

先进绝热压缩空气储能电站日前电力市场主从博弈竞标策略

李 瑞^{1,2}, 陈来军^{1,2,3}, 梅生伟^{1,2,3†}, 薛小代^{1,2,3}

(1. 清华大学 电机工程及应用电子技术系, 北京 100084;

2. 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室, 北京 100084; 3. 青海大学 启迪新能源学院, 青海 西宁 810016)

摘要: 先进绝热压缩空气储能(advanced adiabatic compressed air energy storage, AA-CAES)是支撑电力系统削峰填谷、阻塞管理及可再生能源消纳的有效手段之一. 在储能产业商业化初期, 研究面向日前电力市场的竞标策略对实现AA-CAES电站的经济运行大有裨益. 本文在计及压力动态的AA-CAES运行模型基础上, 采用主从博弈研究了AA-CAES电站竞标策略. 作为主从博弈Leader, AA-CAES电站运营商向日前电力市场上报竞标标的(储能功率、发电功率、储能电价及发电电价); 作为主从博弈Follower, 市场交易机构以最大化社会福利出清电力市场. 为高效求解主从博弈竞标模型, 采用Karush-Kuhn-Tucker(KKT)最优性条件及布尔展开法将双层主从博弈竞标模型转化为单层混合整数线性规划. IEEE-24节点测试系统算例表明, AA-CAES电站可利用低谷电进行充电, 在高峰时刻再以高价售出, 实现套利运行. 基于主从博弈的日前电力市场竞标策略, 可支撑AA-CAES电站的经济运行.

关键词: 主从博弈; 先进绝热压缩空气储能; 日前电力市场; 策略竞标; 混合整数线性规划

引用格式: 李瑞, 陈来军, 梅生伟, 等. 先进绝热压缩空气储能电站日前电力市场主从博弈竞标策略. 控制理论与应用, 2018, 35(5): 662 – 667

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Day-ahead strategic bidding for advanced adiabatic compressed air energy storage plant: a Stackelberg game approach

LI Rui^{1,2}, CHEN Lai-jun^{1,2,3}, MEI Sheng-wei^{1,2,3†}, XUE Xiao-dai^{1,2,3}

(1. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments, Beijing 100084, China;

3. School of QiDi (TUS) Renewable Energy, Qinghai University, Xining Qinghai 810016, China)

Abstract: Advanced adiabatic compressed air energy storage (AA-CAES) can support the peak-shaving and the renewable integration of power systems. At the early commercialization of energy storage facilities, the bidding strategy in the day-ahead electricity market is crucial for the economic operation of AA-CAES plants. We investigated the day-ahead bidding and offering strategies of the AA-CAES plant with a Stackelberg game theoretic approach based on an AA-CAES operation model considering the pressure dynamic. As the leader of the game, the AA-CAES owner submits electricity offers and bids regarding quantity and price, to the independent system operator, who acts as the follower and clears the electricity market to maximize social welfare. To solve the bi-level leader-follower bidding model efficiently, we leverage the KKT optimality condition, and the binary expansion method to approximate and transform it as mixed-integer linear programming. The experiments on a modified IEEE-24 bus system demonstrated the energy arbitrage behavior of AA-CAES by purchasing the off-peak low-price electricity and selling to balance the peak-load with a higher price. The leader-follower game based bidding and offering strategies in the day-ahead electricity market can benefit the economic operation of the AA-CAES plant.

Key words: Stackelberg game; advanced adiabatic compressed air energy storage; day-ahead electricity market; strategic bidding; mixed-integer linear programming

Citation: LI Rui, CHEN Laijun, MEI Shengwei, et al. Day-ahead strategic bidding for advanced adiabatic compressed air energy storage plant: a leader-follower game approach. *Control Theory & Applications*, 2018, 35(5): 622 – 667

收稿日期: 2017-11-07; 录用日期: 2018-05-28.

†通信作者. E-mail: meishengwei@mail.tsinghua.edu.cn; Tel.: +86 10-62794778.

本文责任编辑: 陈皓勇.

国家自然科学基金创新群体项目(51621065), 青海省基础研究项目(2016-ZJ-742), 青海省科技成果转化专项(2017-GX-101), 青海省自然科学基金项目(2017-ZJ-932Q), 国家电网公司科技项目(SGRI-DL-71-15-006)资助.

Supported by the Foundation for Innovative Research Groups of the National Natural Science Foundation of China (51621065), the Basic Research Program in Qinghai Province (2016-ZJ-742), the Scientific and Technological Project of Qinghai Province (2017-GX-101), the Natural Science Foundation of Qinghai Province (2017-ZJ-932Q) and the Science and Technology Program of SGCC (SGRI-DL-71-15-006).

