

基于 EWM-TOPSIS 法的新能源 发电项目投资决策评价

孟 敬¹, 夏 沛²

(1. 国网江西南昌供电公司, 南昌 330000; 2. 湖北工业大学电气与电子工程学院, 武汉 430068)

摘要: 新能源发电项目的投资建设是构建清洁低碳、绿色高效新型能源体系的重要支撑。针对新能源发电项目投资决策评价问题, 采用定量指标与定性指标相结合的原则, 建立包含技术效益和经济效益的指标体系。在此基础上, 以熵权法(entropy weight method, EWM)确定指标权重, 建立基于逼近理想解排序法(technique for order preference by similarity to an ideal solution, TOPSIS)的评价模型, 经 IEEE 39 节点系统的算例测试验证了此方法的可行性和有效性。结果表明, 该方法能综合衡量影响新能源发电项目投资的各指标因素, 可为新能源发电项目投资决策评价提供参考依据。

关键词: 新能源发电项目; 投资决策评价; 指标体系; EWM-TOPSIS 法

中图分类号: TM-9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2023)22-0142-06

以风电、光伏为代表的新能源发电项目对于保障我国能源安全, 推动“双碳”目标实现具有重要意义。近年来, 我国新能源电站的建设规模不断扩大, 发展势头迅猛。然而, 风电、光伏出力具有不确定性, 其大规模并网也将给电力系统的安全、经济运行带来挑战^[1], 对新能源发电项目进行技术效益和经济效益的评价分析, 有利于提升新能源发电项目的投资收益, 并降低对电网安全稳定运行的消极影响。传统的新能源发电项目投资决策主要是依赖于专家长期积累的经验进行判断, 当待建项目较多且新能源发电项目运行经验缺乏时, 依赖专家主观决策的方法将难以适用, 易导致盲目投资和资金浪费。

多属性决策方法在电力系统投资决策优化中已获得了初步应用, 常用于在具有多重约束的多个备选方案中择优选出最佳方案^[2]。目前, 针对新能源发电项目的投资决策评价问题的研究仍处于探索阶段。王志刚^[3]从技术、经济、社会、环境因素出发, 构建了风电项目可行性评估的指标体系; 徐卓华^[4]从环境效益、经济效益、社会效益的角度, 建立了光伏发电项目可行性评估的指标体系; Wang 等^[5]考虑了区位特征、技术、经济、社会和环境方面

的指标, 将数据包络分析法和层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)相结合, 解决风电场的选址评价问题; Ma 等^[6]考虑了海上风资源储量、稳定性和建设条件方面的指标, 利用 AHP 法解决海上风电资源评估问题; Guo 等^[7]建立了包含经济性和安全性的综合评价指标体系以评估大型光伏-光热电站的容量规划方案; 伊力奇等^[8]应用改进 AHP-熵权法(entropy weight method, EWM)计算综合权重的三角直觉模糊交互式多属性决策方法, 构建了海上风电-海浪能与光伏-压缩空气储能综合能源系统的投资决策评价模型。

上述研究为新能源发电项目投资决策指标体系的建立和赋权方法的选取奠定了良好的研究基础。AHP 方法将复杂的多属性决策问题分成多个层次进行定量与定性相结合的分析与评价, 具有良好的适应性, 但其在指标赋权过程存在主观性, 且需计算判断矩阵的一致性, 一旦判断矩阵的一致性校验不通过, 则需调整判断矩阵重新评价。EWM 是基于信息熵的概念建立起来的决策工具, 它能根据数据信息量的大小来确定指标的权重^[9], 属于客观赋权法, 避免了决策者主观因素的干扰, 在工程管理科学中成为重要的赋权方法之一^[10]。逼近理

收稿日期: 2023-08-23

作者简介: 孟敬(1992—), 女, 河南鹤壁人, 国网江西南昌供电公司, 工程师, 硕士, 研究方向为电力系统及其自动化; 夏沛(1986—), 女, 湖北孝感人, 湖北工业大学电气与电子工程学院, 讲师, 博士, 研究方向为含新能源电力系统优化调度与运行控制、储能规划。

想解排序方法^[11]最早由 Hwang 和 Yoon^[12]于 1981 年提出,是一种有效的多属性决策方法,该方法将备选方案中的最佳方案视为最接近正理想方案或最远离负理想方案的方案。基于 EWM-TOPSIS 的方法在发电企业低碳转型进程评价^[13]、光伏资源利用评价^[14]、风电光伏发展潜力评估^[15]等方面已获得初步应用。

