

考虑新能源不确定性影响的抽水蓄能容量效益分析

方绍凤,唐宇,周野,李静,李娟

(中国能源建设集团 湖南省电力设计院有限公司,长沙 410007)

摘要:为支撑高比例新能源电力系统安全高效运行,并保障电力系统柔性灵活调节,需同步发展大规模的抽水蓄能。为科学准确地量化分析有、无新能源影响下的抽水蓄能容量效益,首先,提出了一种抽水蓄能容量效益概念;其次,统筹分析了不同场景下新能源装机占比及出力特性对抽水蓄能容量效益结果。为了考虑新能源不确定性对容量效益的影响,进一步按照95%时刻满足电力供应需求确定考虑新能源电力支撑能力的火电开机需求、抽水蓄能容量效益;最后,结合某地区规划情况,对比分析不同时长储能时长对应的抽水蓄能容量效益。研究结果表明,该方法可科学地指导未来中长期抽水蓄能需求规模建设与优化运行策略。

关键词:抽水蓄能;容量效益;火电替代率;柔性灵活调节;新能源占比

Capacity benefit analysis of pumped storage considering the uncertainty of new energy sources

FANG Shaofeng, TANG Yu, ZHOU Ye, LI Jing, LI Juan

(Hunan Electric Power Design Institute Co., Ltd., China Energy Engineering Group, Changsha 410007, China)

Abstract: To support the safe and efficient operation, flexible and adaptive regulation capabilities of a high proportion of new energy power systems, it is necessary to simultaneously develop large-scale pumped storage energy. To scientifically and accurately quantify the benefits of pumped storage capacity with and without the influence of new energy, a concept of pumped storage capacity benefits is proposed; Secondly, a comprehensive analysis is conducted on the impact of the proportion of new energy in-stalled capacity and output characteristics on the efficiency of pumped storage capacity in different scenarios. In order to consider the impact of uncertainty in new energy on capacity efficiency. Further determine the thermal power start-up demand and pumped storage capacity benefits considering the new energy power support capacity based on meeting the power supply demand at 95% of the time; Finally, based on the planning situation of a certain region, compare and analyze the pumped storage capacity benefits corresponding different energy storage time. The research results indicate that this method can scientifically guide the construction and optimization of operation strategies for the scale of future pumped storage demand in the medium to long term.

Key words: pumped storage energy; capacity efficiency; thermal power substitution rate; flexible and adaptive regulation; proportion of new energy

0 引言

构建新能源占比逐渐提高的新型电力系统是实现“碳达峰、碳中和”战略目标的重要实施路径之一。随着新能源占比的提升,电力系统对灵活性调节电源的需求也就越大,抽水蓄能、压缩空气储能和电化学储能等是主要的灵活性电源,其中抽水蓄能是目前技术最成熟、最为经济的灵活性资源^[1-2]。

目前,针对抽水蓄能的研究主要分两大类,一类是考虑中长期或者短期的抽水蓄能规模优化配置,另一类是针对新能源、常规电源和抽水蓄能的协调

调度运行策略与方法研究。抽水蓄能电站有促进新能源消纳、参与系统调峰、调频的作用^[3-4],如何配置抽水蓄能的容量和功率也是研究者关注的重点。

对电源侧储能的容量规划,已有研究大多以储能规划提升系统经济性为主要目标。针对储能容量替代其他电源的问题,单独从电源之间替代关系研究来看:文献[5]提出了新能源配置储能替代火电的经济性分析流程;文献[6]提出了基于“等面积原理”的储能与新能源协同优化配置方法;文献[7]基于风资源特性定义了风电场的火电替代容量和负荷供应容量,构建了储能参数的优化配置方法;文献[8-9]研究了用于平抑风电波动的储能设备容量配置方法,和风储系统鲁棒本模型预测控制技术;文献[10]基于一阶巴特沃思滤波环节的平抑策略,提出了一种满足一定置信区间的储能装置功率

