

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2025.20242190

# 考虑多时间尺度嵌套运行的梯级水光互补系统调度规则研究

尹述红<sup>1,2</sup>, 李红刚<sup>1,2</sup>, 王昱倩<sup>1,2</sup>, 李阳毅诚<sup>1,2</sup>

(1. 华能澜沧江水电股份有限公司, 云南 昆明 650204; 2. 云南省水风光一体化工程技术创新中心, 云南 昆明 650214)

**摘要:** 随着清洁能源一体化基地建设投产, 多能源联合调度需求迫切。在梯级水电联合调度的基础上, 嵌入通道弃电风险作为惩罚约束, 将调度人员工作经验与滚动思想相融合, 提出一种基于实际运行的多时间尺度梯级水光互补联合调度规则制定方法, 提前识别可能存在的弃电风险并提出控制措施, 选用水电发电与蓄能效益、光伏发电效益构建水光联合系统互补函数对调度规则进行评价, 最后将所提方法应用于澜沧江小湾—漫湾水光互补系统中。结果表明, 在不显著影响水电调节作用的同时实现了水光联合系统经济效益显著增加, 具备推广至未来流域水风光储清洁能源一体化基地联合运行的可行性。

**关键词:** 多时间尺度; 水光互补调度规则; 澜沧江小湾、漫湾电站; 弃电风险; 效益评价

**中图分类号:** TV697.1<sup>+</sup>2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2025)09-0216-05

运行提供技术支撑。

## 1 引言

双碳目标背景下, 风光新能源接入流域水电联合运行大势所趋, 其实质在于水电优化自身运行边界响应新能源灵活性需求<sup>[1-2]</sup>。光伏电源接入流域水电大多数场景下理论可实现装机容量比例 1:1 甚至更多。但在实际运行中, 局部时段、局部地区已出现送出通道弃电风险, 未来这一问题将愈加凸显。2022 年, 黄显峰等<sup>[3-4]</sup> 通过建立水光互补联合优化调度模型, 探讨了水光互补多尺度调度方式; 朱燕梅等<sup>[5-8]</sup> 探索了调度规则的制定方法, 并对这些调度规则进行评价<sup>[9-10]</sup>。但上述研究主要集中在理论研究方面, 而应用于工程实践存在转化难度, 尚需做出更多探讨。为此, 本文按照时序递进方法, 挖掘水电调节能力, 融合调度人员工作经验与滚动嵌套思想, 提出一种多时间尺度调度规则制定方法, 年分月尺度以保供和消纳风险最小为原则, 将通道弃电风险作为惩罚约束嵌入; 月分日尺度将月内新能源逐日波动精细化纳入建模中, 优化水库逐日调度计划, 并构建效益互补函数评判; 最后选取澜沧江小湾电站及其下游漫湾电站水光互补系统为例验证其科学性和经济性, 以期为流域清洁能源一体化基地建设

## 2 多时间尺度优化调度规则制定

制定多时间尺度优化调度规则需遵循以下原则: ①年分月尺度调度规则的制定以不改变小湾在系统中蓄丰补枯的作用为原则。②月分日尺度以通道弃电风险最小为目标。③光伏调节引起的水库库容变化在日内、最多次日平衡, 允许合理弃电。

### 2.1 年分月尺度调度规则制定

(1) 在年分月尺度, 选取具有良好调节性能的水库为主体, 确定其关键节点目标水位。选取调度函数作为调度规则的基本形式, 以分月预测入库流量  $\{Q_1, Q_2, \dots, Q_{12}\}$  作为系统前置输入, 以各月末水位作为结果输出。选取一元线性函数:

$$Y_k = a_k X_k + b_k \quad (1)$$

式中,  $X_k$ 、 $Y_k$  分别为调度函数的输入、输出变量, 选取水库初始库容和时段入库水量之和作为输入变量、时段末库容作为输出变量;  $a_k$ 、 $b_k$  均为函数的基本参数;  $k$  为时段, 年分月尺度以月为计算时段,  $k=1, 2, \dots, 12$ 。当样本数据大于 2 时, 不存在唯一的  $a$ 、 $b$  使得所有的  $Y=aX+b$  严格成立, 因此以残差  $Y_k - (a_k X_k + b_k)$  的平方和  $Q = \sum_{i=1}^n \{Y_i - (aX_i + b)\}^2$  最小为目标寻求可接受的

