

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.06.004

基于余留期效益函数的水光互补随机优化调度方法

闻 昕,秦济森,谭乔凤,张子仪,王燕玲

(河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098)

摘要:针对多能互补模式下水库调度面临径流、新能源出力等多重不确定性叠加影响,以及如何协调近期效益和远期效益的最优余留库容等关键问题,提出了一种基于余留期效益函数的水光互补随机优化调度方法。结合数学期望模型提出了水光互补调度两阶段随机优化决策框架,基于水库调度的周期性马尔科夫特性,采用逐步迭代方法对多能互补系统的余留期效益函数进行近似逼近,以实现有限预报信息条件下水库长期余留库容动态决策。以锦屏一级水光互补系统为实例进行验证,结果表明:余留期效益函数受光伏出力影响较小,而与余留库容、径流呈正相关有关系;随着调度时段从枯期进入汛期,余留期效益函数逐渐从线性曲面变为凸曲面;相较于常规调度方法,提出的调度方法多年平均发电量在率定期、检验期分别增加了2.70亿、2.51亿kW·h,在径流、光伏出力预报信息相对较小的条件下,能有效指导水光互补系统的长期调度运行。

关键词:水光互补;余留期效益函数;不确定性;随机优化;两阶段决策

中图分类号:TV697.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)06-0023-09

Research on stochastic optimal operation of hydro-photovoltaic complementary based on utility function of carryover stage//WEN Xin, QIN Jisen, TAN Qiaofeng, ZHANG Ziyi, WANG Yanlin (College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In response to the multiple uncertainties such as runoff and new energy output in reservoir operation under the multi energy complementary mode, as well as key issues such as how to determine the optimal remaining storage capacity that can coordinate short-term and long-term benefits, a hydro-photovoltaic complementary stochastic optimal operation method based on the utility function of the carryover stage was studied. Firstly, combine the mathematical expectation model to derive a two-stage decision-making framework of hydro-photovoltaic complementarity, and then establish a two-stage stochastic optimization operation model of hydro-photovoltaic complementarity based on the utility function of the carryover stage to realize the dynamic decision-making of carryover storage under limited forecast information. Taking Jinping level 1 hydro-photovoltaic complementary system as an example for verification, the results show that the utility function of the carryover stage is less affected by the photovoltaic output, but positively related to the carryover storage and runoff. With the operation period from dry season to flood season, the utility function of the carryover stage gradually changes from linear surface to convex surface. Compared with the conventional operation method, the average annual power generation of the two-stage operation method has increased by 270 million kWh and 251 million kWh respectively in the periodic and inspection periods. Under the condition of relatively small predicted information on runoff and photovoltaic output, the method can effectively guide the long-term scheduling and operation of hydro-photovoltaic complementary systems.

Key words: hydro-photovoltaic complementary; utility function of carryover stage; uncertainty; stochastic optimization; two-stage decision-making

可再生能源的开发利用是保证未来能源安全以及应对全球气候变化的重大战略举措。然而,以风

电、光伏为代表的可再生能源具有间歇性、波动性和随机性,直接并网会对电力系统的安全稳定运行带

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52079040)

作者简介:闻昕(1987—),男,教授,博士,主要从事水利水电调度运行研究。E-mail:njwenxin@163.com

通信作者:谭乔凤(1991—),女,青年教授,博士,主要从事水利水电调度运行研究。E-mail:qiaofengt@126.com

来极大压力。利用自然资源的天然互补性,同时发挥水电的灵活调节性,实施多能互补运行,是促进新能源消纳的一种有效途径^[1-3]。《国务院关于印发2030年前碳达峰行动方案的通知》文件中明确提出“推动西南地区水电与风电、太阳能发电协同互补”,《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》文件中明确提出“建设一批多能互补的清洁能源基地”。2022年国家能源局全面启动全国主要流域可再生能源一体化规划研究工作,推动了以水电调节能力为核心的水风光一体化资源配置、规划建设、调度运行和消纳。水风光一体化协同发展是可再生能源未来发展方向,是新时期可再生能源高质量发展的必由之路^[4-7]。

水风光多能互补系统的核心是利用水电快速灵活的调节能力平抑风光出力波动性,在提升互补发电系统输电质量的同时,提升多种能源的综合利用效率。由于风电、光伏不可储存,多能互补系统调度运行的本质是将风光出力作为约束条件的水库再调度^[8]。按照时间尺度划分,水库调度可以分为长期调度和短期调度。其中,水库长期调度的目标是在满足各类约束的前提下,寻求使发电量最大、发电保证率最大的水库调度计划,既要考虑近期效益,也要兼顾远期效益^[9-11]。目前围绕水库长期优化调度开展了广泛研究,包括确定性优化调度和随机优化调度^[12-14]。确定性优化调度通常将调度期内的径流过程视为确定性已知条件,利用动态规划算法(dynamic programming, DP)、遗传算法(genetic algorithm, GA)、粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)等优化算法获取整个调度期内各个调度时段的水库调度过程,使调度结果达到理论最优。而在实际运行过程中,长期径流的预报精度不高且预见期有限,并不能保证整个调度期的径流已知,因此未考虑径流不确定性的确定性优化调度往往无法直接应用于实际运行^[15-21]。随机优化调度考虑了径流不确定性,实现了随机径流条件下的期望最优,可分为隐随机优化调度和显随机优化调度。隐随机优化调度将长系列历史径流资料作为确定性优化模型的样本输入,利用优化算法得到理论上的最优调度过程,再利用多元回归、神经网络、支持向量机等方法提取调度规则。该方法获取的调度规则简单直观,应用方便,但是调度规则的解析形式没有先验知识,调度规则的优劣受数据挖掘方法影响很大,因此所提取的调度规则难以达到最优效果^[22]。显随机优化调度通过马尔可夫过程描述径流的不确定性,借助条件转移概率和优化算法寻求

余留库容各离散区间内的期望最优运行策略。随机动态规划(stochastic dynamic programming, SDP)是最为常见的显随机优化方法,其优化结果可直接指导水库的调度运行,但是由于SDP需要同时对状态变量和随机变量进行离散遍历,比确定性动态规划的“维数灾”更为严重,故其在复杂水库群系统中应用较少^[23-24]。

水电站长期发电策略一直是水库优化调度研究的难点。在制订优化调度方案时,不仅要考虑面临时刻的径流形势及调度效益,还要顾及余留期径流变化规律及余留期效益。特别是在水光互补调度、打捆外送的新背景下,水库调度面临径流、光伏功率等多重不确定性,如何确定能协调近期效益和远期效益的最优余留库容是亟待解决的难点问题。明波等^[25]提出了嵌套短期弃电风险的水光互补长期优化调度方法,采用隐随机优化调度方法提取了线性调度函数,该函数能有效指导水光互补长期调度。Yang等^[26]采用隐随机优化调度方法提取了水光互补系统的线性调度规则,提高了互补系统的发电量和发电保证率。刘哲源等^[27]针对水风光互补系统在变化环境下的运行问题,采用集合卡尔曼滤波技术与隐随机优化调度方法开展适应性调度研究。Li等^[28]采用显随机优化调度方法同时考虑了径流和光伏功率的不确定性,进一步提高了水光互补系统的调度效益。上述研究不同程度地考虑了径流、光伏功率的不确定性,而如何实现有限预报精度和预见期下的最优余留库容决策仍需深入研究。

