

平原及低矮丘陵地区风电项目风险管理研究

徐 晶^{1,2}, 李军祥^{1,3*}, 王 昕¹

¹上海理工大学管理学院, 上海

²华能济南黄台发电有限公司, 山东 济南

³上海理工大学智慧应急管理学院, 上海

收稿日期: 2024年12月24日; 录用日期: 2025年1月17日; 发布日期: 2025年1月24日

摘 要

随着可持续发展的不断推进, 风力发电成为我国发电领域的主流方式之一。结合实际情况, 利用定性、定量结合的方法从风险识别、风险评价、风险应对三方面相关问题进行着手, 对平原及低矮丘陵地区风力发电项目的风险影响因素进行了分析研究。通过文献分析法、SWOT分析法、专家访谈法确定了风险因素清单, 在确定风险清单后, 通过层次分析法确定了二级风险因素的权重, 利用模糊综合评价法确认一级风险因素等级, 并对平原及低矮丘陵地区此类项目整体风险等级进行评定。最终得出此类风电项目风险评估的结果。最后分析得出各风险应对策略, 为平原及低矮丘陵地区风电项目建设管理工作提供有效的实践指导意义。

关键词

风力发电, 风险评价, 风险管理

Research on Risk Management of Wind Power Projects in Plains and Low Hilly Areas

Jing Xu^{1,2}, Junxiang Li^{1,3*}, Xin Wang¹

¹Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

²Huaneng Huangtai Power Station, Jinan Shandong

³School of Intelligent Emergency Management, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Dec. 24th, 2024; accepted: Jan. 17th, 2025; published: Jan. 24th, 2025

Abstract

With the continuous advancement of sustainable development, wind power has become one of the

*通讯作者。

文章引用: 徐晶, 李军祥, 王昕. 平原及低矮丘陵地区风电项目风险管理研究[J]. 建模与仿真, 2025, 14(1): 1031-1037.
DOI: 10.12677/mos.2025.141093

mainstream methods in China's power generation field. Combining actual conditions, a qualitative and quantitative approach was used to analyze and study the risk impact factors of wind power projects in plain and low hill areas from the aspects of risk identification, risk evaluation, and risk response. Through literature analysis, SWOT analysis, and expert interviews, a list of risk factors was determined. After establishing the risk list, the weights of secondary risk factors were determined using the Analytic Hierarchy Process (AHP), and the grades of primary risk factors were confirmed using the Fuzzy Comprehensive Evaluation method. The overall risk level of such wind power projects in plain and low hill areas was assessed. The results of the risk assessment of these wind power projects were ultimately obtained. Finally, risk response strategies were analyzed to provide effective practical guidance for the construction management of wind power projects in plain and low hill areas.

Keywords

Wind Power Generation, Risk Assessment, Risk Management

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在全球推动低碳经济与能源革命的背景下,发展利用可再生能源,已成为各国普遍共识,风力发电作为世界上商业化程度最高的可再生能源之一,已在全球范围内实现大规模的开发应用,风电已成为新增电力供应的重要部分[1]。根据国际能源署(IEA)发布的《2024 年可再生能源报告》,预计到 2030 年,全球可再生能源装机容量将激增,其中风电的扩张速度将比 2017 年至 2023 年期间的速度翻一番。然而在产业发展的过程中,也存在诸多安全风险隐患,近年来风电倒塔、起火、叶片断裂、生产与运维事故频发国内相关研究文献表明多数风电项目在处理风险时大都采取“救火式”的处理方法,即问题来了才想解决的办法,本文通过“风险识别-风险评价-风险控制”对平原及低矮丘陵地区风电项目开展风险管理研究,对相关领域文献梳理总结归纳,分析目前存在的问题与不足,对于国内较少研究的平原及低矮丘陵地区的风电项目风险管理进行了系统的分析和优化,得出有效的风险管控“提前式”应对策略,以便提高此类风电项目的风险管理水平,为项目建设管理工作提供有效的实践指导意义。

2. 风险识别过程

本文风险识别的过程首先是明确分析对象,收集相关文献资料,其次通过 SWOT 分析扩大风险识别范围,确定风险因素初始清单。最后利用专家访谈法征集专家意见,完善最终的风险识别,获得本项目风险清单。

