

新型电力系统下抽水蓄能电站容量效益分析

张祥成¹, 田旭¹, 张桂红¹, 刘飞¹, 樊恒建^{2,3}, 李知艺³

(1. 国网青海省电力公司经济技术研究院, 西宁 810008; 2. 浙江大学 工程师学院, 杭州 310015;
3. 浙江大学 电气工程学院, 杭州 310027)

摘要:抽水蓄能电站的投资建设将为新型电力系统安全可靠运行带来多种效益,容量效益是维持电力供需平衡的基础保障。然而,现阶段抽水蓄能电站的容量效益未被充分认知和补偿,导致电站盈利不理想,投资建设积极性差。基于生产运行模拟理念,提出了一种抽水蓄能电站的容量效益评估方法;建立了抽水蓄能电站与风、光、水、火等多类型电源的联合优化运行模型;基于某省电力系统运行数据,分析了抽水蓄能电站在减少火电机组装机容量和减少新能源弃电方面所体现的容量效益,为厘清抽水蓄能电站在能源电力转型过程中的作用提供了理论依据。

关键词:抽水蓄能;容量效益;生产运行模拟;优化运行

DOI:10.15938/j.jhust.2023.01.013

中图分类号: TM933 **文献标志码:** B **文章编号:** 1007-2683(2023)01-0105-09

Capacity Benefit Analysis of Pumped-storage Power Stations in a New-type Power System

ZHANG Xiangcheng¹, TIAN Xu¹, ZHANG Guihong¹, LIU Fei¹, FAN Hengjian^{2,3}, LI Zhiyi³

(1. Economic and Technological Research Institute of State Grid Qinghai Electric Power Company, Xining 810008, China.
2. Polytechnic Institute, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310015, China.
3. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract: The investment and construction of pumped-storage power stations will bring multiple benefits to the safe and reliable operation of the new power system, and capacity benefits are the basic guarantee for maintaining the balance of power supply and demand. However, at this stage, the capacity benefits of pumped storage power plants are not fully recognized and compensated, resulting in unsatisfactory profitability and poor enthusiasm for investment and construction. To promote the development of pumped-storage power plants in the process of energy-to-power transition, this paper proposes a capacity benefit evaluation method for pumped-storage power stations based on the concept of production and operation simulation; a pumped-storage power station is established. The joint optimization operation model of energy power station and wind, light, water, fire and other types of power sources is established. Based on the operating data of a certain province's power system, it is verified that the pumped storage power station can reduce the installed capacity of thermal power plants and reduce renewable energy sources, thereby laying the theoretical foundation for analyzing the role of pumped-storage power stations in the transition of power and energy industry.

Keywords: pumped storage; capacity benefit; production simulation; optimized operation

收稿日期: 2021-12-06

基金项目: 国家自然科学基金(52007164).

作者简介: 张祥成(1984—),男,高级工程师;

田旭(1990—),男,工程师.

通信作者: 李知艺(1989—),男,博士,研究员,博士研究生导师, E-mail: zhiyi@zju.edu.cn.

0 引 言

2020 年 9 月,习近平总书记宣布,中国将争取在 2030 年前实现碳排放达峰,在 2060 年前实现碳中和。在“双碳”目标驱动下,我国能源电力行业将加速转型,尤其是未来的新型电力系统将以风电和光伏等新能源为主体。然而,高占比的新能源发电具有随机性、波动性和间歇性等特点,对新型电力系统的安全稳定运行带来了严峻的挑战^[1-2]。在此背景下,储能设施的价值凸显,大量可靠、灵活的储能设施将有力保障能源电力的低碳化转型^[3]。事实上,抽水蓄能是目前最成熟、最可靠、最具大规模开发潜力且经济性最优的储能设施^[4-6]。目前,抽水蓄能在世界各国都处于高速建设发展期。根据国际水电协会(IHA)发布的 2021 全球水电报告,2020 年底全球抽水蓄能装机规模为 1.59 亿千瓦,占全球储能总规模的 94%,另有 2 亿千瓦以上的抽水蓄能项目在开展前期工作。到 2021 年 9 月为止,我国的抽水蓄能电站装机总量达到了 32 490 兆瓦,另有在建装机容量 53 130 兆瓦^[7]。可以预见,抽水蓄能将在未来新型电力系统中占据重要地位。

随着装机规模的不断提升,抽水蓄能在未来新型电力系统调控运行过程中将呈现体现多种效益,具体可以分为动态效益和静态效益:动态效益是指抽水蓄能电站在电力系统的运行中发挥动态功能所产生的效益,主要包括调峰填谷效益、调频效益、调相效益、事故备用效益和黑启动效益等^[8-11];静态效益是指抽水蓄能电站在电力系统的运行中发挥静态功能所产生的效益,主要包括电量效益和容量效益^[12]。在静态效益里,容量效益是指抽水蓄能在不额外消耗化石能源前提下平滑新能源发电波动性所带来的效益^[13],将对维持新型电力系统功率平衡的起到基础性的保障作用。因此,抽水蓄能电站的容量效益尤其值得关注和分析。然而,现阶段抽水蓄能电站的容量效益未被充分认知和补偿。虽然抽水蓄能电站的功能多、建设规模大,但现有的投资运营模式、电价机制等并不能很好地体现抽水蓄能电站的容量效益,对抽水蓄能电站的投资和运营产生一定负面影响^[14]。因此,在抽水蓄能亟需发展的关键时期,对其进行容量效益分析研究具有重要的理论意义和实际价值^[15]。

