

考虑新能源消纳的黄河上游水电站群生态优化调度研究

陈 述^{1,2}, 陈 琼^{1,2}, 任 康^{1,2}, 张鑫凯³, 李 智⁴

(1. 三峡大学水电工程施工与管理湖北省重点实验室, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002; 3. 上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200335; 4. 中国长江三峡集团有限公司, 湖北 武汉 430010)

摘要:为降低黄河上游水电站群调度中新能源消纳对河流径流情势和生态完整度的影响,以河流径流情势变化最小、水电站群发电量最大、发电出力平稳性最高为目标,建立了风-水-光多能互补系统生态调度模型,采用多目标进化算法求解,探讨了多能互补系统发电出力、新能源消纳及河流生态保护之间的均衡关系。结果表明:水电站群发电量和河流生态保护目标之间呈现明显的竞争关系,多能互补系统的发电出力波动越大,水电站群发电量越大,径流情势变化也越大;入库径流量越大,水电站群生态调度对径流情势的影响越小;多能互补系统生态调度对径流情势的影响主要集中在年发生高/低流量脉冲次数和流量平均增加率/减少率这两项指标,在枯水年发电量最大的调度结果中,年发生低流量脉冲次数和流量平均减少率指标的变化最大。

关键词:新能源消纳;生态调度;水电站群;多能互补系统;多目标进化算法;黄河上游

中图分类号:TV212

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2024)03-0020-08

Ecological optimal scheduling of hydropower stations on the upper Yellow River considering renewable energy accommodation//CHEN Shu^{1,2}, CHEN Qiong^{1,2}, REN Kang^{1,2}, ZHANG Xinkai³, LI Zhi⁴ (1. Key Laboratory of Hydropower Engineering Construction and Management of Hubei Province, Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. College of Hydraulic & Environmental Engineering, Three Gorges University, Yichang 443002, China; 3. Shanghai Survey, Design and Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200335, China; 4. China Three Gorges Corporation, Wuhan 430010, China)

Abstract:To mitigate the impacts of renewable energy accommodation on the river flow regime and ecological integrity in scheduling of hydropower stations on the upper Yellow River, a multi-energy complementary system ecological scheduling model was established with the objectives of minimizing variations in river flow regime, maximizing power generation of hydropower stations, and ensuring the highest stability of generation output. A multi-objective evolutionary algorithm was employed to explore the balance among the generation output of the multi-energy complementary system, renewable energy accommodation, and ecosystem protection of rivers. The results indicate a clear competitive relationship between power generation of hydropower stations and river ecosystem protection objectives. The larger the fluctuation in generation output of the multi-energy complementary system, the greater the power generation of hydropower stations and the larger the variation in river flow regime. Moreover, the larger the inflow volume, the smaller the impacts of ecological scheduling of hydropower stations on river flow regime, and the impacts are mainly concentrated on the indicators, including the numbers of annual occurrences of high/low flow pulses and the average increase/decrease rate of flow. In the scheduling results with maximum power generation in dry years, the indicators of the number of annual occurrence of low flow pulses and average decrease rate of flow have the greatest changes.

Key words: renewable energy accommodation; ecological scheduling; hydropower stations; multi-energy complementary system; multi-objective evolutionary algorithm; upper Yellow River

随着我国风、光装机规模不断突破新高,电力系统调峰资源紧缺现象日趋严重^[1]。发展灵活性电

源,提高新能源的消纳水平及利用率是风、光等新能源高效利用的关键^[2],也是能源转型阶段亟待攻克

基金项目:国家自然科学基金项目(52079073)

作者简介:陈述(1986—),男,教授,博士,主要从事工程安全管理研究。E-mail:chenshu@ctgu.edu.cn

通信作者:任康(1993—),男,讲师,博士,主要从事水资源管理研究。E-mail:renkang@ctgu.edu.cn

的瓶颈问题^[3]。促进新能源消纳的主要途径包括实施多能互补运行管理^[4]、跨区域电力消纳^[5]以及增加储能设施^[6]等。其中,水电站特别是抽水蓄能电站,由于其启动迅速、调节灵活、装机容量大等特点^[7],在实施多能互补运行后能够大幅降低电力系统弃风、弃光率,保证系统平稳运行。目前,我国已经规划和建设了 14 个水电基地,形成了世界上规模最大的流域梯级水电站群,对新能源的消纳潜力巨大^[8],为新能源为主体的新型电力系统构建提供了基础^[9]。

根据不同地理条件,以新能源为主体的新型电力系统可分为风-光互补、水-风互补、水-光互补^[10]和风-水-光多能互补等系统,但以风-光为主的新能源发电出力往往具有强波动性、随机性和间歇性等特征。针对新能源为主体的新型电力系统发电出力不确定性,目前研究通常以水电站作为调节新能源发电出力波动性的主要手段,考虑水电站发电量最大化与新能源消纳最大等,开展了以水电为主导的多能互补调度研究。Wang 等^[11]构建了多目标优化调度模型,分析在风-水-光多能互补系统中,总发电量最大与发电量短期波动最小的竞争与博弈关系,证明在风-水-光新能源互补系统中,短期发电出力波动性与发电量最大存在矛盾。Ming 等^[12]以发电量最大(水电与光电)为目标构建了多能互补调度模型的三层嵌套优化框架,分析了电力负荷的波动性与不确定性对多目标函数的影响。杨秀媛等^[13]构建了风电站与水电站协同运行实时调控策略,分析了新能源在实时调控中的不确定性因素。朱燕梅等^[14]构建了基于发电量最大和发电出力波动最小的水-光互补新能源短期优化调度模型,得出发电量与发电出力波动最小的最优解。

