

基于主客观赋权的电力市场风险综合评价研究

张志翔¹, 蒋龙¹, 严旭¹, 旷世芳², 陆展辉^{2,✉}

(1. 南方电网广州电力交易中心有限责任公司, 广东 广州 510530;

2. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510663)

摘要: [目的] 随着国家对于电力市场体系建设的强调和推进, 我国电力市场朝着更深入更统一的方向不断发展, 为了促进电力市场建设, 关于电力市场风险影响因素及其评价仍有待进一步研究。[方法] 在考虑电力市场交易全周期的基础上, 以事前风险、事中风险和事后风险为切入点, 整合电力市场各阶段存在的风险, 并建立电力市场风险评价指标体系。基于主客观赋权的思想, 分别采用层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 和熵权法对指标体系进行赋权, 采用模糊综合评价 (Fuzzy Comprehensive Evaluation, FCE) 对电力市场综合风险水平进行评价。[结果] 通过不同电力市场的算例结果分析, 证实了文章中所提模型的合理性、全面性和有效性。[结论] 文章中所构建模型可对市场进行风险综合评价, 为电力市场风险体系建设及未来发展方向提供理论参考。

关键词: 电力市场; 风险评估; 层次分析法; 熵权法; 模糊综合评价

中图分类号: TM7; F206

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2023)06-0160-10

开放科学(资源服务)二维码:



Research on Comprehensive Evaluation of Electricity Market Risk Based on Subjective and Objective Weighting

ZHANG Zhixiang¹, JIANG Long¹, YAN Xu¹, KUANG Shifang², LU Zhanhui^{2,✉}

(1. Guangzhou Power Exchange Center Co., Ltd., Guangzhou 510530, Guangdong, China;

2. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong, China)

Abstract: [Introduction] With the emphasis and promotion of the electricity market system construction by the government, the electricity market is constantly growing towards a deeper and more unified direction. In order to promote the electricity market construction, the influence factors of the electricity market risk and its evaluation remain to be studied further. [Method] Based on the consideration of the whole cycle of electricity market trading, this paper took pre-trade risk, during-trade risk, and post-trade risk as the entry points, integrated the existing risks in each stage of electricity market, and established the risk evaluation index system for electricity market. Based on the thought of subjective and objective weighting, analytic hierarchy process (AHP) and entropy weight method were used to assign weights to the index system respectively, and fuzzy comprehensive evaluation (FCE) was adopted to evaluate the comprehensive risk level of the electricity market. [Result] The rationality, comprehensiveness and validity of the proposed model are verified through the analysis of the calculation examples of different electricity markets. [Conclusion] The model established in this paper can conduct a comprehensive risk evaluation for the electricity market, and provide a theoretical reference for the construction of the risk system of the electricity market and its future development direction.

Key words: electricity market; risk assessment; analytic hierarchy process; entropy weight method; fuzzy comprehensive evaluation

2095-8676 © 2023 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

自 2015 年发布《中共中央、国务院关于进一步深化电力体制改革的若干意见》^[1] 以来, 我国电力市

场改革实现了较大的进步^[2-3], 但仍还存在部分问题^[4]。2022 年通过了《关于加快建设全国统一电力市场体系的指导意见》^[5], 要求健全多层次统一电力市场体系, 推动形成多元竞争的电力市场格局。我国电力

收稿日期: 2022-11-30 修回日期: 2023-01-18

基金项目: 国家社会科学基金重大项目(19ZDA081); 广东省基础与应用基础研究基金(2021A1515110295)

市场持续推进,并朝着更深入更多元更统一的方向发展。和其他市场发展的历程相同,在电力市场发展过程中也存在较多影响因素^[6],例如市场机制、市场成员行为、外部环境等,这些交易中存在的风险因素可能会为电力市场正常稳定开展带来挑战。与此同时,对电力市场的风险影响因素进行研究,还可以进一步为电力市场发展提供参考建议,有利于电力市场向更大范围更深层次建设推进。

在电力市场风险因素辨析方面,文献[7]以售电侧放开为背景,从发电、售电和用户三个角度研究了市场主体在电力市场中面临的风险。文献[8]则是以新能源接入为切入点,在电力运营方面从电能质量、电能调峰、电网安全控制和电网运行共4方面建立了指标体系。文献[9]则是从电力市场结构、成员行为、效率和运行对电力市场的风险因素进行了分析。在风险因素评估方面,文献[10]采用区间数和综合权重方法,研究了发电企业和用户相互互动的评价模型。文献[11]使用AHP对售电公司购售电风险进行了评价。文献[12]基于AHP和FCE对电网发展水平进行评估。文献[13]建立电力监控网络安全层次结构模型,将其分为目标层、准则层以及方案层,计算电力监控网络安全风险因素指标权重,重新分配安全风险因素权重系数,基于改进AHP算法度量电力监控网络整体风险值。文献[14]针对浙江电力现货市场结算试运行方案及试运行情况,采用基于极差最大化AHP-CRITIC组合赋权法对各项监测指标进行组合赋权和案例分析。国外有关风险因素评估方面的文献也多采用AHP^[15-17]、FCE^[18-19]等。