目前,已有部分文献对抽水蓄能电站的容量效益开展了探索性分析。文[16-17]提出了一种基

于等可靠性指标法的容量效益计算方法;但是在抽水蓄能电站的容量效益分析中,可靠性指标的具体确定没有一个统一的标准或方法。文[18-20]采用贝叶斯模型从容量效益等角度对抽水蓄能电站进行了容量配置分析,为抽水蓄能电站的容量效益分析提供了新思路;但整体实施方案较为复杂。文[21]从熵理论出发分析了抽水蓄能电站的容量配置,使用改进熵权法确定各项指标的权重以分析抽水蓄能电站的容量效益。文[22]构建了包括抽水蓄能容量配置和抽水蓄能联合系统调度运行优化的抽水蓄能电站双层规划模型,分析了抽水蓄能电站的典型日调度优化问题并提出了求解流程;但是使用的新能源装机容量较小且对新能源不确定性的考虑不够充分。文[23]以四川电网为研究对象,基于双层规划理论对抽水蓄能电站容量配置问题进行了研究;但所采用的抽水蓄能电站模型容量较小。综上,国内外对于抽水蓄能电站容量效益的定量计算尚未形成统一的标准和方法,且在新型电力系统建设背景下已有模型和方法亟需改进。

本文以新能源富集区域送端电力系统(简称为区域电力系统)为研究对象,建立了抽水蓄能电站与其他发电机组联合优化运行的数学模型,并通过生产运行模拟实验测算了抽水蓄能电站的容量效益。后续内容安排如下:第 1 节整体介绍抽水蓄能电站容量效益分析框架和关键技术;第 2 节具体介绍包含抽水蓄能电站的生产运行模拟模型和计算流程;第 3 节展示了基于实际电力系统数据的算例分析结果;第 4 节对全文进行了总结。

1 抽水蓄能电站容量效益分析框架

1.1 整体思路

抽水蓄能电站的容量效益是其自身的容量给电力系统安全、环保、经济运行带来的一种静态效益。虽然抽水蓄能电站的投入运行给电力系统带来的容量效益显著,但是容量效益在电力系统的整个生产运行过程中难以直接体现。在新型电力系统背景下,火电机组、风电机组、光伏机组、水电机组和抽水蓄能电站与电力系统协调运行,保障本地负荷和外送功率的稳定供应,维持区域电力系统的电力电量平衡。理论上,在保证电力系统的供电可靠性和系统备用容量满足其要求的条件下,可以通过抽水蓄能电站投入电力系统运行前后能够减少的火电机组装机规模和能够减少的新能源弃电量来体现抽水蓄

能电站的容量效益。

图 1 展示了抽水蓄能电站容量效益计算的基本思路,其中:区域电力系统可以被建模为无穷大电网而无需考虑具体的网架结构和运行约束;风、光、水、火等多类型电源均可以广域等值聚合成单机模型;因此,在以经济效益最大化为目标的联合调度优化决策求解过程中,只需对待投资建设的抽水蓄能电站的具体运行方式进行详细建模。

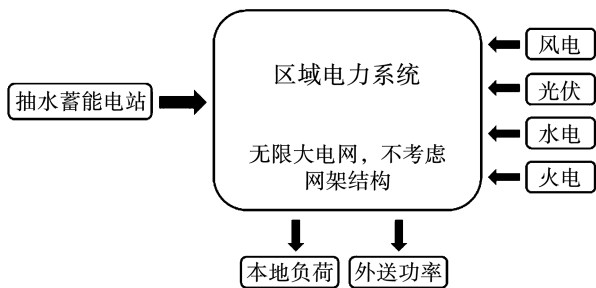


图 1 抽水蓄能电站容量效益分析思路

Fig. 1 Capacity benefit analysis scheme of pumped-storage stations

1.2 火、水电多机组等值建模

对于火电机组,将系统内全部火电机组装机容量进行叠加,得到等效机组的装机容量。同时,将系统内全部火电机组的出力 and 爬坡约束进行叠加,得到等效机组的出力和爬坡约束:

$$W_c = \sum_{i=1}^n w_{c,i} \quad (1)$$

$$P_c^{\min} = \sum_{i=1}^n p_{c,i}^{\min} \quad (2)$$

$$P_c^{\max} = \sum_{i=1}^n p_{c,i}^{\max} \quad (3)$$

$$R^{\min} = \sum_{i=1}^n r_i^{\min} \quad (4)$$

$$R^{\max} = \sum_{i=1}^n r_i^{\max} \quad (5)$$

式中: W_c 为等效火电机组装机容量; $w_{c,i}$ 为火电机组 i 的装机容量; n 为火电机组数量; $p_{c,i}^{\min}$ 为火电机组 i 的最小出力; $p_{c,i}^{\max}$ 为火电机组 i 的最大出力; $r_i^{\min}$ 和 $r_i^{\max}$ 分别为火电机组 i 的爬坡和上限。

对于水电机组,使用和火电机组相似的方法进行简化处理。具体来说,将系统内所有水电机组装机容量和调度周期内发电量上下限进行叠加,得到等效水电机组参数:

$$W_h = \sum_{i=1}^o w_{h,i} \quad (6)$$

$$E_h^{\min} = \sum_{i=1}^o E_{h,i}^{\min} \quad (7)$$

$$E_h^{\max} = \sum_{i=1}^o E_{h,i}^{\max} \quad (8)$$

式中: W_h 为等效水电机组装机容量; w_i 为水电机组 i 的装机容量; o 为水电机组数量; $E_{h,i}^{\min}$ 和 $E_{h,i}^{\max}$ 分别为水电机组 i 在调度周期内的发电量下限和上限。

