

基于 Leaky Noisy-or Gate 和贝叶斯网络的光伏发电项目施工风险评估方法

董华珊, 侯学良

(华北电力大学 工程技术与管理研究所, 北京 102206)

摘要:针对复杂多变的光伏发电项目施工风险评估问题,利用 Leaky Noisy-or Gate 模型整合历史经验和专家知识来确定贝叶斯网络参数并建立光伏施工风险的贝叶斯网络模型,同时采用 Netica 仿真分析,对施工风险进行有效预测并诊断识别出关键性风险和敏感性风险,以便管理者精准施策、管控风险。为验证该方法的有效性,以 Z 项目为例进行建模仿真。结果表明,其施工风险等级为中等,与实际相符。

关键词:光伏项目;贝叶斯网络;Leaky Noisy-or Gate 模型;敏感性分析;关键性风险

中图分类号:C93 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2023)02-0218-06

据统计,截至 2021 年底,中国光伏发电建设累计并网容量达 30 598.7 万 kW^[1],已成为全球光伏发电安装量增长最快的国家。为实现“双碳”目标,国家发改委和国家能源局在《能源生产和消费革命战略(2016—2040)》中明确指出:到 2030 年,国内非化石能源发电要占总发电量的 50%;到 2050 年,要占总量的 70%~80%。由此可见,今后一段时期,中国将迎来光伏发电工程的建设新高峰。

然而,从工程项目管理角度来看,由于在光伏工程项目施工过程中,时常受到项目内外各种风险因素的干扰,会给项目质量、进度、成本等建设目标的顺利实现带来一定的阻碍和约束,这意味着对其风险管理的成败将决定项目运作成功与否。因此,如何对光伏项目施工中可能出现的各种风险进行预测、分析和评估并针对性管理,以达到控制风险、降低成本、提高效益的目的,已成为当前工程项目管理领域亟待解决的重要课题。

1 研究现状

随着工程项目管理理论的不完善,工程项目管理中的风险管理体系也逐渐成熟。光伏发电项目具有资源依赖性、资金密集性、技术密集性、社会公用性等基本特征,因此做好项目的风险评价管控至关重要,不容忽视。冯鹤等根据电气-几何模型,深入研究并网光伏发电系统的损害来源、损害类型

以及损失程度影响因素,并提出了并网光伏发电系统雷电灾害风险评估的定量解决方法^[2]。杨有民和孙冠男通过对光伏发电项目风险特征和风险类型的分析,探讨了构建基于层次分析法、模糊综合评价法以及专家评价法的光伏发电项目风险评价指标体系的具体措施步骤^[3]。何宁波在充分考虑分布式光伏发电项目整体实际情况的基础上,利用层次分析法确定指标权重,并运用物元可拓理论来获得各评价等级的关联度,最终建立了基于层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)的物元可拓项目风险评价模型^[4]。汪顺旭将风险管理理论和光伏电站建设项目相结合,通过专家调查法和层次分析法来对风险因素进行识别,并应用模糊评价法来对光伏电站建设项目中存在的不确定因素进行预想推论,并针对事故隐患提出应对措施^[5]。

综合上述学者们对光伏发电项目风险评估的研究,不难发现存在一些局限性。大多数学者普遍关注对光伏发电项目进行全生命周期风险评价,通过建立风险评价指标和评估模型来进行整体性风险评估。如董博和杨小兵应用模糊层次分析法来确定大型光伏发电项目投资、建设、运营、回购等阶段的主要风险因素及其风险等级,但未深入分析相关风险因素之间的转化关联影响^[6];杨彦等对光伏发电项目从筹备到实施到运营的全

收稿日期:2022-08-14

作者简介:董华珊(1990—),女,山东聊城人,华北电力大学工程技术与管理研究所,硕士研究生,研究方向为项目管理;侯学良(1966—),男,山西太原人,华北电力大学工程技术与管理研究所,教授,博士,博士生导师,研究方向为工程技术与

过程涉及的风险单元进行识别,并采用 ANP-TOPSIS 组合的方法来建立光伏发电项目的整体风险评估模型,但其评估的不确定性较强^[7]。或是由于其高投资特点而更侧重投资风险评价,如成健等从政策变动、发电效益、投资权益等角度对光伏发电项目投资过程中面临的主要障碍和风险进行分析并提出相应策略^[8];强丽娟运用问卷调查法和因子分析法来对光伏电站风险评价指标进行确认,结合 AHP 和熵权法来对指标进行量化,并基于模糊综合评价法来构建光伏电站项目投标报价风险的评价模型^[9]。

