

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241538

## 考虑平稳输送的跨断面异质能源互补优化调度研究

易绍雯<sup>1,2</sup>, 闫孟婷<sup>1,2</sup>, 朱燕梅<sup>1,2</sup>, 黄炜斌<sup>1,2</sup>, 马光文<sup>1,2</sup>, 王靖<sup>3</sup>

(1. 四川大学水利水电学院, 四川 成都 610065; 2. 四川大学山区河流保护与治理全国重点实验室, 四川 成都 610065; 3. 国家电网有限公司西南分部调度控制中心, 四川 成都 610041)

**摘要:** 在新型电力系统背景下, 输电网架结构的复杂化为清洁能源跨断面打捆外送带来了新挑战。为此, 提出一种考虑系统跨断面输电平稳性的异质能源互补调度方法。首先, 构建了以发电量最大、各断面输电波动性最小和弃电量最小为目标的中长期优化调度模型, 并采用 NSGA-II 算法求解。然后, 针对传统 NSGA-II 算法在求解梯级水电主导的调度模型时对运行越限情况调整能力较弱的问题, 引入差异化探索矩阵优化变异算子, 提升算法对约束边界的自适应调节能力。最后, 以雅砻江清洁能源基地为算例, 通过对比不同典型年计算结果验证了所构建的三目标模型在描述异质能源系统跨断面输电问题时具有较好的适用性, 对比改进前后算法的错误率和帕累托解占比指标验证了改进后的 NSGA-II 算法具有更强的自适应能力。

**关键词:** 异质能源互补系统; 跨断面输电; 水风光一体化; 多目标优化; 改进 NSGA-II 算法

### Study on optimal scheduling of cross-section heterogeneous energy complementary optimization considering stable transmission

YI Shaowen<sup>1,2</sup>, YAN Mengting<sup>1,2</sup>, ZHU Yanmei<sup>1,2</sup>, HUANG Weibin<sup>1,2</sup>, MA Guangwen<sup>1,2</sup>, WANG Jing<sup>3</sup>

(1. College of Water Resource and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 3. Dispatching Control Center of Southwest Branch, State Grid Corporation of China, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** In the context of new power systems, the increasing complexity of transmission grid structures poses new challenges for bundled delivery of clean energy sources across network sections. To address this issue, a heterogeneous energy complementary dispatching method is proposed that accounts for the smooth delivery across the transmission sections of the system. First, a mid- to long-term multi-objective optimal dispatch model is constructed with the objectives of maximizing power generation, minimizing transmission fluctuations across sections, and minimizing power curtailment. The model is solved by the NSGA-II algorithm. Then, to overcome the weak adjustment ability of the traditional NSGA-II algorithm in handling operational constraint violations when solving scheduling models dominated by cascade hydropower stations, a differentiated exploration matrix is introduced to optimize the mutation process, thereby enhancing the algorithm's adaptive adjustment capability at constraint boundaries. Finally, taking the Yalong River clean energy base as an example, the applicability of the constructed three-objective model in describing the cross-section transmission problem of heterogeneous energy systems is verified by comparing the computational results across different typical years. Furthermore, the stronger adaptive ability of the improved NSGA-II algorithm is demonstrated by comparing the error rate and percentage of Pareto solution metrics before and after the improvement.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFB0905204).

**Key words:** heterogeneous energy complementary system; cross-section transmission; hydro-wind-solar integration; multi-objective optimization; improved NSGA-II algorithm

## 0 引言

《中华人民共和国经济和社会发展第十四个五

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2018YFB0905204)

年规划和 2035 年远景目标纲要》提出, 要建设一批集成水风光火储多能互补的清洁能源基地, 推动经济社会绿色低碳转型。截至 2024 年 9 月, 我国新能源装机容量已达到约 17.3 亿 kW, 其中风光电站装机合计约 12.5 亿 kW。然而以风能、光能为代表的

新能源电源出力具有波动性、随机性特征,直接并网会对电力系统的稳定运行带来不利影响<sup>[1-3]</sup>,通过水电这一灵活性电源平抑新能源波动性,进行异质能源互补调度已成为提高新型电力系统可靠性与新能源消纳水平的必然选择<sup>[4]</sup>。同时随着新能源并网规模的不断扩大,外送通道架构不能完全满足电力送出需求,成为了制约新能源电力消纳的重要因素。我国持续推进跨省、跨区输电通道建设,形成了复杂、多维、多约束的网架拓扑结构,极大地缓解了清洁电力生产与负荷中心的空间不协调性,但同时也对新能源调度方式提出了新要求。构建考虑多输电通道约束的异质能源互补优化调度模型有利于进一步促进清洁能源基地资源配置,提升新型电力系统中的新能源渗透率。

考虑到水电主导的异质能源互补系统联合运行不仅需要满足生态、防洪、发电、供水等传统调度目标,还需要统筹源网侧多主体的利益要求,单一目标无法准确描述实际工程的运行情况,目前学者的研究更多着眼于多能互补优化调度的多目标问题。文献[5]综合考虑电网潮流与光伏不确定性,构建了兼顾发电效益与电网消纳能力的水光互补中长期优化模型;文献[6]以系统剩余波动最小和径流情势变化最小为目标构建模型,分析了生态目标和兴利目标的竞争关系;文献[7-8]综合考虑多能互补系统运行效益与网源协调性目标进行经济性分析;文献[9]考虑电网局部和整体需求,以输电通道利用率最大及源荷匹配最优为目标构建水风光多能互补短期调度模型并验证了模型的有效性。以上研究虽对综合能源系统优化调度的源、网侧运行需求有所涉及,但仍欠缺对系统所面临的电网侧跨断面输电送出平稳性要求的考虑。

各目标间的冲突性、异质能源间的高耦合度、目标和约束的非线性等特点增加了多目标多能互补优化调度问题求解的难度,因此,国内外学者对各种最优化决策算法在多能互补调度中的应用进行了探索。非线性规划<sup>[10-13]</sup>、动态规划<sup>[14-18]</sup>等方法在解决多能互补调度求解问题时均表现出了良好的适用性,然而随着多能互补系统中水力电力联系复杂性进一步提高,规划类方法的解耦及全局搜索能力缺陷逐渐凸显。启发式算法具有自优化能力,不易收敛至局部最优,因此如粒子群算法<sup>[19-20]</sup>、遗传算法<sup>[21-22]</sup>、蚁群算法<sup>[23-24]</sup>、模拟退火算法<sup>[25]</sup>等在求解多能互补模型时均有所应用。然而该类算法通常不具备直接求解多目标问题的能力,需要决策者对目标进行处理,求解模型时亦受到决策者主观因素导向。NSGA-II算

法(non-dominated sorting genetic algorithm-II, NSGA-II)引入非支配排序思想,给出一系列非支配解,再由决策者进行优中择优,在优化调度模型求解中表现良好<sup>[26-28]</sup>,但必须考虑到其应用在水风光优化调度问题时临界情况响应能力不足的问题。随着人工智能技术的发展,强化学习相关方法也有所应用<sup>[29-31]</sup>,但在目前阶段强化学习方法机理性较弱,对综合能源系统实际调度情况的刻画有待进一步研究。

