含光热集热模块的先进绝热压缩空气储能系统 容量配置策略

蔡杰1,张松岩2,杜治1,杨东俊1,方仍存1,李姚旺2,谢澄3,苗世洪2

(1. 国网湖北省电力有限公司经济技术研究院,湖北 武汉 430074;

2. 华中科技大学 电气与电子工程学院 强电磁工程与新技术国家重点实验室

电力安全与高效湖北省重点实验室,湖北 武汉 430074;

3. 国网福建省电力有限公司福州供电公司,福建 福州 350009)

摘要:先进绝热压缩空气储能(AA-CAES)技术不但具有环境友好、成本低、容量大等优点,还拥有热电联储 /联供的独特优势,并且能够与外接热源耦合运行。充分考虑AA-CAES电站的热电联储/联供特性,将光 热集热模块作为AA-CAES系统的外部扩展热源,提出了光热集热模块耦合AA-CAES系统的优化规划模型。 该模型除了计及影响光热集热模块各项实际运行效率的约束外,还综合考虑了AA-CAES电站的规划约束、 运行约束以及AA-CAES电站备用出力约束等,并采用大M法对模型中的非线性项进行等价转换,将优化规 划模型转化为能被常规商用优化求解器高效求解的混合整数线性规划模型。基于某地区的典型日数据和改 进的IEEE 30节点系统进行算例仿真,仿真结果验证了所提模型的有效性。

0 引言

环境污染、资源短缺日益成为制约人类社会迅速发展的重要瓶颈问题之一,全球各国政府都在积极寻求解决该问题的方法和措施,大力开发、利用可再生能源已成为解决上述问题的战略共识。风能作为全球范围内分布最广泛、最丰富的清洁能源,受到来自学术界、工业界的广泛关注,成为可再生能源开发应用的重点。然而,由于风电出力具有随机性、波动性等不确定特性,其大规模并网将给电网的安全、经济运行带来严峻的考验^[1],如湖北省电网面临着严重的弃风问题,省内老旧设备众多也制约了风电的进一步消纳。因此,如何高效、安全地利用风电,减少系统的弃风水平,已成为近年来的热点研究问题之一。

大规模储能是解决风电规模化利用问题的重要 手段和关键技术。在众多储能技术中,压缩空气储 能CAES(Compressed Air Energy Storage)和抽水蓄 能是目前比较适合大规模应用的两大储能技术^[23]。 相比较而言,抽水蓄能电站受选址条件的限制,近年 来的发展渐趋平缓,而CAES电站的配置则相对灵

收稿日期:2019-10-24;修回日期:2020-05-31

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFB0903601);国家 自然科学基金资助项目(51777088);国网湖北省电力有限公 司科技项目(SGHBJY00PSJS1900052)

Project supported by the National Key Research and Development Program of China (2017YFB0903601), the National Natural Science Foundation of China (51777088) and the Science and Technology Program of State Grid Hubei Electric Power Company Limited (SGHBJY00PSJS1900052) 活,因此 CAES 技术被认为是目前最具发展潜力的 大规模储能技术之一^[3-4]。

目前全球已有2座大规模CAES电站投入商业 运行,分别是德国的Huntorf电站和美国的McIntosh 电站,其均为传统的燃气轮机补燃式CAES电站^[3-5], 缺点是发电过程依赖化石燃料,这极大地限制了传 统CAES技术的发展。为了解决这一弊端,先进绝热 压缩空气储能AA-CAES(Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage)在原有技术的基础上逐 步发展起来,该技术通过回收压缩阶段的压缩热代 替燃料补燃,实现了运行全过程的无燃烧和零排 放^[2]。此外,AA-CAES电站中包含储热装置,使其能 与外部热源耦合运行,这将有利于进一步提高AA-CAES电站的经济效益、运行灵活性,所以AA-CAES 具有广阔的发展前景和巨大的竞争优势。目前,AA-CAES技术已进入10 MW级工程示范阶段,我国也正 开展100 MW级AA-CAES系统关键部件的研发^[23]。

国内外学者已针对 CAES 电站的优化规划问题 开展了部分研究:文献[6]以微网为研究对象,提出 了一种含 CAES 的微网容量与运行双层优化规划模 型;文献[7]对风电场耦合 CAES 电站的运行方式进 行了优化和比较,建立了一种混合整数非线性规划 模型;文献[8]提出了一种基于混合整数线性规划的 含储能的主动配电网规划-运行联合优化策略;文献 [9]以提高风电消纳率为目标,建立了小岛风力耦合 CAES 电站,并提出了容量优化方法。然而,上述研 究大多仅考虑了 AA-CAES 电站具有灵活的外部扩展 热源的能力。目前,尚未有关于AA-CAES电站在热 /电双能流下考虑耦合外部拓展热源的系统容量优 化模型研究的报道。AA-CAES电站的储热装置不 但能存储压缩热,还能有效利用外部扩展热源,从而 提高AA-CAES电站内部热量调度的灵活性,进一步 提高AA-CAES电站内部热量调度的灵活性,进一步 提高AA-CAES电站的运行经济性。目前,学术界已 对将太阳能辅热作为AA-CAES电站外部扩展热源 的热力学特性进行了研究,验证了其可行性和有效 性^[1011]。但是,已有研究尚未详细考虑太阳能作为 辅热模块对AA-CAES电站参与电力系统优化规划 的影响。

166

针对上述问题,本文考虑将太阳能光热集热模 块作为AA-CAES电站的外部耦合热源,研究光热集 热模块耦合AA-CAES系统的优化规划方法。首先, 构建光热集热模块耦合AA-CAES系统的架构,分析 耦合系统的基本架构及其工作模式;在此基础上,建 立含光热集热模块的AA-CAES系统的优化规划模 型,综合考虑系统约束、光热集热约束、弃风约束、常 规机组约束、热电联产(CHP)机组约束、AA-CAES电 站规划约束、运行约束等,并采用大M法将非线性规 划问题转化为混合整数线性规划问题,简化了模型 求解的难度;最后,基于某地区的典型日数据和典型 气象年数据在IEEE 30节点系统完成算例分析,验 证所建耦合模型的有效性和可行性。

1 光热集热模块耦合AA-CAES系统架构

光热集热模块耦合 AA-CAES 系统的架构如图 1 所示,其分为压缩储能子系统、膨胀释能子系统、太 阳能聚光集热子系统 3 个部分,其中压缩储能子系 统主要包括多级压缩机、电动机以及级间冷却换热 器^[3,5],膨胀释能子系统主要包括多级膨胀机、发电 机以及级间加热换热器^[3,5],太阳能聚光集热子系统 主要包括曲面反射镜、接收器、辅助调节设备和太阳





