

源-荷匹配机制下的水光互补系统中长期与短期嵌套优化调度模型

黄显峰¹, 黄 晗¹, 鲜于虎成¹, 张艳青², 李 旭³, 许 昌⁴

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550081; 3. 华能澜沧江水电股份有限公司, 云南 昆明 650214; 4. 河海大学电气与动力工程学院, 江苏 南京 211100)

摘要:针对高比例光伏发电渗透下水光互补系统源-荷同步性显著下降的问题,构建了一种外层长期水量调蓄与内层短期电力互补相耦合的嵌套调度模型。该模型在外层识别光伏出力与负荷曲线特征,而在内层基于源-荷匹配机制,根据水、光、荷特性将输电通道划分为多个目标空间,并采用层内目标分级与层间全局搜索的耦合联动机制,求解输电通道电量配比,得到各目标空间的电量分布情况。澜沧江西藏段水光互补系统实例分析结果表明,构建的模型能够有效引导系统运行工况趋近目标偏好区域,所制订的调度方案能够满足短期弃电、波动风险控制与电力调峰需求,验证了模型的合理性。

关键词:水光互补系统;源-荷匹配;输电通道;优化调度模型

中图分类号:TM73

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2025)02-0038-08

Mid-long term and short term nested optimal scheduling model of hydro-photovoltaic complementary system considering source-load matching mechanism//HUANG Xianfeng¹, HUANG Han¹, XIANYU Hucheng¹, ZHANG Yanqing², LI Xu³, XU Chang⁴(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. POWERCHINA Guiyang Engineering Corporation Limited, Guiyang 550081, China; 3. Huaneng Lancang River Hydropower Inc., Kunming 650214, China; 4. School of Electrical and Power Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: Aiming at the problem of the significant decline in source-load synchronization of a hydro-photovoltaic complementary system under the penetration of a high percentage of photovoltaic power generation, a nested scheduling model that couples long-term water storage regulation in the outer layer with short-term power complementary in the inner layer is constructed. The model identifies the characteristics of photovoltaic output and load curve in the outer layer, while in the inner layer, based on the source-load matching mechanism, it divides the transmission channel into multiple target spaces according to the characteristics of water, light and load. The model employs the coupling linkage mechanism of intra-layer target classification and inter-layer global search to solve the power allocation of the transmission channel and obtain the power distribution in each target space. The results of the case study of the hydro-photovoltaic complementary system in the Xizang section of the Lancang River show that the constructed model can effectively guide the operating conditions of the system to approach the target preference region, and the formulated scheduling scheme can meet the requirements of short-term power curtailment, fluctuation risk control and power peak regulation, verifying the rationality of the model.

Key words: hydro-photovoltaic complementary system; source-load matching; transmission channel; optimal scheduling model

随着水、风、光等可再生资源发电技术与高压直流输电技术的快速发展,通过协调多种清洁能源互补开发与打捆并网外送,能够有效提升电力系统的

低碳性与可靠性^[1-4],是推进能源结构升级的重要途径,也是实现“双碳”目标的重大战略举措^[5]。然而,光伏发电出力受气象条件影响,具有较强的随机

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFE0128500);国家自然科学基金项目(521034511);中国华能集团有限公司总部科技项目(HNKJ20-H20)

作者简介:黄显峰(1980—),男,副教授,博士,主要从事水利水电和新能源系统优化调度研究。E-mail:xfhuang@hhu.edu.cn

通信作者:鲜于虎成(1998—),男,硕士研究生,主要从事水利水电和新能源系统优化调度研究。E-mail:yuchengxy@qq.com

性及波动性,在高比例光电渗透的场景下会导致源-荷同步性下降,甚至引发弃电问题^[6-9]。而梯级水库群凭借其良好的调蓄能力,能够作为调节“媒介”来平抑光电波动性^[10],并保持一定的负荷跟踪能力,然而水电在补偿光电波动性的过程中会出现水资源综合利用效率下降的问题^[11-14]。

针对光伏出力不确定性分析,现有研究主要集中在场景模拟与不确定性集生成两方面,前者主要采用参数聚类、蒙特卡罗以及马尔可夫链随机生成典型场景^[15-16],后者主要从辐照度预测偏差近似服从正态分布的角度出发,构建功率偏差置信风险模型^[17-18]。Guo等^[19]主要从场景模拟的角度出发,采用同步回代法缩减多能出力场景获得四季典型日,建立了发电量最大、剩余负荷标准差最小的多目标短期鲁棒优化模型。在不确定性集生成方面,Yang等^[20]采用核密度估计非参数方法分析光电预测偏差区间,建立了剩余负荷峰、谷差最小的短期随机优化模型。Ming等^[21]结合实测与预测样本,评估了光电短期出力系数的预测区间,获得了光伏出力预测误差的置信区间。然而,上述研究仍存在一定的局限性。首先,现有研究中的鲁棒优化模型虽然能够有效处理不确定性因素,但未充分考虑光伏运行周期内相邻时段之间的相互影响,导致其不确定性分析结果存在一定的局限性;其次,单一的置信区间研究难以全面覆盖光伏出力大小、整体波动偏差和局部离散程度,可能会对预测结果的准确性造成一定的影响。