新能源发电项目投资决策评价是一项复杂的系统工程,评价指标的选择以及指标权重的计算已成为多属性决策问题的重要环节。本文基于建立的综合技术效益与经济效益的发电项目投资决策评价指标体系,采用 EWM 计算评价指标权重,利用 TOPSIS 法建立评价模型,根据发电项目指标综合值的大小进行投资决策评价,根据评价结果优先建设指标综合值大的发电项目。

1 新能源发电项目投资决策评价指标体系

建立新能源发电项目投资决策评价指标体系如图 1 所示。

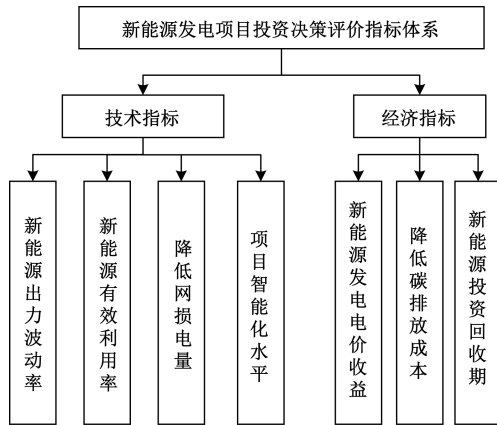


图 1 新能源发电项目投资决策评价指标体系

1.1 新能源出力波动率

考虑到新能源发电功率具有不确定性,采用新能源出力波动率表征新能源出力不确定性对电网运行可靠性的影响,其计算式如下所示。

$$I_1 = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (P_t^R - P^{R0})^2} \quad (1)$$

式中: P_t^R 和 P^{R0} 分别为新能源电站在第 t 个时段的预测出力 and 全年的平均出力,单位为 MW; T 取值 8 760 h。

1.2 新能源有效利用率

新能源有效利用率反映了新能源机组的发电能力,被定义为新能源电站的年上网电量与其理论发电量的比值。

$$I_2 = \frac{E}{PT} \quad (2)$$

式中: E 为新能源电站年发电电量; P 为新能源电站的总装机容量。

1.3 降低网损电量

降低网损电量是指建设新能源发电项目前后电网全年网损的变化,可以反映新能源发电项目的降损效益,其值越大,经济性越好。

$$I_3 = \sum_{t=1}^T (P_t^{\text{loss},0} - P_t^{\text{loss}}) \quad (3)$$

式中: $P_t^{\text{loss},0}$ 和 P_t^{loss} 分别为建设新能源发电项目前后的有功功率损耗。

1.4 项目智能化水平

项目智能化水平属于主观性指标,本文采用梯形模糊数 $A=(a_1, a_2, a_3, a_4)$ 量化计算, A 的取值及其表征的模糊等级如表 1 所示。

A 的隶属函数定义为

$$\mu_A(x) = \begin{cases} \frac{x-a_1}{a_2-a_1}, & a_1 \leq x < a_2 \\ 1, & a_2 \leq x < a_3 \\ \frac{x-a_4}{a_3-a_4}, & a_3 \leq x \leq a_4 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

主观性指标的数值采用梯形模糊数的期望值^[16]来表示,其计算公式为

$$I_4 = \frac{1}{2} \left(a_2 + a_3 + \int_{a_3}^{a_4} \frac{x-a_4}{a_3-a_4} dx - \int_{a_1}^{a_2} \frac{x-a_1}{a_2-a_1} dx \right) = \frac{a_1 + a_2 + a_3 + a_4}{4} \quad (5)$$

表 1 梯形模糊数及其模糊等级

A	模糊等级	
(0,0,0.2,0.2)	1	非常差
(0.05,0.15,0.25,0.35)	2	差
(0.2,0.3,0.4,0.5)	3	较差
(0.35,0.45,0.55,0.65)	4	一般
(0.5,0.6,0.7,0.8)	5	较好
(0.65,0.75,0.85,0.95)	6	好
(0.8,0.9,1,1)	7	非常好