目前对于光伏发电项目施工阶段风险的研究尚不丰富,但其施工风险管理却在工程项目管理中占据非常重要的地位,因此需探索新方法对光伏发电项目的施工风险进行科学有效的评估,以便采取针对性管控措施来降低风险、提高效益。

2 光伏发电项目施工风险评估研究思路

光伏发电项目施工阶段具有工期短、交叉作业多、作业面广等特点,不确定性和复杂性^[10]是施工风险的主要来源。作为在不确定知识的表达和推理领域最行之有效的模型,贝叶斯网络在表达和分析不确定性和概率性问题上具有独特优势,符合光伏发电项目施工风险复杂多变的特征,故本文将贝叶斯网络应用于光伏发电项目施工风险评估领域。

2.1 贝叶斯网络

贝叶斯网络(Bayesian network, BN),又称信念网络,适用于不确定知识的表达和推理决策,可用由节点及连接节点的有向边构成的有向无环图(directed acyclic graph, DAG)来表示,节点表示随机变量,有向边表示变量之间的条件依赖,用条件概率表(conditional probability tables, CPT)表示其关系强度(即联合概率分布)。因此,BN 可写为

$$G = \{ (L, E), P \} \quad (1)$$

其中: L 为网络节点; E 为有向无环图; P 为节点的条件概率分布。

条件概率 P 表示变量之间的依赖关系,可用贝叶斯定理来计算,其 Bayes 公式为

$$P(X_i | Y) = \frac{P(Y | X_i)P(X_i)}{\sum_{j=1}^n P(Y | X_j)P(X_j)} \quad (2)$$

式中: $P(X_i)$ 、 $P(X_j)$ 为先验概率,可通过统计数据或经验知识获得; $P(X_i | Y)$ 为后验概率,即在 Y 发生的条件下 X_i 发生的概率; $P(Y | X_i)$ 、 $P(Y | X_j)$ 均为条件概率。

由上可见,贝叶斯网络可将先验概率(即对事物已有的认知)和条件概率(即得到的新证据)有效融合,推演得到后验概率(即事物的发展规律),使得对变量的统计推断更合理。

构建 BN 模型,需要特定网络结构的先验概率和后验概率作为网络参数来进行运算^[11]。在数据充分的情况下,可通过直接建模来确定其网络参数,如采用极大似然估计^[12]、随机近似蒙特卡罗方法(SAMC)^[13]等。但这些方法都需要大量的数据样本,且研究主要以 β 分布和二项分布为主,具有一定的局限性。但由于国内光伏发电项目缺少较为完备的风险案例数据库,可用有效数据较少,而 Leaky Noisy-or Gate 模型在有效数据不充分的情况下可依据专家知识和历史经验来确定 BN 参数^[14],故本文采用 Leaky Noisy-or Gate 来计算 BN 参数。

2.2 Leaky Noisy-or Gate 扩展模型

由于实际项目中还会存在一些其他的未知因素会影响节点 Y ,故 Henrion 提出了遗漏概率(leak probability)概念,继而又提出 Leaky Noisy-or Gate 扩展模型,其定义如下。

假设 Y (子节点)有 2 个相互独立的父节点: X_i 和 X_{all} (即 X_i 以外的其他因素合并为 X_{all}), P_i 和 P_{all} 是其连接概率;将所有未知因素合为一个因素 X_L ,其连接概率为 P_L ,则有

$$P(Y | X_i) = P_i + P_{all} - P_i P_{all} \quad (3)$$

$$P(Y | \bar{X}_i) = P_{all} \quad (4)$$

由式(3)和式(4)联立,可得

$$P_i = \frac{P(Y | X_i) - P(Y | \bar{X}_i)}{1 - P(Y | \bar{X}_i)} \quad (5)$$

根据式(5)获得父节点连接概率 P_i 后,再结合不确定因素 X_L 及其连接概率 P_L (可由风险历史分布函数确定),从而得出节点 Y 的条件概率为

$$P_i(Y) = 1 - (1 - P_L) \prod_{i: X_i \in X_p} (1 - P_i) \quad (6)$$

综上,基于 Leaky Noisy-or Gate 和贝叶斯网络来对光伏项目施工风险进行评估,其具体步骤如下:

