

源—网—荷—储一体化环境下复杂电网 投资决策指标体系的研究

张哲亮, 夏 沛, 张晓星, 张 成, 陈颖伦, 王述祯

(湖北工业大学新能源及电网装备安全监测湖北省工程研究中心, 湖北 武汉, 430068)

摘 要:从源—网—荷—储的单一环节和多元交互出发, 构建了复杂电网投资决策指标体系。为计及复杂电网中各侧指标的依存和反馈关系, 考虑决策者的指标偏好及指标包含的信息量, 将 ANP-EWM 组合赋权法引入到投资决策中。首先, 提出复杂电网中源、网、荷、储的单侧指标和考虑网源交互、荷网交互、源荷交互、源储交互、网储交互的交互指标, 建立投资决策指标体系; 其次, 利用博弈论得到 ANP-EWM 组合赋权法为指标赋权; 最后, 使用优劣解距离法求取项目总效用值。以 IEEE 39 节点系统为例, 将所提方法与其他赋权法进行比较, 验证所提方法的有效性。

关 键 词:复杂电网投资决策; 源网荷储一体化; 指标体系; ANP; EWM; 组合赋权法

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.03.001 中图分类号: TM863 文章编号: 1673-9140(2023)03-0001-13

Research on the complex grid investment decision indexes system under the integrated source-grid-load-storage environment

ZHANG Zheliang, XIA Pei, ZHANG Xiaoxing, ZHANG Cheng, CHEN Yinglun, WANG Shuzhen

(Hubei Engineering Research Center for Safety Monitoring of New Energy and Power Grid Equipment,
Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: A complex grid investment decision indexes system is established from the single component and multiple interactions of source-grid-load-storage. To take the interdependence and feedback relationships of the indexes on each side of the complex grid into account, the ANP-EWM combined weighting method is introduced into the investment decision, considering the preferences of decision makers and the information contained in the indicators. Firstly, the unilateral indices of source, grid, load and storage in complex grids and the interaction indices considering grid-source interaction, load-grid interaction, source-load interaction, source-storage interaction, load-storage interaction and grid-storage interaction are proposed to establish the investment decision index system. Then, the ANP-EWM combined weighting method is designed using game theory to assign weights to the indices. Finally, the overall utility value of the project is calculated using the distance vector merging algorithm. Taking the IEEE 39-node system as an example, the proposed method is compared with other weighting methods to verify its effectiveness.

Key words: complex grid investment decision; source-grid-load-storage integration; index system; ANP; EWM; combined weighting method

收稿日期: 2022-07-29; 修回日期: 2022-09-06

基金项目: 湖北工业大学高层次人才基金(BSQD2020026); 太阳能高效利用及储能运行控制湖北省重点实验室开放基金(HBSEES202201); 国网重庆市电力公司重点科技项目(522056210003)

通信作者: 夏 沛(1985—), 女, 博士, 讲师, 主要从事电力系统分析计算与控制研究; E-mail: xp_sharpay@yeah.net

国家能源局的数据表明,中国能源构成中煤炭的比例高达56%^[1],大大超过了其他能源的比例。风电、光伏等新能源具有污染小、储量大、可再生等优点,成为解决当今环境污染和资源枯竭问题的首要选择。然而,新能源的随机性、波动性给电网安全稳定运行的需求增加了调控难度和运行风险,制约了新能源的开发利用。储能和主动负荷可以实现电力生产和消费的平衡,因此它们被广泛用于含有大量可再生能源的电网。随着新能源、主动负荷、储能在传统电网中的兴起,它们的互动程度不断加深,集成度不断加强,形成了源—网—荷—储一体化的复合电网。由于传统的电力系统投资决策方法大多数只考虑源—网—荷—储的单侧,其投资决策可能会出现结果不准确的问题。因此有必要充分考虑网源、荷网、源荷、源储、荷储、网储的交互影响,建立复杂电网投资决策指标体系,并用合适的方法为指标赋权,得到复杂电网投资决策方法。

电力系统投资决策方法主要侧重于指标体系的建立、评价和赋权方法的研究。在指标体系的建立方面,文献[2-4]从技术、经济、环境、社会等4个角度构建可再生能源投资决策指标体系。文献[5-7]从技术、经济、社会3个角度建立了电网投资综合评估体系。文献[8]从互动参与度、互动效果、电网安全性3个角度对柔性负荷参与电网互动的效果进行了评估。文献[9]从投资成本和经济效益两方面建立了氢储系统投资决策指标体系。文献[10]从能源升级、节能减排2个角度建立了电源—电网—负荷多层评价指标体系。上述文献分别建立了电源侧、电网侧、负荷侧、储能侧的投资决策指标体系,为建立源—网—荷—储一体化的复杂电网投资决策模型奠定了基础。但是上述文献未充分考虑源—网—荷—储之间的交互影响,且未能同时决策源—网—荷—储各侧的待建项目。

在赋权方法的研究方面,有层次分析法^[11](analysis hierarchical process, AHP)、网络层次分析法^[12](analytic network process, ANP)、德尔菲法^[13]、主成分分析法^[14]、熵权法^[15](the entropy weight method, EWM)、反熵权法^[16]、灰色关联分析法^[17]、变异系数法^[18]等方法以及AHP-熵权法综合

赋权法^[10]。层次分析法默认指标之间相互独立,不适用于为存在交互的复杂电网投资决策指标赋权,网络层次分析法的计算过程十分复杂,德尔菲法花费的时间过长,主成分分析法需要保证提取的几个主成分有实际的背景和意义解释。熵权法、反熵权法和变异系数法未考虑决策者的主观偏好。灰色关联分析法要求数据服从某个数理统计的典型分布。AHP-熵权法综合赋权法虽然综合考虑了主客观赋权法,但是未计及指标之间的交互关系。

针对上述问题,本文建立一种计及复杂电网源—网—荷—储各侧交互的投资决策指标体系。为考虑复杂电网各侧指标的依存和反馈关系,克服主观赋权法的不足,本文提出基于博弈论的ANP-EWM组合赋权法,使赋予的权重既具备专家的经验优势又避免赋权的主观随意性。算例结果表明本文提供的方法能为复杂电网投资提供决策支持。

1 复杂电网的交互影响

源—网—荷—储一体化的复杂电网(以下简称复杂电网)交互方式有网源、荷网、源荷、源储、网储、荷储,如图1所示,其中储能建设在电源侧,可以与电源交互,起到降低弃风弃光的作用;建在电网侧,可以与电网交互,起到调峰调频的作用;建在负荷侧,起到低储高放的作用。

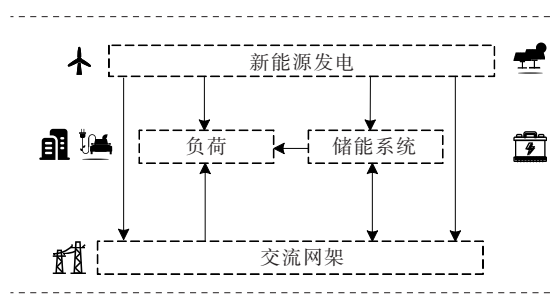


图1 源—网—荷—储交互示意

Figure 1 Source-grid-load-storage interaction diagram

2 复杂电网投资决策指标体系

基于霍尔三维结构模型思想,建立一个计及复杂电网源—网—荷—储单一环节和多元交互的三

维结构模型,并应用该模型建立复杂电网投资决策指标体系。在图 2 中, i, j 平面表示源—网—荷—储各环节的交互影响, t 表示各环节规划和调度阶段的交互影响,轴平分线上的点表示单一环节内部的影响,如 M 表示源自自身的影响;轴平分线以外的点表示多元交互的影响,如 N 表示的是网源交互的影响, P 点表示源荷交互的影响。