基于此,本文提出了一种基于余留期效益函数的水光互补随机优化调度方法,以实现有限预报信息条件下水库长期余留库容动态决策。首先结合数学期望模型提出水光互补调度两阶段随机优化决策框架,然后基于水库调度的周期性马尔科夫特性,提出逐步迭代方法对多能互补系统的余留期效益函数进行近似逼近,并建立基于余留期效益函数的水光互补两阶段决策模型,用以指导水光互补系统长期发电计划滚动更新,最后以锦屏一级水库及周边光伏电站为实例,检验所提出方法的合理性和有效性。

1 研究方法

1.1 两阶段随机优化决策框架

在约束条件或目标函数中包含随机变量的情况下,使目标函数的期望值达到最优的数学规划,称为期望值模型^[29]。该模型要求在随机变量还未实现的情况下,做出可以最大化目标函数期望值的决策,对于这种随机优化问题,可将问题划分为两个阶段:随机变量 ξ 实现前为第一阶段,实现后

为第二阶段。第一阶段制定的决策为 x , 获得的阶段效益为 $f(x, \xi)$, 待随机变量 ξ 实现后, 在第二阶段制定策略 y 获得额外效益 $Q(x, y_\xi, \xi)$ 。两阶段决策框架为:

$$\max \{f(x, \xi) + E_\xi [Q(x, y_\xi, \xi)]\} \quad (1)$$

式中: $Q(x, y_\xi, \xi)$ 为第二阶段所有可能出现的情形下决策 y 的效用函数; E_ξ 为第二阶段的期望值。

水光互补调度的任务是: 根据水库当前阶段初的水库库容和该时段的径流、光伏出力预报信息, 将光伏出力作为约束条件, 通过水库优化调度方法对水库进行再调度, 不断滚动向前做出水库的最优调度决策, 其不仅要兼顾当前阶段的近期效益, 还要通过余留库容考虑远期效益, 以实现全景效益最优。图 1 为水光互补两阶段随机优化决策框架, 可见, 水光互补系统根据调度期可大致分为当前阶段(第 t 时段)和余留期(第 $t+1$ 时段至调度期末 T)。互补系统可以根据当前阶段的水库初始库容 v_t 、预报径流 q_t 和光伏预测出力 $N_{s,t}$, 通过决策当前阶段的水库余留库容 v_{t+1} , 将水电和光伏出力联合送出和集中消纳, 提高当前阶段的即时效益 $f_t(v_t, v_{t+1}, q_t, N_{s,t})$, 也可以根据余留库容 v_{t+1} 、余留期径流序列 $\vec{q}_t$ 和余留期光伏出力序列 $\vec{N}_{s,t}$, 在余留期采用调度策略, 提高余留期效益 $g_{t+1}(v_{t+1}, \vec{q}_t, \vec{N}_{s,t})$ 。

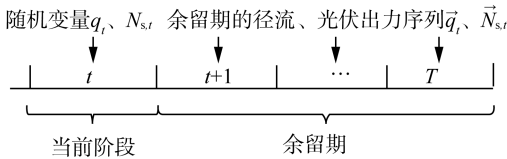


图 1 水光互补两阶段决策框架

Fig. 1 Two-stage decision-making framework of hydro-photovoltaic complementation

定义水光互补调度的两阶段随机优化决策框架如下:

$$F_t(v_t, q_t, N_{s,t}) = \max_{v_{t+1}} \{f_t(v_t, v_{t+1}, q_t, N_{s,t}) + E[g_{t+1}(v_{t+1}, \vec{q}_t, \vec{N}_{s,t})]\} \quad (2)$$

$$f_t(v_t, v_{t+1}, q_t, N_{s,t}) = \begin{cases} [N_t + \beta(N_t - N_{bz})] \Delta t_h & N_t \leq N_{bz} \\ N_t \Delta t_h & N_t \geq N_{bz} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $F_t(\cdot)$ 为互补系统在 $t \sim T$ 时段的最优水光期望发电效益; E 为 t 时段关于随机变量(径流、光伏出力)的二元联合期望算子, 本文假定径流与光伏出力之间相互独立; N_t 、 $N_{h,t}$ 、 $N_{s,t}$ 分别为 t 时段的水光出力、水电出力和光伏出力, $N_t = N_{h,t} + N_{s,t}$; N_{bz} 为互补系统的保证出力; β 为惩罚系数; Δt_h 为 t 时段的时间长度。

实施水光互补两阶段随机优化调度的前提是获得各个调度时段的余留期效益函数。但是余留期效益受到当前阶段的余留库容、余留期径流序列、光伏出力序列、调度策略等方面的影响, 这使得余留期效益函数难以获得。SDP 通过逆向递推计算, 可以获得不同状态变量(余留库容)和随机变量(径流、光伏出力)组合的余留期效益。但是传统的 SDP 存在缺陷^[30-31]: SDP 需要对所有的状态变量和随机变量进行离散遍历, 离散点过少会导致精度过低, 无法应对所有的工况, 离散点过多会使状态变量和随机变量的组合工况数量呈指数上升, 无法避免“维数灾”问题。为了克服传统 SDP 的缺陷, 本文提出一种逐步迭代方法对余留期效益函数进行近似逼近。

1.2 余留期效益函数近似

本文提出一种基于 SDP 的逐步迭代方法: 采用较少的离散节点获得余留期效益函数的输出样本, 然后在给定的收敛准则下通过逐步迭代的方法拟合样本输入和输出之间的函数关系, 推求余留期效益的近似函数。其主要求解步骤如下:

步骤 1 建立考虑径流、光伏功率不确定性的 SDP 的递推方程:

$$F_t(v_t, q_t, N_{s,t}) = \max_{v_{t+1}} [f_t(v_t, v_{t+1}, q_t, N_{s,t}) + \sum_{j,k} P(q_{t+1,j} | q_t) P(N_{s,t+1,k} | N_{s,t}) h_{t+1}(v_{t+1}, q_{t+1}, N_{s,t+1})] \quad (4)$$

