

基于云模型的水光互补清洁能源基地 容量配置方案优选

黄显峰¹,周引航¹,张启凡²,李大成³,李旭⁴,吴迪³

(1. 河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098; 2. 武汉大学水利水电学院,湖北 武汉 430072;
3. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司,贵州 贵阳 550081;
4. 华能澜沧江水电股份有限公司,云南 昆明 650214)

摘要:为优选水光互补清洁能源基地容量配置方案,从安全性、环保性、经济性、技术性4个方面选取14个指标构建了综合评价指标体系,采用改进云模型方法对容量配置方案进行评价。改进云模型方法以基于层次分析法改进的云模型求解主观权重,以熵权法求解客观权重,组合赋权得到指标权重,再利用条件云发生器计算各指标的隶属度,最后根据级别特征值法计算容量方案等级评分,确定最优方案。将该方法应用于我国西南某清洁能源基地水光互补系统容量配置方案的优选,优选结果与集对分析法优选结果和实际选择方案均相符,证明了该方法的有效性与适用性。

关键词:水光互补系统;容量配置方案;改进云模型;组合赋权;集对分析

中图分类号:TV213.9

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2024)01-0044-08

Capacity allocation scheme optimization based on cloud model for a hydro-photovoltaic complementary clean energy base //HUANG Xianfeng¹, ZHOU Yinhang¹, ZHANG Qifan², LI Dacheng³, LI Xu⁴, WU Di³ (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. School of Water Resources and Hydropower Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. POWERCHINA Guiyang Engineering Corporation Limited, Guiyang 550081, China; 4. Hua'neng Lancang River Hydropower Inc., Kunming 650214, China)

Abstract: In order to optimize the capacity configuration scheme for a hydro-photovoltaic complementary clean energy base, a comprehensive evaluation index system was constructed by selecting 14 indicators from the 4 aspects of safety, environmental protection, economy, and technology. An improved cloud model method was used to evaluate the capacity configuration scheme. The improved cloud model based on analytic hierarchy process was used to solve the subjective weights, the entropy weight method was used to solve the objective weights, the combined weighting was used to obtain the indicator weights, and then a conditional cloud generator was used to calculate the membership degree of each indicator. Finally, based on the level eigenvalue method, the capacity scheme rating was calculated to determine the optimal scheme. The method was applied to the optimization of the capacity configuration scheme for a hydro-photovoltaic complementary clean energy base in Southwestern China. The optimization results are consistent with the set pair analysis method and the actual selection scheme, proving the effectiveness and applicability of the method.

Key words: hydro-photovoltaic complementary system; capacity allocation scheme; improved cloud model; combination weighting; set pair analysis

在“碳达峰”和“碳中和”的总体要求下,我国正积极推进多能互补的清洁能源基地建设,以逐步实现能源生产消费方式绿色低碳变革^[1]。能源互补发电系统是清洁能源基地建设的重要内容之一。

能源互补发电系统是建立在能源资源互补特性之上的多能源混合发电系统,而配置互补系统容量的合理规模是达到综合效益最大化的关键。朱燕梅

等^[2]以系统弃风光电量最小和接入的风光总规模最大为目标,建立了水光风互补发电系统容量优化模型,以计算水电站可接入的风光项目的最优比例和容量配置。李健华等^[3]建立了以满足互补和最大年收益率为目标的多能互补发电系统容量配置模型,提出了多能互补发电系统的容量配置规划方法。王磊等^[4]提出了一种基于双层优化模型的风-光-储

互补发电系统优化配置方法,外层优化以互补发电系统年净收益最大化为目标,内层优化以互补发电系统日出力波动率和日出力峰谷差最小化为目标。谭乔凤等^[5]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,弥补了风光预测不确定性导致的发电偏差,可提高供电可靠性。申建建等^[6]提出水风光互补系统灵活性需求量化及协调优化模型,该模型能够根据需求变化给出多类型电源互补调度方案。可见,目前研究从优化配置方法、改进计算模型、增加约束条件等各方面对配置互补系统容量合理规模做了探索和尝试,而提高能源互补利用率、保障系统送电性能稳定性等课题是研究中重要的一环。

水光互补是能源互补的主要形式之一。水资源与光资源具有非常明显的时间互补特性,在水、光资源丰富的地区,基于资源空间的重合性以及时间上的互补性构建互补系统,可充分利用水电站已有送出线路通道和水电机组快速调节能力,将光伏发电和水电机组的电力联合送出,提高线路通道利用率,减小光伏发电波动性的影响^[7-9]。互补系统能有效弥补独立发电系统的不足,在往电网输送更稳定、可靠电能的同时,合理利用空间以及共同的输电设备,减少维护费用和投资,降低发电成本。明波等^[10-11]考虑了水光互补系统光电的短期随机波动性,提出了嵌套短期弃电风险的水光互补中长期优化调度方法,并对3种水光互补中长期随机优化调度方法(隐随机优化、显随机优化、参数-模拟-优化)进行了评估,可为中长期水光互补运行管理提供决策支持。梁艺缤等^[12]为降低光伏出力波动性、提高水光互补系统的电量效益,研究了水光互补系统协调性和经济性之间的关系,发现两者呈现明显的竞争关系。蒋万泉等^[13]建立了基于系统发电容量和备用容量耦合关系的两阶段优化模型,提出了容量确定方法。Yuan等^[14]提出了一种包括典型场景分类、各场景下光伏流入量和发电量分析以及场景组合的场景分析技术,在此基础上,构建优化模型确定了与水电站互补运行的光伏电站最优规模。上述研究对水光互补系统中的调度方案、容量确定方法等问题提出了优化思路,同时,为了减少互补过程中因系统弃水或弃光产生的电量损失,考虑了水光互补系统的多样场景,得出互补效率高的容量配置方案。