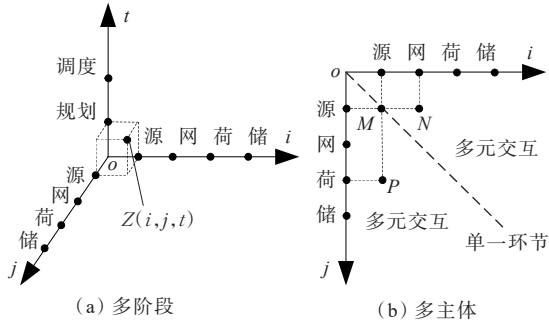


图 2 源—网—荷—储评价指标三维结构模型

Figure 2 Three-dimensional structural model of source-grid-load-storage evaluation indices

由图 1、2 分析复杂电网各部分的能量流动产生的安全影响和经济效益,其投资决策指标体系中包含源—网—荷—储的单侧指标和交互指标。根据全面性、可比性、可操作性、定性定量结合原则选取评价指标。在电源侧,选取图 3 中的单侧指标衡量新能源高渗透率下复杂电网运行特性;在电网侧,选取图 4 中的单侧指标来衡量其安全性;在负荷侧,选取图 5 中的单侧指标来衡量其在电网调节过程中的参与程度及对电网的影响;在储能侧,选取图 6 中的单侧指标来衡量其与复杂电网的互动程度和自身的技术先进性。在单侧指标方面,每侧包含 4 个定量指标和 1 个定性指标;在交互侧,每侧包含 4 个

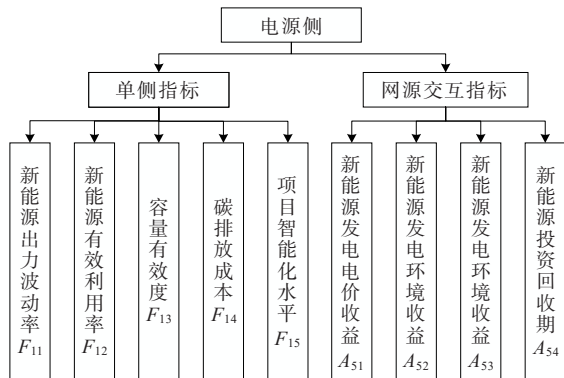


图 3 电源侧投资决策指标

Figure 3 Power-side investment decision indices

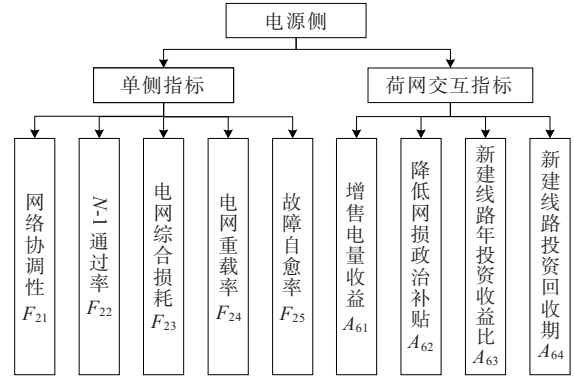


图 4 电网侧投资决策指标

Figure 4 Grid-side investment decision indices

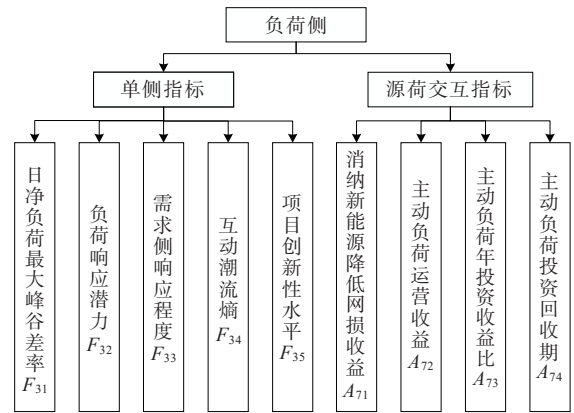


图 5 负荷侧投资决策指标

Figure 5 Load-side investment decision indices

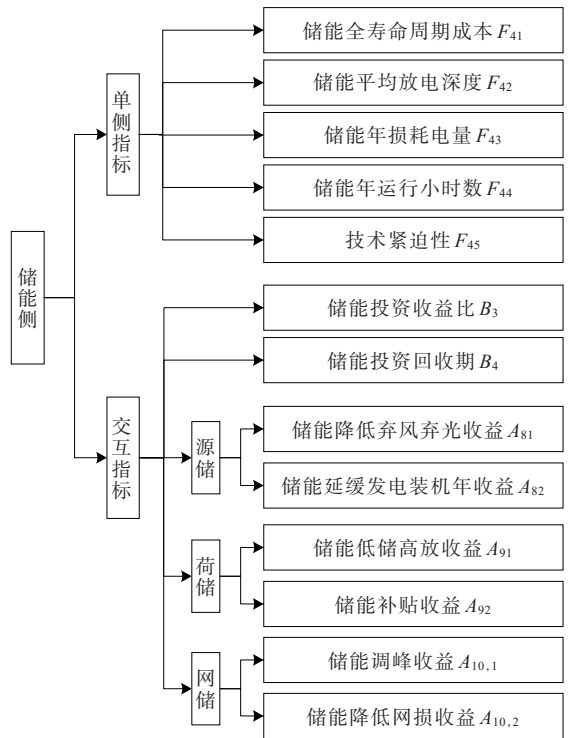


图 6 储能侧投资决策指标

Figure 6 Storage-side investment decision indices

经济效益指标(定量指标),前2个为交互收益,后2个为年投资收益比和投资回收期。另外,图3中项目智能化水平为定性指标;图4中故障自愈率为定性指标;图5中项目创新性水平为定性指标;图6中技术紧迫性为定性指标。

3 指标计算

3.1 定性指标

模糊等级及其对应的梯形模糊数^[6]如表1所示。

表1 模糊等级及其对应梯形模糊数
Table 1 Fuzzy level and its corresponding trapezoidal fuzzy number

模糊等级	梯形模糊数(a,b,c,d)	期望值
1-非常差	(0,0,0.2,0.2)	0.100
2-差	(0.05,0.15,0.25,0.35)	0.200
3-较差	(0.2,0.3,0.4,0.5)	0.350
4-一般	(0.35,0.45,0.55,0.65)	0.500
5-较好	(0.5,0.6,0.7,0.8)	0.650
6-好	(0.65,0.75,0.85,0.95)	0.800
7-非常好	(0.8,0.9,1,1)	0.925

定性指标的数值用梯形模糊数^[19]的期望值来表示,专家打分对应梯形模糊数的期望值为

$$E(x) = \frac{1}{2} \left(b + c + \int_c^d \frac{x-d}{c-d} dx - \int_a^b \frac{x-a}{b-a} dx \right) = \frac{a+b+c+d}{4} \quad (1)$$

3.2 电源侧定量指标

新能源出力波动率^[20]的计算方法为

$$F_{11} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{t=1}^n (P_t^{\text{NE}} - P_t^{\text{NEmean}})^2} \quad (2)$$

式中, P_t^{NE} 、 P_t^{NEmean} 为新能源第*t*小时的出力和新能源全年的平均出力,MW; $n=8760$ 。

新能源有效利用率^[21]的计算方法为

$$F_{12} = E_{\text{NG}}^{\text{NE}} / (P_{\text{NG}}^{\text{NE}} T) \quad (3)$$

式中, $E_{\text{NG}}^{\text{NE}}$ 为新能源的年实际发电量,MW·h; $P_{\text{NG}}^{\text{NE}}$ 为新能源的装机容量,MW; $T=8760$ 。

容量有效度的计算方法为

$$F_{13} = E_{\text{NG}}^{\text{NE}} / E_{\text{all}}^* \quad (4)$$

式中, E_{all}^* 为所有机组的年实际发电量,MW·h。

碳排放成本的计算方法为

$$F_{14} = k_{\text{CO}_2} E_{\text{NG}}^{\text{NE}} \lambda_{\text{CO}_2} \times 0.1 \quad (5)$$

