

中文引用格式:刘坤琦,杨涓,李子依,等. 基于 BN-MC 的极端天气下城市新型电力系统风险评估[J]. 中国安全科学学报, 2026, 36(1): 157-166.

英文引用格式:LIU Kunqi, YANG Juan, LI Ziyi, et al. Risk assessment of new urban power systems under extreme weather conditions based on BN-MC[J]. China Safety Science Journal, 2026, 36(1): 157-166.

# 基于 BN-MC 的极端天气下城市新型电力系统 风险评估\*

刘坤琦<sup>1</sup>, 杨涓<sup>1</sup>, 李子依<sup>1</sup>, 李鹏<sup>2</sup>高级工程师, 吴建松<sup>1</sup>教授,  
刘畅<sup>\*\*2</sup>高级工程师

(1 中国矿业大学(北京)应急管理与安全工程学院, 北京 100083;

2 国网电力工程研究院有限公司, 北京 100053)

中图分类号:X946; TM08

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.01.1266

基金项目:北京市自然科学基金资助(8232014); 国家电网公司科技项目(1400-202317632A-3-2-ZN)。

**【摘要】** 为缓解极端天气频发对新型电力系统的源、网、荷侧设备构成的重大安全风险, 提出一种面向极端天气的城市新型电力系统风险评估模型。首先, 基于灾害理论辨识城市新型电力系统的风险因素, 并借助解释结构模型(ISM)梳理风险因素间的影响关系; 然后, 将灾害链拓扑结构映射成为贝叶斯网络(BN), 并通过模糊综合评价和事故统计确定各风险因素节点的先验概率, 运用敏感性分析和情景分析得出城市新型电力系统事故关键风险节点和多灾害耦合事故后果; 最后, 借助蒙特卡罗(MC)模拟, 对敏感性较高的“杆塔”节点开展运行优化分析。结果表明: BN-MC 耦合模型可有效实现城市新型电力系统极端天气风险的量化评估与提升分析, 多重极端天气叠加时, 光伏发电机组故障概率高达 60%, 且强风是其故障的关键驱动因素; 其次, 提升杆塔抗风等级对降低其失效概率效果显著, 在实时风速 36 km/h 时, 抗风等级从 35 km/h 提升至 40 km/h, 可使失效概率下降 59.39%, 且该效果呈现非线性特征, 低风速区段的风险概率降幅大于中风速区段。

**【关键词】** 贝叶斯网络(BN); 蒙特卡罗(MC); 极端天气; 城市新型电力系统; 风险评估; 解释结构模型(ISM)

## Risk assessment of new urban power systems under extreme weather conditions based on BN-MC

LIU Kunqi<sup>1</sup>, YANG Juan<sup>1</sup>, LI Ziyi<sup>1</sup>, LI Peng<sup>2</sup>, WU Jiansong<sup>1</sup>, LIU Chang<sup>2</sup>

(1 School of Emergency Management and Safety Engineering, China University of Mining & Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 2 State Grid Electric Power Engineering Research Institute Co., Ltd., Beijing 100053, China)

**Abstract:** In order to address the significant safety risks posed by frequent extreme weather to the source, grid, and load-side equipment of the new power system, a risk assessment model for urban new power systems under extreme weather conditions was proposed. First, risk factors of the urban new power

\* 文章编号:1003-3033(2026)01-0157-10; 收稿日期:2026-09-11; 修稿日期:2025-11-15

\*\* 通信作者:刘畅(1990—),男,河南周口人,博士,高级工程师,主要从事安全科学方面的工作。E-mail: liuchang.2019@tsinghua.org.cn。

system were identified based on disaster theory, and an ISM was applied to clarify the interrelationships among these risk factors. Subsequently, the topological structure of the disaster chain was mapped into a BN. The prior probabilities of each risk factor node were determined using fuzzy comprehensive evaluation and accident statistics. Sensitivity analysis and scenario analysis were employed to derive key risk nodes for urban new power system accidents and the consequences of multi-hazard coupled accidents. Finally, MC simulation was utilized to conduct operational optimization analysis on “transmission towers” from the perspective of wind resistance level design. The results indicate that the constructed BN-MC coupled model effectively quantifies and enhances the analysis of extreme weather risks in urban new power systems. Under multiple superimposed extreme weather conditions, the failure probability of photovoltaic generators reaches as high as 60%, with strong winds being the key driving factor. Furthermore, improving the wind resistance level of transmission towers significantly reduces their failure probability. At a real-time wind speed of 36 km/h, increasing the wind resistance level from 35 km/h to 40 km/h reduces the failure probability by 59.39%. This effect exhibits a nonlinear characteristic, with a greater reduction in risk probability in the low wind speed range than in the medium wind speed range.

