解器。

4 算例分析

4.1 基础数据

本文算例选取某工业园区为对象,系统中已安装的设备包括风电机组、燃气轮机、余热回收锅炉、热泵,各设备参数如附录中表A1所示^[4,18]。NSF-CAES系统的基本参数主要来源于文献[16,19],具体如附录中表A2所示。其中,压缩机组/膨胀机组的级数(4级)与储气室的储气压力范围(60~100 bar)和储热介质最高温度(368 K)相匹配。假设贴现率为8%^[9]。

需要说明的是,气候环境(如高盐高湿)会对NSF-CAES系统的投资成本和维护成本产生影响,为了得到不同地区工业园区内NSF-CAES系统的最优容量配置结果,需要更换相应的NSF-CAES系统的成本参数和工业园区系统参数。

典型日的调度周期为24 h,单位调度时长为1 h。系统典型日的负荷曲线和风电预测出力曲线见附录中图A2。假设向电网购电功率、向电网倒送功率的最大值分别为2500、500 kW。天然气的价格为2.04元/m³。假设NSF-CAES系统各待规划量的下限为0,且不设上限。

峰谷分时电价来源于海南省现行的峰谷分时电价政策^[20]:峰时段(10:00—12:00、16:00—22:00)的电价为1.0315元/(kW·h),平时段(07:00—10:00、12:00—16:00以及22:00—23:00)的电价为0.6362元/(kW·h),谷时段(23:00至次日07:00)的电价为0.3321元/(kW·h)。

4.2 结果分析

根据本文所建优化规划模型,可以计算得到NSF-CAES系统的容量配置结果及各项成本,结果如表1所示。配置NSF-CAES系统前、后系统典型日的用能成本对比如表2所示。

由表1可以看出,配置NSF-CAES系统能够为该微型综合能源系统带来约385.88万元/a的经济效益。该经济效益主要来源于系统用能成本的降低,

表 1 NSF-CAES 系统的容量配置结果及成本

Table 1 Capacity configuration results and costs of NSF-CAES system

参数	取值	参数	取值
压缩功率容量 / kW	1 198	发电单元年化投资成本 / (万元·a ⁻¹)	8.94
发电功率容量 / kW	546	储热单元年化投资成本 / (万元·a ⁻¹)	1.42
储热功率容量 / kW	562	供热单元年化投资成本 / (万元·a ⁻¹)	1.32
供热功率容量 / kW	525	储气室年化投资成本 / (万元·a ⁻¹)	1.42
储气室体积 / m ³	937	热水罐年化投资成本 / (万元·a ⁻¹)	38.15
热水罐体积 / m ³	5 678	年化运行与维护成本 / (万元·a ⁻¹)	11.51
节省的年年用能成本 / (万元·a ⁻¹)	472.19	为系统带来的年化净收益 / (万元·a ⁻¹)	385.88
压缩单元年化投资成本 / (万元·a ⁻¹)	23.56		

表 2 配置 NSF-CAES 系统前、后用能成本对比

Table 2 Comparison of energy consumption costs before and after configuration of NSF-CAES system

成本	结果 / 元	
	配置前	配置后
购电成本	37 090.91	39 431.93
天然气购置成本	32 363.63	17 085.81
总用能成本	69 454.54	56 517.74

在配置 NSF-CAES 系统后,系统总用能成本能够下降约 472.19 万元 / a。

NSF-CAES 系统的总投资成本约为 890.49 万元,其中,由于需要兼顾压缩 / 发电过程的储热 / 供热需求以及面向用户的储热 / 供热需求,系统热水罐的体积配置量相对较大,且由于其单位投资成本较高,因此,其投资成本约占系统总投资成本的 51%。

虽然 NSF-CAES 系统的总投资成本较高,但由于 NSF-CAES 具有寿命长(本文假设其寿命为 40 a^[81])的优点,其年化总投资成本约为 74.8 万元 / a,因此,配置 NSF-CAES 系统仍能为系统带来明显的经济效益。此外,NSF-CAES 系统具有较低的运行与维护成本,其年化运行与维护成本约为 11.51 万元 / a。

