

风-光-混蓄长周期互补发电优化调度研究

张验科, 罗笙月, 卢垚键, 王远坤

(华北电力大学水利与水电工程学院, 北京 102206)

摘要:为探究在大规模风电、光伏(简称风光)并网背景下混合式抽水蓄能电站对风光的长周期互补调节能力,以风-光-混蓄联合运行所消纳的风光发电量最大为目的,构建了一种以风-光-混蓄系统剩余负荷方差最小为目标的风-光-混蓄长周期互补发电优化调度模型,并采用逐步优化算法进行求解。算例计算结果表明,与未加装可逆式机组前的风-光-水系统相比,风-光-混蓄系统的风光消纳率期望值提高了8.56%,剩余负荷方差的期望值减小了99.38%,混合式抽水蓄能电站能更好地发挥其风光调节能力,能在满足追踪电网负荷需求的同时提高风光发电的消纳率和风-光-混蓄系统的发电量。

关键词:风-光-混蓄系统;长周期互补;发电优化调度;风光消纳率;剩余负荷方差

中图分类号:TV743

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2025)04-0060-07

Research on optimal operation for long-term complementary power generation of wind-photovoltaic-hybrid storage system//ZHANG Yanke, LUO Shengyue, LU Yaojian, WANG Yuankun (School of Water Resources and Hydropower Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: To investigate the long-term complementary regulation capability of hybrid pumped-storage power stations under the background of grid integration of large-scale wind and photovoltaic power, an optimal operation model for long-term complementary power generation of wind-photovoltaic-hybrid storage systems was developed. This model aims to maximize the utilization of wind and photovoltaic power generation in the joint operation of wind-photovoltaic-hybrid storage systems by minimizing the variance of residual load, and it was solved using a progressive optimization algorithm. The results of a case study show that compared with the wind-photovoltaic-hydro system without reversible pump-turbine units, the expected value of the utilization rate of wind and photovoltaic power in the wind-photovoltaic-hybrid storage system increases by 8.56%, and the expected value of the variance of residual load decreases by 99.38%. These results indicate that the hybrid pumped-storage power station can better play its role in regulating wind and photovoltaic power, and can improve the utilization rate of wind and photovoltaic power generation and the power generation capacity of the wind-photovoltaic-hybrid storage system while meeting the demand for tracking grid load.

Key words: wind-photovoltaic-hybrid storage system; long-term complementary; optimal power generation operation; utilization rate of wind and photovoltaic; variance of residual load

为落实“双碳”目标,风电、光伏(以下简称风光)和水电等可再生能源的高效利用已成为能源发展的主要方向^[1-3]。然而,风光能源的强烈波动性特征也给清洁能源消纳和电力系统安全稳定运行带来了严峻的挑战^[4-6]。随着风光能源并网规模逐渐增大,对风光调节能力的需求日益增长^[7-8],因此,发展高效储能技术以提升电网调节能力是增强新能源并网灵活性,提高可再生能源电能质量和扩大可再生能源规模的重要途径^[9-10]。

混合式抽水蓄能电站(以下简称混蓄电站)作

为目前最具经济性的大规模储能电站之一,既具备常规水电站的天然径流与调节能力,还具有纯抽水蓄能电站的特征,能进一步增强系统的调节能力和提高清洁能源的消纳量^[11-16]。冯晨等^[17]考虑光伏出力的波动性,构建了以发电量最大和出力波动最小为目标的水电、光伏、抽水蓄能互补运行短期调度模型;袁川等^[18]以水电、光伏、抽水蓄能、风电的总出力曲线与电网负荷过程曲线的相似度最高、梯级水电蓄能增量最大为目标,验证了混蓄电站可有效提高系统总出力曲线与电网负荷曲线匹配度的结

基金项目:国家自然科学基金项目(52279064, U2243224);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2024JC003)

作者简介:张验科(1983—),男,副教授,博士,主要从事水资源与能源科学研究。E-mail: ykzhang2008@163.com

通信作者:王远坤(1981—),男,教授,博士,主要从事水资源与能源科学研究。E-mail: yuankunw@ncepu.edu.cn

论;Fu 等^[19]通过对春夏秋冬四季典型日的水电、风光及负荷预测值进行调度分析,得出抽水蓄能的加入不仅减少了弃风弃光,而且提高了电网安全性;Li 等^[20]对风电、抽水蓄能联合系统进行优化,结果表明抽水蓄能的加入能提高风电运行的经济效益以及抑制风电的波动;彭煜民等^[21]探究了不同抽水蓄能形式对水电、风电、光伏、抽水蓄能互补系统的影响。综上,已有文献多集中于常规天气下混蓄电站对风光的调节作用^[22-23],然而,在极端天气出现时,风光出力的不确定性大幅增加,其出力特性可能发生较大变化。鉴于此,本文旨在研究调度期内连续较长时间高功率运行(连续大发)和连续较长时间低功率运行(连续小发)时的风-光-混蓄系统运行情况,构建风-光-混蓄长周期互补发电优化调度模型,期为风光资源的长周期消纳和制定电力系统保供策略提供参考。

