

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231085

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

彭煜民¹, 王雪林², 刘德旭², 李贻凯¹, 杨迎², 熊翊君², 陈满¹, 钟海旺²

(1. 南方电网调峰调频发电有限公司储能研究院, 广东 广州 511486;

2. 清华四川能源互联网研究院, 四川 成都 610000)

摘要: 流域梯级水风光综合能源基地配建抽水蓄能构建水风光蓄互补系统, 是提高风光消纳能力、加速可再生能源一体化开发的重要途径。水风光蓄互补系统因地制宜既可配置混合式抽水蓄能, 又可配置传统常规抽水蓄能。针对何种配置方式更优问题, 从调度运行需求出发进行了研究。首先量化分析了水风光资源的季节互补性和日内互补性。然后分别考虑配置混蓄与纯蓄, 基于精细化流域梯级水电模型, 以负荷跟踪偏差率最小、弃能最小、水量利用率最大为目标构建了水风光蓄互补系统短期优化调度模型, 从调度运行角度探究不同抽蓄形式对水风光蓄互补系统的影响。最后, 通过某流域梯级水风光一体化基地算例表明, 配置混蓄相较于配置纯蓄, 不同运行场景下负荷跟踪偏差率均更小、弃能均降低、水量利用率均提高, 综合运行效率也得到提升, 表明配置混蓄对水风光蓄互补系统调度运行的提升优于纯蓄。研究可为流域清洁能源基地、抽水蓄能规划建设及调度运行提供决策支持。

关键词: 抽水蓄能; 水风光蓄互补系统; 优化调度; 混合式抽蓄电站

Comparative research on the dispatching operation of a hydro-wind-solar-storage complementary system considering configurations with hybrid and pure pumped-storage hydropower plants

PENG Yumin¹, WANG Xuelin², LIU Dexu², LI Yikai¹, YANG Ying², XIONG Yijun², CHEN Man¹, ZHONG Haiwang²

(1. CSG PGC Power Storage Research Institute, Guangzhou 511486, China; 2. Sichuan Energy Internet

Research Institute, Tsinghua University, Chengdu 610000, China)

Abstract: The constructions of pumped-storage hydropower plants (PSHPs) and the hydro-wind-solar-storage (HWSS) complementary system within a cascade HWSS integrated energy base along the river basin are important means of improving the consumption of wind and solar power and accelerate the integrated development of renewable energy. The HWSS complementary system can be configured with hybrid or traditional pure PSHPs according to the local geographic conditions. To select the optimal configuration, this paper starts with the demands of the dispatching operation. First, the seasonal and intraday complementarities of hydro, wind, and solar (HWS) resources are quantitatively analyzed. Then, based on a refined cascade hydropower plant model along the basin and considering the respective configurations with hybrid and pure PSHPs, a short-term dispatching optimization model for an HWSS complementary systems is constructed with the minimum load tracking deviation rate, minimum energy curtailments, and maximum hydropower utilization rate as objectives. The impacts of different forms of PSHPs on the HWSS complementary system can thus be explored from the perspective of the dispatching operation. Finally, a case study on a cascade HWS integrated base along the basin shows that the configuration with mixed PSHPs exhibits smaller load tracking deviation rates, lower energy waste, and higher hydropower utilization rates, in different operating scenarios, than the configuration with pure PSHPs. The overall operating efficiency is also improved, which indicates a better improvement of the HWSS complementary system's dispatching operation by the configuration with mixed PSHPs than that with pure PSHPs. This research can provide decision support for the planning and dispatching of clean energy bases and PSHPs along river basins.

This work is supported by the Science and Technology Project of China Southern Power Grid (No. 020000KK52210005).

Key words: pumped storage; hydro-wind-solar-storage complementary system; dispatching operation; hybrid pumped storage hydropower station

基金项目: 南方电网科技项目资助 (020000KK52210005)

0 引言

流域梯级水风光一体化发展是提高可再生能源电能质量和扩大可再生能源规模的新范式^[1]。目前,我国雅砻江水风光一体化示范基地^[2]、金沙江上游水风光一体化基地^[3]等流域综合能源基地建设正持续推进。抽水蓄能是目前电力系统最成熟的储能技术^[4-6],在流域水风光一体化基地中增加抽水蓄能构建水风光蓄互补系统,能进一步增强系统调节能力,进一步提高系统清洁能源消纳量,是挖掘电源供电潜力、健全流域综合能源基地建设的新解法。鉴于依托流域丰富的水资源及地形地势,抽水蓄能电站既可建设为传统水库独立的纯抽水蓄能,又可建设为借用梯级水库的混合式抽水蓄能^[7],何种配置方式对水风光蓄互补系统调度运行的提升更大,以及配置抽蓄后互补系统中各电源如何协调配合以使互补系统增益最多,仍有待对比研究。

现有调度运行研究对水风光系统及其子系统已有较多关注。文献[8]对水光系统日内优化运行策略进行了研究,建立了兼顾发电量与出力波动的互补优化调度模型,使水光系统在晴天、多云、阴雨等不同天气下输出电力电量均平稳;文献[9]考虑大规模风电接入梯级水电系统打捆外送,对水风光系统中长期、日前和实时尺度的调度方式进行了研究,并评估了互补调度的效益和风险;文献[10]围绕风光出力不确定性,基于雅砻江流域梯级水风光系统开展了多尺度随机优化调度研究;此外,学者对水风光系统资源互补性^[11-13]、容量配置^[14-15]、功率预测^[16]、网源协调^[17]等方面进行了深入研究。水风光联合优化调度的重点在于对系统出力波动及互补性的刻画,以及不同场景流域梯级水电的利用,对调节电源建模的精细程度决定了互补优化调度的成效,同时,流域梯级水电因提供出力调节,水电系统自身运行效率是否受到影响也需要考虑。

随着并网风光规模的持续扩大,水风光系统前瞻性配建抽水蓄能以进一步提升调节能力逐渐引起关注。文献[18]基于风光并网规模扩大需求,从容量配置和优化运行出发,构建了水风光蓄系统双层规划模型,确定源荷匹配下互补系统可接纳风光容量;文献[19]以经济效益和灵活调节裕度为目标,建立了梯级水风光蓄系统日前多目标优化调度模型,充分挖掘互补系统供电潜力;文献[20]则重点关注求解算法,提出了耦合贪婪策略和自适应 t 分布变异的改进飞蛾搜索算法,对梯级水火风光蓄储多源联合系统进行优化。从当前的少量文献报道来看,增加抽蓄可使水风光系统电力输出更平稳、可