式中, k_{CO_2} 为碳排放因子,其典型值为0.89 kg/(kW·h)^[22]; λ_{CO_2} 为单位碳排放交易价格0.0585元/kg。

新能源发电电价收益的计算公式如下:

$$A_{51} = E_{\text{NG}}^{\text{NE}} M_{\text{Newenergy}} \times 0.1 \quad (6)$$

式中, $M_{\text{Newenergy}}$ 为新能源发电电价,元/(kW·h)。

新能源发电环境收益的计算方法为

$$A_{52} = E_{\text{NG}}^{\text{NE}} k_{\text{CO}_2} M_{\text{Carbon}} \times 0.1 \quad (7)$$

式中, M_{Carbon} 为新能源发电环境收益,元/kg。

新能源年投资收益比的计算方法如下:

$$\begin{cases} A_{\text{Powercost}} = ((1 + x_{\text{wp}}\%) c_{\text{wp}} E_{\text{wp}}) \frac{(1+r)^{T_{\text{Lifespan}}} r}{(1+r)^{T_{\text{Lifespan}}} - 1} \\ A_{53} = (A_{51} + A_{52}) / A_{\text{Powercost}} \end{cases} \quad (8)$$

式中, c_{wp} 为光伏或风电的单位功率价格,万元/MW; E_{wp} 分别为光伏或风电的额定功率,MW; T_{Lifespan} 为光伏或风电的全生命周期, a ; r 为年投资收益率,8%; $x_{\text{wp}}\%$ 分别为光伏或风电的运营成本与初始投资的比值。

新能源投资回收期的计算方法为

$$A_{54} = A_{\text{Powercost}} T_{\text{Lifespan}} / (A_{51} + A_{52}) \quad (9)$$

3.3 电网侧定量指标

网路协调性^[23]的计算方法如下:

$$F_{21} = \sqrt{\frac{1}{N_L} \sum_{i=1}^{N_L} (L_i - \bar{L})^2} \quad (10)$$

式中, N_L 为总线路条数; L_i 为第*i*条线路的负载率; \bar{L} 为*N_L*条线路的负载率的平均值。

*N-1*通过率^[25]的计算方法为

$$F_{22} = N_p / N_L \quad (11)$$

式中, N_p 为通过*N-1*安全校验的线路条数。

电网综合损耗^[26]的计算方法为

$$F_{23} = \sum_{i,j \in \Omega_i} [g_{ij} (V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \theta_{ij})] \times 10^{-6} \quad (12)$$

式中, Ω_i 为电网中所有支路的集合。 V_i 、 V_j 分别为电网中节点*i*、*j*的电压幅值; g_{ij} 、 θ_{ij} 分别为电网中节点*i*、*j*的电导和相角差。

线路重载率^[27]的计算方法为

$$F_{24} = N_{\text{HL}} / N_L \quad (13)$$

式中, N_{HL} 为重载线路数。本文将年最大负载率超过70%且持续1h以上线路作为重载线路。

增售电量收益的计算方法为

$$A_{61} = E_{IE}^{Loss*} M_{Grid} \times 0.1 \quad (14)$$

式中, E_{IE}^{Loss*} 为年增售电量, MW·h; M_{Grid} 为电量售价, 元/(kW·h)。

降低网损的奖励收益的计算方法为

$$A_{62} = E_{IE}^{Loss*} M_{reward} \times 0.1 \quad (15)$$

式中, M_{reward} 为奖励单价, 元/(kW·h)。

新建线路年投资收益比的计算方法为

$$\begin{cases} A_{gridcost} = ((1 + x_g\%)c_g L_g) \frac{(1+r)^{T_{Lifespan}} \cdot r}{(1+r)^{T_{Lifespan}} - 1} \\ A_{63} = (A_{61} + A_{62}) / (A_{gridcost}) \end{cases} \quad (16)$$

式中, c_g 为输电线路每千米的造价, 万元/km; L_g 为输电线路的长度, km; $T_{Lifespan}$ 为输电线路的全生命周期, a; $x_g\%$ 为输电线路的运营成本与初始投资的比值。

新建线路投资收益回收期的计算方法为

$$A_{64} = (A_{gridcost} T_{Lifespan}) / (A_{61} + A_{62}) \quad (17)$$

3.4 负荷侧定量指标

日负荷最大峰谷差率^[28]的计算方法如下:

$$F_{31} = \frac{(\max_{t \in D} (P_t^{Load}) - \min_{t \in D} (P_t^{Load}))}{\max_{t \in D} (P_t^{Load})} \quad (18)$$

式中, P_t^{Load} 是主动负荷在第 D 天中第 t 时刻的功率, MW。 $\max_{t \in D} (P_t^{Load})$ 和 $\min_{t \in D} (P_t^{Load})$ 是主动负荷在第 D 天的最大值和最小值。

负荷响应潜力^[8]的计算方法如下:

$$F_{32} = \begin{cases} \frac{P_{i,max}(t) - P_{i,0}(t)}{P_{i,0}(t)}, \text{互动后功率增加} \\ \frac{P_{i,min}(t) - P_{i,0}(t)}{P_{i,0}(t)}, \text{互动后功率减少} \end{cases} \quad (19)$$

式中, $P_{i,max}(t)$ 、 $P_{i,min}(t)$ 和 $P_{i,0}(t)$ 分别为 t 时刻主动负荷参与需求侧响应后可达到的最大功率、最小功率和额定功率, MW。

需求侧响应程度^[8]的计算方法如下:

$$F_{33} = (P_i(t) - P_{i,0}(t)) / (P_{i,0}(t) \cdot F_{32,load}(t)) \quad (20)$$

式中, $P_i(t)$ 为主动负荷的实际互动功率, MW。

互动潮流熵的计算方法为

$$F_{34} = -\ln 10 \sum_j^{n-1} \frac{l_j}{N_L} \ln N_L \quad (21)$$

式中, 给定常数序列 $R = \{R_1, R_2, R_3, \dots, R_n\}$, l_j 为负载率 r_j 满足 $r_j \in (R_j, R_{j+1}]$ 的线路条数,

消纳新能源降低网损收益的计算方法为

$$A_{71} = (E_{BeforeLoad}^{Loss*} - E_{AfterLoad}^{Loss*}) \cdot M_{Grid} \quad (22)$$

式中, $E_{BeforeLoad}^{Loss*}$ 、 $E_{AfterLoad}^{Loss*}$ 为新建主动负荷前、后电网全年的总线损, MW。

本文以数据中心负荷为例, 数据中心的收益方式有机架出租、结算收益、带宽收益等^[29-30]。

主动负荷运营收益的计算公式如下:

$$A_{72} = P_{i,0}(t) M_{IDC} \times 100 \quad (23)$$

式中, M_{IDC} 为数据中心的单位收益, 元/(W·年)。

主动负荷年投资收益比的计算方法如下:

$$\begin{cases} A_{Loadcost} = ((1 + x_1\%)c_1 P_1) \frac{(1+r)^{T_{Lifespan}}}{(1+r)^{T_{Lifespan}} - 1} \\ A_{73} = \frac{A_{71} + A_{72}}{A_{Loadcost}} \end{cases} \quad (24)$$

式中, c_1 为主动负荷单位功率价格, 万/(MW·h); P_1 为主动负荷的额定功率, MW·h; $T_{Lifespan}$ 为主动负荷的全生命周期, a; $x_1\%$ 为主动负荷的运营成本与初始投资的比值。

主动负荷投资回收期的计算方法为

$$A_{74} = (A_{Loadcost} T_{Lifespan}) / (A_{71} + A_{72}) \quad (25)$$

3.5 储能侧定量指标

储能全寿命周期成本^[31]的计算公式为

$$F_{41} = ((1 + x\%)c_e E_{storage} + (1 + y\%)c_p P_{storage}) \frac{(1+r)^{T_{Lifespan}} \cdot r}{(1+r)^{T_{Lifespan}} - 1} \quad (26)$$

式中, c_e 、 c_p 分别为储能的单位容量价格与单位功率价格, 万元/(MW·h); $E_{storage}$ 和 $P_{storage}$ 分别为储能电站的额定容量(MW·h)和额定功率(MW); $T_{Lifespan}$ 为储能的全寿命周期, a; $x\%$ 、 $y\%$ 为储能容量和功率的运营成本与初始投资的比值。