1 引言(Introduction)

大规模储能技术被公认为是平滑新能源电力波动性、提高输电系统平均载荷量、实现削峰填谷及聚纳可再生能源的主要措施之一^[1]。目前已商业化的大规模储能技术主要包括抽水蓄能和压缩空气储能(compressed air energy storage, CAES)等,前者占目前全球已投运储能装机容量(169.2 GW)的97%,但因建址条件及潜在生态环境等因素,发展已渐趋饱和。近年来,CAES因使用寿命长、响应速度快及优良的辅助服务特性等优势备受关注,欧、美、日、中、加拿大等纷纷部署CAES技术发展方案^[2]。

在众多CAES技术方案中,先进绝热压缩空气储能(advanced adiabatic compressed air energy storage, AA-CAES)技术通过空气压缩热的回收再利用,摒弃了燃料补燃,成为CAES领域的主流趋势^[3]。AA-CAES具有零排放、效率高、成本低等优点,其理论效率可达70%左右。AA-CAES电站的优良动态特性,使其成为风电场/光伏电站的最佳协同者之一,在电量价格套利、调频、旋转备用、黑启动等方面具有广阔应用前景^[1,3-4]。我国正在江苏常州建设首个国家级AA-CAES示范电站,其规模为60 MW/300 MWh,未来将达1000 MW^[5]。可以预见,随着该类示范工程的逐步建成及推广,大规模AA-CAES储能电站运营商将作为独立市场主体参与电力市场运营。该类电站运营商将更加关注其竞标策略,以提高储能电站运营经济性。

当前,针对AA-CAES电站市场运营的研究并不多见,但常规CAES电站的市场运营研究颇为充分。文献[6]描述了3种独立的CAES电站运行策略,以提高电站经济性。文献[7]基于市场电价信号研究了CAES电站在欧洲电力市场的套利策略,指出CAES电站在部分电力市场环境有较大套利效益。针对市场电价存在预测误差导致的套利风险问题,文献[8-9]分别提出了基于鲁棒优化和信息鸿沟决策理论的CAES电站鲁棒竞标策略,以规避价格预测误差风险。然而,上述研究用简化效率模型或理想效率模型描述CAES电站运行特性,并未考虑运行过程中系统内部的温度、压力等动态^[10],导致运行策略过于乐观^[11]。为此,文献[10]考虑了CAES电站运行中压缩机、透平、储气库等组件的部分负荷效率特性,研究了CAES电站在日前电量和备用联合市场中的竞价策略。然而,文献[10]针对传统CAES电站,难以考虑AA-CAES电站换热器等组件运行特性,也未考虑传输阻塞等实际问题。文献[12]建立了计及内部压强、温度等热动态特性的AA-CAES运行模型,并研究了AA-CAES在多能互补应用场景中的经济调度问题。另一方面,博弈论为分析市场决策主体行为提供了有力工具,被广泛应用于智能电网控制、调度、演化等方面^[13-15]。特别地,文献[16]采用等效电池模型研究了储能系统在电量及辅助服务联合市场的双层规划竞标策略。文

献[17]针对含不确定性的常规发电厂市场运营问题,提出了采用布尔展开法的主从博弈竞标策略。

综上,当前对考虑AA-CAES电站详细运行特性的竞标策略研究为空白。本文在作者所建AA-CAES电站运行模型^[12]基础上研究其日前电力市场竞标模型及高效求解策略。首先,构建了面向AA-CAES电站独立运营商的主从博弈双层竞标模型,支撑储能电站参与日前电力市场套利运营。其基本思路为,AA-CAES电站运营商参与电力市场竞标,上报售(购)电量与售(购)电价,以最大化电力交易运营收益。电力市场交易机构根据储能电站、其他电源及负荷竞标标的,以最大化电力市场社会福利出清电力市场。其次,提出了AA-CAES电站主从博弈竞标模型的高效求解方法,其思路为通过最优性条件将该双层非线性竞价模型转化为单层模型,并线性化互补松弛约束。最后,采用布尔展开法^[17]近似线性化单层模型目标函数中的价格与电量双线性项,将单层竞价模型转化为混合整数线性规划。

2 AA-CAES电站运行模型(AA-CAES plant modelling)

为提高运行效率,AA-CAES电站一般采用多级压缩多级膨胀结构^[10,12],图1给出了一典型的两级压缩两级膨胀AA-CAES电站结构。储能时,电站利用弃风电/光电、低谷电/低价电能等驱动压缩机,经过两级绝热压缩回收压缩热,并解耦存储空气压力势能(储气库)和压缩热能(蓄热系统);释能时,通过绝热膨胀(透平系统)利用压缩热能,实现空气压力势能和压缩热能的耦合释能发电。蓄热系统(换热器与储热系统)的存在使得AA-CAES具备良好的热电联供与联储能力,其剩余热能可供热负荷^[18]。

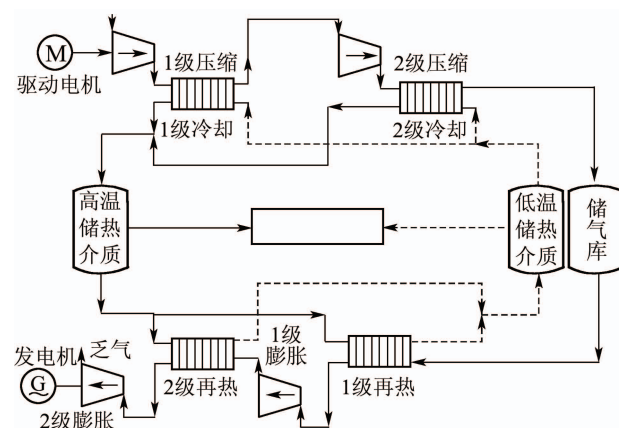


图1 两级压缩两级膨胀AA-CAES电站结构图

Fig. 1 Topology of an AA-CAES plant with a two-stage compressor and a two-stage turbine