1 风-光-混蓄长周期互补发电优化调度模型

1.1 目标函数

风-光-混蓄互补发电时为尽可能提高风光消纳量同时保障风-光-混蓄并网运行的安全性、可靠性,风-光-混蓄的出力过程应与电网负荷需求曲线的波动趋势保持一致。因此,模型以剩余负荷方差最小为目标(式(1)),以增强系统的灵活性与适应性。

$$f_1 = \min \sum_{t=1}^T \left(N_t - P_t - \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (N_t - P_t) \right)^2 \quad (1)$$

式中: f_1 为剩余负荷方差; N_t 为第 t 时段风-光-混蓄总出力; P_t 为第 t 时段电网负荷需求; T 为时段总数。

风-光-混蓄总出力的计算公式如下:

$$N_t = N_{pv,t} + N_{w,t} + N_{h,t} - N_{p,t} \quad (2)$$

式中: $N_{pv,t}$ 为第 t 时段光伏出力; $N_{w,t}$ 为第 t 时段风电出力; $N_{h,t}$ 为第 t 时段混蓄电站发电出力; $N_{p,t}$ 为第 t 时段混蓄电站抽水功率。

1.2 约束条件

a. 水量平衡约束:

$$V_{1,t+1} = V_{1,t} + (Q_{1,t} - q_{1,t})\Delta t + Q_{c,t}t_c \quad (3)$$

$$V_{2,t+1} = V_{2,t} + (Q_{2,t} - q_{2,t})\Delta t - Q_{c,t}t_c \quad (4)$$

式中: $V_{1,t}$ 、 $V_{1,t+1}$ 分别为上库在第 t 时段和第 $t+1$ 时段的蓄水量; $Q_{1,t}$ 、 $q_{1,t}$ 分别为上库在第 t 时段的平均入库流量、平均下泄流量; $V_{2,t}$ 、 $V_{2,t+1}$ 分别为下库在第 t 时段和第 $t+1$ 时段的蓄水量; $Q_{2,t}$ 、 $q_{2,t}$ 分别为下库在第 t 时段的平均入库流量、平均下泄流量; t_c 为抽水时间; Δt 为时段长度; $Q_{c,t}$ 为混蓄电站抽水流量。

b. 水库蓄水约束:

$$V_{1,t,\min} \leq V_{1,t} \leq V_{1,t,\max} \quad (5)$$

$$V_{2,t,\min} \leq V_{2,t} \leq V_{2,t,\max} \quad (6)$$

式中: $V_{1,t,\min}$ 、 $V_{2,t,\max}$ 分别为上库在第 t 时段的蓄水量下限和蓄水量上限; $V_{2,t,\min}$ 、 $V_{2,t,\max}$ 分别为下库在第 t 时段的蓄水量下限和蓄水量上限。

c. 下泄流量约束:

$$Q_{1,t,\min} \leq Q_{1,t} \leq Q_{1,t,\max} \quad (7)$$

$$Q_{2,t,\min} \leq Q_{2,t} \leq Q_{2,t,\max} \quad (8)$$

式中: $Q_{1,t,\min}$ 、 $Q_{1,t,\max}$ 分别为上库在第 t 时段的下泄流量下限和上限; $Q_{2,t,\min}$ 、 $Q_{2,t,\max}$ 分别为下库在第 t 时段的下泄流量下限和上限。

d. 出力约束:

$$N_{1,t,\min} \leq N_{1,t} \leq N_{1,t,\max} \quad (9)$$

$$N_{2,t,\min} \leq N_{2,t} \leq N_{2,t,\max} \quad (10)$$

式中: $N_{1,t}$ 、 $N_{2,t}$ 分别为上库和下库在第 t 时段的出力; $N_{1,t,\min}$ 、 $N_{1,t,\max}$ 分别为上库在第 t 时段的出力下限和上限; $N_{2,t,\min}$ 、 $N_{2,t,\max}$ 分别为下库在第 t 时段的出力下限和上限。

e. 抽水蓄能机组功率约束:

$$N_{p,t,\min} \leq N_{p,t} \leq N_{p,t,\max} \quad (11)$$

式中: $N_{p,t,\min}$ 、 $N_{p,t,\max}$ 分别为抽水蓄能机组抽水功率的下限和上限。

f. 抽水蓄能机组流量约束:

$$Q_{p,\min} \leq Q_p \leq Q_{p,\max} \quad (12)$$

式中: Q_p 为抽水蓄能机组抽水流量; $Q_{p,\min}$ 、 $Q_{p,\max}$ 分别为抽水蓄能机组抽水流量的下限和上限。

g. 抽水工况和发电工况互斥约束:

$$N_{p,t}N_{h,t} = 0 \quad (13)$$

该约束条件表示抽水蓄能机组在第 t 时段不能同时出现抽水、发电两种状态。

2 模型求解

在电网负荷的约束下,混蓄电站与风光互补发电时,若电网负荷需求小于风光出力,优先安排风力发电与光伏发电上网,此时混蓄电站存储多余的电能;反之,当电网负荷需求超过风光出力之和时,混蓄电站则释放存储的电能,以满足电网负荷需求。因此,依据负荷需求确定上库的运行方式,同时将下库水位作为状态变量,运用逐步优化算法(progressive optimality algorithm, POA)对模型加以求解。模型求解步骤如下:

步骤 1 将调度期分为 T 个时段,根据电网负荷及风光出力计算各时段内上库需承担的出力,通过经济运行计算,得到上库出库流量、时段末水位。

步骤 2 确定下库在 j 时刻的初始水位序列,并将其作为初始条件;从第 1 个时刻开始进行逐步优

化计算,固定第 1、3 个时刻的水位 Z_1 、 Z_3 ,离散第 2 个时刻的水位 Z_2 ,忽略水流滞时,将上库出库流量直接作为下库入库流量,通过式(3)计算两个时段的下泄流量,进而得到两个时段的出力,并通过调整 Z_2 得到两阶段的最优出力。

步骤 3 以步骤 2 计算得出的 Z_2 作为新的初始水位,固定 Z_2 、 Z_4 ,调整 Z_3 ,重复步骤 2。每次计算会形成新的两阶段中间时刻对应的水位,将时段向后推移,直至完成 $T-1$ 、 T 时段的计算后,即完成一轮迭代,得到新的水库调度水位线序列 $\{Z_1, Z_2, \dots, Z_T, Z_{T+1}\}$ 。

步骤 4 更新水库初始解,返回步骤 3,直到两次迭代求得的出力变化达到精度要求,此时优化计算结束。

3 算例分析

3.1 研究对象

本文选取位于湖北省竹山县境内的汉江支流堵河下游的潘口水电站、小漩水电站,以及周边风光资源组成的风-光-混蓄系统(以下简称潘口-小漩混蓄电站)进行算例分析,两个水电站水库的基本特征如表 1 所示。

表 1 水电站水库基本特征

水库	总库容/ 万 m ³	正常蓄 水位/m	死水位/m	装机容 量/MW	调节能力
潘口	197 000	355	330.0	800	年调节
小漩	2 822	264	261.3	48	日调节

根据湖北省发展和改革委员会发布的数据,截至 2023 年末,湖北省清洁能源中水电、风光装机容量之比约为 0.56 : 0.33 : 0.11。以潘口-小漩混蓄电站的总装机容量 848 MW 为基准,根据该比例,设置风电站和光伏电站总装机容量分别为 166.57 MW 和 499.71 MW。同时,按照一定比例将电网负荷过程缩放至与潘口-小漩混蓄电站出力相匹配的量级。以 7 d 为调度期,设置 7 d 内风光出力出现连续大发和连续小发两种情形,风速、辐射和气温等资料来自 www.ecmwf.int 网站,两种情形下调度期内风光出力情况及电网负荷需求过程如图 1 所示。

3.2 结果分析

3.2.1 风光连续大发情形

风-光-混蓄系统与风-光-水系统出力过程及混蓄电站抽水情况如图 2 所示。由图 2 可知,在白天风光出力持续较大的情况下,水电站会产生较多弃风弃光,相比之下,混蓄电站的风光调节能力更强,尽管受混蓄电站的上下库库水位限制,仍会产生弃电,但弃电更少。

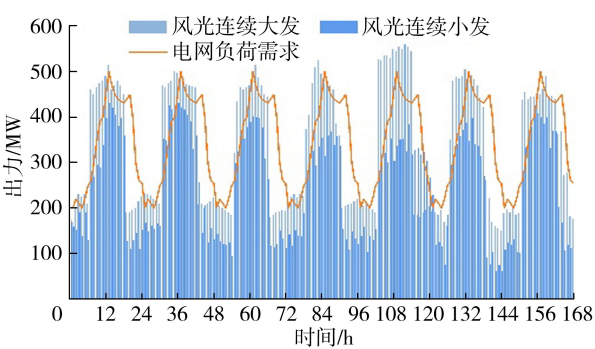
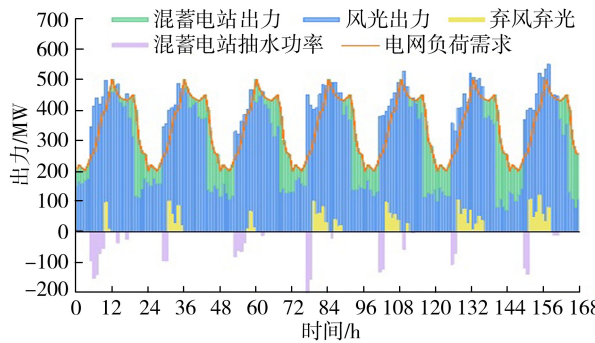
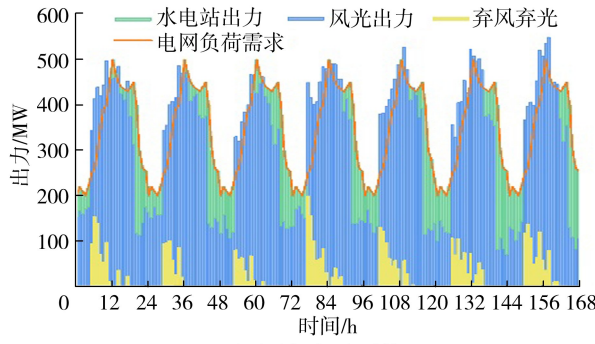


