

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2025.219

引用格式:张秀琪,李辉,赖伟,等.考虑新能源消纳的废弃矿井压缩空气储能双层容量优化配置模型[J].重庆大学学报,2025,48(11):14-24.



考虑新能源消纳的废弃矿井压缩空气储能双层容量优化配置模型

张秀琪¹,李辉¹,赖伟¹,廖庆龙²,李永福²

(1. 重庆大学输变电装备技术全国重点实验室,重庆 400044; 2. 国网重庆市电力公司电力科学研究院,重庆 404100)

摘要:在“双碳”目标驱动下,针对风、光等新能源消纳难题与废弃矿井资源化利用需求,文中提出一种考虑新能源消纳的废弃矿井压缩空气储能双层容量优化配置方法。区别于传统基于巷道空间静态确定容量的模式,该研究兼顾经济性与新能源消纳需求,为废弃矿井储能系统容量规划提供了一种解决方案。该双层容量优化配置模型由规划层及运行层组成:规划层以综合经济性最优为目标,运行层以系统新能源消纳率最高为目标,规划层与运行层上下互动,互相迭代,并通过改进的粒子群算法对该模型进行求解并得到最优配置方案。基于改进 IEEE33 节点系统的多场景仿真结果表明,相比传统固定容量配置,文中所提模型在 4 种典型场景下新能源消纳率平均提升 6.53%,总成本降低 45.45%,验证了该模型在提升新能源消纳能力与优化系统经济性方面的有效性。

关键词:压缩空气储能;废弃矿井;新能源消纳;双层容量优化配置;改进的粒子群算法

中图分类号:TM73

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2025)11-014-11

A two-layer capacity optimization configuration model for compressed air energy storage in abandoned mines considering renewable energy integration

ZHANG Xiuqi¹, LI Hui¹, LAI Wei¹, LIAO Qinglong², LI Yongfu²

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China; 2. State Grid Chongqing Electric Power Research Institute, Chongqing 404100, P. R. China)

Abstract: Driven by the “dual-carbon” goals, this study proposes a two-layer capacity optimization method for compressed air energy storage (CAES) in abandoned mines, addressing both the challenges of renewable energy integration and the resource utilization of abandoned mine spaces. Unlike traditional static capacity designs that rely solely on roadway volume, this approach balances economic performance with renewable energy integration,

收稿日期:2025-02-17 网络出版日期:2025-07-07

基金项目:国网重庆市电力公司电力科学研究院科学技术项目(SGCQDK00SBJ2200311)。

Supported by State Grid Chongqing Electric Power Research Institute(SGCQDK00SBJ2200311).

作者简介:张秀琪(2001—),女,硕士研究生,主要从事压缩空气储能在电力系统中的应用研究,(E-mail) xiuqizhang2022@163.com。

通信作者:李辉,男,教授,博士生导师,主要从事风力发电技术、电力电子器件应用与可靠性,特种电机设计与控制等研究,(E-mail) cqulh@163.com。

providing a practical framework for planning energy storage systems in abandoned mines. The proposed model consists of a planning layer and an operation layer: the planning layer seeks overall economic optimality, while the operation layer aims to maximize renewable energy utilization. These layers interact iteratively, and the model is solved using an improved particle swarm optimization algorithm to determine the optimal configuration. Multi-scenario simulations based on the modified IEEE 33-node system show that, compared with traditional fixed-capacity configurations, the proposed model increases renewable energy absorption by an average of 6.53% and reduces total costs by 45.45% across four typical scenarios. The results verify the model's effectiveness in improving both renewable energy utilization and economic performance.

Keywords: compressed air energy storage; abandoned mines; renewable energy integration; two-layer capacity optimization configuration; improved particle swarm optimization algorithm

近年来,在“双碳”目标背景下,风、光等可再生能源装机容量快速增长,由其随机性及不确定性导致的弃风弃光问题日益严峻^[1]。与此同时,中国关停的大量废弃矿井所遗留的巷道提供了巨大的空间^[2],其规模化利用成为资源再生与低碳转型的关键课题。压缩空气储能(compressed air energy storage, CAES)作为一种大规模长时物理储能技术^[3-4],可以对目前储能规模最大的抽水蓄能进行有效补充^[5-6],有望成为提高可再生能源消纳能力和保障电力系统稳定运行的重要手段之一。Zhang 等^[7]从理论上验证了将废弃矿井巷道作为 CAES 储气库的技术可行性,且中国于 2019 年开始搭建了全球首个废弃煤矿巷道 CAES 电站。因此,将废弃矿井改造为 CAES 储气库,既可实现废弃地下空间资源化利用,又能提高新能源消纳能力^[8-10]。废弃矿井 CAES 技术整体仍处于初级阶段,因此,废弃矿井 CAES 电站容量的确定在规划阶段具有重要意义。