AA-CAES电站运行特性复杂,既涉及电能、空气压力势能以及空气压缩热能等不同形式能量间的传递和转换过程,各部分组件之间又高度耦合。同时,压

压缩机、透平、换热系统等组件特性又与系统运行工况密切相关. 采用常效率模型或理想效率模型刻画其运行特性, 往往使得运行结果过于乐观. 为此, 本文采用作者在文献[12]中的所建的AA-CAES电站运行模型, 研究其竞标策略. 为便于描述, 该部分符号与文献[12]保持一致. 此外, 本文假定AA-CAES电站储气库与周围环境无热交换.

$$u_{j,t}^{\text{ch}} + u_{j,t}^{\text{dis}} \leq 1, u_{j,t}^{\text{ch}}, u_{j,t}^{\text{dis}} \in \{0, 1\}, \quad (1a)$$

$$pr_j^{\text{st}} \leq pr_{j,t}^{\text{st}} \leq pr_j^{\text{u}}, \quad (1b)$$

$$pr_{j,t+1}^{\text{st}} = pr_{j,t}^{\text{st}} + \frac{R_g}{V} \tau_{j,t}^{\text{st}} (u_{j,t}^{\text{ch}} \dot{m}_{j,t}^{\text{ch}} - u_{j,t}^{\text{dis}} \dot{m}_{j,t}^{\text{dis}}), \quad (1c)$$

$$H_{j,t+1}^{\text{st}} = H_{j,t}^{\text{st}} + u_{j,t}^{\text{ch}} H_{j,t}^{\text{g}} - u_{j,t}^{\text{dis}} H_{j,t}^{\text{c}} - h_{j,t}^{\text{d}}, \quad (1d)$$

$$H_j^{\text{st},l} \leq H_{j,t}^{\text{st}} \leq H_j^{\text{st},u}, \quad (1e)$$

$$\text{式(1) - (24)(27) - (32)}^{[12]}, \quad (1f)$$

其中: 公式(1a)表示电站压缩充电侧和透平发电侧不能同时运行, $u_{j,t}^{\text{ch}}$ 与 $u_{j,t}^{\text{dis}}$ 表征压缩侧和透平侧运行状态, 1为运行, 0为不运行, t 为调度时刻, j 为电站索引; 公式(1b)–(1c)描述电站储气库压力(压缩空气压力)平衡关系, $pr_{j,t}^{\text{st}}$ 为储气库储气压力水平, pr_j^{st} 与 pr_j^{u} 分别为储气库压力上下限; 公式(1d)–(1e)表征储能电站储热水平的变化情况, $H_{j,t}^{\text{st}}$ 代表存储的压缩热能, H_j^{st} 与 H_j^{u} 分别为其上下限, $h_{j,t}^{\text{d}}$ 为电站自带热负荷; 公式(1f)给定了AA-CAES电站内部各压缩级、透平级的温度、压强等变化关系, 具体可见文献[12].

3 主从博弈竞标模型 (Leader-follower game model for AA-CAES strategic bidding)

3.1 领导者层: 储能电站 (Upper level: AA-CAES plant)

作为市场参与主体, 即主从博弈领导者 (leader), AA-CAES 电站运营商参与日前电力市场竞标(标的为电量与价格), 以最大化运营收益, 即

$$\max_{\Xi_{\text{UP}}} \sum_{j=1}^{N_A} \sum_{t=1}^{N_T} [\lambda_{j,t}^{\text{dis}} A_{j,t}^{\text{dis}} - \lambda_{j,t}^{\text{ch}} A_{j,t}^{\text{ch}}] - \sum_{j=1}^{N_A} \sum_{t=1}^{N_T} [C_j^{\text{dis}} A_{j,t}^{\text{dis}} - C_j^{\text{ch}} A_{j,t}^{\text{ch}}], \quad (2)$$

其中: 第1项为AA-CAES 电站向电力市场售电收益(扣除购电成本), 第2项充放电边际运行成本; $\lambda_{j,t}^{\text{ch}}$, $\lambda_{j,t}^{\text{dis}}$ 分别为AA-CAES 电站向电力市场的购电报价与售电报价, 其单位为\$/MWh; $A_{j,t}^{\text{ch}}$, $A_{j,t}^{\text{dis}}$ 分别表示电力市场出清的储能电站购电量与充电量, 其单位为MWh; C_j^{ch} 与 C_j^{dis} 分别为电站边际充放电成本.