在光伏出力不确定性分析的基础上,为了更有效地实施水光协同互补,需综合考虑发电效益^[22]、调峰能力^[23]、输电平稳性^[23]等多方面因素,充分挖掘水库的调蓄能力,从而制定科学合理的库容蓄能策略。针对如何提高水光互补出力方案的合理性,相关学者对水光互补系统中的源-荷同步性问题进行了研究。例如:张歆萌等^[24]提出了源-荷匹配机制,旨在保证电力供应的稳定性与同步性,并充分提升新能源利用效率,避免弃电损失;崔杨等^[25]考虑负荷端调峰约束,提出以降低受端电网不利调峰率和源荷扰动率为目标的输电方式,通过对传统直流定功率运行方式进行优化来改善电网调峰能力。面对高比例光电渗透带来的不确定性风险,现有研究虽然从源-荷匹配角度对水光互补进行了探讨,但仍未有效解决调度周期内发电效益与风险控制之间的平衡问题,如何制定既能满足决策偏好又能兼顾效益与风险的运营计划,是目前亟待解决的难题。

本文考虑光电不确定性与源-荷匹配机制,构建了水光互补系统中长期与短期嵌套优化调度模型,

并以澜沧江西藏段水光互补系统为研究背景,通过实例分析对模型进行了验证。

1 源-荷匹配机制

1.1 源、荷曲线特征解析

在光伏电站的运行过程中,其输出功率往往存在一定的预测偏差,这种偏差的不确定性主要源于辐照度受到中、微尺度气象扰动的影响^[26]。具体而言,在大尺度天气条件下,光伏出力具有持续且稳定的波形特征,而在中、微尺度气象扰动的影响下,光伏出力则表现出离散且不稳定的波形特征。结合晴、阴、雨3类典型气象条件^[27],根据波动强度与离散程度的不同,将光伏出力波形特征分为平滑波动、尖峰波动、锯齿波动3种类型^[28-29]。

a. 光伏出力序列波形特征解析。首先识别光伏出力曲线的峰、谷特征点,并依据相邻峰谷区间划分初始出力片段,随后基于波动强度与波动时长进行聚类分析,判别各片段的特征类型,按照相邻片段同类型融合、不同类型分段的原则,构建具有典型波动特征的光伏出力片段。通过对历史光伏出力序列进行聚类分析,计算调度期内光伏出力预测值,聚类识别公式如下:

$$P_n = \{P_t | t \in [t_{n1}, t_{n2}]\} \quad (1)$$

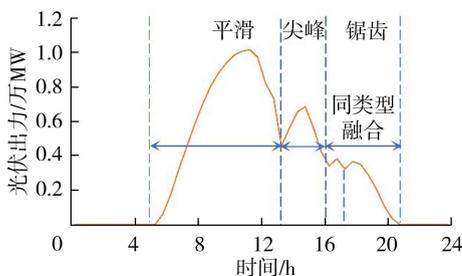
$$E_n = 1/T_n \sum_{t=1}^{T_n} \left[\frac{(P_{nt} - \bar{P}_t)/P_s}{\delta_n} \right] \quad (2)$$

$$P_{im} = J(E_n, T_n) \quad (3)$$

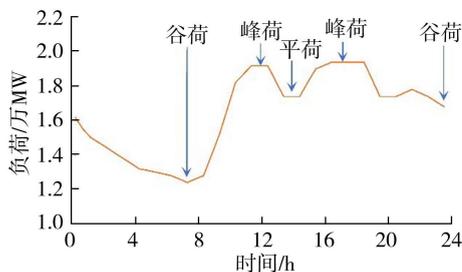
式中: P_n 为初始片段 n 光伏出力,kW; P_t 为时段 t 光伏出力,kW; t_{n1} 、 t_{n2} 为初始片段起始、终止时段,h; E_n 为波动强度特征参数,表示初始片段 n 波峰形状的尖度, h^{-1} ; T_n 为波动时长特征参数,表示初始片段 n 持续时间,h; P_{nt} 为初始片段 n 时段 t 光伏出力,kW; \bar{P}_t 为时段 t 所有初始片段的光伏出力平均值,kW; P_s 为光伏装机容量,kW; σ_n 为初始片段 n 光伏出力的标准差; P_{im} 为出力类型 i 特征片段 m 的光伏出力值,kW; J 表示通过 K -means聚类,根据历史光伏出力序列优化特征参数 E_n 、 T_n 取值。光伏出力波形特征片段划分见图1(a)。

b. 负荷曲线的峰荷、平荷、谷荷特征节点识别。考虑到电网的调峰需求,在源-荷匹配机制下需识别负荷曲线中峰荷、平荷、谷荷及其所对应的时间节点。为减小负荷的不确定性对源-荷同步性造成的不利影响,本文采用典型日的历史负荷曲线识别特征节点。负荷曲线如图1(b)所示,根据负荷大小识别峰荷、平荷、谷荷,并记录所对应的时间段 T_{ki} ,其中 k 表示负荷类型, $k=1,2,3$ 分别代表峰荷、平荷和