在优选容量配置方案的过程中,需以综合效益最优为目标,拟定多个水光互补清洁能源基地容量配置方案,最后在综合比较分析后,优选出最合适的容量配置方案。因此需要构建一套评价指标体系,对不同容量配置方案进行综合评价和优选。云模型^[15]作为一种兼具模糊性与随机性的评价工具,可

以实现定量数据和定性概念之间的转化。吴杰等^[16]将云模型理论应用于储能容量优化模型,从而确定了储能系统的配置方案。何璞玉等^[17]构建了水电外送竞争力评价指标体系,采用云模型对四川、云南和贵州的水电外送竞争力进行了分析研究。

本文结合云模型对水光互补系统容量配置方案进行评价,并以我国西南某清洁能源基地水光互补系统为实例进行分析。

1 容量配置方案评价指标体系

1.1 评价指标体系构建

水光互补清洁能源基地容量配置方案优选需要对多个方案进行评级,属于多属性决策问题,建立一套综合评价指标体系和选取合适的指标是对容量配置方案进行有效评价的关键所在。

综合评价指标体系的核心目标是容量配置方案的优选,基于核心目标可提出4个关键问题,即方案安全性是否合格,方案环保性是否达标,方案经济性是否良好以及方案技术性是否合理,将这4个关键问题列为4个子系统,分析其内涵,进而提出各个子系统的评价指标,最后形成核心目标-子系统-评价指标的层次结构,得到水光互补清洁能源基地容量配置方案评价指标体系。

影响水光互补系统的因素众多,依据国家发展改革委和国家能源局对于多能互补发展的指导意见,构建水光互补系统容量配置方案综合评价指标体系需结合构建清洁低碳、安全高效的能源体系的目标与要求,综合分析水光互补系统的影响因素,在选取指标的过程中遵循科学实用、系统客观的原则,结合能源互补发电系统的发展现状,既要兼顾定性定量、独立与典型,也要注意整个评价过程的可操作性^[18]。因此,本文依据综合评价指标体系的核心目标和4个子系统,参考屈小云等^[19]梳理的评价指标,提出包含14个指标的容量配置方案评价指标体系如图1所示。

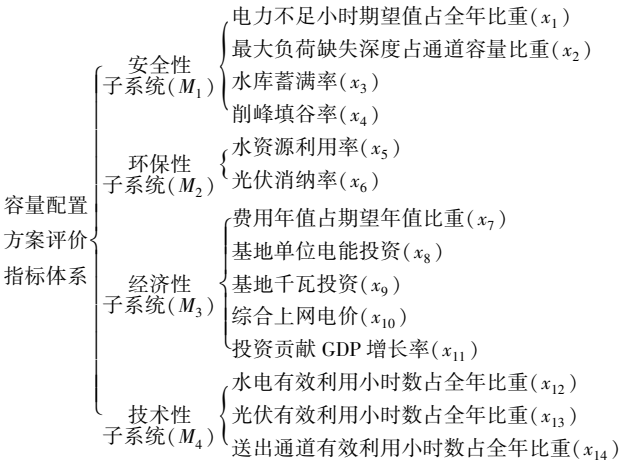


图1 容量配置方案评价指标体系

1.2 评价指标等级划分标准

本文将容量配置方案的优劣分为 4 个等级,分别为优秀(Ⅰ)、良好(Ⅱ)、合格(Ⅲ)与不合格(Ⅳ),确定评价指标体系中各指标的等级标准和等级范围,如表 1 所示。

2 改进云模型评价方法

本文采用改进云模型方法对水光互补清洁能源基地容量配置方案进行评价,对云模型的改进表现在改变云模型中权重的计算方法。传统云模型的权重处理方式:依次使用云模型逆、正云发生器,根据初始权重模拟大量数据,取均值计算得到权重。初始权重一般来自专家意见,这使得经过云模型云发生器处理后得到的权重带有较强的主观性。而基于层次分析法改进的云模型计算得到的主客观权重,可以在一定程度上避免过大的主观差异,使结果更为合理。计算得到主观权重之后,再采用熵权法计算客观权重,将主、客观权重综合赋权得到组合权重,最后将组合权重与云模型结合计算隶属度,得到所需的评价结果^[20]。

