

doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2019.03.007

## 基于模糊综合法的光伏发电项目风险评价 方法及其应用研究

杨彦<sup>1</sup>, 查建华<sup>1</sup>, 周怡<sup>2</sup>, 袁宁一<sup>1</sup>, 丁建宁<sup>1</sup>

(1.常州大学 江苏省光伏科学与工程协同创新中心,江苏 常州 213164;2.常州宝利环保科技有限公司,  
江苏 常州 213022)

**摘要:**结合我国光伏发电项目的发展特点和基本属性,采用风险鉴定、风险元层次分析、风险表征 3 个步骤,充分考虑了光伏发电项目从筹备到实施到运营的全过程,对光伏发电项目涉及的风险单元进行识别鉴定,构建基于技术性、自然、环境、政策、市场、生命周期、经营管理、并网风险等 8 个风险评估指标层次体系,采用 ANP-TOPSIS 组合的方法,建立光伏发电项目的评估模型。通过对实例进行应用,表明该方法的实用、有效性,以期光伏发电项目的方案制定及产业建设发展提供有益参考。

**关键词:**光伏发电项目;风险评价;ANP;TOPSIS

**中图分类号:**X 913

**文献标志码:**A

**文章编号:**2095-0411(2019)03-0063-08

## Risk Evaluation Method of Photovoltaic Power Generation Project and Its Application Research Based on Fuzzy Synthesis

YANG Yan<sup>1</sup>, ZHA Jianhua<sup>1</sup>, ZHOU Yi<sup>2</sup>, YUAN Ningyi<sup>1</sup>, DING Jianning<sup>1</sup>

(1.Jiangsu Collaborative Innovation Center of Photovoltaic Science and Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China; 2. Changzhou Baoli Environmental Technology Co., Ltd., Changzhou 213022, China)

**Abstract:**Combining with the development characteristics and basic attributes of photovoltaic power generation projects in China, this paper adopts three aspects of risk identification, risk element hierarchy analysis and risk characterization, and fully considers the whole process of photovoltaic power generation projects from preparation to implementation and operation, and identifies the risk units involved in photovoltaic power generation projects by constructing a risk evaluation index hierarchy system for 8

**收稿日期:**2018-09-04。

**基金项目:**江苏省科技计划产学研前瞻性联合研究项目(BY2016029-17)。

**作者简介:**杨彦(1984—),女,江苏淮安人,博士,高级工程师。通信联系人:丁建宁(1966—),E-mail: dingjn@cczu.edu.cn

**引用本文:**杨彦,查建华,周怡,等. 基于模糊综合法的光伏发电项目风险评价方法及其应用研究[J]. 常州大学学报(自然科学版),2019,31(3):63-70.

risks involving technology, nature, environment, policy, market, life cycle, management and grid-connection. An evaluation model of photovoltaic power generation is established by using ANP-TOPSIS method. The application of the example shows the practicability and validity of the model, which provides a reference for the formulation of photovoltaic projects and industrial development.

**Key words:** photovoltaic power generation project; risk assessment; ANP; TOPSIS

近年来,光伏产业由于其安全可靠、无噪声、无污染、资源分布广泛、建设周期短等优势,尤其是在当前应对气候变暖的低碳发展思路下,受到了世界各国的普遍关注。与传统能源发电不同,中国的光伏产业起步较晚,技术基础薄弱。此外光伏发电利用太阳辐射能进行发电,本身存在间歇性、波动性和不确定性等特点,在并网后容易产生电能质量恶化、电网调度难度变大、引起设备误动作等问题。目前国内外诸多政府相关部门、科研院所、产业行业协会、企业等致力于开展光伏产业的评估研究<sup>[1-4]</sup>。对国内外已有的报道进行总结不难发现,目前光伏产业、项目的风险评估多集中于节能效果<sup>[5]</sup>、并网<sup>[6]</sup>、投资风险<sup>[7]</sup>等单一风险源,或者指标体系较为简单<sup>[8]</sup>,又或者缺乏实际案例论证<sup>[9]</sup>,然而光伏产业发展、项目建设是一个系统的过程,只有对其建立一套整体、准确、系统的评估方法,才能科学表征其发展程度,对光伏产业的发展具有重要的现实意义。