储能年平均放电深度的计算公式为

$$F_{42} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k ED_i \quad (27)$$

式中, ED_i 为储能第 i 次放电过程中释放的电量, MW; k 为储能全年的放电次数。

储能年损耗电量指标的计算公式如下:

$$F_{43} = \sum_{t=1}^T (u_t^{\text{ESS}} P_t^{\text{ESS},c} - v_t^{\text{ESS}} P_t^{\text{ESS},d}) \quad (28)$$

式中, $P_t^{\text{ESS},c}$ 和 $P_t^{\text{ESS},d}$ 分别为储能在第 t 小时的充、放电功率, MW; u_t^{ESS} 、 v_t^{ESS} 分别为储能的充、放电特征变量, 且不能同时为 1。当 $u_t^{\text{ESS}}=1$ 且 $v_t^{\text{ESS}}=0$, 储能为充电状态; 当 $u_t^{\text{ESS}}=0$ 且 $v_t^{\text{ESS}}=1$, 储能为放电状态; 当 $u_t^{\text{ESS}}=0$ 且 $v_t^{\text{ESS}}=0$, 储能处于静止状态。

储能年运行小时数的计算方法为

$$F_{44} = \sum_{t=1}^T (u_t^{\text{ESS}} + v_t^{\text{ESS}}) \quad (29)$$

储能降低弃风弃光收益的计算方法为

$$A_{81} = (E_{\text{AW}} + E_{\text{AP}}) \cdot M_{\text{P-s}} \quad (30)$$

式中, E_{AW} 、 E_{AP} 分别为储能降低的年弃风电量、弃光电量, MW·h; $M_{\text{P-s}}$ 分别为奖励系数, 万元/(MW·h)。

储能延缓发电装机收益的计算方法如下:

$$A_{82} = e_r \sum_{t=1}^T v_t^{\text{ESS}} P_t^{\text{ESS},d} \quad (31)$$

式中, e_r 表示单位电量备用容量的价格, 万元/(MW·h)。

储能低储高放收益的计算方法为

$$A_{91} = \Delta Q (P_f - P_g) \times 0.1 \quad (32)$$

式中, ΔQ 为储能全年的充电量, MW·h; P_f 、 P_g 分别为该区域实施的峰时和谷时电价, 元/(kW·h)。

储能补贴收益^[31-32]如下:

$$A_{92} = \Delta P_f m_f \times 0.1 \quad (33)$$

式中, ΔP_f 为电网接入储能后全年减少的峰荷, MW·h; m_f 为减少单位峰荷获得的奖励, 元/(kW·h)。

储能调峰收益的计算方法为

$$A_{10,1} = e_m P_{\text{RC}} \times 0.1 \quad (34)$$

式中, e_m 为储能的单位调峰收益, 元/(kW·h); P_{RC} 为储能全年的调峰电量, MW·h。

储能降低网损收益的计算方法如下:

$$A_{10,2} = \sum_{i=1}^{N^T} \Delta Q_{\text{loss}} M_{\text{Grid}} \times 0.1 \quad (35)$$

式中, ΔQ_{loss} 表示新建储能前后网损的变化量, MW。

储能年投资收益比的计算方法为

$$B_1 + B_2 = \begin{cases} A_{81} + A_{82}, & \text{源储交互} \\ A_{91} + A_{92}, & \text{荷储交互} \\ A_{10,1} + A_{10,2}, & \text{网储交互} \end{cases} \quad (36)$$

$$B_3 = (B_1 + B_2) / F_{41}$$

储能投资回收期的计算方法为

$$B_4 = F_{41} T_{\text{Lifespan}} / (B_1 + B_2) \quad (37)$$

4 指标权重的确定及项目总效用值的求取

4.1 熵权法

EWM 的原理是根据信息熵来对指标进行赋权。信息熵越大, 越应该赋予较大的权重。

首先需要将指标矩阵进行标准化得到矩阵 Z :

$$z_{ij} = \frac{x_{ij} - \min \{x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{nj}\}}{\max \{x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{nj}\} - \min \{x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{nj}\}} \quad (38)$$

式中, x_{ij} 代表第 i 个项目第 j 个指标的值, n 为项目的个数, $j=1, 2, \dots, 9$, z_{ij} 为标准化后的指标值。

计算信息熵后将其归一化:

$$e_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n \left(z_{ij} / \sum_{i=1}^n z_{ij} \right) \ln \left(z_{ij} / \sum_{i=1}^n z_{ij} \right) \quad (39)$$

式中, e_j 为指标的信息熵, 最后计算各指标的熵权 W_j :

$$W_j = (1 - e_j) / \sum_{j=1}^9 (1 - e_j) \quad (40)$$

EWM 的客观性强, 但是会忽视决策者对指标的主观偏好。

4.2 网络层次分析法

ANP 的结构如图 7, 将系统元素分为控制层和网络层, 控制层由决策目标 A 和决策准则 $B_k (k=1, 2, \dots, M)$ 组成, 网络层由所有受到控制层决策的元素集 $C_i (i=1, 2, \dots, N)$ 组成。设元素集 C_i 中的元素为 $e_{i1}, e_{i2}, \dots, e_{im_i}$, 在本文中, 元素集 C_1 和 C_2 分别为单侧指标集和交互指标集, $n_{11}=5, n_{12}=4, N=2$ 。

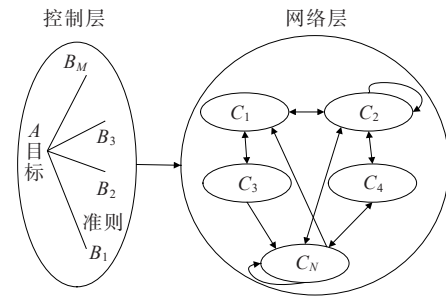


图7 ANP 结构示意图

Figure 7 ANP structural diagram

步骤 1: 描述元素关联性, 建立并计算元素判断矩阵, 构造未加权超矩阵。

以控制层 B_k 为准则,元素集 C_j 中的元素 $e_{j1}(e_{j1}, e_{j2}, \dots, e_{jn_j})$ 为次准则,元素集 C_i 中的元素按其对元素集 C_j 中的元素的影响程度构造判断矩阵。

$$W_{ij} = \begin{bmatrix} \omega_{i1}^{(j1)} & \omega_{i1}^{(j2)} & \dots & \omega_{i1}^{(jn_j)} \\ \omega_{i2}^{(j1)} & \omega_{i2}^{(j2)} & \dots & \omega_{i2}^{(jn_j)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \omega_{in_i}^{(j1)} & \omega_{in_i}^{(j2)} & \dots & \omega_{in_i}^{(jn_j)} \end{bmatrix} \quad (41)$$

W_{ij} 中的元素为元素集 C_i 中的元素对元素集 C_j 中的元素的影响程度。当 $i=j$ 时, W_{ij} 的元素为元素集 C_i 对自身元素的影响程度,当 $i \neq j$ 时, W_{ij} 的元素为元素集 C_i 对另外元素集中的元素的影响程度。例如 W_{11} 中的元素为单侧指标集中的元素对自身影响程度, W_{12} 中的元素为单侧指标集中的元素对交互指标集中的元素影响程度。

在 B_k 下,元素集 C_i 中的所有元素对元素集 C_j 中的所有元素影响程度构成的未加权超矩阵 W 如式(42)所示。

$$W = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 \dots n_1 & 1 \dots n_2 & \dots & 1 \dots n_N \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \dots n_1 \\ 1 \dots n_2 \\ \vdots \\ 1 \dots n_N \end{matrix} & \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} & \dots & W_{1N} \\ W_{21} & W_{22} & \dots & W_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ W_{N1} & W_{N2} & \dots & W_{NN} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (42)$$