能冷却换热器^[12];另外,级间冷却换热器、级间加热 换热器、蓄热介质以及存储蓄热介质的蓄热罐和蓄 冷罐等构成了蓄能系统。

光热集热模块与AA-CAES电站构成的耦合系 统与传统AA-CAES系统的区别是额外增加了太阳 能聚光集热子系统作为系统的外部扩展热源。传统 AA-CAES电站的热源仅有压缩阶段回收的级间压 缩热,其设计初衷在于通过回收级间压缩热来避免 化石能源的使用及其所带来的环境污染和资源枯竭 等问题,但压缩阶段回收的级间压缩热及产生的高 压气体与膨胀阶段所需的热量及高压气体是否匹配 这一问题在一定程度上制约了系统的出力安排和整 体的经济效益。光热集热模块的引入增加了热量调 度的灵活性,并在与压缩气体匹配的前提下尽可能 提高光热集热模块与AA-CAES耦合系统的整体热 量水平,有利于AA-CAES电站的充分利用。

光热集热模块与AA-CAES电站耦合系统的工 作模式如下:当系统处于用电低谷时段或者风电盈 余时,压缩储能子系统启动,从电网吸收盈余的电量 以驱动压气机工作,将空气压缩成高压气体存储在 储气室内;同时通过级间冷却换热器将冷罐中的冷 工质加热,存储在热罐中来回收系统级间压缩热,完 成电能的存储。而当系统处于用电高峰时段或者系 统发电量出现缺额时,膨胀释能子系统启动,储气室 内存储的高压气体通过级间加热换热器被加热,高 温高压的压缩气体进入膨胀机,驱动膨胀机做功,带 动发电机工作向电网输出电量,完成电能的释放^[3,10]。

太阳能聚光集热子系统作为AA-CAES电站的 一个补充热源系统,主要有集热、空闲这2种工作状态。当太阳光照辐射强度不为0且AA-CAES电站的 储热装置未达到蓄热上限时,太阳能聚光集热子系 统工作于集热状态,吸收太阳能将其转化成热能存 储在储热装置中,给AA-CAES系统补充热量;当太阳 光照辐射强度为0或AA-CAES电站储热装置达到蓄 热上限时,太阳能聚光集热子系统工作于空闲状态。

根据聚光集热方式的不同,聚光集热模块通常 有槽式、菲涅尔式、塔式和碟式这4种类型^[13],其中 槽式和菲涅尔式属于线性聚光系统,而塔式和碟式 属于点型聚光系统。不同的聚光集热方式在技术成 熟度、工作温度、投资成本等诸多方面都存在较为明 显的差异,综合比较之后,本文选择成本低、结构简 单、易于控制的线性菲涅尔式聚光集热模块构成耦 合系统中的太阳能聚光集热子系统。

2 光热集热模块耦合 AA-CAES 系统的优化 规划模型

本文建立的光热集热模块耦合 AA-CAES 系统

的优化规划模型如下:

$$\begin{cases} \min_{x_1, x_2} f(x_1, x_2) \\ \text{s.t.} \quad g(x_1) \leq 0 \\ \quad h(x_1, x_2) \leq 0 \end{cases}$$
(1)

其中, x_1 、 x_2 分别为系统的各项规划值决策变量集合、各项运行值决策变量集合,分别如式(2)和式(3) 所示; $f(x_1, x_2)$ 为目标函数,表示全系统的日均投资 运行成本; $g(x_1)$ 为系统的建设规划约束; $h(x_1, x_2)$ 为 系统的运行约束。

$$x_{1} = \{ A_{SF}, P_{CAESC,r}, P_{CAESC,r}, V_{ST,r}, Q_{TES,r} \}$$
(2)
$$x_{2} = \{ u_{SF,t}, P_{CHP,t}, u_{CHP,t}, P_{Gi,t}, u_{i,t}, R_{Gi,t}^{up}, R_{Gi,t}^{down}, P_{CAESC,r}, P_{CAESC,r}, \mu_{CAESC,r}, \mu_{CAESC,r}, P_{CAESC,r}, \mu_{CAESC,r}, \mu_{CAES$$

$$P_{CAESC, i}, P_{CAESC, i}, u_{CAESC, i},$$

其中,Asr为光热集热模块的镜场面积;Pcarscat为AA-CAES电站的额定压缩功率;P_{CAESG,r}为AA-CAES电 站的额定发电功率; $V_{\rm st.r}$ 为储气室的额定容积; $Q_{\rm rts.r}$ 为储热装置的额定储热量;usr. 为光热集热模块在 时段t的运行状态二进制变量,其值为1表示处于集 热状态,其值为0表示处于空闲状态;Pcmp,为CHP机 组在时段t的出力大小;ucm,为CHP机组在时段t的 运行状态二进制变量,其值为1表示CHP机组开机, 其值为0表示CHP机组关机;PG,为常规机组i在 时段t的出力大小;uit为常规机组i在时段t的运 行状态二进制变量,其值为1表示机组开机,其值为 0表示机组停机;R^{up}_{Git}、R^{down}Git 分别为常规机组i在时段t 的正、负备用容量;PCAESC,t、PCAESC,t分别为AA-CAES 电站在时段t的实际压缩出力、膨胀出力;u_{CAESC,t} $(u_{CAESG,t})$ 为时段t压缩工况(膨胀工况)二进制变量, |其值为1表示电站工作于压缩工况(膨胀工况),其 值为0表示压缩工况(膨胀工况)空闲; R^{up}_{CAES,t}, R^{down}_{CAES,t} 分别为AA-CAES电站在时段t的正、负备用容量; $H_{CAES,t}$ 为AA-CAES电站在时段t输出的热功率; $P_{sW,t}$ 为时段 t 风电的实际调度出力。

光热集热模块耦合 AA-CAES 系统的优化规划 模型在满足系统电、热负荷的前提下,尽可能地利用 光热集热模块提高 AA-CAES 电站参与系统供电、供 热、提供备用和提高风电消纳的积极性和灵活性,进 而最小化系统的整体投资运行成本。优化规划模型 的目标函数及约束条件的详细建模如下。

2.1 目标函数

本文所考虑的光热集热模块耦合 AA-CAES 系统优化规划模型的目标函数表达式为:

min
$$C_{\text{Total}} = C_{\text{Invest}} + C_{\text{Run}} = (C_{\text{Inv, Solar}} + C_{\text{Inv, CAES}}) + (C_{\text{R, Th}_{e}} + C_{\text{R, Th}_{r}} + C_{\text{R, CHP}} + C_{\text{R, CAES}} + C_{\text{R, W}_{e}} + C_{\text{R, Env}})$$
 (4)

