

基于物元可拓模型的电力需求响应经济效益评价

杨世海¹,李波¹,杨斌²

(1. 国网江苏省电力有限公司 营销服务中心,南京 210019;2. 国网江苏省电力有限公司 盐城供电分公司,江苏 盐城 224001)

Economic benefit evaluation of power demand response based on matter-element extension model

YANG Shihai¹, LI Bo¹, YANG Bin²

(1. Marketing Service Center, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210019, China; 2. Yancheng Power Supply Company, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Yancheng 224001, China)

摘要:以清洁能源集成消纳的不同利用途径为研究对象,以参与清洁能源集成消纳的电力用户、电网企业和发电企业为主体,构建考虑需求响应的多主体经济效益评价指标体系,运用物元可拓模型对经济效益进行评价。研究表明:参与多能互补系统消纳的经济效益评价等级为优秀,参与微电网和虚拟电厂消纳的经济效益评价等级为良好,参与风光储消纳的经济效益评价等级为不合格。在考虑评价等级偏向程度基础上,进一步发现参与虚拟电厂发电消纳的经济效益的稍高于参与微电网发电消纳的经济效益。研究结论有助于优化不同清洁能源集成消纳利用途径,为建立基于经济效益评价结果的利用途径提供有效的决策依据。

关键词:需求响应;集成消纳;多主体经济效益;物元可拓模型

Abstract: Different utilization approaches in the integration and consumption of clean energy are taken as the research object, and an economic benefit evaluation index system for multi-agent demand response is constructed to participate in the integration and consumption of clean energy from the three main bodies of power users, power grid enterprises and power generation enterprises. The model evaluates economic benefits. The research results show that the economic benefit evaluation level of participating in the multi-energy complementary system consumption is excellent, the economic benefit evaluation level of participating in the microgrid and virtual power plant consumption is good, and the economic benefit evaluation level of participating in the wind and solar storage and consumption is unqualified. On the basis of considering the degree of evaluation grade bias, it is further found that the economic benefits of participating in the generation and consumption of virtual power plants are slightly higher than those of participating in the generation and consumption of microgrids. The research conclusions are helpful to optimize the integrated consumption and utilization of different clean energy sources, and provide an effective decision-making basis for the establishment of utilization methods based on the results of economic benefit evaluation.

Key words: demand response; integration and consumption; multi-agent economic benefit; matter-element extension model

0 引言

需求响应通过制定多元化电力价格机制和激励补偿政策,促进清洁能源发电并网,可实现分布式清洁能源集成优化利用,如微电网、虚拟电厂和冷热电联产系统等集成方式。不同方式投资成本、运行成本和运营成本也不同,因此需要对参与清洁能源集成消纳的考虑需求响应的多主体经济效益进行评价。科学评价参与清洁能源集成消纳的考虑需求响应的多主体经济效益有助于优化不同清

洁能源集成消纳利用途径,进而为建立基于经济效益评价结果的利用途径提供有效的决策依据。

需求响应能带来短期和中长期的经济效益^[1],对于经济效益的研究主要有评价指标体系构建、指标权重确定和综合评估等^[2]。学者们建立了冷热电联产评价指标体系^[3]、跨时空风电特性评价指标体系^[4]、风光储联合发电系统评价指标体系^[5]、太阳能光伏发电评估指标体系^[6]等。在指标权重方面,常用的指标权重计算方法有主观赋权法、客观赋权法和主客观相结合赋权法。其中,主观赋权法依赖专家知识储备与经验来对评价指标赋予权重,主要包括层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)、专家打分法和模糊评价法等。客观赋权法主要根据指标本身信息

收稿日期:2023-05-25;修回日期:2023-06-10

基金项目:国网江苏省电力有限公司科技项目(J2021152)