表 1 的计算结果表明,该综合能源系统在优化配置 NSF-CAES 系统后,大约能在 3 a 内收回 NSF-CAES 系统的总投资成本。

由表 2 可以看出,配置 NSF-CAES 系统后,系统的总用能成本降低了约 18.62%,其中系统天然气购置成本下降明显,降低了约 47.21%;而系统购电成本稍有增加,增加了约 6.31%。这主要是因为 NSF-CAES 系统会存储用电谷时段的电能,且其效率较低,因而系统的购电量稍有增加;此外,由于 NSF-

CAES 系统能够参与到系统的供电和供热中,降低了运行成本相对较高的燃气轮机的出力,从而使系统天然气购置成本减少。

配置 NSF-CAES 系统前、后典型日的电量调度结果分别如附录中图 A3 和图 A4 所示。配置 NSF-CAES 系统前、后典型日的供热调度结果分别如附录中图 A5 和图 A6 所示。NSF-CAES 系统储气室压力和储热水量的变化曲线如图 2 所示。

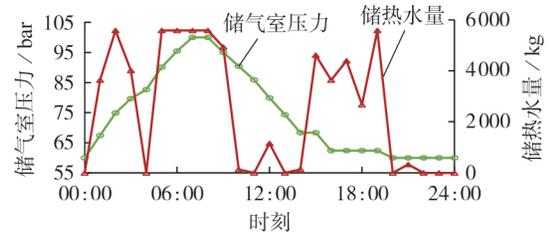


图 2 NSF-CAES 系统储气室压力和储热水量的变化曲线

Fig.2 Change curves of gas reservoir's pressure and hot water storage for NSF-CAES system

由图 A3 和图 A5 可以看出,由于燃气轮机具有相对较高的运行成本,其基本上只在负荷峰值时段启动并供电,系统主要的电能来源为从电网购电,系统主要的热能来源为热泵。

由图 A4 和图 A6 可以看出,配置 NSF-CAES 系统后,其主要在谷电价时段(01:00—07:00)处于压缩状态进行储能,在平电价或峰电价时段(09:00—14:00、16:00、20:00)处于发电状态。因此,虽然配置 NSF-CAES 后系统的总购电量明显增加(增加了 12.24%),但系统总购电成本增加并不明显(增加了 6.31%)。还可以看出,NSF-CAES 系统主要在压缩工况的同时还处于供热状态,而在发电工况的同时还处于储热状态。这主要是因为 NSF-CAES 系统热水罐的单位体积投资成本较高,在压缩过程产生的富余热水直接进行供热,这可以在一定程度上降低热水罐的配置容量需求;在发电过程中,一方面利用压缩过程中存储的剩余热水,另一方面从外部热源补充热量,以保障正常发电。此外,配置 NSF-CAES 系统后,燃气轮机的出力降低,导致热泵的供热需求增加,进而使得热泵的全天耗电量由 3 954 kW·h 增长至 4 401 kW·h。

由图 2 可以看出,经过一天的运行,NSF-CAES 系统完成储能状态的完整循环(初始的储气 / 储水状态等于最终的储气 / 储水状态),系统全天总耗电量为 6 442 kW·h,总发电量为 3 656 kW·h,电能循环效率约为 57%。可以看出,配置 NSF-CAES 系统后,由于储能系统的电能循环效率相对较低,总用电量有所增加,但是,这并不妨碍系统运行经济性的提升,这主要得益于 NSF-CAES 系统的“低储高放”功能和热电联储 / 联供能力。

此外,由图2还可以看出,NSF-CAES系统的储热量在典型日运行过程中变化较为剧烈,这主要是因为NSF-CAES系统中绝热水罐的储水容量相对较小,因此,在运行过程中,NSF-CAES系统的压缩/发电工况中所产生/消耗的热量及其在供热/放热状态下向微型综合能源系统放出/吸收的热量,均会对NSF-CAES系统中的储热量产生较大的影响。

5 结论

本文考虑了NSF-CAES系统的热电联储/联供特性,面向优化规划问题,构建了NSF-CAES系统的运行约束集合。面向微型综合能源系统,提出了NSF-CAES系统的容量优化规划方法。采用线性等价转换的方法将所建模型转换成混合整数线性规划模型进行求解。通过仿真算例验证了本文模型的有效性。仿真结果表明:

(1)配置NSF-CAES系统后,微型综合能源系统的用电能耗虽有所增加,但系统总用能成本得到明显的降低;

(2)NSF-CAES系统的总投资成本虽然较高,但由于具有寿命长的优点,其年均投资成本不高,且由于其具有热电联储/联供的优势,配置NSF-CAES能为系统带来明显的经济效益。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 许寅,李佳旭,王颖,等. 考虑光伏出力不确定性的园区配电网日前运行计划[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(5): 85-94, 106.
XU Yin, LI Jiaxu, WANG Ying, et al. Day-ahead operation plan for campus distribution network considering uncertainty of photovoltaic output[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(5): 85-94, 106.
- [2] 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.
- [3] 中共中央办公厅, 国务院办公厅. 国家生态文明试验区(海南)实施方案[N]. 人民日报, 2019-05-13.
- [4] 蔡含虎, 向月, 杨昕然. 计及需求响应的综合能源系统容量经济配置及效益分析[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(8): 186-194.
CAI Hanhu, XIANG Yue, YANG Xinran. Economic capacity allocation and benefit analysis of integrated energy system considering demand response[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 186-194.
- [5] 李相俊, 王上行, 惠东. 电池储能系统运行控制与应用方法综述及展望[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3315-3325.
LI Xiangjun, WANG Shangxing, HUI Dong. Summary and prospect of operation control and application method for battery energy storage systems[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3315-3325.

- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 尹斌鑫, 苗世洪, 李姚旺, 等. 考虑变寿命特性的先进绝热压缩空气储能电站容量规划模型[J]. 电工技术学报, 2020, 35(3): 612-622.
YIN Binxin, MIAO Shihong, LI Yaowang, et al. A capacity planning model of advanced adiabatic compressed air energy storage plant considering lifetime varying characteristic[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(3): 612-622.
- [10] DING J, XU Y J, CHEN H S, et al. Value and economic estimation model for grid-scale energy storage in monopoly power markets[J]. Applied Energy, 2019, 240: 986-1002.
- [11] LI R, CHEN L J, YUAN T J, et al. Optimal dispatch of zero-carbon-emission micro Energy Internet integrated with non-supplementary fired compressed air energy storage system[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2016, 4(4): 566-580.
- [12] 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, 39(8): 79-85, 112.
BAI Jiayu, XUE Xiaodai, CHEN Laijun, et al. Operation feasible region analysis of advanced adiabatic compressed air energy storage under thermal-electric co-generation mode[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 79-85, 112.
- [13] 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): 6924-6936, 7126.
YAN Yi, ZHANG Chenghui, LI Ke, et al. The optimal operation strategy for hybrid combined cooling, heating and power microgrid with compressed air energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(23): 6924-6936, 7126.
- [14] HE W, WANG J H, DING Y L. New radial turbine dynamic modelling in a low-temperature adiabatic compressed air energy storage system discharging process[J]. Energy Conversion and Management, 2017, 153: 144-156.
- [15] WANG S X, ZHANG X L, YANG L W, et al. Experimental study of compressed air energy storage system with thermal energy storage[J]. Energy, 2016, 103: 182-191.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 许周,孙永辉,谢东亮,等. 计及电/热柔性负荷的区域综合能源系统储能优化配置[J]. *电力系统自动化*,2020,44(2):53-63.
XU Zhou,SUN Yonghui,XIE Dongliang, et al. Optimal configuration of energy storage for integrated region energy system considering power/thermal flexible load[J]. *Automation of Electric Power Systems*,2020,44(2):53-63.
- [19] 柳文洁. 热水蓄热罐在热电联产供热系统中的应用研究[D].

哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.

- LIU Wenjie. Application of heat storage tanks in CHP heating system[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology,2016.
- [20] 海南省发展与改革委员会. 海南省电网销售电价表[EB/OL]. [2020-03-15]. <http://plan.hainan.gov.cn/sfgw/jggb/201811/8a6f50dfbe094cb3a2d3c824bc4e482a.shtml>.