**Keywords:** Bayesian network (BN); Monte Carlo (MC); extreme weather; urban new power system; risk assessment; interpretative structural modeling method (ISM)

## 0 引言

随着新型电力系统的持续建设,我国电力系统结构与运行方式正发生深刻变革。然而风电、光伏等可再生能源具有明显的间歇性与随机性,极大增大了电力系统运行的不确定性,导致电力系统风险逐步转向运行状态动态化、控制链条耦合化、传导路径多样化等。与此同时,在全球气候变暖的背景下,极端天气事件发生频次、影响范围和破坏强度不断增加,持续冲击着电力系统传统的稳定边界,严重制约了其安全韧性水平的提升。因此,构建具备科学性、系统性与动态性的新型电力系统风险评估与运行优化机制,对于保障“双碳”目标下的电力系统安全运行具有重要意义。

近年来,已有多数学者针对不同极端天气引发的灾害开展了风险评估<sup>[1]</sup>,所用方法包括蒙特卡罗 (Monte Carlo, MC) 模拟<sup>[2]</sup>、解释结构模型 (Interpretative Structural Modeling, ISM)<sup>[3]</sup>、组合赋权法<sup>[4]</sup>等。此外,ZOU Yuansu 等<sup>[5]</sup>结合灰色系统理论、优劣解距离法与梯度提升树算法辨识了道路应急风险因子;LI Jian 等<sup>[6]</sup>采用信息扩散理论与马尔可夫链对可燃介质泄爆风险进行了动态建模;贺治超等<sup>[7]</sup>开发了多米诺事故风险评估系统,实现了多灾种、多米诺事故的动态建模与可视化响应。在电力系统风险评估研究方面,已有学者从振荡稳定性、灾害诱发风险、多源不确定性建模与信息物理协同等多角度展开研究。在震荡稳定性研究方面,吕振

华等<sup>[8]</sup>提出基于短路比与出力裕度的海上风电稳定边界评估方法;赵牧驰等<sup>[9]</sup>构建多端口阻抗频域分析框架,识别新能源系统的振荡模式;XUAN Gong<sup>[10]</sup>、ALDEEN<sup>[11]</sup>等从小扰动视角探讨大电网低频振荡与电压稳定性风险。在灾害诱发风险方面,邱刚<sup>[12]</sup>采用熵权法与灰色关联分析评估雷击跳闸概率;周毅<sup>[13]</sup>结合冰风荷载与潮流优化实现冰灾下输电线路的综合评估。在多源不确定性建模方面,NORUZI 等<sup>[14]</sup>通过融合 MC 与随机代数方法,提升了系统状态变量概率分布建模效率。PIAO 等<sup>[15]</sup>提出稳健区间的市级电力系统模糊规划方法,实现政策容忍度、电力供需平衡及排放约束的联合优化。在信息物理协同方向,ZHOU Long 等<sup>[16]</sup>利用贝叶斯网络 (Bayesian Networks, BN) 与 MC 方法,量化电力系统负荷损失概率;马梓刚<sup>[17]</sup>提出基于 Petri 网的工业控制系统功能与信息安全一体化评估方法;IESMANTAS 等<sup>[18]</sup>利用 BN 对输电网故障引发的级联停电事故开展了风险评估。综上所述,当前开展的电力系统风险评估多依赖静态结构或单一扰动模型,难以揭示多风险因素的动态耦合与传导机制,导致风险传播路径识别不全面。同时,传统的确定性模型难以反映极端天气下风险演化的动态特征。

鉴于此,笔者拟提出一种融合 BN 与 MC 模拟的风险评估模型,可有效辨识极端天气下城市新型电力系统风险因素,评估多风险因素耦合引发跳闸、短路等事故的发生概率,并量化不同优化措施的风险补偿效用度,以提升城市新型电力系统在复杂风