目前,针对废弃矿井 CAES 电站储能容量的规划,大多研究停留在通过对废弃矿井可利用矿井巷道空间容量直接进行储能容量配置^[11],忽略了废弃矿井 CAES 接入电网时“源网荷储”的协同优化对储能容量配置的影响,因此,废弃矿井 CAES 的储能容量规划需结合电力系统“源网荷储”的协同优化。关于 CAES 电站接入电网的容量配置问题,国内外已经开展了一些相关的研究。尹斌鑫等^[12]考虑先进绝热压缩空气储能(advanced adiabatic CAES, AA-CAES)电站的变寿命特性,建立了面向电力系统运行的 AA-CAES 电站双层优化规划模型,实现了 AA-CAES 电站的容量配置,不足之处是没有考虑风光发电和负荷需求的不确定性。Yu 等^[13]提出了考虑风光和负荷不确定性的 CAES 系统容量优化配置方法;李广阔等^[14]和 Zhang 等^[15]考虑 CAES 的变工况特性,分别建立了风储系统运行优化模型及储能系统容量配置模型;崔杨等^[16]提出一种多热源协同互补的 AA-CAES 系统容量配置模型。上述文献均未涉及废弃矿井场景的特殊约束条件,且未充分考虑 AA-CAES 对电网新能源消纳等能力的支撑作用。

文中提出以新能源消纳及经济性作为优化目标,建立废弃矿井 AA-CAES 在配电网系统中的双层容量优化配置模型。首先,对 AA-CAES 的运行特性进行分析,得到其系统模型及约束条件。然后,建立考虑新能源消纳的规划-运行双层容量优化配置模型,规划层与运行层进行上下互动,采用改进的粒子群算法对该模型进行求解,得到最优配置方案。最后,利用修改的 IEEE33 节点配电系统进行算例仿真,验证了该模型的有效性。研究结果为废弃矿井储能系统规划提供了理论支撑与工程实践参考。

1 AA-CAES 优化调度模型

1.1 AA-CAES 系统运行特性模型

文中选取 AA-CAES^[17-18]作为研究对象,其系统结构如图 1 所示。AA-CAES 的结构、工作方式、约束条件及参数等参见文献[14],其中,压缩机、透平及换热器均采用常效率模型。

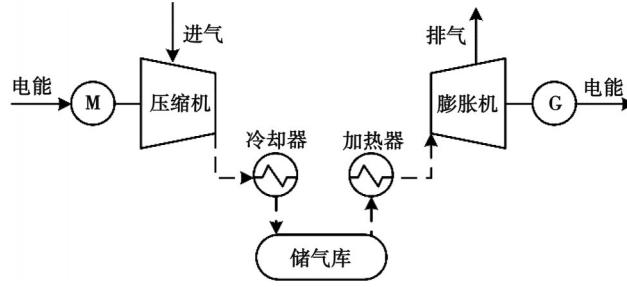


图1 AA-CAES系统结构图

Fig. 1 System structure of AA-CAES

1.1.1 压缩机模型

压缩机在 t 时段内消耗的功率 $P_{CAES,t}^c$ 为

$$P_{CAES,t}^c = \frac{1}{\eta_m \eta_{c,i}} \dot{m}_{c,i} c_{p,a} \left(\sum_{i=1}^{N_c} T_{c,i,t}^{\text{in}} \left(\beta_{c,i}^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right) \right) \quad (1)$$

第 i 级压缩机在 t 时段的出口温度 $T_{c,i,t}^{\text{out}}$ 为

$$T_{c,i,t}^{\text{out}} = \frac{1}{\eta_{c,i}} T_{c,i,t}^{\text{in}} \left(\left(\beta_{c,i} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} + \eta_{c,i} - 1 \right) \quad (2)$$

式中： η_m 为电动机效率； $\eta_{c,i}$ 为第 i 级压缩机的等熵效率； $\dot{m}_{c,i}$ 为 t 时段流经压缩机的空气质量流量； $c_{p,a}$ 为空气的定压比热容； N_c 为压缩机的级数； $T_{c,i,t}^{\text{in}}$ 为 t 时段第 i 级压缩机的进气温度； $\beta_{c,i}$ 为第 i 级压缩机的压缩比； κ 为等熵指数。

1.1.2 透平发电机模型

透平在 t 时段内发出的功率 $P_{CAES,t}^g$ 为

$$P_{CAES,t}^g = \eta_e \eta_{g,i} \dot{m}_{g,i} c_{p,a} \left(\sum_{i=1}^{N_g} T_{g,i,t}^{\text{in}} \left(1 - \beta_{g,i}^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right) \right) \quad (3)$$

第 i 级透平在 t 时段的出口温度 $T_{g,i,t}^{\text{out}}$ 为

$$T_{g,i,t}^{\text{out}} = T_{g,i,t}^{\text{in}} / \left(\beta_{g,i} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \quad (4)$$

式中： η_e 为发电机的效率； $\eta_{g,i}$ 为第 i 级透平的等熵效率； $\dot{m}_{g,i}$ 为 t 时段流经透平的空气质量流量； N_g 为透平的级数； $\beta_{g,i}$ 为第 i 级透平的膨胀比； $T_{g,i,t}^{\text{in}}$ 为 t 时段第 i 级透平的进气温度。

1.1.3 换热器模型

$$T_{\text{out},t}^{\text{air}} = T_{\text{in},t}^{\text{air}} + \varepsilon (T_{\text{in},t}^{\text{oil}} - T_{\text{in},t}^{\text{air}}) \quad (5)$$