靠,进一步提高风光消纳量或扩大风光并网规模。现有研究对抽蓄的考虑过于简化,尤其混合式抽水蓄能依托流域梯级水电,其运行将改变原有梯级水电水力联系和水量耦合关系,运行不合理将对梯级水电优化调度产生负面影响。因此,水风光蓄系统优化调度建模须结合抽蓄形式,考虑系统各组成部分的相互影响,增加必要约束或联系使模型更健全。

鉴于此,本文以水风光蓄系统为研究对象,分别考虑混合式抽水蓄能和纯抽水蓄能两种抽蓄形式,结合水风光资源的季节互补性和日内互补性,计及复杂水量耦合关系,对增加抽水蓄能前后流域梯级水电进行精细化建模。在此基础上以负荷跟踪偏差率最小、弃能最小、水量利用率最大为目标,构建流域梯级水风光蓄互补系统短期优化调度模型。最后,对某流域梯级水风光清洁能源基地采用抽蓄不同配置方式进行运行模拟,得到互补系统最优运行方式及抽蓄不同配置方式的调度运行性能对比。

1 水风光互补特性量化

互补性是多个变量间异向协同性的体现,即变量增减趋势方向相反,但变化时机相同,若将具有互补关系的变量线性加和为一个新变量,新变量与原主要变量的关系表现为相关性增强及过程曲线平坦化。为此,本文将水电 x_{hydro} 、风电 x_{wind} 及光伏 x_{solar} 分别加和为水风 $x_{\text{h-w}}$ 、水光 $x_{\text{h-s}}$ 、水风光 $x_{\text{h-w-s}}$ 3 个新变量,用互信息表征新变量相关性是否增强,用标准差表征新变量波动是否更小,以此量化水风光互补特性,其中互信息计算如式(1)所示^[21]。

$$I_M = -\frac{1}{2} \log(1-r^2) \quad (1)$$

式中: I_M 为互信息,两变量间的共有信息越多,互信息越大; r 为皮尔逊相关系数。

表 1 为某地区水电与水风、水光、水风光互信息计算结果,其中年内月尺度输入数据为发电量序列,日内小时尺度输入数据为出力序列,均除以对应装机容量进行归一化消除数量级差异。由表 1 可知:中长期尺度水风加和后互信息较多,水光加和后互信息较少;短期尺度水风加和后互信息较少,水光加和后互信息较多;水风光加和后互信息介于水风、水光加和之间。

表 2 为水风、水光、水风光标准差计算结果。与水电标准差相比,中长期尺度水风、水风光加和后标准差变小,曲线更平坦;短期尺度水风、水光、水风光加和后标准差均有所减小,且水光标准差减小更为显著。

表 1 某地区水风光互信息计算结果

Table 1 Calculation result of mutual information of hydropower-wind-photovoltaic in a certain area

互信息	年内月尺度	日内小时尺度
$x_{\text{hydro}} \sim x_{\text{h-w}}$	0.57	0.08
$x_{\text{hydro}} \sim x_{\text{h-s}}$	0.13	0.28
$x_{\text{hydro}} \sim x_{\text{h-w-s}}$	0.44	0.20

表 2 某地区水风光标准差计算结果

Table 2 Calculation result of standard deviation of hydropower-wind-photovoltaic in a certain area

标准差	年内月尺度	日内小时尺度
x_{h}	3.07	10.25
$x_{\text{h-w}}$	2.12	9.86
$x_{\text{h-s}}$	3.19	7.16
$x_{\text{h-w-s}}$	2.47	9.02

由互补性指标计算结果可知, 水电与风电具有较好的季节互补性, 丰水期(5—10月)水大风小, 枯水期(12—3月)水小风大; 水电与光伏具有较好的日内互补性, 白天水小光大, 夜间光为0而水电有所增加。水风光年内日利用小时数如图1所示。根据水风光互补特性, 可选取夏季水电大发而风电较小, 冬季风电大发而水电较小, 季节转换水风光相当三个季节剖面, 设置水风光出力典型场景, 反映水风光资源的季节变化特征。

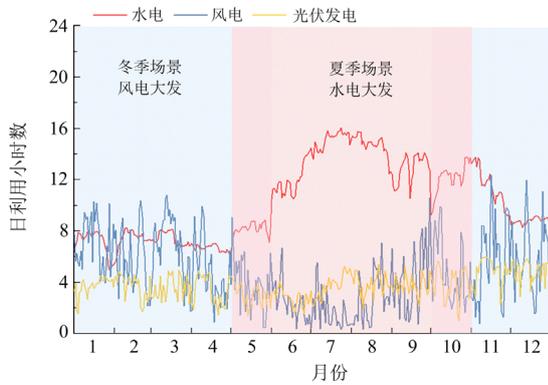


图 1 水风光年内日利用小时数

Fig. 1 Hydropower-wind-photovoltaic daily utilization hours during the year

2 流域梯级水电精细化建模

水风光蓄系统实现互补调度运行的关键在于如何利用及发挥水库水电站和抽蓄电站的调节性^[22]。流域梯级水电构成如图2所示。对水电子系统, 由于水库水电站和径流式水电站存在差异化串联关系, 水电内部也需要互补优化调度, 以最大化发挥梯级水电发电能力。对水-蓄子系统, 若抽水蓄能为

纯抽水蓄能配置方式, 水-蓄耦合关系不需特别考虑; 若抽水蓄能为混合式抽水蓄能配置方式, 水-蓄耦合关系需特别考虑水力联系的变化。针对水-蓄子系统, 本节分别对流域梯级水电和含混蓄电站梯级水电进行精细化建模。