其中, C_{Total} 为全系统日均投资运行成本; C_{Invest} 、 C_{Run} 分

别为系统的日均投资成本、日均运行成本, C_{Invest}包括 光热集热模块的日均投资成本 C_{Inv.Solar}、AA-CAES 电 站的日均投资成本 C_{Inv.CAES}, C_{Run}包括典型日内常规 机组的运行成本 C_{R.Th.e}、常规机组的备用成本 C_{R.Th.r}、 CHP机组的运行成本 C_{R.CAES}、希知人组的备用成本 C_{R.Th.r}、 CHP机组的运行成本 C_{R.CAES}、系统弃风成本 C_{R.W.e}、常规机组的排污 成本 C_{R.CAES}、系统弃风成本 C_{R.W.e}、常规机组的排污 成本 C_{R.Env}。常规机组的排污成本与其运行方式密 切相关,所以本文将常规机组排污成本与其运行成 本之和称为常规机组综合运行成本。各项投资成本 的具体计算表达式如下:

$$\begin{cases} C_{\text{Inv, Solar}} = \frac{1}{365} f_{\text{Solar}} A_{\text{SF}} \frac{r (1+r)^{T^{\text{proj}}}}{(1+r)^{T^{\text{proj}}} - 1} \\ C_{\text{Inv, CAES}} = \frac{1}{365} (f_{\text{CAES, C}} P_{\text{CAESC, r}} + f_{\text{CAES, G}} P_{\text{CAESG, r}} + (5) \\ f_{\text{CAES, ST}} V_{\text{ST, r}} + f_{\text{CAES, TES}} Q_{\text{TES, r}} \frac{r (1+r)^{T^{\text{proj}}}}{(1+r)^{T^{\text{proj}}} - 1} \end{cases}$$

其中, f_{Solar}为菲涅尔式聚光集热模块单位面积镜场的投资成本; T^{proj}为工程周期年限; r为折现率; f_{CAES,C}、f_{CAES,G}分别为AA-CAES电站单位压缩功率、单位膨胀功率的投资成本; f_{CAES,ST}为AA-CAES电站单位体积储气室的投资成本; f_{CAES,TES}为AA-CAES电站单位储热量的投资成本。

各项运行成本的具体计算表达式为:

$$\begin{cases} C_{\text{R, Th}_{e}} = \sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^{N_{c}} (a_{\text{Gi}} P_{\text{Gi},t} + b_{\text{Gi}} + S_{\text{Gi},t}) \\ C_{\text{R, Th}_{r}} = \sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^{N_{c}} (c_{\text{Gi}} R_{\text{Gi},t}^{\text{up}} + d_{\text{Gi}} R_{\text{Gi},t}^{\text{down}}) \\ C_{\text{R, CHP}} = \sum_{t=1}^{24} (F_{\text{CHP},t} c_{\text{ng}} + S_{\text{CHP},t}) \\ C_{\text{R, CAES}} = C_{\text{om, CAES}} (P_{\text{CAESC},r} + P_{\text{CAESG},r}) \\ C_{\text{R, W}_{c}} = \sum_{t=1}^{24} e_{\text{Wc}} (P_{\text{fW},t} - P_{\text{sW},t}) \\ C_{\text{R, Env}} = \sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^{N_{c}} k_{\text{env},i} P_{\text{Gi},t} \end{cases}$$
(6)

其中, N_{c} 为常规机组的数量; a_{Gi} 、 b_{Gi} 为常规机组i的 购电成本系数; c_{Gi} 、 d_{Gi} 分别为常规机组i的正、负备 用成本系数; $F_{CHP,t}$ 为CHP机组在时段t的天然气耗 量; c_{ng} 为天然气价格; $S_{Gi,t}$ 为常规机组i在时段t的启 动成本; $S_{CHP,t}$ 为CHP机组在时段t的启动成本; $C_{em, CAES}$ 为AA-CAES电站的运行维护成本; $P_{NV,t}$ 为时 段t风电的预测功率; e_{We} 为弃风成本; $k_{enV,t}$ 为常规机 组i的排污成本。

2.2 光热集热模块耦合 AA-CAES 系统的规划约束

系统规划值决策变量集合x₁主要包括光热集热 模块的镜场面积和AA-CAES电站的各项额定值。

(1)光热集热模块镜场面积的规划约束。

7)

$$0 \leq A_{\rm SF} \leq A_{\rm SF,\,max} \tag{(}$$

其中,A_{SF,max}为受场地面积和相关技术发展制约的镜场面积最大值。

(2)AA-CAES电站各项额定值约束。

$$\begin{cases}
P_{CAESC, rmin} \leq P_{CAESC, r} \leq P_{CAESC, rmax} \\
P_{CAESG, rmin} \leq P_{CAESG, r} \leq P_{CAESG, rmax} \\
V_{ST, rmin} \leq V_{ST, r} \leq V_{ST, rmax} \\
Q_{TES, rmin} \leq Q_{TES, r} \leq Q_{TES, rmax}
\end{cases}$$
(8)

其中, $P_{CAESC, max}$ 、 $P_{CAESC, min}$ 和 $P_{CAESG, max}$ 、 $P_{CAESC, min}$ 分别为 AA-CAES电站额定压缩功率和额定膨胀功率的 上、下限; $V_{ST, max}$ 、 $V_{ST, min}$ 和 $Q_{TES, max}$ 、 $Q_{TES, min}$ 分别为AA-CAES电站储气室体积和储热装置储热量的上、 下限。

2.3 光热集热模块耦合AA-CAES系统的运行约束

系统运行值决策变量集合 x₂主要包括常规机 组、CHP机组和AA-CAES电站的实际运行出力值及 参与系统备用出力值等,具体约束条件如下。

(1)系统功率平衡约束。

系统功率平衡包括电功率平衡和热功率平衡, 分别如式(9)和式(10)所示。

$$\sum_{i=1}^{N_{\rm G}} P_{{\rm G}i,t} + P_{{\rm CAESG},t} + P_{{\rm sW},t} = P_{{\rm Load},t} + P_{{\rm CAESC},t} \qquad (9)$$

$$H_{\text{CHP},t} + H_{\text{CAES},t} = H_{\text{Load},t} \tag{10}$$

其中, $P_{\text{Load},t}$ 、 $H_{\text{Load},t}$ 分别为时段t系统电负荷、热负荷的预测值; $H_{\text{CHP},t}$ 为CHP机组在时段t的热出力。

(2)系统备用约束。

由于风电和负荷的预测存在一定的不确定性, 为了保证系统的安全、稳定运行,需要为系统预留一 定量的正、负旋转备用,具体约束如下:

$$\sum_{i=1}^{N_{\rm G}} R_{{\rm G}i,t}^{\rm up} + R_{{\rm CAES},t}^{\rm up} \ge \varepsilon_{\rm L} P_{{\rm Load},t} + \varepsilon_{\rm W} P_{{\rm fW},t}$$

$$\sum_{i=1}^{N_{\rm G}} R_{{\rm G}i,t}^{\rm down} + R_{{\rm CAES},t}^{\rm down} \ge \varepsilon_{\rm L} P_{{\rm Load},t} + \varepsilon_{\rm W} P_{{\rm fW},t}$$
(11)

其中,ε_L、ε_w分别为系统负荷、风电的预测误差比例。 (3)常规机组运行约束。

常规机组运行约束主要包括机组出力上下限约 束、机组启停时间约束、爬坡约束及运行工况约束 等,具体表达式如下^[14]:

$$\begin{cases} u_{Gi,t}P_{Gi,\min} \leq P_{Gi,t} \leq u_{Gi,t}P_{Gi,\max} \\ T_{Gi,t}^{on} \geq T_{Gi,\min}^{on} \\ T_{Gi,t}^{off} \geq T_{Gi,\min}^{off} \\ S_{Gi,t} = u_{Gi,t}(1 - u_{Gi,t-1})f_{St_{Gi}} \\ P_{Gi,t+1} - P_{Gi,t} \leq v_{Gi}^{up} \\ P_{Gi,t} - P_{Gi,t+1} \leq v_{Gi}^{down} \end{cases}$$
(12)