式中： $T_{\text{in},t}^{\text{air}}$ 、 $T_{\text{out},t}^{\text{air}}$ 分别为 t 时段流经换热器空气的进出温度； $T_{\text{in},t}^{\text{oil}}$ 为 t 时段流经换热器导热油的温度； ε 为换热器的效能。

1.1.4 储气库模型

以废弃矿井的巷道空间作为储气库，模型如下：

$$\begin{cases} \dot{p}_{\text{st},t} = \frac{R_g \kappa (\dot{m}_{c,t} T_{\text{st}}^{\text{in}} - \dot{m}_{g,t} T_{\text{st},t})}{V_{\text{st}}} \\ p_{\text{st},t} = p_{\text{st},0} + \sum_{\tau=1}^t \dot{p}_{\text{st},\tau} \Delta t \end{cases} \quad (6)$$

式中： $\dot{p}_{\text{st},t}$ 为 t 时刻储气库内空气压力的变化量； $p_{\text{st},0}$ 为储气库初始的压力； $p_{\text{st},t}$ 为 t 时段储气库内压力； $T_{\text{st},t}$ 为 t 时段储气库内温度； $T_{\text{st}}^{\text{in}}$ 为储气库进气温度； R_g 为气体常数； Δt 为运行步长。

1.2 模型约束条件

AA-CAES电站的运行约束主要包括功率约束、储气库压力约束和启停约束。

1) 功率约束为

$$\mu_{t,e} P_{CAES,\min}^c \leq P_{CAES,t}^c \leq \mu_{t,e} P_{CAES,\max}^c,$$

$$\mu_{t,g} P_{CAES,min}^g \leq P_{CAES,t}^g \leq \mu_{t,g} P_{CAES,max}^g, \quad (7)$$

式中: $P_{CAES,min}^c$ 、 $P_{CAES,min}^g$ 分别为压缩机及透平的最小功率; $P_{CAES,max}^c$ 、 $P_{CAES,max}^g$ 分别为压缩机及透平的最大功率; $\mu_{t,c}$ 及 $\mu_{t,g}$ 为 0/1 变量, 分别代表压缩储能工况及膨胀释能工况。

2) 储气压力约束。不同废弃矿井空间储气库的储气压力各不相同, 取决于其安全性及稳定性等多种因素。

$$p_{st,min} \leq p_{st,t} \leq p_{st,max}, \quad (8)$$

式中: $p_{st,min}$ 、 $p_{st,max}$ 分别为储气库运行压力的最小值及最大值。

3) 启停约束为

$$\mu_{t,c} + \mu_{t,g} \leq 1. \quad (9)$$

2 AA-CAES 考虑新能源消纳的规划—运行双层容量优化配置模型

2.1 双层容量优化配置模型基本框架

为了实现考虑新能源消纳的废弃矿井 AA-CAES 的容量优化配置研究, 提出了一种考虑 AA-CAES 新能源消纳能力, 并综合考虑其经济性的规划—运行双层容量优化配置模型, 其中规划层与运行层的关系示意图如图 2 所示。

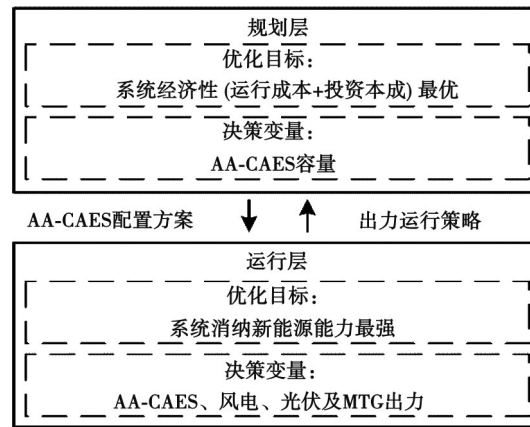


图 2 废弃矿井 AA-CAES 双层容量优化配置模型规划层与运行层互动关系示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the interaction between the planning layer and the operation layer of the two-layer optimization model for AA-CAES in abandoned mines

规划层以系统的综合经济性最优为目标, 对废弃矿井 AA-CAES 的容量进行配置, 并将容量配置结果传给运行层; 运行层以系统消纳新能源能力最强为目标, 对 AA-CAES、风电、光伏、微型燃气轮机 (micro-turbine generator, MTG) 的出力及主网购电量进行优化, 并将优化出力结果反馈给规划层。规划层与运行层上下互动, 交替迭代, 可以实现消纳与经济的综合考虑。最终确定 AA-CAES 的容量配置方案、AA-CAES 及新能源的出力方案, 并得到最优的新能源消纳量及经济性。

2.2 规划层模型

规划层以运行成本及投资成本之和最小为目标, 以 AA-CAES 的容量配置为决策变量, 约束条件包括 AA-CAES 的容量约束、AA-CAES 选址约束和投资成本约束等。

2.2.1 目标函数

目标函数 F_a 由运行成本 F_1 和投资成本 F_2 组成, 即:

$$\min(F_a) = F_1 + F_2. \quad (10)$$

运行成本包括主网购电成本 C_G 、风电及光伏弃风弃电成本 $C_{WTG,PVG}$ 、网损成本 C_{loss} 、AA-CAES 启停成本 C_{ss} 、AA-CAES 运维成本 C_{OM_CAES} 、MTG 发电成本 C_{OM_MTG} 。