步骤 2: 建立元素集的加权矩阵。

以控制层 B_k 为准则,元素集 C_j 为次准则,元素集 C_i 对元素集 C_j 的影响程度构造加权矩阵 D 。

$$D = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & \dots & n_1 & 1 & \dots & n_2 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ \vdots \\ n_1 \\ 1 \\ \vdots \\ n_2 \end{matrix} & \begin{bmatrix} d_{11} & \dots & d_{11} & d_{21} & \dots & d_{21} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots \\ d_{11} & \dots & d_{11} & d_{21} & \dots & d_{21} \\ d_{12} & \dots & d_{12} & d_{22} & \dots & d_{22} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots \\ d_{12} & \dots & d_{12} & d_{22} & \dots & d_{22} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (43)$$

在本文中只有单侧指标集和交互指标集 2 个元素集。以单侧指标集为决策准则, d_{11} 代表单侧指标集的权重, d_{12} 代表交互指标集的权重。以交互指标集为决策准则, d_{21} 代表单侧指标集的权重, d_{22} 代表交互指标集的权重。如果在某个指标只对单个指标集中的元素有影响,则此指标集中对应元素的权重就为 1。

步骤 3: 使用加权矩阵 D 对未加权超矩阵 W 加权,得加权超矩阵 \bar{W} ,则其中的元素 \bar{W}_{ij} 为

$$\bar{W}_{ij} = d_{ij} W_{ij} \quad (44)$$

步骤 4: 建立极限矩阵,获得各元素权重。

设加权超矩阵 \bar{W} 中的元素仍为 W_{ij} ,则其反映了元素 i 对元素 j 的第一步优势度,记为 $\bar{W}^{(1)}$ 。优势度是累计影响作用,则元素 i 对元素 j 的第 t 步优势度为

$$\bar{W}_{ij}^{(t)} = \sum_{m=1}^N \bar{W}_{im}^{(t-1)} \bar{W}_{mj}^{(t-1)} \quad (45)$$

当 $\bar{W}^{(t)}$ 在 $t \rightarrow \infty$ 时极限存在,即

$$\bar{W}^{(\infty)} = \lim_{t \rightarrow \infty} \bar{W}^{(t)} \quad (46)$$

$\bar{W}^{(\infty)}$ 的第 j 列归一化后的值就是 B_k 下各元素的权重。复杂电网各侧的交互关系不同,所以 ANP 要为源—网—荷—储赋予不同的权重。ANP 可以反映指标之间的依存和反馈关系,但是定性分析多。

4.3 组合赋权法

利用组合赋权法来为复杂电网投资决策指标赋予权重,使赋权结果具有决策者的经验优势,同时充分利用指标包含的信息量。本文采博弈论求组合权重,用 W 表示组合赋权法权重向量, W_a 表示 ANP 权重向量, W_e 表示 EWM 权重向量。根据纳什均衡原理,组合权重 W 的最优值应该是博弈双方达成平衡状态,此时 W 和 W_a 、 W_e 的离差之和最小。

以 W 和 W_a 和 W_e 的离差之和最小为目标函数,寻找最优的线性组合系数 α^* 和 β^* [34]。则 W 的计算的目标函数和约束条件为

$$\begin{cases} \min(\|W - W_a\|_2 + \|W - W_e\|_2) = \\ \min(\|\alpha W_a + \beta W_e - W_a\|_2 + \\ \|\alpha W_a + \beta W_e - W_e\|_2) \\ \text{s.t. } \alpha + \beta = 1, \alpha, \beta \geq 0 \end{cases} \quad (47)$$

根据微分原理,式(47)取得最小值的导数条件为

$$\begin{cases} \alpha W_a W_a^T + \beta W_a W_e^T = W_a W_a^T \\ \alpha W_e W_a^T + \beta W_e W_e^T = W_e W_e^T \end{cases} \quad (48)$$

求出 α 和 β 的值后将其进行归一化即可得到 α^* 和 β^* 。归一化方法如下:

$$\alpha^* = \frac{|\alpha|}{|\alpha| + |\beta|}, \beta^* = \frac{|\beta|}{|\alpha| + |\beta|}$$

则组合的最优权重为

$$W = \alpha^* W_a + \beta^* W_e \quad (49)$$

4.4 优劣解距离法

目前常用线性加权法来计算项目的综合效用值,但是线性加权法不能考虑各个方案与正理想解

和负理想解的相对位置,对各待建项目的评价不够全面。因此本文使用优劣解距离法^[33]来求取项目的综合效用值。设本文归一化后的指标为 z_{ij} , Z_j^+ 和 Z_j^- 分别为指标的最优值和最劣值, w_{ij} 为第 i 个项目第 j 个指标的权重,则第 i 个项目到最优点的距离为

$$d_1(i) = \sqrt{\sum_{j=1}^n w_{ij} (Z_j^+ - z_{ij})^2} \quad (50)$$

到最劣点的距离为

$$d_2(i) = \sqrt{\sum_{j=1}^n w_{ij} (Z_j^- - z_{ij})^2} \quad (51)$$

第 i 个项目的综合效用值为

$$\eta_T(i) = d_2(i) / (d_1(i) + d_2(i)) \quad (52)$$

式中, $\eta_T(i)$ 越大的项目越先建设。

5 算例分析

以IEEE 39节点为例,在源—网—荷—储各侧都新建4个项目。电源侧编号为Power1、Power2、Power3、Power4,电网侧编号为Grid1、Grid2、Grid3、Grid4,负荷侧编号为Load1、Load2、Load3、Load4,储能侧编号为Storage1、Storage2、Storage3、Storage4。贷款利率为0.08,趸售电价为0.426 3元/(kW·h)。待建项目具体情况见图8及表2~5。

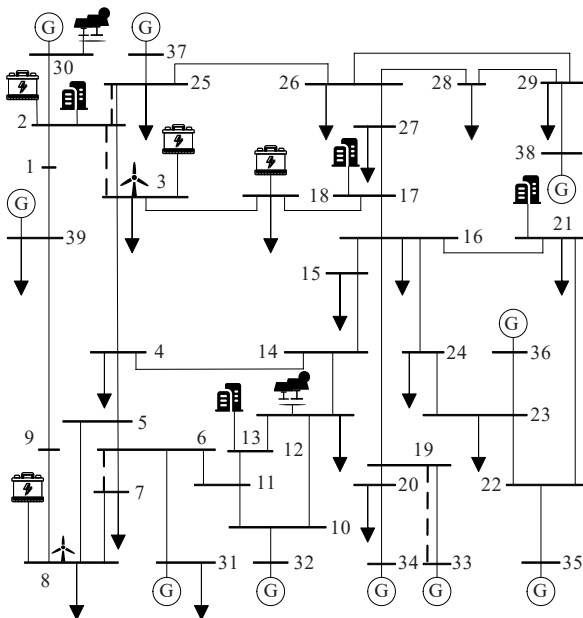


图8 待建项目示意

Figure 8 Diagram of the projects to be built

表2 电源侧待建项目数据

Table 2 Power side pending project data

待建项目	接入节点	额定功率/MW	风电/光伏	智能化水平
Power1	3	150	风电	1
Power2	8	200	风电	2
Power3	13	180	光伏	3
Power4	30	150	光伏	6

表3 电网侧待建项目数据

Table 3 Grid side pending project data

待建项目	接入节点	故障自愈率
Gird1	2~3	2
Gird2	2~25	3
Gird3	6~7	5
Gird4	19~33	2

表4 负荷侧待建项目数据

Table 4 Load side pending project data

待建项目	接入节点	额定功率/	创新性	经济支撑
		MW	水平	水平
Load1	2	50	4	5
Load2	12	60	5	6
Load3	17	40	6	3
Load4	21	75	4	4

表5 储能侧待建项目数据

Table 5 Energy storage side pending project data

待建项目	接入节点	额定容量/	额定功	技术紧	交互
		(MW·h)	率/MW	迫性	
Storage1	3	55	20	4	源储
Storage2	8	60	22	5	源储
Storage3	2	40	18	6	荷储
Storage4	18	50	25	4	网储