综上所述,现有研究主要以消纳新能源后系统发电的波动性最小^[15]或发电量最大^[16]作为多能互补系统运行的主要目标^[17],无法体现以风-水-光新能源为主体的新型电力系统发电与河流生态保护之间的冲突关系。水电站群调度为消纳新能源发电出力提供有效途径的同时,将显著改变河流径流情势及生态完整性^[18],但多能互补系统运行对河流生态健康的影响机制尚不明确。针对这一问题,本文以黄河上游水电站群及新能源基地为研究对象,提出

兼顾多能互补系统平稳运行、发电量最大、河流径流情势变化最小的风-水-光多能互补系统生态调度模型,在保障系统发电效益的基础上,减小水电站调度对河流生态的影响。

1 研究区概况

在黄河上游水电开发和多能互补运行中,玛尔挡、班多和羊曲水电站作为“西电东送”和“青电入豫”骨干电源,是国家和青海省重点新能源项目。水电站群的基本数据如表 1 所示,本文收集了羊曲水电站下游唐乃亥水文站 1956 年 1 月 1 日至 2020 年 12 月 31 日共 65 年的日径流数据、羊曲水电站上游玛曲水文站 1959 年 1 月 1 日至 2021 年 12 月 31 日共 63 年的日径流数据和军功水文站 1980 年 1 月 1 日至 2021 年 12 月 31 日共 42 年的日径流数据。为研究新能源和玛尔挡-班多-羊曲水电站群共同组成的风-水-光新能源基地综合发电效益,以黄河上游新能源基地的两座光伏电站(一塔拉,1 000 MW;三塔拉,3 000 MW)和两座风电站(切吉,1 500 MW;二塔拉,500 MW)为研究对象,本文也收集了与径流时间跨度相一致的两座风电站及两座光伏电站风-光新能源发电出力过程资料。该新能源基地建成后,与黄河上游玛尔挡-班多-羊曲水电站群组成多能互补系统向电网供电。根据生态环境部发布的《关于黄河羊曲水电站工程环境影响报告书的批复》,在黄河上游水电站建成并投入运行为电网提供清洁能源和消纳新能源发电出力的同时,将会显著改变下游河流径流情势和生态系统的完整性^[19]。为落实流域生态环境保护措施^[20],减少水电开发可能造成的不利影响,兼顾电站发电效益,进行水电站生态调度是目前黄河上游水电开发工作的重点。但是,黄河上游水电站群进行生态调度后,如何保证水电站群有充足的调蓄容量进行新能源消纳,是目前尚未解决的重要问题之一。

2 研究方法

2.1 水文改变度评估方法

Richter 等^[21]提出了水文变异指标(indicators of hydrologic alteration, IHA)体系评估河流径流情势特征,包括频率(年发生低流量脉冲的次数(x_1))、年发

表 1 黄河上游水电站基本数据

Table 1 Basic data of hydropower stations on the upper Yellow River

水电站	控制流域 面积/ km ²	总库容/ 亿 m ³	调节库 容/亿 m ³	多年平均入库 径流量/亿 m ³	正常蓄 水位/m	死水位/m	保证发电 出力/MW	装机容 量/MW	多年平均发电 量/亿 kW·h	调节能力
玛尔挡	98 346	14. 820	7. 06	167. 14	3 275	3 240	293. 0	2 200	70. 54	季调节
班 多	107 520	0. 154	0. 02	183. 22	2 760	2 757	46. 1	360	14. 12	日调节
羊 曲	12 326	14. 724	2. 39	197. 10	2 715	2 710	164. 0	1 200	49. 00	日调节

生高流量脉冲的次数(x_2)、流量转换次数(x_3)、流量(1—12月逐月的平均流量($x_4 \sim x_{15}$),年最小1、3、7、30、90 d流量($x_{16} \sim x_{20}$),年最大1、3、7、30、90 d流量($x_{21} \sim x_{25}$)以及基流指数(x_{26}))、发生时间(年最小1 d流量发生时间(x_{27})、年最大1 d流量发生时间(x_{28}))、改变率(流量平均增加率(x_{29})、流量平均减少率(x_{30}))和脉冲历时(低流量脉冲历时(x_{31})、高流量脉冲历时(x_{32}))5个方面的32个指标。

变化范围法(range of variability approach, RVA)是在 IHA 基础上提出的一种频率统计方法^[22], RVA 通常用各指标改变后的平均值减标准差或指标值,以 IHA 落入 25% ~ 75% 改变度视为满足河流生态需求的变动范围^[23]。RVA 的计算公式为

$$D_n = \left| \frac{N_{on} - N_{en}}{N_{en}} \right| \times 100\% \quad (1)$$

式中: D_n 为第 n 个 IHA 的改变度; N_{on} 为第 n 个指标变化后,观测的落于阈值内年数的平均值; N_{en} 为第 n 个指标变化后,预期落于阈值内年数的标准差或者指标值。