主网购电成本

$$C_G = \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T c_{k,t,trans} P_{k,t,trans}; \quad (11)$$

风电及光伏弃风弃电成本

$$C_{WTG,PVG} = \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T c_{k,t,WTG} \Delta P_{k,t,WTG} + c_{k,t,PVG} \Delta P_{k,t,PVG}; \quad (12)$$

网损成本

$$C_{loss} = \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T c_{k,t,loss} \Delta P_{k,t,loss}; \quad (13)$$

AA-CAES启停成本 C_{SS} 及运维成本 C_{OM_CAES} 为

$$C_{SS} = \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T (\mu_{k,t,c} \lambda_c + \mu_{k,t,g} \lambda_g), \quad (14)$$

$$C_{OM_CAES} = \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M c_{OM_CAES} P_{k,t,m,CAES}; \quad (15)$$

MTG发电成本

$$C_{OM_MTG} = \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N c_{OM_MTG} P_{k,t,n,MTG}; \quad (16)$$

投资成本 F_2 包括 M 个储能电站的投资成本, 为

$$F_2 = \frac{r(1+r)^y}{(1+r)^y - 1} \sum_{m=1}^M c_{inv,CAES} P_{m,CAES} \circ \quad (17)$$

式中: K 为运行场景的数量; T 为运行时段数量; M 为 AA-CAES 电站的数量; $P_{k,t,trans}$ 、 $\Delta P_{k,t,WTG}$ 、 $\Delta P_{k,t,PVG}$ 、 $\Delta P_{k,t,loss}$ 、 $P_{k,t,m,CAES}$ 、 $P_{m,CAES}$ 和 $P_{k,t,n,MTG}$ 分别为主网购电量、风力发电弃电量、光伏发电弃电量、网损量、第 m 个 AA-CAES 电站输出功率、第 m 个 AA-CAES 电站的容量和第 n 个 MTG 电站发电量; $c_{k,t,trans}$ 、 $c_{k,t,WTG}$ 、 $c_{k,t,PVG}$ 、 $c_{k,t,loss}$ 、 c_{OM_CAES} 、 c_{OM_MTG} 和 $c_{inv,CAES}$ 分别为主网购电价格、风电弃风惩罚价格、光伏弃电惩罚价格、网损价格、AA-CAES 单位运维成本、MTG 单位发电成本和 AA-CAES 单位容量投资成本; λ_c 、 λ_g 分别代表 AA-CAES 一次压缩储能过程及膨胀释能过程的启停成本; r 为折现率; y 为 AA-CAES 电站使用年限。

2.2.2 约束条件

1) AA-CAES 容量约束取决于废弃矿井的巷道空间, 通过对其空间容量进行计算即可得到 AA-CAES 的容量约束为

$$P_{CAES,m,min} \leq P_{m,CAES} \leq P_{CAES,m,max}, \quad (18)$$

式中, $P_{CAES,m,min}$ 、 $P_{CAES,m,max}$ 分别为第 m 个 AA-CAES 电站的最小容量与最大容量。

2) 总投资成本约束为

$$F_2 \leq C_{total}, \quad (19)$$

式中, C_{total} 为 AA-CAES 电站最大投资成本。

2.3 运行层模型

运行层以新能源消纳能力最优即弃风弃光量最少为目标; 以 AA-CAES、风电、光伏、MTG 的出力及主网购电量为决策变量; AA-CAES 储气库的空气压力为状态变量; 约束条件包括: 上述第 1 节中 AA-CAES 的等式及不等式约束、风电及光伏发电弃电约束、MTG 出力约束、系统功率平衡约束。

2.3.1 目标函数

目标函数 F_b 为弃风量和弃光量最小, 为

$$\min(F_b) = \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T (\Delta P_{k,t,WTG} + \Delta P_{k,t,PVG}) \circ \quad (20)$$

2.3.2 约束条件

1) AA-CAES 运行约束: 包含上述第 1 节中 AA-CAES 的等式及不等式约束。

2) 风电及光伏发电弃电约束

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T \Delta P_{k,t,WTG} \leq \eta P_{k,t,WTG}, \\ \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T \Delta P_{k,t,PVG} \leq \eta P_{k,t,PVG}. \end{cases} \quad (21)$$

式中: $P_{k,t,WTG}$ 、 $P_{k,t,PVG}$ 分别为风力发电、光伏发电实际并网量; η 为风光允许的弃电比例。

3) MTG 出力约束

$$P_{MTG,n,\min} \leq P_{k,t,n,MTG} \leq P_{MTG,n,\max}, \quad (22)$$

式中, $P_{MTG,n,\min}$ 、 $P_{MTG,n,\max}$ 分别为第 n 个 MTG 电站的最小出力与最大出力。

4) 系统功率平衡约束

$$P_{k,t,\text{load}} - \sum_{n=1}^N P_{k,t,n,MTG} - \sum_{m=1}^M P_{k,t,m,CAES} - P_{k,t,WTG} - P_{k,t,PVG} - P_{k,t,\text{trans}} = 0, \quad (23)$$

式中, $P_{k,t,\text{load}}$ 为负荷电量。

2.4 模型求解方法

文中采用惯性权重因子和学习因子调整的改进粒子群算法进行求解^[19], 该算法可以进一步优化粒子搜索能力, 提高运算收敛性。文中基于改进粒子群算法的模型求解步骤如图 3 所示。