综合上述国内外的研究,电力市场风险因素尚未有考虑电力市场交易全周期的指标评价体系,可能会造成电力市场各个环节间部分风险因素的遗失。同时AHP和FCE较为主观,可能会造成最终结果上的偏差。基于此,文章首先从事前、事中、事后风险指标3个方面作为切入点,分别辨识分析了电力市场在各个阶段可能存在的风险因素,并建立电力市场风险评价指标体系。在此基础上,采用主观与客观结合的双重赋权法确定指标体系权重,先采用AHP确定阶段层和要素层指标的权重,再采用熵权法确定决策层指标的权重,最后通过FCE对电力市场的综合风险评分,使得模型更具全面性和有效性。

1 电力市场风险评估指标

1.1 事前风险指标

1.1.1 规则风险

1) 市场耦合度

市场耦合将在电力上存在联系的不同地区作为一个整体参与电力市场出清。目前在市场耦合方面发展成熟的有欧盟日前市场,其基本原理为各个地区市场成员分别提交市场报价,将跨境传输通道的可用传输容量作为约束条件进行统一优化出清,以此来得到各市场成交电量和电价。采用这种出清方法会出现2种结果:(1)输电通道未发生阻塞,此时输电通道连接的市场成交价格相同,电能资源能够跨区跨域实现优化配置;(2)输电通道发生阻塞,此时市场间的电价存在差异,整个耦合市场分割形成多个价区。

市场耦合程度越高,其输电通道容量越不容易出现阻塞现象,地区间电力流动更符合优化结果;反之,当地区间市场耦合程度较小时,会更容易出现阻塞和出清价格不一致的现象。因此本文选取市场耦合区域内各区域出清电价相同时刻所占比例来表述市场耦合情况好坏,以价格耦合程度来表征市场耦合程度大小。

2) 机制完善程度

电力市场机制设置不完善在较大程度上会对市场平稳运行带来危害。2020年山东进行了为期4天的现货市场连续结算试运行,由于未考虑市场中发用电不对等的情况,原先机制中的容量补偿机制不合理,引起了对市场化机组的过补偿,因此造成山东市场结算中出现了大量的不平衡资金。

由此可见,机制完善程度对于电力市场风险影响较大。本文从中长期市场与现货市场的衔接,现货市场中日前市场、日内市场和实时市场的衔接,辅助服务市场与电能市场的衔接,发电侧与用电侧的价格机制和结算机制,市场偏差处理机制等方面衡量市场机制的完善程度。

1.1.2 结构风险

1) 供需合理度

市场化发、用电电量规模是影响电力市场风险的一个重要因素,也是2020年山东试运行失败的另一个原因。当发电侧申报量小于用电侧申报量时,

为了满足用电需求,需要从非市场化机组中购买电量,这部分电量分别按照标杆电价和市场电价结算,由此产生大量不平衡资金。也正因供需不平衡时,势必会有部分非市场发电或用电产生,因此采用供需比来衡量电力市场供需合理度,量化这一风险指标。供需比即为市场化发电电量规模和市场化用电量规模的比例。

2) 市场集中风险

赫芬达尔-赫希曼指数通过市场内成员收益占行业收益或资产的占比,来判断市场中成员的离散程度。数值越大时,该成员在市场中的垄断程度越高,对市场的影响也较大。除了计算某成员的市场占有情况外,还可以通过此指数来反映整个市场的成员结构,进而可以对整个电力市场结构进行判断。

$$I_{HHI} = \sum_{i=1}^N S_i^2 \times 10\,000 \quad (1)$$

式中:

S_i ——电力市场第 i 个发电企业占有的市场比例;

N ——市场中的发电企业数量。

1.1.3 环境风险

1) 极端自然灾害

自然条件下可能会出现一些极端天气,极端天气的发生会较大程度影响电力市场的稳定运行。极端天气可能会增加发、输、用各个环节的风险,例如极寒极热天气会引起用电负荷猛增、形成通道阻塞,冰冻或台风天气有一定概率引起线路损坏等现象。本文采用极端自然灾害发生概率来衡量这一风险。

2) 煤炭价格

火电机组在参与电力市场的发电机组中占据了较大份额,而煤炭价格与火电机组发电成本息息相关,煤炭价格高低直接关系到发电机组参与电力市场的申报价格,甚至进而关系到整个电网运行稳定。2021年东北出现的拉闸限电,其主要原因就是煤炭紧缺、煤炭价格高和煤电价格倒挂。基于此,本文采用煤炭价格在其价格分布情况中所处的位置,来量化煤炭价格对电力市场带来的影响。不难看出,当煤炭价格处于高位时,整个电力市场风险大幅增加。

1.2 事中风险指标

1.2.1 市场力行为风险

1) 机组串谋风险

电力市场中可能会有机组串谋以谋取更大利益的现象出现,为了更好辨别和量化这种风险,采用报价曲线差异度来对此进行衡量。由于串谋的机组通常报价曲线重合度较高,因此通过报价曲线间的差值即可判别其报价差别情况,差值越小,则串谋的可能性越高。具体可表示为如下:

$$\rho_{ij} = \int_0^1 |p_i^* - p_j^*| \cdot dQ^* \quad (2)$$

式中:

p_i^* 、 p_j^* ——机组 i 、机组 j 申报曲线的申报电价标么值;

Q^* ——机组申报曲线中申报容量标么值。

当市场中报价曲线差异度小于一定数值时,则认为存在串谋风险,此处定义机组串谋风险为串谋机组与总体参加市场的机组占比。

2) 容量供给风险

在市场出清过程中,可能会存在机组通过市场力操纵市场价格的情况,本文采用投标供给指数来衡量市场主体是否存在这一风险。

$$\rho_j^{\text{RSI}} = \frac{S_0 - S_j}{D_0} \quad (3)$$

式中:

ρ_j^{RSI} ——市场主体 j 的剩余供给指数;

S_0 ——所有准入市场主体的总发电容量;

S_j ——市场主体 j 所有准入机组的发电容量;

D_0 ——目标交易时段的交易总需求。

当投标供给指数小于一定数值时,可认为市场主体的投标供给指数超标,存在风险。因此定义投标供给存在风险的机组的占比来表示电力市场容量供给风险。

1.2.2 运营管理风险

1) 应急管理响应

当下我国电力市场仍处于初步建设阶段,市场机制仍未健全,市场体系还有待完善,因此难免会出现异常情况。电力供应关乎民生问题,若不能对异常情况采取快速科学的应急管理响应,不仅会影响电力市场的健康发展,还会影响电网的安全运行。

本文将电力市场运行异常情况分为电力供应异常、电网异常、市场主体行为异常、平台异常、出清结果异常、出清价格异常、边界条件异常等,结合电力市场机制中对异常情况的处理方法和对实际发生

的异常情况的响应速度及处理情况对电力市场应急管理响应进行评估。

2) 技术支持系统运行风险

技术支持系统一方面应保障电力市场运营所需的交易安全、数据安全和网络安全, 并具备可维护性, 适应电力市场逐步发展完善的需要; 另一方面, 平台运行的流畅度与系统大数据处理速度的快慢则会关系到市场申报、出清的顺利进行与否。

因此, 本文从2个方面衡量技术支持系统的运行风险: (1) 技术支持系统是否符合国家有关技术标准、行业标准和有关的国际标准; (2) 采用技术支持系统响应速度和市场信息公布时间来衡量技术支持系统运行风险。

1.3 事后风险指标

1.3.1 市场绩效风险

1) 价格异常风险

电力市场出清后, 可能会出现电价异常的情况, 这反映了市场对于此类风险的防范能力较低。本文通过市场电价异常率来表征这一风险, 即认为当某一时刻出清电价偏离近一个月同一时段加权平均值超过50%时为电价异常。

2) 市场活跃性

一个成熟的市场一般都是一个交易活跃的市场, 成员的参与度高低影响着市场能不能进行良好的流动, 一个活跃性较低的市场往往潜藏着风险。因此本文在事后阶段还考虑了市场活跃性, 采用成员在市场中的活跃程度来表征这一指标, 以市场交易量占总交易量比例来衡量市场活跃性。

1.3.2 市场运行风险

1) 发电机组亏损风险

在电力市场运行中, 由于煤价、天气等因素存在, 发电机组可能会存在亏损。而如果在电力市场中, 发电机组持续存在亏损情况, 则这样的电力市场势必较难持续运行下去。因此采用发电机组亏损风险来对这种现象进行衡量。由于新能源发电机组可成本几乎为零, 因此假设新能源机组无亏损风险, 而对于火电机组, 将火电机组的发电成本与市场平均电价对比, 发电成本高于市场平均电价的机组视为亏损, 用市场亏损机组数量与全部参与市场机组数量之比表示亏损风险。

2) 不平衡资金风险

不平衡资金的设立是为了妥善平衡电力市场供需双方电量和电价间的不匹配关系。而当市场出现较大的电能供需不平衡或电价机制不合理时, 则会导致巨大的不平衡资金出现, 进而直接威胁到电力市场稳定运行。因此本文采用不平衡资金风险来表征这一风险。不平衡资金风险以当日/当月不平衡资金金额占当日/当月市场交易金额的百分比表示。

1.4 电力市场风险评价指标体系

综合上述电力市场指标分析, 以事前、事中、事后风险指标为一级指标(阶段层指标); 规则风险、结构风险等7个指标为二级指标(要素层指标); 市场耦合度、机制完善程度等14个指标为三级指标(决策层指标), 可建立电力市场风险评价指标体系如图1所示。

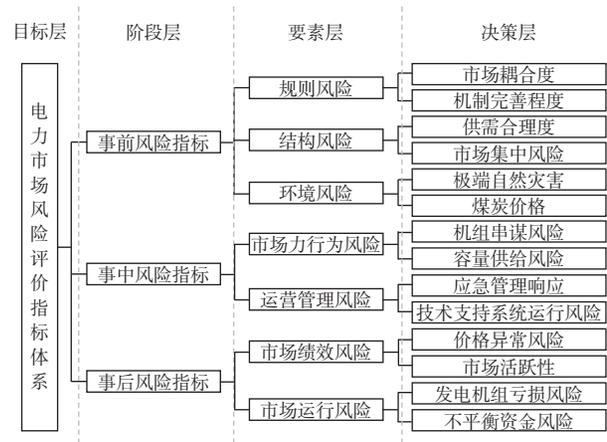


图1 电力市场风险评价指标体系

Fig. 1 Electricity market risk evaluation index system

2 基于AHP-熵权法-FCE的风险评价模型

2.1 基于AHP-熵权法-FCE的电力市场风险评价模型步骤

由于电力市场风险评价指标体系中既有机制完善程度等主观定性指标, 又有市场集中风险等客观定量指标。为充分体现评价需要考虑主观与客观、定性与定量等方面对电力市场风险的影响, 本文选择AHP-熵权法的主客观赋权来反映指标对电力市场风险带来的影响, 并在此基础上, 将结果作为已知的起算条件采用FCE隶属度理论对电力市场综合风险进行定量评估。具体步骤为:

1) 分层建立各级评价指标: $U = \{U_1, U_2, U_3, \dots, U_n\}$, 其中 U_a , $a = 1, 2, \dots, n$ 是一级指标的第 a 个指标;

$U_a = \{U_{a1}, U_{a2}, \dots, U_{am}\}$, 其中 U_{ab} , $b = 1, 2, \dots, m$ 是 U_a 第 b 个指标。

2) 标准化指标: 将各个不同量纲和度量标准的指标标准化。对正向与负向指标进行区别, 将所有风险指标转化到仅包含一种类型指标, 进行数据的归一化处理。本文所示正向指标表示数值越大越满足目标要求, 反之, 负向指标则表示数值越小越满足目标要求。

3) 基于 AHP 确定阶段层指标和要素层指标主观权重。

4) 基于熵权法确定决策层指标客观权重。

5) 采用 FCE, 根据阶段层、要素层和决策层指标的权重, 最终得到电力市场风险的综合评分。

2.2 AHP 确定指标权重

1) 构建评价矩阵

比较第 i 个元素与第 j 个元素相对于上一层的重要性, 将相对重要程度量化为 c_{ij} , 假设有 n 个元素进行比较, 则形成的比较矩阵为 $B_{n \times n}$ 。评价矩阵的形式如下:

$$B_{n \times n} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_{n1} & c_{n2} & \dots & c_{nn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中: $c_{ji} = 1/c_{ij}$, $c_{ii} = 1$, 将矩阵中 c_{ij} 的取值按照表 1 进行赋值。

表 1 评价指标重要性比较标度

Tab. 1 Comparison scale for the importance of evaluation indexes

标度值	标度意义
1	两者比较, 具有同样重要性
3	两者比较, 前者比后者稍微重要
5	两者比较, 前者比后者明显重要
7	两者比较, 前者比后者强烈重要
9	两者比较, 前者比后者极端重要
2, 4, 6, 8	表示上述相邻判断的中间值

2) 一致性检验

衡量矩阵一致性的指标为 C_1 , 其计算公式如下:

$$C_1 = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (5)$$

式中:

C_1 ——矩阵一致性指标;

λ_{\max} ——矩阵最大特征根;

n ——矩阵的秩。

C_1 数值越小, 意味着判断矩阵越趋向于一致。为计算一致性比率, 此处代入随机一致性指标 R_1 , 其数值与 n 的选取相关, 如表 2 所示。

表 2 随机一致性指标

Tab. 2 Random consistency index

n	1	2	3	4	5	6	7
R_1	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32

则有一致性比率如下所示:

$$C_R = \frac{C_1}{R_1} \quad (6)$$

式中:

C_R ——一致性比率, 当 $C_R < 0.1$ 时, 通过一致性检验;

R_1 ——随机一致性指标。

3) 确定权重

使用几何平均确定权重如式(7)所示:

$$W_B = (w_{b,j}) \quad (7)$$

式中:

$w_{b,i}$ ——第 i 个指标的权重。

$w_{b,i}$ 的计算公式为:

$$w_{b,j} = \frac{\left(\prod_{j=1}^n c_{ij} \right)^{\frac{1}{n}}}{\sum_{i=1}^n \left(\prod_{j=1}^n c_{ij} \right)^{\frac{1}{n}}} \quad (8)$$

2.3 熵权法确定指标权重

1) 指标标准化处理

采用离差法将第 j 个指标中的第 i 个样本数据标准化为 r_{ij} , 其中 $i = 1, 2, 3, \dots, n; j = 1, 2, 3, \dots, m$ 。当指标为负向指标时, 计算公式为:

$$r_{ij} = \frac{x_{\max,j} - x_{i,j}}{x_{\max,j} - x_{\min,j}} \quad (9)$$

当指标为正向指标时, 计算公式为:

$$r_{ij} = \frac{x_{i,j} - x_{\min,j}}{x_{\max,j} - x_{\min,j}} \quad (10)$$

$$x_{\max,j} = \max \{x_{i,j}\}$$

$$x_{\min,j} = \min \{x_{i,j}\}$$

2) 计算特征比重

$$p_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^n r_{ij}} \quad (11)$$

式中:

p_{ij} ——第 j 个指标中第 i 个样本数据的特征比重。

3) 计算各指标信息熵

$$e_j = -k \sum_{i=1}^n p_{ij} \times \ln(p_{ij}) \quad (12)$$

$$k = \frac{1}{\ln(n)} \quad (0 \leq e_j < 1) \quad (13)$$

式中:

e_j ——第 j 个熵值;

k ——公式参数, 无实质意义。

4) 计算各指标权重

$$w_j = \frac{|1 - e_j|}{\sum_{j=1}^m |1 - e_j|} \quad (14)$$

式中:

w_j ——第 j 个指标的权重。

文献 [20] 指出在一定范围内, 熵值的细小差异也将引起熵权的倍数改变。为了避免该情况发生, 此处引用改进熵权法计算权重, 使得评价结果更具有客观性、全局性和整体性。

$$w_j' = \frac{\sum_{k=1}^m e_k + 1 - 2e_j}{\sum_{i=1}^m \left(\sum_{k=1}^m e_k + 1 - 2e_i \right)} \quad (15)$$