量和样本差异对评价指标赋予权重,主要包括主成分分析法、因子分析法、熵值法和TOPSIS法等。主观赋权法虽然可以反映主观判断和直觉但是易受主观影响,客观赋权法不受主观影响但是忽略了评价主体的专业知识和经验。主客观相结合赋权法能同时兼得主客观方法各自优势,因此越来越多学者开始使用主客观组合赋权法,如利用AHP-熵权法来对工业大用户能效进行评价^[7];结合熵值法和TOPSIS法来量化评价经济质量^[8]。但是多主体响应的效益评价指标包含定性指标和定量指标,而且许多指标之间也存在矛盾。物元可拓模型能够有效结合事物的“质”和“量”,是解决不相容和矛盾性问题的一个重要定量化工具,运用物元可拓模型对核电站安全运行状态进行评价^[9]。在综合评估结果方面,有些评价结果有绝对意义,如通过因子分析法能够得到评价结果的具体数值,依据这些数值可以对需求响应参与的效益进行分析。有些评价结果没有绝对意义,如TOPSIS法只能对评价对象进行相对排名。还有一些评价结果是给出评价对象的具体等级,如利用“优秀”“良好”“中等”“合格”和“不合格”等模糊概念来反映效益情况。物元可拓模型应用范围越来越广,目前可以应用范围包括优化决策和综合评价等,如物元可拓模型使用关联度函数和关联度^[10]来判断评价对象属于某一等级的程度,取得了良好效果。

以上研究为本文提供了一定的理论支撑与实践指导,但仍存在一些不足:首先,现有研究较少涉及清洁能源集成利用为评估对象,更多的是对单一发电进行评价,但清洁能源集成利用能够充分发挥不同电源的优势互补作用,如何开展相应的经济效益评价工作有待于深入讨论;其次,现有研究考虑需求响应的多主体经济效益评价较少,特别是考虑需求响应的多主体在促进清洁能源集成利用方面;最后,已有需求响应的效益评价方法主要利用常用AHP、熵权法或者AHP-熵权法来确定指标权重,无法有效解决评价指标之间的矛盾性和不可公度性。基于上述分析,本文以清洁能源集成消纳中4种利用途径作为研究对象,以电力用户、电网企业和发电企业3个主体构建参与清洁能源集成消纳的考虑需求响应的多主体经济效益评价指标体系,运用物元可拓模型对经济效益进行评价,进而得到不同清洁能源集成消纳利用途径的具体排序。

1 指标体系构建

参与清洁能源发电的考虑需求响应的多主体经济效益分析中涉及主体有发电公司、电网公司和终端用户。对于这3个主体而言,指标体系选取的

合适与否,很大程度上影响着需求响应参与的经济效益评价结果,因此如何选取评价指标至关重要。

根据相关研究,选取的评价指标体系如表1所示^[11-12]。对发电公司而言,需求响应措施能够引导用户在电力处于低谷时增加用电,而在电力处于高峰或者紧张时减少用电。长远来看,能够产生固定持久负荷,避免机组启停成本,由于节电,还能使系统避免新增装机容量而节约成本;对电网公司而言,需求响应项目有助于增加电力系统供电容量、减少输配电投资成本,进而提高电力系统的平稳性,延长电网设施的设施寿命,降低电力系统的维修成本;对电力用户而言,就激励性需求响应项目来说,电力用户由于削减用电负荷进而能够获得一定政策补贴,也形成了经济收益。

表1 考虑需求响应的多主体经济效益评价指标体系
Table 1 Multi-agent economic benefit evaluation index system considering demand response

一级指标	二级指标	三级指标
经济效益 A	发电侧效益 A ₁	可避免峰荷容量成本 A ₁₁
		可避免发电燃料成本 A ₁₂
		可避免机组启停成本 A ₁₃
		可避免电源建设成本 A ₁₄
	电网侧效益 A ₂	可避免电网投资成本 A ₂₁
		可避免系统运维成本 A ₂₂
		智能设备投资成本 A ₂₃
		可增加的系统负荷率 A ₂₄
		终端用户强制限电成本 A ₃₁
	用户侧效益 A ₃	可获得政策补贴收益 A ₃₂
		用户设备投资成本 A ₃₃

2 物元可拓模型

2.1 物元矩阵

物元矩阵 M 表示形式如下

$$M = (O, C, V) = \begin{bmatrix} o & c_1 & v_1 \\ & c_2 & v_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: o 为事物; c_n 为事物的第 n 个特征; v_n 为第 n 个特征的量值。假设经济效益评估等级分为 m 级,则经典域物元矩阵 M_j 由事物、特征及其量值区间组成,即

$$M_j = (O_j, C, V_j) = \begin{bmatrix} o_j & c_1 & v_{j1} \\ & c_2 & v_{j2} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_{jn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} o_j & c_1(\alpha_{j1}, \beta_{j1}) \\ & c_2(\alpha_{j2}, \beta_{j2}) \\ & \vdots \\ & c_n(\alpha_{jn}, \beta_{jn}) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: o_j 为第 j 个评估等级; $(\alpha_{jn}, \beta_{jn})$ 为第 n 个指标在第 j 个评估等级下的取值范围。