收稿日期:2024-07-15;修回日期:2024-09-18

基金项目:国网湖南省电力有限公司经济技术研究院管理咨询项目(SGHNJYOOGHWT2210030)

和容量的配置方法;文献[11]提出了储能利用量和储能损失量的概念,并给出了考虑风功率预测误差相关性的储能容量配置方法及储能容量优化模型;在电源之间替代关系的基础上,进一步考虑电网线路或断面的输送通道压力问题;文献[12]提出了一种配套储能和传输线路容量协调优化配置的机会约束规划模型,从而节约总投资成本;文献[13]基于时序生产模拟软件和概率统计分析方法,研究了考虑新能源发电不确定性和弃电率约束的局部断面储能容量配置问题。

目前行业内对于火电、储能和新能源电力支撑能力的量化评估研究还刚刚起步,本文提出了一种抽水蓄能容量效益概念;其次,统筹分析了不同场景下新能源装机占比及出力特性对抽水蓄能容量效益结果。为了考虑新能源不确定性对容量效益的影响,进一步按照95%时刻满足电力供应需求确定考虑新能源电力支撑能力的火电开机需求、抽水蓄能容量效益;最后,结合某地区规划情况,对比分析4、6 h储能时长对应的抽水蓄能容量效益。研究结果表明,该方法可科学地指导未来中长期抽水蓄能需求规模建设与优化运行策略。

1 抽水蓄能运行要求

为满足高峰负荷电力电量支撑,抽水蓄能不仅需要满足最大负荷时刻的电力需求还必须要有足够电能可充,即需要有一定规模可提供稳定电能的电源,如图1所示。火电装机存在最小值,若火电装机小于该值会出现缺电,即抽水蓄能替代火电的容量有上限值,如图2所示。

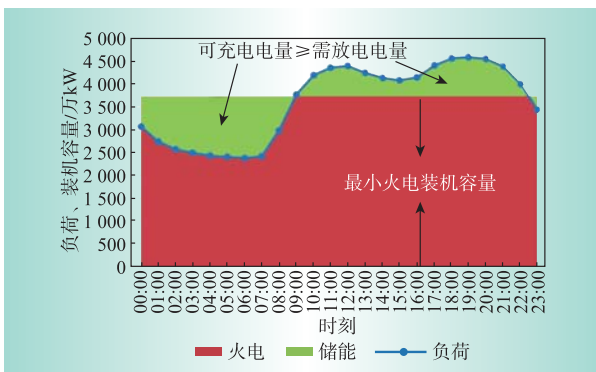


图1 抽水蓄能充电电量大于等于放电电量下典型日火电与抽水蓄能运行需求

Fig. 1 Typical daily demand for thermal power and pumped storage operation when charging capacity of pumped storage is greater than or equal to the discharge capacity

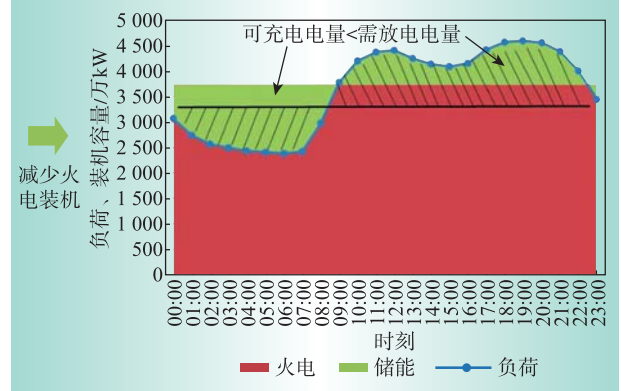


图2 抽水蓄能充电电量小于放电电量下典型日火电与抽水蓄能运行需求

Fig. 2 Typical daily demand for thermal power and pumped storage operation when charging capacity of pumped storage is less than the discharge capacity