收稿日期: 2024-11-21, 修回日期: 2024-12-24

基金项目: 云南省科技人才与平台计划项目(202405AK340002)

作者简介: 尹述红(1975-), 男, 高级工程师, 研究方向为梯级水电站集控运行管理等, E-mail: 519520404@qq.com

一组  $a、b$  值,将当平方和函数导数为 0 时, $Q$  取最小值,依次求得  $k$  月可接受的一组  $a、b$  值,此时  $Y_k = a_k X_k + b_k$  中的  $a_k、b_k$  可认为是一组向量。对历史长系列径流过程资料进行排频处理,结合排频结果计算一组  $a_k、b_k$  值,将所得的大水电站水库年内各月末水位控制边界作为水电的年分月尺度优化运行调度规则。

(2)将通道弃电风险作为惩罚约束条件,本文所述弃电风险是针对整个梯级水光互补系统,以大于通道送出能力作为弃电风险的具体表述。送出通道弃电率  $\delta = (P_w + P_1)/P$  表征,其中, $\delta$  为流域水光互补联合运行系统的通道弃电率; $P_w$  为水电出力; $P_1$  为光伏出力; $P$  为送出通道极限,计算所得的送出通道利用率大于通道容量,即为该情况下对应的弃电风险。在年分月尺度调度规则制定方面,由于受到上游大水电站水库调节,下游调节能力较差的水电站水库全年平均可维持在高水位运行。

### 2.2 月分日尺度调度规则制定及弃电风险防控

(1)在月分日尺度,年分月尺度调度规则可认为是其边界。在某一月度逐日预测来水过程及光伏典型日出力过程场景下,年分月尺度调度规则形成的该月始末水位控制条件  $\{Z_1, Z_2, \dots, Z_{12}\}$  可作为起始边界,通过月内日间平滑避免水光联合运行的通道弃电风险,得到的月分日水位控制过程即为该场景下水电消纳光伏的调度规则。

(2)在弃电风险防控方面,结合调度人员经验及历史长系列径流资料模拟计算判断,流域梯级水光互补联合调度系统弃电风险最大的时段为:①在于上游大水电站水库枯期大方式拉水运行、需要下游水电匹配运行且光伏出力较大时;②在于后汛期水电调节空间有限遇光伏连续大发时;③在于汛后水电尚未腾出调节空间且光伏出力逐步增加时。需针对这三个时段强化风险分析并提前执行可行的控制措施。实际运行过程中,若前序运行方式偏离制定的调度规则,则应争取在月内最多次月回正,避免偏差累积。

### 2.3 调度规则效益评价

分别选取水电发电与蓄能效益、光伏发电效益作为评价指标,可用  $E_p$  表征:

$$E_p = aE_w + bE_1 = a \left\{ \left[ \sum_{t=0}^T (P_{w,t} N_{w,t}) \Delta t \right] + \overline{P_w} \Delta E \right\} + b \left[ \sum_{t=0}^T (P_{l,t} N_{l,t}) \Delta t \right] \quad (2)$$

式中, $E_p$  为流域梯级水光互补系统的总效益; $E_w$  为水电子系统效益; $E_1$  为光伏子系统效益; $a、b$

为水电子系统和光伏子系统对应的权重; $P_{w,t}$  为水电电价; $N_{w,t}$  为计算时段水电平均出力; $\Delta t$  为计算时段; $\overline{P_w}$  为调度期内水电平均电价; $\Delta E$  为调度期内水电蓄能增量,蓄能减少则为负值; $P_{l,t}$  为光伏电价; $N_{l,t}$  为计算时间内光伏平均出力,弃电则为负值。