1) 采用德尔菲法对施工中存在的主要风险因素进行识别和分类,并确定其先验概率。

2) 通过专家评议确认风险因素之间的因果层级关系并排序,构建贝叶斯网络模型。

3) 根据先验概率来确定模型中各子节点与其父节点之间的连接概率。

4) 利用 Leaky Noisy-or Gate 模型计算可得到整个贝叶斯网络的 CPT^[15]。

5)采用专业分析工具 Netica 对施工风险贝叶斯网络模型进行仿真分析评估。

3 实例分析

以光伏发电项目施工阶段的典型风险因素作为研究对象,依靠专家确定节点及节点间关系,构建贝叶斯网络模型结构,通过仿真分析,并与项目实际风险因素情况进行结论比较,以验证所建评估模型的合理性和有效性。

3.1 项目概况及其风险因素识别与分类

以 Z 项目为例,其为 200 MW_p 大型地面集中式光伏复合项目,总占地面积 8 020 亩(1 亩 = 666.7 m²),总投资 77 878.84 万元,运营期 25 年。场区位于腾格里沙漠地带边缘,地势总体起伏较大且沙化严重;施工期为 2020 年 10 月 15 日至 12 月 30 日,有效工期不足 3 个月,日均气温-5~-10 ℃。

在了解 Z 项目实际情况后,通过分析中国近年来光伏发电项目施工中存在的风险因素,以现场采访和问卷调查的方式,对建设、监理、设计、施工等相关单位管理人员及主要工作人员进行了施工风险因素调查。共计发出 239 份调查表,实际回收 227 份,其中有效调查表的数量为 214 份,总有效率为 89.5%,满足要求。对有效调查表进行整理汇总分析,筛选出施工阶段存在的 10 种主要风险因素,且这些风险因素之间存在较好的相互独立性,风险因素及符号见表 1。

表 1 施工阶段主要风险因素及符号

风险因素	符号
材料设备质量不合格	Y ₁
安全技术措施不到位	Y ₂
隐蔽工程监督不到位	Y ₃
设备故障或操作不当	Y ₄
施工用电操作不规范	Y ₅
施工人员违章作业	Y ₆
极端天气或灾害发生	Y ₇
施工方案不详细合理	Y ₈
资源供应机制不畅	Y ₉
进度管控不到位	Y ₁₀

通过参考国内外风险因素分析实例并考虑光伏发电项目施工风险特点,邀请 48 名专家对这些风险因素进行分类,同时对有效样本数据进行相关统计分析,获得各个风险因素的先验概率,见表 2。

为了更好地反映光伏发电项目施工风险发生的可能性大小(概率),经专家组评议,可将其风险概率等级划分为 5 个等级,见表 3。

表 2 施工阶段风险因素及其先验概率

类别	风险因素	先验概率
质量风险 X ₁	材料设备质量不合格 Y ₁	0.59
	安全技术措施不到位 Y ₂	0.27
	隐蔽工程监督不到位 Y ₃	0.42
安全风险 X ₂	设备故障或操作不当 Y ₄	0.16
	施工用电操作不规范 Y ₅	0.35
	施工人员违章作业 Y ₆	0.53
	极端天气或灾害发生 Y ₇	0.28
管理风险 X ₃	施工方案不详细合理 Y ₈	0.21
	资源供应机制不畅 Y ₉	0.34
	进度管控不到位 Y ₁₀	0.40

表 3 风险概率等级评价标准

风险等级	概率等级	概率区间
I	很高	≥0.75
II	高	0.60~0.75
III	中等	0.45~0.60
IV	低	0.30~0.45
V	很低	≤0.30

3.2 贝叶斯网络模型建立

在以贝叶斯网络为基础模型的研究中,构建贝叶斯网络结构是进行施工风险预判的基础。即将光伏发电项目整体施工风险作为目标层,3 类具体风险作为准则层,细化风险因素作为指标层,各层存在隶属关系,经专家群决策对各层指标进行排序,直至形成完整的基于施工风险的贝叶斯网络节点结构(图 1)。结合客观数据与专家知识,分析网络节点变量间因果关系并进行逻辑推理,最终构建 Z 项目施工风险贝叶斯网络模型(图 2)。