节域物元矩阵是由事物、特征及其特征的拓展

范围组成的矩阵,表示如下

$$M_p = (O, C, V_p) = \begin{bmatrix} O_j & c_1 & v_{p1} \\ & c_2 & v_{p2} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_{pn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} O_j & c_1(\alpha_{p1}, \beta_{p1}) \\ & c_2(\alpha_{p2}, \beta_{p2}) \\ & \vdots \\ & c_n(\alpha_{pn}, \beta_{pn}) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $(\alpha_{pn}, \beta_{pn})$ 为第 n 个指标的取值范围,即节域。对于某一个待评估的事物 O_x ,待测矩阵 M_x 可以表示为

$$M_x = (O_x, C, V_x) = \begin{bmatrix} O_x & c_1 & v_{x1} \\ & c_2 & v_{x2} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_{xn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中:待测矩阵 M_x 中的所有数值均为待评估事物 O_x 各项指标的实际数值。

由于经典域物元矩阵、节域物元矩阵和待测物元矩阵中各个指标的取值范围可能存在较大差异,因此需要对各个指标数值进行规范化处理,才能有效地计算关联度。对于正指标即“越大越好”时,处理方法为 $\gamma_i = \frac{\gamma_i - \alpha_{pi}}{\beta_{pi} - \alpha_{pi}}$;对于负指标即“越小越好”

时,处理方法为 $\gamma_i = \frac{\beta_{pi} - \gamma_i}{\beta_{pi} - \alpha_{pi}}$ 。

2.2 指标权重确定方法

2.2.1 层次分析法

层次分析法步骤如下:

(1) 构建判断矩阵 A 满足 3 个条件: $\alpha_{ij} > 0$ 、 $\alpha_{ij} = \frac{1}{\alpha_{ji}}$ 、 $\alpha_{ii} = 1$, 其中 α_{ij} 为指标 i, j 之间相对权重值。 α_{ij} 标度值及其说明如表 2 所示。

表 2 标度值和说明

Table 2 Scale value and description

标度值	说明
1	i 指标和 j 指标同样重要
3	i 指标比 j 指标稍微重要
5	i 指标比 j 指标明显重要
7	i 指标比 j 指标强烈重要
9	i 指标比 j 指标绝对重要
2,4,6,8	表示上述相邻判断等级的中间值

(2) 计算权重向量。计算矩阵中每行元素的几何平均值,进而得到 $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$,并对向量 w 做归一化处理。

(3) 一致性检验。首先计算判断矩阵最大特征值 $\varphi_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(Aw)_i}{n w_i}$, $(Aw)_i$ 为 Aw 的第 i 个分量。然后计算一致性指标 $C_1 = \frac{\varphi_{\max} - n}{n - 1}$ 。为衡量 C_1 大小,

引入随机一致性指标 R_1 ,其和判断矩阵阶数之间的对应关系见表 3。对判断矩阵一致性进行检验时,

需要计算检验系数 $C_R = \frac{C_1}{R_1}$ 。

表 3 随机一致性指标数值

Table 3 Random consistency index value

矩阵阶数	R_1	矩阵阶数	R_1
1	0	7	1.32
2	0	8	1.41
3	0.58	9	1.45
4	0.90	10	1.49
5	1.12	11	1.51
6	1.24		

2.2.2 熵权法

熵权法确定权重步骤:建立指标矩阵并按上述方法对矩阵中数据进行标准化处理得到矩阵 B ,对于第

i 个指标,计算其熵值 $\varepsilon_i = -\frac{1}{\ln m} \sum_{j=1}^m e_{ji} \ln e_{ji}$,其中 $e_{ji} =$

$$\frac{b_{ji}}{\sum_{j=1}^m b_{ji}}, \text{对于第 } i \text{ 个指标,计算其熵权 } \tau_i = \frac{1 - \varepsilon_i}{\sum_{i=1}^n (1 - \varepsilon_i)}。$$