谷荷, l 表示各个负荷类型的节点个数。



(a) 光伏出力波形特征片段划分



(b) 负荷曲线峰荷、平荷、谷荷特征节点识别

图1 源、荷曲线特征解析

1.2 源-荷匹配机制下的电力互补策略

1.2.1 输电通道目标空间重构

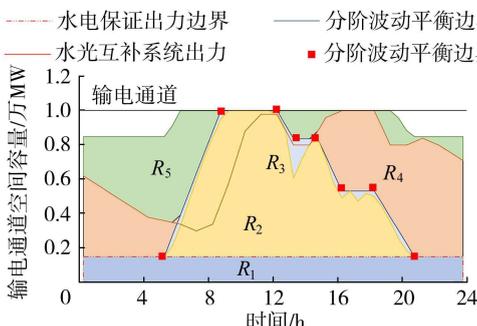
源-荷匹配的目标是在短期调度中保障水光互补系统出力的稳定性与调峰性能,提高发电效益并降低波动、弃电风险,为此,以输电通道内部空间为电量消纳边界,从水、光、荷特性出发,将输电通道划分为5个目标空间,各个空间的电量组成分别反映水电安全、光电消纳、波动平抑、负荷调峰、弃电控制等5个指标,如图2(a)所示。

a. 水电保证空间 R_1 :表征水电需要维持的出力下限,以保障水电系统安全运行。其空间容量为

$$W_{b1} = \sum_{t=1}^T P_{bt, \min} \Delta t \quad (4)$$

式中: W_{b1} 为短时段 b 水电保证空间容量, $\text{kW} \cdot \text{h}$; $P_{bt, \min}$ 为短时段 b 时段 t 水电保证出力, kW ; b 为当前短时段的序号; T 为调度期总时段, h ; Δt 为计算步长, h 。

b. 光电最优空间 R_2 :在确保水机组安全运



(a) 输电通道空间重构示意图

行且不超过电网输电能力的前提下,最大限度地消纳光伏电量。其空间容量为

$$W_{b2} = \sum_{t=1}^T P_{bt} \Delta t \quad (P_{bt} \leq G - P_{bt, \min}) \quad (5)$$

式中: W_{b2} 为光电最优空间容量, $\text{kW} \cdot \text{h}$; P_{bt} 为短时段 b 时段 t 光伏出力, kW ; G 为输电通道功率, kW 。

c. 波动平衡空间 R_3 :依据光伏出力特征片段构建分阶波动平衡边界,采用阶梯状轮廓曲线作为分阶波动平衡边界,该曲线与光伏出力形状高度适配,并需覆盖光伏出力曲线,同时保证平抑光电波动性所调用的水电出力最小。其空间容量为

$$W_{b3} = \sum_{t=1}^T (P_{bth} - P_{bt}) \Delta t \quad (6)$$

式中: W_{b3} 为波动平衡空间容量, $\text{kW} \cdot \text{h}$; P_{bth} 为短时段 b 时段 t 分阶波动平衡边界, kW 。

d. 电力调峰空间 R_4 :引入负荷曲线,将负荷曲线定位至输电通道内部空间,以弃电边界为上限,波动平衡边界为下限,形成平滑波动的调峰边界。其空间容量为

$$W_{b4} = \sum_{t=1}^T (P_{btf} - P_{bth}) \Delta t \quad (P_{bth} \leq P_{btf} \leq P_{btg}) \quad (7)$$

其中 $P_{btg} = \min(P_{bt, \max} + P_{bt}, G)$ 式中: W_{b4} 为电力调峰空间容量, $\text{kW} \cdot \text{h}$; P_{btf} 、 P_{btg} 分别为短时段 b 时段 t 调峰边界和弃电边界, kW ; $P_{bt, \max}$ 为短时段 b 时段 t 水电最大出力, kW 。

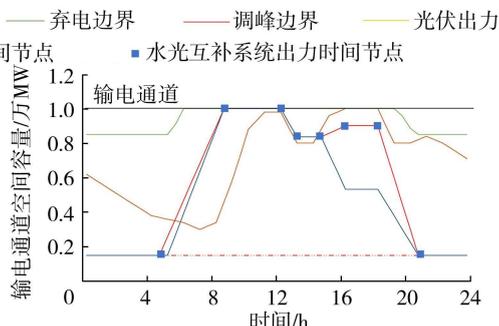
e. 防弃电空间 R_5 :考虑到水光互补系统外送电能需要兼顾稳定与防弃电需求,以输电通道水光电量的消纳轮廓作为弃电边界。其空间容量为

$$W_{b5} = \sum_{t=1}^T P_{btg} \Delta t - \sum_{z=1}^4 W_{bz} \quad (8)$$

式中: W_{b5} 为防弃电空间容量, $\text{kW} \cdot \text{h}$; z 为目标空间序号; W_{bz} 为短时段 b 目标空间 z 的目标电量, $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