式中:

w_j' ——引用改进熵权法计算的第 j 个指标的权重。

5) 生成权重向量 $W_{c,j} = (w_j)$, 且满足 $\sum_{j=1}^m w_j = 1$ 。

2.4 FCE 法风险评估

通过 AHP 和熵权法确定阶段层、要素层和决策层指标的权重后, 再利用 FCE 法可确定各层指标的评分向量, 最终得到电力市场风险的综合评估。

1) 确定因素集

以阶段层的 3 个特性指标作为评判项目, 电力市场风险评估的评判因素集 R 为:

$$R = [R_1, R_2, R_3] \quad (16)$$

式中:

R_x ——对应因素的评判映射。

阶段层的 3 个特性指标均有对应的要素层指标, 要素层指标也有对应的决策层指标。同理, 对 R 中的各评判因素建立要素层和决策层的子因素集。

2) 建立评语集合

将电力市场风险评估分为 5 个级别: 风险非常高、风险较高、风险适中、风险较低、风险非常低, 构成相应的评语集合:

$$V = [v_1, v_2, v_3, v_4, v_5] \quad (17)$$

$$\sum v_j = 1 \quad j = \{1, 2, 3, 4, 5\} \quad (18)$$

式中:

V ——评语集合;

v_j ——该等级 j 发生的概率。

3) 建立评判矩阵

建立评判因素 $R_i, i = 1, 2, 3$ 与评语 $V_j, j = \{1, 2, 3, 4, 5\}$ 之间的映射关系 r_{ij} , 表示评判因素 R_i 发生评语 V_j 的可能性。

$$R = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} & r_{15} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} & r_{25} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} & r_{35} \end{bmatrix} \quad \sum_{j=1}^5 r_{ij} = 1 \quad (19)$$

式中:

r_{ij} —— R_i 对 V_j 的隶属程度, 取值范围为 $[0, 1]$ 。

同理, 可建立相应的要素层和决策层中各元素的评判矩阵。

4) 构造隶属度矩阵

运用半梯形和三角形整合的方式构建评语集的隶属度函数, 如图 2 所示。

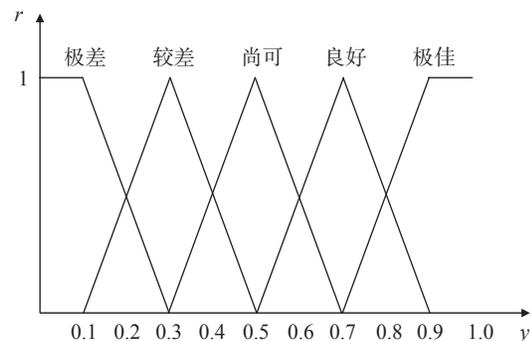


图 2 隶属度函数分布形式图

Fig. 2 Membership function distribution diagram

v_1 选择降半梯形隶属函数, v_2, v_3, v_4 选择三角形隶属函数, v_5 属于升半梯形函数。图中 y 为电力市

场风险评估中指标处理得到的数值。根据图 2, 可得到各指标对 5 个评语的可能性 r_{ij} 。

5) 确定决策层模糊评价矩阵

根据隶属函数和决策层各指标的标准化数值, 可得到决策层模糊评价矩阵 $R_{c,d} = (r_{ij})$ 。

6) 确定要素层模糊评价矩阵

根据决策层模糊评价矩阵 $R_{c,d}$ 和决策层权重 $W_{c,j}$, 确定要素层模糊评价矩阵 $R_{b,c} = (r_{cj})$ 。

7) 确定阶段层模糊评价矩阵

根据要素层模糊评价矩阵 $R_{b,c}$ 和要素层权重 $W_{b,j}$, 确定阶段层模糊评价矩阵 $R_{a,b} = (r_{bj})$ 。

8) 确定目标层模糊评价矩阵

根据阶段层模糊评价矩阵 $R_{a,b}$ 和阶段层权重 $W_{a,j}$, 确定目标层模糊评价矩阵 R_a 。

$$R_a = W_{a,j} \circ R_{a,b} \quad (20)$$

式中:

\circ —— $M(\cdot, \oplus)$ 型模糊算子。

9) 确定目标层、阶段层和要素层模糊评分

利用评判矩阵 V 和要素层模糊评价矩阵 $R_{b,c}$, 确定要素层的模糊评分; 然后利用评判矩阵 V 和阶段层模糊评价矩阵 $R_{a,b}$, 确定阶段层模糊评分; 最后利用评判矩阵 V 和目标层模糊评价矩阵 R_a , 确定目标层模糊评分。

$$G_C = V \times (R_{b,c})^T \quad (21)$$

$$G_B = V \times (R_{a,b})^T \quad (22)$$

$$G_A = V \times (R_a)^T \quad (23)$$

3 算例分析

3.1 参数设置

为了更好地在算例中体现本文所提模型有效性, 本文选取了 3 个已开展电力市场的省份进行算例分析, 令其分别为 A 市、B 市和 C 市。其中: A 市电力市场规则开启较早, 规则机制等都较为完善, 且已有长期试运行经验; B 市相较于 A 市电力市场启动较晚, 规则相较于 A 市来讲略显不完善, 但也有长期试运行经验, 总体运行情况良好; C 市电力市场启动较晚, 整体市场化程度角度, 市场活力还有待释放, 同时规则也还需进一步完善。