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{m1} & b_{m2} & \dots & b_{mn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

2.2.3 组合权重和最终权重

基于上述层次分析法和熵权法得到的指标权重,综合这两种权重得到组合权重为

$$\left\{ \frac{w_i \tau_i}{\sum_{i=1}^n (w_i \tau_i)} \quad i = 1, 2, \dots, n \right\}, \text{进一步将组合权重和对应}$$

的二级指标权重相乘可以得到各个指标最终权重 $\{w_i \quad i = 1, 2, \dots, n\}$ 。

2.3 关联函数和关联度

在经典的物元可拓模型中, $K_j(v_i)$ 为待评估对象第 i 个特征与第 j 个等级之间的关联度,用初等关联函数表述如下

$$K_j(v_i) = \begin{cases} -\frac{\rho(v_i, V_{ji})}{|V_{ji}|} & v_i \in V_{ji} \\ \frac{\rho(v_i, V_{ji})}{\rho(v_i, V_{pi}) - \rho(v_i, V_{ji})} & v_i \in V_{pi} \end{cases} \quad (6)$$

$$|V_{ji}| = \beta_{ji} - \alpha_{ji} \quad (7)$$

$$\rho(v_i, V_{ji}) = \left| v_i - \frac{\beta_{ji} + \alpha_{ji}}{2} \right| - \frac{\beta_{ji} - \alpha_{ji}}{2} \quad (8)$$

$$\rho(v_i, V_{pi}) = \left| v_i - \frac{\beta_{pi} + \alpha_{pi}}{2} \right| - \frac{\beta_{pi} - \alpha_{pi}}{2} \quad (9)$$

式中: $\rho(v_i, V_{ji})$ 、 $\rho(v_i, V_{pi})$ 分别为第 i 个指标量值 v_i 到经典域 V_{ji} 、节域 V_{pi} 的距离。如果 $K_j(v_i) = \max K_i(v_i)$,

$l \in \{1, 2, \dots, m\}$, 那么可以判定指标 i 的等级为 j , 进而可以对每一个指标的等级进行判定。综合关联度为各指标关联度和对应权重的乘积, 即 $K_j(v_p) = \sum_{i=1}^n \omega_i K_{ij}(v_p)$, 根据最大关联度准则, 如果 $K_j(v_p) = \max_l K_l(v_p), l \in \{1, 2, \dots, m\}$, 那么可以判定待评估对象等级为 j 。此外, 还可以通过计算级别变量特征来进一步分析属于等级 j 的同时偏向于等级 j^*

的程度。 j^* 计算公式为 $j^* = \frac{\sum_{j=1}^m j \hat{K}_j(v_p)}{\sum_{j=1}^m \hat{K}_j(v_p)}$, 其中 $\hat{K}_j(v_p) = \frac{K_j(v_p) - \min_l K_l(v_p)}{\max_l K_l(v_p) - \min_l K_l(v_p)}, l \in \{1, 2, \dots, m\}$ 。

3 算例分析

3.1 基本数据

本文以清洁能源集成消纳中4种利用途径(常规风光储联合运行、微电网、虚拟电厂和多能互补系统)作为研究对象,对参与不同清洁能源集成消纳的考虑需求响应的多主体经济效益进行评价。对定性指标通过调查问卷形式进行赋值,对定量指标以文献[2]中算例结果为基础进行赋值,得到不同指标初始赋值结果。表4所示为每种集成利用方式下每个指标的具体数值。

表4 评价指标及其数值

Table 4 Evaluation indexes and values

指标	类型	指标数值			
		风光储	微电网	虚拟电厂	多能互补系统
A_{11}	正	3 150	2 200	2 600	1 200
A_{12}	正	205	210	225	260
A_{13}	正	35	50	80	120
A_{14}	正	3 050	2 600	2 100	1 500
A_{21}	正	高	适中	适中	一般
A_{22}	正	一般	高	高	适中
A_{23}	负	0.82	1.48	1.76	2.85
A_{24}	正	10.28	13.65	14.82	18.26
A_{31}	负	适中	较低	较低	低
A_{32}	正	48.55	64.85	66.73	79.44
A_{33}	负	1 185.12	2 258.45	1 625.48	3 245.64