1.2.2 输电通道目标电量配比

输电通道空间按风险控制与目标需求重构为水



(b) 输电通道目标电量配比

图2 源-荷匹配机制

电保证、光电最优、波动平衡、电力调峰和防弃电 5 类目标空间。由于光电难以调节,需要调节水电优化各类空间的目标电量配比(图 2(b)),引入负荷特征节点,构建系统出力决策变量集合:

$$U_b = \{P_{kl}, t_{kl} \mid k = 1, 2, 3; l = 1, 2, \dots, 8\} \quad (9)$$

式中: U_b 为短时段 b 系统出力变量集合; P_{kl} 为负荷类型 k 、时间节点 l 的水光互补系统出力, kW; t_{kl} 为边界出力对应的时间节点, h。相比于传统 24 个变量,本文系统出力的决策变量缩减为 13 个,即 5 个边界出力变量与 8 个时间节点变量。

输电通道 5 个目标空间的目标电量分布情况为

$$W_{bz} = \sum P_{kl} \Delta t \quad (P_{kl} \in R_{bz}) \quad (10)$$

2 模型构建

水光互补系统中长期与短期嵌套优化调度模型在中长期运行时需要以电量效益最大为目标,而短期调度过程需要以水电安全保证、波动风险、弃电风险为约束。

2.1 目标函数

基于输电通道目标空间与电量配比的优先级别构建中长期目标函数:

$$W = \max \sum_{b=1}^B \sum_z C_z W_{bz} + \sum_{b=1}^B C_4 W_{b4} \quad (z = 1, 2, 3, 5) \quad (11)$$

$$C_4 W_{b4} = \sum_{t=1}^T C_{k4} W_{bt4} \quad (12)$$

式中: W 为中长期电量目标效益, kW · h; C_z 为各类空间的目标电量权重,其中 C_1 、 C_3 、 C_5 采用“0-1”变量; C_{k4} 为电力调峰空间负荷类型 k 的权重; W_{bt4} 为短时段 b 时段 t 负荷类型 k 的调峰空间容量; B 为短时段阶段总数。通过式(12)赋予调峰电量配比过程中不同的优先级别,响应电网调峰需求。

2.2 约束条件

a. 短时段水电电量平衡:

$$W_{bs} = \sum_{t=1}^T \sum_{d=1}^D P_{btd} \Delta t \quad (13)$$

式中: W_{bs} 为短时段 b 的水电电量, kW · h; P_{btd} 为短时段 b 第 d 级水电站时段 t 的出力, kW; D 为水电站梯级数量。

b. 水电站水量平衡约束:

$$V_{bd} = V_{b(d-1)} + 3600(Q_{(b-t_s)(d-1)} - Q_{bd} + q_{bd}) \quad (14)$$

式中: $V_{b(d-1)}$ 、 V_{bd} 分别为短时段 b 第 d 级水电站的初、末库容, m^3 ; $Q_{(b-t_s)(d-1)}$ 为第 $d-1$ 级水电站下泄至第 d 级水电站的入库流量, m^3/s ; Q_{bd} 、 q_{bd} 分别为短

时段 b 第 d 级水电站的出库流量和坝前区间流量, m^3/s ; t_s 为第 d 级与第 $d-1$ 级水电站间的水流滞时, h。

c. 水电站库容控制边界:

$$V_{d1} = V'_{d1} \quad (15)$$

$$V_{d2} = V'_{d2} \quad (16)$$

$$V_{bd, \min} \leq V_{bd} \leq V_{bd, \max} \quad (17)$$

式中: V_{d1} 、 V_{d2} 分别为长期调度中第 d 级水电站的初、末库容, m^3 ; V'_{d1} 、 V'_{d2} 分别为短期调度中第 d 级水电站的初、末库容, m^3 ; $V_{bd, \min}$ 、 $V_{bd, \max}$ 分别为短时段 b 第 d 级水电站的库容下限、上限, m^3 。

d. 水电站出库流量约束:

$$Q_{bd, \min} \leq Q_{bd} \leq Q_{bd, \max} \quad (18)$$

式中 $Q_{bd, \min}$ 、 $Q_{bd, \max}$ 分别为短时段 b 第 d 级水电站的出库流量下限、上限, m^3/s 。

e. 水电站出力变幅约束:

$$|P_{btd} - P_{b(t-1)d}| \leq \Delta P_d \quad (19)$$

式中: P_{btd} 、 $P_{b(t-1)d}$ 分别为短时段 b 第 d 级水电站时段 t 、 $t-1$ 的出力, kW; ΔP_d 为第 d 级水电站相邻时段最大出力变幅, kW。

f. 电力波动风险约束:

$$C_1 W_{b1} + C_3 W_{b3} \leq W_{bs} \quad (20)$$

通过 C_1 、 C_3 的取值为 0 或 1 来判断该阶段水电电量是否能够满足水电保证空间与波动平衡空间的电量需求。

g. 电力弃电风险约束

$$W_{bs} \leq \sum_{z=1}^5 C_z W_{bz} - C_2 W_{b2} \quad (21)$$

通过 C_5 的取值为 0 或 1 来判断短时段 b 水电电量是否满足输电通道防弃电要求。

3 模型求解

考虑到电网负荷和电站环境复杂性会对模型求解带来影响,本文提出的中长期与短期嵌套优化模型分为内外两层,在外层搜索库容,选取具有代表性的径流数据,并通过对光伏出力曲线特征进行聚类识别,模拟光伏出力数据,外层计算水电电量后导入内层;内层通过重构输电通道、优化目标空间电量配比生成短期发电计划,形成长期库容搜索与短期系统出力优化的框架,初始 $b=1$,采用动态逐步优化算法进行求解。