综上所述,本文构建兼顾电源侧发电能力、电网侧出力送出平稳性和清洁能源消纳的异质能源中长期互补优化调度模型。基于 $\varepsilon$ -贪心策略思想引入差异化探索矩阵对NSGA-II算法进行改进以提高其临界情况下的自适应能力,采用改进后的算法进行模型求解,并以雅砻江清洁能源基地作为算例,分析了本文所构建模型及求解算法的合理性与适用性。研究成果可为大型清洁能源基地进行中长期多能互补优化调度提供参考。

## 1 互补优化调度模型构建

对于电源侧,互补优化调度运行应尽可能提高发电效益,因此目标 I 为异质能源互补系统总发电量最大,如式(1)所示。

$$\max f_E = \sum_{t=1}^T \left( \sum_{i=1}^I P_{i,t} \cdot \Delta t \right) \quad (1)$$

式中:  $f_E$  为系统总发电量;  $T$  为计算时段总数;  $t$  为时段序号;  $I$  为异质能源电站总数;  $i$  为电站序号;  $P_{i,t}$  为第  $i$  个异质电源  $t$  时段的出力;  $\Delta t$  为时段间隔。

若系统中包含水电,则水电站出力的计算方法如式(2)所示。

$$P_{i,t} = k_i Q_{i,t} H_{i,t} \quad \forall i \in m_h \quad (2)$$

式中:  $k_i$  为第  $i$  个水电站的出力系数;  $Q_{i,t}$  为第  $i$  个水电站  $t$  时段的发电流量;  $H_{i,t}$  为第  $i$  个水电站  $t$  时段的净水头;  $m_h$  为水电站总数。

对于电网侧,则应当考虑多能互补系统向各个断面输出尽可能平稳的出力过程。尤其在枯水期时天然来水减少,水电的发电能力受到影响,调节能力有所下降,系统面临的平稳送出难度进一步提高。因此目标 II 为枯水期(12月至次年4月)各断面送出力标准差最小,如式(3)所示。

$$\min f_S = \sum_{c=1}^C \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^{T_d} (P_{c,t}^{\text{out}} - \overline{P_c^{\text{out}}})^2}{T_d}} \quad \forall t \in T_d \quad (3)$$

其中

$$P_{c,i}^{\text{out}} = \begin{cases} D_c & P_{c,t}^s \geq D_c \\ \sum_{i=1}^I \mu_{i,t} P_{i,t} & P_{c,t}^s < D_c \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $f_s$  为各断面输电出力标准差;  $C$  为断面总数;  $c$  为断面序号;  $T_d$  为枯水期计算时段总数;  $P_{c,i}^{\text{out}}$  为第  $c$  个断面  $t$  时段实际送出出力;  $\overline{P_c^{\text{out}}}$  为第  $c$  个断面枯水期平均送出出力;  $D_c$  为第  $c$  个断面输电通道容量;  $P_{c,t}^s$  为第  $c$  个断面  $t$  时段拟送出出力;  $\mu_{i,t}$  为第  $i$  个异质能源电站  $t$  时段送出比例。

同时兼顾新型电力系统构建需要, 通过异质能源互补调度提高电网新能源渗透率, 因此目标 III 为弃电量最小, 如式(5)所示。

$$\min f_L = \sum_{t=1}^T L_t \cdot \Delta t \quad (5)$$

其中

$$L_t = \begin{cases} 0 & P_{c,t}^s \leq D_c \\ P_{c,t}^s - D_c & P_{c,t}^s > D_c \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $f_L$  为弃电量;  $L_t$  为  $t$  时段弃电量。

互补优化调度模型的约束条件包括电站出力约束、非负约束等。

$$P_{i,t}^{\min} \leq P_{i,t} \leq P_{i,t}^{\max} \quad (7)$$

式中:  $P_{i,t}^{\max}$ 、 $P_{i,t}^{\min}$  分别为第  $i$  个异质电源  $t$  时段的出力上、下限。

若系统中包含水电, 则还需要考虑水量平衡约束、水电站水位约束、流量约束等。

$$\begin{cases} V_{i,t+1} = V_{i,t} + (R_{i,t} - Q_{i,t} - S_{i,t}) \cdot \Delta t \\ R_{i,t} = I_{i,t} + Q_{i-1,t} + S_{i-1,t} \\ Z_{i,t}^{\min} \leq Z_{i,t} \leq Z_{i,t}^{\max} \\ Q_{i,t}^{\min} \leq Q_{i,t} \leq Q_{i,t}^{\max} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $V_{i,t}$ 、 $R_{i,t}$ 、 $S_{i,t}$  分别为第  $i$  个水电站  $t$  时段的库容、入库流量和弃水流量;  $I_{i,t}$  为第  $i$  个水电站与上一梯级水电站间的区间流量;  $Z_{i,t}$ 、 $Z_{i,t}^{\max}$  和  $Z_{i,t}^{\min}$  分别为第  $i$  个水电站  $t$  时段的水位及其上、下限;  $Q_{i,t}$ 、 $Q_{i,t}^{\max}$  和  $Q_{i,t}^{\min}$  分别为第  $i$  个水电站  $t$  时段发电流量及其上、下限。

## 2 改进的 NSGA-II 算法

NSGA-II 算法是求解多目标模型的智能算法, 通过个体间的非支配排序对种群进行分级, 计算拥挤距离选择优质个体组成均匀的帕累托前沿, 并通

过精英保留策略确保优质个体不会被淘汰。本文对离散化的水库水位进行实数编码作为个体的染色体, 为了提高 NSGA-II 算法在异质能源互补优化调度问题求解中的适用性, 对其进行了改进。

### 2.1 佳点集种群初始化

初代种群通常在可行域中随机生成, 该方法的弊端在于如果随机生成的个体过于集中在同一区域, 那么种群对于可行域空间中的信息利用较少, 一定程度上减弱了对解空间的探索能力, 降低了种群多样性。为解决这一问题, 引入佳点集理论在解空间中均匀选点, 令初始种群个体均匀地分布在解空间内。随机初始化和佳点集初始化方法在三维空间中选点对比如图 1 所示。

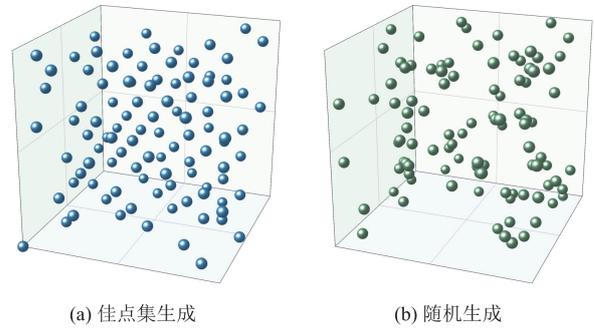


图 1 佳点集生成与随机生成效果对比

Fig. 1 Comparison of the effects of good point set generation and random generation