险情境下的应对能力。

## 1 城市新型电力系统风险评估模型构建

基于 BN 与 MC 的城市新型电力系统风险评估模型主要包括 3 个部分:①结合灾害理论辨识极端天气影响下城市新型电力系统的风险因素。②借助 ISM 梳理电力设备设施间的因果关系,辨识“极端天气-电力设备设施-事故后果”的风险传导路径,构建城市新型电力系统事故演化 BN。③基于识别出传导路径中的关键影响设备,运用 MC 方法模拟该设备不同优化策略下的风险状态,开展运行优化研究以提升极端天气下的系统稳定性。城市新型电力系统风险评估框架如图 1 所示。

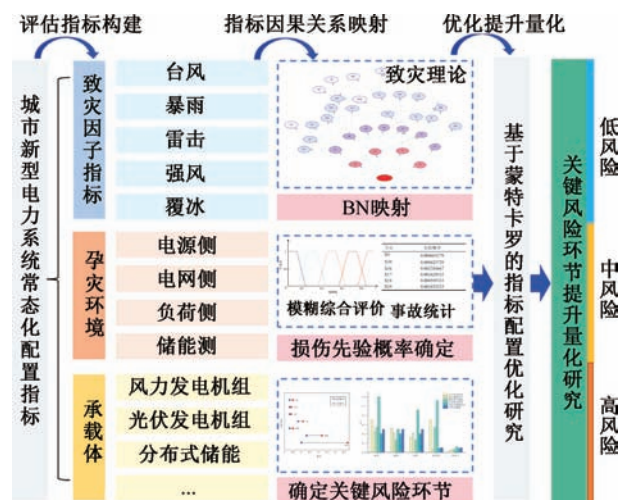


图 1 城市新型电力系统风险评估框架

Fig. 1 Risk assessment framework for new urban power systems

### 1.1 BN 与模糊评价

BN 是结合概率论原理和有向无环图的因果推理模型,通过一组条件概率函数表达不确定性,其节点可对应极端天气、城市新型电力系统各环节设备状态及风险事件等变量,有向边用于刻画这些变量间的因果依赖关系<sup>[19]</sup>,条件概率表(Conditional Probability Tables, CPTs)用来描述变量间的相关性。联合概率可以表示为:

$$P(C_1, C_2, \dots, C_n) = \prod_i P(C_i | \text{parent}(C_i)) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中:\$(C\_i)\$ 为子节点,表示各电网设备;\$\text{parent}(C\_i)\$ 为 \$C\_i\$ 的一组父节点;\$n\$ 为子节点的数量。

然而,在极端天气下城市新型电力系统风险评

估领域,极端天气强度与设备故障概率的关联、多设备故障引发系统风险等特定场景的概率信息往往伴随不确定性,因此,模糊评价结合 BN 形成处理这类概率不确定性、将专家经验等定性表达转换为数值概率的有效工具。使用梯形模糊数描述基本事件的失效概率,因为它在处理隶属函数和进行代数运算方面更加便捷。图 2 和下式展示了隶属函数的图形表示及其数学表达。

$$\mu(x) = \begin{cases} \frac{x - r_1}{r_2 - r_1} & r_1 \leq x \leq r_2 \\ 1 & r_2 \leq x \leq r_3 \\ \frac{r_4 - x}{r_4 - r_3} & r_3 \leq x \leq r_4 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

在评估过程中,根据专家的客观能力,如职位、服务时间和教育水平等,确定专家的权重,以减少主观认知偏差对结果的影响。根据下式结合专家权重计算加权模糊数,并通过聚合所有专家在每个事件状态下的加权模糊数,以支持后续的模糊处理来获得 CPTs。

$$M_i = \sum_{j=1}^f W_j \otimes A_{ij} = \sum_{j=1}^f W_j \times (r_1, r_2, r_3, r_4)_{ij} \quad (3)$$

式中:\$M\_i\$ 为事件 \$i\$ 的聚合模糊数;\$W\_j\$ 为专家 \$j\$ 的权重因子;\$A\_{ij}\$ 为根据专家 \$j\$ 对事件 \$i\$ 的语言描述对应的梯形模糊数;\$f\$ 为参与评估的专家总数。