值得指出,对发电机组进行等值简化建模会显著提高计算速度,且相应的误差对于抽水蓄能电站的容量效益分析结果不会有很大影响。

1.3 风、光伏发电典型场景生成

对于风电和光伏机组的典型出力曲线,可以利用条件生成对抗网络(conditional generative adversarial networks, CGAN)预测得到^[22]。具体思路如图 2 所示。

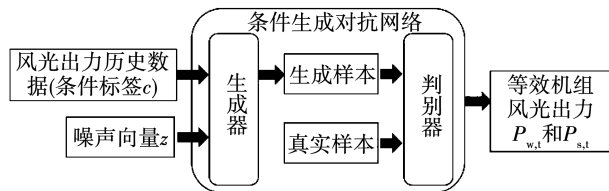


图 2 风、光出力曲线生成方法

Fig. 2 Wind power and photovoltaic output forecast

CGAN 中,生成器和判别器的损失函数分别为:

$$L_G = -E_{z \sim p_z(z)} [D(G(z|c)|c)] \quad (9)$$

$$L_D = \{-E_{x \sim p_r(x)} [D(x|c)] + E_{z \sim p_z(z)} [D(G(z|c)|c)]\} \quad (10)$$

式中: E 表示期望; $G(z|c)$ 表示在条件 c 下生成的样本; $D(\cdot)$ 表示判别器判定输入样本为真实数据的概率; $z \sim p_z(z)$ 表示从高斯分布 $p_z(z)$ 采样得噪声向量 z ; $x \sim p_r(x)$ 表示采样得一组真实样本 x 。

CGAN 训练过程的总体目标函数为

$$\min_G \max_D \{E_{x \sim p_r(x)} [D(x|c)] - E_{z \sim p_z(z)} [D(G(z|c)|c)]\} \quad (11)$$

具体来说,首先将风光出力历史数据作为条件标签 c ,将其与噪声向量 z 拼接输入到生成器,产生生成样本;随后,将生成样本和真实样本输入到判别器,通过生成器和判别器对抗博弈,得到条件 c 下生成的符合真实规律的数据,即风、光机组的典型出力 $P_{w,t}$ 和 $P_{s,t}$ 。

2 抽水蓄能电站生产运行模拟模型

2.1 目标函数

将火电机组发电成本、启停成本和新能源的弃电惩罚统筹考虑,在满足电力系统电力电量平衡等约束条件下,尽可能地降低整个系统的总成本。具体来说,目标函数可以表示为

$$\min \left\{ \sum_{t=1}^T U_{c,t} C_{c,t}(P_{c,t}) + \lambda_1 \sum_{t=1}^T E_{w,t} + \lambda_2 \sum_{t=1}^T E_{s,t} + \lambda_3 \sum_{t=1}^T E_{h,t} \right\} \quad (12)$$

式中: $C_{c,t}$ 为火电机组在 t 时刻的发电成本函数; $P_{c,t}$ 为火电机组在 t 时刻的出力; $U_{c,t}$ 为火电机组在 t 时刻的运行状态的布尔变量, 1 表示机组运行, 0 表示机组停机; $E_{w,t}$ 为 t 时刻的弃风功率; $E_{s,t}$ 为 t 时刻的弃光功率; $E_{h,t}$ 为 t 时刻的弃水功率; λ_1 为弃风惩罚因子; λ_2 为弃光惩罚因子; λ_3 为弃水惩罚因子。具体计算方式如下。

火电机组发电成本函数^[23-24]为

$$C_{c,t} = aP_{c,t}^2 + bP_{c,t} + d \quad (13)$$

式中: a, b, d 均为火电发电成本与功率之间的函数关系系数。

弃风功率计算公式为

$$E_{w,t} = W_{w,t} - P_{w,t} \quad (14)$$

式中: $W_{w,t}$ 为风电机组在 t 时刻的理论可发功率; $P_{w,t}$ 为风电机组在 t 时刻实际发出的功率。

弃光功率计算公式为

$$E_{s,t} = W_{s,t} - P_{s,t} \quad (15)$$

式中: $W_{s,t}$ 为光伏电站在 t 时刻的理论可发功率; $P_{s,t}$ 为光伏电站在 t 时刻实际发出的功率。

弃水功率计算公式为

$$E_{h,t} = W_{h,t} - P_{h,t} \quad (16)$$

式中: $W_{h,t}$ 为水电机组在 t 时刻的理论可发功率; $P_{h,t}$ 为水电机组在 t 时刻实际发出的功率。

2.2 约束条件

模型中将区域电力系统当作无穷大电网考虑, 忽略线路损耗。

1) 系统电力电量平衡约束:

$$P_{c,t} + P_{w,t} + P_{s,t} + P_{h,t} + P_{ps,t} = L_{d,t} + L_{o,t} \quad (17)$$

式中: $P_{ps,t}$ 为抽水蓄能电站功率(可能为正也可能为负, 在无抽水蓄能电站时为 0); $L_{d,t}$ 为 t 时刻, 区域电力系统的本地负荷; $L_{o,t}$ 为 t 时刻, 区域电力系统的外送功率。

2) 火电机组发电出力爬坡约束:

$$P_c^{\min} \leq P_{c,t} \leq P_c^{\max} \quad (18)$$

$$P_{c,t} - P_{c,t-1} \leq R_c^{\max} \quad (19)$$

$$P_{c,t} - P_{c,t-1} \leq -R_c^{\min} \quad (20)$$

式中: $P_c^{\min}$ 为火电机组出力下限; $P_c^{\max}$ 为火电机组出力上限; $P_{c,t-1}$ 为火电机组在 $t-1$ 时刻的出力; $R_c^{\max}$ 为火电机组爬坡上限; $R_c^{\min}$ 为火电机组爬坡下限。