2.2 发电出力计算方法

风-水-光多能互补系统发电出力的主要影响因素是风速、径流量和太阳辐射强度。通常,在年尺度下,夏季光照充足、太阳辐射强度大、风速较小,汛期降水量丰富、入库径流量增多;冬季光照较少、太阳辐射强度小、风速较大,枯水期入库径流少。在日尺度下,白天风速较小、太阳辐射强度大、光照较充足;夜间风速较大、没有阳光。风-水-光多能互补系统发电出力计算方法如下:

a. 风发电出力的主要影响因素是风速^[24],在一定风速下风发电出力计算公式为

$$H_w = A_w \rho v^3 C_p / 2 \quad (2)$$

式中: H_w 为风发电出力; A_w 为涡轮机叶片扫掠的面积; ρ 为空气密度; v 为平均风速; C_p 为风能的利用系数,在理想条件下其最大值约为 0.593,阻力型风电机 C_p 约为 0.15,螺旋桨式的高性能风电机 C_p 约为 0.45。

b. 水电站发电出力指通过水轮机将水的动能和势能转化为电能,在一定径流和水电站上下游水位差下,水电站发电出力的计算公式为

$$H_h = K(Z_u - Z_d - Z) Q_g \quad (3)$$

式中: H_h 为水电站发电出力; K 为综合发电出力系数; Z_u 为水电站上游水位; Z_d 为水电站下游水位; Z 为水头损失; Q_g 为发电流量。

c. 光伏发电主要将太阳辐射能转化为电能,影响光伏发电出力的主要因素是太阳辐射强度,光伏发电出力计算公式为

$$H_s = n_r [1 - \beta(T_c - T_{ref})] G A_s \quad (4)$$

式中: H_s 为光伏发电出力; n_r 为参考组件效率; β 为温度系数; T_c 为单元有效温度; T_{ref} 为单元参考温度; G 为太阳辐射强度; A_s 为光伏发电板面积。

2.3 生态调度模型

以黄河上游风-水-光多能互补系统运行为例,以系统总发电量最大、发电出力平稳性最高(即发电出力波动最小)、河流径流情势变化最小^[25]为目标,构建风-水-光多能互补系统生态调度模型。

a. 发电量最大目标函数。发电量最大目标是保证羊曲-班多-玛尔挡水电站群消纳风-光新能源后,在调度周期内的发电量最大,其表达式为

$$\max E = \sum_{t=1}^L \bar{E}_t \Delta t \quad (5)$$

$$\text{其中 } \bar{E}_t = \sum_{i=1}^{M_w} E_{wi,t} + \sum_{j=1}^{M_h} E_{hj,t} + \sum_{k=1}^{M_s} E_{sk,t}$$

式中: E 为调度期内所有电站的发电量之和; $\bar{E}_t$ 为 t 时段平均发电量; Δt 为时段长度, $\Delta t = 24 \text{ h}$; $E_{wi,t}$ 为第 i 个风电场 t 时段的发电量; $E_{hj,t}$ 为第 j 个水电站 t 时段的发电量; $E_{sk,t}$ 为第 k 个光电场 t 时段的发电量; M_w 、 M_h 、 M_s 分别为互补系统内风电场、水电站和光电场数目; L 为调度期总时段数。

b. 发电出力平稳性最高目标函数。风-水-光多能互补发电系统发电出力过程平稳性可由发电出力波动最小为目标进行衡量,其表达式为

$$\min C_V = \min \left(\frac{S}{H} \right) = \min \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^L (H_t - \bar{H})^2 / \bar{H}}{T}} \quad (6)$$

式中: C_V 总发电出力变异系数; S 为总发电出力标准差; H_t 为 t 时段发电出力; $\bar{H}$ 为总发电出力平均值。

c. 河流径流情势变化最小目标函数。河流径流情势变化最小指水电站群调度运行后,在鱼类产卵期 4—6 月 t 时段下泄径流 Q_t 与自然径流 q_t 之间的差异尽可能小,即:

$$\min C = \frac{1}{L_a} \sum_{t=1}^{L_a} \frac{\min(q_t - Q_t, 0)}{q_t} \quad (7)$$

式中: C 为径流情势改变度; L_a 为产卵期时段数。

2.4 生态调度模型约束条件

风-水-光多能互补系统生态调度模型的约束条件可归纳为风电、水电和光电 3 个方面^[26-28]。

a. 风电场的风速约束:

$$v_{\min i,t} \leq v_{i,t} \leq v_{\max i,t} \quad (8)$$

式中: $v_{i,t}$ 为 t 时段第 i 个风电场的风速; $v_{\min i,t}$ 为风电场 t 时段的切入风速; $v_{\max i,t}$ 为风电场 t 时段的切出风速。

b. 水电站水位约束:

$$Z_{\min j,t} \leq Z_{uj,t} \leq Z_{\max j,t} \quad (9)$$

式中: $Z_{uj,t}$ 为 t 时段第 j 个水电站的上游水位; $Z_{\max j,t}$ 为水电站 t 时段上游水位的上限, 一般取正常蓄水位或防洪限制水位; $Z_{\min j,t}$ 为水电站 t 时段上游水位的下限, 一般取死水位。

c. 水电站下泄流量约束:

$$Q_{\min j,t} \leq Q_{j,t} \leq Q_{\max j,t} \quad (10)$$

式中: $Q_{j,t}$ 为 t 时段第 j 个水电站总下泄流量; $Q_{\max j,t}$ 为水电站 t 时段下泄流量上限值; $Q_{\min j,t}$ 为水电站 t 时段下泄流量下限值

d. 水电站发电出力约束:

$$H_{\min j,t} \leq H_{hj,t} \leq H_{\max j,t} \quad (11)$$

式中: $H_{hj,t}$ 为 t 时段第 j 个水电站的发电出力; $H_{\max j,t}$ 为水电站 t 时段发电出力的上限; $H_{\min j,t}$ 为水电站 t 时段发电出力的下限。

e. 水量平衡方程:

$$V_{j,t+1} = V_{j,t} + (I_{j,t} - Q_{j,t} - E_{V_{j,t}}) \Delta t \quad (12)$$

式中: $V_{j,t}$ 为第 j 个水电站 t 时段的初库容; $V_{j,t+1}$ 为第 j 个水电站 t 时段的末库容; $I_{j,t}$ 为第 j 个水电站 t 时段的入库流量; $E_{V_{j,t}}$ 为第 j 个水电站 t 时段的蒸发损失。

f. 光伏发电板容量约束:

$$H_{\min sk,t} \leq H_{sk,t} \leq H_{\max sk,t} \quad (13)$$

式中: $H_{sk,t}$ 为第 k 个光电场 t 时段的发电出力; $H_{\max sk,t}$ 为第 k 个光电场 t 时段发电板容量上限; $H_{\min sk,t}$ 为第 k 个光电场 t 时段发电板容量下限。

2.5 模型求解算法

受自然选择和生物进化启发提出的多目标进化算法 (multi-objective evolutionary algorithms, MOEAs)^[29], 可用于解决非凸、非线性多目标优化问题。在求解多目标优化问题过程中, 算法随机生成一组解, 并通过模仿自然界生物遗传、变异和选择过程的进化机制进行迭代改进。在迭代过程中, MOEAs 通常利用非支配排序策略权衡多目标优化中相互冲突的目标函数。本文采用非支配排序遗传

算法 (non-dominated sorting genetic algorithms-III, NSGA-III)^[30] 对羊曲水电站和玛尔挡-班多-羊曲水电站群生态调度模型求解。NSGA-III 的核心算法来源于 NSGA-II^[31], 是一个针对多目标问题改进后的 NSGA-II。与 NSGA-II 相比, NSGA-III 采用了一种基于参考点的非支配排序方法改进选择算子, 以解决高维多目标优化问题。

3 结果与分析

3.1 生态调度模型求解结果

图 1 为考虑发电量和新能源消纳的水电站群生态调度模型求解结果 (图中每一个标记均为一个可行解, 所有解共同构成了一个帕累托解集), 可见多能互补系统的发电量最大目标和发电出力平稳性最高目标之间呈现出显著的竞争关系, 即发电量越大, 生态调度模型的发电出力波动也越大。径流情势变化与系统发电量之间的关系也表明, 当河流径流情势变化越大, 系统发电出力波动和发电量也会相应增加, 反之则减少。在实际运行中, 由于新能源发电出力的随机性和间歇性特征, 需要对水电站群进行调节, 以尽可能降低发电出力的波动性。但是, 该模型的结果表明, 多能互补系统在获得最大发电效益时发电出力波动性也最大, 给实际多能互补系统的调度运行增加了难度。同时, 在多能互补系统发电量最大时, 水电站群的生态调度导致河流径流情势变化也最大。特别是枯水年, 由于多能互补系统的调度运行和入库径流减少导致系统的平均发电量相比平水年和丰水年分别降低了 10.09% 和 11.54%, 下游平均径流情势变化增加了 56.22% 和 8.58%, 但枯水年平均发电出力波动相比平水年和丰水年降低了 19.65% 和 19.21%。因此, 生态调度模型的调度结果不仅取决于最优解, 而且取决于来水的大小。为了分析不同求解结果下多能互补系统运行过程, 在帕累托解集中选择发电出力波动最小 (最优解 1)、年发电量最大 (最优解 3) 和权衡年发电量、