步骤 1 外层,搜索当前短时段 b 的离散库容,计算日均水电电量并导入内层。

步骤 2 内层,根据光伏出力曲线特征和目标需求,重构输电通道目标空间。

步骤 3 内层,根据负荷曲线特征和目标分级,

结合步骤1的日均水电电量信息,优化目标空间电量配比,获得系统出力方式。

步骤4 内层,根据短期系统出力采用“以电定水”反演短时段 b 库容边界,采用同倍比法整体缩放系统出力,保证短时段 b 内的电量、水量平衡,并完成该阶段搜索。

步骤5 外层,搜索下一短时段 $b+1$ 的离散库容,返回步骤1,直至 $b>B$,搜索结束。

重复上述步骤,得到所有光伏出力场景下的系统出力方式。选取能够满足所有场景风险控制约束条件下的最优目标函数作为发电计划。求解框架如图3所示。

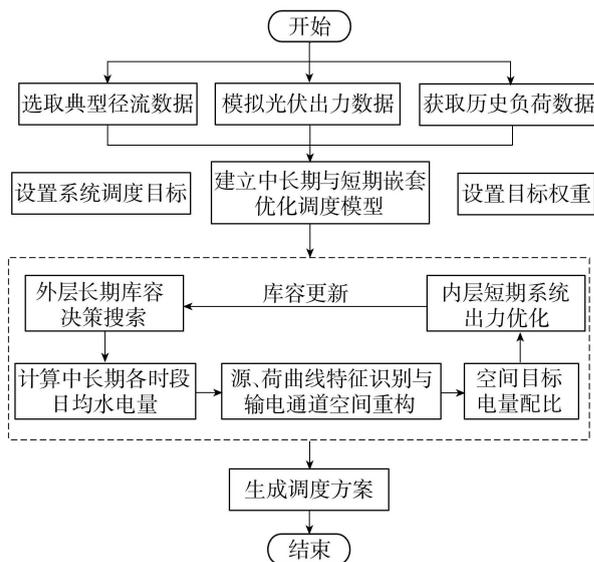


图3 模型求解框架

4 实例验证

4.1 工程参数

澜沧江西藏段水光互补系统包括6个梯级水电站与13个分布式光伏电站,水、光装机容量分别为907万kW和1200万kW,两者均采用1000万kW输电通道外送至东部地区。梯级水电站调度参数见表1。中长期、短期调度分别以月、日为周期,计算步长分别以日、时为单位。

表1 梯级水电站调度参数

水电站	正常蓄水位/m	死水位/m	调节库容/亿 m^3	装机容量/万kW	调节性能
班达	3054.00	3030.00	3.340	150	季
如美	2895.00	2815.50	24.330	240	年
邦多	2605.00	2600.00	0.117	68	日
古学	2535.00	2530.00	0.450	200	日
曲孜卡	2345.00	2335.00	0.130	39	日
古水	2267.00	2230.00	6.340	210	日

对于光伏出力,基于2000—2019年光伏出力实测信息,采用聚类分析与长短时记忆网络相结合的

方法计算光伏出力预测值;对于水电出力,选取具有代表性的典型径流场景,采用2013年6月的日均流量计算梯级水电站出力;负荷采用电网当月的历史数据。

4.2 中长期调度效果分析

根据6月历史数据模拟10组光伏出力序列,根据不同的目标需求,采用两种方案进行模型求解。方案一考虑水电安全运行、波动与弃电风险,各类空间的目标权重均设置为1;方案二中在方案一的基础上,结合峰、平、谷电价比值对调峰目标空间赋予次级权重,峰荷、平荷、谷荷的次级权重分别为1、1.2、1.8。通过嵌套优化调度模型求解得到调度期内各个目标空间的电量分布情况,如图4所示(图中各时段的5个目标空间电量用彩色填充示意,各个空间之间采用黑色分界线分隔)。