3) 系统负荷备用约束:

$$B^{\min} \leq B_t \quad (21)$$

式中: $B^{\min}$ 为 t 时刻系统负荷备用下限; B_t 为 t 时刻系统负荷备用。

4) 水电机组约束:

$$E_h^{\min} \leq \sum_{t=1}^T (P_{h,t} + E_{h,t}) \leq E_h^{\max} \quad (22)$$

式中: $E_h^{\min}$ 为水电机组在一个调度周期内的发电量下限; $E_h^{\max}$ 为水电机组在一个调度周期内的发电量上限。

5) 抽水蓄能电站约束:

抽水蓄能电站受自身特点以及其功能定位等条件限制, 运行中具有特定的约束。

①抽水蓄能电站不能同时进行发电和抽水, 故存在抽水与发电状态互斥约束:

$$x_t + y_t \leq 1 \quad (23)$$

式中: x_t 为 t 时刻指示机组抽水状态的布尔变量, 为 1 表示机组处于抽水状态, 为 0 表示机组没有处于抽水状态; y_t 为 t 时刻指示机组发电状态的布尔变量, 为 1 表示机组处于发电状态, 为 0 表示机组没有处于发电状态。

②发电功率约束:

$$0 \leq P_{ps,t}^g \leq y_t P_{ps,t}^{g\max} \quad (24)$$

式中: $P_{ps,t}^g$ 为抽水蓄能电站 t 时刻的发电功率; $P_{ps,t}^{g\max}$ 为抽水蓄能电站的最大发电功率。

③由于抽水蓄能电站机组在处于抽水状态时, 只能以恒定的功率从电力系统中吸收电能进行抽水, 故有抽水功率约束:

$$P_{ps,t}^d = x_t P_{ps,t}^{d\max} \quad (25)$$

式中: $P_{ps,t}^d$ 为抽水蓄能电站 t 时刻的抽水功率; $P_{ps,t}^{d\max}$ 为抽水蓄能电站的恒定抽水功率。

④上水库库容时变约束:

$$E_{ps,t+1} = E_{ps,t} + P_{ps,t}^d - \frac{P_{ps,t}^g}{\eta_g \eta_d} \quad (26)$$

式中: $E_{ps,t+1}$ 为 $t+1$ 时刻抽水蓄能电站上水库库容电量; $E_{ps,t}$ 为 t 时刻上水库库容电量; η_g 为抽水蓄能电站发电效率; η_d 为抽水蓄能电站抽水效率。

⑤由于抽水蓄能电站的上水库蓄水量不能超过最大值, 故有抽水蓄能电站上水库库容电量约束:

$$E_{ps,t}^{\min} \leq E_{ps,t} \leq E_{ps,t}^{\max} \quad (27)$$

式中: $E_{ps,t}^{\min}$ 为上水库库容电量最小值; $E_{ps,t}^{\max}$ 为上水库库容电量最大值。

2.3 线性化处理

由于火电机组发电成本的加入,考虑上述约束条件所构建的抽水蓄能与火电、水电、风电、光伏机组与电力系统协调运行的模型为混合整数非线性规划问题。求解时,先将火电机组发电成本通过下式进行分段线性化处理:

$$C_{c,t} = \sum_{s=1}^m K_s P_{c,s} \quad (28)$$

$$K_s = a(2s-1)F + b \quad (29)$$

$$P_{c,t} = \sum_{s=1}^m P_{c,s} \quad (30)$$

$$F = \frac{P_c^{\max} - P_c^{\min}}{m} \quad (31)$$

式中: m 为分段总数; K_s 为机组在第 s 分段区间的斜率; $P_{c,s}$ 为机组在第 s 分段的实际出力; F 为机组在第 s 分段的最大出力。

分段线性化后,模型在每个分段区间内,变为混合整数线性规划问题,可以有效使用商业求解器 Gurobi 进行求解。

2.4 整体计算流程

图 3 为抽水蓄能电站容量效益的计算流程。

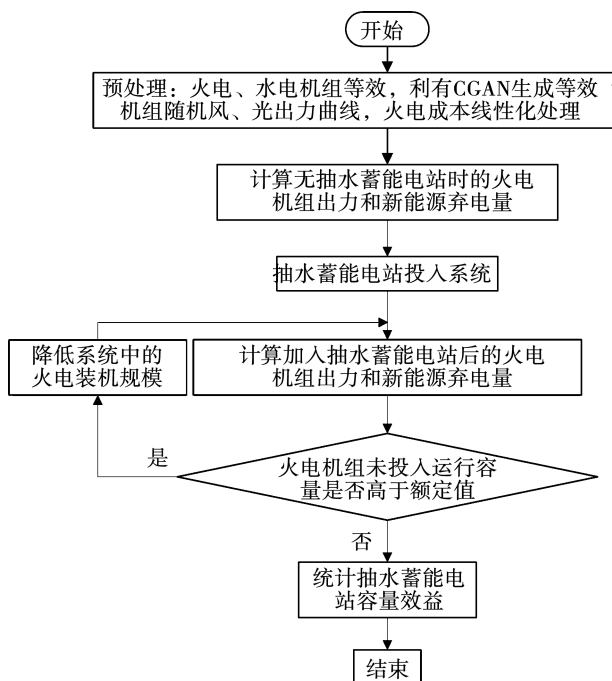


图 3 抽水蓄能电站容量效益计算流程图

Fig. 3 Flow chart of capacity benefit calculation of pumped-storage power station

