

DOI: 10.13622/j.cnki.cn42-1800/tv.1671-3354.2025.05.003

# 多能互补系统一体化调度效益评估

张乐辰, 黄天任

(华电电力科学研究院有限公司, 浙江 杭州 310030)

**摘要:** 双碳目标下, 实现水风光一体化调度运行是促进大规模风光消纳, 支撑电网安全稳定运行的重要途径之一。以西南某流域水风光梯级电站为研究对象, 以系统发电效益最大为目标构建中长期多能互补调度模型; 采用分层评价的方法, 构建了涵盖水风光全系统、水电子系统、风电子系统和光伏子系统的水风光互补调度效益评估指标体系, 测算不同运行场景下调度运行效益。研究成果量化了一体化调度对研究区域不同类型电站的效益影响, 对提升流域水风光资源利用率具有重要意义。

**关键词:** 多能互补调度模型; 一体化运行; 评估体系; 调度效益

**中图分类号:** TM61      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1671-3354(2025)05-0009-05

## Evaluation of the Benefit of Integrated Scheduling of Multi-energy Complementary Systems

ZHANG Lechen, HUANG Tianren

(Huadian Electric Power Research Institute Co., Ltd., Hangzhou 310030, China)

**Abstract:** To achieve the carbon peaking and carbon neutrality goals, integrated scheduling and operation of hydro-wind-photovoltaic power stations is one of the important ways to promote large-scale consumption of wind and photovoltaic power and support the safe and stable operation of power grids. Taking the cascade hydro-wind-photovoltaic power stations in a river basin in Southwestern China as the research object, a medium-term to long-term multi-energy complementary scheduling model is constructed with the goal of maximizing the power generation benefit. Then, hierarchical evaluation method is adopted to construct a hydro-wind-photovoltaic power complementary scheduling benefit evaluation index system, which covers the hydropower, wind power and photovoltaic power subsystems and the integrated hydro-wind-photovoltaic power system. The scheduling and operation benefits under different operation conditions are calculated. The results provide a quantified assessment of the impact of integrated scheduling on the benefits of different types of power stations in the study area, which is of great importance for improving the utilization rate of the hydro-wind-photovoltaic power resources.

**Key words:** multi-energy complementary scheduling model; integrated operation; evaluation system; scheduling benefit

在碳达峰、碳中和以及新型电力系统建设等国家重大战略背景下, 我国清洁能源的发展迎来了历史性机遇。太阳能、水能等可再生能源具有环保、可再生等优点, 充分利用水风光资源是构建绿色、低碳的新型电力系统, 提升电力系统运行效率的必由之路。风、光电出力具有强随机性、间歇性和波动性, 大规模并网会对电网的稳定运行造成冲击, 进一步加剧电网调峰难度。水电机组控制较简单、启动调节迅速, 同时水库具备一定库容, 是调节能力较强的清洁能源。利用水轮机组

快速调节能力对冲风、光出力的波动, 形成优质、稳定的互补发电系统, 实现互补调度是目前公认的应对大规模风光消纳难题的方式之一<sup>[1-3]</sup>。

对此国内外专家学者已开展了大量研究, 马晓伟等<sup>[4]</sup>构建短期调度模型评估水风光联合运行中的弃电、弃水及失负荷风险, 提取响应关系, 提出计及短期运行特征的水风光互补中长期调度规则编制方法; 谭乔凤等<sup>[5]</sup>系统研究了大规模风光接入背景下梯级水电站在长期、日前和实时尺度上的调度方式, 并应用于