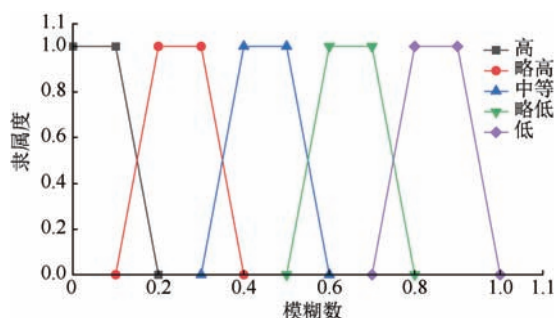


图 2 梯形模糊数隶属函数

Fig. 2 Trapezoidal fuzzy membership function

通过下式将模糊可能性(Fuzzy Possibility, FPs)转换为模糊概率 \$P\_f\$,以完成去模糊化。

$$P_f = \begin{cases} \frac{1}{10^K} & \text{if FPs} \neq 0 \\ 0 & \text{if FPs} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$K = \left[ \left( \frac{1 - \text{FPs}}{\text{FPs}} \right) \right]^{\frac{1}{3}} \times 2.301 \quad (5)$$

式中:\$K\$ 为常数;FPs 为模糊可能性分数。



1.2 MC 模拟

MC 方法是一种依靠重复随机采样以获取数值结果的广泛运用的计算技术。该方法的核心在于利用随机性应对多样化问题。依据大数定律,当样本数量足够大时,独立样本的经验均值将逐渐逼近其对应的随机变量的期望值。

在极端天气下城市新型电力系统风险评估与运行优化中,MC 模拟遵循以下核心步骤:首先,明确极端天气强度、电力设施设备信息、微地形信息等潜在输入参数的范围;然后,依据上述参数在实际场景中的概率分布随机生成输入数据,并将这些数据代入电力设施设备失效概率模型进行确定性计算;最后,汇总多次模拟的结果进行综合评估,为运行优化提供依据。MC 模拟的本质在于通过反复随机抽样与统计分析来求解问题,该过程实则是一连串的随机试验,尤其适用于处理电力系统中台风影响下杆塔相关未知参数难以直接获取的情景。

2 城市新型电力系统风险评估

2.1 风险因素辨识

极端天气影响下城市新型电力系统风险辨识的首要目标是辨识风险因素及其后果,因此,从以下方面辨识城市新型电力系统风险。

基于灾害系统理论归类梳理灾害链中的相关因素,电网设备台风灾害是指台风及其衍生次生灾害对电网设备设施造成破坏,引发电网设备设施局部或全部功能失效,甚至引发跳闸或大面积停电的现象<sup>[20]</sup>。因此,基于风险分析中收集到的城市新型电力系统相关建设标准、历史事故调查报告、相关文献<sup>[21-23]</sup>的分析,并结合相关领域专家经验,最终所辨识出的风险因素,见表 1。

表 1 极端天气影响下城市新型电力系统风险因素  
Table 1 Risk factors for new urban power systems under extreme weather conditions

| 编号    | 风险因素名称 | 编号    | 风险因素名称    |
|-------|--------|-------|-----------|
| $F_1$ | 台风     | $X_1$ | 倒塔        |
| $F_2$ | 暴雨     | $X_2$ | 双极闭锁      |
| $F_3$ | 雷击     | $X_3$ | 叶片结构损伤    |
| $F_4$ | 强风     | $X_4$ | 风电塔筒倒塌    |
| $F_5$ | 覆冰     | $X_5$ | 分布式光伏组件损坏 |
| $A_1$ | 风力发电机组 | $X_6$ | 主变压器过负载   |
| $A_2$ | 光伏发电机组 | $X_7$ | 太阳能电池板损坏  |
| $A_3$ | 配电架空线路 | $X_8$ | 架空线路断线    |
| $A_4$ | 分布式储能  | $X_9$ | 变电站倒塌     |

续表 1

| 编号       | 风险因素名称  | 编号       | 风险因素名称  |
|----------|---------|----------|---------|
| $A_5$    | 抽水蓄能电站  | $X_{10}$ | 发电机组故障  |
| $A_6$    | 电化学储能电站 | $X_{11}$ | 发电厂管道受损 |
| $A_7$    | 热储能电站   | $X_{12}$ | 绝缘子串受损  |
| $B_{15}$ | 线路跳闸    | $X_{13}$ | 避雷器接触树枝 |
| $B_{16}$ | 断路故障    | $X_{14}$ | 引流线脱落   |
| $B_{17}$ | 短路      | $X_{15}$ | 压力管道断裂  |
| $B_{18}$ | 横担放电    | $X_{16}$ | 储热管结构损伤 |
| $B_{19}$ | 设备损坏    | $X_{17}$ | 风冷系统失效  |