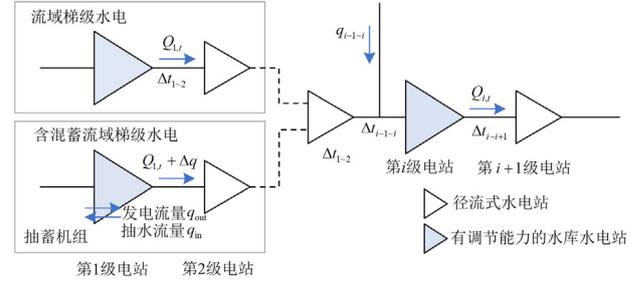


图 2 流域梯级水电构成示意图

Fig. 2 Schematic diagram of cascade hydropower structure in basin

2.1 流域梯级水电数学模型

对于流域梯级水电, 其发电量为所有单个水电站发电量的总和, 由于河道流量传播具有水力联系和水流滞时, 流域中由上至下的各水电站发电量具有内在关联, 梯级水电站发电量模型可表示为

$$E_{\text{h}} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I P_{i,t} \cdot t_n = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I f(Q_{i,t}, q_{i-1-i,t}, \Delta t_{i-1-i}) \cdot t_n \quad (2)$$

式中: E_{h} 为梯级水电发电量; t 为时段编号; i 为由上游至下游的电站编号; $P_{i,t}$ 为 t 时段电站 i 出力; t_n 为时段小时数; f 为水电转换函数; $Q_{i,t}$ 为 t 时段电站 i 发电引用流量; $q_{i-1-i,t}$ 为 t 时段电站 $i-1$ 至 i 区间流量; Δt_{i-1-i} 为电站 $i-1$ 至 i 流量传播时间; T 为时段编号总数; I 为梯级水电站总数。

该发电模型忽略了短期内发电水头和发电效率的变化, 着重考虑梯级水电的水力联系。在水力学中, 径流传播可用连续方程和运动方程来描述, 然而该方程组的解难以求得, 且在短期发电计算中关注流量传播时间(水流滞时)即可, 因此简化水力联系为

$$Q_{i,t}^{\text{in}} = Q_{i-1,t-\Delta t} + \tilde{q}_{i-1,t-\Delta t} + q_{i-1-i,t-\Delta t-t} \quad (3)$$

式中: $Q_{i,t}^{\text{in}}$ 为 t 时段电站 i 入库流量; Δt 为电站间流量传播时间; $\tilde{q}_{i-1,t-\Delta t}$ 为计及水流滞时 Δt 下 t 时段电站 $i-1$ 弃水流量; $q_{i-1-i,t-\Delta t-t}$ 为计及水流滞时 Δt 下 t 时段电站 $i-1$ 同电站 i 的区间流量。第 i 级电站发电流量与 Δt 前第 $i-1$ 级电站发电流量、弃水流量和区间流量有关。各级电站间的 Δt 在实际中难以测得, 可用电站间的相对距离和流速估算。

除水力联系外, 为保证水能资源的高效利用,

梯级水电中有调节能力的水库水电站与其下游的径流式水电站还存在一定的电力联系,即出力匹配,如式(4)所示。

$$P_{j,t} \varepsilon_j = P_{j+1,t-\Delta t} \varepsilon_{j+1} = P_{j+2,t-\Delta t'} \varepsilon_{j+2} \quad (4)$$

式中: j 为流域中某一具有调节能力的水库水电站, $j+1$ 、 $j+2$ 为其下游两个径流式水电站; $P_{j,t}$ 为流域中 t 时段电站 j 出力; ε_j 为电站 j 发电耗水率; $\Delta t'$ 为电站 $j+2$ 和电站 $j+1$ 间的流量传播时间。

2.2 含混蓄流域梯级水电数学模型

混合式抽水蓄能电站既有常规水电机组,又有抽水蓄能机组,相较于纯抽水蓄能电站,其无需遵循水量抽发平衡,可根据系统运行需要灵活调整,将式(2)中的梯级电站按常规水电站和含混蓄水电站进行划分,得到含混蓄流域梯级水电发电量模型,如式(5)所示。

$$E_h = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I P_{i,t} \cdot t_n + \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K (P_{k_1,t} + P_{k_2,t} - P_{k_3,t}) \cdot t_n \quad (5)$$

式中: i 为由上游至下游常规电站编号; k 为由上游至下游混蓄电站编号; K 为混蓄电站的最大编号; $P_{k_1,t}$ 为 t 时段混蓄电站 k 中常规机组出力, $P_{k_2,t}$ 、 $P_{k_3,t}$ 分别为 t 时段混蓄电站 k 中抽蓄机组发电出力 and 抽水功率。

对于水力联系,河道流量传播规律与式(3)保持一致,但混蓄电站发电流量发生改变,对其下游水电站发电产生影响。混蓄电站发电流量为常规机组发电流量与抽蓄机组引用流量之和,设抽蓄机组引用流量在发电时为正,在抽水时为负,混蓄电站发电流量可表示为

$$Q_{k,t} = Q_{k_1,t} + \Delta q_{k,t} = Q_{k_1,t} + q_{k_2,t} - q_{k_3,t} \quad (6)$$

式中: $Q_{k,t}$ 为 t 时段混蓄电站 k 发电引用流量; $Q_{k_1,t}$ 为 t 时段混蓄电站 k 常规机组引用流量; $\Delta q_{k,t}$ 为 t 时段混蓄电站 k 抽蓄机组引用流量; $q_{k_2,t}$ 、 $q_{k_3,t}$ 分别为 t 时段混蓄电站 k 抽蓄机组发电流量和抽水流量。

3 水风光蓄互补系统短期优化调度模型

水风光蓄互补系统协调优化以能源高利用率、系统经济性为原则,以满足负荷需要为目标,利用可调节电源平抑不可调节电源波动,实现系统运行最优化。参考文献[23-24],本文以负荷跟踪偏差率最小和弃能最小为目标,并考虑互补运行对梯级水电的影响,再选取可用水量利用率最大为目标。

3.1 目标函数

1) 水风光蓄互补系统负荷跟踪偏差率最小

从互补系统运行效率考虑,互补系统总出力应尽可能贴近目标出力,满足电网对该水风光蓄系统的负荷需要,以互补系统负荷跟踪误差率最小为目标。

$$f_1 = \min \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \frac{|P_{\text{total},t} - L_t|}{L_t} \quad (7)$$

$$P_{\text{total},t} = P_{h,t} + P_{w,t} + P_{s,t} \quad (8)$$

式中: f_1 为水风光蓄互补系统负荷跟踪误差率最小; $P_{\text{total},t}$ 为 t 时段水风光互补系统总出力; $P_{h,t}$ 、 $P_{w,t}$ 、 $P_{s,t}$ 分别为 t 时段互补系统内水电(含抽蓄)、风电、光伏出力; L_t 为 t 时段系统目标出力。