收稿日期: 2025-02-06

作者简介: 张乐辰, 女, 工程师, 主要从事梯级水电站发电调度工作。

指导雅砻江流域锦官梯级水风光多能互补调度;曹辉等<sup>[6]</sup>提出基于马尔科夫链和 Copula 函数的水风光联合场景生成方法,构建了基于多重不确定性下的水风光多能互补长期优化调度方法。当前水风光多能互补调度模型难点主要集中在耦合复杂调度需求和场景,以及提升大规模非线性问题的求解效率两个方面。针对调度效益评价,吴文惠等<sup>[7]</sup>结合常规考核评价方法,着重采用优化挖潜考核评价方法对乌江梯级发电效益进行评价;聂强等<sup>[8]</sup>提出了调度智能化综合指数,利用该指数体系评价智能集控水平,为水电行业推进智能化调度提供统一评价模版。黄显峰等<sup>[9]</sup>提出以目标识别区和电量分布评价水光系统调度成果,直观反映系统长短期运行工况的目标偏好与风险边界。现有的评估体系主要针对常规水电调度,鲜少有研究涉及到水风光多能互补调度效益评估,目前尚未建立较为系统的多能互补调度评估体系。

本文以贵州西南某流域水风光梯级电站为研究对象,以系统发电效益最大为目标搭建长期水风光多能互补调度模型,采用分层评价的方法,从运行效益和资源利用两个角度构建水风光互补调度效益评估指标体系。通过测算不同场景下的计算数据,比较水风光系统单独运行和互补运行时评估指标的差异,综合分析多能互补系统一体化调度运行效益。

## 1 研究方法

建立水风光多能互补一体化调度效益评估体系对于能源体系可持续发展具有重要意义,通过指标体系计算评估调度结果,为调度人员提供直观反馈,及时修正调度模型的约束边界,实现资源利用最大化,研究思路如图 1 所示。

### 1.1 水风光多能互补调度模型

长期水风光多能互补调度模型以年为调度周期,月为步长,受到出力坦化影响,无法表现水风光日内互补及通道竞争关系,因此本文长期调度模型统筹考虑了弃电损失,引入弃电函数概念,定量描述水电出力与风光弃电之间的关系。模型以水风光系统发电效益最大为目标,嵌套风光弃电损失函数,综合考虑风光出力约束、梯级水库系统约束及电力系统约束。模型的目标函数与约束条件描述如下。

#### 1.1.1 目标函数

$$\max F = \sum_{i=1}^T \sum_{i} (N_{H,t,i} \cdot r_{H,i} + N_{N,t,i} \cdot r_{N,i}) \cdot \Delta t \quad (1)$$

$$N_{N,t,i} = (N_{PV,t,i} + N_{W,t,i}) [1 - f_{loss,i}(N_{H,t,i})] \quad (2)$$

式中: $N_{H,t,i}$ 表示第*i*个外送通道的水电出力; $N_{N,t,i}$ 表示第*i*个外送通道的新能源实际出力; $r_{H,i}$ 为第*i*个外送

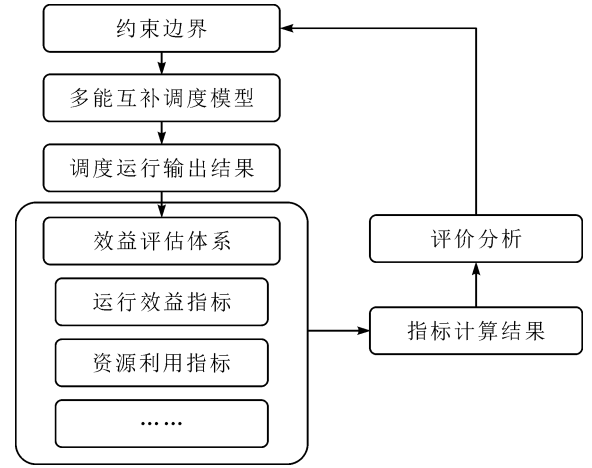


图 1 计算思路

通道的水电电价; $r_{N,i}$ 为第*i*个外送通道的新能源电价; $N_{PV,t,i}$ 表示第*i*个外送通道的光伏出力; $N_{W,t,i}$ 表示第*i*个外送通道的风电出力; $f_{loss,i}(\ast)$ 为第*i*个外送通道的弃电损失函数,通过拟合多组水电实际出力与对应风光弃电率的关系得到。

#### 1.1.2 约束条件

##### 1) 水量平衡方程

$$V_{i,t+1} = V_{i,t} + (I_{i,t} - Q_{i,t} - Ev_{i,t}) \cdot \Delta t \quad (3)$$