2.1. 文献分析的初步风险清单拟定

本文通过在知网及万方查阅大量文献,搜索“风力发电”、“风电”、“风险因素”、“风险管理”、“风险评估”等关键字,发现国内外文献对多种因素开展了风险评估。例如,曾琦等人在分析这些气象灾害对风电场各分区单位的影响的同时,总结出能对风电场产生影响的气象灾害类型,其中包括风电机组、集电线路、升压站、建筑、道路等设施设备,并对风电场的经营活动造成危害的程度和类型进行了分析[2]。张博等人提出一种山区风力发电机组的雷击风险评估方法,通过自洽式先导发展模型进行分析、计算得到风力发电机年均遭受雷击次数来表征风机的雷击风险,结果表明,风机雷击截收区域随风机所

处地形高度和地面倾角的增加而增加[3]。田帅将风险投资及风险管理理论引入新能源项目建设实践，识别出新能源项目在市场、技术、运营、政策环境和经济效益 5 个方面的风险[4]。Gupta 等开发了一个无风险的可再生能源发电能力，以解决风能和太阳能的随机性和可靠性挑战。通过市场驱动的动态设计和定价，使可再生能源发电者能够在日前电力市场中竞争性投标，并评估了该无风险部分在美国不同地理位置的风能和太阳能资源中的表现[5]。胡广文等提出中国需从系统视角慎重把握碳中和目标实现过程中的风险，从政策引领、监测核算、科技人才、创新环境、国际合作等多方面共同发力和协同推进，深入实施低碳技术领跑者政策、加强碳排放核算与碳减排风险评估、积极培育壮大低碳技术研发力量、营造有利于低碳创新的社会环境[6]。

本文在以上文献基础上，通过梳理多种风险因素，将风险等级主要分为两个等级，一级风险大致可以分为技术风险、环境风险、政策风险、经营管理风险、经济风险五大类，再对这五大类风险进一步细化获得更为具体的二级风险清单。

2.2. 基于 SWOT 分析进一步完善风险清单

利用上文的文献分析法阅读大量相关文献，收集整理风电项目相关内容及知识，接下来进行 SWOT 分析，对平原及低矮丘陵地区风电项目的优势、劣势、机会、威胁多方面整合总结，得到如表 1 所示的 SWOT 分析表。

Table 1. SWOT analysis table
表 1. SWOT 分析表

优势 S	劣势 W
① 优质的清洁能源。	① 施工破坏。
② 年可发电小时数高。	② 跳闸风险。
③ 当地政府积极支持。	③ 政策补贴风险。
④ 选址满足要求和相关规定。	④ 限电风险。
⑤ 技术方案合理。	⑤ 初始投资较高。
机会 O	威胁 T
① 能源结构转型。	① 利用率下降。
② 技术创新。	② 电力安全稳定遭到挑战。
③ 全球能源需求增长。	③ 极端天气增多。
④ 分散式风电得到推广。	④ 市场竞争加剧。

2.3. 基于访谈法明确风险清单

随后通过与来自行业各方的专家的深入访谈交流，得到了更为贴合实际的风险因素信息，并据此对风险因素清单进行了详尽的补充和细化，并在不合理之处予以修改，以确保风险评估的全面性和准确性，明确了最终风险因素清单，如表 2 所示。

Table 2. Final risk factors list
表 2. 最终风险因素清单

一级风险因素	二级风险因素
技术风险	电气火灾风险
	高处坠落风险
	振动超标风险

续表

环境风险	雷击风险
	跳闸风险
	叶片覆冰风险
	自然灾害风险
政策风险	气候恶劣风险
	社会环境风险
	补贴电价风险
经营管理风险	调峰限电风险
	工期控制风险
	人力资源管理风险
	安全管理风险
经济风险	财务管理风险
	贷款资金风险
	汇率变动风险
	上网电价风险