步骤 1 进行预处理,包括火电、水电机组等效,利用 CGAN 生成等效机组的随机风、光出力曲线和火电成本的线性化处理。

步骤 2 进行典型日无抽水蓄能电站参与的电力系统生产运营模拟,计算此时的火电机组出力和新能源弃电量。

步骤 3 将抽水蓄能电站投入电力系统运行。将利用新能源弃电作为抽水蓄能电站最主要的电能来源,采用综合性的运行方式以保证容量效益计算的结果贴近实际。

步骤 4 在抽水蓄能电站投入运行的情况下,进行典型日电力系统生产运营模拟。计算抽水蓄能电站加入后电力系统中的火电机组出力和新能源弃电量。

步骤 5 判断系统中未投入运行的火电机组容量是否高于额定值。若是,则进行步骤 6;若不是,则进行步骤 7。

步骤 6 降低电力系统中火电机组的装机规模,返回步骤 4。

步骤 7 计算出抽水蓄能电站投入运行后与投入运行前相比,满足系统备用要求下的系统火电机组装机容量差值和新能源弃电变化量。按以下两种方式分析测算分析抽水蓄能电站的容量效益。一方面,火电机组装机部分容量效益计算公式为

$$F_1 = W_c - W_c^* \quad (32)$$

式中: F_1 为火电机组装机部分容量效益; W_c^* 为有抽水蓄能电站接入后保证系统稳定运行和备用容量要求的火电机组总装机容量。另一方面,新能源弃电部分容量效益计算公式为

$$F_2 = C_c - C_c^* \quad (33)$$

式中: F_2 为新能源弃电部分容量效益; C_c 为无抽水蓄能电站接入时的新能源弃电量; C_c^* 为抽水蓄能电站接入后的新能源弃电量。

3 算例分析

3.1 参数设置

算例中的各项数据基于某省电力系统的实际装机容量、实际本地负荷和实际省间外送电等数据,所采用数据的时间间隔为 1 h。其中,火电机组的最小出力为火电机组装机总容量的一半。抽水蓄能电站相关数据采用该省某抽水蓄能电站的实际设计参数,两典型日的储能初值均为 300 MWh。该抽水蓄能电站的最大发电功率为 2 400 MW,全功率最长发电时间为 7 h。算例中的部分相关数据如表 1 所示:

表 1 某省电源装机与抽水蓄能电站部分参数

Tab. 1 Parameters of experimental setup

装机容量/MW		抽水蓄能电站相关参数	
火电	3900	最大发电功率/MW	2400
水电	11000	全功率最长发电时间/h	7
风电	8400	抽水效率	100%
光伏	16000	发电效率	75%

3.2 容量效益

分别选取某省电力系统冬季日负荷峰谷差最小和夏季负荷峰谷差最小的两天作为典型日,对抽水蓄能电站加入电力系统前后系统火电装机容量的变化进行计算。统计抽水蓄能电站的容量效益。其中,冬季典型日的本地负荷和外送功率如图 4 所示;夏季典型日的本地负荷和外送功率如图 5 所示;冬季典型日的等效风电、光伏机组出力如图 6 所示;夏季典型日的等效风电、光伏机组出力如图 7 所示。