### 2.2 引入差异化探索矩阵的变异操作

在水电主导的异质能源互补调度问题求解过程中, 所面临的主要难题是当前时段水库运行水位对上一时段运行情况的依赖关系引起的可行域重构。实际上当前时段的水库水位运行允许范围并非固定的, 其上下限随着上游电站下泄流量、上一时段水库水位等因素变化而在死水位和正常蓄水位之间变动, 如果解无法满足这一实际可行域, 将产生不可行解, 意味着水库临界甚至越界运行。传统遗传算法中变异操作的无向性和随机性虽然为算法提供了一定的全局探索能力, 但在决策变量存在越界风险时, 其无向性特点有可能导致子代中产生劣质解和不可行解, 从而降低种群个体质量。考虑到这一问题, 本文将  $\varepsilon$ -贪心策略的思想引入 NSGA-II 算法中, 产生差异化探索矩阵对个体变异进行诱导, 在规避重构可行域计算困难的同时, 提升算法探索能力和自适应能力。  $\varepsilon$ -贪心策略通常用以平衡探索和利用的关系, 基于该思想在进行变异操作时, 考虑目前所面临越界风险, 令对应时段的决策变量较大概率直接向界内方向变异, 较小概率执行其他变异

动作，从而在提高个体质量、提升计算效率的同时保留对解空间的探索能力。

### 2.3 改进后 NSGA-II 算法执行步骤

Step1 利用佳点集方法产生初始种群。

Step2 随机选取种群中的个体作为父本进行交叉、变异产生子代，其中引入差异化探索矩阵进行变异的方法如下。

1) 识别越界状态时段。根据染色体序列进行计算，若某时刻的决策变量存在超越可行域上界的风险，则在差异化探索矩阵对应位置中记录包含方向和概率信息的元素  $\phi_{i,t} = -\varepsilon_{i,t}$ ；若决策变量存在超越可行域下界的风险，则类似的记录元素  $\phi_{i,t} = \varepsilon_{i,t}$ ，其中  $\varepsilon_{i,t}$  为利用率，为保证算法以较大的概率执行有益的操作，取值范围为 (0.5,1]。处于可行域中的决策变量则不进行特殊标记，令  $\phi_{i,t} = 0$ 。最终得到差异化探索矩阵  $M$ 。

2) 基于差异化探索矩阵进行变异操作。读取对应的差异化探索子矩阵  $M_i$ ，对水位序列  $Z_i$  进行变异操作。如果  $\phi_{i,t} > 0$ ，则进行式(9)的变异；如果

$\phi_{i,t} < 0$ ，则进行式(10)的变异；如果  $\phi_{i,t} = 0$ ，则进行随机变异。

$$Z'_{i,t} = \begin{cases} Z_{i,t} + \omega \cdot (Z_{i,t}^{\max} - Z_{i,t}) & \varepsilon \leq \varepsilon_{i,t} \\ \text{else} & \varepsilon > \varepsilon_{i,t} \end{cases} \quad (9)$$

$$Z'_{i,t} = \begin{cases} Z_{i,t} + \omega \cdot (Z_{i,t}^{\min} - Z_{i,t}) & \varepsilon \leq \varepsilon_{i,t} \\ \text{else} & \varepsilon > \varepsilon_{i,t} \end{cases} \quad (10)$$

式中： $Z'_{i,t}$  为第  $i$  个水电站  $t$  时段变异后的水位； $\varepsilon$  为判断系数； $\omega$  为折算参数， $\varepsilon$ 、 $\omega$  均通过在 (0,1] 间随机采样生成。

Step3 将子代和父代合并形成临时种群。计算临时种群中每一个体的目标值，采用非支配排序将种群分级，分别计算各个层级中每一个体的拥挤距离。

Step4 根据层级与拥挤距离，选择种群中的优质个体形成下一代种群，保持种群数量不变，

Step5 重复 Step2—Step4，直至满足最大迭代次数，得到最终种群。

算法执行流程如图 2 所示。

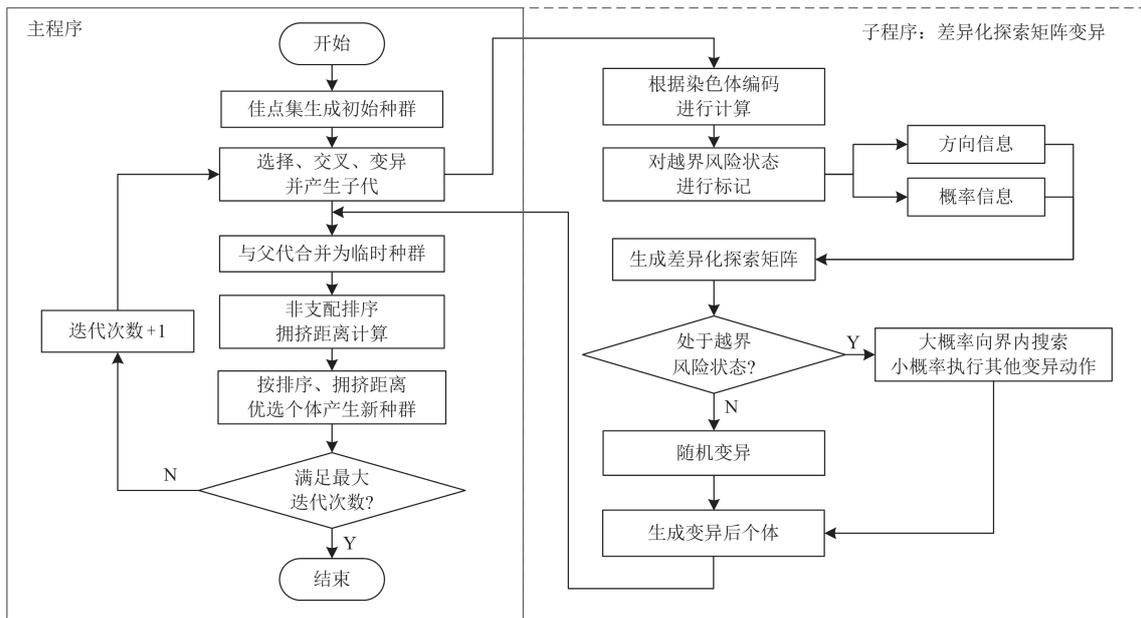


图 2 改进 NSGA-II 算法流程图

Fig. 2 Flowchart of the improved NSGA-II algorithm

## 3 案例分析

雅砻江流域水风光一体化基地是我国九大清洁能源基地之一。为了响应新型电力系统建设要求，一方面，随着流域内风光电站逐渐投产，新能源并网规模进一步扩大，以雅砻江梯级水电为主要调节