3.2 算例结果

3.2.1 建立经典域及节域

通过对专家进行问卷调查,将需求响应参与清洁能源集成消纳的经济效益划分为优秀、良好、中等、合格和不合格5个等级,并得到各个评价指标的经典域以及节域。对于已经进行规范化处理评价指标而言,取值范围均为 $[0, 1]$ 。

$$\begin{aligned}
 R_1 &= \begin{bmatrix} o_1 c_1(0.6, 1.0] \\ c_2(0.8, 1.0] \\ c_3(0.8, 1.0] \\ c_4(0.6, 1.0] \\ c_5(0.7, 1.0] \\ c_6(0.7, 1.0] \\ c_7(0.8, 1.0] \\ c_8(0.5, 1.0] \\ c_9(0.7, 1.0] \\ c_{10}(0.7, 1.0] \\ c_{11}(0.8, 1.0] \end{bmatrix}, R_2 = \begin{bmatrix} o_2 c_1(0.4, 0.6] \\ c_2(0.6, 0.8] \\ c_3(0.5, 0.8] \\ c_4(0.4, 0.6] \\ c_5(0.5, 0.7] \\ c_6(0.5, 0.7] \\ c_7(0.6, 0.8] \\ c_8(0.4, 0.5] \\ c_9(0.5, 0.7] \\ c_{10}(0.5, 0.7] \\ c_{11}(0.5, 0.8] \end{bmatrix}, R_3 = \begin{bmatrix} o_3 c_1(0.3, 0.4] \\ c_2(0.4, 0.6] \\ c_3(0.3, 0.5] \\ c_4(0.3, 0.4] \\ c_5(0.3, 0.5] \\ c_6(0.3, 0.5] \\ c_7(0.3, 0.6] \\ c_8(0.3, 0.4] \\ c_9(0.3, 0.5] \\ c_{10}(0.3, 0.5] \\ c_{11}(0.3, 0.5] \end{bmatrix}, \\
 R_4 &= \begin{bmatrix} o_4 c_1[0.2, 0.3] \\ c_2(0.1, 0.4] \\ c_3(0.2, 0.3] \\ c_4(0.2, 0.3] \\ c_5(0.1, 0.3] \\ c_6(0.1, 0.3] \\ c_7(0.1, 0.3] \\ c_8(0.2, 0.3] \\ c_9(0.1, 0.3] \\ c_{10}(0.1, 0.3] \\ c_{11}(0.2, 0.3] \end{bmatrix}, R_5 = \begin{bmatrix} o_5 c_1[0, 0.2] \\ c_2[0, 0.1] \\ c_3[0, 0.2] \\ c_4[0, 0.2] \\ c_5[0, 0.1] \\ c_6[0, 0.1] \\ c_7[0, 0.1] \\ c_8[0, 0.2] \\ c_9[0, 0.1] \\ c_{10}[0, 0.1] \\ c_{11}[0, 0.2] \end{bmatrix}, R_p = \begin{bmatrix} o_p c_1[0, 1] \\ c_2[0, 1] \\ c_3[0, 1] \\ c_4[0, 1] \\ c_5[0, 1] \\ c_6[0, 1] \\ c_7[0, 1] \\ c_8[0, 1] \\ c_9[0, 1] \\ c_{10}[0, 1] \\ c_{11}[0, 1] \end{bmatrix}.
 \end{aligned}$$

3.2.2 AHP法确定权重

首先应用AHP法计算得到各个指标的主观权重。根据专家打分平均值(专家打分具体依据见表2),可得考虑需求响应的多主体经济效益二级指标判断矩阵,如表5所示。

表5 考虑需求响应的多主体经济效益二级指标判断矩阵
Table 5 Secondary index judgment matrix of evaluation for multi-agent economic benefit considering demand response

指标	A_1	A_2	A_3
A_1	1	2/3	1/2
A_2	3/2	1	2/3
A_3	2	3/2	1

根据表5,计算可得考虑需求响应的多主体经济效益二级指标权重为 $(0.2211, 0.3190, 0.4590)$,一致性检验结果为 $C_1 = 0.0008, C_R = 0.0013 < 0.1000$,因此该判断矩阵通过一致性检验。发电侧经济效益的三级指标判断矩阵及其权重,如表6所示。