1.5 新能源发电电价收益

新能源发电项目并网运行后,可通过售卖电量获取电价收益。其计算方法如下:

$$I_5 = 0.1 \times E(M_S - M_T) \quad (6)$$

式中: M_S 为新能源发电的售电电价,单位为元/(kW·h); M_T 为输配电成本,单位为元/(kW·h)。

1.6 降低碳排放成本

火电机组通过燃煤发电会产生大量的 CO_2 ,其碳排放成本的计算公式为

$$I_6 = 0.1 \times k_{\text{CO}_2} E \lambda_{\text{CO}_2} \quad (7)$$

式中: k_{CO_2} 为碳排放因子,碳排放因子的典型值为

0.572 1 kg/(kW · h); λ_{CO_2} 为单位碳排放交易价格, 取 0.058 5 元/kg。

1.7 新能源投资回收期

投资回收期常用收回投资成本的速度来反映投资方案的经济性, 其计算式如下所示。

$$I_7 = (1 + r_0\%)cP \frac{(1+r)^{T_L}r}{(1+r)^{T_L}-1} \times \frac{T_L}{I_5 + I_6} \quad (8)$$

式中: c 为新能源单位功率的发电成本, 单位为万/MW; T_L 为新能源机组的全生命周期; r 为年投资收益率, 取 8%; $r_0\%$ 为新能源发电的运营成本与其初始投资成本的比值。

2 基于 EWM-TOPSIS 法的综合评价方法

2.1 EWM

EWM 的决策流程如下。

1) 建立决策矩阵。

设有 m 个备选方案, 各备选方案有 n 个评价指标, g_{ij} 表征第 i ($i \in [1, m]$) 个方案的第 j ($j \in [1, n]$) 个指标, 构建备选方案的投资决策指标矩阵 G 。

2) 指标的归一化处理。

将极大值指标按下式处理:

$$Y_{ij} = \frac{g_{ij} - \min_j}{\max_j - \min_j} \quad (9)$$

将极小型指标按下式处理:

$$Y_{ij} = \frac{\max_j - g_{ij}}{\max_j - \min_j} \quad (10)$$

3) 计算指标所包含的信息量。

$$\rho_{ij} = Y_{ij} / \sum_{i=1}^n Y_{ij}, \forall i \in [1, m], \forall j \in [1, n] \quad (11)$$

4) 计算指标的信息熵。

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \times \sum_{i=1}^m \rho_{ij} \ln \rho_{ij} \quad (12)$$

5) 计算指标的熵权。

$$\omega_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^n (1 - e_j)} \quad (13)$$

2.2 TOPSIS 法

TOPSIS 法的决策步骤如下。

1) 决策指标矩阵的归一化。

将由 m 个备选方案和 n 个评价指标构成的决策指标矩阵 G 归一化为 H 。

$$h_{ij} = \frac{g_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m g_{ij}^2}}, \forall i \in [1, m], \forall j \in [1, n] \quad (14)$$

采用基于 EWM 的 TOPSIS 方法时, H 可通过

式(9)和式(10)计算得到。

2) 构造加权的归一化决策矩阵 R 。

$$R = HW \quad (15)$$

式中: W 为指标权重构成的矩阵。

3) 分别计算备选方案的解到正、负理想方案解的距离。

若 r_j^+ 和 r_j^- 分别为评价指标的最优值和最劣值, 则第 i 个备选方案的解到最理想方案解的距离为

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (r_{ij} - r_j^+)^2} \quad (16)$$

第 i 个备选方案的解到最不理想方案解的距离为

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (r_{ij} - r_j^-)^2} \quad (17)$$

4) 确定备选方案与理想方案的接近程度 D_i 。

$$D_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-} \quad (18)$$

5) D_i 的归一化处理。

为便于比较, 对各备选方案的 D_i 进行归一化处理, 如下所示。

$$D_i = \frac{D_i}{\sum_{i=1}^m D_i} \quad (19)$$

3 算例分析

3.1 算例介绍

IEEE 39 节点测试系统如图 2 所示, 6 个新能源发电项目作为备选方案, 记为 $G_1 \sim G_6$, 其基础数据如表 2 所示。全年负荷曲线如图 3 所示。采用 Weibull 函数^[17]来模拟全年的风速, 基于风速-风电功率模型^[18]计算风电全年出力。风电发电机高度取为 70 m, 平均每月风速为 7.7 ~ 10.6 m/s, Weibull 函数的比例参数为 9.15, 形状参数为 2.26, 风电机组切入风速为 3 m/s, 切出风速为 25 m/s, 额定风速为 14 m/s。光伏电站全年的光照强度采用余弦函数^[19]进行模拟, 光伏发电功率参考谭岭玲^[20]的光照强度-发电功率模型计算, 启动光照强度为 200 W/m², 额定光照强度为 800 W/m²。