对于水电出力,需考虑抽蓄为纯蓄配置方式还是混蓄配置方式,分别按前述流域梯级水电模型+纯蓄、含混蓄流域梯级水电模型进行计算。

2) 水风光蓄互补系统弃能最小

从提高系统的能源利用率角度考虑,为尽量实现全额消纳,设置弃能最小为目标,如式(9)所示。

$$f_2 = \min \sum_{t=1}^T \sum_{z=1}^Z P_{z,t}^{\text{e}} - P_{z,t}^{\text{g}} \quad (9)$$

式中: f_2 为水风光蓄互补系统弃能最小; z 为互补系统送出线路编号; Z 为互补系统送出线路总数; $P_{z,t}^{\text{e}}$ 为 t 时段送出线路 z 下上网电源输出功率; $P_{z,t}^{\text{g}}$ 为 t 时段在线路 z 的预测出力。

3) 流域梯级水电可用水量利用率最大

从互补系统优化调度经济性考虑,流域梯级水电及抽蓄作为调节电源,其水量利用率变化直观反映优化调度效益,设置流域梯级可用水量利用率最大为目标,水量利用率计算式^[25]为

$$f_3 = \max \frac{W_E}{W_E + \Delta W + \tilde{W}} \quad (10)$$

$$W_E = E_h \cdot \bar{\varepsilon} \quad (11)$$

$$\tilde{W} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I f_p(\tilde{q}_{i,t}) \cdot t_n \cdot \varepsilon_i \quad (12)$$

式中: f_3 为流域梯级水电可用水量利用率最大; W_E 为梯级水电发电用水量; ΔW 为梯级水电库容变化量; \tilde{W} 为梯级水电弃水量; $\bar{\varepsilon}$ 为梯级水电平均耗水率; $\tilde{q}_{i,t}$ 为 t 时段电站 i 弃水流量; $f_p(\tilde{q}_{i,t})$ 为弃水水电转换函数; ε_i 为电站 i 发电耗水率。

3.2 约束条件

1) 送出线路(断面)功率约束

对水风光蓄系统的每条送出线路(断面),电源上网功率不应超过线路(断面)送出能力,如式(13)所示。

$$P_{z,t}^h + P_{z,t}^w + P_{z,t}^s \leq P_z^l, \forall t \in T \quad (13)$$

式中: $P_{z,t}^h$ 、 $P_{z,t}^w$ 、 $P_{z,t}^s$ 分别为 t 时段在线路(断面) z 的水电、风电、光伏出力; P_z^l 为送出线路 z 的功率上限。

2) 流域梯级水电运行约束

除式(3)水力联系和式(4)出力匹配外, 流域梯级各水电站运行约束还包括库容约束、发电流量约束、振动区约束。式(16)为库容与流量换算关系式。

$$V_i^{\min} \leq V_{i,t} \leq V_i^{\max} \quad (14)$$

$$Q_i^{\min} \leq Q_{i,t} \leq Q_i^{\max} \quad (15)$$

$$V_{i,t+1} = V_{i,t} + (Q_{i,t}^{\text{in}} - Q_{i,t}) \cdot t_n \quad (16)$$

$$P_{\tilde{i},\max}^{\text{vib}\xi} \leq P_{\tilde{i},t} \leq P_{\tilde{i},\min}^{\text{vib}(\xi+1)}, \xi = 0, 1, 2 \quad (17)$$

式中: $V_{i,t}$ 为 t 时段水电站 i 库容量; V_i^{\max} 、 V_i^{\min} 分别为电站 i 库容上下限; Q_i^{\max} 、 Q_i^{\min} 分别为电站 i 发电引用流量上下限; ξ 为振动区编号; \tilde{i} 为隶属于水电站 i 的机组; $P_{\tilde{i},t}$ 为 t 时段水电站 i 水电机组 \tilde{i} 出力; $P_{\tilde{i},\max}^{\text{vib}\xi}$ 、 $P_{\tilde{i},\min}^{\text{vib}(\xi+1)}$ 分别为 ξ 振动区上限和 $\xi+1$ 振动区下限, $P_{\tilde{i},\max}^{\text{vib}0} = 0$ 。

3) 纯抽水蓄能电站运行约束

参考文献[26], 纯抽水蓄能电站运行约束包含出力上下限约束、运行工况约束、库容约束、库容连续变化及水量抽发平衡约束。

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

$$u_t^D P_{\min}^S \leq P_{d,t}^S \leq u_t^D P_{\max}^S \quad (19)$$

$$u_t^C + u_t^D \leq 1 \quad (20)$$

$$V_{\min}^{\text{up}} \leq V_t^{\text{up}} \leq V_{\max}^{\text{up}} \quad (21)$$

$$V_{t+1}^{\text{up}} = V_t^{\text{up}} - P_{d,t}^S \cdot t_n \cdot \varepsilon_d + P_{c,t}^S \cdot t_n \cdot \varepsilon_c \quad (22)$$

$$V_1^{\text{up}} = V_T^{\text{up}} \quad (23)$$

式中: u_t^C 、 u_t^D 分别为抽蓄机组抽水、发电运行工况状态 0-1 变量; P_{\max}^S 、 P_{\min}^S 分别为抽蓄机组运行功率上下限; $P_{c,t}^S$ 、 $P_{d,t}^S$ 分别为 t 时段抽蓄机组抽水功率、发电出力; V_t^{up} 为 t 时段抽蓄电站上水库库容; V_{\max}^{up} 、 V_{\min}^{up} 分别为抽蓄电站上水库库容上下限。式(22)为库容连续变化方程式, ε_d 为发电耗水率; ε_c 为抽水电量-水量转换系数。式(23)为水量抽发平衡方程式。