表6 发电侧经济效益的三级指标判断矩阵

Table 6 Third grade index judgment matrix of economic benefit of power generation side

指标	A_{11}	A_{12}	A_{13}	A_{14}
A_{11}	1	3/2	4	3
A_{12}	2/3	1	3	3
A_{13}	1/4	1/3	1	1
A_{14}	1/3	1/3	1	1

根据表6,通过计算可得发电侧经济效益的三级指标权重为(0.434 6,0.330 2,0.113 4,0.121 8),一致性检验结果为 $C_1 = 0.005 4$, $C_R = 0.006 1 < 0.100 0$,因此发电侧经济效益判断矩阵通过一致性检验。电网侧经济效益的三级指标判断矩阵及其权重,如表7所示。

表7 电网侧经济效益的三级指标判断矩阵

Table 7 Third index judgment matrix of economic benefits of grid side

指标	A_{21}	A_{22}	A_{23}	A_{24}
A_{21}	1	1/2	1	1/4
A_{22}	2	1	2/3	2/5
A_{23}	1	3/2	1	1/3
A_{24}	4	5/2	3	1

根据表7,通过计算可得电网侧经济效益的三级指标权重为(0.128 4,0.184 6,0.181 6,0.505 4),一致性检验结果为 $C_1 = 0.035 5$, $C_R = 0.039 4 < 0.100 0$,因此电网侧经济效益判断矩阵通过一致性检验。用户侧经济效益的三级指标判断矩阵及其权重,如表8所示。

表8 用户侧经济效益的三级指标判断矩阵

Table 8 Third grade index judgment matrix of economic benefits of user side

指标	A_{31}	A_{32}	A_{33}
A_{31}	1	2	5
A_{32}	1/2	1	3
A_{33}	1/5	1/3	1

根据表8计算可得用户侧经济效益的三级指标权重为(0.581 6,0.309 0,0.109 5),一致性检验结果为 $C_1 = 0.001 8$, $C_R = 0.003 2 < 0.100 0$,因此用户侧经济效益判断矩阵通过一致性检验。

3.2.3 熵权法确定权重

利用熵权法计算得出的三级指标权重如表9所示。

表9 基于熵权法的三级指标权重

Table 9 Three grade index weight based on entropy weight method

指标	权重	指标	权重
A_{11}	0.071 6	A_{23}	0.071 1
A_{12}	0.134 6	A_{24}	0.078 1
A_{13}	0.105 1	A_{31}	0.076 6
A_{14}	0.078 4	A_{32}	0.072 9
A_{21}	0.165 7	A_{33}	0.072 8
A_{22}	0.073 2		

3.2.4 组合权重和最终权重

通过进一步计算可得三级指标的组合权重,并将二级指标权重和三级指标相乘得到三级指标最终权重,各个指标的组合权重和最终权重的计算结果如表10所示。

3.2.5 关联函数和关联度

根据式(6)计算得到各个经济效益指标关于不

表10 组合权重和最终权重

Table 10 Combined weight and final weight

指标	组合权重	最终权重	指标	组合权重	最终权重
A_{11}	0.120 0	0.026 5	A_{23}	0.049 8	0.015 9
A_{12}	0.171 4	0.037 9	A_{24}	0.152 3	0.048 5
A_{13}	0.046 0	0.010 2	A_{31}	0.171 8	0.078 9
A_{14}	0.036 8	0.008 1	A_{32}	0.086 9	0.039 9
A_{21}	0.082 1	0.026 2	A_{33}	0.030 8	0.014 1
A_{22}	0.052 2	0.016 6			