2.1 指标权重计算

a. 改进云模型方法计算主观权重。云模型可以根据初始权重,通过逆向云发生器求得 3 个特征值(期望、熵、超熵),再用正向云发生器补充云滴求得权重,其计算步骤^[21-23]如下:①收集一定数量专家的评价意见,由层次分析法求得初始权重;②通过逆向云发生器求解 3 个特征值;③根据所求的 3 个特征值,用正向云发生器补充云滴,并基于最大隶属度原则求得权重,并根据云滴计算正态随机数和确定度;④对云滴取均值并进行归一化处理,即可得到云模型主观权重。

b. 熵权法计算客观权重。在信息论基本原理中,信息是系统有序程度的一个度量,熵是系统无序程度的一个度量。后来,熵被运用于多指标综合评价中,因为某一个指标提供的信息量与该指标的信息熵成正比,所以熵值可作为指标在评价中重要程

度的一个判断,以此来确定其权重^[18]。对于可查询充足数据的综合评价项目,熵权法可以提供客观的依据,其计算步骤如下^[24]:①根据已有的资料,将每个指标的样本数据规范化,作为其特征比重;②计算每项指标的熵值和信息效用价值;③计算各指标权重。

c. 计算组合权重。由上述两种方法可分别计算主观权重和客观权重,兼顾了专家意见和客观数据,既衡量了各指标在评价体系中的影响程度和重要性,又考虑了数据之间的关联性,将二者进行综合计算,可使所得结果更为合理。组合权重的计算公式如下^[25]:

$$w_i = w'_i w''_i / \sum_{i=1}^m w'_i w''_i \quad (i = 1, 2, \cdots, m) \quad (1)$$

式中 w_i 、 w'_i 、 w''_i 分别为第 i 项指标的组合权重、主观权重和客观权重。

2.2 指标等级计算

指标等级采用云模型的 X 条件云发生器计算,其具体步骤如下^[26-28]:①收集资料,得到评价目标的指标值,并确定评价指标等级标准;②计算各指标的 3 个特征值,并依据正、逆向指标分别求解各个指标在各等级下的隶属度;③通过级别特征值的方法进行评价等级评判,最后得到整体评价等级。

2.3 改进云模型方法评价流程

改进云模型方法评价流程如图 2 所示。

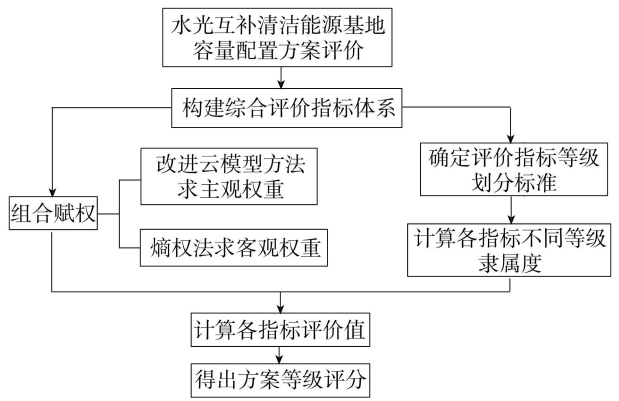


图 2 改进云模型方法评价流程

表 1 容量配置方案评价指标等级划分标准

评价等级	$x_1/\%$	$x_2/\%$	$x_3/\%$	$x_4/\%$	$x_5/\%$	$x_6/\%$	$x_7/\%$
Ⅰ	0 ~ 15	≤60	90 ~ 100	≥45	90 ~ 100	90 ~ 100	90 ~ 95
Ⅱ	>15 ~ 30	>60 ~ 75	80 ~ <90	30 ~ <45	80 ~ <90	80 ~ <90	>95 ~ 100
Ⅲ	>30 ~ 45	>75 ~ 90	60 ~ <80	15 ~ <30	60 ~ <80	60 ~ <80	>100 ~ 105
Ⅳ	>45	>90 ~ 100	<60	0 ~ <15	<60	<60	>105 ~ 110

评价等级	$x_8/(元/(kW \cdot h))$	$x_9/元$	$x_{10}/(元/(kW \cdot h))$	$x_{11}/\%$	$x_{12}/\%$	$x_{13}/\%$	$x_{14}/\%$
Ⅰ	0 ~ 1	8 000 ~ 8 500	0.5 ~ 1	≥60	≥60	≥40	≥70
Ⅱ	>1 ~ 3	>8 500 ~ 9 000	0.25 ~ <0.5	50 ~ <60	50 ~ <60	25 ~ <40	55 ~ <70
Ⅲ	>3 ~ 5	>9 000 ~ 9 500	0.1 ~ <0.25	40 ~ <50	40 ~ <50	10 ~ <25	40 ~ <55
Ⅳ	>5	>9 500 ~ 10 000	<0.1	<40	<40	<10	<40

3 实例研究

3.1 工程概况

我国西南某清洁能源基地径流丰沛稳定、落差大,水能资源丰富,规划的梯级水电站建设条件较好,是我国尚待开发的大型水电能源基地之一,同时流域及周边太阳能资源丰富,流域年日照时数在2 200 h左右,年总辐射量在5 800 ~ 6 700 MJ/m²之间,稳定度为0.65,整个流域辐射量相对平均,规划区域的太阳能资源属于“很丰富至最丰富”等级,太阳能资源很稳定,适于进行太阳能资源的开发利用。流域干流河段河道长379 km,落差约1 080 m,平均比降2.85‰,基本为峡谷河段。