电源的多能互补调度难度进一步增加；另一方面，基地同时承担断面内用电负荷、跨断面省内输电和跨省输电的任务，网架结构复杂性进一步增加，其拓扑结构如图 3 所示。雅砻江干流梯级水电包括两河口、杨房沟、锦屏一级、锦屏二级、官地、二滩、桐子林七级水电站，两河口水电站的电力通过雅安断面

送至省内负荷中心, 杨房沟水电站的电力均送至省外, 锦屏一级至桐子林水电站的部分电力通过攀西断面送至省内负荷中心。雅砻江同一梯级内的水电站电力需要分别通过不同断面送出, 水电站间的水力联系增加了跨断面互补调度的难度, 且在各断面都

需要将区域内的风电、光伏电能与水电打捆输送, 也对调节性水电的灵活性与韧性提出了挑战。因此本文以雅砻江清洁能源基地为例, 从流域历史径流数据中选取丰平枯 3 种典型年, 采用改进后 NSGA-II 算法进行求解, 种群大小为 50, 最大迭代次数为 5000。

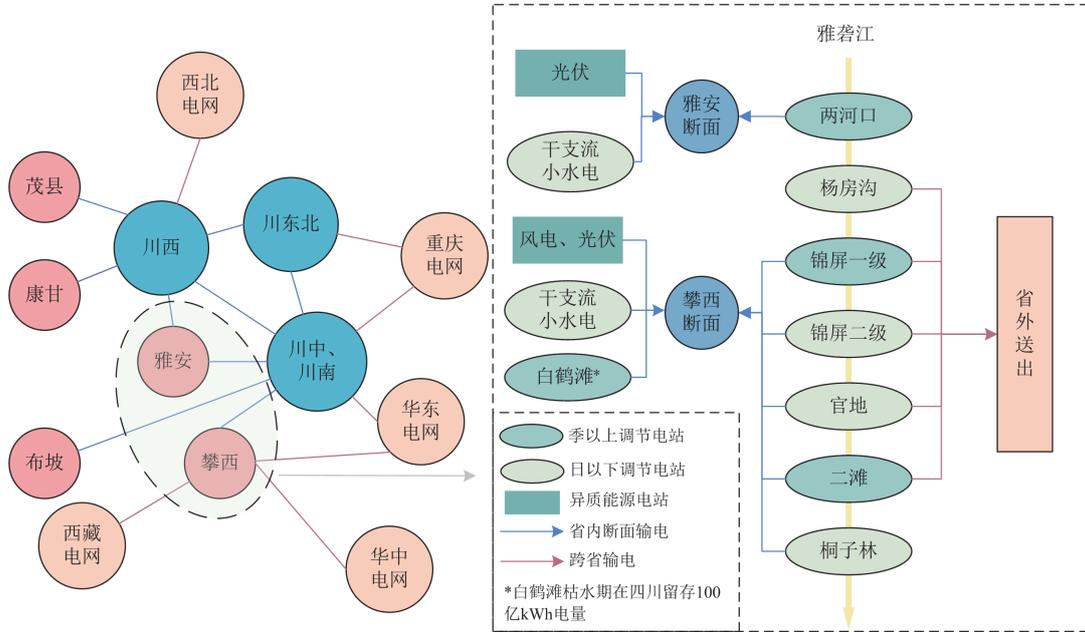


图 3 雅砻江清洁能源基地网架结构拓扑图

Fig. 3 Topology of Yalong river clean energy base grid structure

### 3.1 典型年计算结果分析

各典型年优化计算帕累托解集如图 4 所示。可以看出, 水量丰沛时系统总发电量目标分别与断面枯水期输电平稳性目标和弃电量目标之间形成了较为均匀的帕累托前沿, 反映出系统总发电量目标与其他目标间具有较为明确的竞争关系。而弃电量目标与枯期各断面输电出力标准差目标之间的相关关

系则较弱, 是因为弃电通常发生在通道受限的丰水期, 对各断面枯期输电平稳性基本不产生直接影响。在平、枯典型年中系统发电量目标与弃电量目标的相关关系被削弱, 是因为随着来水减少, 水电的发电能力减弱, 断面输送能力足以完全消纳系统送出的电力, 种群中出现了若干弃电量为 0 的解, 此时缓解了系统发电量目标与弃电量目标之间的竞争。

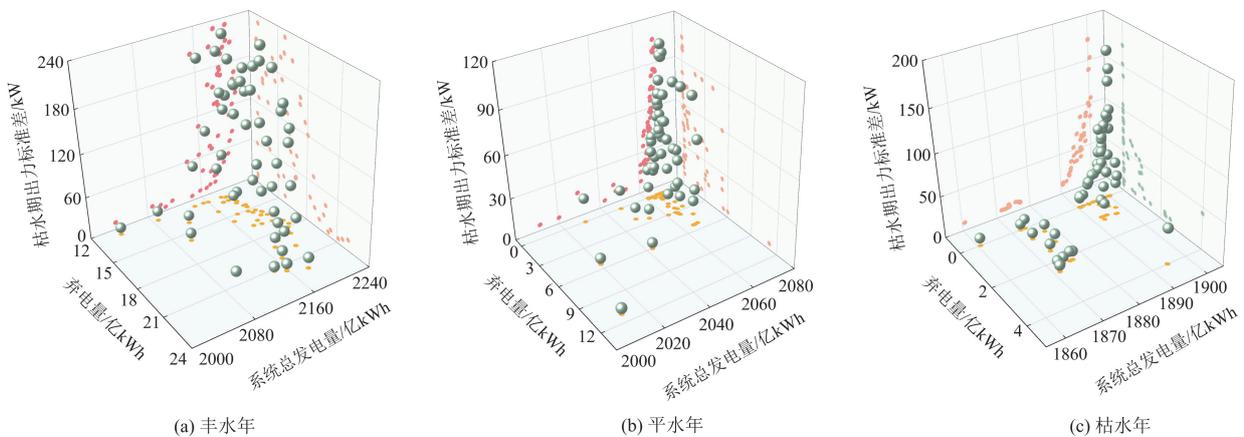


图 4 各典型年优化帕累托解集

Fig. 4 Pareto set for each typical year

在各个帕累托解集中优选个体进行分析，其出力过程如图 5 所示，异质能源互补系统在满足断面内用电负荷需求后，将出力调至平稳并通过断面送出，若断面内电站总出力超越断面限额将导致弃电。依据流域径流特性，本文以丰水期为 6 至 10 月，平水期为 5 月、11 月，枯水期为 12 月至次年 4 月进行分析。图 5(a)、图 5(c)、图 5(e)展示了雅安断面的调度结果。断面内仅包含两河口水电站一座调节性电站，但依托其多年调节能力，光伏出力波

动基本被平抑。在枯水期，两河口水电站的出力变幅较大，在 4 月出现出力谷值，因为相较于枯水期的其他时段，4 月雅安断面内用电负荷陡然减小但光伏出力并未出现显著变化，为满足目标 II，两河口水电站快速调整出力以同时实现光伏消纳和系统出力平稳外送。在丰水典型年，受到目标 III 影响，为减小弃电程度、缩短弃电时段，两河口水电站在 6、7 月增大下泄量提高出力，为丰水期后续时段蓄水留足库容。