同评价等级的关联度矩阵,再进一步结合各指标权重得到综合关联度。以4种集成利用方式中风光储为例,关联度矩阵和综合关联度分别为

$$K_1 = \begin{bmatrix} 0 & -1.000 0 & -1.000 0 & -1.000 0 & -1.000 0 \\ -1.000 0 & -1.000 0 & -1.000 0 & -1.000 0 & 0 \\ -1.000 0 & -1.000 0 & -1.000 0 & -1.000 0 & 0 \\ 0 & -1.000 0 & -1.000 0 & -1.000 0 & -1.000 0 \\ 0 & -1.000 0 & -1.000 0 & -1.000 0 & -1.000 0 \\ -0.285 7 & 0 & 0 & -0.285 7 & -0.444 4 \\ 0 & -1.000 0 & -1.000 0 & -1.000 0 & -1.000 0 \\ -1.000 0 & -1.000 0 & -1.000 0 & -1.000 0 & 0 \\ -1.000 0 & -1.000 0 & -1.000 0 & -1.000 0 & 0 \\ -1.000 0 & -1.000 0 & -1.000 0 & -1.000 0 & 0 \\ 0 & -1.000 0 & -1.000 0 & -1.000 0 & -1.000 0 \end{bmatrix}$$

$$K_{1p} = \omega K_1 = (-0.220 1 \quad -0.306 2 \quad -0.306 2 \quad -0.310 9 \quad -0.098 2)$$

同理可以计算得到微电网、虚拟电厂和多能互补系统的综合关联度 K_{2p}, K_{3p}, K_{4p} ,基于物元可拓模型最终评价结果如表11所示。

表11 物元可拓模型最终评价结果

Table 11 Final evaluation results of matter-element extension model

评价等级	综合关联度			
	风光储	微电网	虚拟电厂	多能互补系统
优秀	-0.220 1	-0.120 4	-0.076 6	-0.088 7
良好	-0.306 2	-0.050 5	-0.055 1	-0.296 6
中等	-0.306 2	-0.091 6	-0.085 3	-0.296 6
合格	-0.310 9	-0.119 0	-0.131 7	-0.304 1
不合格	-0.098 2	-0.113 6	-0.153 7	-0.227 0

根据表11的物元可拓模型最终评价结果可以看出,需求响应参与风光储消纳的经济效益评价等级为不合格,参与微电网和虚拟电厂消纳的经济效益评价等级均为良好,参与多能互补系统消纳的经济效益评价等级则最高为优秀。基于物元可拓模型我们能够对需求响应参与清洁能源集成消纳的经济效益整体优劣度进行排序。但是参与微电网和虚拟电厂消纳的经济效益评价等级均为良好,无法确定两者到底谁更优,即存在无法对局部排序进行精确细分问题。因此,本文进一步计算级别变量特征来分析属于一个等级的同时偏向于另一个等级的程度。通过计算得到参与微电网和虚拟电厂消纳的经济效益评价等级的偏向程度 j^* 分别为2.4

和2.1,这说明参与微电网和虚拟电厂消纳的经济效益评价等级均属于良好偏中等,严格来讲分别属于2.4类和2.1类,参与微电网消纳的经济效益评价等级更偏向于中等,所以参与虚拟电厂消纳的经济效益要稍好于参与微电网的经济效益。

根据上述评价结果可知,就本文所考虑的风光储、微电网、虚拟电厂和多能互补系统4种清洁能源集成利用方式而言,需求响应参与清洁能源集成多能互动系统可以实现系统经济效益的最优化。主要是因为多能互补系统能够充分利用风能、太阳能、天然气以及其他清洁能源间的优势互补效应,充分考虑终端用户的冷、热、电和气等用能需求,最大化提升能源的利用效率。总体而言,积极引导终端用户参与需求响应,促进清洁能源的集成优化利用,有利于充分发挥清洁能源的经济型,实现系统经济效益最佳。

4 结论

本文以参与清洁能源集成消纳利用途径的考虑需求响应的多主体经济效益为研究对象,运用物元可拓模型对参与不同清洁能源集成消纳的经济效益进行了评价。总体研究结论如下:

经济效益从高到低排序依次为:电力用户、电网企业、发电企业。在电力用户的经济效益中,终端用户强制限电成本权重最大,可获得政策补贴收益权重,用户设备投资成本权重排在第三;在电网企业的经济效益中,权重最大的是可增加的系统负荷率,其次是智能设备投资成本,第三是可避免电网投资成本,最后是可避免系统运维成本;在发电企业的经济效益中,可避免发电燃料成本权重最大,第二和第三分别为可避免峰荷容量成本和可避免机组启停成本,最后是可避免电源建设成本。

在进一步考虑评价等级偏向程度的经济效益中,参与虚拟电厂发电消纳的经济效益要稍好于参与微电网发电消纳的经济效益。因此最终参与4种清洁能源集成消纳利用途径的排序依次为多能互补系统、虚拟电厂、微电网、风光储。D

参考文献:

[1] 王冬容,刘宝华,杨赛,等. 电力需求响应的经济效益分析[J]. 电力需求侧管理,2007(1):8-10.
WANG Dongrong, LIU Baohua, YANG Sai, et al. Economic benefit analysis of power demand response [J]. Power Demand Side Management, 2007(1):8-10.