AA-CAES电站的决策变量 Ξ_{UP} 主要包括向市场交易机构上报的竞标标的(售购电量与售购电价), 电站自身运行状态量如充放电状态、充放电功率、荷电(热)状态等. AA-CAES电站主从博弈竞标策略模型

中, 上层目标函数的约束包括电站自身运行约束与下层模拟的电力市场出清约束, 其自身运行约束除包括公式(1)外, 还包括

$$0 \leq \hat{A}_{j,t}^{\text{ch}} \leq u_{j,t}^{\text{ch}} \bar{A}_j^{\text{ch}}, 0 \leq \hat{A}_{j,t}^{\text{dis}} \leq u_{j,t}^{\text{dis}} \bar{A}_j^{\text{dis}}, \quad (3a)$$

$$\lambda_{j,t}^{\text{ch},l} \leq \lambda_{j,t}^{\text{ch}} \leq \lambda_{j,t}^{\text{ch},u}, \sum_{t=1}^{N_T} \lambda_{j,t}^{\text{ch}} \leq N_T \lambda_{j,\text{av}}^{\text{ch}}, \quad (3b)$$

$$\lambda_{j,t}^{\text{dis},l} \leq \lambda_{j,t}^{\text{dis}} \leq \lambda_{j,t}^{\text{dis},u}, \sum_{t=1}^{N_T} \lambda_{j,t}^{\text{dis}} \leq N_T \lambda_{j,\text{av}}^{\text{dis}}, \quad (3c)$$

其中: 公式(3a)要求电站向市场上报的售购电量竞标标的不能超过其充放电容量, $\hat{A}_{j,t}^{\text{ch}}$ 与 $\hat{A}_{j,t}^{\text{dis}}$ 分别为电站售购电量竞标标的, $\bar{A}_j^{\text{ch}}$ 与 $\bar{A}_j^{\text{dis}}$ 为电站充放电容量; 公式(3b)–(3c)分别限制购电电价与售电电价在一定范围, 同时要求平均收购电价不能超过某一值 $\lambda_{j,\text{av}}^{\text{dis}}$ 与 $\lambda_{j,\text{av}}^{\text{ch}}$, 该值可由AA-CAES电站运营商与电力市场签订的合同决定.

3.2 跟随者层: 电力市场出清 (Lower level: electricity market clearing)

作为AA-CAES电站运营商主从博弈的跟随者, 电力市场交易机构根据AA-CAES电站、其他电源及负荷竞标标的, 以最大化电力市场社会福利为目的, 出清电力市场, 从而向市场参与主体提供购(售)电量与购(售)电价信号. 特别地, 本文假定市场机制采用以报价结算方式.

$$\min_{\Xi_{\text{LL}}} \sum_{t=1}^{N_T} \sum_{j=1}^{N_H} [\lambda_{j,t}^{\text{dis}} A_{j,t}^{\text{dis}} - \lambda_{j,t}^{\text{ch}} A_{j,t}^{\text{ch}}] + \sum_{t=1}^{N_T} \sum_{i=1}^{N_G} C_{i,t}^{\text{g}} p_{i,t}^{\text{g}} - \sum_{t=1}^{N_T} \sum_{i=1}^{N_D} C_{i,t}^{\text{d}} p_{i,t}^{\text{d}}, \quad (4)$$

其中: 第1项对应AA-CAES电站, $\lambda_{j,t}^{\text{ch}}$, $\lambda_{j,t}^{\text{dis}}$, $A_{j,t}^{\text{ch}}$, $A_{j,t}^{\text{dis}}$ 分别为AA-CAES运营商向电力市场竞标标的; 第2项对应常规机组, C_i^{g} 为常规机组报价, $p_{i,t}^{\text{g}}$ 为常规机组出清电量; 第3项对应电力负荷, $C_{i,d}$ 为负荷报价, $p_{i,t}^{\text{d}}$ 为负荷出清量.

电力市场出清决策变量 Ξ_{LL} 主要包括各电源、负荷中标量、市场出清电价及电网状态变量(线路传输功率、电压等). 电力市场出清约束条件主要包括各电源与负荷运行约束及输电网潮流约束组成, 采用直流潮流模型描述输电网潮流分布^[19], 具体地:

$$p_{i,t}^{\text{g}} + W_{i,t} + A_{i,t}^{\text{dis}} = A_{i,t}^{\text{ch}} p_{i,t}^{\text{d}} + \sum_{l|f(l)=i} P_l^{\text{l}} - \sum_{l|t(l)=i} P_l^{\text{t}}, \forall i, \forall t, \quad (5a)$$

$$P_l^{\text{l}} = (\theta_{f(l),t} - \theta_{t(l),t}) / X_l, \forall l, \forall t, \quad (5b)$$

$$0 \leq A_{j,t}^{\text{ch}} \leq \hat{A}_{j,t}^{\text{ch}}, 0 \leq A_{j,t}^{\text{dis}} \leq \hat{A}_{j,t}^{\text{dis}}, \forall j, \forall t, \quad (5c)$$

$$\begin{cases} 0 \leq p_{i,t}^{\text{g}} \leq p_{i,t}^{\text{g},u}, 0 \leq W_{i,t} \leq W_{i,t}^{\text{u}}, \forall i, \forall t, \\ p_{i,t}^{\text{d},l} \leq p_{i,t}^{\text{d}} \leq p_{i,t}^{\text{d},u}, \forall i, \forall t, \\ -P_l^{\text{u}} \leq P_l^{\text{l}} \leq P_l^{\text{u}}, \forall l, \forall t, \\ -\pi \leq \theta_{i,t} \leq \pi, \theta_{\text{ref},t} = 0, \forall i, \forall t, \end{cases} \quad (5d)$$