式中: j, k 为径流、光伏出力等级指标; $P(q_{t+1,j} | q_t)$ 为径流的状态转移概率, 表示 t 时段径流为 q_t 时, $t+1$ 时段径流 q_{t+1} 等级为 j 的概率; $P(N_{s,t+1,k} | N_{s,t})$ 为光伏出力的状态转移概率, 表示 t 时段光伏出力为 $N_{s,t}$ 时, $t+1$ 时段光伏出力 $N_{s,t+1}$ 等级为 k 的概率; $h_{t+1}(v_{t+1}, q_{t+1}, N_{s,t+1})$ 为 t 时段的余留期效益。

径流、光伏出力在月尺度上均有一定的转移规律, 可视为周期性的马尔科夫过程, q_{t+1} 、 $N_{s,t+1}$ 一定程度上反映余留期的径流形势 $\vec{q}_t$ 和光伏出力形势 $\vec{N}_{s,t}$, 可假定 $h_{t+1}(v_{t+1}, q_{t+1}, N_{s,t+1}) \approx g_{t+1}(v_{t+1}, \vec{q}_t, \vec{N}_{s,t})$ 。

步骤 2 将每个时段的初、余留库容在库容上下限范围内离散为 M 个点, 径流可根据皮尔逊 III 型曲线^[32]划分为 N 个区间, 光伏出力可根据威布尔分布^[33]划分为 L 个区间。

步骤 3 假定 T 时段末余留期效益为 0, 即 $h_{T+1}(\cdot) = g_{T+1}(\cdot) = 0$ 。

步骤 4 初始设置 $t = T$ 。

步骤 5 通过式(4)计算 t 时段初库容状态为 v_t 、径流为 q_t 、光伏出力为 $N_{s,t}$ 时的余留期效益值, 遍历

所有的库容、径流、光伏出力离散状态,从而获得 t 时段初余留期效益值的所有样本集合 $F_t(v_t, q_t, N_{s,t})$ 。

步骤 6 以库容状态 v_t 、径流 q_t 、光伏出力 $N_{s,t}$ 为输入样本, F_t 为输出样本,使用支持向量机智能黑箱模型作为余留期效益函数的近似器,获取 t 时段初的余留期效益近似函数 h_t :

$$h_t(v_t, q_t, N_{s,t}) \approx F_t(v_t, q_t, N_{s,t}) \quad (5)$$

步骤 7 如果 $t = 1$, 转入步骤 8; 否则, 令 $t = t - 1$, 并转入步骤 5。

步骤 8 更新 T 时段末的余留期效益值样本:

$$F_{T+1}(v_{T+1}, q_{T+1}, N_{s,T+1}) = F_1(v_1, q_1, N_{s,1}) - \min F_1(v_1, q_1, N_{s,1}) \quad (6)$$

步骤 9 采用智能黑箱模型获取 T 时段末的余留期效益近似函数。如果满足收敛准则式(7), 则停止计算, 并保存最终的余留期效益近似函数; 否则转入步骤 4。

$$\max |h_{T+1}^{(\partial+1)}(v_{T+1}, q_{T+1}, N_{s,T+1}) - h_{T+1}^{(\partial)}(v_{T+1}, q_{T+1}, N_{s,T+1})| < \varepsilon \quad (7)$$

式中: ∂ 为迭代的次数; ε 为允许误差。

随着逆向递推计算迭代次数增加, 余留期效益值将不断累积增大。但是对于 SDP, 影响水库调度决策的是不同库容状态下的余留期效益之差, 而不是某个具体的余留期效益值。因此, 步骤 8 是为了避免余留期效益值在逐步迭代过程中不断累积增大, 并不影响其在随机优化调度中的作用。

1.3 水光互补两阶段决策模型

获取各个时段的余留期效益近似函数之后, 建立水光互补两阶段决策模型, 基于逐月的径流、光伏出力预报数据滚动向前决策, 将原多阶段序贯决策的调度问题简化为两阶段的调度问题, 解决在长期预报精度低且预见期有限条件下的调度难题。

1.3.1 目标函数

水光互补随机优化调度通过决策每个调度时段水库的余留库容, 发挥水库的调节作用, 对水库水量和径流进行再分配, 促进光伏能源的消纳, 最大限度地提高整个调度期的水光发电量。其通常以互补系统发电量最大和发电保证率最大为目标, 构造目标函数表示为

$$F = \max_{v_{t+1}} \left\{ \sum_{t=1}^T E[f_t(v_t, v_{t+1}, q_t, N_{s,t})] \right\} \quad (8)$$

式中 F 为水光互补系统在调度期内兼顾发电保证率的最优期望发电量。

1.3.2 约束条件

模型考虑的约束条件包括水量平衡约束、水库库容约束、泄流能力约束、发电流量约束、电站出力

约束和传输能力约束:

$$\begin{cases} v_{t+1} = v_t + (q_t - Q_t) \Delta t_s \\ v_{t,\min} \leq v_t \leq v_{t,\max} \\ Q_{t,\min} \leq Q_t \leq Q_{t,\max} \\ Q_{t,\min} \leq Q_{e,t} \leq Q_{e,t,\max} \\ N_{h,t,\min} \leq N_{h,t} \leq N_{h,t,\max} \\ N_{h,t} + N_{s,t} \leq N_{\max} \end{cases} \quad (9)$$

式中: Q_t 为水库在第 t 时段的出库流量; Δt_s 为 t 时段的时间长度; $v_{t,\min}$ 、 $v_{t,\max}$ 为水库在 t 时段的库容下限(死库容)、上限(正常蓄水位或防洪限制水位); $Q_{t,\min}$ 、 $Q_{t,\max}$ 为水库在 t 时段的下泄流量下限(最小生态需水流量)、上限(河道允许最大流量); $Q_{e,t}$ 为水库在第 t 时段的发电流量; $Q_{e,t,\max}$ 为水库在 t 时段最大允许发电引用流量; $N_{h,t,\min}$ 、 $N_{h,t,\max}$ 分别为水电站在 t 时段的水电出力下限、上限; $N_{\max}$ 为外送通道传输能力, 本研究取水电装机容量。

2 实例验证

2.1 工程概况与数据来源

雅砻江流域水能资源丰富, 是我国第三大水电基地, 雅砻江下游是雅砻江流域的资源密集区, 也是整个雅砻江清洁能源基地的重点。选取锦屏一级水电站及周边光伏电站组成的水光互补系统为研究对象。锦屏一级水电站是雅砻江下游梯级电站中的龙头电站, 其正常蓄水位为 1880 m, 死水位为 1800 m, 防洪限制水位为 1860 m, 兴利调节库容为 49.10 亿 m^3 , 具有年调节性能, 水电装机容量 360 万 kW, 最大引用发电流量为 2024 m^3/s 。根据《雅砻江流域风光水能开发规划》, 锦屏一级水电站规划接入 209 万 kW 光伏。

收集了锦屏一级水库 1953 年 1 月至 2012 年 12 月的月尺度径流数据; 考虑到光伏电站缺乏长系列运行资料, 从中国气象数据网站 (<https://data.cma.cn/>) 下载了 1953—2012 年逐月的辐射和温度数据, 采用光伏出力转换模型计算光伏逐月出力^[34]。