网络层次分析法 ANP (Analytic Network Process) 是由 AHP (Analytic Hierarchy Process) 基础上发展形成,该法自 1996 年由美国匹兹堡大学 T.L.Saaty 教授提出后,由于其适应于存在内部依存和反馈关系的复杂决策系统,被多国科研人员广泛使用于国际发展项目的选择<sup>[10]</sup>、大型工程项目的风险评估<sup>[11]</sup>等领域。目前国内光伏产业、项目的风险评估报道中,也有使用 ANP 方法展开研究,通过分析不难发现,尽管 ANP 具有所需信息量少,系统性强等优势,但在计算过程中如存在定性的指标较多的情况,其评估的不确定性则增强<sup>[12]</sup>。TOPSIS 法 (Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution) 于 1981 年由 C.L.Hwang 和 K.S.Yoon 首次提出<sup>[13]</sup>。该方法具有计算简单、应用灵活、结果较合理等特点,非常适合于对多目标的决策分析过程,利用评价对象与理想目标之间的接近程度进行排序,在现有对象中进行相对的优劣评价。目前该方法被广泛应用于环境<sup>[14]</sup>、金融<sup>[15]</sup>、火力发电<sup>[16]</sup>等领域。

本文拟从风险鉴定、风险元层次分析、风险表征 3 个步骤,对光伏发电项目涉及的风险进行识别鉴定,并剖析其相关因素构建评估指标层次体系,采用 ANP-TOPSIS 组合的方法,避归使用单一方法评价时存在的缺点,提高评价的准确、科学性的同时,以期为该领域的研究提供一定的参考依据,对该产业的良好发展具有重要的推动作用。

## 1 光伏发电项目风险评价方法的构建

### 1.1 风险鉴定

本文采用过程分析法对光伏项目建设进行风险鉴定,并在此基础上建立其评价指标体系单元。本次风险鉴定遵循以下基本原则:①系统性原则。即指标体系的建立力求能够客观,充分考虑项目建设的运行、运营、维护的过程性和完整性。②可比性原则。即指标的筛选在科学的基础上,更需考虑其可比性,含义通俗易懂,均有较强的可操作性。结合课题组在前期的文献查询、现场调研及专家咨询等技术方法,采用 SMART 设计准则构建光伏产业、行业风险评估指标体系。

### 1.2 风险元层次分析

构建光伏产业、行业风险单元主要包括:技术性风险、自然风险、环境风险、政策风险、市场风险、建

设项目生命周期风险、经营管理风险、并网风险等,并以这8个单元作为一级指标,构建评估指标体系,如图1所示。

### 1.3 风险评估指标

#### 1.3.1 技术性风险

光伏发电技术涉及技术风险评估指标设计包括:先进性指标,目前现有的光伏发电项目,所使用的电池种类较多(晶硅电池、薄膜电池等),其产地来源不同(进口、国产),及其核心技术的知识产权归属,都能对其先进性产生影响。安全性指标,指在项目实施、运营过程中信息传输及数控系统的安全程度。可靠性指标,指设备的可用率、故障修复率等。

#### 1.3.2 自然风险

自然与环境风险评估指标设计包括:太阳能年辐射总量,对光伏发电效率影响最为主要的太阳能转化效率,在评估过程中需充分考虑对其影响最为主要的参数,如年日照时间、光照强度等。其次气候条件(温度、湿度)、地理条件(经度与纬度、海拔与气压、地形地貌)等也会对太阳能资源利用产生影响。

需要考虑的是,一般情况下,太阳能资源较为发达的地区,地质环境和气象条件等环境因素也比较复杂多变,在进行评估时,需分析项目所在地区极端气象环境指数。

#### 1.3.3 环境风险

随着我国政府对环境保护的日益重视,对企业的环保要求越来越高,新的环保标准相继出台,在光伏发电项目实施运营过程中,给环境造成的破坏和不利影响,也是评估中需要考虑的。如在项目建设过程中的“三废”处理处置,运营维护过程中电池表面清洁的洗涤废水、厂区人群的生活垃圾、污水等。