[2] 鞠立伟. 需求响应参与清洁能源集成消纳与效益评价模型研究[D]. 北京:华北电力大学,2017.
JU Liwei. The research on the optimization mode and benefit evaluation mechanism for clean energy absorptive considering demand response [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.

[3] 凌莉,钟英杰,王巍巍,等. 冷热电联产系统评价指标体系的研究[J]. 轻工机械,2012,30(1):103-107.
LING Li, ZHONG Yingjie, WANG Weiwei, et al. Study of evaluation index system for combined cooling heating and power[J]. Light Industry Machinery, 2012, 30(1):103-107.

[4] 李剑楠,乔颖,鲁宗相,等. 多时空尺度风电统计特性评价指标体系及其应用[J]. 中国电机工程学报,2013,33(13):53-61.
LI Jiannan, QIAO Ying, LU Zongxiang, et al. An evaluation index system for wind power statistical characteristics in multiple spatial and temporal scales and its application[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(13):53-61.

[5] 张蕊. 风光储联合发电系统评价指标体系研究[D]. 北京:华北电力大学,2014.
ZHANG Rui. The research of evaluation index system of wind and solar power energy demonstration station [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.

[6] BHAKTA S, MUKHERJEE V. Performance indices evaluation and techno economic analysis of photovoltaic power plant for the application of isolated India's island[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2017, 20(2):9-24.

[7] 张健钊,陈星莺,徐石明,等. 基于AHP-熵权法的工业大用户用电能效评估[J]. 电网与清洁能源,2017,33(1):57-63.
ZHANG Jianzhao, CHEN Xingying, XU Shiming, et al. Electricity utilization evaluation of large industrial users based on ahp and entropy method[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(1):57-63.

[8] 任保显. 中国省域经济高质量发展水平测度及实现路径:基于使用价值的微观视角[J]. 中国软科学,2020,10(7):175-183.
REN Baoxian. Research on the measurement and realization path of high-quality development of Chinese provincial economy: from the micro perspective of use value[J]. China Soft Science, 2020, 10(7):175-183.

[9] 牛东晓,宋宗耘. 基于熵值法和物元可拓模型的核电站安全运行状态评价[J]. 安全与环境学报,2015,15(5):25-29.
NIU Dongxiao, SONG Zongyun. Evaluation model for the nuclear power plant safety operation based on the matter-element and entropy method [J]. Journal of Safety and Environment, 2015, 15(5):25-29.

[10] 杨春燕,李小妹,李卫华. 客户价值综合关联函数的构造方法[J]. 统计与决策,2012(21):180-182.
YANG Chunyan, LI Xiaomei, LI Weihua. A constructive approach to comprehensive number theoretical of custom value[J]. Statistics & Decision, 2012(21):180-182.

[11] 陈铭明,左强,杨世海,等. 共生理论视角下的电力需求响应多主体互利共生模式研究[J]. 煤炭经济研究,2021,41(9):52-56.
CHEN Mingming, ZUO Qiang, YANG Shihai, et al. Study on the modes of multi-agent mutualism of power demand response in views o symbiosis theory [J]. Coal Economic Research, 2021, 41(9):52-56.

[12] 方凯杰,杨世海,陈铭明,等. 多主体参与的电力需求响应效益评价研究[J]. 煤炭经济研究,2021,41(5):24-30.
FANG Kaijie, YANG Shihai, CHEN Mingming, et al. Research on benefit evaluation of power demand response with multi-agent participation [J]. Coal Economic Research, 2021, 41(5):24-30.

作者简介:

杨世海(1976),男,安徽淮北市人,教授级高级工程师,研究方向为电力需求侧管理。

(责任编辑 水 鹤)