DOI:10.20040/j.cnki.1000-7709.2025.20250505

考虑风光不确定性的水库多目标优化调度

冉洪伟[1],任琰琰[1],吴星烨[1],杨 棣[1],苏 健[1],陈 旭[2],徐陈飞[2],付乐盈[2]

(1. 中国长江电力股份有限公司,湖北 宜昌 443002;2. 湖北省电力规划设计研究院有限公司,湖北 武汉 430000)

摘要:针对水库调度过程中面临的风光出力不确定性与生态流量需求问题,提出了一种水风光互补系统的多目标优化调度新方法,即通过场景生成与聚类量化风光不确定性曲线,构建考虑生态流量与新能源消纳的多目标优化模型,并采用NSGA-Ⅱ算法进行了求解,进一步结合组合赋权法与TOPSIS法确定了兼顾各目标的水库运行优化方案。实例分析结果表明,新方法有效平衡了发电、生态保护与新能源消纳之间的竞争关系,在仅损失3.9%的总发电量情况下,生态流量短缺量减少了80.4%,同时新能源消纳量提升了5.6%,由此实现了发电效率、生态保护与新能源消纳的多目标协同优化。所提方法对可再生能源高比例接入下梯级水库多目标协同调度策略的制定具有借鉴意义。

关键词:多能互补;不确定性;生态流量;水库调度;综合评价

中图分类号:TV679.1+2 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-7709(2025)07-0213-05

1 引言

在中国的"碳达峰、碳中和"战略目标推动下,我国能源结构向清洁低碳转型,风能、光伏等可再生能源成为电力系统的重要组成部分[1]。然而,风光出力具有的间歇性和波动性,给电力系统的稳定带来了重大挑战,对水库的协同调度提出了更高要求[2];同时,随着生态环境保护意识的增强,下游河道的生态流量需求日益受到重视。目前,如何量化不确定性是一个前沿难题,ZHANG S等[3-4]通过约束不确定范围或场景生成与聚类方法削减后构建多种不同的场景集合,未对生成各类的典型风光出力场景进行量化,致使后续优化调度模型中需要考虑存在的大量场景,增加了多目标优化调度模型计算的复杂度。长江流域快速发展风光等新能源与水电形成互补,但面临生态流量保障与新能源消纳问题,LIU Z等[5]提出通过将生态流量目标纳入水库调度以解决下游流域生态用水问题,但却并未考虑新能源消纳需求。如何在风光不确定背景下协调发电目标、生态流量需求与新能源消纳,成为水库多目标调度中亟待解决的关键问题。对此,本文以长江流域典型支流为例,提出一种水风光互补系统多目标优化调度新方法,通过C-vine Copula结合同步回代法量化风光不确定性,引入生态流量目标,构建多目标生态调度模型与决策评估体系;最后,通过计算长江流域典型支流的水位调度过程,为实现发电效益、生态保护与新能源消纳的协同优化提供参考。

2 研究方法

2.1 生态流量计算

为确定水库下游流域的适宜生态流量,采用Tennant法基于实测水文数据开展计算[6]。将水量丰枯划分为较枯和较丰时段,分别对应河流的低流量期和高流量期。在水量较枯时段,取多年平均天然流量的20%作为生态流量,以确保在枯水期维持河流生态系统的基本功能;在水量较丰时段,则取多年平均天然流量的30%,以支持河流生态系统的健康发展和生物多样性的维持。

2.2 风光不确定性分析

2.2.1 风光场景生成

基于一种多阶段建模方法开展场景生成[4]。在初始阶段,利用马尔科夫链对风电和光伏的时序特性进行建模,模拟各时间段的风光状态变化

收稿日期:2025-03-19,**修回日期**:2025-04-15

基金项目:中国长江电力股份有限公司资助(项目编号:2423020037;合同编号:Z242302041)