4) 混合式抽水蓄能电站运行约束

混蓄电站中的抽蓄机组除需满足式(18)一式(20)的出力约束和运行工况约束外, 还需融合式(6)、式(14)一式(16)满足对应水库运行约束。

5) 风光功率约束

风电和光伏上网功率应在预测可发功率范围内, 如式(24)和式(25)所示。

$$0 \leq P_{z,t}^w \leq P_{z,t}^{w,\max} \quad (24)$$

$$0 \leq P_{z,t}^s \leq P_{z,t}^{s,\max} \quad (25)$$

式中, $P_{z,t}^{w,\max}$ 、 $P_{z,t}^{s,\max}$ 分别为 t 时段风电和光伏预测可发功率。

3.3 模型分析与求解

所建模型中, 目标函数 f_1 将优化方向规制到满足大电网对互补系统调度运行的需要, 目标函数 f_2 体现一体化运行的互补价值, 目标函数 f_3 保证互补系统核心水电的运行效益, 目标函数设置能满足互补系统优化调度需要。其中, f_1 与 f_2 优化方向均为最小, 但 f_2 存在数量级差异, 向 f_2 施加惩罚系数大 M 可避免数量级对求解的影响; f_3 换向后与 f_1 、 f_2 方向一致, 因此, 多目标函数可转换为单目标函数进行求解, 即 $\min f_1 + M \cdot f_2 - f_3$ 。结合约束条件可知, 该优化问题为混合整数规划问题, 涉及的非线性约束可通过分段法转换为线性约束^[27], 以降低计算难度。本文在 Matlab 中建立模型并调用商业求解器进行求解。

4 算例分析

4.1 算例设置

以某水风光清洁能源基地为例, 分别考虑配置混蓄与纯蓄, 探究水风光蓄系统互补调度运行方式。该能源基地构成如图 3 所示, 其中梯级水电总装机容量为 317 万 kW, 各水电站主要特征参数如表 3 所示, 风电装机容量为 126 万 kW, 光伏装机容量为 182 万 kW, 水风光配比约 1:0.40:0.57。综合考虑当前清洁能源基地扩建抽蓄机组条件及水泵水轮机常见规格, 构建水风光-混蓄系统如图 3(a)所示, 即假设基地中水电站 B 配置一台装机容量为 200 MW 的水泵水轮机改建为混蓄电站, B 站中混蓄容量与常规机组容量之比约为 1:3。构建水风光-纯蓄系统

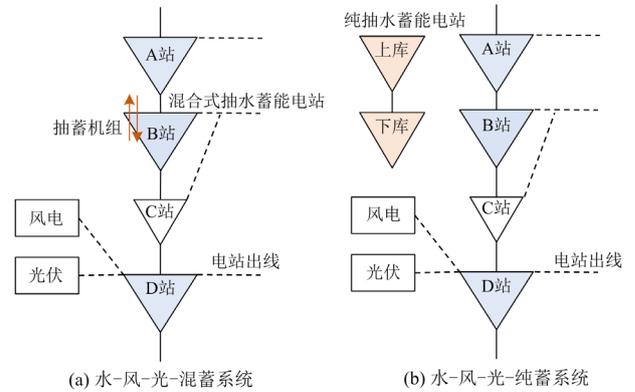


图 3 某清洁能源基地构成示意图

Fig. 3 Schematic diagram of a renewable energy base

表 3 梯级水电站主要特征参数

Table 3 Main characteristic parameters of cascade hydropower station

电站	装机容量/ 万 kW	调节能力	库容/ 亿 m ³	最大流量/ (m ³ /s)
A 站	60	多年	44.97	490.5
B 站	66	季	8.64	632.2
C 站	66	日	1.69	994.5
D 站	125	季	21.4	1250

如图 3(b)所示,即新建离河上、下水库形成纯抽水蓄能电站,与系统仅存在电气连接,为防止容量不同对系统运行产生影响,纯蓄电站装机容量与混蓄机组容量设置为相等。

为探究模型的适应能力,根据水风光季节互补

特性,选取夏季场景、冬季场景、季节转换场景 3 个季节剖面,分别考虑配置混合式抽水蓄能、纯抽水蓄能、不配置抽水蓄能进行基地模拟运行,场景设置如表 4 所示。

表 4 场景设置

Table 4 Scene situation

场景序号	季节剖面	抽蓄配置方式
I	换季场景	(a)混蓄、(b)纯蓄、(c)无抽蓄
II	夏季场景	(a)混蓄、(b)纯蓄、(c)无抽蓄
II	冬季场景	(a)混蓄、(b)纯蓄、(c)无抽蓄