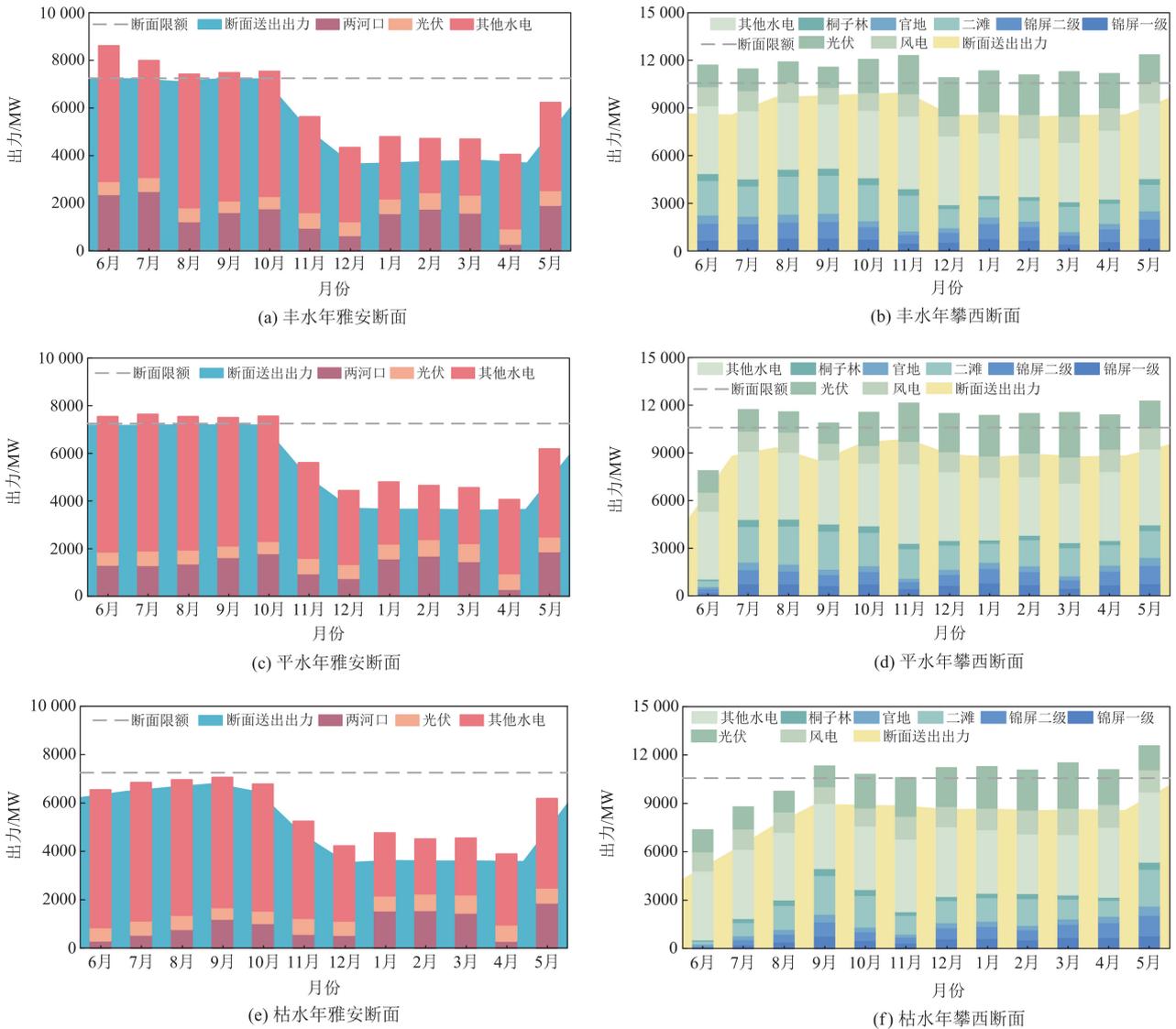


图 5 典型年出力过程

Fig. 5 Output process for each typical year

图 5(b)、图 5(d)、图 5(f)展示了攀西断面的调度结果。相较于雅安断面，攀西断面内包含锦屏一级、二滩两座季调节能力及以上水电站，并且通道容量较大，较少发生因断面受限而产生弃电的情况，

整体上网能源利用率较高。经水电调节后，异质能源系统能够在枯水期通过攀西断面送出平稳优质的电力。从堆积柱形的总高度可以看出，平水、枯水典型年异质能源互补系统在 6 月出力偏小，其原因在

于为保证后续时段的发电效益, 攀西断面内的调节性水电站会在 6 月快速蓄水至较高水位, 造成本时段发电效益有所损失。

同时关注到在两个断面内, 断面送出出力均在 5 月出现局部峰值。原因是为保证枯水期各断面输电平稳性, 水电站会一定程度上减少下泄量以保证系统总出力较为平均, 余留水量在 5 月集中下泄形成系统出力的局部峰值。

### 3.2 不同目标模型计算结果对比

为验证所构建的三目标模型的优化效果, 分别建立了仅包含目标 I、II 和仅包含目标 I、III 的两目标模型, 采用相同的改进 NSGA-II 算法求解并进行对比分析。为保证异质能源系统的发电效益, 将发电量最大目标分别与枯水期出力波动最小、弃电率最小目标组合构建模型。各模型目标如表 1 所示, 表中“√”表示该目标被纳入对应模型中。

表 1 各模型目标

Table 1 Objectives of each model

	模型 1	模型 2	模型 3
目标 I: 系统发电量最大	√	√	√
目标 II: 枯水期出力波动最小	√	√	
目标 III: 弃电量最小	√		√

通过发电效益指标、输电平稳性指标、新能源消纳指标衡量模型的优化调度效果。

指标 A: 发电效益指标, 即异质能源互补系统总发电量, 计算方法同式(1)。

指标 B: 输电平稳性指标, 即各断面枯水期送出出力标准差, 计算方法同式(3)。

指标 C: 新能源消纳指标, 即系统弃电率  $\eta$ , 计算方法如式(11)所示。

$$\eta = \frac{f_L}{f_E} \times 100\% \quad (11)$$

选取指标 A 相近的解进行分析, 指标计算结果如表 2 所示。

由表 2 可知, 在指标 A 相近的情况下, 模型 2 相较于模型 1 在指标 B 上表现较优, 但会导致弃电率明显增大。在丰、平、枯典型年中, 模型 2 相较于模型 1 的指标 B 分别减小了 22.88%、27.18%和 12.68%, 指标 C 分别增大了 0.15%、0.48%、0.17%。尤其在平、枯典型年, 3 个对比模型中仅有缺乏目标 III 的模型 2 发生了弃电。原因在于如果目标 III 缺失, 新能源消纳利用要求无法在互补调度模型中体现, 导致系统在丰水期的电力分配不够合理, 弃电风险增大。