流域水光互补系统多时间尺度联合调度规则制定流程见图 1。

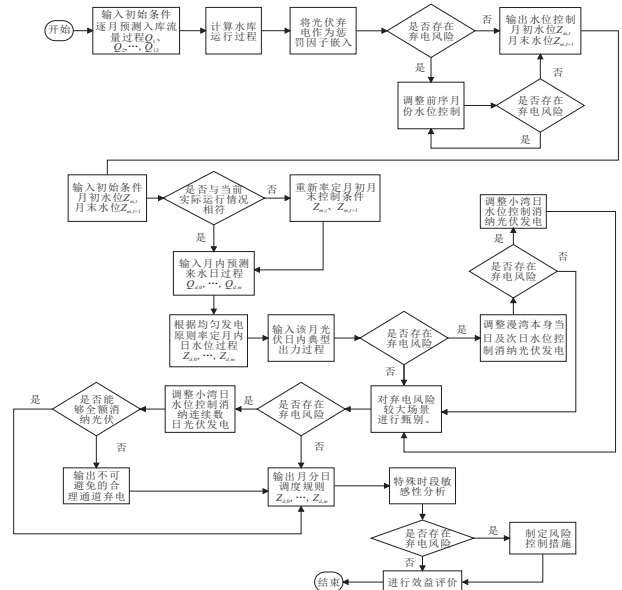


图 1 流域水光互补系统多时间尺度联合调度规则制定流程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the process for formulating multi time scale joint scheduling rules for the watershed water solar complementary system

## 3 实例应用

以澜沧江小湾—漫湾水光互补系统为例,小湾电站装机容量  $420 \times 10^4 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ,正常蓄水位 1 240 m、死水位 1 166 m,具有不完全多年调节性能,作为系统兜底调节电源在云南省内乃至整个南方电网系统中承担蓄丰补枯的重要调节作用;漫湾电站装机容量  $167 \times 10^4 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ,正常蓄水位 994 m、死水位 988 m,具有季调节性能,全年平均可维持在高水位运行。假定小湾断面入库流量预测为多年平均;光伏装机容量按照近期  $50.3 \times 10^4 \text{ kW}$ 、远期  $167 \times 10^4 \text{ kW}$ ,根据设计资料及近三年云南光伏平均利用小时推算光伏平均出力。按照本文所制定年调度规则并进行风险分析及效益评价。

送出通道利用率见表 1,通道率大于 100% 的部分即为对应的弃电率。结合长系列水文资料计

算小湾调度规则场景集见图 2,推算漫湾光伏平均出力见表 2。

表 1 水光互补优化前各月漫湾通道利用率

Tab. 1 Monthly utilization rate of manwan channel before water light complementary optimization

场景	利用率/%											
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
近期	49	51	59	56	63	78	79	83	97	78	67	66
远期	62	65	74	70	76	89	91	94	108	88	81	78

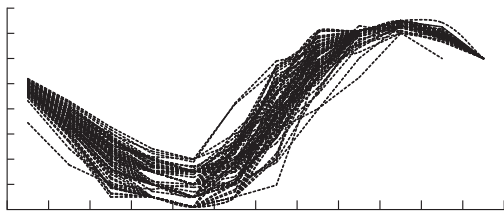


图 2 小湾水电优化调度规则场景集

Fig. 2 Scenario set of optimization scheduling rules for Xiaowan Hydropower

表 2 漫湾光伏拟定平均出力

Tab. 2 Proposed average output of Manwan photovoltaic

场景	平均出力/ $10^4$ kW											
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
近期	9	10	11	9	9	7	7	8	7	7	9	9
远期	31	34	35	31	29	24	24	26	25	24	31	29

优化后通道利用率见表 3,敏感性分析见表 4。小湾水位过程见图 3,漫湾平均可维持在 991 m 附近。

表 3 水光互补优化后各月漫湾通道利用率

Tab. 3 Monthly utilization rate of manwan channel after water light complementary optimization

场景	利用率/%											
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
近期	49	51	59	56	77	78	81	84	88	78	67	66
远期	62	65	74	70	90	89	92	96	98	88	81	78