作者简介:



宁光涛(1961—),男,安徽阜阳人,教授级高级工程师,从事电网规划与生产运行方面的研究工作(E-mail:ninggt@hn.csg.cn)。

(编辑 陆丹)

Capacity planning method of energy storage system for micro integrated energy system in environmental friendly islands

NING Guangtao¹,LI Linwei¹,HE Lipeng¹,CHEN Mingfan¹,ZHENG Zhu²

(1. Hainan Power Grid Co.,Ltd.,Haikou 570204,China;

2. Beijing Tsingsoft Technology Co.,Ltd.,Beijing 100085,China)

Abstract: The development of micro integrated energy systems and rational allocation of energy storage devices are important means to achieve the goal of substantially increasing the proportion of clean energy, increasing the utilization efficiency of comprehensive energy and building a clean energy island. Therefore, based on the comparison and analysis of the operation characteristics of different types of energy storage technologies, the application advantages of NSF-CAES (Non-Supplementary Fired Compressed Air Energy Storage) in the integrated energy system are fully considered. Taking NSF-CAES technology as a representative, the capacity planning method of energy storage system for micro integrated energy system is studied. Firstly, considering the combined heat and power storage/generation characteristics of NSF-CAES, the operation constraint set of NSF-CAES system is constructed for optimal planning problem. On this basis, the capacity planning method of NSF-CAES system is proposed for the micro integrated energy system with the objective of maximizing the net benefit brought by NSF-CAES. Then, by means of equivalent linear transformation, the established planning model is transformed into the mixed integer linear programming model which can be solved easily. Finally, the validity of the established model is verified by a simulation example. Simulative results show that although the total investment cost of NSF-CAES station is relatively high, installing NSF-CAES system can bring significant economic benefits to the micro integrated energy system due to its merit of long lifetime and its unique capability of combined heat and power storage/generation.

Key words: micro integrated energy system; combined heat and power storage/generation; NSF-CAES; capacity planning

附录

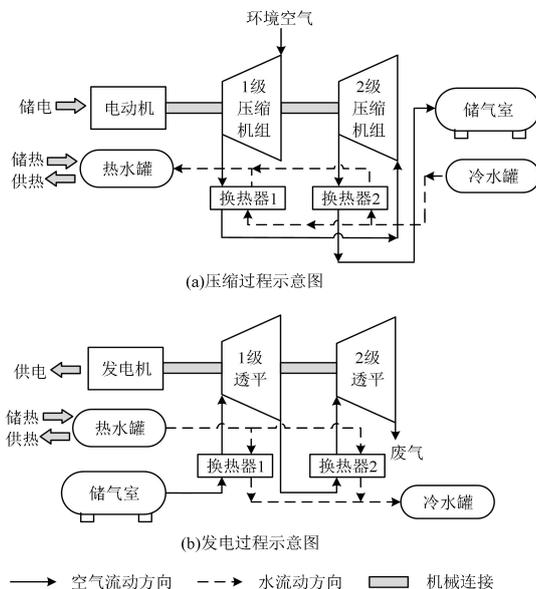


图 A1 典型 NSF-CAES 系统的结构示意图

Fig.A1 Structure diagram of a typical NSF-CAES system

表 A1 已安装设备的运行参数

Table A1 Operation parameters of installed equipment

设备	参数	取值
燃气轮机	出力上限/kW	1000
	出力下限/kW	100
	耗量系数 α /(kW·m ⁻³)	2.67
	耗量系数 β /m ³	11.43
	余热回收效率/%	0.8
	发电效率/%	0.8
余热回收锅炉	集热效率/%	0.8
热泵	供热功率上限/kW	1000
	制热效率/%	4.4