3.2 数据计算

1) 备选方案指标值计算。

采用式(1)~式(8)计算备选方案的指标值, 表 3 所示为备选方案的指标值计算结果。

2) 决策矩阵归一化处理。

决策矩阵的归一化处理可解决具有不同量纲及量纲单位的指标所带来的不可比问题, 使得各指标值转化为便于比较的无量纲数据。指标 1 和指标

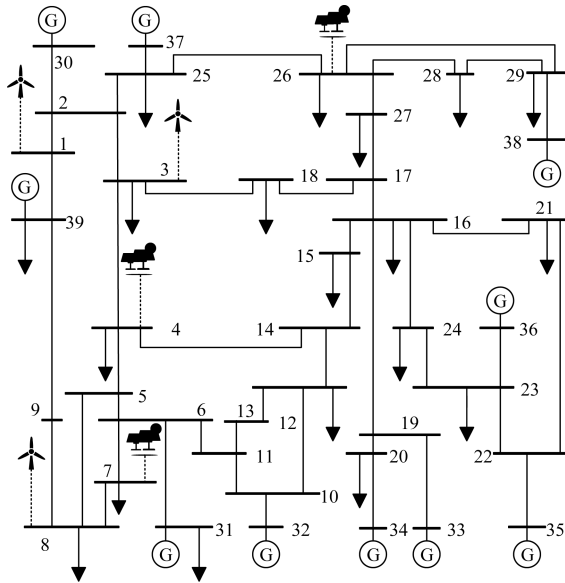


图2 IEEE 39 节点测试系统

7 为极小型指标类型,按式(10)进行归一化处理,其他指标按式(9)进行归一化处理,计算结果如表 4 所示。

3) 指标权重计算。

根据式(11)~式(13),采用 EWM 法计算得到的各指标权重为: $w_1=0.137\ 3$, $w_2=0.216\ 0$, $w_3=0.069\ 8$, $w_4=0.166\ 5$, $w_5=0.100\ 2$, $w_6=0.100\ 2$, $w_7=0.210\ 0$ 。

4) 备选方案综合评价。

根据式(15)计算加权的归一化决策矩阵,采用式(16)~式(19)计算得到各备选方案的解到正、负理想方案解的距离及备选方案与理想方案的接近程度。表 5 给出了各备选方案的评价指标综合值计算结果。

表3 备选方案的指标值

编号	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6	I_7
G_1	36.427 0	0.282 8	3 819.185 3	0.350 0	9 873.070 4	994.822 9	23.967 3
G_2	55.706 8	0.287 4	3 093.470 0	0.350 0	15 054.117 3	1 516.871 7	24.344 9
G_3	52.085 9	0.397 1	4 064.233 0	0.500 0	16 176.352 8	1 629.949 6	12.785 2
G_4	55.785 0	0.396 9	4 376.483 2	0.800 0	17 323.796 6	1 745.567 4	12.840 4
G_5	61.393 4	0.285 6	5 127.792 7	0.800 0	16 618.370 4	1 674.487 8	24.647 6
G_6	37.022 9	0.396 7	-5 323.659 3	0.925 0	11 542.468 4	1 163.033 6	12.507 7

表4 指标值归一化计算结果

编号	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6	I_7
G_1	1.000 0	0.000 0	0.874 8	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.056 0
G_2	0.227 8	0.040 8	0.805 4	0.000 0	0.695 4	0.695 4	0.024 9
G_3	0.372 8	1.000 0	0.898 2	0.260 9	0.846 0	0.846 0	0.977 1
G_4	0.224 6	0.998 4	0.928 1	0.782 6	1.000 0	1.000 0	0.972 6
G_5	0.000 0	0.024 5	1.000 0	0.782 6	0.905 3	0.905 3	0.000 0
G_6	0.976 1	0.996 4	0.000 0	1.000 0	0.224 1	0.224 1	1.000 0