#### 1.3.4 政策风险

光伏发电项目已列为中国重要的战略扶持项目之一,目前国家层面的指导意见及地方政府结合本地区光伏发电产业规划,计划或已实施了一系列财政补贴、税收抵扣、税收减免、低息贷款和免息贷款等激励政策。在评估时政策风险指标设计包括:国家政策(国家产业政策、国家税收优惠)、区域政策(地区光伏发电产业规划、补贴额度)等。

#### 1.3.5 市场风险

光伏发电对于缓解国家供需压力,提高节能减排作用显著,但由于技术、生产保障能力等与传统的发电方式尚有一定差距,对电力市场的市场需求度、市场竞争力、进入壁垒的概率等指标进行评估可较好的表征其市场风险。

#### 1.3.6 建设项目生命周期风险

无论何种项目在前期筹备、建设、运营维护过程中均存在风险,光伏发电项目是新兴产业,建设规范尚在完善的过程中。建设项目生命周期风险,包括前期筹备过程中可能发生的项目审批、资金筹措、前期选址、勘察设计等风险,及建设过程中人员施工安全、设备安装调试、建设期管理调度等风险。另外,后期运营维护过程中,设施的日常维护、检修,消耗件的更换、储运等风险,均需充分考虑。

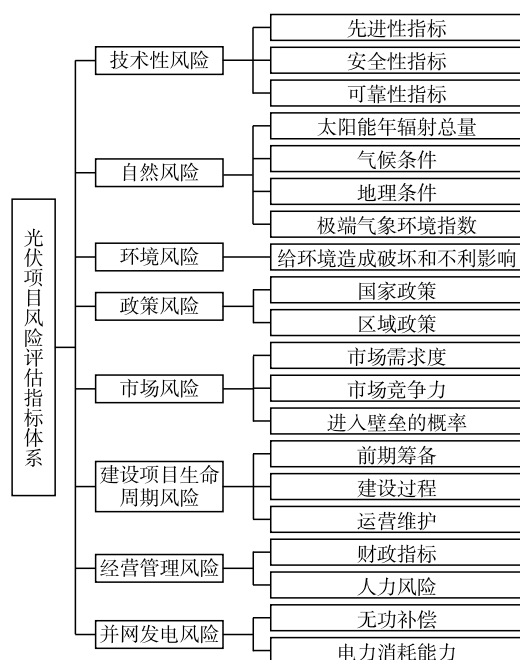


图1 光伏项目风险评估指标体系

### 1.3.7 经营管理风险

光伏发电项目是否成功的最终衡量标准之一,就是财政指标,项目的盈利能力、偿债能力、成长能力均可以反映项目的发展前景。在运营管理中,人力风险则需考虑其组织结构、人力资源管理等指标。

### 1.3.8 并网发电风险

光伏发电项目的功率因数和电压调节能力应满足技术规程的要求,当不能满足时,应选择合理的无功补偿方案,考虑无功功率补偿装置容量、类型、安装位置、逆变器的功率因数、汇集线路等因素。此外,电力消耗能力在光伏并网的过程中也可能带来一定风险,对电网电力平衡、消耗能力进行评估可最大程度的降低并网造成的风险。

## 1.4 风险评估模型

本文建立的评估体系指标信息量丰富,根据其属性特点,拟采用模糊综合评估法(ANP-TOPSIS)对项目进行评估,计算步骤如下:

#### 1) 构建指标矩阵

设有  $m$  个评价方案,  $n$  个评价指标,构造标准化决策矩阵:

$$\mathbf{X} = (x_{ij})_{m \times n} \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n)$$

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{pmatrix} \quad (1)$$

#### 2) 指标矩阵无量纲化

不难发现,评价指标之间由于属性、单位、量级等存在较大的差别,需要按照式(2)对其进行无量纲化处理,得到无量纲化指标矩阵  $\mathbf{P} (p_{ij})_{m \times n}$ 。