其中, $P_{G_{i,max}}$ 、 $P_{G_{i,min}}$ 分别为常规机组i出力的上、下限; $T_{G_{i,t}}^{on}$ 、 $T_{G_{i,t}}^{off}$ 分别为常规机组i在时段t的开机时间、

停机时间; $T_{Gi,min}^{on}$ 、 $T_{Gi,min}^{off}$ 分别为常规机组i的最小开机时间、最小停机时间; f_{SLGi} 为常规机组i的启动成本; v_{Gi}^{un} 、 v_{Gi}^{unn} 分别为常规机组i的上、下爬坡率。

(4)CHP机组运行约束。

本文采用背压式燃气轮机作为CHP机组^[15],其 输出电功率和热功率之间的约束为:

$$P_{\rm CHP,t} = k_{\rm CHP} H_{\rm CHP,t} \tag{13}$$

CHP机组消耗的天然气流量约束为:

$$F_{\text{CHP},t} = \frac{\chi_{\text{CHP}}(\psi_{\text{P}} P_{\text{CHP},t} + \psi_{\text{H}} H_{\text{CHP},t})}{H_{\text{Value_ng}}}$$
(14)

其中, χ_{CHP} 为CHP机组的成本系数; ψ_P, ψ_H 分别为CHP机组输出单位电功率、热功率消耗的天然气; $H_{Value_{ng}}$ 为天然气的热值。

CHP机组的出力上下限约束为:

$$\begin{cases} u_{CHP,t} P_{CHP,\min} \leq P_{CHP,t} \leq u_{CHP,t} P_{CHP,\max} \\ u_{CHP,t} H_{CHP,\min} \leq H_{CHP,t} \leq u_{CHP,t} H_{CHP,\max} \\ u_{CHP,t} F_{CHP,\min} \leq F_{CHP,t} \leq u_{CHP,t} F_{CHP,\max} \end{cases}$$
(15)

其中, $P_{CHP, max}$ 、 $P_{CHP, min}$ 和 $H_{CHP, max}$ 、 $H_{CHP, min}$ 以及 $F_{CHP, max}$ 、 $F_{CHP, min}$ 分别为CHP机组输出电功率和热功率以及消 耗天然气流量的上、下限。

此外,CHP机组的约束还包括爬坡约束和启停 约束等,这些约束与常规机组类似,在此不再赘述。

(5)AA-CAES电站运行约束。

AA-CAES电站相较于常规火电机组及传统 CAES电站的一大优势是:AA-CAES电站内部不含 有燃料燃烧过程,其动态响应特性相较于常规火电 机组有了明显的提高,故在建立规划约束模型时可 以忽略AA-CAES电站的爬坡约束、启停约束和工况 转化约束,这在一定程度上简化了约束模型^[2]。

然而,AA-CAES电站是一个多能流交互耦合的 复杂系统,其内部质量流量、储气室气压/温度、压 缩/膨胀比以及压缩/膨胀功率之间存在着复杂的 耦合关系,彼此之间相互影响,给模型的建立和深入 分析带来了较大的困难。本文参考文献[16]中的方 法对AA-CAES系统进行模型解耦和线性化,将储气 室气压变化率和储热装置热量变化率转化为由压缩 功率和膨胀功率决定的线性化约束,并通过分段线 性化的方法将运行过程中储气室气压变化对系统运 行的影响考虑在内。线性化之后的AA-CAES电站 的约束模型如下^[2,16-17]。

压缩过程约束为:

 $P_{\text{CAESC, min}} u_{\text{CAESC, t}} \leq P_{\text{CAESC, t}} \leq P_{\text{CAESC, r}} u_{\text{CAESC, t}} \quad (16)$

 $T_{CAESC, out, i} = T_{CAESC, in, i} \{ [\beta_{c, i}^{(R-1)/R} - 1] / \eta_{c} + 1 \} (17)$ 其中, $P_{CAESC, min}$ 为压缩机实际出力下限; $T_{CAESC, in, i}$ 、 $T_{CAESC, out, i}$ 分别为第 i级压缩机的进、出口气体温度; R为空气的比热比; $\beta_{c, i}$ 为第 i级压缩机的额定压缩比; $\eta_{\rm o}$ 为压缩效率。

$$P_{\text{CAESG, min}} u_{\text{CAESG, t}} \leq P_{\text{CAESG, t}} \leq P_{\text{CAESG, r}} u_{\text{CAESG, t}}$$
(18)
$$T_{\text{CAESG, out, i}} = T_{\text{CAESG, in, i}} \{ [\beta_{g, i}^{(R-1)/R} - 1] / \eta_g + 1 \}$$
(19)

其中, $P_{CAESC, min}$ 为膨胀机实际出力下限; $T_{CAESC, min}$ 、 $T_{CAESC, out, i}$ 分别为第i级膨胀机的进、出口气体温度; $\beta_{s,i}$ 为第i级膨胀机的额定膨胀比; η_s 为膨胀效率。

关于储气室约束,本文考虑储气室气压变化的 影响。利用分段线性化的方法将储气室气压按照气 压上下限划分为3段,根据每段气压的中间值计算 对应的线性化系数:

$$\begin{cases} \dot{p}_{up,t} = (u_{p1,t}k_{c1} + u_{p2,t}k_{c2} + u_{p3,t}k_{c3})P_{CAESC,t} \\ \dot{p}_{down,t} = k_g P_{CAESC,t} \end{cases}$$
(20)

$$p_{\mathrm{st},t} = p_{\mathrm{st},0} + \sum_{\tau=1}^{t} \left(\dot{p}_{\mathrm{up},\tau} - \dot{p}_{\mathrm{down},\tau} \right) \Delta \tau \tag{21}$$

$$p_{\text{st,min}} \leq p_{\text{st,}t} \leq p_{\text{st,max}} \tag{22}$$

其中, k_{e1} 、 k_{e2} 、 k_{e3} 分别为3段储气室气压分段对应的 压缩机气压变化率的功率系数; $u_{p1,t}$ 、 $u_{p2,t}$ 、 $u_{p3,t}$ 分别为 3段储气室气压分段的二进制状态量,其值为1表示 时段t储气室的实际气压位于对应的分段内,其值为 0表示时段t储气室的实际气压不位于对应的分段 内; k_{g} 为膨胀机气压变化率的功率系数; $\dot{p}_{up,t}$ 、 $\dot{p}_{down,t}$ 分 别为时段t储气室气压的上升率、下降率; $p_{st,0}$ 和 $p_{st,t}$ 分别为储气室初始气压、时段t的气压; $p_{st,max}$ 、 $p_{st,min}$ 分 别为储气室气压的上、下限值; $\Delta \tau$ 为单位时段调度 时长。由于储气室出口一般配置有稳压阀,储气室 内部气压变化对膨胀阶段的影响几乎可以忽略,所 以不考虑储气室气压分段对膨胀阶段的影响。