2.2 结果与分析

将径流、光伏出力的资料划分为率定期(1953—1997 年)和检验期(1998—2012 年)。采用率定期的径流、光伏出力数据资料作为率定数据集, 用以推求余留期效益近似函数, 采用检验期的数据资料用以验证随机优化调度方法的性能。

2.2.1 余留期效益近似函数结果

在推求余留期效益近似函数过程中, 设置锦屏一级水电站库容状态离散步长为 3 亿 m^3 , 径流与光伏出力依据其边缘分布(径流为皮尔逊 III 型分布,

光伏为威布尔分布)累积频率阈值 5%、10%、20%、30%、40%、50%、60%、70%、80%、90%，将各时段径流、光伏出力分别划分为 11 个等级区间。采用 1953—1997 年的径流、光伏出力数据资料,应用基于 SDP 的逐步迭代方法推求逐月的余留期效益近似函数。典型月份的余留期效益近似函数曲面如图 2 所示。由图 2 可见,余留期效益近似函数随着水库的余留库容、径流、光伏出力单调递增。水库的余留库容增加表示水库的余留水量增加,可以增加余留期的发电流量和水头,进而增加余留期效益。径流可以从两方面影响水光互补系统的余留期效益:一方面,径流增加既可以增大当前阶段的发电流量以提升即时效益,也可以增加余留水量以提升余留期效益;另一方面,径流前后时段具有较强的正相关性,即前一时段的径流增多预示着余留期的径流也越丰富,有利于余留期效益的提高。光伏出力则直接作用于水光互补系统的余留期效益,在水光出力不超过输送通道容量条件下,光伏出力越大,余留期效益越大。

随着调度时段从枯期进入汛期,余留期效益近似函数逐渐从线性曲面转变为凸曲面。为了更直观地表示余留期效益近似函数分别与余留库容、径流、光伏出力之间的关系,采用单一变量控制的方法绘制余留期效益近似函数的曲面投影图,图 3、图 4 分别是 1 月末、8 月末的余留期效益近似函数曲面投

影图。由图 3(a)(b)、图 4(a)(b)可见,枯期余留期效益近似函数随余留库容和径流基本呈线性单点递增趋势,汛期余留期效益近似函数随余留库容和径流呈单调递增趋势,但是增长速度逐渐减缓,满足边际效益递减规律。这是由于汛期 5—10 月径流丰富,锦屏一级水电站的装机容量有限,且光伏出力占用一定的输送通道容量,在水库的余留库容较高而余留期径流较丰时,可能导致余留期弃水,降低了单位水量的余留期效益;另外,锦屏一级水库在主汛期承担防洪任务,需要满足防洪限制水位要求,余留库容过高、径流太大会增加余留期的弃水量,降低单位水量的边际价值。由图 3(c)、图 4(c)可见,无论是枯期还是汛期,余留期效益近似函数受光伏出力的影响很小,余留期效益基本呈一条平线,这是由于光伏出力在月尺度的波动性较小,相对稳定,并且各月的变异系数^[35-36](样本标准差与平均值之比)均在 0.1 以下。综上,余留期效益近似函数在月尺度上主要受余留库容、径流影响,受光伏出力的影响较小。

2.2.2 方案对比分析

设置 3 种对比方案,分析随机优化调度方法的适用性。①常规调度方案:考虑到长期径流、光伏预报的精度较低且预见期有限的前提条件,《水电站水库调度规范》规定编制水电站年发电计划常用保证率为 70%~75% 的径流过程作为模型初始假定