其中: 公式(5a)描述节点功率平衡关系, $W_{i,t}$ 为节点 i 注入的风电功率, P_l^t 为线路 l 传输的功率, $f(l)$ 与 $t(l)$ 代表线路 l 的首节点与末节点; 公式(5b)描述线路潮流分布, $\theta_{f(l),t}$ 与 $\theta_{t(l),t}$ 表示线路首末节点电压相角, X_l 为线路阻抗; 公式(5c)表征市场出清的AA-CAES售购电量不超过电站运营商上报的售购电量, 公式(5d)给定常规机组出力、风电机组出力、线路潮流及节点电压相角的上下限. 需要说明的是, 由于本文只涉及日前电量市场, 因此本文假定负荷需求全部由日前市场满足, 即 $p_{i,t}^{d,l} = p_{i,t}^d = p_{i,t}^{d,u}$, 如此式(4)中可去除最后一项.

4 主从博弈模型求解 (Solution methods for strategic bidding)

AA-CAES电站主从博弈双层竞标模型为非线性模型. 考虑到下层为线性规划, 可利用最优性条件(KKT条件)将该双层模型转化为单层规划. 转化后的单层模型亦为非线性, 其非线性来源主要包括两类, 一是通过最优性条件引入的互补松弛约束, 二是上层目标函数中价格与能量的双线性乘积项. 为此, 本文采用布尔展开法近似双线性乘积项^[17], 最终将主从博弈双层竞标模型转化为混合整数线性规划, 进而采用商业求解器高效求解.

4.1 最优性条件(KKT optimality conditions)

由于下层电力市场出清问题为线性规划, 可采用最优性条件消去目标函数. 为便于描述, 将下层电力市场出清问题抽象为

$$\begin{aligned} \min \quad & f^T x, \\ \text{s.t.} \quad & A_{\text{eq}} x = b_{\text{eq}} : \lambda, \\ & A_{\text{ineq}} x \leq b_{\text{ineq}} : \mu, \end{aligned} \quad (6)$$

其对应的等价KKT系统为

$$A_{\text{eq}} x = b_{\text{eq}}, \quad (7a)$$

$$A_{\text{ineq}} x \leq b_{\text{ineq}}, \quad (7b)$$

$$f = A_{\text{eq}}^T \lambda - A_{\text{ineq}}^T \mu, \quad (7c)$$

$$0 \leq \mu \perp (-A_{\text{ineq}} x + b_{\text{ineq}}) \geq 0. \quad (7d)$$

电力市场出清最优性条件(7)中包含非线性互补松弛约束(7d), 其抽象形式如下:

$$0 \leq (a - f) \perp g \geq 0, \quad (8)$$

为便于求解, 将式(8)线性化为

$$0 \leq a - f \leq Mh, \quad 0 \leq g \leq M(1 - h), \quad (9)$$

其中: h 为引入的布尔量, M 为一足够大的正数.

4.2 布尔展开法(Binary expansion method)

上层目标函数(2)中存在电价与电量相乘的双线性项, 如 $\lambda_{j,t}^{\text{dis}} A_{j,t}^{\text{dis}}$, $\lambda_{j,t}^{\text{ch}} A_{j,t}^{\text{ch}}$. 本节采用布尔展开法近似线

性化该类双线性项. 以线性化 $\lambda_{j,t}^{\text{dis}} A_{j,t}^{\text{dis}}$ 为例进行说明, 将 $\lambda_{j,t}^{\text{dis}}$ 展开为

$$\lambda_{j,t}^{\text{dis}} = \lambda_j^{\text{dis},l} + \Delta \lambda_j^{\text{dis}} \sum_{k=0}^{K_1} 2^k x_{j,t,k}^{\text{dis}}, \quad \forall j, \forall t, \quad (10)$$

并附加如下约束:

$$\begin{cases} 0 \leq A_{j,t}^{\text{dis}} - z_{j,t,k}^{\text{dis}} \leq M(1 - x_{j,t,k}^{\text{dis}}), & \forall j, \forall t, \forall k, \\ 0 \leq z_{j,t,k}^{\text{dis}} \leq M x_{j,t,k}^{\text{dis}}, & \forall j, \forall t, \forall k, \\ \Delta \lambda_j^{\text{dis}} = (\lambda_j^{\text{dis},u} - \lambda_j^{\text{dis},l})/G, \quad G = 2^{K_1}, \quad \forall j, \end{cases} \quad (11)$$

其中: $x_{j,t,k}^{\text{dis}}$ 为引入的辅助0-1变量, $z_{j,t,k}^{\text{dis}}$ 为辅助连续量, $\Delta \lambda_j^{\text{dis}}$ 为售电量离散步进量. $\lambda_{j,t}^{\text{ch}} A_{j,t}^{\text{ch}}$ 亦可采用相同的方式线性化. 如此, 经过上述变换, AA-CAES电站运营商主从博弈双层非线性竞价模型转化为混合整数线性规划问题, 进而可采用商业求解器高效求解.