4.2 结果分析

利用所建模型得到流域梯级水风光清洁能源基地在换季场景、夏季场景和冬季场景的各类电源出力情况,如图 4 所示。

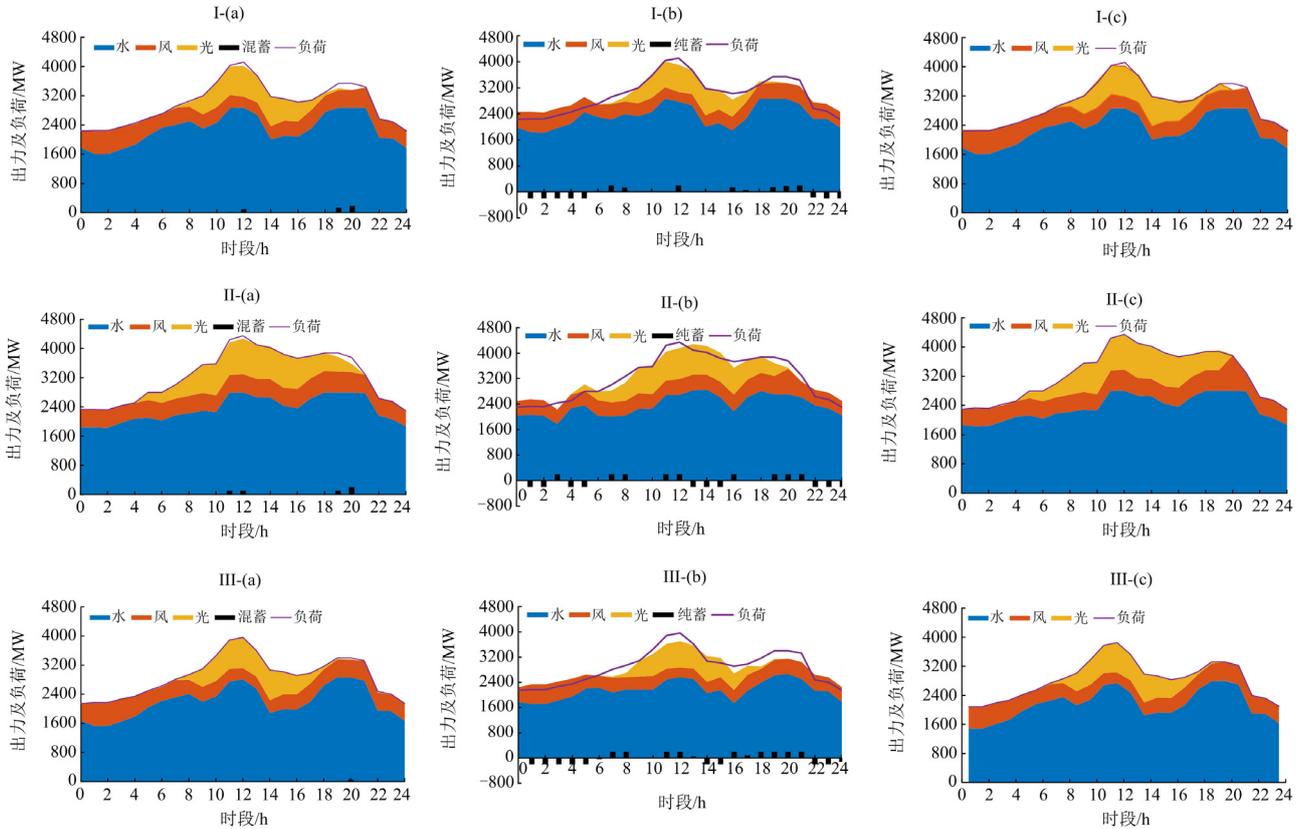


图 4 不同场景下各能源出力情况

Fig. 4 Output of each power in different scenarios

图 4 对比了配置混蓄、纯蓄、无抽蓄的运行差异。若无抽蓄,换季场景下系统存在电力缺口,配置混蓄或纯蓄后,电力缺口在削峰填谷作用下消除;3 类季节下,配置混蓄相对于纯蓄,抽蓄机组启动次数、工况转换次数均显著减少,对保护水泵水轮机、延长使用寿命具有积极作用;换季场景和夏季场景下,无论是否配置抽蓄,互补系统均有弃能产

生,冬季场景下仅无抽蓄时有弃能产生。

下面分别从负荷跟踪偏差率、弃能、水量利用率及调度运行成效等方面详细分析不同抽蓄配置方式对系统运行的影响。

1) 负荷跟踪偏差率分析

不同场景、不同抽蓄配置方式下水风光清洁能源基地负荷跟踪偏差率如图 5 所示。由图 5 可知,

相较于无抽蓄, 配置混蓄在换季、夏季、冬季场景下负荷跟踪偏差率分别降低 0.28%、0.05%、2.44%, 平均降低 0.92%; 配置纯蓄在换季、夏季、冬季场景下负荷跟踪偏差率分别降低 0.03%、0.04%、1.32%, 平均降低 0.46%。可知冬季场景下配置抽蓄对提高互补系统负荷跟踪能力尤为明显, 换季场景下略有提升, 夏季场景下提升最小, 且 3 个季节场景下配置混蓄对减小负荷跟踪偏差的作用均优于配置纯蓄。

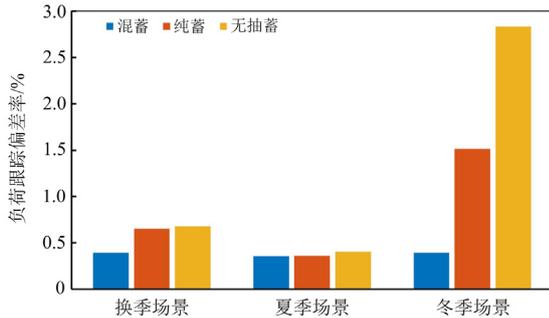


图 5 不同场景下基地负荷跟踪偏差率

Fig. 5 Base load tracking deviation rate in different scenarios

2) 弃能分析

不同场景、不同抽蓄配置方式下水风光清洁能源基地弃电量如图 6 所示。配置混蓄后, 基地在换季、夏季场景下分别产生弃电 41.1 MWh、216.6 MWh, 冬季场景下无弃电, 3 类季节场景下平均弃电 85.9 MWh, 较配置纯蓄平均弃电减少 119.8 MWh, 较无抽蓄平均弃电减少 328.1 MWh。从减少弃能角度看, 配置混蓄优于配置纯蓄, 均显著优于无抽蓄。

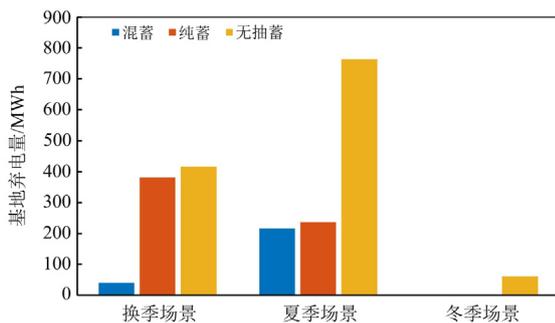


图 6 不同场景下基地弃电量

Fig. 6 Base discarded power in different scenarios

3) 可用水量利用率分析

不同计算条件下流域梯级水电可用水量利用率如图 7 所示。其中, 换季、夏季、冬季场景下配置混蓄平均可用水量利用率为 99.83%, 配置纯蓄平均可用水量利用率为 99.60%, 无抽蓄平均可用水量利