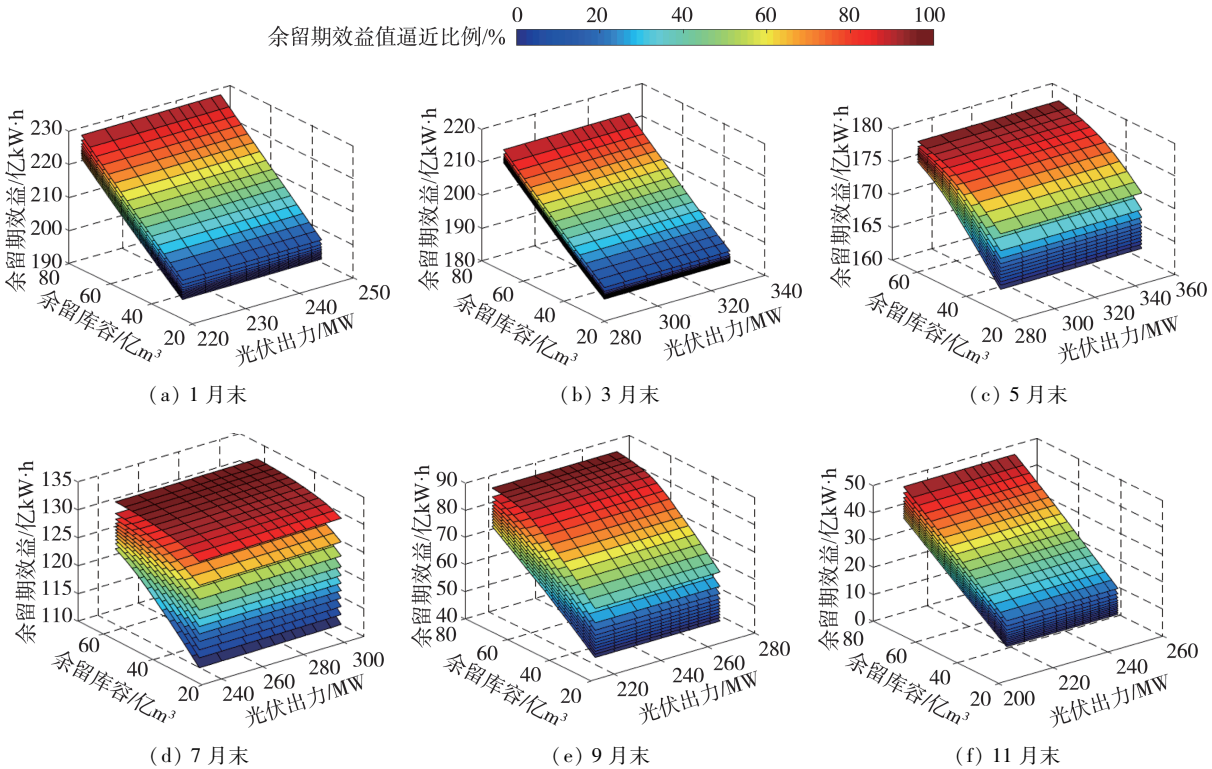


图 2 典型月的余留期效益近似函数曲面

Fig. 2 Approximate utility function surface of carryover stage of typical month

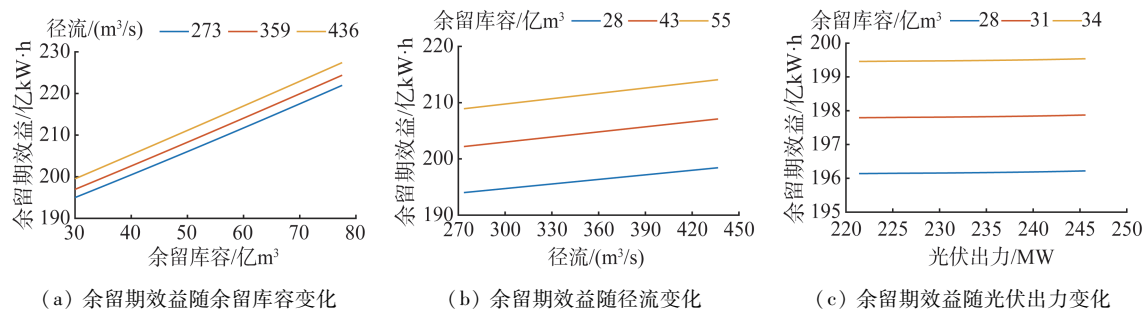


图3 1月末余留期效益近似函数投影

Fig. 3 Projection of approximate utility function surface of carryover stage at end of January

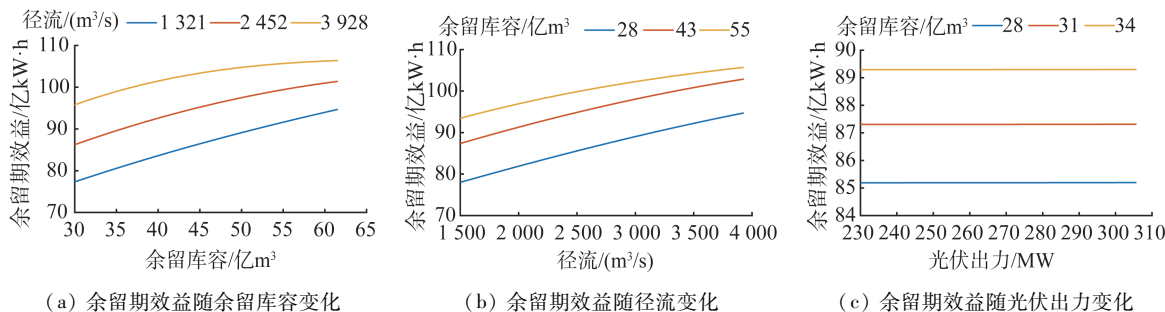


图4 8月末余留期效益近似函数投影

Fig. 4 Projection of approximate utility function surface of carryover stage at end of August

径流输入^[37-38],随着时间推移逐月更新径流输入。本研究采用保证率为75%的径流、光伏出力序列作为模型初始假定输入,以互补系统发电量最大为优化准则,采用DP制定长期发电计划。②优化调度方案:将某年完整的径流、光伏出力序列作为模型输入,以互补系统发电量最大为优化准则,采用DP制定长期发电计划。该发电计划的发电效益为当年输入序列条件下的理论最大发电效益,因此该方案用于检验两阶段调度方案的有效性。③两阶段调度方案:采用基于余留期效益函数的水光互补随机优化调度方法制定互补系统的发电计划。基于SDP推求余留期效益近似函数,根据径流、光伏出力逐月的预测数据,通过水光互补系统两阶段决策模型滚动向前决策,从而制定长期发电计划。

采用多年平均发电量和多年平均弃水量评价3种调度方案的发电效益,并采用超过率指标评价两阶段调度方案相较于常规调度方案的优越性,超过率为优化调度方案、两阶段调度方案的年平均发电量优于常规调度方案的年份数占比。表1为不同方案调度效益评价结果,可以看出,无论是率定期还是检验期,常规调度方案的综合效益最差,两阶段调度方案次之,优化调度方案最优。两阶段调度方案在所需调度信息相对较少的情况下,综合效益与优化调度方案相差较小,多年平均发电量在率定期、检验期分别只少了2.26亿、3.12亿kW·h,约占其效益的1.5%。相较于常规调度方案,多年平均发电量在

率定期、检验期分别增加了2.70亿、2.51亿kW·h。并且,采用两阶段调度方案的超过率达75%以上,即在大部分情况下,两阶段调度方案综合效益比常规调度方案更优,因此,在径流、光伏出力预报信息相对较少的情况下,采用两阶段调度方案能有效指导水光互补系统的长期调度运行。

表1 不同方案调度效益评价结果

Table 1 Operation benefit evaluation result of different schemes

调度方案	多年平均发电量/亿kW·h		多年平均弃水量/亿m³		超过率/%	
	率定期	检验期	率定期	检验期	率定期	检验期
常规调度	201	205.41	54.8	79.44		
优化调度	205.96	211.04	33.38	52.27	100	100
两阶段调度	203.7	208.92	40.72	59.08	76	80

图5为水光互补系统的多年平均弃水流量和水位过程。由图5可见,常规调度发电效益低是因为其根据规范将发电保证率为75%的径流、光伏出力过程假定为模型输入,随着时间推移逐月更新模型输入,对余留期的能量输入估计偏于保守,为了兼顾水光互补系统的余留期效益,水库处于较高水位运行,使得水量利用不充分,极易使水库在主汛期造成大量弃水,减弱了水库的调蓄作用,降低了单位水量的效益。而两阶段调度方案采用基于余留期效益近似函数的水光互补两阶段决策模型滚动决策长期发电计划,余留期效益近似函数能够反映余留期的最优期望效益,可避免对余留期径流、光伏出力序列的

假定,基于当前时段径流、光伏出力的预报信息,通过水库的调蓄作用增加水库在枯期的发电量,同时增加水库在汛期的存蓄能力,降低了水库在主汛期的弃水流量,增加了单位水量的效益。

从检验期中选取 2001 年、2002 年、2006 年 3 个典型年进行具体分析,验证随机优化调度方法的合理性和有效性,其中 2001 年属于特丰水年份,2002 年的年平均来水接近保证率 75%,属于平水年份,2006 年属于特枯水年份。图 6 为 3 个典型年的调度过程,表 2 为 3 个典型年的发电量、弃水量统计结

果。由图 6(a) ~ (c) 可见,当实际径流远大于 75% 保证率的径流时,常规调度方案假定的余留期径流过程较实际的径流过程偏低,水库水位一直处于高水平运行,不能及时腾空库容,导致枯期互补系统发电量大,汛期加剧水光通道竞争,产生大量弃水,尤其在 6 月水光竞争关系最为剧烈,最终使得发电量低于两阶段调度方案,弃水量高于两阶段调度方案。由图 6 (d) ~ (f) 可见,当实际径流接近于 75% 保证率的径流时,虽然 2002 年的年平均来水量与 75% 保证率的典型年相差不大,但是两年的径流序列、光