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (x_{ij})^2}} \quad (2)$$

#### 3) 指标权重的确定

采用熵权法确定各指标的权重。根据熵的定义,计算第  $j$  项指标的熵值  $e_j$  为

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m f_{ij} \ln f_{ij} \quad (3)$$

其中  $k = \frac{1}{\ln m} > 0$ ,

$$f_{ij} = \frac{w_{ij}}{\sum_{i=1}^m w_{ij}} \quad (4)$$

式中  $f_{ij}$  表示第  $j$  类风险程度下第  $i$  种方案的相对比重,则第  $j$  项指标的熵权为

$$w_j = \frac{g_j}{\sum_{j=1}^n g_j} \quad (5)$$

式中  $g_j = 1 - e_j$  为第  $j$  项指标的差异性系数。

可得指标权重列向量为

$$\mathbf{W} = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T \quad (6)$$

式中  $w_i$  表示指标权重。

#### 4) 指标矩阵加权标准化

将规范化后的指标矩阵与相应的指标权重相乘,求得加权标准化矩阵  $V$  为

$$V = (V_{ij})_{m \times n} = \begin{pmatrix} \omega_1 p_{11} & \omega_2 p_{12} & \cdots & \omega_n p_{1n} \\ \omega_1 p_{21} & \omega_2 p_{22} & \cdots & \omega_n p_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \omega_1 p_{m1} & \omega_2 p_{m2} & \cdots & \omega_n p_{mn} \end{pmatrix} \quad (7)$$

## 1.5 风险表征

本文拟通过确定评价样本的正理想解和负理想解,计算样本与正理想样本和负理想样本的欧氏距离和相对贴适度,来对光伏建筑一体化项目进行量化风险表征排序。

### 1) 确定正理想解与负理想解

分别确定每个指标集(即同一属性的指标)的最大值与最小值,并以正向指标  $j^+$  的最大值与负向指标  $j^-$  的最小值构成正理想解,以正向指标  $j^+$  的最小值与负向指标  $j^-$  的最大值构成负理想解。

$$V_0^+ = (\max_{1 \leq i \leq m} v_{ij} | j \in j^+, \min_{1 \leq i \leq m} v_{ij} | j \in j^-) = (v_1^+, v_2^+, \dots, v_m^+) \quad (8)$$

$$V_0^- = (\min_{1 \leq i \leq m} v_{ij} | j \in j^+, \max_{1 \leq i \leq m} v_{ij} | j \in j^-) = (v_1^-, v_2^-, \dots, v_m^-) \quad (9)$$

### 2) 计算欧氏距离

设样本  $i$  到正理想解和负理想解之间的欧氏距离分别为  $S_i^+$  和  $S_i^-$ , 则可得到:

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2} \quad (10)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad (11)$$

### 3) 计算相对贴适度

相对贴适度反映了待评样本与正理想解或者负理想解在态势变化上的接近程度。方案  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ) 到理想方案的贴适度为

$$\delta_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-} \quad (12)$$

应用式(12)计算每个项目的 TOPSIS 评价值,根据评价值进行排序选优。

## 2 光伏发电项目评估实例

选择中国不同地区,已并网连接的不同规模光伏发电项目作为研究对象,通过现场调研、资料收集、统计分析等方式,总结相关数据,设计问卷。采用专家咨询法,邀请相关领域专家对待评估项目涉及的多个风险单元进行问卷打分。综合打分结果,采用 ANP-TOPSIS 组合的方法,对光伏发电项目进行科学评估。

### 2.1 项目概况

1) 江苏省江阴市某工业园区(北纬  $31.75^\circ$ , 东经  $120.28^\circ$ ), 5 MW 分布式光伏发电项目(项目 1)。江阴属北亚热带季风性湿润气候,年平均气温  $16.7^\circ\text{C}$ , 年降雨量 1 040.7 mm, 四季分明。项目采取太阳能电池板与屋顶表面相结合的形式,建设光电建筑。电池组件方阵由 20 400 块 JT245PLe 多晶硅组件组成,面积约 88 000  $\text{m}^2$ ,采用用户侧并网方式。项目所在地年均日辐射量达 4 979  $\text{MJ}/\text{m}^2$ , 年均日照时数达 2 163 h。年均发电量可达 539 万  $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。项目总投资为 4 271 万元(871 万元自筹, 3 400 万元贷款)。预计年均净利达 223 万元,投资回收期 6.92 a。