储气室气压的分段线性化约束为:

$$\begin{cases} u_{p_{1,t}} + u_{p_{2,t}} + u_{p_{3,t}} = 1 \\ \sum_{i=1}^{3} p_{i} u_{p_{i,t}} \leq p_{s_{t,t}} \leq \sum_{i=1}^{3} \bar{p}_{i} u_{p_{i,t}} \end{cases}$$
(23)

其中, \underline{p}_i 、 \bar{p}_i 分别为第*i*段储气室气压分段的气压下限、上限。

储热装置约束为:

$$\begin{cases} P_{\text{Qc},t} = H_c P_{\text{CAESC},t} \\ P_{\text{Qg},t} = H_g P_{\text{CAESG},t} \end{cases}$$
(24)

$$Q_{\text{TES},t} = Q_{\text{TES},0} + \sum_{\tau=1}^{t} (P_{\text{SF},t} + P_{\text{Qc},\tau} - P_{\text{Qg},\tau}) \Delta \tau \quad (25)$$

$$Q_{\text{TES, min}} \leq Q_{\text{TES, t}} \leq Q_{\text{TES, r}}$$
(26)

其中, H_e 、 H_g 分别为压缩机、膨胀机热量变化率的功率系数; $P_{SF,t}$ 为时段t太阳能聚光集热模块的产热功率; $P_{Qe,t}$ 、 $P_{Qe,t}$ 分别为时段t压缩机的产热功率、膨胀机的释热功率; $Q_{TES,0}$ 、 $Q_{TES,t}$ 分别为储热装置初始储热量、时段t的储热量; $Q_{TES,min}$ 为储热装置储热量的下限值。

AA-CAES电站的运行工况约束为:

$$u_{\text{CAESC},t} + u_{\text{CAESG},t} \le 1 \tag{27}$$

即AA-CAES电站不能同时工作在压缩工况和膨胀工况。

(6)AA-CAES备用约束。

当考虑 AA-CAES 电站提供旋转备用时,除了 需要考虑压缩 / 膨胀功率上下限值约束外,还需要 额外考虑储气室气压上下限和储热装置储热量上 下限约束,保证 AA-CAES 电站提供备用功率时不会 发生气压或者储热量越限的情况。本文不考虑 AA-CAES 电站跨工况提供备用的情形,故 AA-CAES 电 站的正、负旋转备用约束为^[2]:

$$\begin{cases} R_{CAES,t}^{up} = R_{CAESC,t}^{up} + R_{CAESG,t}^{up} \\ R_{CAES,t}^{down} = R_{CAESC,t}^{down} + R_{CAESG,t}^{down} \end{cases}$$
(28)
$$\begin{cases} P_{CAESC,t} - R_{CAESC,t}^{up} > P_{CAESC,min} \\ P_{CAESC,t} + R_{CAESC,t}^{up} > P_{CAESC,max} \\ P_{CAESC,t} + R_{CAESG,t}^{up} < P_{CAESC,max} \\ P_{CAESC,t} + R_{CAESG,t}^{up} < P_{CAESC,max} \\ P_{CAESC,t} + R_{CAESC,t}^{up} < P_{CAESC,max} \\ P_{CAESC,t} + R_{CAESC,t}^{down} < P_{CAESC,max} \\ P_{CAESC,t} - R_{CAESC,t}^{down} < P_{CAESC,max} \\ P_{CAESC,t} - R_{CAESC,t}^{down} < P_{CAESC,max} \\ P_{CAESC,t} - R_{CAESC,t}^{down} > P_{CAESC,max} \end{cases}$$
(30)

其中, $R_{CAESC,t}^{up}$, $R_{CAESC,t}^{down}$, $R_{CAESC,t}^{p}$, R_{CA

(7)太阳能聚光集热模块的运行约束。

太阳能聚光集热模块通过反射镜、接收器和换 热器等装置将太阳能转化成AA-CAES电站可以直 接利用的热能,具体约束如下^[12]:

 $P_{SF,t} = A_{SF} D_t I_L I_T \eta_{OPT,R} \eta_{END} \eta_{CIN} \varepsilon u_{SF,t}$ (31) 其中, D_t 为时段 t 太阳光的直接法向辐射强度; $\eta_{OPT,R}$ 为参考光学效率,其主要取决于镜面反射率、玻璃管 折射率、接收管选择性涂层的吸收率等因素; η_{END} 为 终端损耗光效率,用于表示接收器角度的调整对实 际受照面积的影响; η_{CIN} 为反射镜面、玻璃管表面的 清洁度系数; ε 为太阳能冷却换热器的换热系数。

参考光学效率 η_{огг.} 通常是在入射光线与镜面 反射镜垂直的条件下给出的,一个典型日内太阳光 的入射角(太阳入射光线和镜面反射镜法线之间的 夹角)是不断变化的,因此实际情况下的光学效率需 要进行一定的折算,本文引入入射角调整率(IAM)。 IAM 根据实际情况可以被分解为纵向分量 I_{L} 和横向 分量 I_{T} ,它们主要取决于入射角的纵向分量 θ_{L} 和横向分量 θ_{T} ,具体对应关系可以参考文献[12]。

终端损耗光效率 η_{END} 的具体计算表达式为:

$$\eta_{\rm END} = 1 - (F/L) \tan \theta_{\rm L}$$
 (32)

其中,F、L分别为太阳能聚光集热模块单位反射镜的焦距、长度。

(8)弃风约束。

$$0 \leq P_{sW,t} \leq P_{fW,t} \tag{33}$$

即系统弃风量不能超过风电预测出力。

2.4 非线性约束转换

从上述约束模型中可以看出,本文所建立的光 热集热模块耦合AA-CAES系统的优化规划模型中 存在非线性问题,即AA-CAES电站额定值的规划结 果将会进一步影响到AA-CAES电站及常规机组的 运行出力及备用出力。面对这种问题,本文借助大 M法将上述非线性规划问题转化为混合整数线性规 划问题,避免求解过程中出现非线性项。

下文以AA-CAES电站压缩机运行出力的上限 约束为例,阐述大M法的转化思路:原始的压缩功率 上限约束如式(16)所示,由于P_{CAESC,}和u_{CAESC,}都是 决策变量,两者相乘将会引入非线性项,借助大"M" 法将其进行转化之后的表达式如式(34)所示。

$$\begin{cases} P_{\text{CAESC},t} \leq P_{\text{CAESC},r} + (1 - u_{\text{CAESC},t})M \\ -u_{\text{CAESC},t}M \leq P_{\text{CAESC},t} \leq u_{\text{CAESC},t}M \end{cases}$$
(34)

其中,M为一个近似无穷大的常数。经分析可以发现,当 $u_{CAESC,i}$ =1时,式(16)和式(34)均表示AA-CAES电站的压缩功率 $P_{CAESC,i}$ 不超过其额定值 $P_{CAESC,i}$;当 $u_{CAESC,i}$ =0时,式(16)和式(34)均表示AA-CAES电站的压缩功率 $P_{CAESC,i}$ =0。可以看出,经过大M法转化之后,原始约束关系并没有发生变化且系统中的非线性项被转化为线性项,降低了模型的求解难度。同理,利用大M法可以将膨胀功率、储气室气压以及储热装置储热量的非线性约束问题转化为线性化问题,简化求解过程,在此不再赘述。