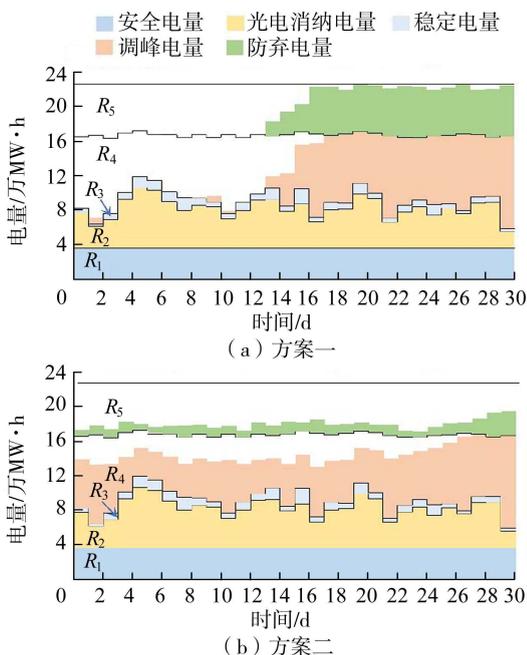


图4 中长期调度目标空间电量分布

方案一无需考虑调峰需求(图4(a)),在第1~15天的调度期内,水电电量仅满足了对光电波动的补偿要求,几乎没有参与电网调峰,而在第18~30天的调度期内,水电虽然较大程度地参与了调峰过程,但由于水电电量几乎完全填满防弃电空间,导致在不确定性环境下的弃电风险增大。与方案一相比,方案二考虑了调峰需求(图4(b)),在整个调度周期内均保持了一定的调峰电量,各天的水电电量不仅有效平抑了光电波动性,且预留了足够的防弃电空间容量,减小了弃电风险。

4.3 短期发电计划效果分析

选取调度周期内第12天的短期调度数据进行分析:方案一工况下,水光互补系统出力曲线与分阶波动平衡边界相贴合,表明该日水电电量仅用于维

持水电机组安全运行与光电波动补偿需求。基于光伏出力特征片段,将分阶波动平衡边界分为1段边界出力变量与2个时间节点(图5(a)),形成3个稳定的电力输送边界,该发电计划有效平抑了光伏出力的波动风险,并满足了特高压输电对电力平稳性的要求。

方案二考虑调峰需求,通过负荷特征节点对系统出力变量进行优化,与方案一相比,方案二的水光互补系统出力同样覆盖了 R_1 、 R_2 、 R_3 空间,如图5(b)所示。方案二将系统出力变量划分为5段边界出力变量与8个时间节点变量,体现了与峰荷、谷荷变化相匹配的电力跟踪能力,调峰效益显著,从而提升了系统在不同负荷场景下的调节灵活性与实时响应能力。

完全满足波动风险控制要求,而方案二中,波动平衡空间的电量仅为方案一的91%,无法完全构建分阶波动平衡边界,从而无法保障输电稳定性,且在实际运行过程中产生了弃电量。

表2 调度方案效果分析

优化方案	波动平衡空间电量/万kW·h	弃电量/万kW·h	发电量/万kW·h
方案一	24618	0	478330
方案二	22402	5262	480389

5 结语

本文针对高比例光伏并网条件下的水光互补系统调度过程中风险控制与效益优化协同的需求,基于源-荷匹配机制构建了水光互补系统中长期与短期嵌套优化调度模型。该模型通过重构输电通道空间、优化电量配比,生成了系统出力方案,采用目标空间的电量分布图直观展示系统调度结果。其中,模型中的目标电量权重可以根据工程实际需求动态调节,在不确定场景下实现风险适应能力与效益优化目标的动态平衡。实例分析结果表明,该模型能够优化系统出力,有效评估系统运营风险,生成满足发电效益与风险控制需求的发电计划,可为多能互补系统运行与调度决策提供合理的调度方案。

参考文献:

[1] 谢和平,侯正猛.“碳中和与绿色能源”专刊前言[J]. 工程科学与技术,2022,54(1):1. (XIE Heping, HOU Zhengmeng. Preface of Carbon Neutrality and Green Energy issue [J]. Advanced Engineering Sciences,2022,54(1):1. (in Chinese))

[2] 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):3871-3884. (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):3871-3884. (in Chinese))

[3] 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))

[4] 黄显峰,周引航,张启凡,等.基于云模型的水光互补清洁能源基地容量配置方案优选[J].水利水电科技进展,2024,44(1):44-51. (HUANG Xianfeng, ZHOU Yinhang, ZHANG Qifan, et al. Capacity allocation scheme optimization based on cloud model for a hydro-photovoltaic

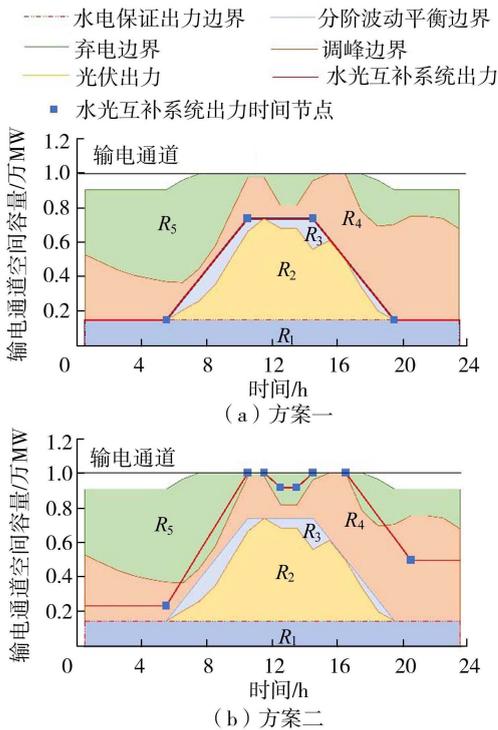


图5 短期输电通道目标空间电量分布

相较于现有的波动、调峰、弃电等评价指标,本文通过求解输电通道内5个目标空间的电量分布情况,量化分析了中长期规划与短期运行场景下的调度特征差异,更加直观地呈现了系统调度的发电效益优先与风险控制边界的平衡关系,从而可为多时间尺度调度提供兼顾安全性与经济性的优化决策。