3. 风险评价过程

本文风险评价的过程首先是通过分发调查问卷给各个专家评估不同程度的风险，量化风险评估。其次通过层次分析法建立平原及低矮丘陵地区项目风险层次结构，采用特征向量法计算判断矩阵最大特征向量和权重，得到风险判断矩阵权向量值及一致性检验结果。最后使用模糊综合评价法确认风险等级，量化出此类风电项目总风险分值，对项目的风险因素进行评定。为平原及低矮丘陵地区风电行业如何进行风险管理，该遵循怎样的风险应对策略，以及提出具体应对措施提供了更具准确性的参考。

3.1. 层次分析法

为了准确评估每个风险因素的影响力，需对不同级别的风险因素进行相互比较，并依此构建评判矩阵。根据专家填写的调查问卷及专家打分均值表，建立一级、二级风险因素判断矩阵，对每个风险因素进行权重计算和一致性检验，将这一级、二级权重进行相乘后，得到二级风险因素的综合权重并进行排序，最终明确排名前三的分别是补贴电价风险、调峰限电风险以及安全管理风险。二级风险因素排序表如表 3 所示。

Table 3. Secondary risk factors ranking table
表 3. 二级风险因素排序表

二级风险因素	综合权重	排序
电气火灾风险 A11	0.1049	4
高处坠落风险 A12	0.0245	10
振动超标风险 A13	0.0411	7
雷击风险 A14	0.0082	16
跳闸风险 A15	0.0669	5
叶片覆冰风险 A16	0.0117	13
自然灾害风险 A21	0.0033	17

续表

气候恶劣风险 A22	0.0321	9
社会环境风险 A23	0.0104	14
补贴电价风险 A31	0.3022	1
调峰限电风险 A32	0.1511	2
工期控制风险 A41	0.0349	8
人力资源管理风险 A42	0.0010	18
安全管理风险 A43	0.1106	3
财务管理风险 A44	0.0158	11
贷款资金风险 A51	0.0085	15
汇率变动风险 A52	0.0146	12
上网电价风险 A53	0.0493	6

3.2. 模糊综合评价法

通过模糊综合评价法构建风险因素评价集，首先基于层次分析法中计算得到的风险因素权重，建立平原及低矮丘陵地区风电项目的风险评估等级。为了使评估等级更为直观，现将风险分为五个等级，表示为 $V = \{V_1, V_2, V_3, V_4, V_5\} = \{\text{低, 较低, 中, 较高, 高}\}$ ，由专家打分。然后建立从风险评价矩阵 A 到评价集 V 的模糊关系矩阵 $R = \{r_{mn}\}_{pq}$ ，通过调查问卷中的专家打分得到关系矩阵 R 。对于二级风险评价因素集 $R_i (i = 1, 2, 3, 4, 5)$ 中的 R_1 进行一级模糊评价， $R_1 = (R_{11}, R_{12})$ ，权重集为 $A_1 = (0.4077, 0.0952, 0.1597, 0.0318, 0.2601, 0.0455)$ ，两者相乘可得各项一级风险因素的模糊评价矩阵，在完成二级风险因素模糊评价后，通过整合 B_1 - B_5 可对项目的整体风险 B 进行评价，通过风险等级评分表及风险得分量化公式对 B 进行处理，可以量化出平原及低矮丘陵地区风电项目总风险分值为“较高”风险等级，其中一级风险因素风险大小排名如下：政策风险 > 技术风险 > 经济风险 > 环境风险 > 经营管理风险。其中政策风险属于“高”风险，技术风险、经济风险、环境风险均为“较高”风险等级，经营管理风险属于“中”风险等级。

2.3. 风险评价结果分析

本研究采用两种风险评价方法，层次分析法和模糊综合评价法，通过层次分析法确定风险评价体系中各二级风险因素的权重，再用模糊综合评价法对项目的风险因素进行评定。若只选用单层次的模糊综合评价方式，无法合理分配每个风险因素的权重，所以采用多层次的综合评价模型对项目的风险按照层次分析法的分类进行评估，最终得到平原及低矮丘陵地区风电项目的整体风险程度以及各类因素风险等级排序，此方法亦适用于某一风电项目开展风险管理研究。