作者简介:冉洪伟(1984-),男,高级工程师,研究方向为水利水电工程,E-mail:ran_hongwei@ctg.com.cn

通讯作者:陈旭(1990-),男,高级工程师,研究方向为电力系统规划设计,E-mail:chenxusj@powerchina-hb.com

中国知网 https://www.cnki.net

过程，并结合蒙特卡罗抽样生成具有时间相关性的初始风光出力场景集合；随后引入 C-vine Copula 函数对初级场景进行多维度重构，形成反映风光多能互补特性的耦合场景集。

2.2.2 风光场景削减与典型场景生成

对于生成的大量风电和光伏出力场景集，采用同步回代缩减法进行场景削减[7]，获得典型场景集。首先建立等概率分布的初始场景空间；随后通过计算场景间的概率差异矩阵，逐步移除差异度最小的场景对，并将被移除场景的概率重新分配至其空间近邻场景；持续进行这一优化过程，直至场景规模收敛至预设的目标值，确保缩减后的场景集能够保持原始概率分布的关键统计特征；最后通过计算各典型风光出力场景的概率分布特征，并通过加权平均方法生成典型风光出力曲线。

3 水风光互补系统多目标生态优化调度模型

针对以发电为主导、兼顾新能源消纳需求的梯级水电站群，面向水库下游生态流量目标，构建包含发电收益最大化、生态流量短缺量最小和新能源消纳最大的多目标优化模型，实现水—风—光多能互补系统的协同优化调度。

3.1 目标函数

(1)梯级电站发电量最大。针对梯级电站面临的发电效率与能源充分利用的挑战，构建以梯级总发电量 F 最大化为核心目标的调度模型：

$$\max F=\sum_{i=1}^{M}\sum_{t=1}^{T}N_{i,t}\Delta t=\sum_{i=1}^{M}\sum_{t=1}^{T}K_iH_{i,t}Q_{i,t}^{fd}\Delta t \tag{1}$$

式中，F 为整个调度期内梯级水库群的总发电量；M 为梯级水库总数；T 为调度期的总时段长度(选取 1 年共 36 个旬为总时段)；K_i 为水库 i 的发电出力系数；Δt 为时段间隔；$N_{i,t}$、$H_{i,t}$、$Q_{i,t}^{fd}$ 分别为水库 i 在时段 t 的出力、水头、发电流量。

(2)新能源消纳量最大。为缓解高比例新能源并网引发的弃风弃光现象，构建了以风光并网电量 Q_{wp} 最大化为核心目标的优化模型：

$$\max Q_{\mathrm{wp}}=\sum_{t=1}^{T}\sum_{j=1}^{N_{\mathrm{w}}}P_{\mathrm{w},t}+\sum_{t=1}^{T}\sum_{t=1}^{N_{\mathrm{p}}}P_{\mathrm{s},t} \tag{2}$$

式中，N_{w} 为风电场总数；N_{p} 为光伏电场总数；j 为风电场编号；$P_{\mathrm{w},t}$ 为电网在 t 时段实际接纳的风电功率；$P_{\mathrm{s},t}$ 为电网在时段 t 实际接纳的光电功率。

(3)生态流量缺额最小。为缓解梯级电站运行对下游生态系统的负面影响，提出了考虑生态流量需求的优化调度模型，以最小化生态流量缺额 C^{ef} 为目标函数：

$$D_{i,t}^{ef}=\begin{cases}Q_{i,t}^{ef}-Q_{i,t}^{fd}-Q_{i,t}^{qs} & Q_{i,t}^{ef}-Q_{i,t}^{fd}-Q_{i,t}^{qs}\geqslant 0;i=1,2\\ 0 & Q_{i,t}^{ef}-Q_{i,t}^{fd}-Q_{i,t}^{qs}<0;i=1,2\end{cases} \tag{3}$$

$$\min C^{ef}=\sum_{i=1}^{2}\sum_{t=1}^{T}D_{i,t}^{ef}\Delta t \tag{4}$$

式中，$D_{i,t}^{ef}$ 为第 i 个水库 t 时段的生态流量缺额；$Q_{i,t}^{ef}$、$Q_{i,t}^{qs}$ 分别为第 i 个水库 t 时段的生态流量和弃水流量；C^{ef} 为调度期内的生态流量总缺额。