图 1 风光连续大发和连续小发时风光出力与电网负荷需求过程



(a) 风-光-混蓄系统



(b) 风-光-水系统

图 2 风光连续大发时风-光-混蓄系统与风-光-水系统出力过程

调度期内混蓄电站与水电站的上下库水位过程如图 3 所示。混蓄电站与水电站均能对风光出力进行调节,并将多余电能以水能的形式储存于水库之中,减少弃风弃光电量。由于风光出力在调度期内大于电网负荷需求的时段较多,混蓄电站与水电站上库水位均呈阶段上升趋势,但混蓄电站上升更多,可见,混蓄电站通过利用上下库的蓄水变化对风光的调节能力更强。

3.2.2 风光连续小发情形

风-光-混蓄系统与风-光-水系统出力过程及混蓄电站抽水情况如图 4 所示。可以看出,风-光-水总出力曲线无法与电网负荷需求曲线吻合,而混蓄电站通过在风光出力高于电网负荷需求的时段进行抽水,在风光出力低于电网负荷需求时加大出力,可使风-光-混蓄出力曲线与电网负荷需求曲线完全吻合。

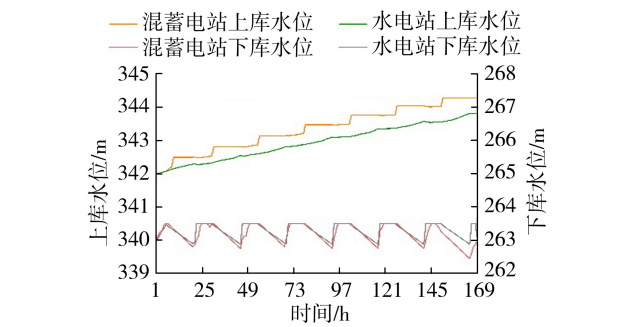


图3 风光连续大发时混蓄电站和水电站的上下库水位过程

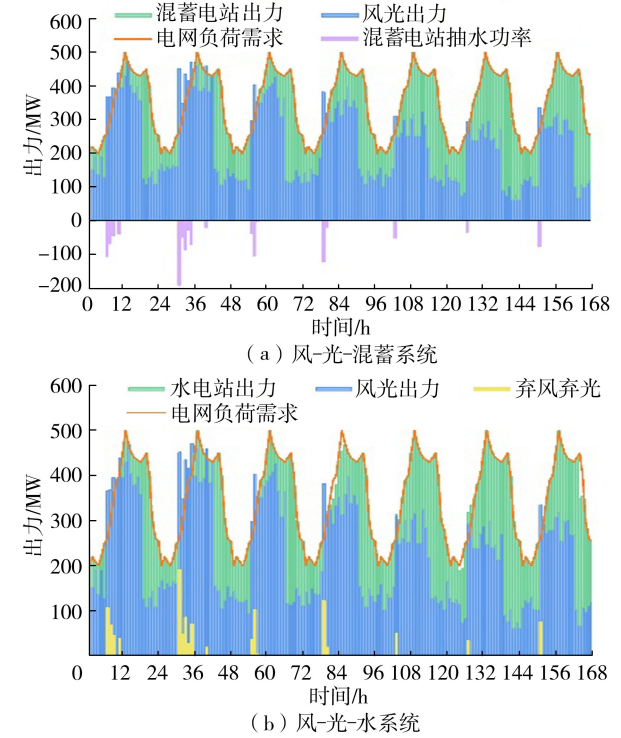


图4 风光连续小发时风-光-混蓄系统与风-光-水系统出力过程

调度期内混蓄电站与水电站的上下库水位如图5所示。混蓄电站与水电站的上库水位均先上升后下降,且变化基本一致,但混蓄电站水库蓄水更多,上库水位整体较高,表明混蓄电站可以通过抽水的方式消纳多余的风光出力。

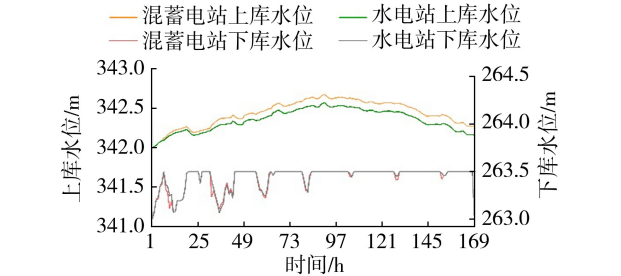


图5 风光连续小发时混蓄电站和水电站上下库水位过程

3.2.3 风光消纳率与剩余负荷方差对比

两种典型风光出力情形下风光消纳率与剩余负荷方差对比如表2所示。由表2可知,风-光-混蓄

系统风光消纳率相比风-光-水系统最大提升幅度达14.00%,且两种情形下混蓄电站对风光的消纳能力都比水电站更强,风光出力较大时,混蓄电站的优势更明显。同时,风-光-混蓄系统剩余负荷方差相比风-光-水系统减少了100.00%,可见风-光-混蓄系统的调节风光入网能力和负荷跟踪能力均优于风-光-水系统。