3.3 贝叶斯网络参数确定

由表 2 中的先验概率可确定各子节点与其父节点之间的连接概率;再利用 Leaky Noisy-or Gate 模型计算得到 CPT。限于篇幅,以安全风险 X₂为例,其 CPT 见表 4。

3.4 基于贝叶斯网络模型的施工风险评估分析

常用 BN 分析工具较多,有 GeNIe^[16-17]、Netica^[18]、MATLAB 的 BNT 工具箱^[19]等。

Netica 是一款专业高效的贝叶斯网络搭建与仿真分析工具,可通过自动学习样本数据来计算先验概率,得出节点对结果的影响程度^[11],故拟采用 Netica 对案例进行仿真分析,来实现对施工风险事件有效预测与诊断。

利用 Netica 软件创建贝叶斯网络,输入各节点参数进行学习后,可得到光伏发电项目施工阶段主要风险因素的概率分布,可实现基于 BN 的风险预测,定性分析出各风险因素与事故之间的因果关

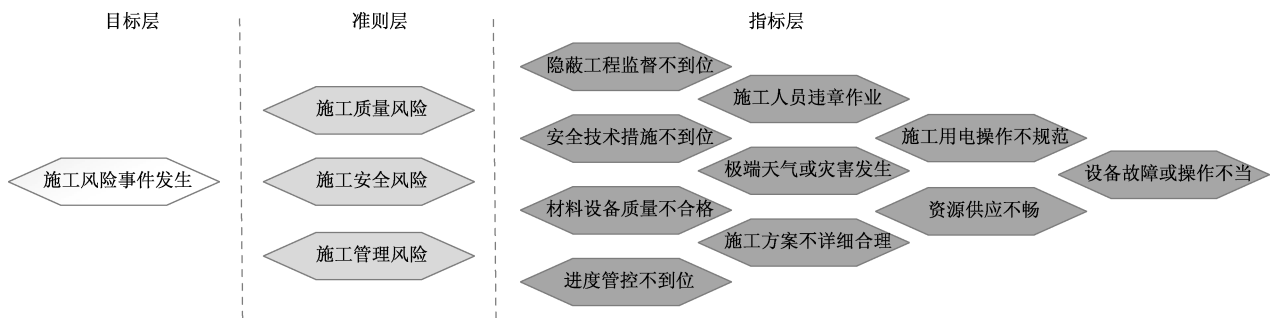


图 1 Z 项目施工风险贝叶斯网络节点结构

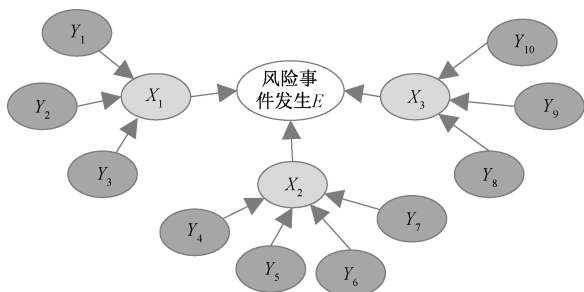


图 2 Z 项目施工风险贝叶斯网络模型

系。为进一步定量判断出施工阶段的致因风险链,利用 BN 的逆向推理来进行敏感性分析和关键性分析,可有效识别关键性风险因素、规避敏感性风险因素,从而降低施工阶段的风险概率,为项目决策提供更科学地依据和参考。

表 4 安全风险 X_2 的 CPT(1:发生;0:不发生)

节点 X_2	其他不确定因素 的连接概率 φ	Y_4	Y_5
$P(X_2=1)$	0.100	0.640	0.557
$P(X_2=0)$	0.900	0.360	0.443
节点 X_2	Y_6	Y_7	Y_4, Y_5
$P(X_2=1)$	0.384	0.392	0.823
$P(X_2=0)$	0.616	0.608	0.177
节点 X_2	Y_4, Y_6	Y_4, Y_7	Y_5, Y_6
$P(X_2=1)$	0.754	0.757	0.697
$P(X_2=0)$	0.246	0.243	0.303
节点 X_2	Y_5, Y_7	Y_6, Y_7	Y_4, Y_5, Y_6
$P(X_2=1)$	0.701	0.584	0.879
$P(X_2=0)$	0.299	0.416	0.121
节点 X_2	Y_4, Y_5, Y_7	Y_4, Y_6, Y_7	Y_5, Y_6, Y_7
$P(X_2=1)$	0.880	0.834	0.796
$P(X_2=0)$	0.120	0.166	0.204
节点 X_2	Y_4, Y_5, Y_6, Y_7		
$P(X_2=1)$	0.918		
$P(X_2=0)$	0.082		