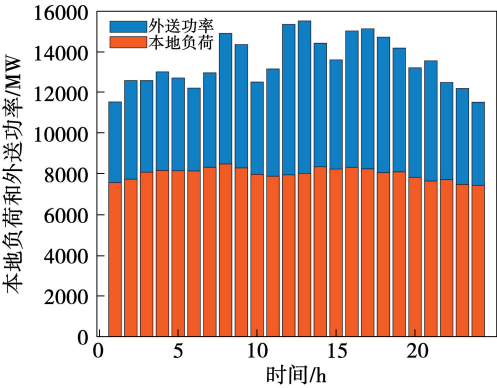


图 4 冬季典型日本地负荷和外送功率

Fig. 4 Load and outgoing power in a winter day

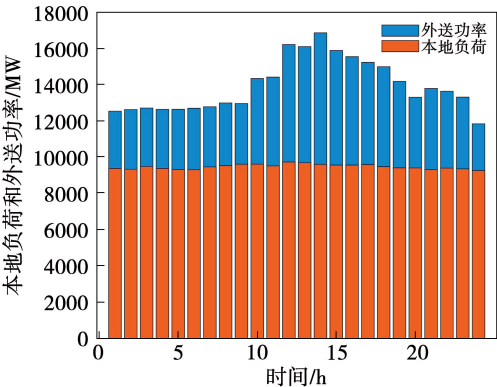


图 5 夏季典型日本地负荷和外送功率

Fig. 5 Load and outgoing power in a summer day

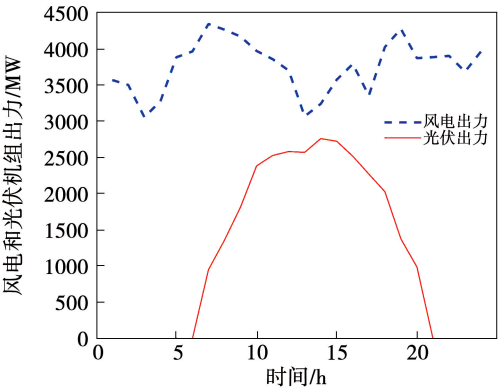


图 6 冬季典型日风电、光伏机组出力

Fig. 6 Wind and PV power output in a winter day

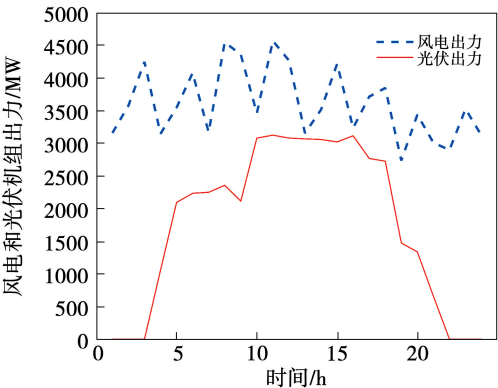


图 7 夏季典型日等效风电、光伏机组出力

Fig. 7 Wind and PV power output in a summer day

1) 减少火电机组装机容量的效益分析

图 8 和图 9 为冬季和春季典型日抽水蓄能电站加入前后火电机组出力情况对比。

在冬季典型日,对有无抽水蓄能电站接入电力系统的两种情况进行生产运营模拟。与无抽水蓄能电站时的火电机组出力相比,抽水蓄能电站的加入可以减少 702 MW 的火电机组装机。并且能够在全天的大多数时间段内大幅减小火电机组的出力。如图 8 所示,抽水蓄能电站的加入使全天共减少的火电机组发电量约为 3 764 MWh,大幅降低了电力系统中的煤耗与碳排放。

在夏季典型日,对有无抽水蓄能电站接入电力系统的两种情况进行生产运营模拟。与无抽水蓄能电站时的火电机组出力相比,抽水蓄能电站的加入可以减少 1 544 MW 的火电机组装机。并且在全天的大多数时间段内能够大幅减少火电机组的出力。如图 9 所示,全天共减少机组发电量约为 7 445 MWh。与冬季典型日相比,抽水蓄能电站的加入对电力系统降低煤耗与碳排放的效果更加显著。

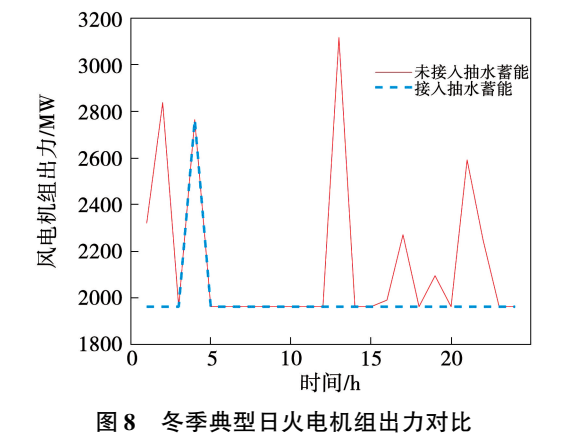


图 8 冬季典型日火电机组出力对比

Fig. 8 Output of thermal power units in a winter day

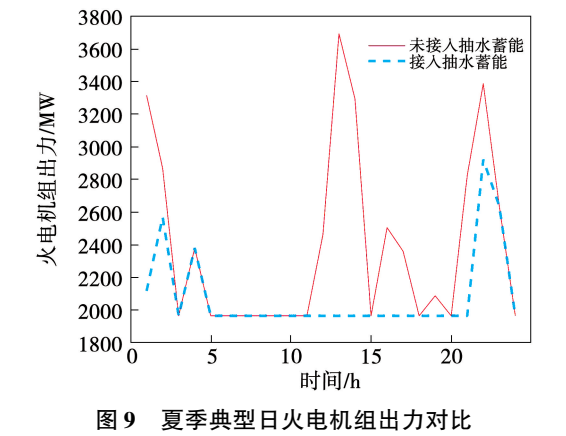


图 9 夏季典型日火电机组出力对比

Fig. 9 Output of thermal power units in a summer day

2) 减少新能源弃电的容量效益分析

抽水蓄能电站加入到电力系统的运行中,除了可以降低火电机组的装机和出力之外,还能够大幅减少新能源弃电量。新能源弃电由于本地负荷、外送功率和新能源出力的波动,会较为频繁地出现峰谷交叉的现象。在上述冬季和夏季典型日的生产运营模拟中,抽水蓄能电站加入电力系统运行前后产生弃电的情况对比如图 10 和 11 所示。

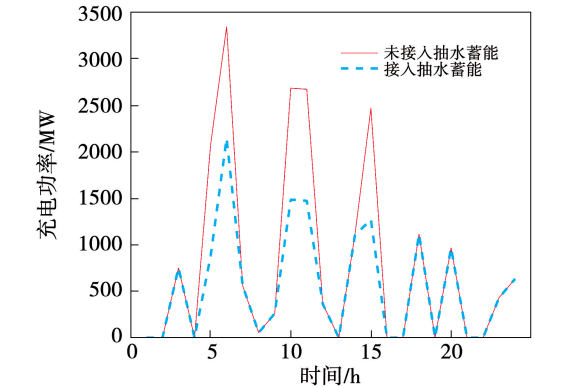


图 10 冬季典型日新能源弃电对比

Fig. 10 Renewable energy curtailment in a winter day

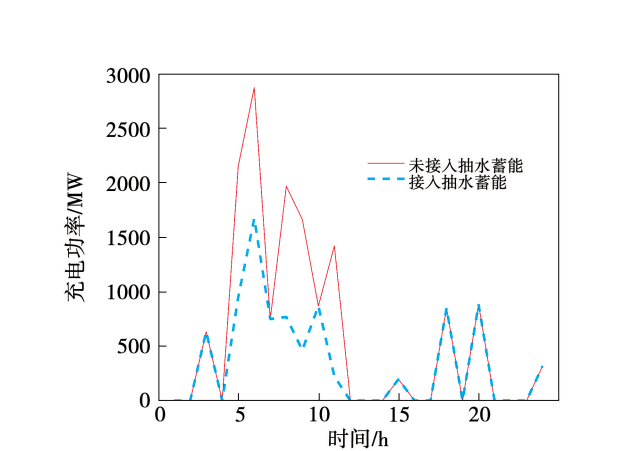


图 11 夏季典型日新能源弃电对比

Fig. 11 Renewable energy curtailment in a summer day

在冬季典型日,对有无抽水蓄能电站接入电力系统的两种情况进行生产运营模拟。与无抽水蓄能电站时的新能源弃电情况相比,抽水蓄能电站的加入在全天部分时段可以有效地减少新能源弃电功率。全天共减少 5 768 MWh 的新能源弃电量。