3.2 约束条件

(1)水量平衡约束。其公式为：

$$V_{i,t+1}=V_{i,t}+(Q_{i,t}^{rk}-Q_{i,t}^{fd}-Q_{i,t}^{qs})\Delta t \tag{5}$$

式中，$V_{i,t}$、$V_{i,t+1}$ 分别为第 i 个水库 t、$t+1$ 时段的库容；$Q_{i,t}^{rk}$ 为第 i 个水库 t 时段入库流量。

(2)梯级水库水力联系约束。其公式为：

$$Q_{i,t}^{rk}=Q_{i-1,t-\tau_{i-1}}^{fd}+Q_{i-1,t-\tau_{i-1}}^{qs}+Q_{i,t}^{\mathrm{inflow}} \tag{6}$$

式中，$Q_{i-1,t-\tau_{i-1}}^{fd}$、$Q_{i-1,t-\tau_{i-1}}^{qs}$ 分别为第 $i-1$ 个水库发电、弃水流量；$Q_{i,t}^{\mathrm{inflow}}$ 为第 i 个水库 t 时段区间入流。

(3)电站机组出力约束。其公式为：

$$N_{i,t}^{\min}\leqslant N_{i,t}\leqslant N_{i,t}^{\max} \tag{7}$$

式中，$N_{i,t}^{\min}$、$N_{i,t}^{\max}$ 分别为第 i 个水库 t 时段的最小保证出力、机组最大出力。

(4)水库调蓄和下泄流量约束。其公式为：

$$\begin{cases}Z_{i,t}^{\min}\leqslant Z_{i,t}\leqslant Z_{i,t}^{\max}\\ Q_{i,t}^{\min}\leqslant Q_{i,t}^{fd}+Q_{i,t}^{qs}\leqslant Q_{i,t}^{\max}\end{cases} \tag{8}$$

式中，$Z_{i,t}^{\min}$、$Z_{i,t}^{\max}$ 分别为第 i 个水库 t 时段最小、最大蓄水位；$Q_{i,t}^{\min}$、$Q_{i,t}^{\max}$ 分别为第 i 个水库 t 时段允许下泄流量的下限、上限。

(5)初始边界条件。其公式为：

$$\begin{cases}Z_{i,1}=Z_{i,b}\\ Z_{i,T+1}=Z_{i,e}\end{cases} \tag{9}$$

式中，$Z_{i,1}$ 为第 i 个水库在 $t=1$ 时段的水位；$Z_{i,b}$、$Z_{i,e}$ 分别为调度期初、末水库蓄水位。

(6)相邻调度时段出库流量变幅约束。其公式为：

$$\begin{cases}|\ Q_{i,T}^{\mathrm{out}}-Q_{i,T+1}^{\mathrm{out}}\ |\leqslant\Delta Q_{\max}^{\mathrm{out}}\\ |\ Z_{i,T}-Z_{i,T+1}\ |\leqslant\Delta Z_{\max}\end{cases} \tag{10}$$

式中，$Q_{i,T}^{\mathrm{out}}$、$Q_{i,T+1}^{\mathrm{out}}$ 分别为相邻调度时段的出库流量；$\Delta Q_{\max}^{\mathrm{out}}$ 为相邻时段最大出库流量变幅；$Z_{i,T}$、$Z_{i,T+1}$ 分别为相邻调度时段的水位；$\Delta Z_{\max}$ 为相邻时段最大水位变幅。

中国知网 https://www.cnki.net

3.3　模型求解

NSGA-Ⅱ是一种广泛应用于多目标优化问题的优化算法,该算法通过 Pareto 非支配排序和拥挤度距离计算,在多个相互冲突的目标之间获取最优权衡解集[8]。本文基于 Matlab 编程语言开发了水库多目标优化调度模型,并应用 NSGA-Ⅱ算法对模型进行求解,设置每一代种群数为 50、种群规模为 50、最大进化代数为 1 000、交叉概率为 0.9、变异概率为 0.1,共得到 33 组非劣解集。