4.4 水光互补系统运营风险评估

本文通过输电通道重构、目标电量分级与风险控制约束等方式,制定的发电计划能够有效响应目标需求并满足风险控制要求,为进一步验证模型的有效性,表2给出了两种不同方案下短期波动风险、弃电量以及中长期发电量的评估结果。由表2可见,方案一在波动平衡空间的电量为24618万kW·h,能够

- complementary clean energy base [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44 (1):44-51. (in Chinese))
- [5] 张沈习,王丹阳,程浩忠,等. 双碳目标下低碳综合能源系统规划关键技术及挑战[J]. 电力系统自动化,2022, 46 (8): 189-207. (ZHANG Shenxi, WANG Danyang, CHENG Haozhong, et al. Key technologies and challenges of low-carbon integrated energy system planning for carbon emission peak and carbon neutrality [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46 (8): 189-207. (in Chinese))
- [6] 高庆忠,赵琰,穆昱壮,等. 高渗透率可再生能源集成电力系统灵活性优化调度[J]. 电网技术,2020,44(10): 3761-3768. (GAO Qingzhong, ZHAO Yan, MU Yuzhuang, et al. Flexibility optimal dispatch of high-penetration renewable energy integrated power systems [J]. Power System Technology, 2020, 44 (10): 3761-3768. (in Chinese))
- [7] 姜云鹏,任洲洋,李秋燕,等. 考虑多灵活性资源协调调度的配电网新能源消纳策略[J]. 电工技术学报,2022, 37(7):1820-1835. (JIANG Yunpeng, REN Zhouyang, LI Qiuyan, et al. An accommodation strategy for renewable energy in distribution network considering coordinated dispatching of multi-flexible resources [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37 (7): 1820-1835. (in Chinese))
- [8] 卢斯煜,周保荣,饶宏,等. 高比例光伏发电并网条件下中国远景电源结构探讨[J]. 中国电机工程学报,2018, 38(增刊1): 39-44. (LU Siyu, ZHOU Baorong, RAO Hong, et al. Research of the prospect of China power generation structure with high proportion of photovoltaic generation [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38 (Sup1): 39-44. (in Chinese))
- [9] 贺元康,刘瑞丰,陈天恩,等. 全清洁能源特高压青豫直流初期打捆外送模式[J]. 中国电力,2021,54(7): 83-92. (HE Yuankang, LIU Ruifeng, CHEN Tianen, et al. Exploration of bundled transaction model for all clean energy transmission of Qing-Yu UHV DC project [J]. Electric Power, 2021, 54(7): 83-92. (in Chinese))
- [10] 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 Yarlha, 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))
- [11] 张茹,楼晨笛,张泽天,等. 碳中和背景下的水资源利用与保护[J]. 工程科学与技术,2022,54(1): 69-82. (ZHANG Ru, LOU Chendi, ZHANG Zetian, et al. Utilization and protection of water resources under the background of carbon neutralization [J]. Advanced Engineering Sciences, 2022, 54(1): 69-82. (in Chinese))
- [12] DING Ziyu, WEN Xin, TAN Qiaofeng, et al. A forecast-driven decision-making model for long-term operation of a hydro-wind-photovoltaic hybrid system [J]. Applied Energy, 2021, 291: 116820.
- [13] 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))
- [14] 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 Zhenyu, 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))
- [15] 杨晶显,刘俊勇,韩晓言,等. 基于深度嵌入聚类的水光荷不确定性源场景生成方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40 (22): 7296-7305. (YANG Jingxian, LIU Junyong, HAN Xiaoyan, et al. An uncertain Hydro/PV/ Load typical scenarios generation method based on deep embedding for clustering [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(22): 7296-7305. (in Chinese))
- [16] 丁明,鲍玉莹,毕锐. 应用改进马尔可夫链的光伏出力时间序列模拟[J]. 电网技术,2016,40(2): 459-464. (DING Ming, BAO Yuyin, BI Rui. Simulation of PV Output time series used improved Markov chain [J]. Power System Technology, 2016, 40 (2): 459-464. (in Chinese))
- [17] BISWAS P P, SUGANTHAN P N, AMARATUNGA G A J. Optimal power flow solutions incorporating stochastic wind and solar power [J]. Energy Conversion and Management, 2017, 148: 1194-1207.
- [18] LIU Weifeng, ZHU Feilin, ZHAO Tongtiegang, et al. Optimal stochastic scheduling of hydropower-based compensation for combined wind and photovoltaic power outputs [J]. Applied Energy, 2020, 276: 115501.
- [19] GUO Yi, MING Bo, HUANG Qiang, et al. Risk-averse day-ahead generation scheduling of hydro-wind-photovoltaic complementary systems considering the steady requirement of power delivery [J]. Applied Energy, 2022, 309: 118467.
- [20] YANG Yuqi, ZHOU Jianzhong, LIU Guangbiao, et al. Multi-plan formulation of hydropower generation considering uncertainty of wind power [J]. Applied Energy, 2020, 260: 114239.
- [21] 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.
- [22] 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))
- [23] ZHANG Yusheng, MA Chao, YANG Yang, et al. Study on short-term optimal operation of cascade hydro-photovoltaic hybrid systems[J]. Applied Energy, 2021, 291: 116828.
- [24] 张歆蒨, 陈仕军, 曾宏, 等. 基于源荷匹配的异质能源互补发电调度[J]. 电网技术, 2020, 44(9): 3314-3320. (ZHANG Xinshuo, CHEN Shijun, ZENG Hong, et al. Heterogeneous energy complementary power generation dispatching based on output-load matching [J]. Power System Technology, 2020, 44 (9): 3314-3320. (in Chinese))
- [25] 崔杨, 程广岩, 仲悟之, 等. 计及受端电网调峰趋势的风-光-火特高压直流外送调度方法[J]. 太阳能学报, 2021, 42(8): 32-40. (CUI Yang, CHENG Guangyan, ZHONG Wuzhi, et al. Wind-photovoltaic-fire UHVDC external dispatching method considering peaking trend of power grid [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42 (8): 32-40. (in Chinese))
- [26] 赵亮, 黎嘉明, 艾小猛, 等. 光伏出力随机性分量的提取和统计特性分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(1): 48-56. (ZHAO Liang, LI Jiaming, AI Xiaomeng, et al. Analysis on random component extraction and statistical characteristics of photovoltaic power [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41 (1): 48-56. (in Chinese))
- [27] 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. (in Chinese))
- [28] 吉铎格, 李慧, 叶林, 等. 基于波动特性挖掘的短期光伏功率预测[J]. 太阳能学报, 2022, 43(5): 146-155. (JI Xingge, LI Hui, YE Lin, et al. Short-term photovoltaic power forecasting based on fluctuation characteristics mining [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2022, 43(5): 146-155. (in Chinese))
- [29] 么艳香, 叶林, 屈晓旭, 等. 风-光-水多能互补发电系统功率云耦合模型分析[J]. 电网技术, 2021, 45(5): 1750-1756. (YAO Yanxiang, YE Lin, QU Xiaoxu, et al. Power cloud coupled model for wind-photovoltaic-hydro hybrid power generation system [J]. Power System Technology, 2021, 45(5): 1750-1756. (in Chinese))