3.4.1 基于 BN 的风险预测

将收集到的数据(先验概率)进行规范化处理,导入 Netica 中并与网络节点进行匹配,当所有节点

都匹配成功后进行参数学习,最后更新贝叶斯网络图,即可得到风险预测的结果。输入各节点参数并更新网络后,可自动得到 E 发生的概率为 49.2%,不发生的概率为 50.8%,如图 3 所示。根据表 3 可判断出该项目施工风险水平为中等(Ⅲ),总体处于可控状态,符合工程实际情况。

根据联合概率计算,可得到 E 在两种状态下的概率为

$$P(E=1) = \sum_{X_1, X_2, X_3} P(X_1, X_2, X_3, E=1) = 0.492;$$

$$P(E=0) = 1 - P(E=1) = 0.508.$$

计算结果与软件仿真结果一致,说明 Netica 对贝叶斯网络的施工风险预测具有合理性。

3.4.2 基于 BN 的敏感性分析

敏感性分析是通过分析、测算项目中的不确定性因素对目标的影响程度,进而衡量判断项目承受风险的能力。Netica 可通过计算相关节点后验概率的方差来确定其敏感程度,详见表 5。

表 5 风险事件 E 的敏感性分析结果

节点	互信息	百分比	方差
E	0.999 80	100	0.249 930 8
X_3	0.100 59	10.1	0.034 010 0
X_2	0.025 14	2.51	0.008 659 1
Y_9	0.023 58	2.36	0.008 117 0
X_1	0.015 21	1.52	0.005 250 7
Y_8	0.003 66	0.366	0.001 267 4
Y_{10}	0.002 56	0.256	0.000 887 1
Y_5	0.002 23	0.223	0.000 771 8
Y_3	0.001 92	0.192	0.000 666 1
Y_4	0.001 52	0.152	0.000 526 5
Y_6	0.000 92	0.091 9	0.000 318 4
Y_2	0.000 90	0.090 4	0.000 313 3
Y_7	0.000 66	0.066	0.000 228 6
Y_1	0.000 40	0.039 5	0.000 136 9

由表 5 可知,对于施工风险事故发生(E)的敏感性:管理风险>安全风险>质量风险;风险因素中, $Y_9>Y_8>Y_{10}>Y_5>Y_3>Y_4>Y_6>Y_2>Y_7>Y_1$ 。

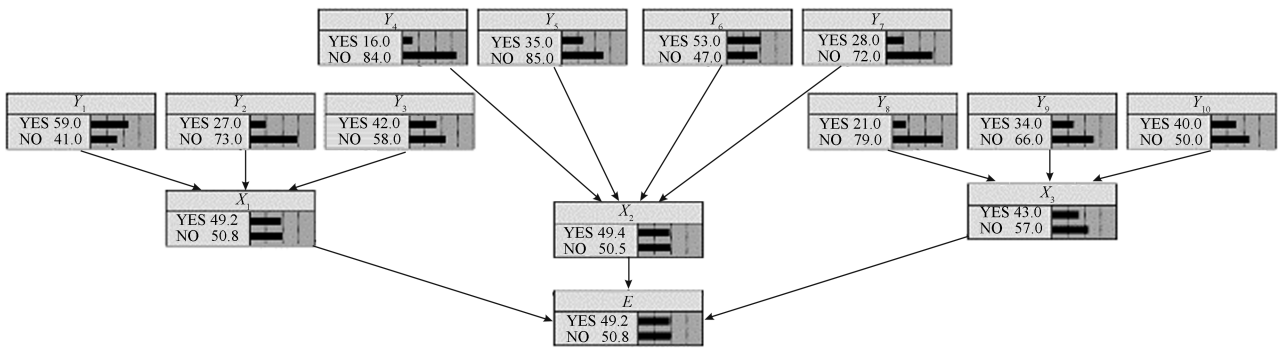


图 3 基于 BN 的风险预测

从整体上看,管理风险 X_3 最为敏感,即影响最大,其中风险因素 Y_9 的敏感性最高,其他 2 个也较敏感;质量风险 X_1 的敏感性最低,其原因是 Y_1 和 Y_2 的敏感性很低,被这两个变量弱化。