3. 风险应对过程

风险应对是风险管理的最后一步也是尤为重要的一步，基于风险识别和评估结果，对识别出的不同类型的风险，制定相应的应对计划和策略，以实现避免或降低项目风险的目标，从而减少因风险发生所导致的损失。

针对前面得出的排名前三的风险，现提出以下应对措施：

(1) 针对补贴电价风险(排名第一)的应对措施

由于补贴电价风险具有最高的综合权重比例(0.3022)，本文建议风电项目可以积极寻求多元化的融资

渠道,与多方企业签订相关战略合作协议,减少对政府补贴电价的依赖。相关措施如下:

① 市场化交易:随着风电成本的降低和技术的进步,政府逐步推行风电上网电价的市场化机制。即新核准的风电项目需要通过竞争方式配置和确定上网电价,而不再是依赖固定的补贴电价。更有利于风电项目更好地融入市场环境,减少对补贴的依赖,同时也可以降低补贴电价政策变动带来的风险。

② 金融支持:为了缓解因补贴政策延迟支付造成的资金压力,通过咨询相关专家,可以通过与金融机构合作,获取补贴确权贷款。或通过与多方企业签署战略合作协议,减少对补贴电价的依赖,分散风险。

③ 绿色电力证书(绿证)交易:为了补偿补贴退坡的影响,政府鼓励风电项目参与绿证交易。利用好绿证市场,不仅可以通过出售绿证来获得额外收入,还可以通过这种机制实现其绿色价值的货币化,增加收益来源,更进一步降低对政府直接补贴的依赖。

④ 关注税收和政策支持:国家通过优化相关税收政策,增强风电项目的经济吸引力。例如,通过可再生能源电价附加的合理分配,确保补贴资金的及时兑付,降低企业运营风险。

(2) 针对调峰限电风险(排名第二)的应对措施

由于调峰限电风险具有第二高的综合权重比例(0.1511),本文建议风电项目可以通过提高风功率预测精度、建设储能系统来平衡电网负荷便于削峰填谷等措施降低风险,根据模糊综合评价法的结果,这一措施可以有效降低调峰限电风险。相关措施如下:

① 提高风力发电预测精度:通过欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的 NWP 数值天气预报数据并结合国内气象局相关数据,采用先进的气象预报技术和优化数据分析算法,通过不同气象不同算法进行模型训练,修正历史功率与风速的对应关系,提高对风速和风向的预测准确性,从而更准确地预测风力发电量。这样可以辅助电网调度,优化电力资源分配,减少因预测不准确导致的调峰限电风险。

② 建设储能系统:配置一定比例的储能设施,如电池储能系统,以存储过剩的风电能量,并在风力发电量不足时释放能量,平衡电网负荷。例如,甘肃定西市安定区的风电项目要求配置储能系统不低于项目规模的 10%,且储能时长不低于 2 小时,这样的配置有助于提高电网的调峰能力。

③ 参与电力市场现货交易:通过参与电力市场的中长期交易、现货市场和辅助服务市场,风电项目可以更灵活地调度电力资源。在电力需求高峰时,风电项目可以通过市场机制出售电力,而在需求低谷时,可以减少发电或利用储能设施存储电力。

④ 技术改造和提升运行灵活性:对现有的风电场进行技术改造,提高其响应电网调度命令的能力。例如,通过改进风电机组的一次调频相应速度和 AGC 自动发电控制系统,使其在满足《山东省电力并网运行管理实施细则》和《山东省电力辅助服务管理实施细则》相关要求的前提下能够更快地调整输电线路上的有功功率,以适应电网的实时需求。

⑤ 与电网建立紧密合作关系:风电项目负责人应与电网公司保持密切沟通,共同制定调度计划和应急预案。如此方可更好的确保风电项目在电网出现调峰需求时,能够及时调整运行状态,减少限电风险。

⑥ 探索源网荷储一体化和多能互补发展:根据国家发展改革委和国家能源局的指导意见,风电项目可以适当去关注和探索与太阳能、水能、储能等多种能源形式的互补发展,提高电力系统的调节能力和整体效率。这种一体化的发展模式有助于提升风电项目的调峰能力,减少对单一能源的依赖。