为清晰呈现上述各风险因素的具体识别依据,其详细来源见表 2。

表 2 城市新型电力系统风险因素来源统计  
Table 2 Statistical analysis of risk factors in urban new power systems

| 因素来源 | 节点编号                                                                |
|------|---------------------------------------------------------------------|
| 标准   | $F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, A_1, A_2, A_4, A_5, A_6, A_7, X_{16}$     |
| 相关文献 | $B_{15}, B_{16}, B_{17}, X_2, X_6, X_{10}, X_{11}, X_{12}, X_{17}$  |
| 事故报告 | $A_3, B_{19}, X_1, X_4, X_5, X_7, X_8, X_9, X_{13}, X_{14}, X_{15}$ |

2.2 风险传导路径辨识

在城市电网风险评估研究中,基于灾害系统理论可系统辨识出致灾因子、载体及孕灾环境等多维度风险要素。其中,载体包括城市新型电力系统输电线路、变电站、发电机组等直接设施设备对象,其自身属性及相互关联特征对风险演化过程具有关键影响。

为此,构建 ISM 邻接矩阵,严格基于风险因素辨识阶段所收集和整理的资料,对于来源于标准的因素,参考标准中的危险工况或故障模式描述来建立关系。对于来源于事故报告的因素,从报告正文描述的因果链中提取直接影响关系。为规避提取过程可能带来的主观性,组织由 2 位来自电网运行、设备制造及安全监管领域的专家检验初步构建的邻接矩阵,确保因果逻辑与工程实际的一致性,最终构建 ISM,如图 3 所示。

2.3 BN 映射

从 ISM 映射到 BN 的过程,核心在于将 ISM 所揭示的城市电网风险要素间的层次化因果关联转化为 BN 的概率化图形结构与参数。首先,将 ISM 中识别的风险要素包括设备故障、负荷波动、气象因素等,直接映射为 BN 的节点;其次,基于 ISM 的有向边与多级递阶结构,提取要素间的直接依赖关系,剔除间接关联以简化网络,作为 BN 中节点间的有向

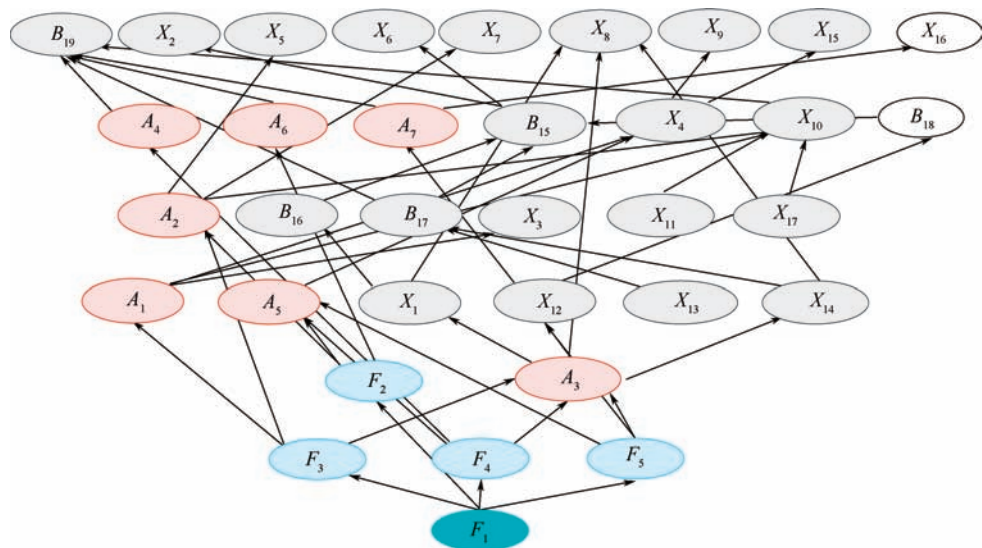


图 3 ISM 层级分析

Fig. 3 ISM hierarchy analysis diagram

边,同时保留 ISM 中顶层要素与底层要素的层级属性,确保因果方向一致性;最后,针对 ISM 中定性描述的要素影响强度,结合专家知识或历史数据进行量化转换,构建 BN 中各节点的 CPTs,将 ISM 的确定性层次关联拓展为 BN 中可量化的不确定性概率依赖关系,从而实现从定性结构分析到定量概率推理的衔接,为后续风险评估的不确定性传递与量化奠定基础。