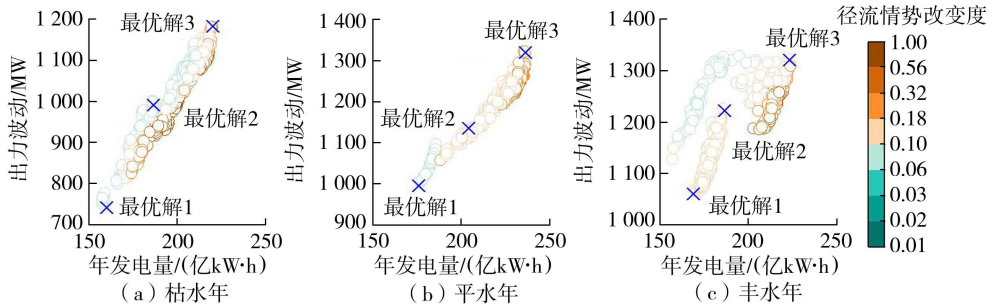


图 1 生态调度模型求解结果

Fig. 1 Calculation results of ecological scheduling model

发电出力波动及径流情势变化(最优解2)的解,对求解结果进一步分析。

3.2 生态优化调度下发电出力过程分析

以水电站群生态调度运行后发电量最大、发电出力平稳性最高以及河流径流情势变化最小为目标,取日尺度建立玛尔挡-班多-羊曲水电站群联合运行生态调度模型,考虑水电站(群)对新能源的消纳,基于风-光伏发电出力特性,求解系统发电出力过程。

为了分析多能互补系统中不同能源的发电出力过程,选择了生态调度模型的最优解2进行分析,结果如图2所示。从图2可以看出,不同典型年各水电站发电出力过程差异较大。班多和羊曲水电站调节性能有限,需要通过较为频繁的生态调度,以保证足够的发电出力;玛尔挡水电站发电出力过程和径流过程有较强的一致性,即径流较大时玛尔挡水电站发电出力也较大,在一年中的丰水季玛尔挡水电站发电出力也最大。玛尔挡水电站由于具有最大的调节库容和装机容量,在多能互补系统中起到了平抑风-光伏发电出力波动性的作用,也保证了系统在丰水年能够尽可能利用径流提高系统发电出力。此外,由于多能互补系统在枯水年发电出力波动性小于平水年和丰水年,水电站群在径流较为丰富的年份发电出力提高,对多能互补系统发电出力稳定性产生了较大的影响。

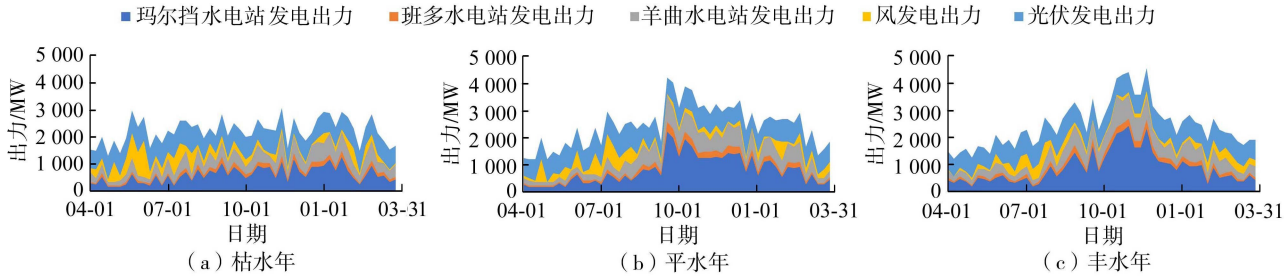


图2 典型年生态调度模型最优解2的发电出力互补过程

Fig.2 Generation output complementary process in typical years corresponding to optimal solution 2 of ecological scheduling model

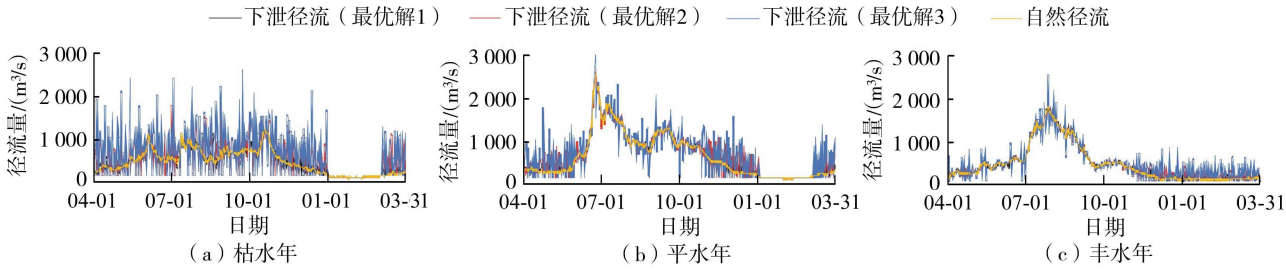


图3 典型年水电站群生态优化调度下羊曲水电站下泄径流与自然径流过程对比

Fig.3 Comparison of outflow process of Yangqu Hydropower Station under ecological optimal scheduling of hydropower stations in typical years with its natural runoff process

3.3 生态优化调度下下泄径流与自然径流过程对比

图3为典型年水电站群生态调度下羊曲水电站下泄径流与自然径流过程对比。从图3可以看出,枯水年下泄径流过程在不同解之间差异较大,表明枯水年水电站群生态调度对径流的改变程度较为显著。在最优解3的情况下,水电站的下泄径流和自然径流过程差异最大,说明水电站群生态调度对下游生态系统的健康造成较大影响,如果一味追求发电量最大,将会显著胁迫羊曲水电站下游生态系统向非健康状态退化。水电站群生态调度下,平水年和丰水年羊曲水电站下泄径流在不同解之间以及与自然径流之间的差异均较小,但在产卵期,最优解3的情况会对径流过程产生较大影响。径流越大,水电站群调度对径流情势的影响越小,在实际调度中需要重点关注枯水年水电站群的生态调度。