3.4　组合赋权与综合评价方法

求得 Pareto 非劣解集后,需评价优化调度模型结果,进而选定梯级电站优化调度方案。采用层次分析法计算主观权重;同时利用 CRITIC 法计算客观权重结合,并通过组合赋权法对指标进行均衡赋权;最后利用 TOPSIS 法,通过引入特定系数 α、β 计算综合权重 ω,并采用差异系数 T' 确定 α、β,实现对调度方案的综合评价[9]。

4　算例分析

4.1　数据说明

以长江流域某典型支流为例,选取流域内 3 座梯级电站(总装机容量 332.2×10^4 kW)及华中某地区并网风光系统构成水风光互补系统,梯级水库详细特征参数见表 1。该区域可再生能源发展迅速,截至 2023 年,风电与光伏装机容量分别达到 67×10^4、69×10^4 kW。当地风光资源呈现季节性特征,风光资源的互补特性与梯级水电的灵活调节能力存在显著协同潜力。然而,在实际调度运行中,需同时兼顾发电效益最大化、生态流量保障和新能源高效消纳等多重目标,导致各目标间产生复杂冲突,传统调度方法难以实现多目标协同优化。

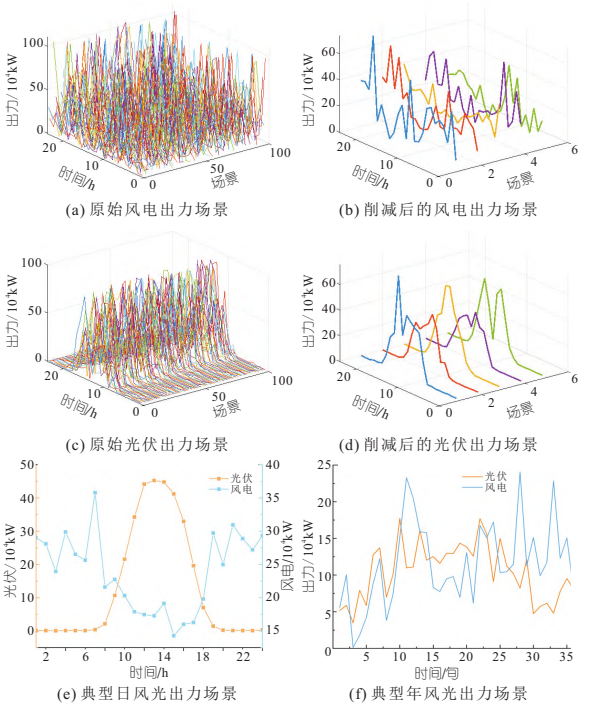
表 1　梯级水库主要参数

Tab. 1　The main parameters of cascade reservoirs

电站名称	总库容 /10^8 m^3	调节库容 /10^8 m^3	装机容量 /MW	平均年发电量 /(10^8 kW·h)	蓄水位 /m
水库 1	45.80	23.83	1 840	39.32	400
水库 2	33.40	19.41	1 212	30.68	200
水库 3	4.89	0.54	270	9.86	80
合计	84.09	43.78	3322	79.86	680

4.2　风光不确定性分析

如图 1 所示,根据该区域给定的风光出力数据,应用场景生成和缩减方法,基于历史风光出力数据构建原始风光出力场景数据集,如图 1(a)、(c)。通过聚类算法,生成代表不同气象条件和出力特征的典型日风光出力过程曲线,如图 1(b)、(d);随后,计算风电典型场景 1～5 出现的概率分布分别为 0.62、0.09、0.09、0.16、0.04,光伏典型场景 1～5 出现的概率分布分别为 0.23、0.18、0.33、0.13、0.13,通过加权平均生成风光出力特征的典型日出力曲线,如图 1(e)。基于此方法,生成对应的风光典型年出力过程,如图 1(f)。