2) 新疆南部某县 20 MW 并网光伏电站工程,位于阿克苏地区最西端(北纬  $40.5^\circ$ , 东经  $79.1^\circ$ )

(项目 2)。项目所在地属大陆性暖温带干旱气候,年均降水量为 73.8 mm。采用了集中架设太阳能组件构件太阳能电站的方式,太阳能组件方阵采用了 80 000 块 250 W 多晶硅电池,总面积达到 533 336 m<sup>2</sup>,采用 110 kV 并网方式。项目所在地年均日辐射量为 5 655 MJ/m<sup>2</sup>,年均日照时数达 2 550~3 500 h。年均发电可达 2 514 万 kW·h。项目总投资 19 021 万元,(3 804 万元自筹,15 217 万元为贷款)。预计年均净利润 820 万元,投资回收期 7.16 a。

3)江苏省南通市海安县某高新技术区(北纬 32.5°,东经 120.4°)(项目 3)。年平均气温 14.5℃,年均降水 1 025 mm,该项目采取了建筑立面与太阳能光伏阵列相结合的方式。太阳能组件方阵采用了 JT245PLe 多晶硅组件 40 800 块,总面积达到了 205 000 m<sup>2</sup>,采用用户侧并网方式。项目所在地,年均日辐射量为 5 096 MJ/m<sup>2</sup>,年均日照时数达 2 200 h。年均发电可达 1 123 万 kW·h。项目总投资 8 628 万元(1 828 万元自筹,6 800 万元贷款),项目预计年均净利润 498 万元,投资回收期 6.43 a。

2.2 风险元层次分析评估

根据项目基础指标信息,采用 1.3 建立的风险评估模型对 3 个光伏发电项目进行评估。

通过问询电力行业、产业协会、新能源等多领域专家,共发放问卷 50 份,其中有效问卷 46 份,经过统计分析,对 3 个光伏发电项目各风险元打分,结果见表 1。

表 1 光伏发电项目各风险元打分结果

风险元	技术性	自然	环境	政策	市场	生命周期	经营管理	并网
项目 1	0.4	0.2	0.4	0.6	0.5	0.2	0.5	0.5
项目 2	0.3	0.9	0.5	0.4	0.6	0.5	0.6	0.6
项目 3	0.4	0.3	0.3	0.5	0.4	0.3	0.4	0.5

使用熵权法,式(3)~式(6)计算光伏发电项目各指标的权重,见表 2。

表 2 光伏发电项目各风险元权重

风险元	技术性	自然	环境	政策	市场	生命周期	经营管理	并网
权重	0.139 1	0.122 8	0.121 3	0.205 6	0.100 7	0.100 0	0.110 2	0.100 3

将光伏发电项目各风险指标单元,风险打分结果矩阵标准化,得到矩阵

$$P = \begin{bmatrix} 0.624\ 7 & 0.206\ 3 & 0.565\ 7 & 0.683\ 8 & 0.569\ 8 & 0.324\ 4 & 0.569\ 8 & 0.539\ 2 \\ 0.468\ 5 & 0.923\ 8 & 0.707\ 1 & 0.455\ 8 & 0.683\ 8 & 0.811\ 1 & 0.683\ 8 & 0.647\ 0 \\ 0.624\ 7 & 0.309\ 4 & 0.424\ 3 & 0.569\ 8 & 0.455\ 8 & 0.486\ 7 & 0.455\ 8 & 0.539\ 2 \end{bmatrix}$$