表 A2 NSF-CAES 系统的基本参数

Table A2 Basic parameters of NSF-CAES system

参数	取值	参数	取值
单位压缩功率投资成本/(元·kW ⁻¹)	2340	压缩机组/膨胀机组的级数	4
单位发电功率投资成本/(元·kW ⁻¹)	1950	压缩机组/膨胀机组的变工况范围	0.4~1.0
单位储热功率投资成本/(元·kW ⁻¹)	300	压缩机组/膨胀机组的等熵效率/%	90
单位供热功率投资成本/(元·kW ⁻¹)	300	储气室气压上限/bar	100
单位体积储气室投资成本/(元·m ⁻³)	180	储气室气压下限/bar	60
单位体积热水罐投资成本/(元·m ⁻³)	800	热水罐内水温/K	368
单位功率运行与维护成本/(元·kW ⁻¹)	66	供热后的回水温度/K	313
NSF-CAES 系统寿命/a	40	膨胀机入口气温/K	363

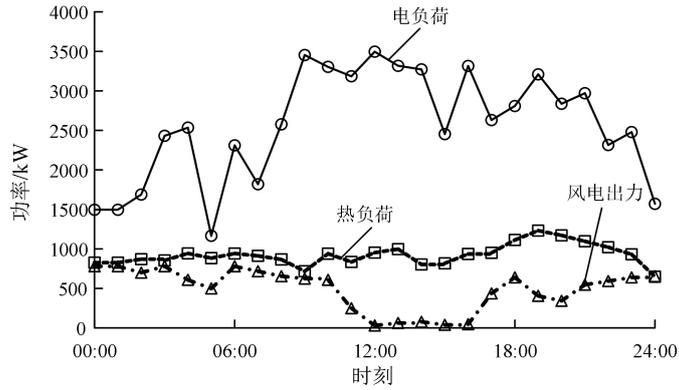


图 A2 系统典型日的负荷曲线和风电预测出力曲线

Fig.A2 Load curves and predicted wind power output curve of system in a typical day

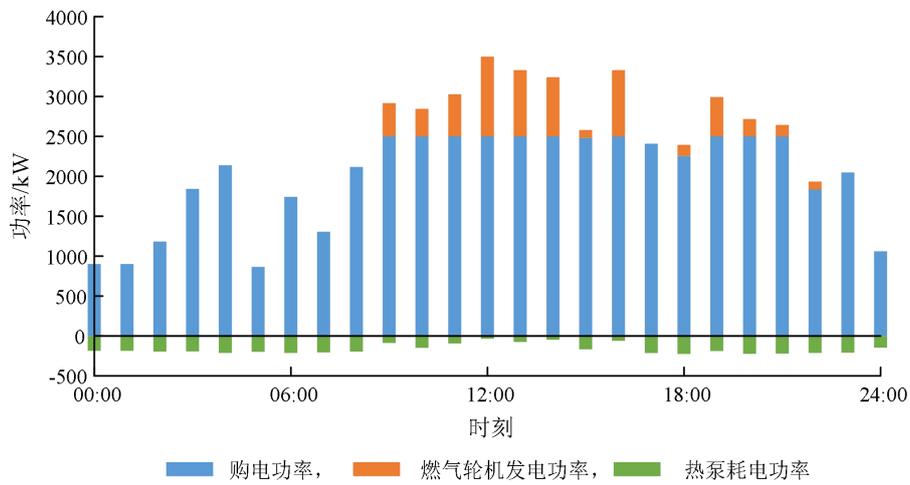


图 A3 配置 NSF-CAES 系统前典型日的电量调度结果

Fig.A3 Electric power scheduling results in a typical day before installing NSF-CAES system