在丰水年时, 相较于模型 1, 模型 3 的指标 C 有一定优化, 异质能源系统弃电率降低了 0.18%, 在

表 2 模型指标计算结果对比

Table 2 Comparison of model metric calculation results

		指标 A/亿 kWh	指标 B/MW	指标 C/%
丰水年	模型 1	2193.40	84.82	0.76
	模型 2	2193.46	65.41	0.91
	模型 3	2196.95	1709.78	0.58
平水年	模型 1	2054.30	93.59	0
	模型 2	2054.78	68.16	0.48
	模型 3	2059.93	1433.54	0
枯水年	模型 1	1891.82	100.24	0
	模型 2	1891.87	87.53	0.17
	模型 3	1894.53	1335.93	0

来水较为匮乏、断面可以完全消纳外送电力的年份模型 1 与模型 3 均可将弃电率限制至 0。但与此同时指标 B 大幅度提高, 其原因是在枯水期没有目标 II 的引导, 系统将会按照目标 I 进行寻优, 在此情况下枯水期出力并无规律可循, 导致各断面输电功率波动陡增。但相应的系统发电效益有所上升, 在所有典型年中模型 3 的系统发电量是 3 个对比模型中相对较大的。

综合来看, 模型 1 虽然在单一目标上表现不够突出, 但是有效弥补了两目标模型计算时可能产生的新能源消纳需求未被考虑和枯水期各断面输电功率平稳性较差的问题, 统筹了电源侧的发电效益、电网侧的断面平稳输送要求及新能源上网消纳需求, 能较好地适用于解决异质能源系统跨断面输电问题。

### 3.3 是否互补运行情况对比

为探究水电与风光电源的互补机理, 验证异质能源系统互补运行优势, 本研究对比了是否互补两种工况下的系统运行情况。在互补运行工况下, 水电站调整蓄、放水策略保证优先满足异质能源系统整体运行目标; 在不互补运行工况下, 水电优先满足自身运行目标, 水风光各类电源独立运行后出力叠加形成系统总出力。两种工况的本质差异在于水电是否在系统中发挥调节作用。以平水年为例, 采用相同的三目标模型及改进 NSGA-II 算法计算, 两种工况下雅安、攀西断面电力送出情况对比如图 6 所示。

由图 6 可知, 相较于不互补运行工况, 互补运行后两断面送出出力的年内结构得到了优化。雅安断面丰水期各月份送出出力较为平均且不再发生因超越断面限额而产生弃电的情况; 攀西断面枯水期送出出力更加平稳, 5 月的送出电力峰值也有所减小。为配套风光资源大规模投产, 攀西断面输电通道

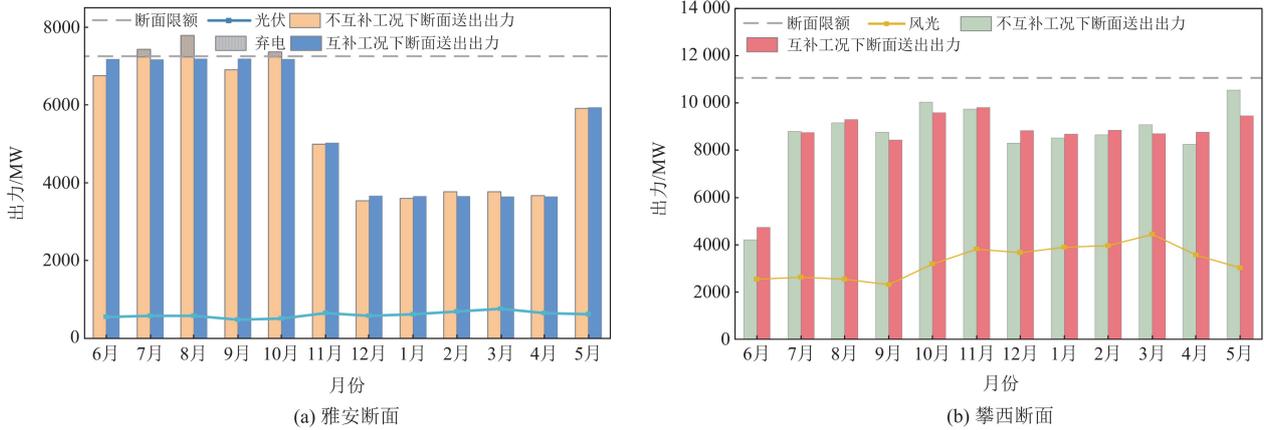


图 6 是否互补运行工况下断面送出情况对比

Fig. 6 Comparison of transmission section deliveries with and without complementary operating conditions

建设规模有所扩大，加之断面内用电负荷也较大，通道消纳现有规模的能源仍有余量。计算两种工况下的梯级发电量、弃电量与各断面枯水期出力标准差，如表 3 所示。

表 3 是否互补运行工况下运行数据对比

Table 3 Comparison of operating data with and without complementary operating conditions

系统运行工况	梯级发电量/ 亿 kWh	弃电量/ 亿 kWh	送出出力标准差/MW	
			雅安断面枯水期	攀西断面枯水期
不互补	993.79	3.20	90.36	294.16
互补	986.59	0	26.29	67.30

由表 3 可知，相较于不互补运行工况，互补后弃电量从 3.2 亿 kWh 减小为 0，雅安、攀西断面的枯水期送出出力标准差分别减小了 70.91%，77.12%，但水电梯级发电量略微受损，发电量减小了 0.72%。在不互补运行的工况下，水电仅考虑自身运行目标进行调度决策，并未利用其调节能力平抑风光波动性。而互补运行后，水电发挥自身灵活性优势，跟随风光出力变化调整出力，平抑风光波动性。在风光出力偏大时，水电减小出力以缓解输电通道的竞争，促进异质能源系统电量上网消纳；风光出力偏小时水电提升出力，承担主力发电任务。互补运行虽然导致系统中梯级发电量受到微弱影响，但可使异质能源系统的能源利用效率提高，且能更好地满足断面送出出力的平稳性要求。

### 3.4 算法优化前后对比

为验证 NSGA-II 算法改进后的效果，分别用改进前后的 NSGA-II 算法求解相同的优化调度模型，计算了错误率、帕累托解占比和程序运算时间作为算法性能的评价标准。

如果个体的染色体序列导致水库越界运行，那

么认为该个体是错误个体。错误率定义为错误个体在种群中的占比，计算如式(12)所示。

$$\theta_{\text{error}} = \frac{m_{\text{error}}}{m_{\text{pop}}} \quad (12)$$

式中： $\theta_{\text{error}}$  为错误率； $m_{\text{error}}$  为错误个体的个数； $m_{\text{pop}}$  为种群大小。