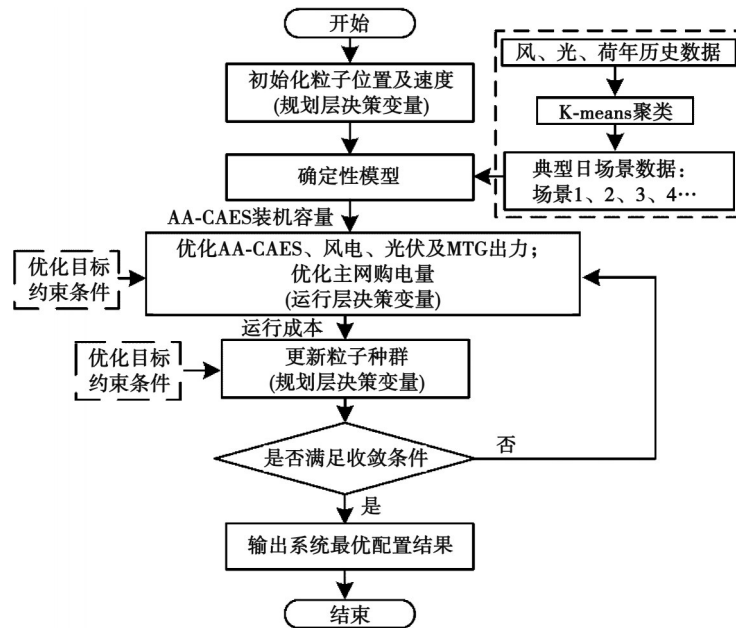


图 3 文中基于改进粒子群算法的双层容量优化配置模型求解流程图

Fig. 3 Flowchart of the improved particle swarm optimization algorithm for solving the two-layer optimization model

3 考虑新能源消纳的双层容量优化配置模型仿真分析

3.1 仿真场景及方案设置

文中基于 IEEE33 节点配电系统进行仿真验证。为了体现源侧的不确定性, 在节点 6、21 处分别接入容量为 500 kW 的光伏电站, 在节点 23 处接入容量为 500 kW 的风电电站。由于风、光处理具有较大的不确定性, 在节点 15 接入容量为 800 kW 的稳定分布式发电单元 MTG。为该系统配置 2 个 AA-CAES 电站, 分别接入节点 16 及节点 26。图 4 为改造后的 IEEE33 节点拓扑图。

根据某地区全年风电出力、光伏出力和负荷的 8 760 h 数据, 采用 k-means 聚类算法对出力数据进行聚类分析, 分别得到风电出力、光伏出力和负荷的 4 个典型日数据, 因此, 运行场景数量取 4, 每个场景的运行时段取 24。其余参数如表 1 所示。

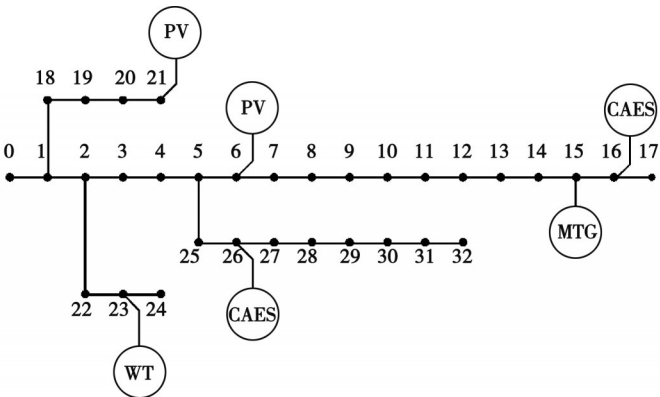


图 4 改造后的 IEEE33 节点配电系统拓扑图

Fig. 4 Topology diagram of the modified IEEE33 node distribution system

表 1 系统参数设定

Table 1 System parameter setting

参数	数值	参数	数值
主网购电价格/(元·(kW·h) ⁻¹)	0.6	AA-CAES 单位容量投资成本/(元·kW ⁻¹)	8 000
风电弃风惩罚价格/(元·(kW·h) ⁻¹)	0.6	AA-CAES 压缩储能过程的启停成本/(元·次 ⁻¹)	7 000
光伏弃电惩罚价格/(元·(kW·h) ⁻¹)	0.6	AA-CAES 膨胀释能过程的启停成本/(元·次 ⁻¹)	7 000
网损价格/(元·(kW·h) ⁻¹)	0.4	折现率	0.06
AA-CAES 单位运维成本/(元·(kW·h) ⁻¹)	0.05	风光允许的弃电比例 η	0.8
MTG 单位发电成本/(元·(kW·h) ⁻¹)	0.4	AA-CAES 电站使用年限/年	30

为了验证文中双层容量配置模型的有效性,设置了以下 2 种方案。

方案 1:根据废弃空间储气空间容量配置 2 个固定容量的 AA-CAES 电站,容量均为 600 kW。

方案 2:通过文中的双层容量配置模型分别对 2 个 AA-CAES 电站进行容量配置。假设 1 台 AA-CAES 机组容量为 50 kW,设置 2 个 AA-CAES 电站机组数量的范围为 6~12 台,则 2 个 AA-CAES 电站的容量范围均为 300~600 kW。