通过水光互补可建成大型清洁能源基地,规划清洁能源基地总规模约2 000万kW,多年平均发电量约570亿kW·h。

在综合考虑了清洁能源基地水力资源条件、水电站工程建设条件、光伏技术可开发规模、水光互补特性、输电通道条件及受端负荷特性、光伏电站与换流站和水电站区位关系等因素后,选取了水电862万、907万、952.5万、1 000万kW 4种规模,光伏1 000万、1 100万、1 200万、1 400万kW 4种规模,组合拟定了16种水光互补系统容量配置方案,如表2所示。

表2 水光互补系统容量配置方案 单位:万kW

方案编号	水电规模	光伏规模	方案编号	水电规模	光伏规模
A1	862	1000	C1	952.5	1000
A2	862	1100	C2	952.5	1100
A3	862	1200	C3	952.5	1200
A4	862	1400	C4	952.5	1400
B1	907	1000	D1	1000	1000
B2	907	1100	D2	1000	1100
B3	907	1200	D3	1000	1200
B4	907	1400	D4	1000	1400

3.2 评价指标权重计算

由改进云模型方法求解得到子系统和评价指标的隶属度分布如图3和图4所示。

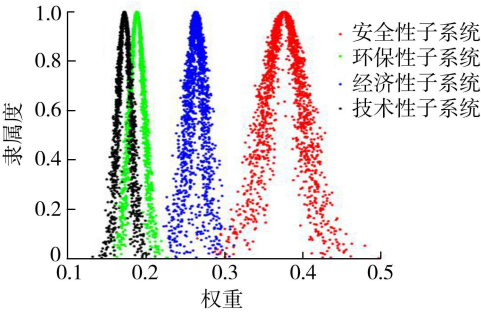


图3 容量配置方案子系统隶属度

由图3和图4可知,各子系统和14个评价指标

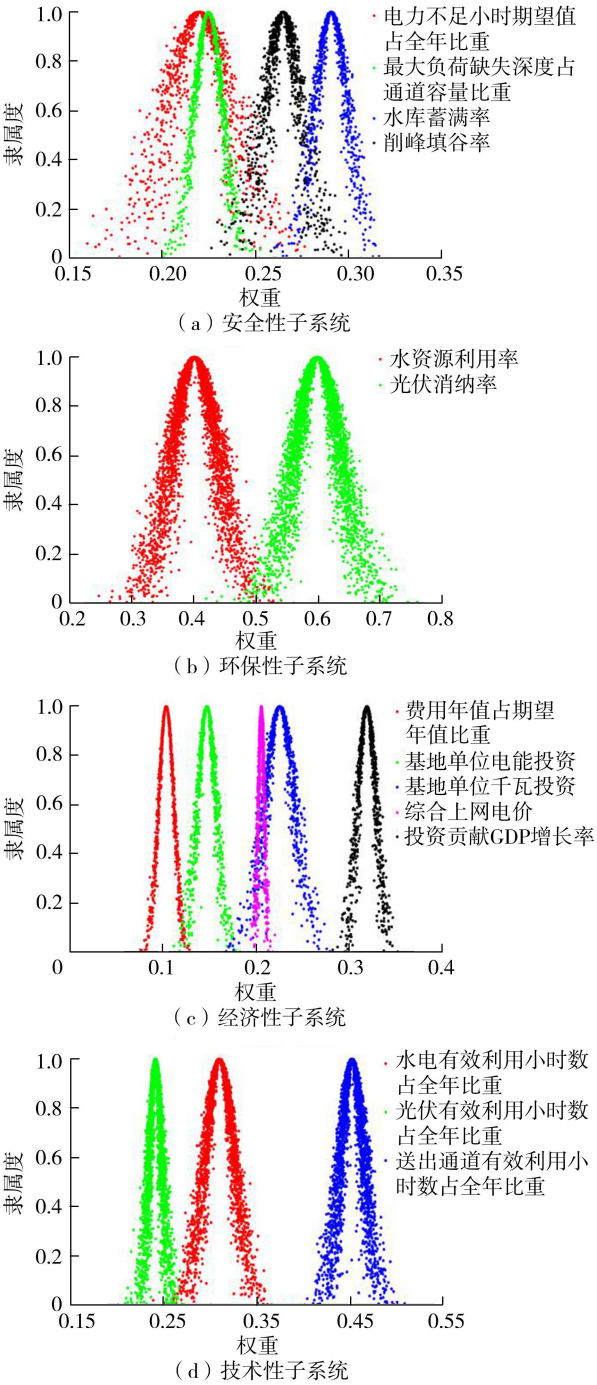


图4 容量配置方案评价指标隶属度

的模拟隶属度均呈正态分布,通过求均值的方法可得各评价指标的云模型主观权重,客观权重可由熵权法计算得到,将上述主、客观权重依据式(1)计算得到组合权重如表3所示。

3.3 评价等级计算

根据每个指标的指标值和评价指标等级划分标准,通过条件云发生器可计算得到每个评价指标对应于各个等级的隶属度,最后得到16个容量配置方案的等级评分如表4所示。

3.4 评价结果分析

由表4等级评分可知,C3方案的等级评分最

表 3 容量配置方案评价指标权重计算结果			
指标	主观权重	客观权重	组合权重
x_1	0.082 5	0.084 3	0.097 0
x_2	0.084 6	0.076 2	0.090 0
x_3	0.109 2	0.024 0	0.036 6
x_4	0.099 7	0.058 1	0.080 7
x_5	0.075 6	0.022 1	0.023 3
x_6	0.112 9	0.084 0	0.132 2
x_7	0.027 2	0.081 0	0.030 7
x_8	0.038 7	0.031 7	0.017 1
x_9	0.059 3	0.090 7	0.075 0
x_{10}	0.054 2	0.025 6	0.019 4
x_{11}	0.084 3	0.136 9	0.160 9
x_{12}	0.053 3	0.124 0	0.092 1
x_{13}	0.041 5	0.058 7	0.033 9
x_{14}	0.077 7	0.102 6	0.111 1

表 4 容量配置方案云模型等级评分							
方案	评分	方案	评分	方案	评分	方案	评分
A1	86.16	B1	88.57	C1	85.63	D1	86.54
A2	87.11	B2	87.07	C2	87.25	D2	88.25
A3	86.64	B3	88.43	C3	89.81	D3	88.78
A4	88.39	B4	89.47	C4	88.01	D4	87.72

高,为 89.81 分,是这 16 种容量配置方案的推荐方案,这与该清洁能源基地最后选择的规划方案是相符的,证明了改进云模型方法适用于水光互补清洁能源基地容量配置方案评价。该方案各指标在对应评价等级下的隶属度如表 5 所示。

表 5 C3 方案各子系统和评价指标不同评价等级隶属度					