3.4.3 基于 BN 的关键性分析

后验概率可用来判定各个风险因素对风险事件的影响程度,即导致风险事故发生的关键节点。施工风险事件发生时,所观测到的后验概率 ≥ 0.6

的风险因素称为关键性风险^[20]。

假定发生施工风险事故,即 $E=1$,基于已构建的贝叶斯网络可计算出各个风险因素的后验概率,并逆向推断出导致风险事件发生最可能的致因组合(关键性风险因素),该结果可对项目管理人员进行相应故障诊断提供帮助,以便及时采取防范或补救措施,防止风险升级、事故扩大。诊断结果如图 4 和图 5 所示。

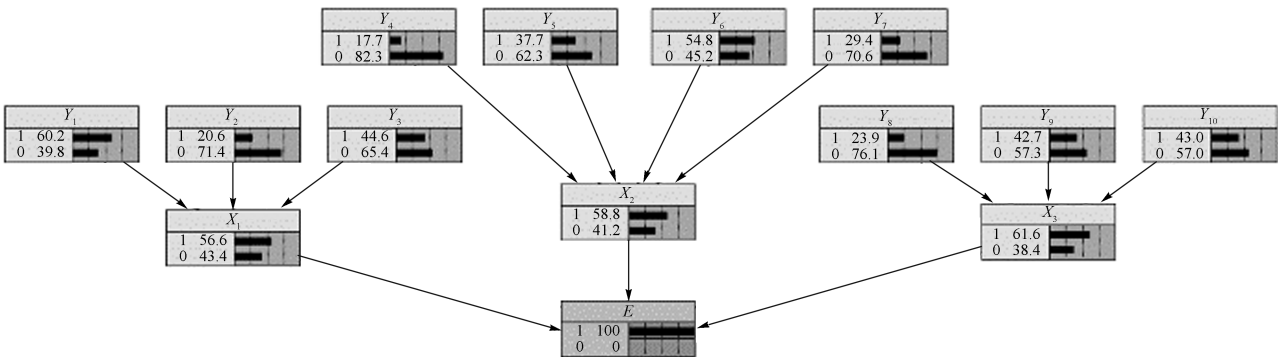
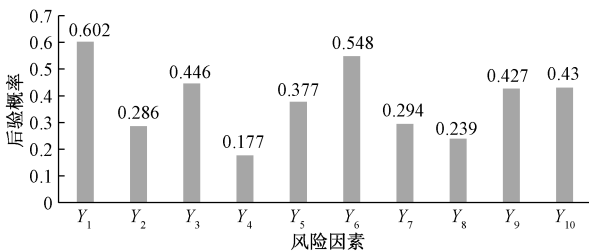


图 4 基于 BN 的关键性分析

图 5 $E=1$ 时,各风险因素的后验概率

由图 4 可知,引起施工风险事件发生的事故致因中:在准则层,管理风险(X_3)的触发概率最大,为 0.616;而在指标层,材料设备质量不合格(Y_1)影响最大,为 0.602。该诊断表明:即当材料设备质量存在隐患且现场管理工作不到位(如未落实进场验收制度等),将导致不合格材料设备被用于施工过程,极大提高了施工风险事件的发生概率,具有逻辑意义。

由图 5 可知,材料设备质量不合格(Y_1)为关键性风险,需重点监控、管理。

4 结论

基于 214 份调查问卷和实例,运用贝叶斯网络理论,建立了光伏发电项目施工风险评估模型,并利用专业分析工具 Netica 进行仿真分析,实现了对施工风险的有效预判和诊断,并进一步识别出了关键性风险和敏感性风险,得到以下结论:

1)在理论知识和实际案例的基础上,本文建立了基于 Leaky Noisy-or Gate 和贝叶斯网络的光伏项目施工风险评估模型,可对施工风险事故发生概率进行有效预测并进一步识别出对其敏感性较高的风险因素,以便管理者及时采取针对性预防措施。

2)运用贝叶斯网络优越的推理能力,可对导致施工风险事件发生的各个风险因素进行诊断并得

出关键性风险因素,有助于项目管理人员及时防范或规避风险,为项目决策提供科学依据。

3)Z 项目施工风险事件发生概率为 0.492,其施工风险水平为中等(Ⅲ)。经仿真分析,其关键性风险为材料设备质量不合格;敏感性风险为施工方案不详细合理、进度管控不到位。针对识别出的关键性风险和敏感性风险,项目管理人员可提前制定针对性的风险管控措施,以避免风险程度升级或潜在损失扩大,有效降低风险治理成本,提高项目效益。经专家评判,仿真结果与工程项目实际情况高度匹配,该方法具有一定的工程应用价值。