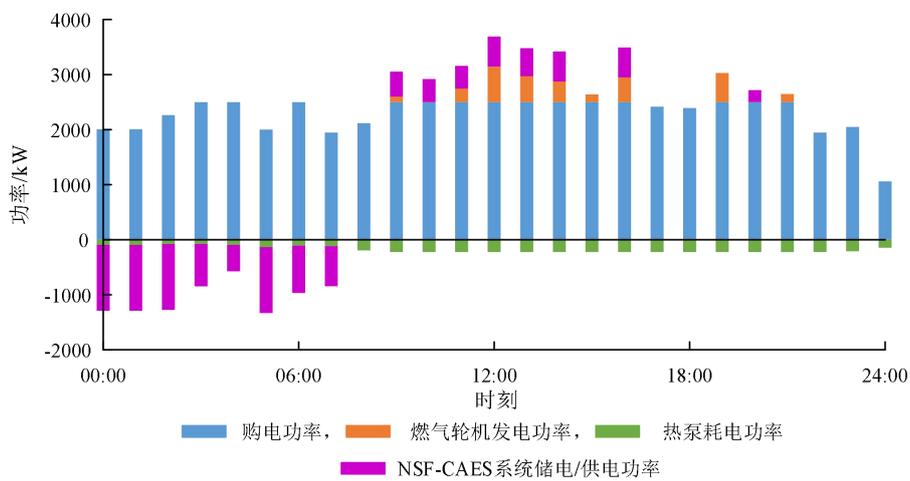


图 A4 配置 NSF-CAES 系统后典型日电量调度结果

Fig.A4 Electric power scheduling results in a typical day after installing NSF-CAES system

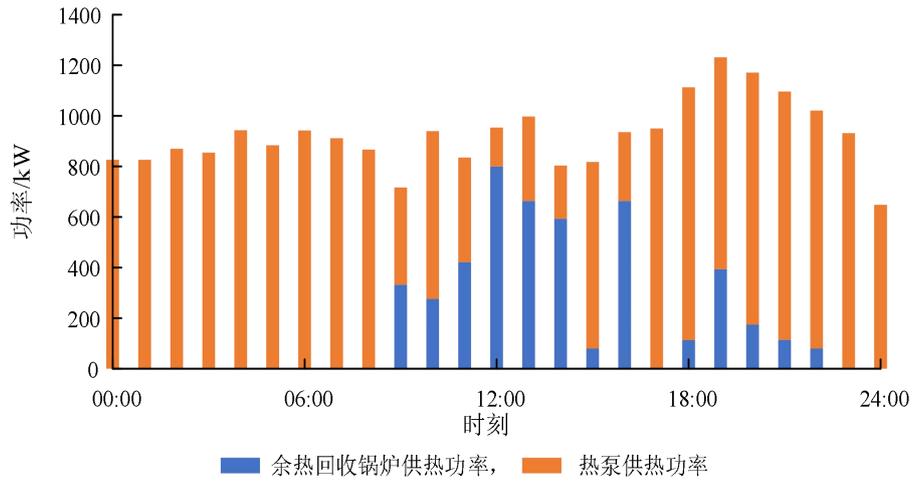


图 A5 配置 NSF-CAES 系统前典型日供热量调度结果

Fig.A5 Heat power supply scheduling results in a typical day before installing NSF-CAES system

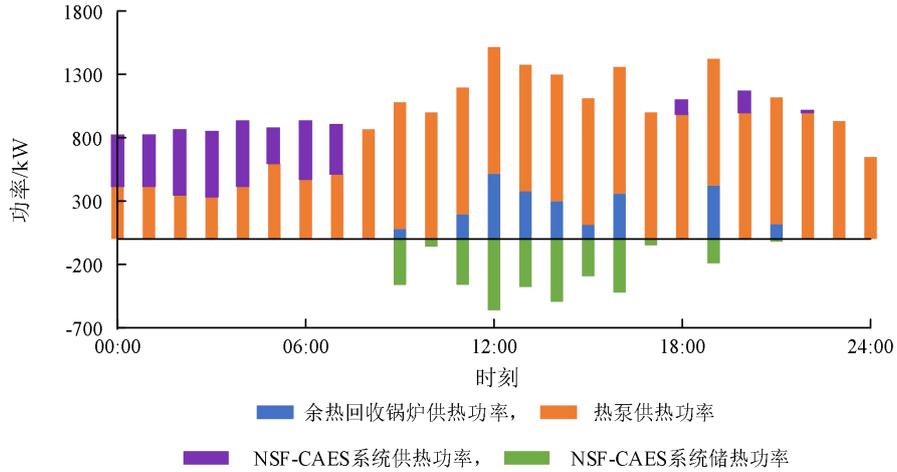


图 A6 配置 NSF-CAES 系统后典型日供热量调度结果

Fig.A6 Heat power supply scheduling results in a typical day after installing NSF-CAES system