子系统与指标	指标值	隶属度			
		I	II	III	IV
M_1		0.120 8	0.573 8	0.220 0	0.085 5
x_1	24.06%	0.000 1	0.998 2	0.001 7	0
x_2	73.40%	0.001 8	0.864 5	0.133 8	0
x_3	100%	1.000 0	0	0	0
x_4	15.31%	0	0	0.677 8	0.322 2
M_2		0.997 4	0.002 6	0.000 0	0.000 0
x_5	97.14%	1.000 0	0	0.000 0	0
x_6	91.61%	0.997 0	0.003 0	0	0
M_3		0.002 3	0.922 7	0.074 7	0.000 3
x_7	98.66%	0.016 5	0.878 7	0.103 5	0.001 3
x_8	3.32 元/(kW·h)	0	0.003 4	0.996 6	0
x_9	8901 元	0	0.999 2	0.000 8	0
x_{10}	0.379 5 元/(kW·h)	0.000 2	0.999 8	0	0
x_{11}	51.17%	0.001 2	0.984 0	0.014 6	0.000 2
M_4		0.206 9	0.401 7	0.390 7	0.000 8
x_{12}	49.57%	0.000 1	0.360 0	0.638 1	0.001 9
x_{13}	18.34%	0	0.000 8	0.999 1	0.000 2
x_{14}	70.45%	0.441 3	0.558 6	0	0

由表 5 可知,基于最大隶属度原则,C3 方案的安全性、环保性、经济性、技术性 4 个子系统的评价等级分别为良好、优秀、良好、良好,对此评价结果进行具体的分析如下:

a. 在安全性子系统下,电力不足小时期望值占全年比重(x_1)和最大负荷缺失深度占通道容量比重

(x_2)2 个指标的评价等级均为良好,这说明由于发电不足导致受端负荷损失电量的平均值较低,且最严重的负荷缺失工况能够在控制范围之内,电力系统的可靠性较好,能够按质按量、连续不断地供应用户所需电力,可见水光的互补性对于减少系统的弃电量十分有效。水库蓄满率(x_3)指标的评价等级为优秀,对于年调节水库,水库能快速提高水头并保证蓄满,能更好地发挥发电效益,配合光伏消纳,可为水光互补系统的协调提供重要保障。而削峰填谷率(x_4)指标的评价等级仅为合格,这表明了互补系统对综合出力削峰填谷的效果并不理想,导致电力系统的稳定性受影响,而这可能是由于水电机组和光伏发电的联合出力尚未能有效削减峰谷差,需要在联合出力的基础上更好地发挥各自的优势。方案的安全性指标直接反映了电力系统能否保持稳定的运行状态,光伏发电具有间歇性和波动性,而水力发电机组的加入,可充分利用水力互补特性,有效降低发电量不足的概率、频率和持续时间。

b. 在环保性子系统下,水资源利用率(x_5)和光伏消纳率(x_6)2 个指标的评价等级均为优秀,证明了水光互补系统对水资源和光资源的利用效率均很高。现阶段电力系统大多存在弃风弃光的现象,水光联合发电比单独使用水力发电或光伏发电更能弥补由于能源间歇性带来的损失,促进能源消纳,提高自然资源的利用率,更好地发挥水光互补系统的环境效益。

c. 在经济性子系统下,费用年值占期望年值比重(x_7)、基地单位电能投资(x_8)、基地千瓦投资(x_9)3 个指标的评价等级分别为良好、合格、良好,这说明水光互补系统的电力竞争力较强,投资成本因水光联合送电而降低。综合上网电价(x_{10})指标的评价等级为良好,代表了基地的盈利能力较好,这是由于减少弃电的同时提高了送电质量和稳定性。投资贡献 GDP 增长率(x_{11})指标的评价等级为良好,这说明基地不但有利于能源合理利用,而且能带动当地经济的发展。发电系统的经济性是水光互补系统是否具有竞争性的决定因素之一,合适的收益会极大地促进水光互补系统的发展。