3.2 仿真结果分析

方案 1 中,2 个 AA-CAES 电站的容量均为 600 kW;方案 2 中,AA-CAES 电站 1 配置容量为 300 kW,AA-CAES 电站 2 配置容量为 300 kW。

3.2.1 2 种容量配置方案新能源消纳结果分析

2 种方案各场景新能源消纳率的仿真结果如表 2 所示。

表 2 4 种典型场景下新能源消纳率仿真结果对比表

Table 2 Simulation results of renewable energy consumption in four typical scenarios

参数	方案	场景 1	场景 2	场景 3	场景 4
新能源消纳率	1	0.886 4	0.886 6	0.875 9	0.931 8
	2	0.965 8	0.962 4	0.959 1	0.954 7

由表 2 可知,根据文中双层容量配置模型得到 AA-CAES 容量的方案 2 比根据废弃空间储气空间容量直接配置 AA-CAES 容量的方案 1 具有更高的新能源消纳能力。在 4 种场景下,方案 2 的新能源消纳率比方案 1

的新能源消纳率平均高 6.53%,说明在规划阶段,通过对该配电网系统的 AA-CAES 电站进行容量配置可以有效提高系统的新能源消纳率。

接下来以场景 1 的仿真结果为例进行分析。图 5 为方案 1 与方案 2 在场景 1 下的风电站出力对比图。

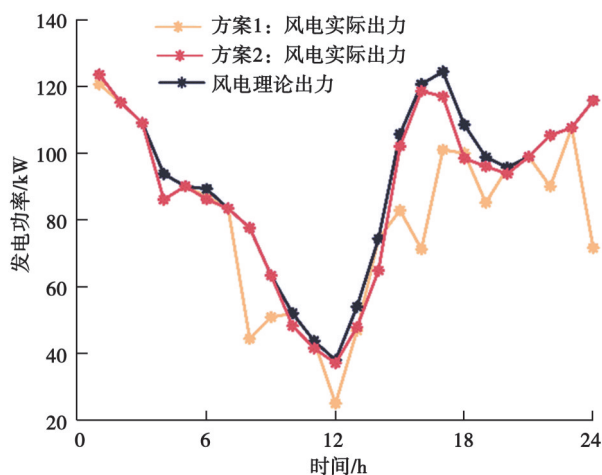


图 5 方案 1 与方案 2 在场景 1 下的风电站出力对比图

Fig. 5 Comparison of wind power plant outputs in scenario 1 between scheme 1 and scheme 2

图 6 为方案 1 与方案 2 在场景 1 下的光伏电站出力对比图。

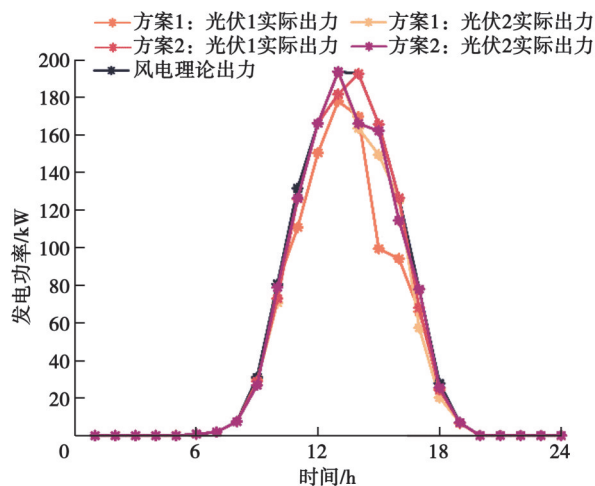


图 6 方案 1 与方案 2 在场景 1 下的光伏电站出力对比图

Fig. 6 Comparison of photovoltaic power plant outputs in scenario 1 between scheme 1 and scheme 2

根据图 5 和图 6 可知,风力发电及光伏发电都具有很强的波动性和随机性,容易出现弃风弃光严重的现象。另外,进行容量配置的方案 2 比未进行容量配置的方案 1 具有更高的风电及光伏的消纳率,说明该 AA-CAES 双层容量优化配置模型对配电网系统的新能源消纳具有促进作用。

3.2.2 2 种容量配置方案各分布式资源出力结果分析

在方案 1 直接根据废弃空间储气空间容量进行 AA-CAES 电站容量配置的情况下,系统内各分布式资源的运行优化出力结果如图 7 所示。

在方案 2 根据文中双层容量配置模型得到 AA-CAES 电站容量配置的情况下,系统各分布式资源的运行优化出力结果如图 8 所示。

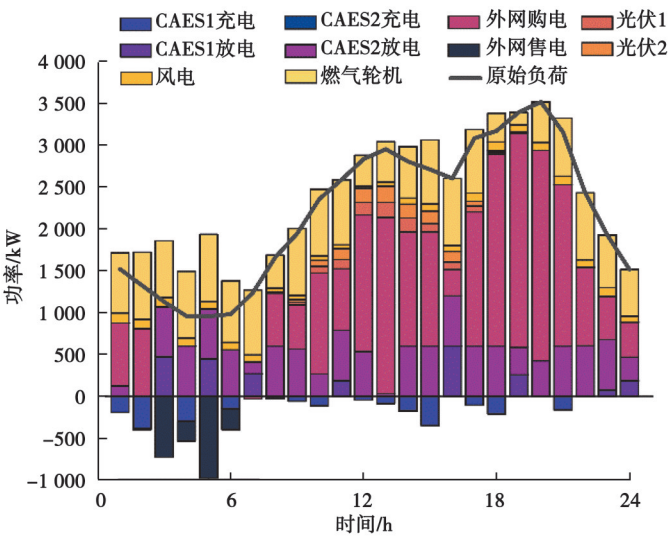


图 7 方案 1 下系统内各分布式资源的运行优化出力结果

Fig. 7 Operation optimization output results of each distributed resource in the system under scheme 1