表 4 典型来水条件下漫湾通道利用率

Tab. 4 Utilization rate of Manwan channel under typical inflow conditions

来水条件	代表年	流量	利用率/%											
			1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
$P=15\%$	1955	1 495	83	85	86	59	71	94	101	120	111	79	101	100
$P=25\%$	1957	1 316	65	80	81	63	83	85	87	88	88	98	78	77
$P=35\%$	1964	1 262	75	77	78	67	69	73	85	89	101	89	78	76
$P=50\%$	1976	1 188	75	77	77	75	69	77	79	81	89	70	74	73
$P=65\%$	1975	1 122	72	74	75	69	70	73	72	74	73	72	77	76
$P=75\%$	1956	1 069	72	74	75	60	82	68	67	68	68	60	78	76
$P=85\%$	1958	1 015	67	69	70	67	61	68	68	70	74	67	68	67

注:流量单位为  $m^3/s$ 。

按照剩余负荷最小原则调节前后示意图 4。在漫湾水电本身难以消纳光伏或遇到光伏出力连续较大的情况时调整小湾水位进行消纳。漫湾光伏包含的阿柱田和帕岭典型出力曲线拟定参

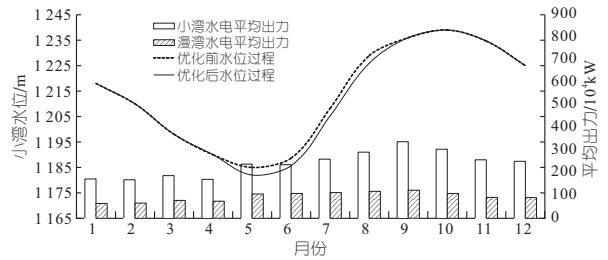


图 3 年分月尺度调度规则

Fig. 3 Monthly scale scheduling rules for years

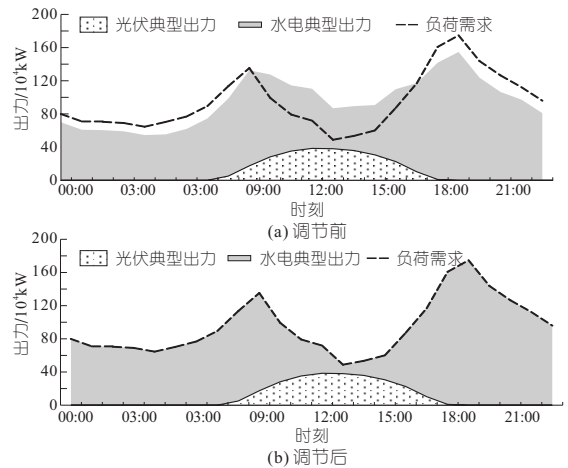


图 4 水光联合运行日内调节前后示意图

Fig. 4 Schematic diagram of water solar joint operation before and after daily adjustment

考距离较近的 4 个光伏场站近 3 年及漫湾光伏实际运行数据见图 5,典型日运行见图 6。

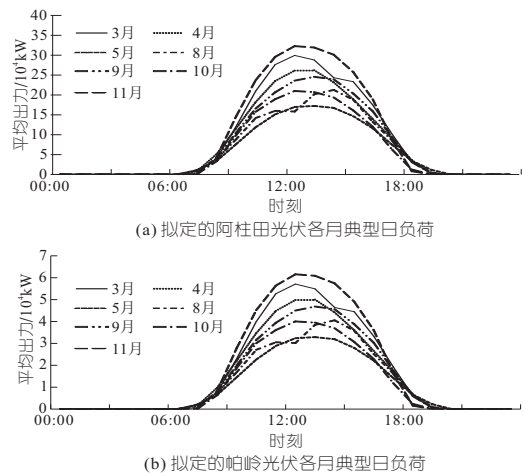


图 5 拟定的漫湾光伏典型出力过程

Fig. 5 Proposed typical output process of Manwan photovoltaic

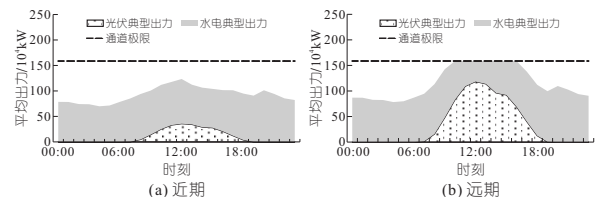


图 6 漫湾水电与光伏典型日内联合运行示意图

Fig. 6 Schematic diagram of typical intraday joint operation of Manwan hydropower and photovoltaics