(a) 原始风电出力场景　(b) 削减后的风电出力场景

(c) 原始光伏出力场景　(d) 削减后的光伏出力场景

(e) 典型日风光出力场景　(f) 典型年风光出力场景

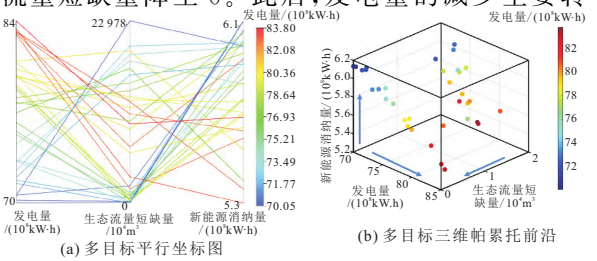
图 1　典型年风光出力场景生成过程

Fig. 1　Typical annual scenario generation process for wind and power output

4.3　多目标生态调度

4.3.1　Pareto 前沿分析

图 2(a)展示了生态流量短缺量与水电站总发电量之间的帕累托前沿,每条曲线上的点均为帕累托最优解。由图 2(a)可看出,随着发电量的减少,生态流量短缺量显著下降,而新能源消纳量则呈现上升趋势。当发电量从 83.77×10^8 kW·h 降至 82.42×10^8 kW·h 时,生态流量缺额减少了 1.13×10^8 m^3,短缺量下降约 95.5%,表明生态流量不足问题得到了显著缓解。当发电量进一步降至 73.25×10^8 kW·h 时,生态流量短缺量降至 0。此后,发电量的减少主要转



(a) 多目标平行坐标图　(b) 多目标三维帕累托前沿

图 2　多目标优化的 Pareto 前沿

Fig. 2　Pareto frontiers for multi－objective optimization

中国知网　https://www.cnki.net

化为新能源消纳量的提升，表明系统优化重点从生态流量保障转向了新能源消纳的最大化。同时，当发电量为 $78.28\times10^8\sim83.77\times10^8$ kW·h 时，发电量的变化主要用于弥补生态流量的缺额，而当发电量小于 78.28×10^8 kW·h 时，则发电量的降低主要用于新能源的消纳，这可能是因为在调度过程中，生态流量的保障优先级高于新能源消纳量，导致后者在优化过程中受到一定程度的限制。图 2(b)进一步将分析扩展到三维空间，其中每个点代表一个帕累托最优解。由图 2(b)可看出，随着发电量的减少，生态流量亏缺量降低，而新能源消纳量则呈现上升趋势，表明发电量、生态流量保障与新能源消纳之间存在着竞争关系。此外，当发电量分别达到 72.80×10^8、75.54×10^8、78.27×10^8、81.03×10^8 kW·h 时，出现显著突变点，可能揭示了多目标优化过程中各目标函数间存在的临界阈值及其非线性权衡特征，与 QIU R 等[10]的研究结果一致。

4.3.2 综合效益分析

通过层次分析法得到总发电量、生态流量短缺量、新能源消纳量 3 个指标的主观权重分别为[0.709，0.174，0.117]；通过 CRITIC 法得到的 3 个指标的客观权重分别为[0.537，0.258，0.205]，差异系数与主客观权重的特定系数分别为 $T'=0.537$、$\alpha=0.806$、$\beta=0.194$，由此求得综合权重 $\omega=[0.675,0.190,0.134]$。所得的对应各电站最终优化调度方案见图 3，各行分别展示了水库 1、2、3 在优化调度下的水位、发电量、入库流量及下泄流量过程。由图 3 可看出，水库 1、2 的水位在调度初期呈现逐渐下降的趋势，而水库 3 的水位则迅速上升至既定峰值，表明水库 1、2 在调度初期承担了较大的发电任务。随着调度期的推进，水库 1、2 的水位逐渐回升，而水库 2、3 的水位在 5 月出现显著下降，这一现象可能与夏季梯级水库发电需求增加有关。由于夏季汛期来水量的增加，水库 1、2 的水位仍保持上升趋势，并于 10 月趋于稳定。水库 3 的水位在短暂下降后迅速回升至峰值。