在夏季典型日,对有无抽水蓄能电站接入电力系统的两种情况进行生产运营模拟。与无抽水蓄能电站时的新能源弃电情况相比,抽水蓄能电站的加入在全天部分时段可以有效地减少新能源弃电功率。在全天共减少了 6 293 MWh 的新能源弃电量。

综上,容量效益统计如表 2 所示:

表 2 容量效益统计分析			
Tab. 2 Results of capacity benefit analysis			
冬季典型日		夏季典型日	
F_1/MW	F_2/MWh	F_1/MW	F_2/MWh
702	5 768	1 544	6 293

3.3 结果分析

在以某省电力系统典型日的实际运行数据和相关参数为基础的仿真分析中,可以看出抽水蓄能电站能够给电力系统带来较高的容量效益。其在减少火电机组装机容量和减少新能源弃电量中都能够发挥显著的作用。但是,算例中所采用的数据为某省电力系统的实际数据。在未来较长的时间尺度内,随着国民经济的快速发展,该省电力系统的各类电源装机容量、省内负荷和外送功率都将会有进一步的提高。因此,在未来新型电力系统的实际运行中,相同装机容量的抽水蓄能电站将会体现出相比于上述算例中更高的容量效益。

4 结 论

在我国电力系统向以新能源为主体的新型电力系统转型的过程中,抽水蓄能电站的容量效益分析是亟待解决的一个重要问题。本文结合抽水蓄能电站的运行特点,建立了抽水蓄能电站和火电、风电、光伏、水电机组联合优化运行的数学模型,并基于某省电力系统典型运行数据进行了生产运营模拟仿真验证。通过对比抽水蓄能电站接入电力系统前后,系统中火电机组的装机容量变化和新能源弃电量的变化,计算分析了抽水蓄能电站的容量效益,为其进一步大规模投资建设提供了针对性的理论依据。值得指出,随着新型电力系统建设发展,本文算例中各类电源的装机容量都比未来潜在装机容量小,因此相同装机容量的抽水蓄能电站在实际运行中将能够体现更大的容量效益。

参考文献:

- [1] 刘梦晨,郑华,秦立军,等. 基于源网荷储综合调峰资源协同方案研究[J]. 电测与仪表,2022,59(8):127.
LIU Mengchen, ZHENG Hua, QIN Lijun, et al. Research on the Collaborative Scheme of Integrated Peak Shaving Resources Based on Generation-grid-load-storage [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(8):127.
- [2] 陈政,杨甲甲,金小明,等. 可再生能源发电电价形成机制与参与电力市场的竞价策略[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2014, 41(2):89.
CHEN Zheng, YANG Jiajia, JIN Xiaoming, et al. A Literature Survey for Pricing Mechanisms and Bidding Strategies of Renewable Energy Generation [J]. Journal of North China Electric Power University, 2014, 41(2):89.
- [3] 朱菲菲,闫春乐,简优宗. 抽水蓄能电站无级调速机组控制策略[J]. 哈尔滨理工大学学报,2016,21(1):66.
ZHU Feifei, YAN Chunle, JIAN Youzong. Control strategy of ac excitation for pumped storage power station[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2016, 21(1):66.
- [4] 谭洪涛,霍丽华,戈宝军. 抽水蓄能电机变频启动时阻尼暂态电流的计算[J]. 哈尔滨理工大学学报,2007(3):99.
TAN Hongtao, HUO Lihua, GE Baojun. Calculation of Starting Currents and Losses for Damper Bars of Pumped Storage Machines by SFC[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2007(3):99.
- [5] BRUNINX K, DVORKIN Y, DELARUE E, et al. Coupling Pumped Hydro Energy Storage with Unit Commitment [J]. IEEE Transactionson Sustainable Energy, 2016, 7(2):786.
- [6] 霍丽华,谭洪涛,戈宝军. 基于 ANSYS 的抽水蓄能电机饱和同步电抗的计算[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2006(1):112.
HUO Lihua, TAN Hongtao, GE Baojun. Calculation of Saturated Synchronous Reactances of Pumped Storage Machine Based Based on ANSYS[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2006(1):112.
- [7] 高志民. 抽水蓄能迎来快速发展机遇期[N]. 人民政协报, 2021-09-23(006).
- [8] 金骆松,刘卫东,纪德良. 电力市场背景下抽水蓄能电站交易机制设计[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(27):11632.
JIN Luosong, LIU Weidong, JI Deliang. Design of Trading Mechanism for Pumped Storage Power Stations Under the Background of Power Market [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(27):11632.
- [9] 陈同法,万正喜,闫磊,等. 抽水蓄能机组的五类调频功能在电力系统调频与紧急事故应对中的作用分析[J]. 水电与抽水蓄能,2015,1(5):42.
CHEN Tongfa, WAN Zhengxi, YAN Lei, et al. Research on Five Kinds of Pump-Storage Unit'S Frequency Modulation Functions for Frequence Modulation and Emergency Response in Power Grid [J]. Hydropower and Pumper Storage, 2015, 1(5):42.
- [10] 王幼平,董浩,王晓茅. 建设抽水蓄能电站促进电网安全优质经济运行[J]. 湖北电力,2002(4):77.
WANG Youping, DONG Hao, WANG Xiaomao. To Speed up the of Reservoir Power Plant Construction and Promote the Power Grid Safe, Stable and Economical Operation[J]. Hubei Electric Power, 2002(4):77.
- [11] CUI M J, ZHANG J, HODGE B M, et al. A Methodology for Quantifying Reliability Benefits from Improved Solar Power Forecasting in Multi-Timescale Power System Operations[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6):6897.
- [12] 王昊婧. 新形势下我国抽水蓄能电站运营效益评价方法研究[D]. 北京:华北电力大学(北京),2016.
- [13] 梁绍泉. 抽水蓄能电站运行控制与效益分析[D]. 济南:山东大学,2019.
- [14] 杨柳,李蓉蓉,金小明,等. 抽水蓄能电站静态效益的量化研究[J]. 南方电网技术,2013,7(6):126.
YANG Liu, LI Rongrong, JIN Xiaoming, et al. Quantitative Study on the Static Benefits of Pumped Storage Power Plant[J]. Southern Power System Technology, 2013, 7