1) 指标计算。

按第3节中的指标计算方法,计算复杂电网各侧的单侧指标及交互指标。设 $F_1 \sim F_5$ 为单侧指标, $A_1 \sim A_4$ 为交互指标,归一化后的各指标值如表6所示,需要注意的是: F_{11} 、 A_{54} 、 F_{23} 、 F_{24} 、 A_{64} 、 F_{31} 、 F_{33} 、 F_{74} 、 F_{81} 、 F_{83} 、 B_4 是极小型指标,需要先进行正向化再进行归一化。

2) 指标权重的求取。

ANP、EWM、组合赋权法的赋权结果如图9所示,由组合赋权法得出的权重曲线位于EWM和ANP之间。得出此结果有以下几点原因:首先,指标数值变化程度较大的EWM赋予其权重也较大,决策者对指标的重视程度越高则ANP赋予其权重

也较大。其次,指标包含的信息量大并不代表决策者对其的重视程度高,这两者有可能是相反的,所以同一个指标的 ANP 和 EWM 权重的结果可能会

不同。最后,由于 ANP 的特性,它会将不与其他指标进行交互与反馈的指标的权重赋为 0,例如 F_{11} 、 F_{15} 、 F_{21} 、 F_{22} 、 F_{25} 、 F_{31} 、 F_{35} 。

表 6 归一化各指标值

Table 6 Normalized values of per indices

建设位置	待建项目	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	A_1	A_2	A_3	A_4
电源侧	Power1	0.000 0	0.812 5	0.768 7	0.767 4	0.110 9	0.521 0	0.521 0	0.447 5	0.523 8
	Power2	0.554 5	0.282 7	0.354 2	0.356 1	0.221 9	0.241 8	0.241 8	0.155 6	0.000 0
	Power3	0.468 0	0.364 9	0.412 6	0.413 7	0.388 3	0.630 5	0.630 5	0.624 7	0.603 0
	Power4	0.688 1	0.356 1	0.336 9	0.336 4	0.887 5	0.522 1	0.522 1	0.620 7	0.601 7
电网侧	Grid1	0.494 7	0.496 5	0.000 0	0.458 7	0.308 6	0.077 7	0.077 7	0.032 3	0.000 0
	Grid2	0.509 3	0.496 5	0.782 4	0.000 0	0.462 9	0.757 4	0.757 4	0.314 8	0.562 2
	Grid3	0.486 3	0.496 5	0.324 3	0.888 4	0.771 5	0.359 5	0.359 5	0.329 9	0.565 2
	Grid4	0.5093	0.510 3	0.531 7	0.016 8	0.308 6	0.539 6	0.539 6	0.889 4	0.603 7
负荷侧	Load1	0.000 0	0.738 8	0.738 8	0.774 2	0.666 7	0.287 5	0.232 5	0.893 6	0.894 3
	Load2	1.000 0	0.000 0	0.000 0	1.000 0	1.000 0	0.559 8	0.530 5	0.000 0	0.000 0
	Load3	0.317 9	0.512 9	0.512 9	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.577 1	0.579 0
	Load4	0.702 6	1.000 0	1.000 0	0.558 0	0.333 3	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
储能侧	Storage1	0.279 9	0.486 3	0.000 0	0.659 8	0.400 0	0.498 5	0.483 9	0.505 5	0.480 5
	Storage2	0.000 0	0.539 5	0.044 4	0.601 5	0.520 0	0.482 2	0.468 1	0.447 1	0.197 1
	Storage3	0.931 8	0.323 4	0.947 4	0.267 5	0.640 0	0.202 1	0.639 7	0.413 8	0.000 0
	Storage4	0.231 0	0.606 4	0.316 9	0.362 3	0.400 0	0.691 5	0.370 9	0.611 0	0.854 6

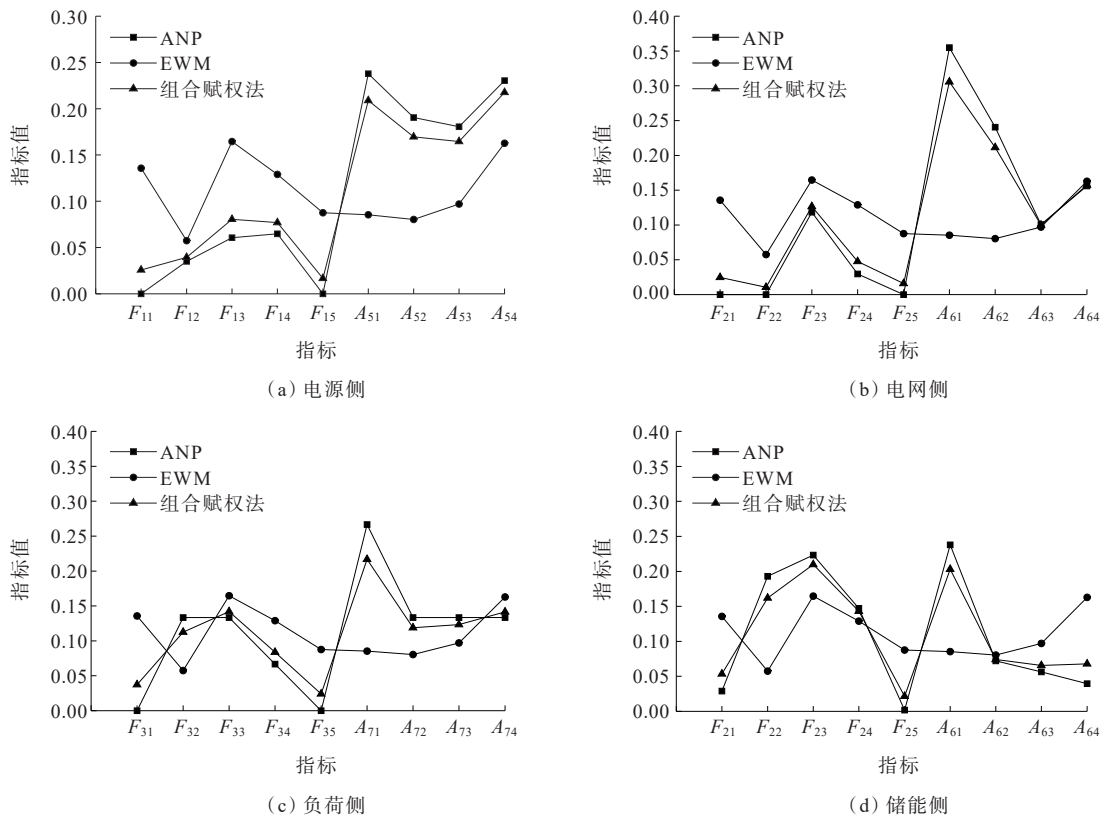


图 9 复杂电网各侧权重

Figure 9 The weights on each side of complex power grids

组合赋权法可以对EWM和ANP进行合理化的协调,降低ANP的主观随意性和EWM的客观绝对性,避免出现指标为0的情况,使赋权结果更合理、科学。

3) 不同赋权方法的决策结果。

不同赋权方法的综合投资决策结果如表7所示,首先比较AHP与ANP的决策结果,第1个建设项目皆为Load4,因为决策者注重交互指标,而Load4的 F_2 、 F_3 指标和交互指标都处于领先水平,但是AHP的第2个建设项目为Storage4,而ANP

的第2个建设项目为Grid2,这是因为AHP赋权不考虑源—网—荷—储的差别及其内部的交互与反馈关系,为各侧指标赋予了统一的权重,Storage4在待建项目中属于单侧指标和交互指标都较大的,其指标大小刚好与AHP权重大小吻合。在电网中,电网综合损耗率(F_3)在技术指标中相当重要,它与其他4个都存在反馈关系,若采用AHP方法, F_3 的权重较小,不能很好地反映Grid2的优势,可知在复杂电网中对指标赋权使用ANP比AHP更合理。