根据典型日负荷下,火电、新能源出力特性,得到抽水蓄能的充放电运行情况,并建立火电、新能源与抽水蓄能之间的量化关系

$$\sum_{i=1, P_{h,i}-L_i \geq 0}^T (P_{h,i} - L_i) \geq \sum_{i=1, P_{h,i}-L_i \leq 0}^T (L_i - P_{h,i}) \quad (1)$$

$$\sum_{i=1, P_{h,i}-L_i \leq 0}^T (L_i - P_{h,i}) = P_c t \alpha \quad (2)$$

式中: P_c 为抽水蓄能装机容量; t 为抽水蓄能时长; α 为抽水蓄能充放效率; $P_{h,i}$ 为 i 时刻的水由装机容量; L_i 为 i 时刻的净负荷; T 为计算周期。

联合上式可求取火电与抽水蓄能之间的量化关系

$$P_{h,i} + \lambda P_c + P_{r,i} = \max(L_i) \quad (3)$$

式中: $\max(L_i)$ 为净负荷最大值; $P_{r,i}$ 为 i 时刻的新能源装机容量; λ 为抽水蓄能容量效益。

$$P_{h,i} \geq P_{h,\min} \quad (4)$$

式中: $P_{h,\min}$ 为火电装机最小容量。

2 抽水蓄能容量效益评估模型

2.1 火电+抽水蓄能顶峰电力需求

通过对典型方式大负荷时刻进行电力平衡计算,得出大负荷时刻下电力支撑能力需求,即火电+抽水蓄能电力顶峰总需求

$$P_{r,i} + P_{w,i} + P_{h,i} + P_{c,i} = L_{i,\max} \quad (5)$$

$$L_i = L_{i,\max} - P_{r,i} - P_{w,i} \quad (6)$$

$$P_{h,i} + P_{c,i} = L_i \quad (7)$$

式中: $P_{w,i}$ 为 i 时刻的水电装机容量; $P_{c,i}$ 为 i 时刻的抽水蓄能装机容量; $L_{i,\max}$ 为 i 时刻的负荷最大需求。

对典型日进行24 h电力电量平衡计算,得到火电顶峰需求装机规模,进一步得到低谷负荷时刻火电的最小出力

$$P_{h,i\max} = L_{i\max} - P_{e,i} - P_{w,i} - P_{r,i} \quad (8)$$

$$P_{h,i\min} = \eta P_{h,i\max} \quad (9)$$

式中: $P_{h,i\max}$ 为顶峰需求的火电装机规模; $P_{h,i\min}$ 为最小负荷时刻对应的火电最小出力; η 为火电最小出力系数。

2.2 抽水蓄能容量效益评估模型

抽水蓄能投入运行后,可以降低支撑性电源(本文指火电)装机规模为抽水蓄能的容量效益,即火电替代容量 P

$$P = P_2 - P_1 \quad (10)$$

式中: P 为火电替代容量; P_2 为抽水蓄能投入运行前支撑性电源装机规模; P_1 为抽水蓄能投入运行后支撑性电源装机规模。

抽水蓄能容量效益 λ 是指降低支撑电源规模与抽水蓄能规模的比值,即

$$\lambda = \frac{P_2 - P_1}{P_e} \quad (11)$$

式中: P_e 为储能规模。

2.3 抽水蓄能容量效益评估流程

考虑新能源不确定性影响的抽水蓄能容量效益量化评估方法求解步骤如下所示。

步骤1:建立抽水蓄能容量效益评估模型;

步骤2:在不考虑新能源影响下,即 $P_{r,i}$ 为0时,根据已知火电、水电装机容量、抽水蓄能装机容量和负荷最大需求,利用式(5)一式(9)计算得到典型方式下火电开机需求,再根据式(10)一式(11)得到所对应的抽水蓄能容量效益;

步骤3:根据历史新能源数据随机生成多组新能源数据,再考虑 $P_{r,i}$ 不为0时,根据已知火电、水电装机容量、抽水蓄能装机容量和负荷最大需求,利用式(5)一式(9)计算得到典型方式下火电开机需求,再根据式(10)一式(11)得到所对应的抽水蓄能容量效益;