表2 两种典型风光出力情形下风光消纳率与剩余负荷方差对比

风光出力情形	风光消纳率/%		剩余负荷方差/MW ²	
	风-光-水系统	风-光-混蓄系统	风-光-水系统	风-光-混蓄系统
连续大发	86.00	100.00	6491.99	0.00
连续小发	95.40	100.00	94625.00	0.00

3.2.4 考虑风光出力、入库流量不确定性下的模型计算分析

3.2.4.1 考虑风光出力不确定性

为验证本文所建模型的有效性,进一步考虑风光出力不确定性的影响,采用拉丁超立方抽样与K-means方法,分别生成风光连续大发情形下的5种典型出力场景和风光连续小发情形下的5种典型出力场景,如图6所示。

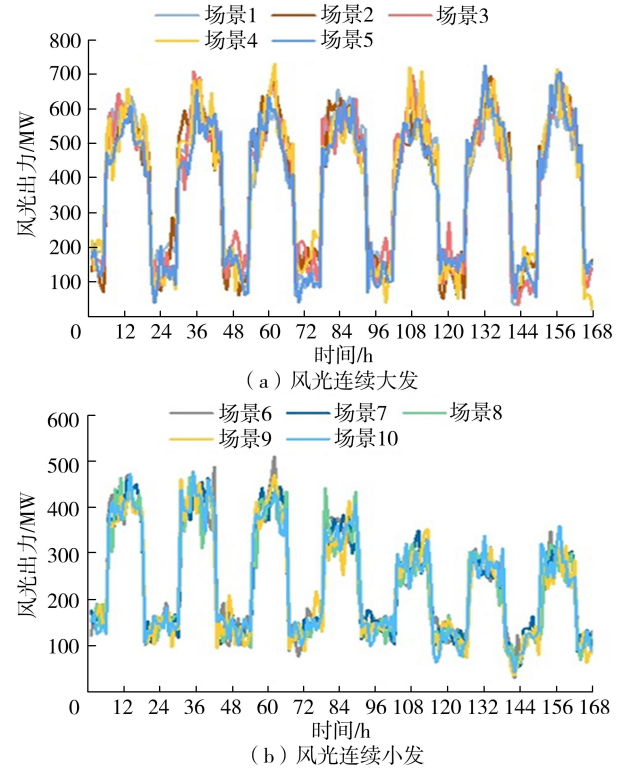


图6 风光连续大发和连续小发时不同风光典型出力场景

通过输入不同风光出力典型场景,计算出不同风光典型出力场景下系统的风光消纳率与剩余负荷方差,如表3所示。由表3可知,风-光-混蓄系统和风-光-水系统的风光消纳率期望值分别为99.21%和90.65%,提高了8.56%;风-光-混蓄系统和风-光-

水系统的剩余负荷方差期望值分别为 314.42 MW² 和 51 244.66 MW², 减少了 50 930.24 MW², 降低了 99.38%。可以看出在两种风光出力情形下风-光-混蓄系统的调节风光入网能力和负荷跟踪能力均优于风-光-水系统。

表 3 多个风光典型出力场景下系统风光消纳率与剩余负荷方差对比

风光出力场景		风光消纳率/%		剩余负荷方差/MW ²	
		风-光-混蓄系统	风-光-水系统	风-光-混蓄系统	风-光-水系统
连续大发	场景 1	100.00	85.90	0.00	6 497.75
	场景 2	100.00	86.03	0.00	6 487.46
	场景 3	100.00	85.40	0.00	6 490.07
	场景 4	96.75	86.26	1 573.50	6 493.16
	场景 5	95.33	86.21	1 570.67	6 490.14
连续小发	场景 6	100.00	95.03	0.00	94 870.83
	场景 7	100.00	95.70	0.00	93 285.00
	场景 8	100.00	94.73	0.00	104 070.83
	场景 9	100.00	95.55	0.00	94 135.74
	场景 10	100.00	95.68	0.00	93 625.65
	期望值	99.21	90.65	314.42	51 244.66