为了进一步评估不同典型年水电站群生态调度对径流情势的影响,采用IHA表征羊曲水电站下游径流情势变化,限于篇幅,本文只给出了改变度相对变化较大的指标,即:相对变化量大于1%的指标和小于-0.5%的指标,结果如图4所示。从图4中可以看出,不同典型年水电站群生态调度对羊曲水电站IHA各指标的影响基本一致,对年发生高/低流量脉冲次数和流量平均增加率/减少率的影响均最为显著。枯水年在最优解3的情况下,流量平均减

少率和流量平均增加率指标相对变化量最大,分别为 29.69% 和 23.63%,其他指标变化较小,均处于 RVA 指标分级的低影响(0~33%)范围内。枯水年水电站群生态调度对 IHA 各指标影响最大,随着由枯水年到丰水年转变,羊曲水电站 IHA 各指标的相对变化量减小,水电站群生态调度对羊曲水电站径流情势的影响呈现出下降趋势。由于羊曲水电站的调节能力有限,生态调度对其径流情势的影响主要集中在部分指标。

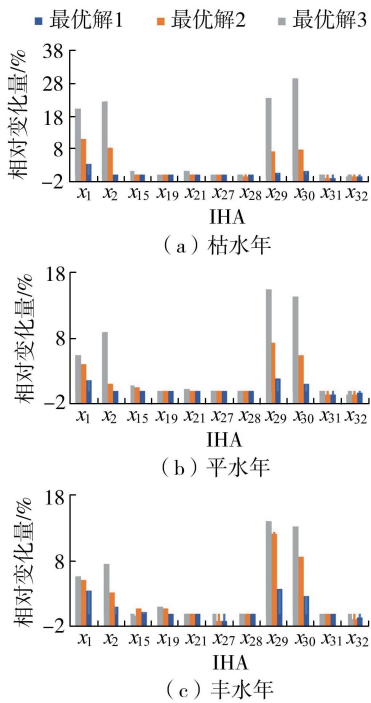


图 4 典型年羊曲水电站 IHA 各指标的相对变化量
Fig.4 Relative changes of IHAs in typical years at Yangqu Hydropower Station

3.4 生态优化调度下年发电量和径流情势变化

图 5 为水电站群生态优化调度不同最优解情况下,典型年羊曲水电站年发电量和径流情势相对变化量的对比结果。从图 5(a)可以看出,生态优化调度取最优解 3 的情况下,枯水年羊曲水电站年发电量增加最为显著,相对变化量超过 25%,平水年和

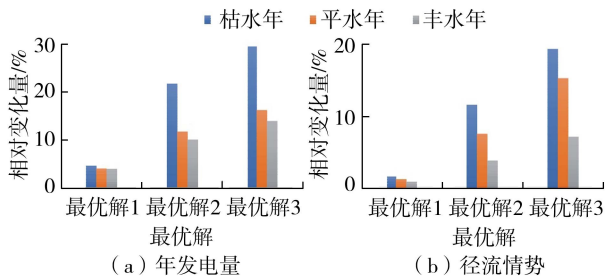


图 5 羊曲水电站年发电量和径流情势相对变化量
Fig.5 Relative variations of annual power generation and runoff regime at Yangqu Hydropower Station

丰水年年发电量相对变化量超过 10%。从图 5(b)可以看出,生态优化调度在不同最优解的情况下,不同典型年羊曲水电站径流情势也发生了显著变化。在羊曲水电站实际调度运行中,需要充分考虑发电量和径流情势的竞争关系,制定合理可行的调度规则。

4 结 论

- a. 风-水-光多能互补系统在获得最大发电效益时发电出力波动性最大,给系统调度运行增加了难度。枯水年多能互补系统的生态调度运行和径流较少导致系统发电量越大时,下游径流情势变化也越大;发电出力波动越小时,径流情势变化也越小。
- b. 实施生态调度后,不同典型年各水电站发电出力过程差异较大。班多和羊曲水电站调节性能有限,需要通过较为频繁生态调度,以保证足够的发电出力;玛尔挡水电站发电出力过程和径流过程有较强的一致性,丰水季玛尔挡水电站发电出力最大。
- c. 生态调度模型发电量最大最优解情况下,枯水年羊曲水电站发电量增加最为显著,增量超过 25%,平水年和丰水年发电量增量超过 10%;相同情况下,羊曲水电站径流情势变化最为显著,枯水年生态优化调度对径流情势的影响也更加显著。

参考文献:

[1] 张振东,唐海华,覃晖,等. 风光水互补系统发电效益-稳定性多目标优化调度[J]. 水利学报,2022,53(9): 1073-1082. (ZHANG Zhendong,TANG Haihua,QIN Hui, et al. Benefit-stability multi-objective optimal operation of wind-solar-hydropower hybrid system [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53 (9): 1073-1082. (in Chinese))

[2] 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 energies [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53 (11): 1280-1290. (in Chinese))