步骤4:考虑95%时刻^[14]满足电力供应需求确定考虑新能源电力支撑能力的火电开机需求、抽水蓄能容量效益。

3 算例分析

为验证本文所提出的考虑新能源影响的抽水蓄能容量效益计算方法的效果,下文以某地区电网为例,具体的数据如下进行分析

3.1 不同新能源出力对抽水蓄能容量效益影响分析

2030年某省级电网扣除外电、水电、生物质出力后,冬季典型日净负荷曲线如图3所示。最大值为46 000 MW,最小值为24 800 MW。

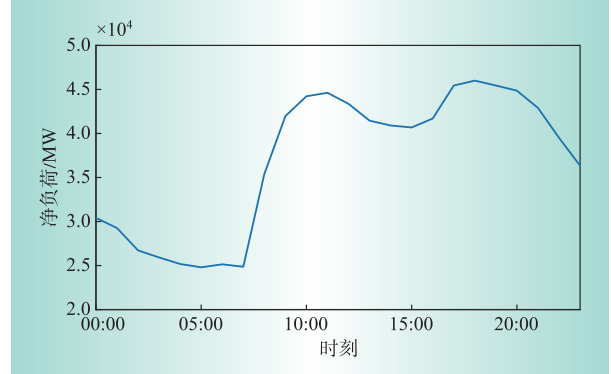


图3 冬季典型日净负荷曲线

Fig. 3 Typical daily net load curve for winter university

考虑配置10 000 MW/60 000 MWh抽水蓄能(6 h储能时长),根据前述所提储能容量效益计算模型,在不考虑新能源的情况下所需的最小火电开机为39 900 MW,此时储能可替代火电装机容量为6 100 MW,容量效率为61.0%。

考虑风电、光伏装机容量分别为22 000 MW、30 000 MW,根据历史数据,生成随机生成100组风、光曲线,如图4、图5所示。

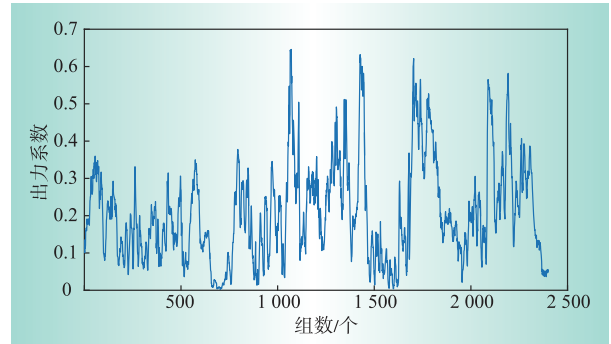


图4 风电出力系数

Fig. 4 Wind power output coefficient

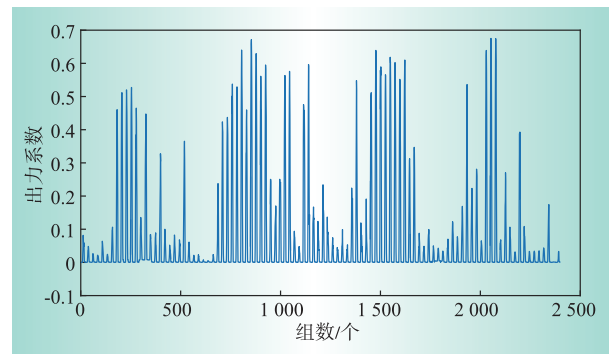


图5 光伏出力系数

Fig. 5 Photovoltaic output coefficient

考虑95%时刻满足电力供应需求,确定火电最小开机容量为36 640 MW,对应的储能可替代火电装机容量为9 360 MW,容量效益为93.6%。

不同新能源出力对抽水蓄能容量效益的影响如表1所示。

表1 不同新能源出力对抽水蓄能容量效益的影响
Table 1 Impacts of different new energy outputs on the efficiency of pumped storage capacity