- (6):126.
- [15] 罗晓东, 孙晋凯, 郭晓霞, 等. 考虑需求响应和储能的微电网市场竞价策略[J]. 电测与仪表, 2021, 58(6):130.
- LUO Xiaodong, SUN Jinkai, GUO Xiaoxia, et al. Bidding Strategy for Micro-grid Market Considering Demand Response Andenergy Storage[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(6):130.
- [16] 傅旭, 杨欣, 汪莹, 等. 光热电站容量效益评估及影响因素研究[J]. 电力工程技术, 2021, 40(3):186.
- FU Xu, YANG Xin, WANG Ying, et al. The Capacity Benefit Evaluation of Csp Power Station and its Influencing Factors [J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(3):186.
- [17] 左玉玺, 傅旭, 吴雄. 陕西电网抽水蓄能电站效益评估[J]. 智慧电力, 2019, 47(2):113.
- ZUO Yuxi, FU Xu, WU Xiong. Research on Benefit Evaluation of Pumped Storage Power Station in Shaanxi Power Grid[J]. Smart Power, 2019, 47(2):113.
- [18] 蔺梦雪, 顾圣平. 基于贝叶斯评价模型的抽水蓄能电站容量规划[J]. 水电能源科学, 2019, 37(1):156.
- LIN Mengxue, GU Shengping. Capacity Planning of Pumped Storage Power Station Based on Bayesian Evaluation Model [J]. Water Resources and Power, 2019, 37(1):156.
- [19] 肖白, 杨宇, 姜卓, 等. 风电-抽水蓄能联合系统中抽水蓄电站容量的优化规划[J]. 太阳能学报, 2020, 41(12):270.
- XIAO Bai, YANG Yu, JIANG Zhuo, et al. Optimal Planning Of Capacity Of Pumped Storage Power Station In Wind Power-Pumped Storage System [J]. Acta Energaie Solaris Sinca, 2020, 41(12):270.
- [20] 陈煌, 黄汉昌, 黎值源, 等. 抽水蓄能机组孤网运行稳定特性分析[J]. 电测与仪表, 2021, 58(11):113.
- CHEN Huang, HUANG Hanchang, LI Zhiyuan, et al. Analysis on the Stability Characteristics of Isolated Network of the Pumped Storage Unit[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(11):113.
- [21] 张占安, 蔡兴国. 采用熵理论确定抽水蓄能容量[J]. 电机与控制学报, 2014, 18(3):34.
- ZHANG Zhanan, CAI Xingguo. Determination of pumped storage capacity based on entropy[J]. Electric Machines and Control, 2014, 18(3):34.
- [22] 程孟增, 唐一金, 商文颖, 等. 风-光-火-抽蓄联合系统中抽水蓄能电站最佳容量配置[J]. 电力建设, 2021, 42(11):72.
- CHENG Mengzeng, TANG Yijin, SHANG Wenying, et al. Optimal Capacity Configuration of Pumped-Storage Power Station in Wind-PV-Fire-Pump Storage System[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(11):72.
- [23] 罗仕华, 胡维昊, 黄琦, 等. 市场机制下光伏/小水电/抽水蓄能电站系统容量优化配置[J]. 电工技术学报, 2020, 35(13):2792.
- LUO Shihua, HU Weihao, HUANG Qi, et al. Optimization of Photovoltaic/Small Hydropower/Pumped Storage Power Station System Sizing under the Market Mechanism [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(13):2792.
- [24] 于龙泽, 肖白, 孙立国. 风光出力场景生成的条件深度卷积生成对抗网络方法[J]. 东北电力大学学报, 2021, 41(06):90.
- YU Longze, XIAO Bai, SUN Ligu. Conditional Depth Convolution Generation of Confrontation Network Method for Scenery Output Scenario Generation [J]. Journal Of Northeast Electric Power University, 2021, 41(6):90.
- [25] 赖菲, 吴波, 吴涛, 等. 火电厂全过程竞价成本计算[J]. 热力发电, 2018, 47(11):147.
- LAI Fei, WU Bo, WU Tao, et al. Whole Process Bidding Cost Calculation for Thermal Power Plants [J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(11):147.
- [26] 陈涛, 任廷林, 宋晓华. 电力现货市场下火电企业实时成本研究[J]. 华北电力大学学报(社会科学版), 2020(5):51.
- CHEN Tao, REN Tinglin, SONG Xiaohua. Research on Real-time Cost of Thermal Power Enterprises in Electricity Spot Market [J]. Journal of North China Electric Power University (social sciences), 2020(5):51.

(编辑:温泽宇)