根据式(7),将加权 P 矩阵标准化得到 V 为

$$V = \begin{bmatrix} 0.086\ 9 & 0.025\ 3 & 0.068\ 6 & 0.140\ 6 & 0.057\ 4 & 0.032\ 4 & 0.062\ 8 & 0.054\ 1 \\ 0.065\ 2 & 0.114\ 0 & 0.085\ 8 & 0.093\ 7 & 0.068\ 9 & 0.081\ 1 & 0.075\ 4 & 0.064\ 9 \\ 0.086\ 9 & 0.038\ 0 & 0.051\ 5 & 0.117\ 2 & 0.045\ 9 & 0.048\ 7 & 0.050\ 2 & 0.054\ 1 \end{bmatrix}$$

2.3 风险表征

根据式(8)、式(9)分别确定同属性指标的正理想解及负理想解,见表 3。

表 3 光伏发电项目风险评估属性指标正负理想解

风险元	技术性	自然	环境	政策	市场	生命周期	经营管理	并网
正理想解	0.086 9	0.114 0	0.085 8	0.140 6	0.068 9	0.081 1	0.075 4	0.064 9
负理想解	0.065 2	0.025 3	0.051 5	0.093 7	0.045 9	0.032 4	0.050 2	0.054 1

采用式(10)、式(11)计算正、负理想解的欧氏距离,结果见表 4。

在求解正、负理想解的欧氏距离的基础上,根据式(12)计算其相对贴近度。最终实现对 3 个光伏建筑一体化项目的风险排序。

由表 5 不难看出,3 个项目的相对贴近度值由高到低依次是 2,1,3。一般来说,相对贴近度值越大,说明评价方案越接近方案的最优解。但是,在本文中,TOPSIS-熵权-ANP 组合评价方法被用来分析的是光伏发电项目的风险大小。因而,其相对贴近度越小说明该方案的风险越小,而相对贴近度越大则说明该项目风险越大。在所列举的 3 个项目中,由表 5 可以看出,项目 2 的相对贴近度最大,因此认为项目 2 的光伏发电项目风险最大;而项目 3 的相对贴近度最小,那么可以认为项目 3 的光伏发电项目风险最小。

图 2 是对 3 个光伏建筑一体化项目各属性进行综合评价的雷达图。从图中可以看出:①项目 1 相比于项目 2 和项目 3 的自然风险十分突出。主要是因为其恶劣的自然环境。②项目 1 的生命周期风险远高于项目 2 和项目 3。③3 个项目的政策风险都十分突出,说明中国的光伏发电项目目前还十分依赖政府的政策扶持。

3 需要说明的问题

本研究采用综合法对光伏发电项目进行风险评估,但剖析其评估方法及过程尚存在一定的不确定性。在评估指标体系的建立过程中,课题组本次采用了现场调研、资料收集、专家咨询等多种技术,然而只有充分考虑光伏发电项目涉及的多种风险因素,换言之参与评估的指标越全面,评估的结果越真实、准确。课题组将在以后的研究中,通过多次专家论证确保评估指标的完整性、科学性。

通过专家打分的形式对风险单元各项评估指标进行打分设计权重,在进行问卷咨询打分的过程中,课题组采用德尔菲法(Delphi Method),以函件的方式分别向专家组进行征询,而专家组成员又以匿名函件的形式提交意见。经反复征询和反馈,专家组成员的意见逐步趋于集中,最后获得具有很高准确率的集体判断结果,在一定程度上降低了主观性影响。

采用 ANP-TOPSIS 的综合方法对光伏发电项目进行了评估,但光伏发电项目其模式、形式多样,如空间电站、地面电站、光伏建筑一体化等,在评估模型的建立过程中除了考虑指标和评估方法本身之外,在后期的研究中,应充分考虑评价载体本身特点,建立具有针对性的评估模型,可更加利于光伏产业的发展。

4 结 论

采用 ANP-TOPSIS 组合的综合方法建立光伏发电项目的风险评估模型,减少权重分析误差的同时,提高了计算精度。从光伏发电项目建设、实施、运营维护的整个过程出发,结合风险管控理论,整体考虑,提出了技术性、自然、环境、政策、市场风险、生命周期、经营管理以及并网等 8 个风险单元,基于不