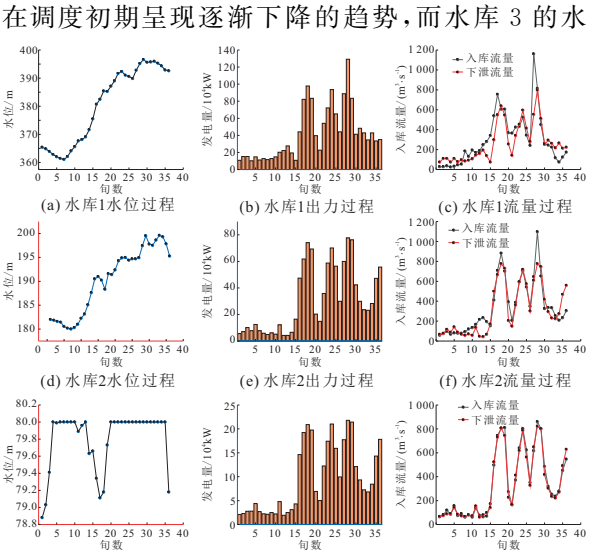


图 3 梯级水库逐旬水位、发电量及流量过程

Fig. 3 Ten-day-by-ten-day water level, power generation and flow processes in the cascade reservoirs

表 2 比较了常规调度方案与优化调度方案在发电量、生态流量及新能源消纳方面的性能差异。由表 2 可知，优化调度方案通过适度降低梯级水库总发电量（减少 3.22×10^8 kW·h），显著缓解了生态流量短缺问题（减少 3.81×10^8 m³），同时实现新能源消纳量的提升（增加 0.324×10^8 kW·h）。这一结果揭示了发电量、生态流量保障与新能源消纳之间的内在权衡关系，表明优化调度方案能够在适度牺牲部分发电效益的前提下，有效平衡生态流量与新能源消纳的需求，优化调度方案通过多目标协同优化机制，实现了水资源与能源的高效配置。

表 2 不同调度方案结果

Tab. 2 Results of different scheduling options

调度方式	总发电量 /(10^8 kW·h)	生态流量短缺量 /10^8 m³	Tennant 法评价结果	新能源消纳量 /(10^8 kW·h)
常规调度	82.74	4.74	中	5.71
优化调度	79.52	0.93	优	6.03
效益/%	−3.9	+80.4	+	+5.6

5 结论

a. 以实现考虑风光不确定性的多目标优化调度为目标，通过引入生态流量及新能源消纳指标，构建了多目标优化调度模型，开展了水风光互补系统的优化调度研究。

b. 基于历史风光出力数据，通过场景生成与削减方法，构建了典型日及典型年风光出力过程曲线。

c. 优化调度结果表明，新能源、生态流量均随发电量的下降而出现不同程度的增加，其中新能源消纳量增幅最小，生态流量增幅最大。

d. 多目标分析表明，发电目标、生态目标和新能源消纳间存在明显的竞争关系。均衡方案较好地协调了各调度目标，在总发电量下降 3.9% 的情况下，生态流量的短缺量下降了 80.4%，同时新能源消纳量上升了 5.6%，提升了水资源的生态利用效率。

e. 未来研究可通过建立考虑新能源随机—模糊双重不确定性的消纳评估体系，结合区域电网特性，开发适应"双高"电力系统的优化调度模型。

中国知网 https://www.cnki.net

参考文献:

[1] 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.

[2] 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.

[3] ZHANG S, GE S, LIU H, et al. Region-based flexibility quantification in distribution systems: An analytical approach considering spatio-temporal coupling[J]. Applied energy, 2024,355:122175.

[4] 曹辉,牟长兴,杨钰琪,等. 多重不确定性下水风光多能互补长期优化调度方法[J]. 人民长江,2024,55(9):26-34.

[5] LIU Z, ZHANG Z, MA H, et al. Optimal scheduling study of cascade hydropower stations to ensure ecological flow requirements—A case study of the Gorge Section of the Yongding River, China[J]. Science of the total environment, 2024, 953: 175977.

[6] 杨国轩,傅志敏,王亚坤,等. 考虑适宜生态流量的水库多目标优化调度研究[J]. 水电能源科学,2025,43(1):192-196.