按照本文所述风险评估及防控方法,选取 4、9、11 月测算见图 7,光伏出力连续较大场景见图 8,7~15 日典型场景见表 5。互补前后对水电运行的影响有:①按午间水光互补出力不大于通道送出能力测算,漫湾水电夜间低谷不应长时间低负荷运行甚至空载。②小湾作为兜底调节电源运行方式受系统供需形势制约,在需要小湾连续大方式运行的情况下,漫湾日水位上涨约 0.5 m,3~5 d 即有弃电风险。在需要小湾连续小方式运行时,漫湾日水位变幅将增加接近 1 m。③小湾断面来水每增加 10%,对应的漫湾通道利用率

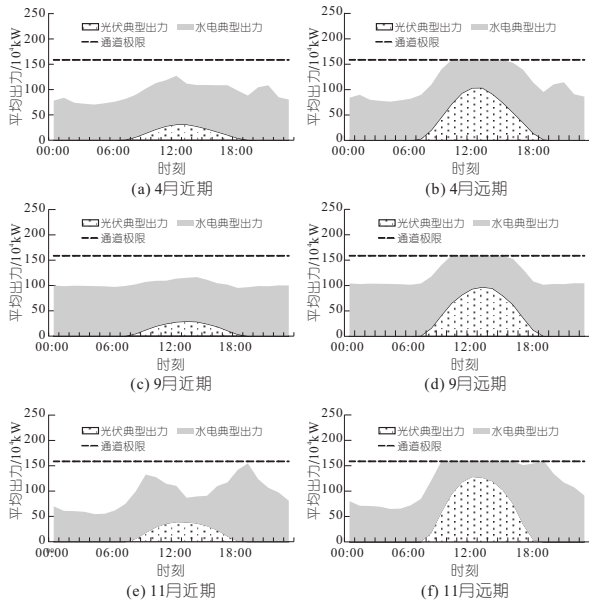


图 7 漫湾水电与光伏典型日内联合运行示意图  
Fig. 7 Schematic diagram of typical intraday joint operation of Manwan hydropower and photovoltaics

表 5 7~15 日典型场景分析

Tab. 5 Typical scenario analysis of 7-15 days

场景 1	水光出力 /10 <sup>4</sup> kW	漫湾变幅/m	场景 2	水光出力 /10 <sup>4</sup> kW	漫湾变幅/m	场景 3	水光出力 /10 <sup>4</sup> kW	漫湾变幅/m	场景 4	水光出力 /10 <sup>4</sup> kW	漫湾变幅/m
4 月 18 日	96	0.53	9 月 6 日	99	0.44	9 月 21 日	103	0.42	10 月 29 日	99	0.44
4 月 19 日	97	0.59	9 月 7 日	101	0.52	9 月 22 日	104	0.49	10 月 30 日	99	0.43
4 月 20 日	100	0.71	9 月 8 日	99	0.46	9 月 23 日	104	0.48	10 月 31 日	100	0.51
4 月 21 日	98	0.63	9 月 9 日	99	0.42	9 月 24 日	104	0.50	11 月 1 日	93	0.47
4 月 22 日	97	0.59	9 月 10 日	100	0.49	9 月 25 日	103	0.46	11 月 2 日	96	0.60
4 月 23 日	95	0.50	9 月 11 日	100	0.47	9 月 26 日	103	0.44	11 月 3 日	97	0.65
4 月 24 日	99	0.66	9 月 12 日	100	0.49	9 月 27 日	105	0.52	11 月 4 日	91	0.37
4 月 25 日	99	0.67	9 月 13 日	98	0.41	9 月 28 日	104	0.50	11 月 5 日	95	0.57
4 月 26 日	97	0.59	9 月 14 日	100	0.47	9 月 29 日	103	0.44	11 月 6 日	95	0.58
4 月 27 日	98	0.61	9 月 15 日	99	0.42	9 月 30 日	103	0.43	11 月 7 日	96	0.61
4 月 28 日	96	0.52				10 月 1 日	98	0.41	11 月 8 日	95	0.53
									11 月 9 日	94	0.53
									11 月 10 日	95	0.55
									11 月 11 日	95	0.57
									11 月 12 日	95	0.53