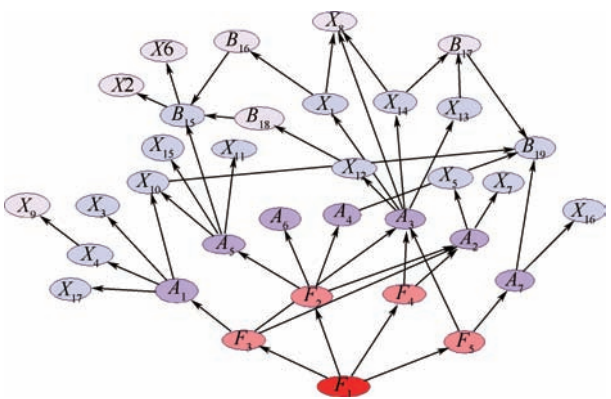


图 4 基于 ISM 映射后的 BN

Fig. 4 BN mapped based on ISM

2.4 BN 先验概率确定

- 1) 基于统计数据。统计 2015 年以来台风、强降雨等极端天气引发的城市新型电力系统事故,部分根节点的先验概率见表 3。
- 2) 基于模糊评价。由于城市新型电力系统中部分设备的故障数据难以通过历史数据或试验拟合数据直接获得,因此,需采用模糊评价方法,以确定剩余 BN 节点的先验概率或条件概率。该模糊评价

表 3 基于统计数据的部分根节点的先验概率

Table 3 Prior probabilities of some root nodes based on statistical data

| 节点       | 先验概率          | 节点       | 先验概率          |
|----------|---------------|----------|---------------|
| $F_1$    | 0.136 363 636 | $B_{19}$ | 0.068 181 818 |
| $F_2$    | 0.056 818 182 | $X_1$    | 0.261 3636 36 |
| $F_3$    | 0.022 727 273 | $X_2$    | 0.011 494 253 |
| $F_4$    | 0.034 090 909 | $X_3$    | 0.045 454 545 |
| $F_5$    | 0.011 363 636 | $X_4$    | 0.011 363 636 |
| $A_1$    | 0.045 454 545 | $X_8$    | 0.261 363 636 |
| $A_3$    | 0.363 636 364 | $X_9$    | 0.068 181 818 |
| $B_{15}$ | 0.034 090 909 | $X_{10}$ | 0.079 545 455 |
| $B_{16}$ | 0.238 636 364 | $X_{12}$ | 0.011 363 636 |
| $B_{17}$ | 0.215 909 091 | —        | —             |

过程分为 2 个阶段:第 1 阶段先收集专家的基本信息,涵盖其专业职级、最高学历、相关工作经验及研究领域等内容;再依据表 4 量化处理上述信息,并基于下式计算得出每位专家的最终权重:

$$W_i = \frac{E_i}{\sum_{j=1}^n E_j}$$

(6)

式中: $W_i$  为分配给第  $i$  位专家的权重; $E_i$  为根据经验、学历、领域贡献程度或其他相关因素对第  $i$  位专家的评价得分。

确保专家评价的权威性和代表性,邀请 5 位来自城市电力系统不同领域的资深专家,其专业背景全面覆盖风力发电、光伏发电及配电系统运行等关键领域,具体的专家权重得分见表 5。

表 4 专家权重分配标准  
Table 4 Expert Weighting Standards

| 属性           | 描述           | 分数 |
|--------------|--------------|----|
| 专业职级         | 教授级高级工程师/教授  | 10 |
|              | 高级工程师/副教授    | 8  |
|              | 工程师/讲师       | 6  |
|              | 助理工程师/助教     | 5  |
|              | 一线操作人员       | 2  |
| 最高学历         | 博士           | 10 |
|              | 硕士           | 8  |
|              | 学士           | 6  |
|              | 专科           | 4  |
| 相关工作<br>经验/a | >20          | 10 |
|              | 15~20        | 8  |
|              | 10~15        | 6  |
|              | 5~10         | 4  |
| 研究领域         | 确定           | 10 |
|              | 分布式光伏/风电集群控制 | 8  |
|              | 交直流混合配网      | 6  |
|              | 智能变电站与自动化    | 4  |
|              | 电力系统调度自动化    | 2  |