基于前文所提 AA-CAES 电站模型解耦线性化 及大M法,本文所建立的光热集热模块耦合 AA-CAES 系统的优化规划模型被简化为一个相对简单 的混合整数线性规划问题,从而可以借助常用的优 化求解软件进行模型求解,本文选择 CPLEX12.6.3 商业求解器进行求解。

3 算例分析

3.1 算例参数

本文算例系统基于改进的IEEE 30节点系统进行仿真分析,风电场和光热集热模块耦合AA-CAES 电站接入原系统的节点23,系统结构图可参考文献 [2]。光热集热模块的单位面积投资成本及各项效率系数见附录中表A1^[12],AA-CAES电站的各项投资成本、规划约束范围见附录中表A2^[4,6,18],AA-CAES电站的各项运行参数见附录中表A3^[2,18],常规机组调度参数见附录中表A4^[2,19],CHP机组参数见附录中表A5^[15],折现率取为8%,工程周期年限为40 a。

本文参考我国某地区典型日 24 h(分为 24 个时段)的电 / 热负荷数据和风电数据^[18,20],电 / 热负荷和风电出力典型日的预测曲线如附录中图 A1 所示。 假设电负荷预测和风电出力预测的最大误差分别为 5%和 20%。为了尽可能保证风电的充分消纳,本 文将弃风成本设置为 200 \$/ MW。

在进行光伏电站或光热电站前期选址和收益计 算时,太阳能辐射数据及太阳能方位角等数据较为 常见的来源有 NASA 和 Meteonorm。本文选择利用 Meteonorm中的气象数据进行分析,主要包括太阳能 直接法向辐射强度、太阳方位角、仰角等数据^[12]。利 用 Meteonorm选择我国某地区一个典型气象年的数 据集进行研究,筛选春分、夏至、秋分和冬至4个典 型日的数据并按比例进行加权平均,从而得到该地 区典型日的太阳直接法向辐射强度预测曲线,如附 录中图 A2 所示。

3.2 结果分析

3.2.1 规划结果分析

为了验证本文所提耦合系统优化规划模型的有效性,设置了3种场景进行对比:场景1,本文所建立的光热集热模块耦合AA-CAES系统模型;场景2,无光热模块的传统AA-CAES电站;场景3,无AA-CAES电站,仅考虑常规机组和CHP机组。上述3种场景除规定设置外,负荷预测和风电出力预测等条件均保持一致。

场景1和场景2的模型规划结果如表1所示。 由表1可知,有、无光热集热模块对系统的规划结果 具有明显的影响,考虑光热集热模块之后AA-CAES 电站的各项规划值均有明显增加。

表1 场景1、2的规划结果对比

Table 1Comparison of planning results betweenScenario 1 and Scenario 2

	规划结果		
<i>参</i> 奴	场景1	场景2	
AA-CAES压缩功率 / MW	140.05	91.39	
AA-CAES膨胀功率 / MW	109.75	98.47	
AA-CAES储气室体积 / m ³	3.5×10^{6}	2.5×10^{6}	
AA-CAES储热装置储热量 / (MW · h)	944.00	781.89	
光热集热模块镜场面积 / m ²	311120.7	_	

场景1--3下系统的部分投资、运行成本仿真结 果如表2所示,完整的仿真结果见附录中表A6。表 中各项数据均已折算为日均投资、运行成本。

表2 各场景下系统投资、运行成本的部分仿真结果

			1±.•
		仿真结果	
	场景1	场景2	场景3
常规机组启停成本	4570	3850	5470
常规机组综合运行成本	515356	484 563	489194
常规机组备用成本	27 620	36064	54375
CHP机组成本	0	55 539	58285
AA-CAES电站成本	22894	17237	_
光热集热模块投资成本	9 2 9 3	_	_
弃风惩罚成本	0	0	48310
总计	579733	597 253	655634

对比场景1和场景2的仿真结果可以看出,光热 集热模块的引入对系统的总体运行经济性有一定的 改善,引入后系统日均投资运行成本由\$597253降 至\$579733,下降了\$17520。进一步分析可以看 出,考虑光热集热模块之后,常规机组备用成本降 低;系统的热负荷供应完全由AA-CAES电站承担, 常规机组综合运行成本与CHP机组成本之和由原 来的\$540102降至\$515356,下降了\$24746;AA-CAES电站的投资、运维总成本出现了一定程度的上 升,且场景1和场景2中均没有出现弃风现象。对比 结果表明光热集热模块的引入丰富了系统的热源, 提高了AA-CAES电站的额定规划值,使得AA-CAES 电站在保证供热负荷的同时能够承担更多的负荷出 力和备用工作,改善了系统的运行经济性。

对比场景2和3的仿真结果可知,AA-CAES电站的建立使系统的总成本由\$655634降至\$597253,下降了\$58381。进一步分析可发现,相较于场景2,场景3中常规机组的综合运行成本、备用成本、启停成本、CHP机组成本均出现了一定程度的上升,且场景3中的弃风惩罚成本不再为0,而是增加至\$48310,约占场景3总成本的8%。对比结果说明AA-CAES电站的引入能极大地改善系统的运行经济性,这是因为:常规机组的动态响应特性较差,无法满足快速跟踪风电出力的需求,会造成较为严重的弃风现象;而AA-CAES电站由于内部无燃料燃烧过程,动态响应特性优良,可快速跟踪负荷、风电的剧烈波动,平滑机组出力,提高系统的运行经济性。

场景1和场景2下的系统典型日的运行结果分别如图2和图3所示,其中AA-CAES电站的功率为 负表明其当前处于压缩工况。

由图2、3可知,不论是否考虑到光热集热模块, AA-CAES电站的整体工作模式都是"低储高放",即 在负荷低谷时段工作于压缩工况进行储能,在负荷高 峰时段工作于膨胀工况进行释能,这表明AA-CAES 电站具有较好的削峰填谷能力;AA-CAES电站大部 分时段并不会运行于最大功率附近,其主要目的是



图 2 场景1下电网典型日运行结果

Fig.2 Operation results of power grid in typical day under Scenario 1



Fig.3 Operation results of power grid in typical day under Scenario 2

为了使AA-CAES电站在保证削峰填谷能力的同时 具备足够的正/负备用容量,以满足负荷备用需求。 3.2.2 AA-CAES电站储气室气压动态变化对规划 结果的影响

本文采用了分段线性化的方法,将储气室气压 按照其额定上下限划分成3段,气压区间分别为 [40,45)、[45,50)、[50,55] bar,并根据每段气压的 中间值计算对应的气压变化率,规划结果见表1和 表2中场景1部分。为了进一步研究储气室气压在 典型日运行过程中的动态变化对规划结果的影响, 设置新的对比场景:不考虑储气室内部气压变化的 影响,气压变化系数按照额定值进行计算(场景4)。