3.2.4.2 考虑入库流量不确定性

混蓄电站与水电站的出力变化均与入库流量有关,因此,基于电站历史入库流量数据,分别选取丰水期、平水期、枯水期的代表性入库流量过程进行分析,如图 7 所示。

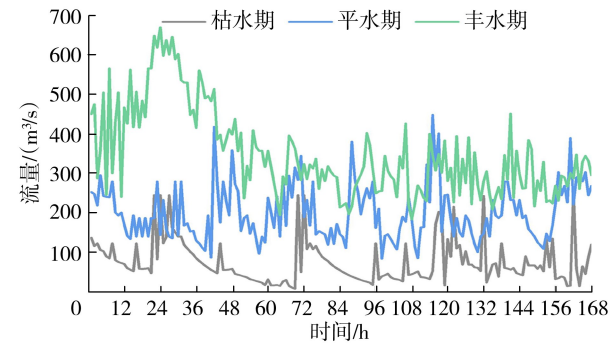


图 7 不同入库流量过程

风-光-混蓄系统与风-光-水系统在不同风光出力与不同入库流量下的出力过程分别如图 8、图 9 所示。由图 8 可知,在风光连续大发情形下,风-光-混蓄系统与风-光-水系统在枯水期均只有 1 个时段未能满足电网负荷需求。由图 9 可知,在风光连续小发情形下,枯水期时风-光-混蓄系统在调度期内约有 62%的时段系统出力能够达到电网负荷需求,且未产生弃电,相比之下,风-光-水系统在调度期内约有 56%的时段系统出力能够满足电网负荷,且其中有 17 个时段产生弃电。在平水期,风-光-混蓄系统能够在调度期内能够满足电网负荷需求,而风-光-水系统仍有 4 个时段无法满足电网负荷需求,且有 21 个时段产生弃电。

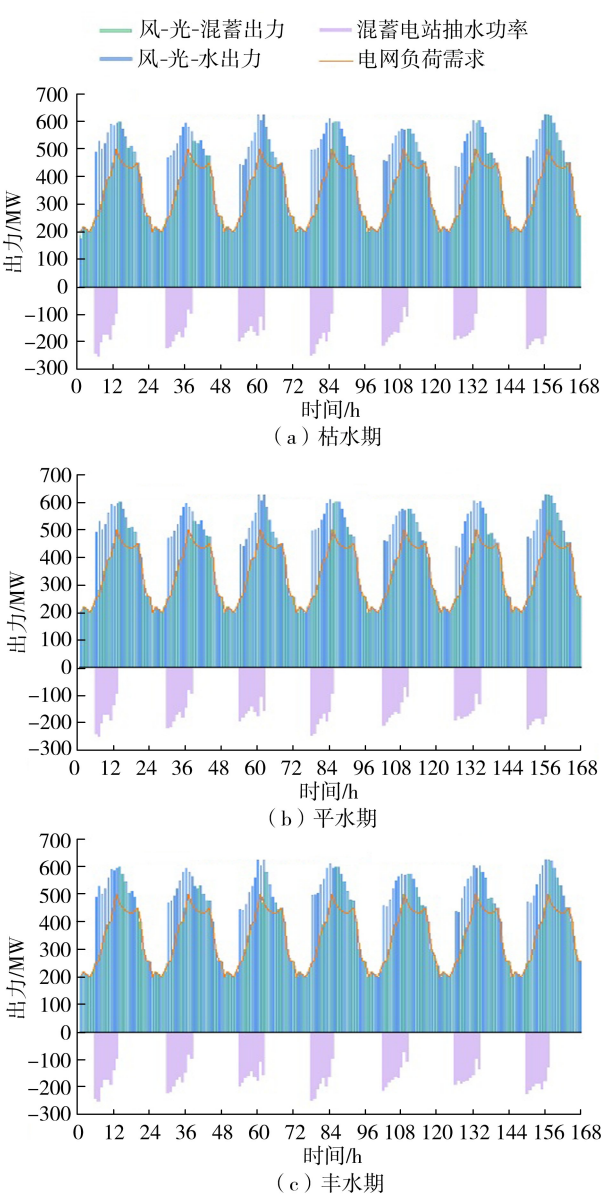


图 8 风光连续大发时风-光-混蓄系统与风-光-水系统在不同流量下的出力过程

综上所述,入库流量对系统出力存在影响,风-光-混蓄系统与风-光-水系统的出力均随着入库流量的增大而增大。在不同入库流量下,风-光-混蓄系统的负荷跟踪能力始终优于风-光-水系统。

4 结 论

a. 以潘口-小漩混蓄电站为算例,构建了风-光-混蓄长周期互补发电优化调度模型,计算结果表明:在风光出力出现连续大发和连续小发的情形下,相比风-光-水系统,风-光-混蓄系统的风光消纳率分别提高了 14.00% 和 4.60%,剩余负荷方差均提高了 100.00%,验证了模型在风光出力确定性条件下的有效性。