参考文献

- [1] 国家能源局. 2021 年光伏发电建设运行情况[EB/OL]. [2022-03-13]. http://www.nea.gov.cn/2022-03/10/c_1310508114.htm.
- [2] 冯鹤,谭涌波,付国振. 并网光伏发电系统雷电灾害风险评估研究[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(33): 313-317.
- [3] 杨有民,孙冠男. 光伏发电项目风险评价指标体系建立的研究[J]. 科技创新导报, 2019, 16(34): 252-254.
- [4] 何宁波. 分布式光伏并网发电项目风险分析及评价研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2017.
- [5] 汪顺旭. 光伏电站 EPC 总承包项目风险管理研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2018.
- [6] 董博,杨小兵. BT 模式下的大型光伏发电项目风险评价研究[J]. 科技管理研究, 2017, 37(21): 45-48.
- [7] 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.
- [8] 成健,付方超,赵岩. 我国对南非光伏发电项目投资的风险分析[J]. 对外经贸实务, 2017(8): 81-84.
- [9] 强丽娟. 光伏电站 EPC 项目投标报价风险评价研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2021.
- [10] 周发鑫,高建平,杨小兵,等. 电力工程总承包大型新能源光伏项目建设面临的主要风险研究[J]. 中国科技纵横, 2018(20): 154-155.
- [11] WANG Z Z, CHEN C. Fuzzy comprehensive Bayesian network-based safety risk assessment for metro construction projects[J]. Tunnelling and underground space technology, 2017, 70: 330-342.
- [12] 王康,齐金平. 贝叶斯网络在飞机驾驶舱手轮故障诊断中的应用[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(34): 14313-14318.
- [13] LIANG F, JIAN Z. Learning Bayesian networks for discrete data[J]. Computational statistics & data analysis, 2009, 53(4): 865-876.
- [14] ASHRAFI M, DAVOUDPOUR H, KHODAKARAMI V. A Bayesian network to ease knowledge acquisition of causal dependence in CREAM: application of recursive noisy - OR Gates[J]. Quality & reliability engineering international, 2017, 33(3): 479-491.
- [15] 张俊光,徐振超,贾赛可. 基于 Noisy-orGate 和贝叶斯网络的研发项目风险评估方法[J]. 科技管理研究, 2015, 35(1): 193-206.
- [16] 鹿浩,张鸿洲,钟寒,等. 融合专家综合知识的贝叶斯网络参数学习方法[J]. 科学技术与工程, 2021, 21: 8944-8950.
- [17] 曾强,黄政,魏曙寰. 基于模糊理论和贝叶斯网络的燃气轮机健康状态评估方法[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(11): 4363-4369.
- [18] 邵荃,罗雄,吴抗抗,等. 基于贝叶斯网络的机场航班延误因素分析[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(30): 8120-8124.
- [19] 肖琪琳,赵珍妮,刘林超. 基于贝叶斯网络的地铁项目施工风险管理研究[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2021, 34(1): 138-144.
- [20] 王宗韩,白思俊,郭云涛. “一带一路”基础设施 PPP 项目投资风险研究: 以东南亚三国为例[J]. 工程管理学报, 2021, 35(5): 88-93.

Construction Risk Assessment of PV Project Based on Leaky Noisy-or Gate and Bayesian Network

DONG Huashan, HOU Xueliang

(Institute of Engineering Technology and Management, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Aiming at the complex and changeable construction risk assessment of photovoltaic power generation projects, the Leaky Noisy or Gate model is used to integrate historical experience and expert knowledge to determine the Bayesian network parameters. The Bayesian network model of photovoltaic construction risk is established. At the same time, the Netica simulation analysis is used to effectively predict and diagnose the construction risks and identify the key risks and sensitive risks, so that the managers can make accurate decisions and control the risks. In order to verify the effectiveness of this method, the Z project is taken as an example for modeling and simulation; The results show that the construction risk level is medium, which is consistent with the actual situation.

Keywords: PV project; Bayesian network; Leaky Noisy-or Gate; sensitivity analysis; key risks