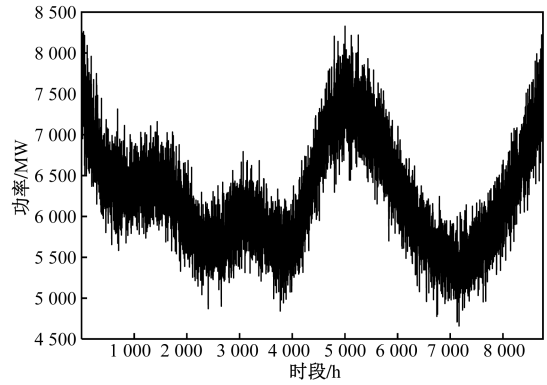


图3 全年负荷曲线

表2 备选方案的基础数据

方案编号	接入节点	额定功率/MW	新能源类型	主观性指标
G_1	1	120	风电	3
G_2	3	180	风电	3
G_3	4	140	光伏	4
G_4	7	150	光伏	6
G_5	8	200	风电	6
G_6	26	100	光伏	7

根据表 5 的评价结果可知,备选方案的投资决策顺序为: $G_4>G_6>G_3>G_5>G_1>G_2$ 。

3.3 方法对比

采用线性加权的 EWM、NPV 法、PCA 法的计算结果如表 6 所示。

由表 6 的计算结果可知,EWM 法的投资决策顺序是 $G_4>G_6>G_3>G_5>G_2>G_1$;NPV 法的投资决策顺序是 $G_3>G_4>G_6>G_2>G_5>G_1$;PCA 法的投资决策顺序是 $G_4>G_3>G_5>G_6>G_2>G_1$ 。其中,EWM 法和 PCA 法决策出的最优方案与 EWM-TOPSIS 法决策出的最优方案结果一致,验证了本文方法的有效性。

表 5 备选方案的评价结果

编号	S_i	S_i	D_i
G_1	0.365 8	0.150 8	0.094 1
G_2	0.354 8	0.118 1	0.080 5
G_3	0.152 0	0.334 0	0.221 4
G_4	0.112 7	0.361 1	0.245 6
G_5	0.329 9	0.195 8	0.120 0
G_6	0.130 3	0.370 3	0.238 4

表 6 不同方法的综合评价价值

编号	EWM	NPV	PCA
G_1	0.210 2	-1.665 6	-1.191 2
G_2	0.240 9	-1.517 7	-0.254 5
G_3	0.748 0	5.125 9	0.480 2
G_4	0.846 2	5.120 7	0.842 9
G_5	0.386 8	-1.576 3	0.271 2
G_6	0.770 6	5.115 2	-0.148 7

PCA 法通过忽略贡献率小的主成分从而达到决策矩阵降维的目的,但其对于主成分的选择对计算结果可能会造成影响。基于线性加权的 EWM 法根据指标之间的信息熵来确定指标权重,但其计算出的权重可能出现个别指标权重过大的现象,导致赋权结果过于乐观,进而影响备选方案综合评价价值的大小。NPV 法通过比较未来现金流的折现值与初始投资额,当净现值大于 0 才会考虑投资项目,此时该备选项目的投资收益将高于项目的投资回报率。本算例中,备选项目 G_3 的初始投资额为 219 537.402 1 万元,小于备选项目 G_4 的初始投资额 235 218.645 1 万元,其他三种方法的投资决策评价结果均表明备选项目 G_4 的投资顺序优于 G_3 ,而受初始投资额的影响,NPV 法的决策结果具有一定的局限性。与 EWM 法结合的 TOPSIS 法要求各个指标都尽可能地取得较好的决策水平,才能使备选项目的指标综合值较高,它明显倾向于各个指标的“折衷”。因此,本文方法能有效避免企业过度追求经济效益而忽略其他指标的决策倾向,综合衡量了影响新能源发电项目投资的各指标因素。

4 结论

新能源发电项目对于我国双碳目标实现,构建新能源体系具有重要意义。针对新能源发电项目的投资决策评价问题,建立综合考虑技术效益和经济效益的评价指标体系,利用 EWM 对指标赋权,避免了人工决策带来的主观性问题,并基于 TOPSIS 法对备选方案进行综合评价,经 IEEE 39 节点算例测试,验证了本文方法的可行性,通过与 EWM、NPV 法、PCA 法比较,验证了该方法的有效性,可为新能源发电项目的投资决策评价提供参考依据。