用率为 99.20%, 在具体场景中, 可用水量利用率均为配置混蓄最高, 配置纯蓄次之, 无抽蓄最低。

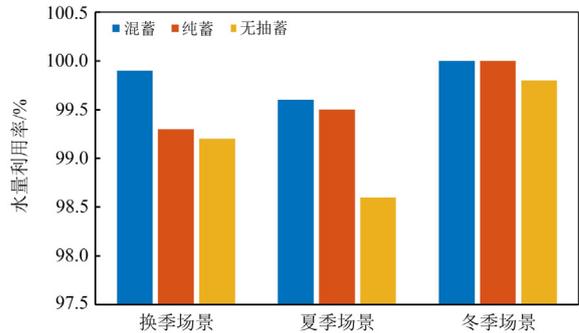


图 7 不同场景下基地水量利用率

Fig. 7 Base water utilization rate in different scenarios

4) 调度运行成效分析

为突出不同抽蓄配置方式调度成效的差异, 对不同季节场景中的 3 个目标函数值取均值, 来代表全年调度运行平均水平, 得到不同抽蓄配置方式调度运行成效对比如表 5 所示。由表 5 可知, 相较于无抽蓄, 配置混蓄平均负荷跟踪偏差率减少了 71%, 平均弃电量减少了 79%, 平均可用水量利用率提高了 0.6%; 相较于配置纯蓄, 配置混蓄平均负荷跟踪偏差率减少了 55%, 平均弃电量减少了 50%, 平均可用水量利用率提高了 0.2%。由此可知, 从负荷跟踪效果、水风光资源利用水平、水电运行效率来看, 流域梯级水风光清洁能源基地配置抽水蓄能后 3 个运行目标均有提升, 且配置混合式抽水蓄能较配置纯抽水蓄能提升更多。从调度运行角度分析, 水风光蓄互补系统配置混蓄优于配置纯蓄。

表 5 不同抽蓄配置方式调度运行成效

Table 5 Dispatch operation effect of different pumped storage configuration modes

抽蓄配置方式	平均负荷跟踪偏差率/%	平均弃电量/MWh	平均可用水量利用率/%
混蓄	0.38	85.9	99.83
纯蓄	0.84	205.7	99.60
无抽蓄	1.30	413.9	99.20

5 结论

本文考虑抽蓄的不同配置方式, 计及梯级水电站复杂水量耦合关系, 构建流域梯级水风光蓄互补系统短期优化调度模型, 探究抽水蓄能对互补系统运行的影响, 主要得出的结论如下。

1) 改造既有水电站为混蓄电站后, 流域梯级水电可用水量利用率较无抽蓄和纯蓄分别提高了 0.6%和 0.2%, 说明混蓄电站虽改变了流域梯级水电

水力联系,但并未对水电运行产生负面影响,在互补系统协同运行下,反而略有提升。

2) 不同季节场景下,流域梯级水风光清洁能源基地无论配置混蓄还是纯蓄,调度运行成效均得到提升,尤其在冬季场景下,负荷跟踪偏差显著减少、弃电得到消除、水电运行效率得到提高。

3) 配置混合式抽水蓄能与配置纯抽水蓄能相比,调度运行负荷跟踪率、资源利用率、水电运行效率均进一步提高,容量相同情况下,配置混蓄优于配置纯蓄。

本文着重从调度运行角度对比混蓄与纯蓄的差异,研究结论可为流域清洁能源基地、抽水蓄能规划建设及调度运行提供决策支持,同时,随着新能源规模持续扩大,水风光混蓄互补系统最优容量配置有待进一步研究。

参考文献

- [1] 国家能源局. 关于开展全国主要流域可再生能源一体化规划研究工作有关事项的通知[EB/OL]. [2022-03-02]. <http://www.cecfa.org.cn/news/4249.html>.
- [2] 王义民, 刘世帆, 李婷婷, 等. 雅砻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.
- [3] 田露, 明波, 张玮, 等. 金沙江下游水风光资源多时间尺度互补性分析[J]. 水力发电学报, 2023, 42(10): 40-49.
TIAN Lu, MING Bo, ZHANG Wei, et al. Multi-time scale complementarity analysis of hydropower, wind power and photovoltaic resources in the lower reaches of Jinsha river[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2023, 42(10): 40-49.
- [4] 杨昌海, 张赛, 王雪妍, 等. 基于平抑风光波动的抽水蓄能容量优化配置[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(7): 140-146.
YANG Changhai, ZHANG Sai, WANG Xueyan, et al. Optimal allocation of the pumped storage capacity based on smooth wind and photovoltaic fluctuation[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(7): 140-146.
- [5] 陈海生, 李泓, 徐玉杰, 等. 2022年中国储能技术研究进展[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(5): 1516-1552.
CHEN Haisheng, LI Hong, XU Yujie, et al. Research progress on energy storage technologies of China in 2022[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(5): 1516-1552.
- [6] 卢艺, 卢苑, 梁俊文, 等. 含抽水蓄能电网安全约束机组组合问题的混合整数线性规划算法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(3): 39-47.
LU Yi, LU Yuan, LIANG Junwen, et al. Mixed integer linear programming algorithm for solving security constrained unit commitment problem of power grid with pumped storage hydro[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(3): 39-47.
- [7] 周建平, 杜效鹤, 周兴波. 面向新型电力系统的水电发展战略研究[J]. 水力发电学报, 2022, 41(7): 106-115.
ZHOU Jianping, DU Xiaohu, ZHOU Xingbo. Study on hydropower development strategy for new power systems[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, 41(7): 106-115.
- [8] 朱燕梅, 黄炜斌, 陈仕军, 等. 水光互补日内优化运行策略[J]. 工程科学与技术, 2021, 53(3): 142-149.
ZHU Yanmei, HUANG Weibin, CHEN Shijun, et al. Intra-day optimal operation strategy of hydro-PV hybrid system[J]. Advanced Engineering Sciences, 2021, 53(3): 142-149.
- [9] 谭乔凤, 聂状, 闻昕, 等. 大规模风光接入下梯级水电站调度方式研究[J]. 水力发电学报, 2022, 41(9): 44-55.
TAN Qiaofeng, NIE Zhuang, WEN Xin, et al. Operation modes of cascade hydropower stations considering large-scale integration of wind and photovoltaic power[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, 41(9): 44-55.
- [10] 李金龙. 雅砻江中下游水风光多能互补多尺度优化调度研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2023.
LI Jinlong. Study on multi-energy complementarity and multi-scale optimal scheduling of hydro-wind-photovoltaic in the middle and lower reaches of Yalong river basin[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2023.
- [11] 田露, 明波, 张玮, 等. 金沙江下游水风光资源多时间尺度互补性分析[J]. 水力发电学报, 2023, 42(10): 40-49.
TIAN Lu, MING Bo, ZHANG Wei, et al. Multi-time scale complementarity analysis of hydropower, wind power and photoelectric resources in lower reaches of Jinsha River[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2023, 42(10): 40-49.
- [12] ZHAO M, WANG Y, WANG X, et al. Flexibility evaluation of wind-PV-hydro multi-energy complementary base considering the compensation ability of cascade hydropower stations[J]. Applied Energy, 2022, 315: 119024.
- [13] 李雄威, 王昕, 顾佳伟, 等. 考虑火电深度调峰的风光火储系统日前优化调度[J]. 中国电力, 2023, 56(1): 1-7, 48.
LI Xiongwei, WANG Xin, GU Jiawei, et al. Day-ahead optimal dispatching of wind-solar-thermal power storage system considering deep peak shaving of thermal power[J]. Electric Power, 2023, 56(1): 1-7, 48.