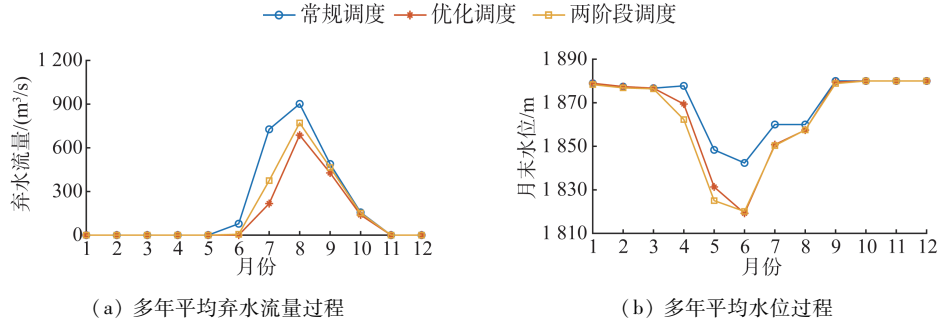


图 5 多年平均弃水流量和水位过程

Fig.5 Annual average abandoned water flow and water level process

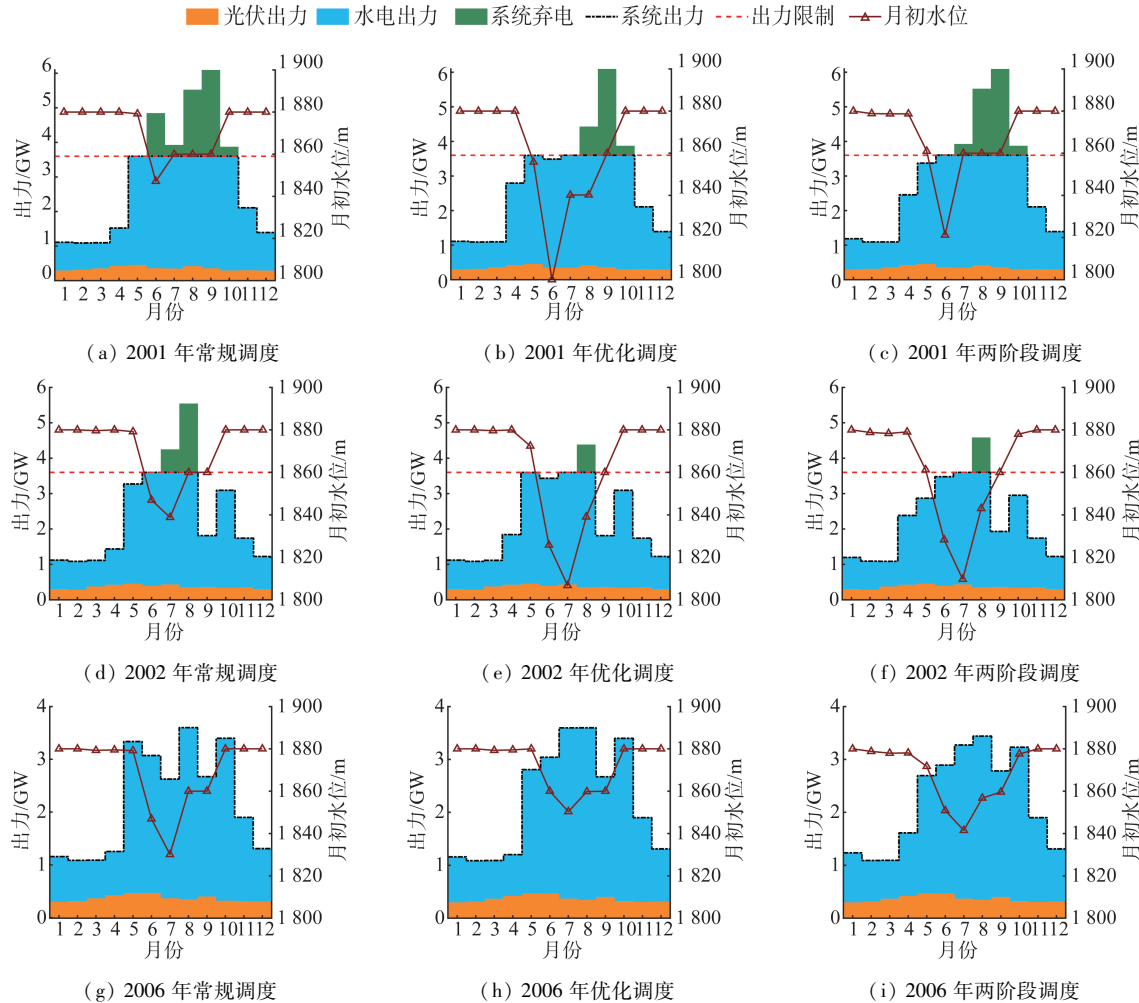


图 6 3 个典型年的调度过程

Fig.6 Operation process of three typical years

出力序列相差较大,常规调度方案相较于优化调度方案、两阶段调度方案,水库水位处于高水位运行,在7—8月水光通道竞争激烈,产生了更多弃水,不利于光伏能源的消纳。由图6(g)~(i)可见,当实际径流远低于75%保证率的径流时,常规调度方案假定的余留期径流过程较实际的径流过程偏高,水库过早地降低了其运行水位,损失了水头效益,同时余留期的径流不足又导致汛期不能满发多发,最终导致发电量低于两阶段调度方案。两阶段调度方案相较于优化调度方案,其所得的余留期效益近似函数表示余留期的最优期望效益,当其应用于具体某一年时仅能达到相对较优,因此两阶段调度方案的综合效益略低于优化调度方案。

表2 3个典型年的效益评价

Table 2 Benefit evaluation of three typical years

调度方案	年发电量/亿 kW·h			年弃水量/亿 m ³		
	2001 年	2002 年	2006 年	2001 年	2002 年	2006 年
常规调度	215.38	192.26	190.84	86.09	36.63	0.12
优化调度	223.71	196.33	193.40	48.87	11.47	0
两阶段调度	221.02	195.53	191.20	68.65	14.23	0

综上所述,在大部分情况下,两阶段调度方案的运行效益要优于常规调度方案,并且两阶段调度方案的运行效益仅略低于优化调度方案。在径流、光伏出力预报信息相对较小的条件下,采用基于余留期效益函数近似的水光互补随机优化调度方法,能有效指导水光互补系统的长期调度运行。