d. 在技术性子系统下,水电有效利用小时数占全年比重(x_{12})、光伏有效利用小时数占全年比重(x_{13})、送出通道有效利用小时数占全年比重(x_{14})3 个指标的评价等级分别为合格、合格、良好,这说明水电系统和光伏系统均未得到最大利用,而互补效果较为显著,可以在满足综合出力要求的前提下,提高水电系统和光伏系统的利用水平。水光互补系统的技术问题也是需要关注的重要方面,应提升技术

设备的利用效果,改善运行情况,有效地发挥效益。

综上所述,C3 方案在各个子系统下的评价结果都较好,充分发挥了能源互补的优势,但仍需要关注和充分利用水光各自的特点。

3.5 集对分析法验证

为了进一步验证改进云模型方法评价结果的准确性,采用集对分析法^[29]对水光互补清洁能源基地容量配置方案进行评价对比。由集对分析法得到的各方案等级评分如表 6 所示。

表 6 容量配置方案集对分析等级评分							
方案	评分	方案	评分	方案	评分	方案	评分
A1	84.20	B1	84.16	C1	84.02	D1	83.87
A2	83.70	B2	83.55	C2	83.44	D2	83.52
A3	82.78	B3	83.39	C3	84.78	D3	82.87
A4	82.88	B4	82.78	C4	82.86	D4	83.00

由表 6 可知,由于计算方法的不同,集对分析法得到的等级评分整体比改进云模型方法等级评分要低,但是评价结果与云模型一致: C3 方案的等级评分最高。

由集对分析法计算得到的 C3 方案各指标在不同评价等级下的隶属度可知,有 1 个指标的评价等级为优秀,8 个指标的评价等级为良好,5 个指标的评价等级为合格,整体情况与云模型相似。

相较于改进云模型方法,集对分析法由于计算公式的限制,其最高隶属度通常只能到 0.5,导致其在评价过程中隶属度的分布不是十分准确。而改进云模型方法在计算过程中生成了大量云滴(即模拟了大量数据),能更精确地反映数字特征,但其边界等级的标准有时会导致隶属度的计算产生误差。

4 结 语

对于水光互补系统而言,容量配置方案的优选是其重中之重,一个合理的容量配置方案可以体现两种能源的互补特性,提高能源的利用率,在改善能源结构的同时发挥出最大的效益。本文构建了水光互补清洁能源基地容量配置方案评价指标体系,结合改进云模型方法对我国西南某清洁能源基地的 16 种初选方案进行了全面有效的评价,筛选出最合适的方案,并采用集对分析法加以验证,得到了一致的结果,且与基地选择的规划方案相同,证明了云模型在水光互补系统容量配置方案评价中具有较好的适用性。

云模型兼具模糊性与随机性的特点,实现了定量数据和定性概念之间的转化,同时在计算过程中结合层次分析法进行改进,使得评价结果更加合理,将其应用于水光互补系统的容量配置方案评价,可

使清洁能源基地取得最大的综合效益。当然,在评价过程中,可以构建更加合适全面的评价指标体系,修正边界等级的标准,以提高评价结果的准确性。

参考文献:

[1] 马钊,张恒旭,赵浩然,等. 双碳目标下配电系统的新使命和新挑战[J]. 中国电机工程学报,2022,42(19): 6931-6944. (MA Zhao,ZHANG Hengxu,ZHAO Haoran, et al. New mission and challenge of power distribution and consumption system under Dual-carbon Target [J]. Proceedings of the CSEE,2022,42(19):6931-6944. (in Chinese))

[2] 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. (ZHU Yanmei, CHEN Shijun, HUANG Weibin, et al. Optimal capacity configuration of hydro-photovoltaic-wind complementary power generation system under wind and photovoltaic curtailment[J]. Water Resources and Power, 2018, 36 (7): 215-218. (in Chinese))

[3] 李健华,刘继春,陈雪,等. 含可再生能源的多能互补发电系统容量配置方法[J]. 电网技术,2019,43(12): 4387-4397. (LI Jianhua, LIU Jichun, CHEN Xue, et al. Capacity allocation of multi-energy complementary system including renewable energy [J]. Power System Technology,2019,43(12):4387-43978. (in Chinese))

[4] 王磊,王昭,冯斌,等. 基于双层优化模型的风-光-储互补发电系统优化配置[J]. 太阳能学报,2022,43(5): 98-104. (WANG Lei, WANG Zhao, FENG Bin, et al. Optimal configuration of wind-photovoltaic-ess complementary power generation system based on bi-level optimization model [J]. Acta Energaiae Solaris Sinica, 2022,43(5):98-104. (in Chinese))

[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. (TAN Qiaofeng, NIE Zhuang, WEN Xin, et al. Operation modes of cascade hydropower stations considering large-scale integration of wind and photovoltaic power [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, 41 (9): 44-55. (in Chinese))