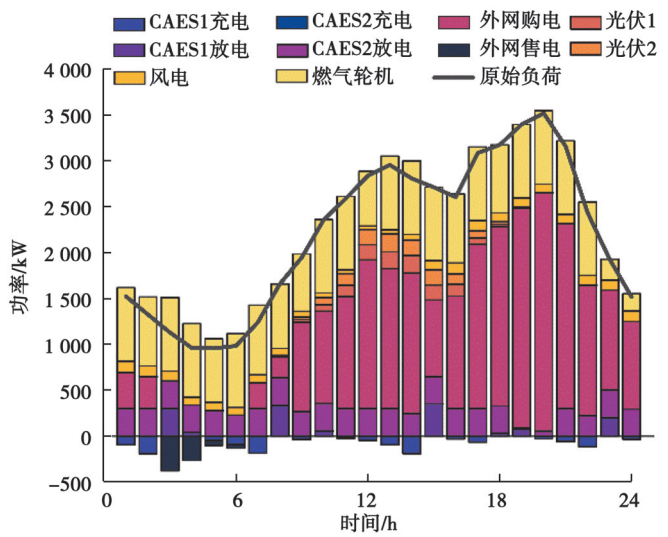


图 8 方案 2 下系统内各分布式资源的运行优化出力结果

Fig. 8 Operation optimization output results of each distributed resource in the system under scheme 2

2 种方案下均可以看到:在系统出力较大时,AA-CAES 处于压缩储能阶段,可以帮助消纳新能源的出力,提高系统新能源消纳率;在系统出力不足时,AA-CAES 处于膨胀释能阶段,可以帮助系统提供出力。2 种方案的系统功率最终均达到平衡;燃气轮机在系统中作为稳定的分布式发电单元;原始负荷由历史数据进行 k-means 聚类得到;在配电网供电不足的情况下,需要向外网进行购电。

3.2.3 2 种容量配置方案经济性结果分析

2 种方案的经济性仿真结果如表 3 所示。

表 3 2 种方案经济性仿真结果对比表

Table 3 Comparison of economic performance simulation results of the two schemes

方案	总成本/元	投资成本/元	运行成本/元
1	725 852.1	697 430	28 422.1
2	395 974.8	348 710	47 264.8

从表 3 可知,根据文中双层容量优化配置模型得到 AA-CAES 电站容量配置的方案 2 与方案 1 相比,总成本降低了 45.45%,投资成本降低了 50%,但运行成本增加了 66.3%。

方案 2 投资成本降低,主要是因为通过双层容量优化配置模型,更合理地确定了 AA-CAES 电站的容量。方案 1 中 2 个 AA-CAES 电站均配置为 600 kW,而方案 2 中 2 个电站容量均为 300 kW,在满足系统需求的前提下,减少了不必要的设备投资。在计算总成本时,虽然运行成本有所上升,但整体投资成本的大幅降低使得总成本显著下降。

为深入分析经济性差异,进一步将运行成本分解为主网购电成本、风电及光伏弃风弃电成本、网损成本、AA-CAES 启停成本、AA-CAES 运维成本及 MTG 发电成本。2 种方案的运行成本仿真结果对比如表 4 所示。

表 4 2 种方案运行成本仿真结果对比表
Table 4 Comparison of operating cost simulation results for the two schemes

方案	主网购电 成本/元	弃风弃电 成本/元	网损 成本/元	AA-CAES 启 停成本/元	AA-CAES 运维成本/元	MTG 发电 成本/元
1	10 535.18	255.67	3 630.23	7 000	796.16	6 204.86
2	15 469.82	108.64	3 597.76	21 000	456.55	6 632.03

结果显示,方案 2 的启停成本占比显著提升,这是由于在优化配置过程中,为了提高新能源消纳率,AA-CAES 电站的充放电频次有所增加。频繁的充放电导致设备的启停成本上升,导致运行成本较方案 1 有所提高。

4 结 论

针对废弃矿井 CAES 容量优化配置问题,提出一种考虑新能源消纳的废弃矿井 CAES 双层容量优化配置模型,通过规划-运行协同迭代,得到综合考虑系统经济性与新能源消纳能力的废弃矿井 CAES 电站的最优容量配置方案。基于改进 IEEE33 节点系统的多场景仿真分析表明:

- 1)与传统直接根据废弃矿井的储气空间容量进行 AA-CAES 电站的容量配置方法相比,在文中的 4 种运行场景下,双层容量优化配置模型比传统固定容量配置的新能源消纳率平均高 6.53%,验证了文中双层容量优化配置模型在提升系统新能源消纳能力方面的有效性。
- 2)在进行 CAES 容量配置时还考虑了系统的经济性,双层容量优化配置模型相较传统固定容量配置的总成本降低了 45.45%,经济性得到了显著改善。

文中聚焦于系统新能源消纳能力的提升,未全面量化 CAES 对电网支撑能力的影响,未来在开展废弃矿井 CAES 容量配置研究时,有待进一步探索如何在规划阶段更全面地考虑其对电网的支撑能力。

参考文献

[1] 文云峰, 杨游航, 邢鹏翔, 等. 多维因素制约下新能源消纳能力评估方法研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(1): 127-147.