- [14] 陈祥鼎, 刘攀, 吴迪, 等. 水风光互补系统装机容量配置解析优化及敏感性分析[J]. 水利学报, 2023, 54(8): 978-986.
CHEN Xiangding, LIU Pan, WU Di, et al. Analytical optimization and sensitivity analysis of installed capacity configuration of hydro-wind-photovoltaic complementary systems[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2023, 54(8): 978-986.
- [15] REN Y, YAO X, LIU D, et al. Optimal design of hydro-wind-PV multi-energy complementary systems considering smooth power output[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2022, 50: 101832.
- [16] 雷鸿萱, 刘攀, 马黎, 等. 水风光多能互补系统中长期功率联合预报[J]. 水力发电学报, 2023, 42(9): 22-33.
LEI Hongxuan, LIU Pan, MA Li, et al. Medium and long-term joint forecast of power outputs for hydro-wind-photovoltaic complementary energy system[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2023, 42(9): 22-33.
- [17] ZHANG X, HUANG W, CHEN S, et al. Grid-source coordinated dispatching based on heterogeneous energy hybrid power generation[J]. Energy, 2020, 205: 117908.
- [18] 蔡绍荣, 沈力, 江栗, 等. 考虑水风光互补与机会约束的电力系统源网荷协调扩展规划研究[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(11): 134-145.
CAI Shaorong, SHEN Li, JIANG Li, et al. A study on source-network-demand coordinated expansion planning of the power system considering hydro-wind-solar complementary and chance constraints[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(11): 134-145.
- [19] 夏金磊, 唐翊杰, 王玲玲, 等. 考虑灵活调节能力的梯级水风光蓄互补系统日前优化运行策略[J/OL]. 上海交通大学学报: 1-25[2023-12-22]. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.419>.
XIA Jinlei, TANG Yijie, WANG Lingling, et al. Optimal operation strategy of cascade hydro-wind-solar-pumped storage complementary system considering the flexible regulation ability[J/OL]. Journal of Shanghai Jiaotong University: 1-25[2023-12-22]. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.419>.
- [20] 曹韵, 韩松, 荣娜, 等. 基于 GCTMSA 的梯级水火风光蓄联合调度[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(3): 108-116.
CAO Yun, HAN Song, RONG Na, et al. Dispatch of a cascade hydro-thermal-wind-photovoltaic-storage complementary system based on GCTMSA[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(3): 108-116.
- [21] CALSAVERINI R S, VICENTE R. An information-theoretic approach to statistical dependence: Copula information[J]. Europhysics Letters, 2009, 88(6): 68003.
- [22] 罗彬, 陈永灿, 刘昭伟, 等. 梯级水光互补系统最大化可消纳电量期望短期优化调度模型[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(10): 66-75.
LUO Bin, CHEN Yongcan, LIU Zhaowei, et al. Short-term optimal dispatch model for maximizing expectation of accommodation power of cascade hydro-photovoltaic complementary system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(10): 66-75.
- [23] 杨明杰, 胡扬宇, 千海霞, 等. 计及碳排放的综合能源配网日前与日内多时间尺度优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(5): 96-106.
YANG Mingjie, HU Yangyu, QIAN Haixia, et al. Optimization of day-ahead and intra-day multi-time scale scheduling for integrated power-gas energy system considering carbon emission[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(5): 96-106.
- [24] 臧紫坤, 杨晓辉, 李昭辉, 等. 考虑储热改造与最优弃能的风光火储低碳经济调度[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(12): 33-44.
ZANG Zikun, YANG Xiaohui, LI Zhaohui, et al. Low-carbon economic scheduling of solar thermal storage considering heat storage transformation and optimal energy abandonment[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(12): 33-44.
- [25] 中国南方电网有限责任公司. 南方电网水电调度运行指标统计规范[EB/OL]. [2017-02-01]. <http://ysp.net.sasac.gov.cn/n2588025/n2588124/c4217985/content.html>.
- [26] 彭煜民, 刘德旭, 王雪林, 等. 计及水库运行约束的极端气象场景下抽蓄电站优化调度研究[J]. 水利学报, 2023, 54(11): 1298-1308.
PENG Yumin, LIU Dexu, WANG Xuelin, et al. Optimization scheduling of pumped-storage power stations under extreme weather scenarios considering reservoir operation constraints[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2023, 54(11): 1298-1308.
- [27] 冯仲恺, 牛文静, 程春田, 等. 大规模水电系统优化调度维数灾问题研究进展[J]. 水电与抽水蓄能, 2021, 7(5): 111-115.
FENG Zhongkai, NIU Wenjing, CHENG Chuntian, et al. Research progress on dimensionality problem of large-scale hydropower system operation optimization[J]. Hydropower and Pumped Storage, 2021, 7(5): 111-115.

收稿日期: 2023-08-22; 修回日期: 2023-12-26

作者简介:

彭煜民(1979—), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 研究方向为抽水蓄能和新型储能; E-mail: 71267103@qq.com

王雪林(1996—), 女, 通信作者, 硕士, 研究方向为电力系统与综合能源、储能。E-mail: 1696955301@qq.com

(编辑 魏小丽)