注:场景 1 指光伏出力高峰时段通道调节空间约 20×10<sup>4</sup>kW,超出则影响水电运行;场景 2、3 指小湾仍有部分调节空间,来水较预测多 25%,光伏出力高峰时段面临弃电风险,需要通过调整小湾水位消纳;场景 4 指小湾基本没有调节空间,来水较预测多 20%,则发生弃电。

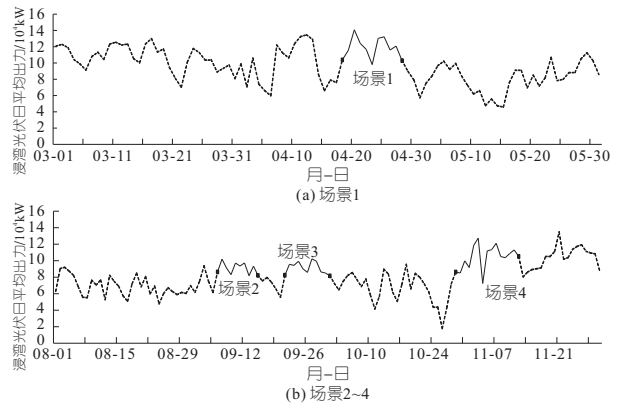


图 8 漫湾光伏连续出力较大场景

Fig. 8 Scenario with high continuous output of Manwan photovoltaic

增加约 5%~10%。应适当控制小湾起调水位,留出合理调节空间。

表 6 为调度规则效益评价,典型日避免弃电损失见图 9。由表 6、图 9 可知,梯级水光互补联合优化调度后增加收益 2 598×10<sup>4</sup> 元,在基本不影响漫湾水电收益的情况下,光伏收益有显著增加,说明本文所提方法在光伏装机容量占比逐渐加大的情况下具有合理经济性。

### 4 结论

本文提出一种基于实际运行的多时间尺度梯级水光互补联合调度规则制定方法,并将其应用于澜沧江小湾—漫湾水光互补系统中。结果表明,在不影响水电调节作用的同时实现了水光联合系统经济效益显著增加,具备推广至流域水风

表 6 调度规则效益评价

Tab. 6 Benefit evaluation of scheduling rules

项目	优化前			优化后		
	水电电	光伏电	合计	水电电	光伏电	合计
	量收益	量收益	收益	量收益	量收益	收益
1月	8 089	6 919.2	15 008	8 089	6 919	15 008
2月	7 491	6 854.4	14 345	7 491	6 854	14 345
3月	9 903	7 812.0	17 715	9 903	7 812	17 715
4月	9 319	6 696.0	16 015	9 319	6 696	16 015
5月	11 033	6 472.8	17 506	13 729	6 473	20 202
6月	13 701	5 184.0	18 885	13 701	5 184	18 885
7月	14 543	5 356.8	19 900	14 736	5 357	20 093
8月	14 872	5 803.2	20 676	15 258	5 803	21 061
9月	18 613	2 721.6	21 335	15 258	5 400	20 658
10月	13 965	5 356.8	19 322	13 965	5 357	19 322
11月	11 369	6 696.0	18 065	11 369	6 696	18 065
12月	11 418	6 472.8	17 891	11 418	6 473	17 891
年	144 317	72 346	216 662	144 236	75 024	219 260