参考文献

- [1] 黄炜栋,李杨,李璟延,等.考虑可再生能源不确定性的风光-储-蓄多时间尺度联合优化调度[J].电力自动化设备,2023,43(4):91-98.
- [2] 王泽祺,刘友波,任鹏哲,等.配电网精准投资理论与关键技术综述[J].电网技术,2022,46(7):2665-2678.
- [3] 王志刚. HPZH 风电场一期工程项目综合评价研究[D].保定:华北电力大学,2019.
- [4] 徐卓华.安徽省 B 公司分布式光伏发电项目综合评价研究[D].合肥:安徽财经大学,2020.
- [5] WANG C N, NGUYEN H P, WANG J W. A two-stage approach of DEA and AHP in selecting optimal wind power plants[J]. IEEE Transactions on Engineering Management, 2023, 70(12): 4299-4309.
- [6] MA X M, LIU Y Q, YAN J, et al. Assessment method of offshore wind resource based on a multi-dimensional indexes system[J/OL]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2022, 1-14. Doi: 10. 17755/CSEEJPES. 2021. 09260.
- [7] GUO Y, GAO S, ZHAO X, et al. A Configuration-dispatch scheme and techno-economic evaluation for large-scale photovoltaic/concentrating solar power plants[C]//2020 5th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE). Chengdu: Hong Kong Society of Mechanical Engineer(HKSMS), 2020: 972-976.
- [8] 伊力奇,李涛,张婷,等.海上风电-海浪能与光伏-压缩空气储能综合能源投资决策模型[J].数学的实践与认识, 2021, 51(14): 78-88.
- [9] 钱媛.基于熵权-TOPSIS 法的海外油气投资方案评价[J].科技和产业, 2023, 23(11): 143-147.
- [10] 徐传久,徐妍,王继新.基于熵权法的水利工程工期方案评价研究[J].水利技术监督, 2023(4): 92-94.
- [11] 孟定华,朱诗洁,毛劲乔.基于 TOPSIS 法的鄱阳湖水环境评价研究[J].水电能源科学, 2023, 41(3): 44-47.
- [12] HWANG C L, YOON K P. Multiple attributes decision-making: methods and applications[M]. Heidelberg: Springer, 1981.
- [13] 汪红,郭恒,武静云,等.基于熵权-TOPSIS 法的发电企业低碳转型进程评价研究[J].热力发电, 2023, 52(7): 26-32.
- [14] 孙佳斌.基于熵权-TOPSIS 法的重点地区光伏资源利用评价研究[J].绿色科技, 2023, 25(10): 192-196.
- [15] 杨春.基于熵权 TOPSIS 模型的风电光伏发展潜力评估[J].太阳能学报, 2022, 43(12): 70-78.
- [16] LIU B, LIU YK. Expected value of fuzzy variable and fuzzy expected value models[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2002, 10(4): 445-450.
- [17] 李军,胡非,王丙兰,等.风速的 Weibull 分布参数[J].太阳能学报, 2012, 33(10): 1667-1671.
- [18] 杨三根,陈峦,曹璘月,等.基于风速 Weibull 分布的电力系统备用容量优化模型[J].可再生能源, 2013, 31(10): 49-52.

- [19] ALBOTEANU I L, BULUCEA C A, DEGERATU S. Estimating solar irradiation absorbed by photovoltaic panels with low concentration located in Craiova, Romania[J]. Sustainability, 2015, 7(3):2644-2661.
- [20] 谭岭玲. 多能互补型微电网规划配置和优化运行研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2021.

Investment Decision-making and Evaluation of New Energy Power Generation Projects Based on Entropy Weighted TOPSIS Method

MENG Jing¹, XIA Pei²

(1. State Grid Corporation of China in Nanchang City Jiangxi Province, Nanchang 330000, China;

2. Hubei University of Technology, School of Electrical and Electronic Engineering, Wuhan 430068, China)

Abstract: The investment and construction of new energy power generation projects is an important support for constituting a clean, low-carbon, green and efficient new energy system. In this paper, for the evaluation of investment decision of new energy power generation projects, the principle of combining quantitative and qualitative indicators was adopted to establish an index system that includes technical and economic benefits. On this basis, the weights of indicators were determined by entropy weight method (EWM), and the evaluation model based on technique for order preference by similarity to an ideal solution (TOPSIS) was established. The feasibility and effectiveness of the method of this paper were verified by the numerical tests on an IEEE 39-bus system. The results indicate that this method can comprehensively measure various indicator factors that affect the investment of new energy power generation projects, and can provide a reference basis for investment decision-making and evaluation of new energy power generation projects.

Keywords: new energy power generation projects; investment decision evaluation; index system; entropy weighted TOPSIS method