场景1与场景4的规划结果以及部分投资、运行 成本仿真结果对比分别如表3和表4所示,场景4完 整的投资、运行成本仿真结果见附录中表A6。

对比上述结果可发现,储气室内部气压的动态 变化对系统优化规划结果有影响但不明显,场景1 和4下AA-CAES电站的规划结果、各项投资运行成 本相差不大。这主要是因为:AA-CAES电站内部气 压的影响主要体现在压缩阶段的最后一级中,在膨胀

表3 场景1、4的规划结果对比

Table 3 Comparison of planning results between

Scenario 1 and Scenario 4

	规划结果		
参 奴	场景1	场景4	
AA-CAES压缩功率 / MW	140.05	137.70	
AA-CAES膨胀功率 / MW	109.75	104.35	
AA-CAES储气室体积/m ³	3.5×10 ⁶	3.0×10 ⁶	
AA-CAES储热装置储热量/(MW・h)	944.00	928.76	
光热集热模块镜场面积 / m ²	311120.7	305 707.0	

表4 场景1、4下系统投资、运行成本的部分仿真结果

Table 4 Partial simulative results of system investment cost and operation cost for Scenario 1 and Scenario 4 单位。\$

	仿真结果		
成本	场景1	场景4	
常规机组启停成本	4570	4 5 7 0	
常规机组综合运行成本	515356	516881	
常规机组备用成本	27 620	28 561	
CHP机组成本	0	0	
AA-CAES电站成本	22894	22 225	
光热集热模块投资成本	9 2 9 3	9130	
弃风惩罚成本	0	0	
总计	579733	581 367	

阶段由于稳压阀的存在所以几乎不产生影响;且储 气室内部气压在一个典型日内变化不大。因此出于 简化分析考虑,可忽略储气室内部气压变化的影响。

4 结论

本文充分考虑了AA-CAES的热电联储/联供特性,将太阳能聚光集热模块作为AA-CAES电站的 外部耦合热源,提出了一种含光热集热模块的AA-CAES系统容量配置策略,并进行了仿真验证,所得 结论如下:

(1)光热集热模块的引入丰富了AA-CAES电站的热量来源,使AA-CAES电站整体供能水平提升, 从而能更加有力地参与系统热/电负荷供应、风电调节和备用中,增加了系统整体运行的经济效益;

(2)AA-CAES电站储气室气压的动态变化对于 规划结果的影响较小,在精度要求不高的情况下可 以忽略,从而简化模型的求解。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

[1] 袁小明,程时杰,文劲宇.储能技术在解决大规模风电并网问题中的应用前景分析[J].电力系统自动化,2013,37(1): 14-18.

YUAN Xiaoming, CHENG Shijie, WEN Jinyu. Prospects analysis of energy storage application in grid integration of largescale wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1):14-18.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 梅生伟,公茂琼,秦国良,等. 基于盐穴储气的先进绝热压缩空 气储能技术及应用前景[J]. 电网技术,2017,41(10):3392-3399.

MEI Shengwei, GONG Maoqiong, QIN Guoliang, et al. Advanced adiabatic compressed air energy storage system with salt cavern air storage and its application prospects [J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3392-3399.

- [5]张新敬,陈海生,刘金超,等. 压缩空气储能技术研究进展[J]. 储能科学与技术,2012,1(1):26-40.
 ZHANG Xinjing, CHEN Haisheng, LIU Jinchao, et al. Research progress in compressed air energy storage system: a review[J].
 Energy Storage Science and Technology,2012,1(1):26-40.
- [6]张俊.含有压缩空气储能的微网规划与运行控制研究[D].济南:山东大学,2016.
 ZHANG Jun. Research on planning and operation of microgrid including CAES[D]. Jinan:Shandong University,2016.
- [7] ABBASPOUR M,SATKIN M,MOHAMMADI-IVATLOO B,et al. Optimal operation scheduling of wind power integrated with Compressed Air Energy Storage(CAES)[J]. Renewable Energy, 2013.51:53-59.
- [8]张毓颖.含等温压缩空气储能的主动配电网规划-运行联合优化[D].北京:华北电力大学,2018.
 ZHANG Yuying. Planning-operation co-optimization of active distribution network with isothermal compressed air energy storage system[D]. Beijing: North China Electric Power University,2018.
- [9] ZAFIRAKIS D,KALDELLIS J K. Autonomous dual-mode CAES systems for maximum wind energy contribution in remote island networks[J]. Energy Conversion and Management, 2010, 51(11):2150-2161.
- [10] 安鹏.基于太阳能辅热的压缩空气储能系统热力性能研究
 [D].北京:华北电力大学,2018.
 AN Peng. Analysis of thermal performance of compressed air energy storage system coupled with solar auxiliary heating
 [D]. Beijing:North China Electric Power University,2018.
- [11] 陈晓弢,王国华,司杨,等.改进的光热复合压缩空气储能系统 设计方案及其仿真分析[J].电力自动化设备,2018,38(5): 20-26.
 CHEN Xiaotao, WANG Guohua, SI Yang, et al. Improved design scheme of solar thermal compressed air energy storage system and its simulation analysis[J]. Electric Power Automa-
- [12] COCCO D, SERRA F. Performance comparison of two-tank direct and thermocline thermal energy storage systems for 1 MWe class concentrating solar power plants[J]. Energy,2015, 81:526-536.

tion Equipment, 2018, 38(5): 20-26.

 [13] 杜尔顺,张宁,康重庆,等.太阳能光热发电并网运行及优化规划研究综述与展望[J].中国电机工程学报,2016,36(21): 5765-5775,6019.
 DU Ershun, ZHANG Ning, KANG Chongqing, et al. Reviews

172

173

and prospects of the operation and planning optimization for grid integrated concentrating solar power[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5765-5775, 6019.

- [14] 李本新,韩学山,刘国静,等.风电与储能系统互补下的火电机 组组合[J].电力自动化设备,2017,37(7):32-37,54.
 LI Benxin, HAN Xueshan, LIU Guojing, et al. Thermal unit commitment with complementary wind power and energy storage system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(7):32-37,54.
- [15] ANAND H,NARANG N,DHILLON J S. Unit commitment considering dual-mode combined heat and power generating units using integrated optimization technique[J]. Energy Conversion and Management, 2018, 171:984-1001.
- [16] LI Y W, MIAO S H, LUO X, et al. Optimization model for the power system scheduling with wind generation and compressed air energy storage combination[C]//2016 22nd International Conference on Automation and Computing(ICAC). Colchester, United Kingdom: IEEE, 2016: 300-305.
- [17] 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 feasi-

ble 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.

 [18] 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.

- [19] 闫顺林,谷兵,艾书剑,等.火电厂发电污染成本核算及敏感度 分析[J].电力科学与工程,2016,32(7):62-67.
 YAN Shunlin, GU Bing, AI Shujian, et al. The environmental cost accounting and sensitivity analysis for thermal power plants[J]. Electric Power Science and Engineering, 2016, 32 (7):62-67.
- [20] LI Z G, WU W C, SHAHIDEHPOUR M, et al. Combined heat and power dispatch considering pipeline energy storage of district heating network [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(1):12-22.