综上, 面向日前电力市场的AA-CAES电站主从博弈竞标策略的混合整数线性规划模型对应的目标函数为

$$\begin{aligned} \max_{\Xi_{\text{UP}}} \quad & \sum_{t=1}^{N_T} \sum_{i=1}^{N_H} [\lambda_j^{\text{dis},l} A_{j,t}^{\text{dis}} + \Delta \lambda_j^{\text{dis}} \sum_{k=0}^{K_1} 2^k z_{j,t,k}^{\text{dis}}] - \\ & \sum_{t=1}^{N_T} \sum_{i=1}^{N_H} [\lambda_j^{\text{ch},l} A_{j,t}^{\text{ch}} + \Delta \lambda_j^{\text{ch}} \sum_{k=0}^{K_2} 2^k z_{j,t,k}^{\text{ch}}] - \\ & \sum_{j=1}^{N_A} \sum_{t=1}^{N_T} [C_j^{\text{dis}} A_{j,t}^{\text{dis}} - C_j^{\text{ch}} A_{j,t}^{\text{ch}}], \end{aligned} \quad (12)$$

对应的约束条件包括: AA-CAES电站运行约束(1), 电站电量及电价竞标约束(3), 电力市场出清条件KKT系统中的等式约束(7a)–(7c), 线性化非线性互补约束(7d)得到的线性约束(9), 以及线性化目标函数(2)引入的附加约束(10)–(11).

5 算例分析(Case study)

本节采用改进的IEEE-24节点可靠性测试系统分析AA-CAES电站主从博弈策略竞标模型. 系统拓扑如图2所示, 包含10台发电机组、32条输电线路、6座风电场、1座AA-CAES电站. AA-CAES电站布置于节点19, 风电场位于节点3, 5, 7, 16, 21, 23. AA-CAES电站参数如表1所示, 其他机组参数、线路参数以及AA-CAES电站内部运行参数可参考文献[20–21].

系统中各电源在各时段的报价最大值、最小值及平均值如图3所示, 本文假定AA-CAES电站充放电电价在各电源报价最大值、最小值之间, 同时AA-CAES电站24时段平均报价不能超过各电源边际电价确定的平均值.

图4给出了AA-CAES日前电力市场主从博弈竞标策略, 包含充放电价格标的与充放电电量标的, 图5给出了系统各电源出力水平. AA-CAES电站在 $t = 6$ 至 $t = 9$ 时充电, 并在系统负荷高峰期其他电源难以满足系统总负荷需求时以高价放电, 如 $t = 11, 12, 15, 16$,

19, 20等. 由图4与图5可知, AA-CAES电站以低价购入电量在再以高价售出电量, 从而实现套利运营, 在当前策略下日前套利运营的收益为\$19548. 特别地, 由于本文市场机制采用按报价支付的方式结算, AA-CAES电站运营商以最高价\$69.47作为售出电价报价, 以最低价\$35.55作为购入电价报价, 同时为满足报价平均值限制, 部分时刻如 $t = 20$ 以低于最高价报价.

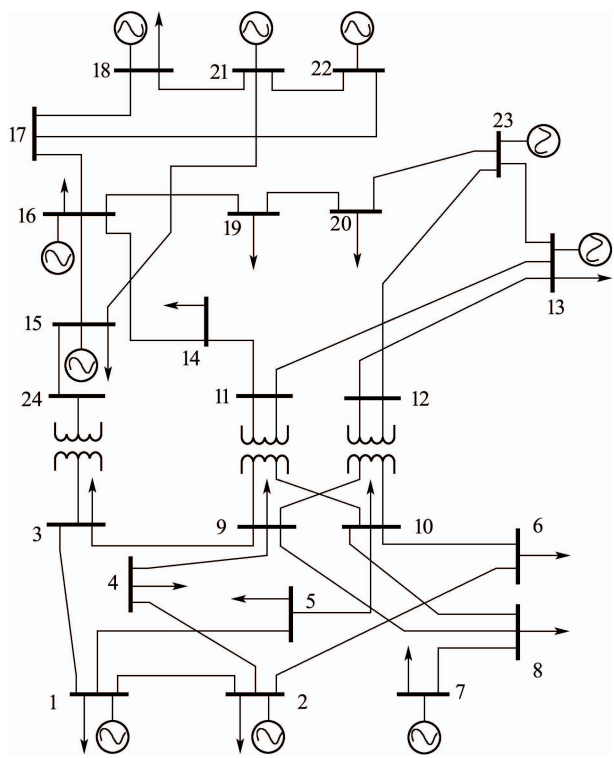


图 2 IEEE 24节点可靠性测试系统
Fig. 2 Topology of the modified IEEE 24 RTS system

表 1 AA-CAES 电站参数
Table 1 Rated parameters of AA-CAES plant

参数	$\bar{A}^{\text{ch}}, \bar{A}^{\text{dis}}$	$\lambda^{\text{ch}}, \lambda^{\text{dis}}$	p_r	$\lambda_{\text{av}}^{\text{ch}}, \lambda_{\text{av}}^{\text{dis}}$
单位	MW	\$/MWh	MPa	\$/MWh
数值	150,350	[35.55,69.47]	[8.4,9.0]	47.47