帕累托解占比定义为帕累托解集中个体数量在种群中的占比，计算如式(13)所示。

$$\theta_{\text{ns}} = \frac{m_{\text{ns}}}{m_{\text{pop}}} \quad (13)$$

式中： $\theta_{\text{ns}}$  为帕累托解占比； $m_{\text{ns}}$  为帕累托解集中的个体数量。

错误率越小，意味着种群中的错误个体越少，算法对于越界运行过程的修正能力越强；帕累托解占比越大，表示种群中个体的质量越高。算法改进前后对比分别如图 7、表 4 所示。

由图 7、表 4 可知，引入差异化探索矩阵变异后，改进 NSGA-II 算法错误率下降速度及帕累托解占比上升速度大幅度提升。与随机初始化-NSGA-II 算法相比，首次错误率降为 0 的迭代次数下降了 41.44%，首次帕累托解占比达到 100% 的迭代次数下降了 35.86%，且种群质量达到最优后基本趋于稳定。其原因在于传统 NSGA-II 算法在异质能源互补调度求解问题时，由于对于越界状态缺乏判断能力且变异过程随机性过强，难以快速获得可行解，同时种群中解的质量不高。而在改进 NSGA-II 算法中，差异化探索矩阵为遗传算法变异的随机过程提供了“视力”，提前判断染色体序列的可行性，从而规避复杂的实际可行域计算。并通过有一定方向性的变异过程使存在越界风险的决策变量值变异至可行

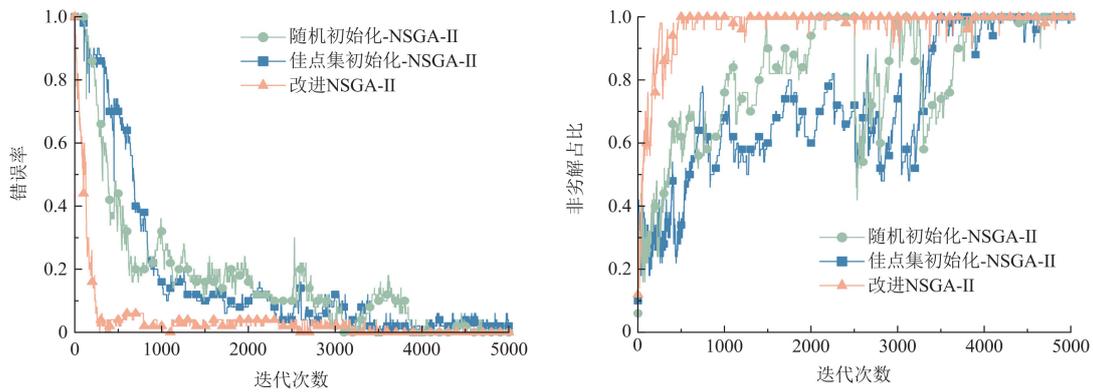


图7 算法改进前后错误率、帕累托解占比变化曲线

Fig. 7 Curve of change in error rate and percentage of Pareto solution before and after algorithm improvement

表4 改进前后算法性能对比

Table 4 Comparison of algorithm performance before and after improvement

算法	首次错误率 降为0时的 迭代次数	首次帕累托解 占比达到100% 时的迭代次数	程序运行 时间/s
随机初始化- NSGA-II	3088	2051	2129.84
佳点集初始化- NSGA-II	3461	3459	1975.96
改进 NSGA-II	1016	258	2002.04

域中, 相较于改进前可更快逼近实际可行域, 提高了算法的稳定性和自适应能力。同时相较于改进前可以更快获得完整的帕累托解集, 有效提升了种群个体质量。但是在运算时间上, 改进 NSGA-II 算法略微劣于佳点集初始化-NSGA-II 算法, 仍有一定改进空间。

#### 4 结语

本文针对异质能源互补系统面临的跨断面平稳输电问题进行了建模和算法研究。构建了兼顾发电效益、输电平稳性和清洁能源消纳的三目标中长期优化模型, 采用 $\epsilon$ -贪心策略的思想改进 NSGA-II 算法, 产生差异化探索矩阵作为个体变异索引。并以雅砻江清洁能源基地为算例进行了仿真计算与对比分析, 相关结论如下。

1) 本文构建的三目标模型可以在保证发电效益的基础上, 有效地统筹跨断面输电平稳性要求与新能源消纳要求。相较于模型 2, 在断面送出出力标准差平均提升 27.12%的情况下, 弃电率平均下降 72.19%; 相较于模型 3, 在保持基本相同的弃电率下断面送出出力标准差平均下降 93.67%。反映出三目标模型在异质能源系统跨断面输电问题中具有更

优的适用性。

2) 本文提出的改进算法有效地提升了 NSGA-II 算法在求解异质能源互补系统优化调度运行问题中的自适应能力和稳定性。相较于随机初始化-NSGA-II 算法, 改进 NSGA-II 算法在求解模型时首次错误率降为 0 的迭代次数下降了 41.44%, 首次帕累托解占比达到 100% 的迭代次数下降了 35.86%, 反映出改进后算法具有更强的修正能力, 获得优质解的效率更高。

#### 参考文献

- [1] 刘洪波, 刘坤诚, 盖雪扬, 等. 高比例新能源接入的主动配电网规划综述[J]. 发电技术, 2024, 45(1): 151-161. LIU Hongbo, LIU Shencheng, GAI Xueyang, et al. Overview of active distribution network planning with high proportion of new energy access[J]. Power Generation Technology, 2024, 45(1): 151-161.
- [2] 史昭娣, 朱宁, 李政, 等. 计及源-荷匹配的多区域多类型新能源系统优化规划方法[J]. 电力工程技术, 2024, 43(4): 67-76. SHI Zhaodi, ZHU Ning, LI Zheng, et al. Optimization planning method of multi-region and multi-type renewable energy generation considering source-load matching[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(4): 67-76.
- [3] 吴应双, 冯祥勇, 王寅, 等. 一种考虑新能源电站出力不确定性的采样鲁棒无功优化方法[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(2): 84-95. WU Yingshuang, FENG Xiangyong, WANG Yin, et al. A sample robust reactive power optimization approach considering the power output uncertainty of renewable energy stations[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(2): 84-95.
- [4] 程春田. 碳中和下的水电角色重塑及其关键问题[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(16): 29-36.