表7 不同赋权方法的综合投资决策结果

Table 7 Integrated investment decision results for different assignment methods

x	综合得分				建设顺序			
	AHP	ANP	EWM	ANP-EWM	AHP	ANP	EWM	ANP-EWM
Power1	0.307 8	0.351 0	0.251 8	0.306 3	4	3	10	6
Power2	0.084 3	0.006 3	0.152 0	0.073 7	16	16	14	15
Power3	0.307 1	0.336 2	0.283 7	0.317 8	5	5	8	5
Power4	0.300 9	0.306 5	0.312 5	0.302 2	7	7	3	7
Grid1	0.111 0	0.050 6	0.112 1	0.064 5	15	15	16	16
Grid2	0.269 5	0.361 4	0.290 5	0.347 6	9	2	6	2
Grid3	0.304 5	0.244 6	0.310 7	0.256 5	6	10	4	10
Grid4	0.315 0	0.343 4	0.286 7	0.331 4	3	4	7	4
Load1	0.284 7	0.264 1	0.265 0	0.265 2	8	9	9	9
Load2	0.178 6	0.164 2	0.218 1	0.182 4	12	13	11	12
Load3	0.168 6	0.158 8	0.163 2	0.160 5	14	14	13	14
Load4	0.368 1	0.412 9	0.353 7	0.391 9	1	1	1	1
Storage1	0.265 1	0.196 5	0.217 0	0.201 5	10	11	12	11
Storage2	0.172 4	0.177 3	0.141 9	0.168 9	13	12	15	13
Storage3	0.205 7	0.332 6	0.334 9	0.332 9	11	6	2	3
Storage4	0.356 8	0.293 6	0.306 2	0.296 7	2	8	5	8

比较ANP与EWM的决策结果,可知ANP和EWM的第1个建设项目都为Load4,而EWM第2个建设的项目为Storage3。因为 F_1 、 F_3 、 F_4 指标包含的信息量较大,所以其权重也较大,而Storage3的 F_1 指标仅次于Load1。从第2个建设项目Storage3即可看出EWM只注重指标包含的信息量的缺点,因为从表6中可以明显看出Storage3的交互指标比Grid2差,尤其是 A_4 为0。

再比较组合赋权法与ANP的决策结果,可知第1、2个待建项目相同,而组合赋权法的第3个建设项

目为Storage3,而ANP的第3个建设项目为Power1。由表6可知,Power1与Storage3的 F_1 的差值几乎为 A_4 的2倍,则可以看出ANP只考虑决策者对交互指标的偏好而忽略了指标的客观性,导致对单侧指标的忽视,使决策结果出现了不合理的现象。

最后比较组合赋权法与EWM的决策结果,可知第1个建设项目皆为Load4,组合赋权法的第2个建设项目为Grid2,EWM的第2个建设项目为Storage3。Grid2的交互指标皆大于Storage3且 A_1 和 A_4 的领先

幅度较大,但 Storage3 仅 F_1 大幅领先 Grid2,其余单侧指标差距较小。可以看出仅使用 EWM 赋权可能会导致决策结果不符合决策者预期的情况。

组合赋权法与 ANP 和 EWM 有很多待建项目的建设顺序相同,但解决了 ANP 仅考虑投资者指标偏好和 EWM 仅注重指标信息量的缺点,实现了主客观赋权法的平衡,其决策结果更科学合理。

6 结语

本文针对源—网—荷—储一体化背景下的复杂电网投资决策问题,提出一种赋权改进的投资决策方法。构建了源—网—荷—储一体化环境下的复杂电网投资决策评价指标体系,包括了源—网—荷—储的单侧指标和交互指标,相较于其他投资决策指标体系,此体系可以充分考虑复杂电网各侧交互产生的经济效益,评价更全面;利用博弈论,结合 ANP 与 EWM,形成“组合赋权法”,相较于单个方法,此方法能够综合考虑源—网—荷—储各侧不同的依存和反馈关系,并在此基础上实现了决策者对指标的主观偏好与指标本身客观情况的平衡;采用优劣解距离法计算复杂电网各项目总效用值,根据总效用值的大小对待建项目进行排序。基于 IEEE 39 节点的算例仿真结果表明,使用组合赋权法有许多待建项目的建设顺序与单独使用 ANP、EWM 赋权法的建设相同,但本文所提组合赋权法解决了 ANP 仅考虑投资者主观偏好和 EWM 仅注重指标客观信息量的问题,在源—网—荷—储各侧的待建项目都对 ANP、EWM 得出的建设顺序做出了改进。本文所提组合赋权法弥补了单一赋权法考虑重点的片面性,可以满足复杂电网投资决策需要综合考虑决策者偏好和指标客观计算值的要求,为源—网—荷—储一体化背景下复杂电网投资决策提供参考。

参考文献:

[1] 国家能源局.我国能源自主保障能力保持在80%以上[EB/OL].[2022-07-29].http://www.nea.gov.cn/2022-07/29/c_1310647946.htm.
National Energy Administration. China's independent

energy security capability remains above 80%[EB/OL].[2022-07-29]. http://www.nea.gov.cn/2022-07/29/c_1310647946.htm.

- [2] ŞENGÜL Ü, EREN M, ESLAMIAN SHIRAZ S, et al. Fuzzy TOPSIS method for ranking renewable energy supply systems in Turkey[J]. Renewable Energy, 2015, 75: 617-625.
- [3] KOPONEN K, LE NET E. Towards robust renewable energy investment decisions at the territorial level[J]. Applied Energy, 2021, 287: 116552.
- [4] QIAO H T, WEN S Y, WU L Z, et al. Research on wind power project investment risk evaluation based on fuzzy-gray clustering trigonometric function[J]. Energy Reports, 2022, 8: 1191-1199.
- [5] 王昭聪,潘学萍,马倩.基于“奖优罚劣”线性变换改进前景理论的电网建设项目多属性投资排序方法[J].电网技术, 2019, 43(6): 2154-2164.
WANG Zhaocong, PAN Xueping, MA Qian. Multi-attribute investment ranking method for power grid project construction based on improved prospect theory of "rewarding good and punishing bad" linear transformation [J]. Power System Technology, 2019, 43(6): 2154-2164.
- [6] 谭忠富,谭彩霞,余雪,等.基于混合布谷鸟算法的智能电网多业务组合投资决策优化[J].智慧电力, 2021, 49(4): 51-57+88.
TAN Zhongfu, TAN Caixia, YU Xue, et al. Multi-business portfolio investment decision optimization of smart grid based on hybrid cuckoo algorithm[J]. Smart Power, 2021, 49(4): 51-57+88.
- [7] 程智余,朱晓虎,李建青.基于改进 ELECTRE 法的电网规划投资多准则融合决策方法[J].中国电力, 2022, 55(11): 59-65.
CHENG Zhiyu, ZHU Xiaohu, LI Jianqing. A multi-criteria fusion decision-making method for power grid planning investment based on improved ELECTRE method[J]. Electric Power, 2022, 55(11): 59-65.
- [8] 张华鲁.面向电力调峰的柔性负荷群调节能力表征及响应策略研究[D].吉林:东北电力大学, 2022.
ZHANG Hualu. Research on adjustable capability characterization and response strategy of flexible load groups for power peak regulation[D]. Jilin: Northeast Electric Power University, 2022.
- [9] 侯慧,刘鹏,黄亮,等.考虑不确定性的电—热—氢综合能源系统规划[J].电工技术学报, 2021, 36(S1): 133-144.
HOU Hui, LIU Peng, HUANG Liang, et al. Planning of electricity-heat-hydrogen integrated energy system