(收稿日期: 2024-04-03 编辑: 熊水斌)

(上接第 16 页)

- [26] 金纯, 姜翠玲, 吴为. 基于水力水文学法的大渡河上游生态流量确定[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(2): 8-14. (JIN Chun, JIANG Cuiling, WU Wei. Determination of ecological flow in upstream of Daduhe River based on hydraulic and hydrological methods [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41 (2): 8-14. (in Chinese))
- [27] 徐志侠, 董增川, 周健康, 等. 生态需水计算的蒙大拿法及其应用[J]. 水利水电技术, 2003, 34(11): 15-17. (XU Zhixia, DONG Zengchuan, ZHOU Jiankang, et al. Montana method for ecological water requirement calculation and its application [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2003, 34 (11): 15-17. (in Chinese))
- [28] TENNANT D L. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources [J]. Fisheries, 1976, 1(4): 6-10.
- [29] 王煜, 武见, 王婷, 等. 黄河流域经济社会用水公平性评价研究[J]. 中国农村水利水电, 2023(10): 54-60. (WANG Yu, WU Jian, WANG Ting, et al. Research on the evaluation of the fairness of economic and social water use in the Yellow River Basin [J]. China Rural Water and Hydropower, 2023(10): 54-60. (in Chinese))
- [30] 赵维岭, 纪义虎, 左其亭, 等. 区域水资源供需平衡指数分析方法: 以引沁灌区为例[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(3): 128-135. (ZHAO Weiling, JI Yihu, ZUO Qiting, et al. Variation in balance between water supply and water demand in Yinqin irrigation district [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42 (3): 128-135. (in Chinese))
- [31] 邱曦, 马军霞, 左其亭, 等. 基于区域水平衡理论和 SWAT 模型的沁河流域水收支平衡演变分析[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(1): 9-15. (QIU Xi, MA Junxia, ZUO Qiting, et al. Evolution analysis of water budget balance in Qinhe River Basin based on regional water balance theory and SWAT model [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44 (1): 9-15. (in Chinese))

(收稿日期: 2024-03-28 编辑: 熊水斌)