表 4 评估属性指标欧式距离

项目	正理想解欧式距离	负理想解欧式距离
1	0.104 61	0.057 04
2	0.051 68	0.112 68
3	0.099 15	0.038 08

表 5 光伏发电项目的风险评价结果

项目	1	2	3
相对贴近度	0.352 86	0.685 57	0.277 49

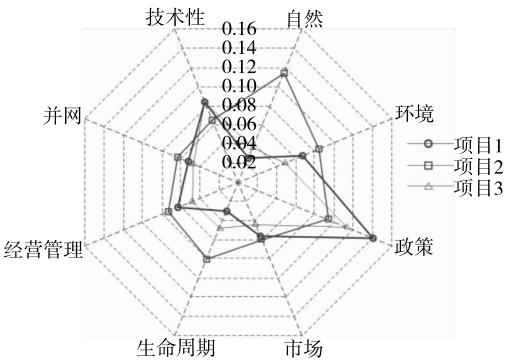


图 2 光伏建筑一体化项目综合评价雷达图

同评估指标的属性特点,采用综合方法进行风险评估。应用实例表明,课题组本次提出的光伏发电项目风险评估方法可较好地反映项目各种属性和建设效果,为光伏发电项目的科学规划、产业发展及推广应用提供参考。

## 参考文献:

- [1] YU J. Solar photovoltaic power generation existing problems and promotion measures[J]. *New Energy Technology Project*, 2010, 17(1): 42-44.
- [2] 李彦斌, 于心怡, 王致杰. 采用灰色关联度与 TOPSIS 法的光伏发电项目风险评价研究[J]. *电网技术*, 2013, 37(6): 1519-1519.
- [3] ZHANG L, WANG J, WEN H, et al. Operating performance, industry agglomeration and its spatial characteristics of Chinese photovoltaic industry[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2016, 65: 373-386.
- [4] 杨琳, 谭亮, 刘洋. 基于模糊综合评价法的光伏发电项目风险评价研究[J]. *电力学报*, 2014, 29(5): 427-430.
- [5] CHIU Y, KE T Y, ZHOU Z S, et al. A performance evaluation of the cross-strait solar photovoltaic industry[J]. *Journal of Renewable & Sustainable Energy*, 2014, 6(1): 1078-1092.
- [6] 何宁波. 基于层次分析法与物元可拓的分布式光伏发电项目风险评价研究[J]. *山西电力*, 2017(2): 9-13.
- [7] 张宁. 太阳能光伏发电项目风险管理研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
- [8] 孙强, 张义斌, 韩冬, 等. 多因素、多维度的智能电网风险评估[J]. *电网技术*, 2012, 36(9): 51-59.
- [9] 孙强, 葛旭波, 刘林, 等. 智能电网多属性网络层次组合评价法及其应用研究[J]. *电网技术*, 2012, 36(10): 49-54.
- [10] GRADY C A, HE X, PEETA S. Integrating social network analysis with analytic network process for international development project selection[J]. *Expert Systems with Applications*, 2015, 42(12): 5128-5138.
- [11] HE Q, LUO L, HU Y, et al. Measuring the complexity of mega construction projects in China—a fuzzy analytic network process analysis[J]. *International Journal of Project Management*, 2015, 33(3): 549-563.
- [12] 柏青. 基于层次分析法的高速公路项目风险及不确定性研究[J]. *项目管理技术*, 2015, 13(2): 62-66.
- [13] HWANG C L, YOON K S. Multiple attribute decision making[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1981.
- [14] 刘亮, 何建新, 高强. 基于熵权的 TOPSIS 模型在城市供水方案优选中的应用[J]. *水资源与水工程学报*, 2010, 21(3): 63-65.
- [15] MANDIC K, DELIBASIC B, KNEZEVIC S, et al. Analysis of the financial parameters of Serbian banks through the application of the fuzzy AHP and TOPSIS methods[J]. *Economic Modelling*, 2014, 43: 30-37.
- [16] 王丰. AHP-熵权综合评价模型在火力发电厂总图运输方案评价中的应用[J]. *能源研究与管理*, 2016(4): 31-33.

(责任编辑:李艳)