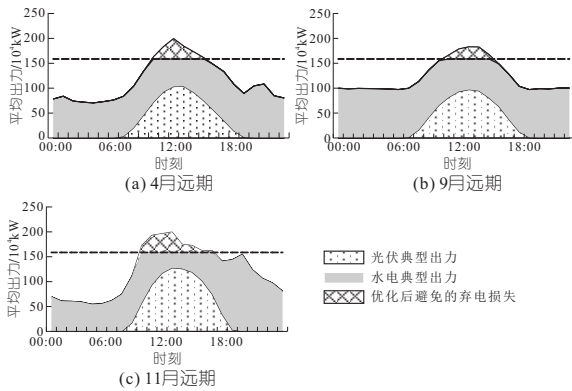


图 9 典型日内调度规则效益评价

Fig. 9 Benefit evaluation of typical daily scheduling rules

光储清洁能源一体化基地运行的可行性。

参考文献:

[1] 张俊涛,程春田,于申,等.水电支撑新型电力系统灵活性研究进展、挑战与展望[J].中国电机工程学报,2024,44(10):3862-3885.

[2] 程春田.碳中和下的水电角色重塑极其关键问题[J].电力系统自动化,2021,45(16):29-36.

[3] 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.

[4] 宋柯.基于场景特征聚类的水光互补系统优化调度[J].水电能源科学,2021,39(6):202-205.

[5] 朱燕梅,陈仕军,黄炜斌,等.一定弃风光率下的水光风互补发电系统容量优化配置研究[J].水电能源科学,2018,36(7):215-218.

[6] 申建建,王月,程春田,等.水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.

[7] 安莉娜,范国福,余兴奎,等.乌江洪家渡水电站水光互补协调运行及其对梯级的研究影响[J].水电与抽水蓄能,2023,9(增刊1):40-45.

[8] 冯欢,于洁,雷芳,等.乌江流域洪家渡水光互补日前优化调度研究[J].水电与新能源,2023,37(7):14-19.

[9] 古婷婷,苏立,何光元.梯级水电站水光互补发电系统稳定性分析[J].水电与抽水蓄能,2021,7(5):96-103.

[10] 万家豪,苏浩,冯冬涵,等.计及源荷匹配的风光互补特性分析与评价[J].电网技术,2020,44(9):3219-3226.

### Research on Scheduling Rules for Cascade Hydro-Photovoltaic Complementary Systems Considering Nested Operation at Multiple Time Scales

YIN Shu-hong<sup>1,2</sup>, LI Hong-gang<sup>1,2</sup>, WANG Yu-qian<sup>1,2</sup>, LI Yang-yi-cheng<sup>1,2</sup>

(1. Huaneng Lancang River Hydropower Inc., Kunming 650204, China; 2. Yunnan Province Water, Wind and Solar Energy Integrated Engineering Technology Innovation Center, Kunming 650214, China)

**Abstract:** With the construction and operation of integrated clean energy bases, there is an urgent need for multi-energy joint dispatch. On the basis of cascade hydropower joint scheduling, this article embeds the risk of channel electricity curtailment as a penalty constraint, integrates the working experience of scheduling personnels with rolling ideas, and explores a method for formulating multi-time scale cascade hydro-photovoltaic complementary joint scheduling rules based on actual operation. The potential risks of power abandonment is identified in advance and control measures are proposed. By selecting the benefits of hydroelectric power generation and energy storage, as well as photovoltaic power generation, a complementary function of hydro-photovoltaic joint system is established to evaluate the scheduling rules. The proposed method has been applied to the hydro-photovoltaic complementary system of Xiaowan and Manwan on the Lancang River. The results show that the economic benefits of the hydro-photovoltaic joint system is significantly increased without significantly affecting the hydropower regulations. The idea has the feasibility of promoting the joint operation of the integrated hydro-photovoltaic energy storage and clean energy watershed base in future.

**Key words:** multiple-time scales; scheduling rules of hydro-photovoltaic complementary systems; Xiaowan and Manwan HPPs on the Lancang River; electricity curtailment risks; benefit assessment