作者简介:



蔡 杰(1985—), 男, 山东枣庄人, 高 级工程师, 硕士, 主要研究方向为电力系统 优化规划技术、电力系统优化运行与控制技 术等(**E-mail**: dtscj@163.com);

张松岩(1996—),男,山西运城人,硕 士研究生,通信作者,主要研究方向为压缩 空气储能系统以及电力系统优化规划等 (E-mail:songyan_zhang@163.com);

蔡杰

苗世洪(1963—),男,湖北随州人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为压缩空气储能系

统、电力系统保护等(E-mail:shmiao@hust.edu.cn)。

(编辑 陆丹)

Capacity allocation strategy of advanced adiabatic compressed air energy storage system with solar thermal collector module

CAI Jie¹, ZHANG Songyan², DU Zhi¹, YANG Dongjun¹, FANG Rengcun¹,

LI Yaowang², XIE Cheng³, MIAO Shihong²

(1. State Grid Hubei Electric Power Company Limited Economic Research Institute, Wuhan 430074, China;

2. Hubei Electric Power Security and High Efficiency Key Laboratory, State Key Laboratory of Advanced

Electromagnetic Engineering and Technology, School of Electrical and Electronic Engineering,

Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

3. Fuzhou Power Supply Company of State Grid Fujian Electric Power Company Limited, Fuzhou 350009, China) Abstract: AA-CAES(Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage) technology not only has the advantages of environmental friendliness, low cost, large capacity and so on, but also has the unique advantages of co-generation and co-storage of heat and power, and can be coupled with external heat sources. Fully considering the characteristics of co-generation and co-storage of heat and power of AA-CAES power station, the solar thermal collector module is taken as the external extended heat source of the AA-CAES system, and the optimization planning model of the AA-CAES system coupled with solar thermal collector module is proposed. In addition to the constraints that affect the actual operation efficiency of solar thermal collector module, the planning constraints, operation constraints and standby output constraints of AA-CAES power station are also considered comprehensively. The nonlinear terms in the model are equivalently transformed by the large M method, and the optimization planning model is transformed into a mixed integer linear programming model, which can be efficiently solved by conventional commercial optimization solvers. Based on the typical daily data of a certain region and the modified IEEE 30-bus system, the simulative results verify the validity of the proposed model.

Key words: AA-CAES; solar assisted heat; solar thermal collector module; optimization planning; capacity allocation; mixed integer linear programming model

附 录

表 A1 光热集热模块参数 Table A1 Parameters of solar collector module

位	参数	数值
.67	单元聚光集热反射镜的长度/m	180
.98	单元聚光集热反射镜的焦距/m	16.56
).7	单位镜场面积投资成本/(\$ ·m ⁻²)	130
)	:值 67 98 9.7	/值 参数 67 单元聚光集热反射镜的长度/m 98 单元聚光集热反射镜的焦距/m 9.7 单位镜场面积投资成本/(\$·m²)

表 A2 AA-CAES 电站的规划参数 Table A2 Planning parameters of AA-CAES plant

参数	数值
压缩机建设成本系数/(\$·MW-1)	3.9×10 ⁵
膨胀机建设成本系数/(\$·MW-1)	3.25×10 ⁵
储气室建设成本系数/(\$·m-3)	3×10 ⁻³
储热装置建设成本系数/[\$·(MW·h)-1]	4.14×10 ³
运行维护成本系数/(\$·MW-1)	5
额定压缩功率上限/MW	200
额定压缩功率下限/MW	20
额定膨胀功率上限/MW	200
额定膨胀功率下限/MW	20
储气室体积上限/m³	4×10 ⁶
储气室体积下限/m ³	2×10^{4}
储热室额定最大储热量/(MW·h)	3000
储热室额定最小储热量/(MW·h)	0

表 A3 AA-CAES 电站的运行参数 Table A3 Operation parameters of AA-CAES plant

racierite opere	men parame	tere of the of the plane	
参数	数值	参数	数值
环境温度/K	293.15	储气室气压上限/bar	55
环境气压/bar	1.013	储气室气压下限 bar	40
压缩机级数	4	储气室初始气压/bar	47.5
膨胀机级数	4	储气室初始气温/K	480
每级压缩机额定压缩比	2.75	储气室壁温/K	485
每级膨胀机额定膨胀比	2.4	冷载热介质温度/K	477
压缩过程效率/%	85	热载热介质温度/K	578
膨胀过程效率/%	85		

参数	G_1	G_2	G ₃	G_4	G5
最大机组出力/MW	350	240	250	350	230
最小机组出力/MW	100	30	50	50	30
燃料成本系数 b/(\$·MW-1)	8.6	12.2	11.5	7.5	12.6
燃料成本系数 c/\$	32.5	27.5	27.5	30	25
机组启停成本/ \$	1500	890	900	1450	720
机组启停时间/h	4	2	2	4	2
机组爬坡率/(MW·min ⁻¹)	2.3	4.5	4.6	2.7	7.9
上备用单位成本/(\$·MW-1)	4.82	3.82	4.49	5.52	3.28
下备用单位成本/(\$·MW-1)	4	3.27	3.13	3.83	2.81
机组排污成本/[\$·(MW·h) ⁻¹]	0.81	0.86	0.85	0.81	0.87

表 A4 常规机组参数 Table A4 Parameters of conventional generators

表 A5 CHP 机组参数 Table A5 Parameters of CHP units

Table A5 Parameters of CHP units				
参数	数值	参数	数值	
机组最大发电出力/MW	140	产热成本系数/(\$·MW ⁻¹)	0.36	
机组最大产热出力/MW	500	天然气热值/(MW·h·m ⁻³)	9.88×10-3	
机组最小发电出力/MW	19.6	天然气价格/(\$·m-3)	0.2	
机组最小产热出力/MW	70	天然气消耗流量爬坡率/(m ³ ·h ⁻²)	50	
热电比	0.28	机组启停时间/h	5	
发电成本系数/(\$·MW-1)	2.1			

表 A6 各场景下系统投资、运行成本仿真结果 Table A6 Simulative results of system investment cost and operation cost under each scenario

	仿真结果/\$			
成本 —	场景1	场景 2	场景 3	场景 4
常规机组启停成本	4570	3850	5470	4570
常规机组运行成本	503361	473237	477967	504861
常规机组备用成本	27620	36064	54375	28561
常规机组排污成本	11995	11326	11227	12020
CHP 机组启停成本	0	6040	6040	0
CHP 机组运行成本	0	49499	52245	0
AA-CAES 投资成本	21645	16288	—	21015
AA-CAES 维护成本	1249	949	—	1210
光热集热模块投资成本	9293	_	—	9130
弃风成本	0	0	48310	0
总计	579733	597253	655634	581367



图 A1 负荷和风电出力的典型日预测曲线 Fig.A1 Forecast curves of load and wind power output in typical day



Fig.A2 Forecast curves of solar direct normal irradiation in typical days