新能源出力	储能可替代火电装机容量/MW	储能容量效益/%
0	6 100	61.0
95%时刻满足电力供应需求	9 360	93.6

由表1可知,考虑一定的新能源电量,可进一步提升储能的火电代替能力。

3.2 不同储能时长对抽水蓄能容量效益的影响分析

基于上述计算结果,进一步分析4 h储能时长对应的储能容量替代火电效率。根据计算结果可知:4 h储能时长对应的火电最小开机容量为38 400 MW,对应储能可替代火电装机容量为7 600 MW,容量效益分别为76.0%。

不同储能时长对抽水蓄能容量效益的影响如表2所示。

表2 不同储能时长对抽水蓄能容量效益的影响
Table 2 Effects of different energy storage durations on the efficiency of pumped storage capacity

储能时长/h	储能可替代火电装机容量/MW	储能容量效率/%
4	7 600	76.0
6	9 360	93.6

由表2可知,对比4 h和6 h计算结果可知:随着储能时长的增加,对应火电、抽水蓄能容量以及储能容量替代火电效率逐渐增加。

4 结束语

本文研究计及新能源不确定性的抽水蓄能容量效益量化评估方法,统筹分析了不同场景下新能源装机占比及出力特性对抽水蓄能容量效益结果。为了考虑新能源不确定性对容量效益的影响,进一步按照95%时刻满足电力供应需求确定考虑新能源电力支撑能力的火电开机需求、抽水蓄能容量效益;对比分析4、6 h储能时长对应的抽水蓄能容量效益,得出以下结论:

(1) 为满足全天中对高峰时刻的最大负荷需

求以及全天的电量平衡,储能必须要有足够电能可充。即储能在一日内充电电量应满足放电电量需求,且最大放电功率应满足最大负荷对所有电源的需求。

(2) 全天时段,随着储能装机规模的增加,对应会减少火电的装机规模,但此时储能替代容量效益会下降,并存在一个极值,即储能最大装机规模。

(3) 考虑一定的新能源电量,可大幅提升储能的火电代替能力。

(4) 考虑95%时刻满足电力供应需求,在储能时长4、6 h下对应火电最小开机容量分别为38 400 MW、36 640 MW,对应的储能可替代火电装机容量分别为7 600 MW、9 360 MW,容量效益分别为76.0%、93.6%。因此,随着储能时长的增加,对应的储能容量替代火电效益逐渐提高。

(5) 未来针对新能源参与储能容量代替效益中需进一步考虑全社会经济性的影响,得到技术经济最优下的抽水蓄能容量效益。

参考文献:

- [1] 崔杨,安宁,付小标,等.面向高比例新能源电力系统调峰需求的储能容量配置方法综述[J].东北电力大学学报,2023,43(1):1-8.
CUI Yang, AN Ning, FU Xiaobiao, et al. Summary of energy storage capacity configuration methods for high proportion new energy power system peak shaving demand [J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2023, 43(1):1-8.
- [2] 李相俊,赵珊珊,惠东.面向新型电力系统的大型储能电站关键技术的发展趋势分析与展望[J].供用电,2022,39(7):2-8,24.
LI Xiangjun, ZHAO Shanshan, HUI Dong. Development trend analysis and prospect of key technologies of large energy storage station in new type power system [J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(7):2-8, 24.
- [3] 王伟,贺彬,张爱芳,等.电池储能协同火电机组参与系统调频控制策略研究[J].中国测试,2022,48(2):1-7.
WANG Wei, HE Bin, ZHANG Aifang, et al. Research on frequency modulation control strategy for collaborative thermal power units participating in system with battery energy storage [J]. China Measurement & Test, 2022, 48(2):1-7.
- [4] 李笑蓉,陈熙,石少伟,等.高风电渗透率下储能配置与系统调节能力提升关联分析[J].电力需求侧管理,2023,25(2):8-14.