[3] 熊力,罗咏,刘镇洋,等. 内蒙古自治区新能源开发布局与有序利用规划方案研究[J]. 水力发电,2023,49(11):7-10. (XIONG Li,LUO Yong,LIU Zhenyang, et al. Research on new energy development layout and orderly utilization planning scheme in inner Mongolia autonomous region [J]. Water Power, 2023, 49 (11): 7-10. (in Chinese))

[4] 陈述,赵金凡,陈云,等. 水风光多能互补联合运行增益分配研究[J]. 科学技术与工程,2022,22(10): 3991-3997. (CHEN Shu,ZHAO Jinfan,CHEN Yun, et al. Gain

- distribution of water-wind-solar multi-energy complementary operation[J]. Science Technology and Engineering,2022, 22(10):3991-3997. (in Chinese))
- [5] VALLEJO-DÍAZ A, HERRERA-MOYA I, FERNÁNDEZ-BONILLA A, et al. Wind energy potential assessment of selected locations at two major cities in the Dominican Republic, toward energy matrix decarbonization, with resilience approach[J]. Thermal Science and Engineering Progress,2022,32:101313.
- [6] 纪昌明,马皓宇,彭杨. 面向梯级水库多目标优化调度的进化算法研究[J]. 水利学报,2020,51(12):1441-1452. (JI Changming, MA Haoyu, PENG Yang. Research on evolutionary algorithms for multi-objective optimal operation of cascade reservoirs[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2020,51(12):1441-1452. (in Chinese))
- [7] 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))
- [8] 闫星,马永胜. 考虑水生态目标的月河流域生态联合调度研究[J]. 水利与建筑工程学报,2022,20(6):216-222. (YAN Xing, MA Yongsheng. Eco-combined operation in Yue River Basin considering water ecological objectives [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering,2022,20(6):216-222. (in Chinese))
- [9] MANCARELLA P. MES (multi-energy systems): an overview of concepts and evaluation models[J]. Energy, 2014,65:1-17.
- [10] 李继清,龙健,刘洋. 基于水光电力系统时序生产模拟模型的水光优化配比研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(1):1-10. (LI Jiqing, LONG Jian, LIU Yang. Study on optimal ratio of water and light based on time-series production simulation model of hydro-optical power system[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2024,52(1):1-10. (in Chinese))
- [11] WANG Xianxun, VIRGUEZ E, XIAO Weihua, et al. Clustering and dispatching hydro, wind, and photovoltaic power resources with multiobjective optimization of power generation fluctuations;a case study in southwestern China [J]. Energy,2019,189:116250.
- [12] MING Bo, LIU Pan, CHENG Lei, et al. Optimal daily generation scheduling of large hydro-photovoltaic hybrid power plants[J]. Energy Conversion and Management, 2018,171:528-540.
- [13] 杨秀媛,樊新东,陈麒宇. 考虑振动区的水电厂控制策略及其在风水协同运行中的应用[J]. 中国电机工程学报,2019,39(18):5433-5441. (YANG Xiuyuan, FAN Xindong, CHEN Qiyu. Control strategy of hydropower plant considering vibration region and its application in coordinated hydro and wind power generation [J]. Proceedings of the CSEE,2019,39(18):5433-5441. (in Chinese))
- [14] 朱燕梅,陈仕军,马光文,等. 计及发电量和出力波动的水光互补短期调度[J]. 电工技术学报,2020,35(13):2769-2779. (ZHU Yanmei, CHEN Shijun, MA Guangwen, et al. Short-term complementary operation of hydro-photovoltaic integrated system considering power generation and output fluctuation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35 (13): 2769-2779. (in Chinese))
- [15] 陈述,赵金凡,陈云,等. 水光互补项目光伏并网运行增益研究[J]. 可再生能源,2021,39(8):1094-1099. (CHEN Shu, ZHAO Jinfan, CHEN Yun, et al. Analysis of gain in grid-connected operation of hydro-photovoltaic complementary power station [J]. Renewable Energy Resources,2021,39(8):1094-1099. (in Chinese))
- [16] 黄志鸿,董增川,周涛,等. 面向生态友好的水库群调度模型[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(3):202-208. (HUANG Zhihong, DONG Zengchuan, ZHOU Tao, et al. Group operation model for ecological friendly reservoir [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2020,48(3):202-208. (in Chinese))
- [17] 李银银,周建中,张世钦,等. 雅砻江-金沙江-长江梯级水电站群联合调度图研究[J]. 水力发电学报,2016,35(4):32-40. (LI Yinyin, ZHOU Jianzhong, ZHANG Shiqin, et al. Combined dispatching charts of cascade hydropower stations on Yalong River, Jinsha River and Yangtze River[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016,35(4):32-40. (in Chinese))
- [18] 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))
- [19] 白涛,洪良鹏,喻佳,等. 基于开源和节流的乌伦古河流域水库群生态调度[J]. 水资源保护,2022,38(5):132-140. (BAI Tao, HONG Liangpeng, YU Jia, et al. Ecological operation of reservoir group in the Ulungur River Basin through increasing water sources and reducing water consumption[J]. Water Resources Protection,2022,38(5):132-140. (in Chinese))
- [20] 陈述,纪勤,颜克胜,等. 长江流域水资源-经济-生态系统的耦合协调及影响因素研究[J]. 水资源与水工程学报,2023,34(3):28-36. (CHEN Shu, JI Qin, YAN Kesheng, et al. Coupling coordination and influencing factors of water-economy-ecology system in the Yangtze River Basin[J]. Journal of Water Resources and Water

Engineering,2023,34(3):28-36. (in Chinese))

[21] RICHTER B D,BAUMGARTNER J V,POWELL J,et al. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems[J]. Conservation Biology,1996,10(4):1163-1174.