基于此设定, 本文邀请电力专家根据 A、B、C

市电力市场运行情况, 对各市电力市场综合风险进行评估。

3.2 指标体系权重确定

根据专家意见和经验对阶段层和要素层指标重要性程度进行比较, 采用 AHP 可得到两层的指标权重结果如表 3~表 4 所示。

表 3 阶段层指标权重

Tab. 3 Index weights in stage layer

阶段层	事前风险	事中风险	事后风险
权重	0.637	0.258	0.105

表 4 要素层指标权重

Tab. 4 Index weights in feature layer

要素层	规则 风险	结构 风险	环境 风险	市场力 风险	运营管理 风险	市场绩效 风险	市场运行 风险
权重	0.644 0	0.271 0	0.085 0	0.800 0	0.200 0	0.166 7	0.833 3

基于熵权法, 分别对 A、B、C 三市的电力市场样本值进行处理, 由于篇幅限制, 此处省略数据标准化过程, 最终不同电力市场评价指标标准化结果如表 5 所示, 其中正向指标有 x_{11} 、 x_{12} 、 x_{21} 、 x_{41} 、 x_{42} 、 x_{51} 、 x_{62} , 负向指标有 x_{22} 、 x_{31} 、 x_{32} 、 x_{52} 、 x_{61} 、 x_{71} 、 x_{72} 。根据表 5 数据, 可计算得到决策层指标权重如表 6 所示。

表 5 不同电力市场评价指标标准化结果

Tab. 5 Standardized results of different electricity market evaluation indexes

指标	x_{11}	x_{12}	x_{21}	x_{22}	x_{31}	x_{32}	x_{41}
A	1	1	0.5	1	0.5	1	1
B	0.7	0.3	0	0.5	1	0.5	0.3
C	0	0	1	0	0	0	0

指标	x_{42}	x_{51}	x_{52}	x_{61}	x_{62}	x_{71}	x_{72}
A	1	1	1	1	1	1	1
B	0.3	0.5	0.3	0.7	0.5	0.5	0.5
C	0	0	0	0	0	0	0

表 6 决策层指标权重

Tab. 6 Index weights in decision layer

指标	x_{11}	x_{12}	x_{21}	x_{22}	x_{31}	x_{32}	x_{41}
权重	0.133	0.867	0.500	0.500	0.500	0.500	0.785

指标	x_{42}	x_{51}	x_{52}	x_{61}	x_{62}	x_{71}	x_{72}
权重	0.215	0.302	0.698	0.738	0.262	0.500	0.500

3.3 评价结果

在确定了电力市场风险指标权重的基础上, 结合各市电力市场综合风险隶属度矩阵, 分别为要素层、阶段层和目标层对三市的电力市场风险进行评估。其中要素层 FCE 结果如图 3 所示。

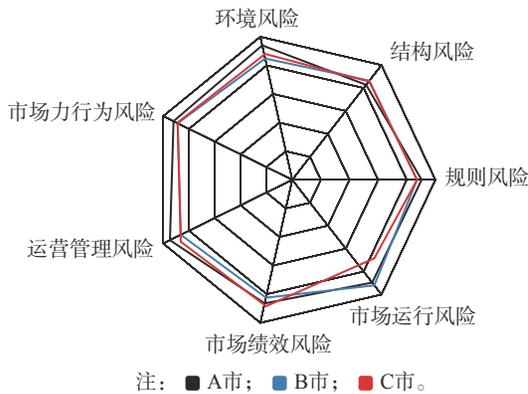


图 3 要素层模糊综合评价结果
Fig. 3 Fuzzy comprehensive evaluation results of the feature layer

由上图可见, A 市得分较为均衡且得分较高, 在规则风险、环境风险、市场力行为风险、市场运行风险 4 个方面均有较大的优势; B 市相较于 A 市得分偏低, 但得分也比较平均, 在结构风险上的得分比较有优势; C 市得分不均衡, 在运营管理风险和 market 绩效风险上得分比较有优势, 而在规则风险和市场运行风险上与另外两市存在较大差距。

阶段层 FCE 结果如图 4 所示, 在 3 个风险指标中, 事前风险指标的均分最高, 事后风险指标的均分最低。同时 A 市的风险得分依旧比 B 市和 C 市更高, 表明在阶段层指标上, A 市综合表现是最好的。B 市的事后风险指标评分相较于 C 市较高, 而 C 市的事前风险指标和事中风险指标更高。

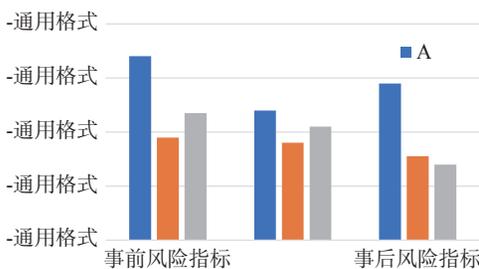


图 4 阶段层模糊综合评价结果
Fig. 4 Stage-level fuzzy comprehensive evaluation results

综合要素层和阶段层 FCE 得分, 可最后计算得到目标层 FCE 结果。由表 7 可见, A 市的电力市场

风险评分最高, 因为其市场规则完善, 且在电力市场运行方面已有较丰富的经验, 所以其电力市场风险相较于其他两市更低。同时由于 C 市整体市场化程度相较于 A 市和 B 市相对滞后, 所以 C 市得分较低, 可以通过完善电力市场机制规则、提高电力市场运行管理水平、优化电力市场环境等方式, 来进一步减小电力市场所面临的

表 7 目标层模糊综合评价结果
Tab. 7 Fuzzy comprehensive evaluation results of target layer

电力市场	A	B	C
电力市场风险评分	0.233	0.215	0.199

4 结论

本文章以电力市场为研究对象, 研究了基于 AHP-熵权法-FCE 的电力市场风险评估, 并最终得到了如下结论:

1) 在考虑电力市场交易全周期的基础上, 分析并辨识电力市场各阶段可能遇到的风险因素, 以事前、事中、事后风险作为一级指标, 建立了电力市场风险评价指标体系, 能够全方位地对电力市场风险进行综合、全面的评估, 具有一定的全面性。

2) 基于主观和客观双重赋权思想, 分别采用 AHP 和熵权法对电力市场风险评价指标体系赋权, 在此基础上, 通过 FCE 对电力市场综合风险水平进行综合评估。通过主客观赋权的思想, 考虑到了个性化的评价需求和去除人为因素影响两个层面, 以及能将定性评价转化为定量评价, 具有结果清晰和系统性强的特点。

3) 通过不同电力市场的算例结果分析, 证实了文章中所提模型的合理性。结果显示电力市场发展程度不同时, 其相对应的电力市场综合风险水平也存在差异。通过算例分析中显示的综合风险评分, 能为电力市场未来发展方向提供理论参考。

参考文献:

[1] 广东省能源局. 中共中央、国务院关于进一步深化电力体制改革的若干意见 [EB/OL]. (2015-03-15) [2023-01-18]. http://drc.gd.gov.cn/snyj/bmgj/content/post_3736970.html.
Guangdong Energy Bureau. Opinions of the CPC Central Committee and The State Council on Further Deepening the Reform of Electric Power System [EB/OL]. (2015-03-15)

- [2023-01-18]. http://drc.gd.gov.cn/snyj/bmgj/content/post_3736970.html.
- [2] 丁一, 谢开, 庞博, 等. 中国特色、全国统一的电力市场关键问题研究(1): 国外市场启示、比对与建议 [J]. *电网技术*, 2020, 44(7): 2401-2410. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2020.0422.
DING Y, XIE K, PANG B, et al. Key issues of national unified electricity market with Chinese characteristics (1): enlightenment, comparison and suggestions from foreign countries [J]. *Power system technology*, 2020, 44(7): 2401-2410. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2020.0422.
- [3] 夏清, 陈启鑫, 谢开, 等. 中国特色、全国统一的电力市场关键问题研究(2): 我国跨区跨省电力交易市场的发展途径、交易品种与政策建议 [J]. *电网技术*, 2020, 44(8): 2801-2808. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2020.0392.
XIA Q, CHEN Q X, XIE K, et al. Key issues of national unified electricity market with Chinese characteristics (2): development path, trading varieties and policy recommendations for inter-regional and inter-provincial electricity markets [J]. *Power system technology*, 2020, 44(8): 2801-2808. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2020.0392.
- [4] 张智刚, 康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望 [J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(8): 2806-2818. DOI: 10.13334/j.0258-8013.psee.220467.
ZHANG Z G, KANG C Q. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(8): 2806-2818. DOI: 10.13334/j.0258-8013.psee.220467.
- [5] 国家发展改革委, 国家能源局. 国家发展改革委 国家能源局关于加快建设全国统一电力市场体系的指导意见 [EB/OL]. (2022-01-18) [2023-01-18]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-01/30/content_5671296.htm.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration. National Development and Reform Commission National Energy Administration on Accelerating the Construction of a National Unified Electricity Market System [EB/OL]. (2022-01-18) [2023-01-18]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-01/30/content_5671296.htm.
- [6] 杜振东, 王佳仁, 何英静, 等. 新电改背景下考虑区域电力市场交易的电力系统风险评估方法 [J]. *智慧电力*, 2019, 47(7): 36-42,75. DOI: 10.3969/j.issn.1673-7598.2019.07.007.
DU Z D, WANG J R, HE Y J, et al. Power system risk assessment method considering different regional power market trading scenarios under the background of new power system reform [J]. *Smart power*, 2019, 47(7): 36-42,75. DOI: 10.3969/j.issn.1673-7598.2019.07.007.
- [7] 唐天琦. 售电侧放开后电力市场交易面临的风险及对策研究 [D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2017. DOI: 10.7666/d.Y3263477.
- TANG T Q. Research on risk and strategy of electricity market transaction after the liberalization of retail side [D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2017. DOI: 10.7666/d.Y3263477.
- [8] 王钊. 智能电网环境下电力运营风险管理模型及信息系统研究 [D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2018.
WANG Y. Research on risk management of electricity operation models and information system in smart grid [D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2018.
- [9] 高政南, 周飞航, 葛根塔娜, 等. 多维电力市场风险综合评价研究 [J]. *电力需求侧管理*, 2021, 23(6): 26-30. DOI: 10.3969/j.issn.1009-1831.2021.06.006.
GAO Z N, ZHOU F H, GEGEN T N, et al. Research on comprehensive evaluation of multi dimensional power market's risks [J]. *Power demand side management*, 2021, 23(6): 26-30. DOI: 10.3969/j.issn.1009-1831.2021.06.006.
- [10] 应昱杭. 供需互动的电力市场信用风险研究 [D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2017.
YING Y H. Research on credit risk of power market under the interaction between supply and demand [D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2017.
- [11] 刘珠慧. 多维度电力市场下售电公司购售电风险防控分析模型 [D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2019.
LIU Z H. Analysis model for risk prevention and control of electricity purchasing and selling for retailers under multi-dimensional electricity market [D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2019.
- [12] 刘万勋, 于琳琳, 张丽华, 等. 基于AHP和多级模糊综合评判的电网发展水平评估 [J]. *智慧电力*, 2020, 48(5): 80-85. DOI: 10.3969/j.issn.1673-7598.2020.05.013.
LIU W X, YU L L, ZHANG L H, et al. Evaluation of power grid development level based on AHP and multi-level fuzzy comprehensive evaluation [J]. *Smart power*, 2020, 48(5): 80-85. DOI: 10.3969/j.issn.1673-7598.2020.05.013.
- [13] 康文倩. 基于改进AHP算法的电力监控网络安全风险评估方法 [J]. *自动化与仪器仪表*, 2022(10): 171-174. DOI: 10.14016/j.cnki.1001-9227.2022.10.171.
KANG W Q. Security risk assessment method of power monitoring network based on improved AHP algorithm [J]. *Automation & instrumentation*, 2022(10): 171-174. DOI: 10.14016/j.cnki.1001-9227.2022.10.171.
- [14] 金骆松, 沈广, 王伟, 等. 基于极差最大化AHP-CRITIC的现货市场监测评估研究 [J]. *华北电力大学学报*, 2022, 49(5): 110-117. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2691.2022.05.13.
JIN L S, SHEN G, WANG W, et al. Spot market monitoring and evaluation based on range maximization AHP-CRITIC [J]. *Journal of North China electric power University*, 2022, 49(5): 110-117. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2691.2022.05.13.