[7] 罗倩,侯佳辰,刘亚茹,等. 基于扩大区间和改进矩阵的风电日内出力极端场景模拟[J]. 水电与抽水蓄能,2024,10(6):22-28.

[8] 孙佳凯,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.

[9] 王永康,吕谋,李源,等. 基于 NSGA-Ⅲ算法的长距离调水泵站多目标优化调度研究[J]. 水电能源科学,2024,42(5):154-158.

[10] QIU R, WANG D, SINGH V P, et al. Integration of deep learning and improved multi-objective algorithm to optimize reservoir operation for balancing human and downstream ecological needs[J]. Water research, 2024,253:121314.

Multi-objective Optimal Scheduling of Reservoirs Considering Wind and Photovoltaic Uncertainties

RAN Hong-wei[1], REN Yan-yan[1], WU Xing-ye[1], YANG Di[1], SU Jian[1], CHEN Xu[2], XU Chen-fei[2], FU Le-ying[2]

(1. China Yangtze Power Co., Ltd., Yichang 443002, China;
2. Hubei Electric Power Planning and Design Institute Co., Ltd., Wuhan 430000, China)

Abstract: Aiming at the problems of uncertainty in wind and photovoltaic power output and ecological flow demand faced in the process of reservoir dispatching, this study proposes a multi-objective optimal scheduling method for a hydro-wind-photovoltaic complementary system. Firstly, scenario generation and clustering techniques are employed to quantify the uncertainty of wind and photovoltaic power. A multi-objective optimization model is established considering ecological flow and renewable energy accommodation requirements, and solved using the NSGA-Ⅱ algorithm. Furthermore, a combined weighting method and TOPSIS approach are applied to determine the optimal reservoir operation scheme that balances multiple objectives. Case study results demonstrate that the proposed method effectively reconciles the competing demands of power generation, ecological protection, and renewable energy accommodation. Specifically, with only a 3.9% reduction in total power generation, the ecological flow deficit decreases by 80.4%, while renewable energy utilization increases by 5.6%. This achieves coordinated optimization across power generation efficiency, ecological conservation, and renewable energy utilization. The proposed methodology provides valuable insights for formulating multi-objective cooperative scheduling strategies for cascade reservoirs in power systems with high renewable energy penetration.

Key words: multi-energy complementation; uncertainty; ecological flow; reservoir scheduling; comprehensive evaluation

(上接第 222 页)

Evaluation of Ecological Restoration Effect of Songxin Jianshui Section of Heishui River Based on Vague Set Similarity Method

TAN Xiao[1], CHENG Bi-xin[2], SUN Gan[3], TIAN Xiang[2], LI Yong[1], LU Yun[1]

(1. State Key Laboratory of Hydraulics and Development and Prodection of Mountain Rivers, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Shanghai Survey and Design Institute, Shanghai 200093, China;
3. Three Gorges Construction (Group) Co., Ltd., Chengdu 610041, China)

Abstract: The Heishui River, a primary tributary of the Jinshajiang River, has multiple diversion-type hydropower stations forming cascade small hydropower systems, leading to the degradation of fish habitats. To improve fish habitat quality, this study evaluated the effectiveness of three pilot restoration projects (including channel dredging, flow-contracting submerged dikes, and permeable weirs) targeting six protected fish species in the Heishui River. Based on literature review, historical spawning ground surveys, and two-dimensional hydrodynamic model combined with the similarity theory of Vague sets, the restoration effects were analyzed. The results show that without ecological flow discharge, high-suitability grid areas increased by 28.9% (dredging) and 506.4% (dikes), while weirs created 61 m^2 of high-suitability grid areas (initially absent). With 10% ecological flow discharge, high-suitability areas changed by −1.7% (dredging), 42.3% (dikes), and 17.6% (weirs). Restoration effectiveness ranked as: flow-contracting submerged dikes > permeable weirs > channel dredging. This study provides a methodological reference for evaluating habitat restoration projects when target fish requirements are unclear.

Key words: fish habitat requirements;habitat restoration projects; evaluation of restoration effect; Vague set; similarity

中国知网 https://www.cnki.net