- CHENG Chuntian. Function remolding of hydropower systems for carbon neutral and its key problems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(16): 29-36.
- [5] LI He, LIU Pan, GUO Shenglian, 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.
- [6] 章国勇, 顾洪宾, 章四龙, 等. 面向产黏性卵鱼类繁殖需求的水风光生态协同调度[J]. 中国农村水利水电, 2024(7): 126-134.
- ZHANG Guoyong, GU Hongbin, ZHANG Silong, et al. Ecological operation of hydro-wind-solar hybrid energy systems considering the reproductive demand of adhesive spawning fish[J]. China Rural Water and Hydropower, 2024(7): 126-134.
- [7] 梁艺缤, 畅建霞, 郭爱军, 等. 考虑水光协调性与经济性的水电站优化调度[J]. 水力发电学报, 2022, 41(6): 22-33.
- LIANG Yibin, CHANG Jianxia, GUO Aijun, et al. Optimal operation of hydropower stations considering hydro-photovoltaic coordination and economy[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, 41(6): 22-33.
- [8] JING Zhiqiang, WANG Yimin, CHANG Jianxia, et al. Benefit compensation of hydropower-wind-photovoltaic complementary operation in the large clean energy base[J]. Applied Energy, 2024, 354.
- [9] 章雅雯, 马光文, 朱燕梅, 等. 大规模水能富集电网短期多目标嵌套多能互补运行方式研究[J]. 中国农村水利水电, 2024(8): 248-254.
- ZHANG Yawen, MA Guangwen, ZHU Yanmei, et al. Research on short-term multi-objective nested multi-energy complementary operation mode of large-scale hydro-energy-enriched power grid[J]. China Rural Water and Hydropower, 2024(8): 248-254.
- [10] YUAN Wenlin, XIN Wenpeng, SU Chengguo, et al. Cross-regional integrated transmission of wind power and pumped-storage hydropower considering the peak shaving demands of multiple power grids[J]. Renewable Energy, 2022, 190: 1112-1126.
- [11] DE LA NIETA A A S, CONTRERAS J, CATALÃO J P S. Optimal single wind hydro-pump storage bidding in day-ahead markets including bilateral contracts[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(3): 1284-1294.
- [12] LI Yang, FANG Ni, HE Shengming, et al. Two-stage stochastic scheduling of cascaded hydropower-wind-photovoltaic hybrid systems considering contract decomposition and spot market[J]. Sustainability, 2024, 16(3).
- [13] 可思为, 董萍, 马铭宇, 等. 考虑风光荷时空互补的多能源绿色数据中心多目标配置方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(22): 22-33.
- KE Siwei, DONG Ping, MA Mingyu, et al. A multi-objective allocation method for multi-energy green data centers considering wind, solar and load spatial-temporal complementarity[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(22): 22-33.
- [14] 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.
- [15] LI Ao, LI Ting, XU Weiting, et al. Research on the joint optimal allocation of hydropower, wind energy and photovoltaic power generation in the basin[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2023(1).
- [16] LAI V, HUANG Y, KOO C H, et al. A review of reservoir operation optimisations: from traditional models to metaheuristic algorithms[J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2022, 29(5): 3435-3457.
- [17] LIU Fang, WANG Yunling, SU Yunche, et al. Research on power-load matching dispatching of hydro-wind-PV hybrid system in cascade[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2023(1).
- [18] 郭勇, 李秋燕, 马杰, 等. 新基建负荷与光伏接入下配电网可开放容量评估及优化[J]. 电力工程技术, 2023, 42(6): 64-73.
- GUO Yong, LI Qiuyan, MA Jie, et al. Evaluation and optimization of available capacity of distribution network under new infrastructure load and photovoltaic access[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(6): 64-73.
- [19] 王译旋, 杨用春, 高长征. 计及典型日选取与源荷灵活性调节的优化调度研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(10): 1-10.
- WANG Yixuan, YANG Yongchun, GAO Changzheng. Optimal scheduling considering typical day selection and source load flexibility adjustment[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(10): 1-10.
- [20] ZHU Feilin, ZHONG Ping'an, XU Bin, et al. Short-term stochastic optimization of a hydro-wind-photovoltaic hybrid system under multiple uncertainties[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 214.
- [21] 彭道刚, 张孟然, 沈丛奇, 等. 考虑不同控制策略下的多能互补能源互联网优化调度[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(1): 17-28.

- PENG Daogang, ZHANG Mengran, SHEN Congqi, et al. Optimal scheduling of multi-energy complementary energy internet considering different control strategies[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(1): 17-28.
- [22] 惠振国, 艾澜, 常鹏霞, 等. 计及风光出力相关性的风光水储互补系统优化调度[J]. 水电能源科学, 2024, 42(8): 218-222.
- HUI Zhenguo, AI Lan, CHANG Pengxia, et al. Optimal scheduling of wind-solar-water-storage complementary system considering the correlation of wind-solar output[J]. Water Resources and Power, 2024, 42(8): 218-222.
- [23] 曹韵, 韩松, 荣娜, 等. 基于 GCTMSA 的梯级水火风光蓄储联合调度[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.
- [24] 李泽宏, 袁肖峰, 肖鹏, 等. 基于多目标飞蛾扑火算法的水光互补系统优化调度[J]. 长江科学院院报, 2025, 42(6): 203-209, 218.
- LI Zehong, YUAN Xiaofeng, XIAO Peng, et al. Research on multi-objective optimal scheduling of hydro-solar complementary system based on improved moth-flame optimization algorithm[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2025, 42(6): 203-209, 218.
- [25] 蒋光梓, 彭杨, 纪昌明, 等. 计及价格型需求响应的水风光互补短期调度[J]. 水力发电学报, 2023, 42(10): 1-12.
- JIANG Guangzi, PENG Yang, JI Changming, et al. Hydro-wind-solar power complementary short-term optimal scheduling considering participation of price-based demand response[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2023, 42(10): 1-12.
- [26] CHEN Yubin, WANG Manlin, ZHANG Yu, et al. Cascade hydropower system operation considering ecological flow based on different multi-objective genetic algorithms[J]. Water Resources Management, 2023, 37(8): 3093-3110.
- [27] 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.
- [28] 张晓英, 张艺, 王琨, 等. 基于改进 NSGA-II 算法的含分布式电源配电网无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(1): 55-64.
- ZHANG Xiaoying, ZHANG Yi, WANG Kun, et al. Reactive power optimization of distribution network with distributed generations based on improved NSGA-II algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(1): 55-64.
- [29] ZHAO Wenmeng, ZENG Tuo, LIU Zhihong, et al. Automatic generation control in a distributed power grid based on multi-step reinforcement learning[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2024, 9(4): 39-50.
- [30] 李文武, 郑凯新, 刘江鹏, 等. 基于 SARSA 算法的风电——抽蓄联合系统日随机优化研究[J]. 水电能源科学, 2020, 38(11): 72-76.
- LI Wenwu, ZHENG Kaixin, LIU Jiangpeng, et al. Research on daily stochastic optimization of combined wind power-pumping system on SARSA algorithm[J]. Water Resources and Power, 2020, 38(11): 72-76.
- [31] 胡鹤轩, 尹苏明, 胡强, 等. 基于强化学习算法的水库优化调度研究[J]. 水电能源科学, 2022, 40(1): 73-77.
- HU Hexuan, YIN Suming, HU Qiang, et al. Reservoir optimal operation method based on reinforcement learning[J]. Water Resources and Power, 2022, 40(1): 73-77.

收稿日期: 2024-11-19; 修回日期: 2025-03-18

作者简介:

易绍雯(2001—), 女, 硕士研究生, 研究方向为新能源调度及电力市场; E-mail: 1348317133@qq.com

黄炜斌(1983—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为新能源调度及电力市场。E-mail: xhuang2002@163.com

(编辑 张颖)