Wen Y F, Yang Y H, Xing P X, et al. Review on the new energy accommodation capability evaluation methods considering multi-dimensional factors[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(1): 127-147. (in Chinese)

[2] 赵同彬, 刘淑敏, 马洪岭, 等. 废弃煤矿压缩空气储能研究现状与发展趋势[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(10): 163-176.

Zhao T B, Liu S M, Ma H L, et al. Research status and development trend of compressed air energy storage in abandoned coal mines[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(10): 163-176. (in Chinese)

[3] 刘笑驰, 梅生伟, 丁若晨, 等. 压缩空气储能工程现状、发展趋势及应用展望[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(10): 38-47, 102.

Liu X C, Mei S W, Ding R C, et al. Current situation, development trend and application prospect of compressed air energy storage engineering projects[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(10): 38-47, 102. (in Chinese)

[4] Yu Q H, Wang Q C, Tan X, et al. A review of compressed-air energy storage[J]. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2019, 11(4): 042702.

- [5] 钟伟杰,唐俊杰,孙青,等.计及压缩空气储能的发输电系统可靠性评估[J].电力系统自动化,2023,47(8):145-155.
Zhong W J, Tang J J, Sun Q, et al. Reliability evaluation of power generation and transmission system considering compressed air energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(8): 145-155. (in Chinese)
- [6] 张玮灵,古含,章超,等.压缩空气储能技术经济特点及发展趋势[J].储能科学与技术,2023,12(4):1295-1301.
Zhang W L, Gu H, Zhang C, et al. Technical economic characteristics and development trends of compressed air energy storage [J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(4): 1295-1301. (in Chinese)
- [7] Zhang X J, Gao Z Y, Zhou B Q, et al. Advanced compressed air energy storage systems: fundamentals and applications[J]. Engineering, 2024, 34: 246-269.
- [8] Wu F, Liu Y, Gao R B. Challenges and opportunities of energy storage technology in abandoned coal mines: a systematic review[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 83: 110613.
- [9] Menéndez J, Loredo J. Integration of renewable energies in the electricity grid from energy storage plants in disused mining structures[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 643: 12104.
- [10] Bu X B, Huang S H, Liu S, et al. Efficient utilization of abandoned mines for isobaric compressed air energy storage[J]. Energy, 2024, 311: 133392.
- [11] He W, Luo X, Evans D, et al. Exergy storage of compressed air in cavern and cavern volume estimation of the large-scale compressed air energy storage system[J]. Applied Energy, 2017, 208: 745-757.
- [12] 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 B X, Miao S H, Li Y W, 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. (in Chinese)
- [13] Yu Q H, Tian L, Li X D, et al. Compressed air energy storage capacity configuration and economic evaluation considering the uncertainty of wind energy[J]. Energies, 2022, 15(13): 4637.
- [14] 李广阔,陈来军,谢毓广,等.考虑压缩空气储能变工况特性的风储联合系统运行优化策略[J].高电压技术,2020,46(2):511-518.
Li G K, Chen L J, Xie Y G, et al. Coordinated optimization strategies of wind-storage hybrid system considering off-design characteristics of compressed air energy storage[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(2): 511-518. (in Chinese)
- [15] Zhang W, Li J B, Yao Y C, et al. Capacity configuration of compressed air energy storage systems with consideration of variable operating conditions[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2024, 2840(1): 012001.
- [16] 崔杨,于一凡,付小标,等.考虑多热源协同互补的含先进绝热压缩空气储能系统容量配置方法[J].电网技术,2024,48(10):4195-4208.
Cui Y, Yu Y F, Fu X B, et al. A capacity allocation method for advanced adiabatic compressed air energy storage systems considering the synergistic complementarity of multiple heat sources[J]. Power System Technology, 2024, 48(10): 4195-4208. (in Chinese)
- [17] Tian Y N, Zhang T, Xie N N, et al. Conventional and advanced exergy analysis of large-scale adiabatic compressed air energy storage system[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 57: 106165.
- [18] Han Z H, Sun Y, Li P. Research on energy storage operation modes in a cooling, heating and power system based on advanced adiabatic compressed air energy storage[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 208: 112573.
- [19] 任智君,郭红霞,杨苹,等.含高比例可再生能源配电网灵活资源双层优化配置[J].太阳能学报,2021,42(9):33-38.
Ren Z J, Guo H X, Yang P, et al. Double-layer optimal configuration of flexible resources with high proportion of renewable energy distribution network[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2021, 42(9): 33-38. (in Chinese)

(编辑 詹燕平)