- LI Xiaorong, CHEN Xi, SHI Shaowei, et al. Analysis of the correlation between energy storage configuration and system regulation capacity improvement under high wind power penetration rate [J]. Power Demand Side Management, 2023, 25(2):8-14.
- [5] 任大伟, 金晨, 侯金鸣, 等. 基于时序运行模拟的新能源配置储能替代火电规划模型[J]. 中国电力, 2021, 54(7):18-26.
- REN Dawei, JIN Chen, HOU Jinming, et al. Planning model for new energy configuration energy storage alternative thermal power based on time series operation simulation[J]. China Electric Power, 2021, 54(7):18-26.
- [6] 张振宇, 张小奇, 段乃欣, 等. 基于“等面积原理”的储能与新能源协同优化配置方法[J/OL]. 电网技术, 2023, 47(10):4 131-4 142.
- ZHANG Zhenyu, ZHANG Xiaoqi, DUAN Naixin, et al. Collaborative optimization configuration method for energy storage and new energy based on the “equal area principle”[J/OL]. Power Grid Technology, 2023, 47(10):4 131-4 142.
- [7] 陆秋瑜, 马千里, 魏韡, 等. 基于置信容量的风场配套储能容量优化配置[J]. 电工技术学报, 2022, 37(23): 5 901-5 910.
- LU Qiuyu, MA Qianli, WEI Wei, et al. Optimal configuration of wind farm supporting energy storage capacity based on confidence capacity [J]. Journal of Electrical Engineering, 2022, 37(23):5 901-5 910.
- [8] 孙玉树, 唐西胜, 孙晓哲, 等. 风电波动平抑的储能容量配置方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1):88-97.
- SUN Yushu, TANG Xisheng, SUN Xiaozhe, et al. Research on energy storage capacity allocation method for wind power fluctuation suppression [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2017, 37(1):88-97.
- [9] 陈金玉, 陈大玮, 张抒凌, 等. 面向风电功率波动平抑的储能系统鲁棒模型预测控制[J]. 供用电, 2023, 40(8):28-33.
- CHEN Jinyu, CHEN Dawei, ZHANG Shuling, et al. Robust model predictive control of energy storage system for wind power fluctuation smoothing [J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(8):28-33.
- [10] 李学斌, 赵号. 基于维纳随机过程的风电场储能配置方法[J]. 电网技术, 2022, 46(9):3 437-3 446.
- LI Xuebin, ZHAO Hao. Wind farm energy storage allocation method based on wiener stochastic process [J]. Grid Technology, 2022, 46(9):3 437-3 446.
- [11] 杨宏, 张天航, 王新, 等. 考虑风功率预测误差相关性的储能容量配置方法研究[J]. 电力科学与工程, 2023, 39(3):52-60.
- YANG Hong, ZHANG Tianhang, WANG Xin, et al. Research on energy storage capacity allocation method considering the correlation of wind power prediction errors [J]. Electric Power Science and Engineering, 2023, 39(3):52-60.
- [12] 谢毓广, 李金中, 王川, 等. 考虑消纳水平的新能源配套储能和输电通道容量协调优化配置[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(7):51-57, 72.
- XIE Yuguang, LI Jinzhong, WANG Chuan, et al. Coordinated and optimized configuration of new energy supporting energy storage and transmission channel capacity considering consumption level [J/OL]. Power Automation Equipmen, 2023, 43(7):51-57, 72.
- [13] 代倩, 吴俊玲, 秦晓辉, 等. 提升局部区域新能源外送能力的储能容量优化配置方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(3):67-74.
- DAI Qian, WU Junling, QIN Xiaohui, et al. Optimization and configuration method for energy storage capacity to enhance the export capacity of new energy in local regions [J]. Power System Automation, 2022, 46(3):67-74.
- [14] 中华人民共和国国家标准. 电力系统安全稳定导则: GB 38755-2019[S]. 2020.
- National Standards of the People's Republic of China. Code on security and stability for power system: GB 38755-2019[S]. 2020.

作者简介:

方绍凤(1992年),女,河南新乡人,硕士,工程师,研究方向为电力系统规划、调度和运行。

(责任编辑 孙 晶 汤丽莉)

广告索引

国网(江苏)电力需求侧管理指导中心有限公司……………(封底)