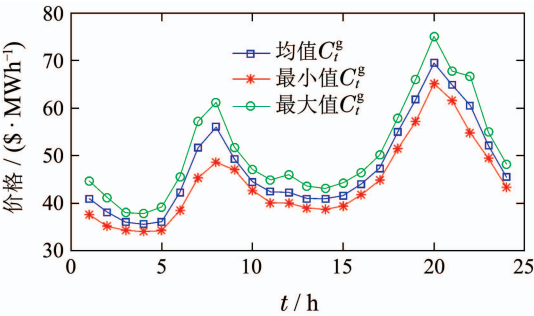


图 3 常规机组边际电价
Fig. 3 Marginal generation cost of traditional generators

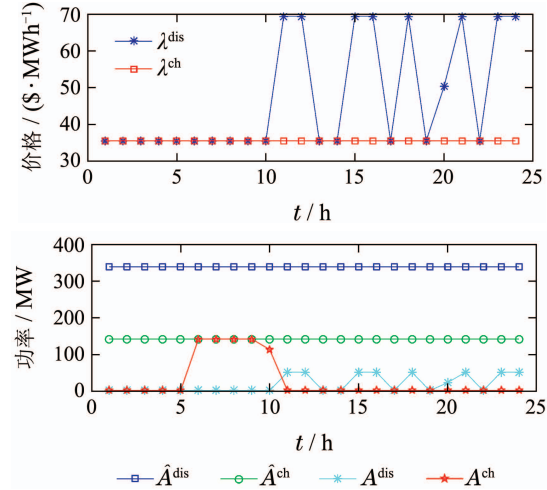


图 4 AA-CAES电站竞标策略
Fig. 4 Bidding strategy of AA-CAES facility

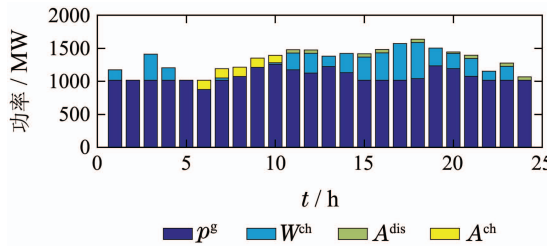


图 5 系统各电源出力水平
Fig. 5 Power generation of each generator in system

图6给出了AA-CAES电站内部储气罐压力变化情况与储热水平变化情况. 系统初始储热水平及储气库压力水平(百分比)均为25%, AA-CAES电站充电过程中储气室压力水平增加, 收集压缩热能提升储热水平. AA-CAES电站放电过程中储气室压力水平下降, 由于透平发电环节需要回馈压缩热能, 从而使得储热水平下降. 储热系统中富余的压缩热能可供集中供暖, 从而进一步提升AA-CAES电站运行收益.

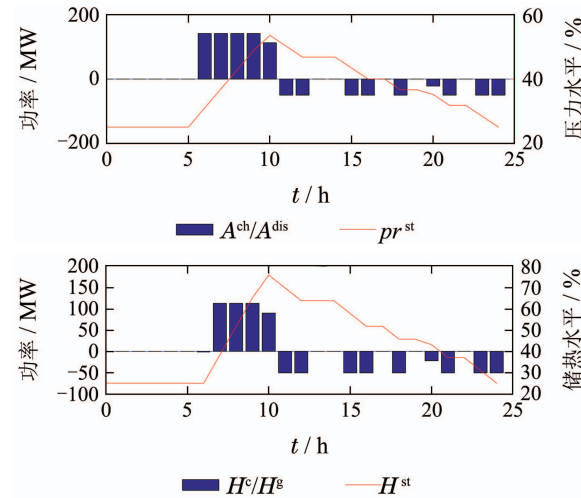


图 6 AA-CAES 电站压力和储热水平变化情况
Fig. 6 Pressure and thermal storage level of the AA-CAES facility

6 结论(Conclusions)

本文研究了面向AA-CAES电站运营商的主从博弈双层竞标模型, 以其辅助参与电力市场交易, 实现套利运营. AA-CAES电站运营商参与电力市场竞标, 上报售(购)电量与售(购)电价, 以最大化电力交易运营收益. 电力市场调度机构根据储能电站、其他电源及负荷竞标标的, 以最大化电力市场社会福利出清电力市场. 通过最优性条件将该双层主从博弈竞价模型转化为单层模型, 并线性化互补松弛约束; 同时采用布尔展开法近似线性化单层模型目标函数中的价格与能量双线性项, 最终将单层竞价模型转化为混合整数线性规划, 采用商业求解器高效求解. 本文所提的储能电站主从博弈竞标及求解方法可用于辅助AA-CAES电站的市场运营. 需要指出的是, AA-CAES电站除了参与日前电量市场外, 还可参与日前辅助服务市场获取收益. 后期将进一步研究面向日前电量与辅助服务联合市场的AA-CAES电站主从博弈竞标策略.