[22] 武连洲,白涛,黄强. 基于 RVA 阈值区间集成的河道内生态需水计算与应用[J]. 水资源保护,2022,38(6):168-174. (WU Lianzhou, BAI Tao, HUANG Qiang. Integrated calculation of ecological water demand of rivers based on RVA threshold interval and its application[J]. Water Resources Protection,2022,38(6):168-174. (in Chinese))

[23] SHIAU J T,WU Fuchun. Feasible diversion and instream flow release using range of variability approach [J]. Journal of Water Resources Planning and Management,2004,130(5):395-404.

[24] 高英,苏华英,于洁,等. 乌江流域水光互补梯级蓄能调度图绘制[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(5):56-64. (GAO Ying, SU Huaying, YU Jie, et al. Drawing of Hydro-PV complementary cascade energy storage dispatching diagram in Wujiang River Basin[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(5):56-64. (in Chinese))

[25] REN K, HUANG S, HUANG Q, et al. Assessing the reliability, resilience and vulnerability of water supply system under multiple uncertain sources[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 252: 119806.

[26] 闻昕,秦济森,谭乔凤,等. 基于余留期效益函数的水光互补随机优化调度方法[J]. 水资源保护,2023,39(6):23-31. (WEN Xin, QIN Jisen, TAN Qiaofeng, et al. Research on stochastic optimal operation of hydro-photovoltaic complementary based on utility function of carryover stage[J]. Water Resources Protection,2023,39(6):23-31. (in Chinese))

[27] 尹丽君,许昌,黄显峰,等. 水光互补基地水库调度图绘制及应用策略[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(5):65-69. (YIN Lijun, XU Chang, HUANG Xianfeng, et al. Drawing and application strategy of dispatching diagram for water-light complementary base reservoir [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(5):65-69. (in Chinese))

[28] 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))

[29] DEB K, JAIN H. An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point-based nondominated sorting approach, part I: solving problems with box constraints [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation,2014,18(4):577-601.

[30] 方国华,李智超,钟华昱,等. 考虑供水均衡性的南水北调东线工程江苏段优化调度[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(3):10-18. (FANG Guohua, LI Zhichao, ZHONG Huayu, et al. Optimal operation of Jiangsu section of the eastern route of the South-to-North Water Diversion Project considering the water supply balance [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(3):10-18. (in Chinese))

[31] 陶洁,王沛霖,王辉,等. 基于 A-NSGA-Ⅲ的引江济淮工程河南段水资源优化配置研究[J]. 水利水电科技进展,2023,43(6):111-119. (TAO Jie, WANG Peilin, WANG Hui, et al. Research on water resources optimal allocation in Henan Section of Yangtze River to Huaihe River Water Diversion Project based on A-NSGA-Ⅲ algorithm[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2023,43(6):111-119. (in Chinese))

(收稿日期:2023-09-14 编辑:施业)

+++++

(上接第 19 页)

[29] 吴健,李英花,黄利亚,等. 东北地区产水量时空分布格局及其驱动因素[J]. 生态学杂志,2017,36(11):3216-3223. (WU Jian, LI Yinghua, HUANG Liya, et al. Spatiotemporal variation of water yield and its driving factors in Northeast China [J]. Chinese Journal of Ecology,2017,36(11):3216-3223. (in Chinese))

[30] 闫晓露,李欣媛,刘澄浩,等. 生态系统服务簇空间演变轨迹及其社会-生态驱动的地理探测:以大连市为例[J]. 生态学报,2022,42(14):5734-5747. (YAN Xiaolu, LI Xinyuan, LIU Chenghao, et al. Spatial evolution trajectory of ecosystem service bundles and its social-ecological driven by geographical exploration:a case study of Dalian[J]. Acta Ecologica Sinica,2022,42(14):5734-5747. (in Chinese))

[31] 刘美娟,仲俊涛,王蓓,等. 基于 InVEST 模型的青海湖流域产水功能时空变化及驱动因素分析[J]. 地理科学,2023,43(3):411-422. (LIU Meijuan, ZHONG Juntao, WANG Bei, et al. Spatiotemporal change and driving factor analysis of the Qinghai Lake Basin based on InVEST model[J]. Scientia Geographica Sinica,2023,43(3):411-422. (in Chinese))

[32] XIANG Hengxing, ZHANG Jian, MAO Dehua, et al. Identifying spatial similarities and mismatches between supply and demand of ecosystem services for sustainable Northeast China [J]. Ecological Indicators, 2022, 134: 108501.

(收稿日期:2024-01-28 编辑:施业)