式中: $V_{i,t}$ 和 $V_{i,t+1}$ 分别表示第*i*个水库在第*t*个时段的初末库容; $I_{i,t}$ 、 $Q_{i,t}$ 和 $Ev_{i,t}$ 分别表示第*i*个水库在第*t*个时段的入库流量、出库流量和蒸发损失; $\Delta t$ 表示时段时长。

##### 2) 水库水位约束

$$Z_{u,i,t}^{\min} \leq Z_{u,i,t} \leq Z_{u,i,t}^{\max} \quad (4)$$

式中: $Z_{u,i,t}$ 表示第*i*个水库在第*t*个时段的上游水位; $Z_{u,i,t}^{\max}$ 和 $Z_{u,i,t}^{\min}$ 分别表示对应水库在对应时段上游水位的上下限。

##### 3) 水库下泄流量约束

$$Q_{i,t}^{\min} \leq Q_{i,t} \leq Q_{i,t}^{\max} \quad (5)$$

式中: $Q_{i,t}$ 表示第*i*个水库在第*t*个时段的总下泄流量,由发电流量 $Q_{g,i,t}$ 和弃水流量 $Q_{a,i,t}$ 组成; $Q_{i,t}^{\max}$ 和 $Q_{i,t}^{\min}$ 分别表示对应水库在对应时段总下泄流量的上下限。

##### 4) 水库出力约束

$$N_{h,i,t}^{\min} \leq N_{h,i,t} \leq N_{h,i,t}^{\max} \quad (6)$$

式中: $N_{h,i,t}$ 表示第*i*个水库在第*t*个时段的发电出力; $N_{h,i,t}^{\max}$ 和 $N_{h,i,t}^{\min}$ 分别表示对应水库在对应时段发电出力的上下限。

##### 5) 调度期末库水位约束

$$Z_{i,t} = Z_i^{\text{end}} \quad (7)$$

式中, $Z_i^{\text{end}}$ 表示第*i*个水库给定的调度期末水库水位。

##### 6) 光电输出功率约束

$$P_{PV}^{\min} \leq P_{PV,t} \leq P_{PV}^{\max} \quad (8)$$

式中: $P_{PV,t}$ 为系统中光伏发电场在第 $t$ 个时段的输出功率; $P_{PV}^{\min}$ 、 $P_{PV}^{\max}$ 分别为系统中光伏发电场所能输出的最小、最大功率。

7) 风电输出功率约束

$$P_W^{\min} \leq P_{W,t} \leq P_W^{\max} \quad (9)$$

式中: $P_{W,t}$ 为系统中风力发电场在第 $t$ 个时段的输出功率; $P_W^{\min}$ 、 $P_W^{\max}$ 分别为系统中风力发电场所能输出的最小、最大功率。

8) 送出通道约束

$$NT_i \leq TCC \quad (10)$$

式中: $NT_i$ 为混合系统出力; $TCC$ 为送出通道容量限制。

9) 变量非负约束

即所有变量均大于等于零。

1.1.3 求解流程

针对水风光多能互补调度模型,在初始化流域梯级水电、光伏及风力电站边界条件和决策变量的基础上,选择智能优化算法进行迭代求解,求解流程如图2所示。

1.2 指标体系

建立水风光互补调度效益评估体系对构建新型电力系统具有重要意义,其核心价值在于可以为运行人员提供调度结果反馈,有助于深度了解一体化调度运行的现状,及时调整与优化策略,确保资源的最佳利用,为一体化系统长期稳定运行和持续优化提供有力支撑。本文采用分层评价的方法,构建了涵盖水风光