- considering uncertainties[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2021,36(S1):133-144.
- [10] 李响,牛赛.双碳目标下源—网—荷多层评价体系研究[J].中国电机工程学报,2021,41(S1):178-184.
LI Xiang,NIU Sai.Study on multi-layer evaluation system of source-grid-load under carbon-neutral goal[J].Proceedings of the CSEE,2021,41(S1):178-184.
- [11] 肖峻,王成山,周敏.基于区间层次分析法的城市电网规划综合评判决策[J].中国电机工程学报,2004,24(4):50-57.
XIAO Jun,WANG Chengshan,ZHOU Min.An IAHP-based madm method in urban power system planning[J].Proceedings of the CSEE,2004,24(4):50-57.
- [12] 曾巧燕,杨洪耕,杨雪萍,等.考虑指标关联性的电能质量综合评估[J].电力系统及其自动化学报,2016,28(7):73-78.
ZENG Qiaoyan,YANG Honggeng,YANG Xueping, et al. Comprehensive evaluation on power quality considering the relevance of indexes[J].Proceedings of the CSU-EPSA, 2016,28(7):73-78.
- [13] 张彦,陈露东,贺墨琳,等.基于影子价格和空间误差面板数据模型的配电网投资优化方法[J].电力系统保护与控制, 2021,49(4):133-140.
ZHANG Yan,CHEN Ludong,HE Molin, et al. Investment optimization method of a distribution network based on shadow price and a spatial error panel data model[J].Power System Protection and Control,2021,49(4):133-140.
- [14] 刘汇川,王峰,吴霜,等.数据驱动的配电网投资有效性评估模型[J].电力系统及其自动化学报,2022,34(5):50-58.
LIU Huichuan,WANG Feng,WU Shuang, et al. Evaluation model of distribution network investment effectiveness based on data-driven method[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2022,34(5):50-58.
- [15] 邓嘉明,李俊杰,姜世公,等.考虑配电网规划长期增量成本的可靠性定价方法[J].电网与清洁能源,2021,37(3):17-23, 30.
DENG Jiaming,LI Junjie,JIANG Shigong,et al.A reliability pricing method considering long-term incremental cost of distribution network planning[J].Power System and Clean Energy,2021,37(3):17-23,30.
- [16] 向思阳,蔡泽祥,刘平,等.基于AHP-反熵权法的配电网低碳运行模糊综合评价[J].电力科学与技术学报,2019,34(4): 69-76.
XIANG Siyang, CAI Zexiang, LIU Ping, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of the low-carbon operation of distribution network based on AHP-Anti-Entropy Method [J].Journal of Electric Power Science and Technology,2019, 34(4):69-76.
- [17] 张可,梁玉勤,薛松,等.交叉关联视角下建筑企业信用评价权重计算[J].统计与决策,2018,34(10):178-182.
ZHANG Ke, LIANG Yuqin, XUE Song, et al. Credit evaluation weight of construction enterprises from perspective of cross association[J]. Statistics & Decision, 2018,34(10):178-182.
- [18] 祝志川,张之.基于变异系数的修正G2赋权方法及实证[J].统计与决策,2019,35(2):70-74.
ZHU Zhichuan, ZHANG Zhi. Modified G2 weighting method and demonstration based on coefficient of variation [J].Statistics & Decision,2019,35(2):70-74.
- [19] LIU T S, WANG M J J. Ranking fuzzy numbers with integral value[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1992, 50(3): 247-255.
- [20] 赵冬梅,尹颢涵,王建锋.间歇性能源出力特性综合分析体系及其应用[J].南方电网技术,2015,9(5):7-14.
ZHAO Dongmei, YIN Haohan, WANG Jianfeng. Comprehensive analysis system of intermittent energy output characteristics and its application[J]. Southern Power System Technology,2015,9(5):7-14.
- [21] 石亮缘,周任军,李娟,等.基于时间序列相似性度量的新能源-负荷特性指标[J].电力自动化设备,2019,39(5):75-81.
SHI Liangyuan, ZHOU Renjun, LI Juan, et al. New energy-load characteristic index based on time series similarity measurement[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(5):75-81.
- [22] 龚道仁,陈迪,袁志钟.光伏发电系统碳排放计算模型及应用[J].可再生能源,2013,31(9):1-4+9.
GONG Daoren, CHEN Di, YUAN Zhizhong. Mathematics calculation model and application of CO₂ emission[J]. Renewable Energy Resources,2013,31(9):1-4+9.
- [23] 王琦,李宁,顾欣,等.考虑碳减排的综合能源服务商合作运行优化策略[J].电力系统自动化,2022,46(7):131-140.
WANG Qi,LI Ning,GU Xin, et al. Optimization strategy for cooperative operation of integrated energy service providers considering carbon emission reduction[J]. Automation of Electric Power Systems,2022,46(7):131-140.
- [23] 王琦,李宁,顾欣,等.考虑碳减排的综合能源服务商合作运行优化策略[J].电力系统自动化,2022,46(7):131-140.
WANG Qi,LI Ning,GU Xin, et al. Optimization strategy for cooperative operation of integrated energy service providers considering carbon emission reduction[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(7): 131-140.

- [24] 林哲,胡泽春,宋永华.考虑 $N-1$ 准则的配电网与分布式储能联合规划[J].中国电机工程学报,2021,41(13):4390-4403.
LIN Zhe, HU Zechun, SONG Yonghua. Joint planning of distribution network expansion and distributed energy storage systems under $N-1$ criterion[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(13): 4390-4403.
- [25] 代琼丹,邓昕,吴雪妍,等.能源互联网下综合能源服务商业模式综述[J].高压电器,2021,57(2):135-144.
DAI Qiongdan, DENG Xin, WU Xueyan, et al. Overview on integrated energy service business model under energy Internet[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(2): 135-144.
- [26] 欧阳曾恺,段梅梅,田正其,等.基于网损二阶灵敏度的分布式电源出力鲁棒优化方法[J].电测与仪表,2022,59(9):69-75.
OUYANG Zengkai, DUAN Meimei, TIAN Zhengqi, et al. Robust optimization method of distributed generation output based on second-order sensitivity network loss[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(9): 69-75.
- [27] 邓申玮,韦钢,朱兰,等.基于区间理论含充换储一体站的主动配电网供电能力评估[J].智慧电力,2022,50(4):59-65,95.
DENG Shenwei, WEI Gang, ZHU Lan, et al. Power supply capability evaluation of active distribution network with charging-swapping-storage integrated station based on interval theory[J]. Smart Power, 2022, 50(4): 59-65, 95.
- [28] 吴震宇.考虑净负荷峰谷差随机性的储能参与电网调峰配置与调度研究[D].长沙:长沙理工大学,2019.
WU Zhenyu. Energy storage planning and operation to solve the peaking problem of power systems with considering the randomness of peak-valley difference[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2019.
- [29] 韩一鸣,徐鹏飞,宫建锋,等.基于用户侧需求的电网发展经营综合评价体系研究[J].发电技术,2022,43(4):636-644.
HAN Yiming, XU Pengfei, GONG Jianfeng, et al. Research on comprehensive evaluation system of power grid development and operation based on user demand[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(4): 636-644.
- [30] 杨军,孙志猛.数据中心投资收益分析[J].邮电设计技术,2015(11):84-87.
YANG Jun, SUN Zhimeng. Analysis of the data center investment income[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2015(11): 84-87.
- [31] 赵泽明,刘敏.考虑储能寿命成本的虚拟电厂能量共享模型[J].分布式能源,2022,7(6):21-29.
ZHAO Zeming, LIU Min. Energy sharing model of virtual power plant considering the lifetime cost of energy storage [J]. Distributed Energy, 2022, 7(6): 21-29.
- [32] 韩晓娟,田春光,张浩,等.用于削峰填谷的电池储能系统经济价值评估方法[J].太阳能学报,2014,35(9):1634-1638.
HAN Xiaojuan, TIAN Chunguang, ZHANG Hao, et al. Economic evaluation method of battery energy storage system in peak load shifting[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2014, 35(9): 1634-1638.
- [33] 毛义华,阮连法,郑邦岩.效用方法评价施工企业综合经济效益[J].浙江大学学报(自然科学版),1997,31(5):592-599.
MAO Yihua, RUAN Lianfa, ZHENG Bangyan. Applying utility theory to the synthetic assessment of economic benefit on construction enterprises[J]. Journal of Zhejiang University (Natural Science), 1997, 31(5): 592-599.
- [34] 涂圣文,赵振华,邓梦雪,等.基于组合赋权-后悔理论的城市综合管廊运维总体风险评估[J].安全与环境工程,2020,27(6):160-167.
TU Shengwen, ZHAO Zhenhua, DENG Mengxue, et al. Overall risk assessment for urban utility tunnel during operation and maintenance based on combination weighting and regret theory[J]. Safety and Environmental Engineering, 2020, 27(6): 160-167.