3 结 论

- a. 余留期效益近似函数随着水库的余留库容、径流单调递增,并且随着调度时段从枯期进入汛期,函数也逐渐从线性曲面变为凸曲面;而由于光伏出力在月尺度的波动性较小,余留期效益近似函数在长期尺度上受光伏出力的影响较小。
- b. 将75%保证率的径流、光伏出力序列作为模型初始假定输入的常规调度方案,由于需要假定余留期的径流、光伏出力序列,当实际径流、光伏出力序列偏高时,水库水位处于高水位运行,导致枯期发电量低,汛期大量弃水;当实际径流、光伏出力序列偏低时,水库过早降低了其运行水位,降低了水头效益。
- c. 相较于常规调度方案,两阶段调度方案的多年平均发电量在率定期、检验期分别增加了2.70亿、2.51亿kW·h,且与将全年径流、光伏出力序列视为已知的确定性优化调度方案的多年平均发电量相差不大。
- d. 在径流、光伏出力预报信息相对较小的条件下,采用基于余留期效益函数近似的水光互补随机

优化调度方法,能有效指导水光互补系统的长期调度运行。

参考文献:

[1] 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. (in Chinese))

[2] 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))

[3] 井志强,王义民,王学斌,等. 水风光多能互补运行中多主体损益关系分析[J]. 水力发电学报,2022,41(11):56-67. (JING Zhiqiang, WANG Yimin, WANG Xuebin, et al. Analysis of multi-entity profit and loss relationship in hydro-wind-solar power complementary operation [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, 41(11): 56-67. (in Chinese))

[4] 李耀华,孔力. 发展太阳能和风能发电技术 加速推进我国能源转型[J]. 中国科学院院刊,2019,34(4):426-433. (LI Yaohua, KONG Li. Developing solar and wind power generation technology to accelerate China's energy transformation [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(4): 426-433. (in Chinese))

[5] 王永真,康利改,张靖,等. 综合能源系统的发展历程、典型形态及未来趋势[J]. 太阳能学报,2021,42(8):84-95. (WANG Yongzhen, KANG Ligai, ZHANG Jing, et al. Development history, typical form and future trend of integrated energy system [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2021, 42(8): 84-95. (in Chinese))

[6] 李建兵,罗洋涛,冯宇. 西藏阿里地区水光互补能源利用模式探讨[J]. 河海大学学报(自然科学版),2016,44(5):465-470. (LI Jianbing, LUO Yangtao, FENG Yu. Discussion on energy utilization pattern of hydro-photovoltaic hybrid in Ngari area of Tibet [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2016, 44(5): 465-470. (in Chinese))

[7] 申建建,王月,程春田,等. 水风光多能互补发电调度问题研究现状及展望[J]. 中国电机工程学报,2022,42(11):3871-3885. (SHEN Jianjian, WANG Yue, CHENG Chuntian, et al. Research status and prospect of generation scheduling for hydropower-wind-solar energy complementary system [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(11): 3871-3885. (in

- Chinese))
- [8] 明波. 大规模水光互补系统全生命周期协同运行研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2019.
 - [9] XU Bin, ZHU Feilin, ZHONG Pingan, et al. Identifying long-term effects of using hydropower to complement wind power uncertainty through stochastic programming [J]. Applied Energy, 2019, 253: 113535.
 - [10] MING Bo, LIU Pan, GUO Shenglian, et al. Hydropower reservoir reoperation to adapt to large-scale photovoltaic power generation [J]. Energy, 2019, 179: 268-279.
 - [11] 畅建霞, 王义民, 黄强, 等. 水电与风电联合补偿调度机理研究与应用 [J]. 水力发电学报, 2014, 33(3): 68-73. (CHANG Jianxia, WNAG Yimin, HUANG Qiang, et al. Compensation operation mechanism of hydropower plant and wind power plant [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(3): 68-73. (in Chinese))
 - [12] 周建中, 杨佩瑶, 覃晖, 等. 水库(群)随机优化调度研究进展与展望 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(8): 19-26. (ZHOU Jianzhong, YANG Peiyao, QIN Hui, et al. Research progress and prospect of multi-reservoir system stochastic optimal operation [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 50(8): 19-26. (in Chinese))
 - [13] 张蓓, 朱燕梅, 马光文, 等. 考虑新能源的梯级水电中长期调度策略研究 [J]. 水电能源科学, 2020, 38(11): 67-71. (ZHANG Bei, ZHU Yanmei, MA Guangwen, et al. Research on mid-long term dispatching strategies of cascade hydropower considering new energy [J]. Water Resources and Power, 2020, 38(11): 67-71. (in Chinese))
 - [14] IIDUKA H. Two stochastic optimization algorithms for convex optimization with fixed point constraints [J]. Optimization Methods and Software, 2019, 34(4): 1425860.
 - [15] 李伶杰, 王银堂, 马敬梅, 等. 基于改进 NSGA-II 的龙江和瑞丽江梯级水电站联合优化调度 [J]. 水资源保护, 2022, 38(2): 83-90. (LI Lingjie, WANG Yintang, MA Jingmei, et al. Joint optimal scheduling of Longjiang and Ruilijiang cascade hydropower stations based on improved NSGA-II [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(2): 83-90. (in Chinese))
 - [16] 孙桂凯, 石锐, 刘思怡, 等. 基于长期与中长期嵌套的水库优化调度 [J]. 长江科学院院报, 2022, 39(8): 23-28. (SUN Guikai, SHI Rui, LIU Siyi, et al. Optimal scheduling of reservoir based on long-term and medium long-term nested model [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2022, 39(8): 23-28. (in Chinese))
 - [17] 王宗志, 谈丽婷, 耿敏, 等. 考虑调水和供水规则的水库优化调度 [J]. 水资源保护, 2023, 39(1): 15-21. (WANG Zongzhi, TAN Liting, GENG Min, et al. Reservoir optimal operation considering water transfer and supply rules [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(1): 15-21. (in Chinese))
 - [18] 纪昌明, 马皓宇, 李传刚, 等. 基于可行域搜索映射的并行动态规划 [J]. 水利学报, 2018, 49(6): 649-661. (JI Changming, MA Haoyu, LI Chuangang, et al. Research on parallel dynamic programming based on feasible region search mapping [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(6): 649-661. (in Chinese))
 - [19] 董增川, 陈牧风, 倪效宽, 等. 考虑模糊区间的水库群优化调度决策方法 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(3): 233-240. (DONG Zengchuan, CHEN Mufeng, NI Xiaokuan, et al. Decision method of optimal operation of reservoir group considering fuzzy interval [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(3): 233-240. (in Chinese))
 - [20] 赵珍玉, 张一, 李刚, 等. 风电并网条件下的梯级水电站长期优化调度 [J]. 水力发电学报, 2020, 39(12): 62-75. (ZHAO Zhenyi, ZHANG Yi, LI Gang, et al. Long-term optimal dispatching of cascade hydropower stations under large-scale wind power grid integration [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2020, 39(12): 62-75. (in Chinese))
 - [21] 黄显峰, 格桑央拉, 吴志远, 等. 水光互补能源基地的多时间尺度优化调度 [J]. 水力发电, 2022, 48(1): 106-111. (HUANG Xianfeng, KELSANG Yartha, WU Zhiyuan, et al. Multi-time scale optimization scheduling of hydro-photovoltaic complementary energy base [J]. Water Power, 2022, 48(1): 106-111. (in Chinese))
 - [22] 纪昌明, 周婷, 王丽萍, 等. 水库水电站中长期隐随机优化调度综述 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37(16): 129-135. (JI Changming, ZHOU Ting, WANG Liping, et al. A review on implicit stochastic optimization for medium-long term operation of reservoirs and hydropower stations [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(16): 129-135. (in Chinese))
 - [23] 罗成鑫. 考虑径流随机性的水库防洪优化调度模型与求解方法研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
 - [24] 郭爱军, 畅建霞, 王义民, 等. 考虑水库来用水过程关联性的多维随机动态规划算法 [J]. 农业工程学报, 2022, 38(2): 139-148. (GUO Aijun, CHANG Jianxia, WANG Yimin, et al. Multi-dimensional stochastic dynamic programming algorithms considering the relevancy between streamflow and water demand [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(2): 139-148. (in Chinese))
 - [25] 明波, 李研, 刘攀, 等. 嵌套短期弃电风险的水光互补中长期优化调度研究 [J]. 水利学报, 2021, 52(6): 712-722. (MING Bo, LI Yan, LIU Pan, et al. Long-term optimal operation of hydro-solar hybrid energy systems nested with short-term energy curtailment risk [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(6): 712-722. (in Chinese))