[6] 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. (SHEN Jianjian, WANG Yue, CHENG Chuntian, et al. Flexibility demand quantification and optimal operation model of water-wind-solar complementary system [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2022,53(11):1291-1303. (in Chinese))

[7] 韩晓言,丁理杰,陈刚,等. 梯级水光蓄互补联合发电关键技术与研究展望[J]. 电工技术学报,2020,35(13): 2711-2722. (HAN Xiaoyan, DING Lijie, CHEN Gang, et

- al. Key technologies and research prospects for cascaded hydro-photovoltaic-pumped storage hybrid power generation system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35 (13): 2711-2722. (in Chinese))
- [8] 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))
- [9] 黄显峰, 鲜于虎成, 许昌, 等. 考虑短期互补的水光发电系统中长期优化调度[J]. 水力发电学报, 2022, 41 (11): 68-78. (HUANG Xianfeng, XIANYU Hucheng, XU Chang, et al. Medium- and long-term optimal scheduling of hydro-solar power system considering short-term complementation [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, 41(11): 68-78. (in Chinese))
- [10] 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))
- [11] 明波, 郭鹏程, 陈晶, 等. 水光互补电站中长期随机优化调度方法评估[J]. 水电与抽水蓄能, 2021, 7 (5): 20-24. (MING Bo, GUO Pengcheng, CHEN Jing, et al. Evaluation of mid-and long-term stochastic optimal operation approaches for hydro-solar hybrid power plants [J]. Hydropower and Pumped Storage, 2021, 7 (5): 20-24. (in Chinese))
- [12] 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. (in Chinese))
- [13] 蒋万泉, 刘继春, 韩晓言, 等. 离网条件下考虑短时间尺度的水光蓄多能互补发电系统备用容量确定方法[J]. 电网技术, 2020, 44 (7): 2492-2502. (JIANG Wanxiao, LIU Jichun, HAN Xiaoyan, et al. Reserve optimization for offline multi-energy complementary generation system in short time scale[J]. Power System Technology, 2020, 44 (7): 2492-2502. (in Chinese))
- [14] YUAN Wenlin, LIU Zhe, SU Chengguo, et al. Photovoltaic capacity optimization of small and medium-sized hydro-photovoltaic hybrid energy systems considering multiple uncertainties [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 276: 124170.
- [15] 吴杰康, 熊焰. 风水气互补发电优化的云模型自适应粒子群优化算法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34 (增刊1): 17-24. (WU Jiekang, XIONG Yan. An cloud model theory based adaptive particle swarm optimization algorithm for complementary power generation optimization of wind-energy, hydro-energy and natural gas [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34 (Sup1): 17-24. (in Chinese))
- [16] 吴杰, 丁明, 张晶晶. 基于云模型和 k -means 聚类的风电场储能容量优化配置方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42 (24): 67-73. (WU Jie, DING Ming, ZHANG Jingjing. Capacity configuration method of energy storage system for wind farm based on cloud model and k -means clustering [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(24): 67-73. (in Chinese))
- [17] 何璞玉, 杜英, 王超, 等. 双碳背景下基于 AHP-CM 的水电外送竞争力模型研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2022, 53 (5): 152-162. (HE Puyu, DU Ying, WANG Chao, et al. AHP-CM-based study on hydropower outward-transmission competitiveness model under background of dual carbon targets[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2022, 53(5): 152-162. (in Chinese))
- [18] 赵凤展, 李奇, 张启承, 等. 多能互补能源系统多维度综合评价方法[J]. 农业工程学报, 2021, 37 (17): 204-210. (ZHAO Fengzhan, LI Qi, ZHANG Qicheng, et al. Multi-dimensional comprehensive evaluation of multi-energy complementary energy system [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37 (17): 204-210. (in Chinese))
- [19] 屈小云, 吴鸣, 李奇, 等. 多能互补综合能源系统综合评价研究进展综述[J]. 中国电力, 2021, 54 (11): 153-163. (QU Xiaoyun, WU Ming, LI Qi, et al. Review on comprehensive evaluation of multi-energy complementary integrated energy systems [J]. Electric Power, 2021, 54 (11): 153-163. (in Chinese))
- [20] 周兰庭, 袁志美, 徐长华, 等. 基于改进云模型的水利工程项目成本风险管理研究[J]. 水电能源科学, 2019, 37 (4): 152-154. (ZHOU Lanting, YUAN Zhimei, XU Changhua, et al. Research on cost risk management of water conservancy project based on modified cloud model [J]. Water Resources and Power, 2019, 37(4): 152-154. (in Chinese))
- [21] XIE Xue, ZHANG Jianyun, LIAN Yanqing, et al. Cloud model combined with multiple weighting methods to evaluate hydrological alteration and its contributing factors [J]. Journal of Hydrology, 2022, 610: 127794.
- [22] 杨子桐, 黄显峰, 方国华, 等. 基于改进云模型的南水北调东线工程效益评价[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41 (4): 60-66. (YANG Zitong, HUANG Xianfeng, FANG Guohua, et al. Benefit evaluation of Eastern Route of

South-to-North Water Transfer Project based on improved cloud model[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(4): 60-66. (in Chinese)