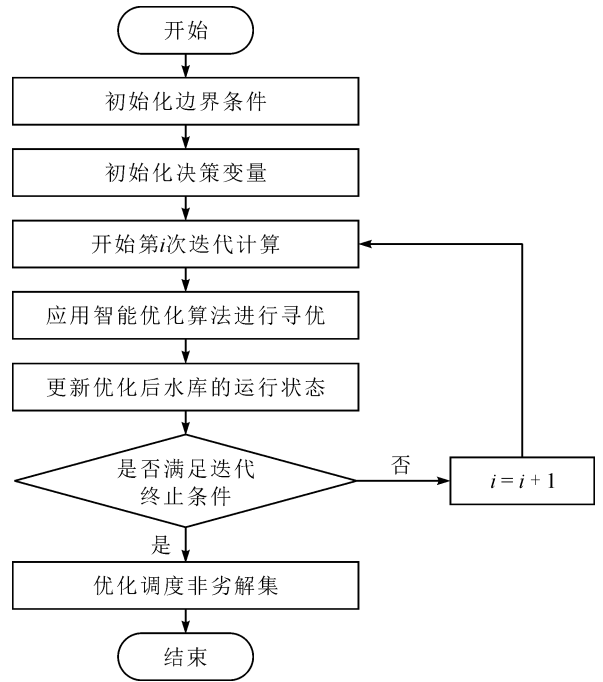


图2 模型求解流程

全系统、水电子系统、风电子系统和光伏子系统的水风光互补调度效益评估指标体系。从运行效益、资源利用两个角度出发,提出一系列具有表征意义的评估指标,具体如图3所示。运行效益指标主要包括发电量和发电效益,资源利用指标则针对不同能源的特性,提出耗水率、可用水量利用率、弃风率、弃光率、利用小时等;针对水风光系统,通盘考虑提出了外送通道利用率和风光资源利用率指标。

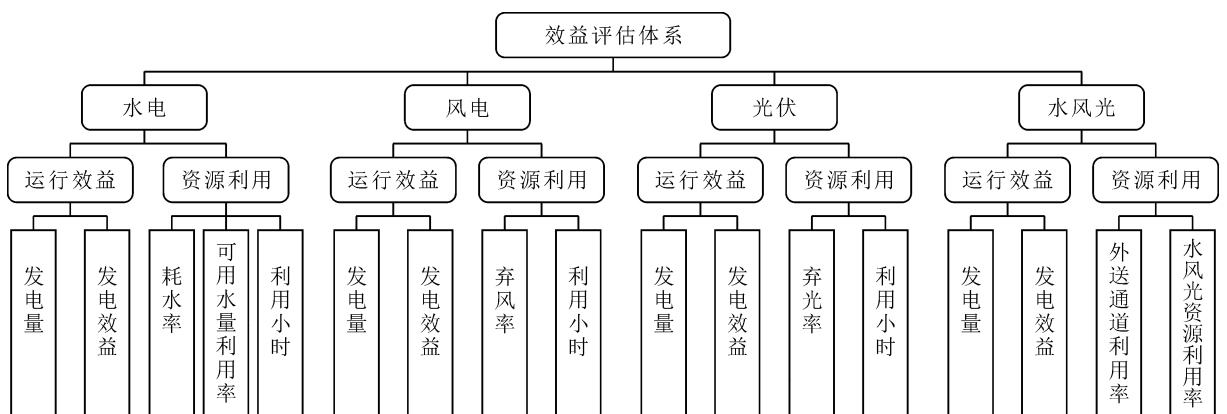


图3 指标评估体系

2 案例分析

本文以贵州西南某流域水风光梯级电站为研究对象,流域三级水库已经形成且具备良好的调节性能,该区域具有水风光互补的条件,风光电站利用现有水电

通道送出,较好地满足电力系统调峰、光伏消纳及电力外送的需求,其中水电站1为龙头电站,为不完全多年调节性能,水电站2、3为日调节性能,风光电站分别与对应的水电站打捆送出,电站装机容量如表1所示。

为了突出对比互补运行对综合效益的影响,选取

来水较丰年份(2020年)运行数据作为研究时段,采用水风光多能互补调度模型计算。设置以下两个调度场景。

表1 研究流域水风光配置 MW

梯级	装机			通道容量
	水电	风电	光伏	
水风光1	1 040	50	1 500	1 040
水风光2	558	20	780	558
水风光3	880	200	1 440	880