(3) 针对安全管理风险(排名第三)的应对措施

由于安全管理风险具有第三高的综合权重比例(0.1106),本文建议风电项目可以加强安全管控、做好应急预案等应对措施降低安全管理风险。相关措施如下:

① 风险识别与评估:项目管理团队需要进行全面的风险评估,识别可能影响自身项目安全的所有因素。其中包括自然风险(如雷击、强风)、技术风险(如设备故障)、人为操作错误等。公司可以通过建立风

险数据库、定期更新和分析风险数据的方式，有效预测和防范潜在风险。

② 安全培训与教育：对所有参与项目的工作人员必须进行定期的安全培训。培训内容应包括安全操作规程、紧急应对措施、健康和法规等。此外，强化现场安全意识，确保每个员工都能够深刻理解并执行安全标准。

③ 安全监控与控制：安装摄像头和传感器，对项目现场进行实时监控，及时发现并处理安全隐患。同时，定期对设备进行检查和维护，确保所有设备都在安全的状态下运行。实施严格的访问控制系统，严格管理门禁，防止未经授权的人员进入危险区域。

④ 应急管理计划：制定详尽的应急管理计划，包括事故响应程序、救援和疏散路线等。在项目每个阶段都应进行应急演练，确保所有参与人员在发生紧急情况时都能够迅速反应，有效执行救援操作。

⑤ 法规遵守与监督：遵守当地的健康和安全法规是风电项目必须履行的法律责任。此外，通过与当地政府和安全监管机构的合作，接受定期的安全检查和审核，可以进一步保证项目的安全合规性。

⑥ 文化和行为安全：注重企业文化培养，建立“安全第一，综合治理，预防为主”的安全管理方针，鼓励员工主动识别并报告安全隐患。实施安全激励机制，如对表现优异的团队或个人给予奖励，可以提升整个项目团队的安全责任感。

4. 结论

本文通过使用相关方法，识别出平原及低矮丘陵地区风电项目中的技术风险、环境风险、政策风险、经营管理风险以及经济风险等五大类共 18 项风险因素，对这些风险因素进行评价，确定了各风险因素的权重，并进行了风险等级的评定，得出二级风险排名。再利用多层次的模糊综合评价法进一步确认了在一级风险中，政策风险属于“高”风险等级，而技术风险、经济风险、环境风险属于“较高”风险等级，经营管理风险则被评为“中”风险等级。针对前三名的二级风险提出了相应的应对策略，提高风电项目的风险管理能力，为项目建设提供实践指导，确保风电项目安全稳定建设运营。此外，该研究的创新之处在于对于国内较少研究的平原及低矮丘陵地区的风电项目风险管理进行了系统的分析和优化，使得研究结果不仅具有理论价值，也具有较高的实用性。通过这样的研究，可以帮助风力发电项目更好地应对和管理风险，从而安全、高效地发展清洁能源，为社会和环境的可持续发展作出贡献。

基金项目

教育部产学研合作协同育人项目(220501791121846)；上海理工大学大学生创新项目(XJ2024137)。

参考文献

- [1] 张琛, 邓伟. 中国风电产业发展现状及趋势研究[J]. 机电产品开发与创新, 2023, 36(3): 206-208.
- [2] 曾琦, 陈正洪. 近年来气象灾害对风电场影响的研究进展[J]. 气象科技进展, 2019, 9(2): 47-55.
- [3] 张博, 孙通, 聂家谊, 等. 山区风力发电机组雷击风险评估方法[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2022, 45(2): 186-191.
- [4] 田帅. 新能源风险投资全周期风险管理体系的构建[J]. 南方能源建设, 2022, 9(1): 40-46.
- [5] Gupta, A. and Palepu, S. (2024) Designing Risk-Free Service for Renewable Wind and Solar Resources. *European Journal of Operational Research*, 315, 715-728. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2023.11.041>
- [6] 胡广文, 顾一帆, 吴玉锋, 穆献中. 中国实现碳中和: 降碳风险的识别与应对[J]. 北京工业大学学报(社会科学版), 2024, 24(1): 135-146.