- [23] 郭金,顾冲时,何菁. 基于组合赋权二维云模型的堤防工程风险评价[J]. 水利水电科技进展,2022,42(6): 117-122. (GUO Jin, GU Chongshi, HE Jing. Risk assessment for levee engineering based on a two-dimensional cloud model with combination weighting[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022,42(6):117-122. (in Chinese))
- [24] 艾亚迪,魏传江,马真臻. 基于AHP-熵权法的西安市水资源开发利用程度评价[J]. 水利水电科技进展,2020,40(2):11-16. (AI Yadi, WEI Chuanjiang, MA Zhenzhen. Evaluation on water resources development and utilization degree based on AHP-entropy weight method [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020,40(2):11-16. (in Chinese))
- [25] 沈时,王栋,王远坤,等. 水资源承载力综合评价的组合权重-MNCM法[J]. 南京大学学报(自然科学),2021,57(5):887-895. (SHEN Shi, WANG Dong, WANG Yuankun, et al. Combined weight-MNCM evaluation method for water resources carrying capacity [J]. Journal of Nanjing University (Natural Science), 2021,57(5):887-895. (in Chinese))
- [26] 黄显峰,刘展志,方国华. 基于云模型的水利现代化评价方法与应用[J]. 水利水电科技进展,2017,37(6):

54-61. (HUANG Xianfeng, LIU Zhanzhi, FANG Guohua. Evaluation and application of water conservancy modernization index system based on a cloud model [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(6) :54-61. (in Chinese))

- [27] 宋菲燕,林凯荣,何艳虎,等. 考虑权重不确定性的珠三角地区水环境承载力评价:基于博弈论与云模型[J]. 水利水电技术,2020,51(11):145-154. (SONG Feiyan, LIN Kairong, HE Yanhu, et al. Assessment of water environment carrying capacity in the Pearl River Delta region with considering weight uncertainty:based on game theory and cloud model [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(11):145-154. (in Chinese))
- [28] CHENG K, FU Q, MENG J, et al. Analysis of the spatial variation and identification of factors affecting the water resources carrying capacity based on the cloud model[J]. Water Resources Management, 2018, 32(8):2767-2781.
- [29] 叶飞,方国华,金菊良. 基于灰色聚类集对分析法的水资源承载力评价模型[J]. 水资源与水工程学报,2020, 31(3):30-36. (YE Fei, FANG Guohua, JIN Juliang. Evaluation model of water resources carrying capacity based on grey cluster set pair analysis method[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2020, 31(3):30-36. (in Chinese))

(收稿日期:2023-03-07 编辑:熊水斌)

(上接第 43 页)

- [16] SINGH R K, ACHARYA P. Identification and evaluation of supply chain flexibilities in Indian FMCG sector using DEMATEL [J]. Global Journal of Flexible Systems Management, 2014, 15(2): 91-100.
- [17] 姜沁瑶, 李洁. 基于 ISM 的建筑工人安全意识影响因素 [J]. 土木工程与管理学报, 2016, 33(3): 106-110. (JIANG Qinyao, LI Jie. Influencing factors of construction workers' safety awareness based on interpretive structure model [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2016, 33(3): 106-110. (in Chinese))
- [18] 褚召强, 杨高升. 考虑事件关联性的施工安全事故致因分析 [J]. 土木工程与管理学报, 2021, 38(3): 153-160. (CHU Zhaoqiang, YANG Gaosheng. Cause analysis on construction safety accidents considering event correlation [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2021, 38(3): 153-160. (in Chinese))
- [19] 王军武, 陆超. 关联性视角下装配式建筑工程吊装事故致因机理分析 [J]. 安全与环境学报, 2021, 21(3): 1158-1164. (WANG Junwu, LU Chao. On the cause-result consequence of the hoisting accidents in the prefabricated construction projects from the perspective of relevance [J]. Journal of Safety and Environment, 2021, 21(3):

1158-1164. (in Chinese))

- [20] 陈立文,张孟佳,李素红,等. 基于 DEMATEL-ISM 的既有建筑节能改造推广影响因素研究[J]. 建筑经济, 2022, 43(1): 84-92. (CHEN Liwen, ZHANG Mengjia, LI Suhong, et al. Influencing factors of energy saving retrofit of existing buildings based on DEMATEL-ISM model[J]. Construction Economy, 2022, 43(1): 84-92. (in Chinese))
- [21] 王伟明,邓潇,徐海燕. 基于三维密度算子的群体 DEMATEL 指标权重确定方法[J]. 中国管理科学, 2021, 29(12): 179-190. (WANG Weiming, DENG Xiao, XU Haiyan. A new index weights calculation method of group DEMATEL based on three-dimensional density operator[J]. Chinese Journal of Management Science, 2021, 29(12): 179-190. (in Chinese))
- [22] 郑霞忠,周佳丽,邵波,等. 基于 D-I 的塔机作业物体打击事故致因分析[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(6): 83-89. (ZHENG Xiazhong, ZHOU Jiali, SHAO Bo, et al. Causal analysis of strike accident of tower crane operating object based on D-I[J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(6): 83-89. (in Chinese))

(收稿日期:2023-01-13 编辑:俞云利)