参考文献(References):

- [1] LUND H, SALGI G. The role of compressed air energy storage (CAES) in future sustainable energy systems [J]. *Energy Conversion & Management*, 2009, 50(5): 1172 – 1179.
- [2] BUDT M, WOLF D, SPAN R, et al. A review on compressed air energy storage: basic principles, past milestones and recent developments [J]. *Applied Energy*, 2016, 170: 250 – 268.
- [3] JAKIEL C, ZUNFT S, NOWI A. Adiabatic compressed air energy storage plants for efficient peak load power supply from wind energy: the European project AA-CAES [J]. *International Journal of Energy Technology & Policy*, 2007, 5(3): 296 – 306.
- [4] DRURY E, DENHOLM P, SIOSHANSI R. The value of compressed air energy storage in energy and reserve markets [J]. *Energy*, 2011, 36(8): 4959 – 4973.
- [5] MEI Shengwei, GONG Maoqiong, QIN Guoliang, et al. Advanced adiabatic compressed air energy storage system with salt cavern air storage and prospective of application [J]. *Power System Technology*, 2017, 41(10): 3392 – 3399.
(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.)
- [6] LUND H, SALGI G, ELMGAARD B, et al. Optimal operation strategies of compressed air energy storage (CAES) on electricity spot markets with fluctuating prices [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2009, 29(5/6): 799 – 806.
- [7] ZAFIRAKIS D, CHALVATZIS K J, BAIOCCHI G, et al. The value of arbitrage for energy storage: evidence from European electricity markets [J]. *Applied Energy*, 2016, 184: 971 – 986.
- [8] NOJAVAN S, NAJAFI-GHALELOU A, MAJIDI M, et al. Optimal bidding and offering strategies of merchant compressed air energy storage in deregulated electricity market using robust optimization approach [J]. *Energy*, 2018, 142: 250 – 257.
- [9] SHAFIEE S, ZAREIPOUR H, KNIGHT A M, et al. Risk-constrained bidding and offering strategy for a merchant compressed air energy storage plant [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, 32(2): 946 – 957.
- [10] GRAZZINI G, MILAZZO A. A thermodynamic analysis of multi-stage adiabatic CAES [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2012, 100(2): 461 – 472.
- [11] SHAFIEE S, ZAREIPOUR H, KNIGHT A. Considering thermodynamic characteristics of a CAES facility in self-scheduling in energy and reserve markets [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2016, PP(99): 1 – 1.
- [12] LI R, CHEN L, YUAN T, 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 System and Clean Energy*, 2016, 4(4): 566 – 580.
- [13] SAAD W, HAN Z, POOR H, et al. Game-theoretic methods for the smart grid: An overview of microgrid systems, demand-side management, and smart grid communications [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2012, 29(5): 86 – 105.
- [14] MEI Shengwei, WEI Wei. Hierarchical game and its applications in the smart grid [J]. *Journal of Systems Science and Mathematical Sciences*, 2014, 34(11): 1331 – 1344.
(梅生伟, 魏韪. 智能电网环境下主从博弈模型及应用实例 [J]. *系统科学与数学*, 2014, 34(11): 1331 – 1344.)
- [15] MEI Shengwei, LIU Feng, WEI Wei. *Foundations of Engineering Game Theory and Its Applications in Power Systems* [M]. Beijing: Science Press, 2016.
(梅生伟, 刘锋, 魏韪. *工程博弈论基础及电力系统应用* [M]. 北京: 科学出版社, 2016.)
- [16] NASROLAHPOUR E, KAZEMPOUR J, ZAREIPOUR H, et al. A bilevel model for participation of a storage system in energy and reserve markets [J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2017, 9(2): 582 – 598.
- [17] PEREIRA M V, GRANVILLE S, FAMPA M H C, et al. Strategic bidding under uncertainty: a binary expansion approach [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2005, 20(1): 180 – 188.
- [18] SAFAEI H, KEITH D W. Compressed air energy storage with waste heat export: an Alberta case study [J]. *Energy Conversion & Management*, 2014, 78: 114 – 124.
- [19] ZIMMERMAN R D, MURILLO-SANCHEZ C E, THOMAS R J. MATPOWER: Steady-state operations, planning, and analysis tools for power systems research and education [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2011, 26(1): 12 – 19.
- [20] ORDOUDIS C, PINSON P, MORALES J M, et al. *An updated version of the IEEE RTS 24-bus system for electricity market and power system operation studies* [EB/OL]. http://orbit.dtu.dk/files/120568114/An_Updated_Version_of_the_IEEE_RTS_24Bus_System_for_Electricity_Market_an....pdf, 2018.
- [21] LI R. *Advanced adiabatic compressed air energy storage test data* [EB/OL]. <https://sites.google.com/site/ruilismarterrlc>, 2017.

作者简介:

李瑞 (1993–), 男, 博士研究生, 目前研究方向为压缩空气储能、综合能源系统优化运行及强化学习在线控制等, E-mail: ceairicky@gmail.com;

陈来军 (1982–), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 目前主要研究方向为微电网控制、压缩空气储能等, E-mail: chenlaijun@mail.tsinghua.edu.cn;

梅生伟 (1964–), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 杰青, 长江学者, IEEE Fellow, IET Fellow, 目前主要研究方向为电力系统鲁棒控制、复杂电力网络理论、电力系统灾变防治和新能源电力系统, E-mail: meishengwei@mail.tsinghua.edu.cn;

薛小代 (1982–), 男, 博士, 助理研究员, 目前主要研究方向为压缩空气储能、智慧微电网等, E-mail: xuexiaodai@tsinghua.edu.cn.