- [15] ZHANG P C, ZHOU S Y, WANG K, et al. Risk assessment of electricity retailers based on improved analytic hierarchy process with trapezoidal fuzzy [C]//Proceedings of 2019 IEEE 8th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference, Chongqing, China, May 24-26, 2019. Chongqing: IEEE, 2019: 1196-1204. DOI: 10.1109/ITAIC.2019.8785636.
- [16] WANG S X, GE L J, CAI S X, et al. Hybrid interval AHP-entropy method for electricity user evaluation in smart electricity utilization [J]. *Journal of modern power systems and clean energy*, 2018, 6(4): 701-711. DOI: 10.1007/s40565-017-0355-3.
- [17] FANG B M, QIU W Q, WANG M C, et al. Evaluation index system of shared energy storage market towards renewable energy accommodation scenario: a China's Qinghai province context [J]. *Global energy interconnection*, 2022, 5(1): 77-95. DOI: 10.1016/j.gloei.2022.04.007.
- [18] BAJAJ M, SINGH A K, ALOWAIDI M, et al. Power quality assessment of distorted distribution networks incorporating renewable distributed generation systems based on the analytic hierarchy process [J]. *IEEE access*, 2020, 8: 145713-145737. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3014288.
- [19] WU Y N, LI L W Y, XU R H, et al. Risk assessment in straw-based power generation public-private partnership projects in China: a fuzzy synthetic evaluation analysis [J]. *Journal of cleaner production*, 2017, 161: 977-990. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.06.008.
- [20] 欧阳森, 石怡理. 改进熵权法及其在电能质量评估中的应用 [J]. *电力系统自动化*, 2013, 37(21): 156-159,164. DOI: 10.7500/AEPS201210206.
- OUYANG S, SHI Y L. A new improved entropy method and its application in power quality evaluation [J]. *Automation of electric power systems*, 2013, 37(21): 156-159,164. DOI: 10.7500/AEPS201210206.

作者简介:



张志翔

张志翔(第一作者)
1979-,男,工程师,硕士,主要研究方向为电力市场研究与运营工作(e-mail) zhangzxl@csg.cn。

蒋龙

1987-,男,企业二级法律顾问,硕士,主要研究方向为电力市场风险防控工作(e-mail) jianglong@csg.cn。

严旭

1989-,男,工程师,硕士,主要研究方向为绿色电力交易工作(e-mail) yanxu@csg.cn。

旷世芳

1989-,女,高级经济师,博士,主要研究方向为工程经济研究分析及咨询工作(e-mail) kuangshifang@gedi.com.cn。

陆展辉(通信作者)

1995-,男,工程师,硕士,主要研究方向为电力市场工作(e-mail) luzhanhui@gedi.com.cn。

项目简介:

项目名称 “适应新形势下监管要求的南方区域电力市场运营应急管理机制研究”

承担单位 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司

项目概述 近年来,南方区域电力市场建设取得显著进展,市场机制不断完善,市场规模不断扩大。伴随而来的市场风险也需要引起关注。为满足国家的政策要求和监管要求,适应电力市场发展的新情况和新变化,满足市场发展和建设完善的需求。项目具有强化电力市场风险防控,推动南方区域电力市场持续健康发展的重要意义。

用风险管理的理论和方法,借鉴国内外相关领域和行业在风险识别和防控方面好的做法,结合南方区域电力市场实际情况,系统梳理电力市场可能存在的各类市场风险,明确各类风险的内涵、表现形式和存在场景,并对识别出的风险制定针对性风险防控措施,通过修订规则、优化系统、出台制度、现场检查等方式强化风险防控,不断提升交易机构的风险管理能力,推动南方区域电力市场持续健康发展。

主要创新点 (1)将部分风险防控措施通过系统方式进行固化。随着南方区域统一电力交易平台的推进,本项目将风险防控相关措施嵌入统一平台,减少了人为原因导致风险防控不到位的情况,确保防控措施可落地可闭环;(2)建立了电力市场风险防控效果评估机制。专题研究建立电力市场风险防控效果评估机制,通过年度防控工作管理指引及时发现问题并改进提升。

(编辑 赵琪)