单独运行:水风光单独制定和执行发电计划,仅利用同一外送通道送出。

互补调度:水电出力过程需配合风、光伏出力过程,使系统联合出力尽可能平稳且弃电量最小。

## 2.1 水电子系统运行结果分析

水电子系统运行指标计算结果如表2所示,表2中展示了两种调度模式下水电子系统的调度效益评估指标,单独运行时,三级水电站从上游至下游发电量为26.74、18.11、40.39亿kWh,年发电效益共26.73亿元,年装机利用小时数分别为2 571.2、3 245.5、4 589.8 h,平均耗水率依次为2.77、5.65、3.30 m<sup>3</sup>/kWh。互补运行时,三级水电站从上游至下游发电量为27.46、18.10、39.98亿kWh,年发电效益共26.82亿元,年装机利用小时数分别为2 640.4、3 243.7、4 543.2 h,平均耗水率依次为2.71、5.64、3.32 m<sup>3</sup>/kWh。两种模式下,可用水量利用率均为100%,未产生弃水。

表2 水电子系统运行评估指标

电站	运行模式	发电量	发电效益	耗水率	可用水量利用率	利用小时数
		/亿 kWh	/亿元	/(m <sup>3</sup> ·kWh <sup>-1</sup> )	/%	/h
水电站1	独立	26.74	8.15	2.77	100.0	2571.2
	互补	27.46	8.37	2.71	100.0	2640.4
水电站2	独立	18.11	5.75	5.65	100.0	3245.5
	互补	18.10	5.75	5.64	100.0	3243.7
水电站3	独立	40.39	12.83	3.30	100.0	4 589.8
	互补	39.98	12.70	3.32	100.0	4 543.2

## 2.2 光伏子系统运行结果分析

光伏子系统运行指标计算结果如表3所示,表3中展示了两种调度模式下光伏子系统的调度效益评估指标。单独运行时,光伏电站发电量分别为12.71、5.75、6.93亿kWh,年发电效益共8.93亿元,弃光率分别为17.4%、28.1%、49.5%,年装机利用小时数分别为847.3、736.9、481.4 h。互补运行时,光伏电站发电量分别为15.39、8.00、12.00亿kWh,年发电效益共12.44亿元,弃光率分别为0%、0%、14.0%,年装机利用小时数分别为1 026.0、1 025.6、833.2 h。

## 2.3 风电子系统运行结果分析

风电子系统运行指标计算结果如表4所示,表4中展示了两种调度模式下风电子系统的调度效益评估指标。单独运行时,风电发电量分别为0.94、0.35、3.14亿kWh,年发电效益共1.55亿元,弃风率分别为9.0%、14.5%、23.8%,年装机利用小时数分别为1 881.3、1 761.3、1 569.2 h。互补运行时,风电发电量分别为1.03、0.41、3.84亿kWh,年发电效益共1.85亿

表3 光伏子系统运行评估指标

电站	运行模式	发电量	发电效益	弃光率	利用小时数/h
		/亿 kWh	/亿元	/%	
光伏1	独立	12.71	4.47	17.4	847.3
	互补	15.39	5.41	0	1 026.0
光伏2	独立	5.75	2.02	28.1	736.9
	互补	8.00	2.81	0	1 025.6
光伏3	独立	6.93	2.44	49.5	481.4
	互补	12.00	4.22	14.0	833.2

元,弃风率分别为0%、0%、7.7%,年装机利用小时数分别为2 060.0、2 050.0、1 921.0 h。

## 2.4 水风光系统运行结果分析

水风光系统运行指标计算结果如表5所示,表5中展示了两种调度模式下水风光互补系统的调度效益评估指标。单独运行时,水风光系统发电量为115.06

表4 风电子系统运行评估指标

电站	运行模式	发电量 /亿 kWh	发电效益 /亿元	弃光率 /%	利用小时数/h
光伏 1	独立	0.94	0.33	9.0	1 881.3
	互补	1.03	0.36	0	2 060.0
光伏 2	独立	0.35	0.12	14.5	1 761.3
	互补	0.41	0.14	0	2 050.0
光伏 3	独立	3.14	1.10	23.8	1 569.2
	互补	3.84	1.35	7.7	1 921.0