b. 为进一步验证模型有效性,利用拉丁超立方抽样与 K-means 方法分别生成多组风光出力典型场

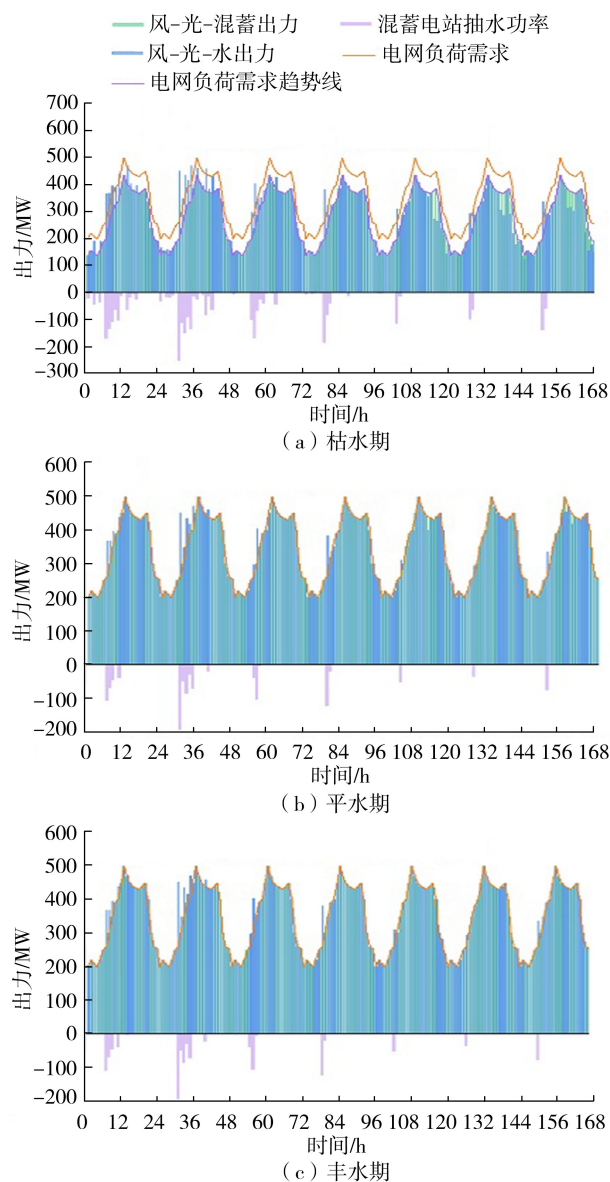


图9 风光连续小发时风-光-混蓄系统与风-光-水系统在不同入库流量下的出力过程

景并代入计算,结果表明:风-光-混蓄系统的风光消纳率期望值比风-光-水系统提高了 8.56%,剩余负荷方差期望值降低了 99.38%。

c. 在丰水期和平水期,风-光-混蓄系统的优势更多地体现在可将多余的风光电量以水能的形式储存下来,从而提高后续发电量;而在枯水期,风-光-混蓄系统的优势在于能将过剩的风光出力合理地分配在调度期的各个时段之中,从而更好地满足电网负荷需求和减少风光弃电量。

参考文献:

[1] 张智刚,康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报,2022,42(8):2806-2818. (ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the

CSEE,2022,42(8):2806-2818. (in Chinese))

[2] 程春田,武新宇,申建建,等. 亿千瓦级时代中国水电调度问题及其进展[J]. 水利学报,2019,50(1):112-123. (CHENG Chuntian, WU Xinyu, SHEN Jianjian, et al. A state-of-the-art review of China's hydropower operations and the recent advances in the era of gigawatts [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2019,50(1):112-123. (in Chinese))

[3] 申建建,王月,程春田,等. 水风光互补系统灵活性需求量化及协调优化模型[J]. 水利学报,2022,53(11):1291-1303. (SHEN Jianjian, WANG Yue, CHENG Chuntian, et al. Flexibility demand quantification and optimal operation model of water-wind-solar complementary system [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2022,53(11):1291-1303. (in Chinese))

[4] 韩世亮,陈泰霖. 气候变化影响下黄河上游梯级水库群未来发电量预测[J]. 水利水电科技进展,2022,42(3):32-38. (HAN Shiliang, CHEN Tailin. Future power generation prediction of cascade reservoirs in upper reaches of the Yellow River under climate change [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42(3):32-38. (in Chinese))

[5] 王义民,刘世帆,李婷婷,等. 雅鲁江能源基地水风光互补短期调度运行模式对比研究[J]. 水利学报,2023,54(4):439-450. (WANG Yimin, LIU Shifan, LI Tingting, et al. A comparative study on the short term operation modes of water-wind-solar energy complementary dispatching in Yalong River Energy Base [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2023,54(4):439-450. (in Chinese))

[6] 吉小盼,谭平,刘园,等. 长江流域上游梯级电站生态调度研究现状[J]. 水利水电科技进展,2022,42(5):8-14. (JI Xiaopan, TAN Ping, LIU Yuan, et al. Research status of ecological operation of cascade hydropower stations in the upper Yangtze River Basin [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42(5):8-14. (in Chinese))

[7] 黄显峰,颜山凯,李大成,等. 对水电效益影响最小的水光互补运行方式研究[J]. 水利水电科技进展,2022,42(6):15-20. (HUANG Xianfeng, YAN Shankai, LI Dacheng, et al. Research on hydro-photovoltaic complementary rules for minimum influence on hydropower benefit [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42(6):15-20. (in Chinese))

[8] 黄小锋,纪昌明,郑江涛,等. 白山混合式抽水蓄能电站水库调度效率分析[J]. 水力发电学报,2010,29(2):145-148. (HUANG Xiaofeng, JI Changming, ZHENG Jiangtao, et al. Analysis on reservoir operation efficiency of Baishan hybrid pumped storage power station [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2010,29(2):145-148. (in Chinese))