(下转第 62 页)

- [36] HAMED M M, NASHWAN M S, SHAHID S, et al. Inconsistency in historical simulations and future projections of temperature and rainfall: a comparison of CMIP5 and CMIP6 models over Southeast Asia [J]. Atmospheric Research, 2022, 265: 105927.
- [37] DAMS J, NOSSENT J, SENBETA T B, et al. Multi-model approach to assess the impact of climate change on runoff [J]. Journal of Hydrology, 2015, 529: 1601-1616.
- [38] WANG H M, CHEN J, XU C Y, et al. A framework to quantify the uncertainty contribution of GCMs over multiple sources in hydrological impacts of climate change [J]. Earth's Future, 2020, 8(8): 1602.
- [39] 薛联青, 白青月, 刘远洪. 人类活动影响下塔里木河流域气象干旱向水文干旱传播的规律 [J]. 水资源保护, 2023, 39(1): 57-62. (XUE Lianqing, BAI Qingyue, LIU Yuanhong. Study on the propagation of meteorological-hydrological drought in Tarim River Basin under the impact of human activities [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(1): 57-63 (in Chinese))
- [40] YANG W, LONG D, BAI P. Impacts of future land cover and climate changes on runoff in the mostly afforested river basin in North China [J]. Journal of Hydrology, 2019, 570: 201-219.

(收稿日期: 2023-01-18 编辑: 王芳)

(上接第 31 页)

- [26] YANG Z, LIU P, CHENG L, et al. Deriving operating rules for a large-scale hydro-photovoltaic power system using implicit stochastic optimization [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 195: 562-572.
- [27] 刘哲源, 刘攀, 李赫. 水风光互补适应性调度的集合卡尔曼滤波方法 [J]. 水力发电学报, 2022, 41(8): 42-53. (LIU Zheyuan, LIU Pan, LI He. An ensemble Kalman filter method for adaptive operation of hydro-wind-solar hybrid power systems [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, 41(8): 42-53. (in Chinese))
- [28] LI H, LIU P, GUO S, et al. Long-term complementary operation of a large-scale hydro-photovoltaic hybrid power plant using explicit stochastic optimization [J]. Applied Energy, 2019, 238: 863-875.
- [29] 刘宝碇. 随机规划与模糊规划 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.
- [30] CELESTE ALCIGEMES B, VENTURA LUISA A. Simple simulation-optimisation vs SDP for reservoir operation [J]. Water Management, 2017, 170(3): 128-138.
- [31] 王金文, 王仁权, 张勇传, 等. 逐次逼近随机动态规划及库群优化调度 [J]. 人民长江, 2002, 33(11): 45-47. (WANG Jinwen, WANG Renquan, ZHANG Yongchuan, et al. SDP with successive approximations and its application in the operation optimization of multireservoir system [J]. Yangtze River, 2002, 33(11): 45-47. (in Chinese))
- [32] CARLOS MENDEZ-GONZALEZ L, ALBERTO RODRIGUEZ-PICON L, JULIETA VALLES-ROSALES D, et al. Reliability analysis for electronic devices using beta-Weibull distribution [J]. Quality and Reliability Engineering International, 2017, 33(8): 2521-2530.
- [33] LIU Zifa, ZHANG Zhe, ZHUO Ranqun, et al. Optimal operation of independent regional power grid with multiple wind-solar-hydro-battery power [J]. Applied Energy, 2019, 235: 1541-1550.
- [34] 张曦, 康重庆, 张宁, 等. 太阳能光伏发电的中长期随机特性分析 [J]. 电力系统自动化, 2014(6): 6-13. (ZHANG Xi, KANG Chongqing, ZHANG Ning, et al. Analysis of mid/long term random characteristics of photovoltaic power generation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014(6): 6-13. (in Chinese))
- [35] 吕清泉, 张珍珍, 马彦宏, 等. 区域光伏发电出力特性分析研究 [J]. 发电技术, 2022, 43(3): 413-420. (LYU Qingquan, ZHANG Zhenzhen, MA Yanhong, et al. Analysis and research on output characteristics of regional photovoltaic power generation [J]. Power Generation Technology, 2022, 43(3): 413-420. (in Chinese))
- [36] 侯婷婷, 周小兵, 张维, 等. 湖北省典型地区风电和光伏电站出力特性分析 [J]. 湖北电力, 2016, 40(1): 24-30. (HOU Tingting, ZHOU Xiaobing, ZHANG Wei, et al. Analysis on characteristics of wind power and photovoltaic power in the type area of Hubei Province [J]. Hubei Electric Power, 2016, 40(1): 24-30. (in Chinese))
- [37] 鲍正风, 张雅琦, 刘志武. 三峡电站中长期发电计划计算方法研究 [J]. 水利水电技术, 2011, 42(12): 88-92. (BAO Zhengfeng, ZHANG Yaqi, LIU Zhiwu. Study on the calculating method for mid-long term power generation plan of Three Gorges hydropower station [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2011, 42(12): 88-92. (in Chinese))
- [38] 王菁, 刘志武. 编制水电站年度发电计划相关问题的探讨 [J]. 水电自动化与大坝监测, 2011, 35(1): 29-31. (WANG Jing, LIU Zhiwu. Discussion on annual generation schedule of hydropower plant [J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2011, 35(1): 29-31. (in Chinese))

(收稿日期: 2023-03-03 编辑: 王芳)