表5 水风光系统运行评估指标

电站	运行模式	发电量 /亿 kWh	发电效益 /亿元	外送通道利用率/%	水风光资源利用率/%
水风光 1	独立	40.39	12.95	47.4	93.6
	互补	43.88	14.14	48.2	100.0
水风光 2	独立	24.21	7.90	54.3	91.3
	互补	26.51	8.70	54.2	100.0
水风光 3	独立	50.46	16.37	75.9	86.2
	互补	55.82	18.34	75.4	96.1

亿 kWh,发电效益 37.22 亿元,外送通道利用率分别为 47.4%、54.3%、75.9%,水风光资源利用率分别为 93.6%、91.3%、86.2%;互补运行时,水风光系统发电量为 126.21 亿 kWh,发电效益 41.18 亿元,外送通道利用率分别为 48.2%、54.2%、75.4%,水风光资源利用率分别为 100.0%、100.0%、96.1%。由此可见,互补调度可以显著提升流域资源利用率,提升电站发电效益和通道利用效率。

从长期优化调度结果来看,风光通过水电通道送出,风光与水电抢占外送通道的现象较为明显,弃电量大幅上升。从弃电率来看,三级电站通道均存在较大的挤占风险,其中水电站 3 的外送通道挤占情况最为严重。在水风光互补调度后,弃电现象可得到较大程度改善。

综合分析上述指标结果,本文提出的水风光多能互补调度模型长期调度目标为系统发电效益最大,引入弃电函数后,实现了在长期模型中量化考虑日内弃电情况,所以水风光独立运行模式和互补运行模式本质差异在日内尺度是否考虑互补。当日内水风光独立运行时,其新能源弃电率明显较高,进而在长期尺度上

对水电发电过程影响较大,具体体现在为防止弃电损失,水电降低运行水位、减少出力,为光伏电量送出腾出空间;而日内互补运行时,水电凭借其灵活调蓄能力配合风光出力特性运行,使得风光弃电率大幅降低,使得长期尺度上对水电发电的影响较小,因此整体发电效益较水光单独运行模式大。

### 3 结语

本文以水风光系统发电效益最大为目标构建了水风光多能互补调度模型,针对水风光全系统、水电子系统、风电子系统和光伏子系统搭建了水风光互补调度效益评估体系。通过比较水风光单独运行和水风光互补运行两种模式的运行指标,来定量评估多能互补系统互补调度综合效益。得出以下结论:

1)水风光互补运行可提升流域总发电量、发电效益、通道利用率以及资源利用率等指标,降低弃风、弃光率,具有显著的经济效益。

2)水电用容量支持风光,风光用电量支持水电,互补调度优化了水风光总出力过程和不完全多年调节电站的年内水位调蓄过程。

3)互补运行可显著提升风、光电站的效益指标,降低风、光电站的弃电率,对新能源电站运行十分有益。

#### 参考文献:

- [1]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.
- [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): 3 871-3 885.
- [3]范开明,黄滔滔. 光伏电站接入光照水电站的水光互补分析[J]. 水电站机电技术, 2023, 46(10): 94-96.
- [4]马晓伟,郭怿,李研,等. 计及短期运行特征的水风光互补中长期调度[J]. 人民长江, 2024, 55(6): 9-15, 84.
- [5]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.
- [6]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.
- [7]吴文惠,张双虎,张忠波,等. 梯级水库集中调度发电效益考核评价研究——以乌江梯级水库为例[J]. 水力发电学报, 2015, 34(10): 60-69.
- [8]聂强,缪益平. 雅砻江梯级水电站智能集控评价体系研究[J]. 人民长江, 2024, 55(S1): 237-240, 244.
- [9]黄显峰,黄晗,鲜于虎成,等. 源-荷匹配机制下的水光互补系统中长期嵌套优化调度[J/OL]. 水利水电科技进展, 2025, 45(2): 38-45.