[9] 黄显峰,王宁,刘志佳,等. 基于改进 NSGA-II 算法的梯

- 级水库多目标优化调度[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(4): 51-58. (HUANG Xianfeng, WANG Ning, LIU Zhijia, et al. Multi-objective optimal operation of cascade reservoirs based on improved NSGA-II algorithm[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(4): 51-58. (in Chinese))
- [10] 黄显峰, 周引航, 张启凡, 等. 基于云模型的水光互补清洁能源基地容量配置方案优选[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(1): 44-51. (HUANG Xianfeng, ZHOU Yinhang, ZHANG Qifan, et al. Capacity allocation scheme optimization based on cloud model for a hydro-photovoltaic complementary clean energy base[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(1): 44-51. (in Chinese))
- [11] 李文武, 黄进, 郭希海. 含混合式抽蓄电站的梯级水库中长期优化调度[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(12): 41-48. (LI Wenwu, HUANG Jin, GUO Xihai. Mid-long term optimal dispatch for the cascaded reservoirs operation with hybrid pumped storage power station[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2014, 26(12): 41-48. (in Chinese))
- [12] 苏学灵, 纪昌明, 黄小锋, 等. 混合式抽水蓄能电站在梯级水电站群中的优化调度[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(4): 29-33. (SU Xueling, JI Changming, HUANG Xiaofeng, et al. Optimizing operation of the hybrid pumped-storage power station between cascade reservoirs[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(4): 29-33. (in Chinese))
- [13] JURASZ J. Modeling and forecasting energy flow between national power grid and a solar-wind-pumped-hydroelectricity (PV-WT-PSH) energy source[J]. Energy Conversion and Management, 2017, 136: 382-394.
- [14] 李树林, 戴嘉彤, 董海鹰, 等. 考虑相关性的风光抽蓄互补发电系统优化运行[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(11): 92-102. (LI Shulin, DAI Jiatong, DONG Haiying, et al. Optimal operation of wind power-photovoltaic-pumped storage joint power generation system considering correlations[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2019, 31(11): 92-102. (in Chinese))
- [15] TANG Yajun, FANG Guohua, TAN Qiaofeng, et al. Optimizing the sizes of wind and photovoltaic power plants integrated into a hydropower station based on power output complementarity[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 206: 112465.
- [16] 刘欣雨, 罗彬, 陈永灿, 等. 融合改造的梯级混合式抽蓄短期调峰优化模型[J]. 电网技术, 2025, 49(3): 1217-1226. (LIU Xinyu, LUO Bin, CHEN Yongcan, et al. Short-term peak shaving model of cascade hybrid pumped storage retrofitted from conventional hydropower[J]. Power System Technology, 2025, 49(3): 1217-1226. (in Chinese))
- [17] 冯晨, 常高松, 陶湘明, 等. 含混合式抽水蓄能电站的水光蓄日内互补运行研究[J]. 水电能源科学, 2024, 42(8): 173-177. (FENG Chen, CHANG Gaosong, TAO Xiangming, et al. Short-term complementary operation of hydro photovoltaic mixed pumped storage integrated power system[J]. Water Resources and Power, 2024, 42(8): 173-177. (in Chinese))
- [18] 袁川, 李博, 李相锐, 等. 基于源荷匹配的梯级水风光蓄系统优化运行研究[J]. 中国农村水利水电, 2024(3): 8-15. (YUAN Chuan, LI Bo, LI Xiangrui, et al. Optimized operation study of a cascade hydro-wind-photovoltaic-storage complementary system based on source-load matching[J]. China Rural Water and Hydropower, 2024(3): 8-15. (in Chinese))
- [19] FU Yiwei, LU Zongxiang, HU Wei, et al. Research on joint optimal dispatching method for hybrid power system considering system security[J]. Applied Energy, 2019, 238: 147-163.
- [20] LI Jinghua, WANG Sai, YE Liu, et al. A coordinated dispatch method with pumped-storage and battery-storage for compensating the variation of wind power[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(1): 1-14.
- [21] 彭煜民, 王雪林, 刘德旭, 等. 考虑混蓄与纯蓄配置方式的水风光蓄互补系统调度运行对比研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(10): 179-187. (PENG Yumin, WANG Xuelin, LIU Dexu, et al. Comparative research on the dispatching operation of a hydro-wind-solar-storage complementary system considering configurations with hybrid and pure pumped-storage hydropower plants[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(10): 179-187. (in Chinese))
- [22] 明波, 成楸语, 黄强, 等. 梯级互补储能对新能源的长期消纳作用分析[J]. 水利学报, 2022, 53(11): 1280-1290. (MING Bo, CHENG Qiuyu, HUANG Qiang, et al. Analysis of long-term consumption effects of cascade complementary energy storage on new energy[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(11): 1280-1290. (in Chinese))
- [23] 胡学东, 吴来群, 袁玉, 等. 抽水蓄能与风电、光伏联合发电系统容量配置研究[J]. 人民长江, 2024, 55(4): 244-251. (HU Xuedong, WU Laiqun, YUAN Yu, et al. Study on capacity configuration of pumped storage, wind power and photovoltaic combined power generation system[J]. Yangtze River, 2024, 55(4): 244-251. (in Chinese))

(收稿日期: 2024-07-29 编辑: 骆超)