表 5 专家权重得分  
Table 5 Expert Weighting

| 编号 | 权重得分 |      |      |       | 权重   |
|----|------|------|------|-------|------|
|    | 专业职级 | 工作经验 | 最高学历 | 判断确定性 |      |
| 1  | 8    | 4    | 10   | 8     | 0.25 |
| 2  | 6    | 4    | 10   | 6     | 0.22 |
| 3  | 2    | 6    | 10   | 8     | 0.22 |
| 4  | 2    | 2    | 8    | 6     | 0.15 |
| 5  | 2    | 2    | 8    | 8     | 0.16 |

第 2 阶段需要专家模糊评价特定事件的可能性,如专家 1 对节点  $X_{11}$  发生的概率评定为“低(L)”。再基于表 4 将模糊描述转换为梯形模糊数,根据式(2)一式(6)计算节点的模糊概率,节点的先验概率模糊评价过程的相关参数见表 6、表 7。

表 6 专家判断对应的模糊数  
Table 6 Experts judge the corresponding fuzzy number

| 发生概率描述  | 模糊数               |
|---------|-------------------|
| 非常高(VH) | (0.8,0.9,1.0,1.0) |
| 高(H)    | (0.8,0.9,0.9,1.0) |
| 略高(SH)  | (0.5,0.6,0.7,0.8) |
| 中等(M)   | (0.4,0.5,0.5,0.6) |
| 略低(SL)  | (0.2,0.3,0.4,0.5) |
| 低(L)    | (0.1,0.2,0.2,0.3) |
| 非常低(VL) | (0.0,0.0,0.1,0.2) |

表 7 专家判断对应的模糊数

Table 7 Experts judge the corresponding fuzzy number

| 编号                     | 专家评价结果 |   |    |    |    | 模糊数                           |
|------------------------|--------|---|----|----|----|-------------------------------|
|                        | 1      | 2 | 3  | 4  | 5  |                               |
| $A_2 = 1$<br>$X_7 = 1$ | H      | H | H  | SH | SH | (0.615,0.718,<br>0.771,1.028) |
| $A_2 = 1$<br>$X_7 = 0$ | L      | L | SL | L  | SL | (0.138,0.238,<br>0.276,0.376) |

3 城市新型电力系统风险评估结果分析

在构建 BN 之后,可进行因果推理、敏感性分析和情景分析<sup>[24]</sup>,其中,敏感性分析作为 BN 中的关键步骤,用来计算查询节点对证据节点的敏感性。情景分析可具体量化不同风险因素同时发生对后果概率的影响。

3.1 敏感性分析

将证据节点线路跳闸事故、设备损坏事故、双极闭锁事故、变压器过负载事故的状态依次设置为“是”,观察各中间节点的先验概率和后验概率的变化,如图 5 所示,按分割线所示,由上至下依次为变压器过负载、双击闭锁、设备损坏以及线路跳闸事故。

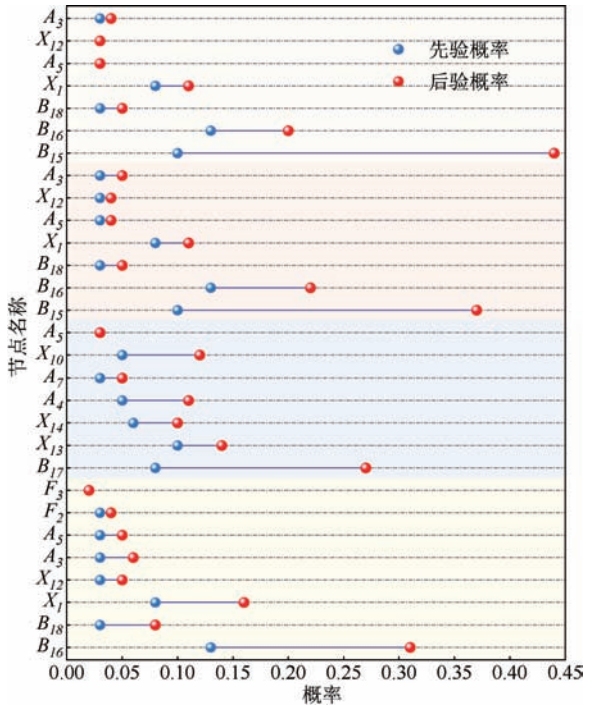


图 5 BN 敏感性分析结果

Fig. 5 BN sensitivity analysis results

线路跳闸事故的主要诱因是断路故障(敏感性



0.18,后验概率显著升至 0.31),需重点优化保护装置和开关设备;次要因素为倒塔(0.08)和横担放电(0.05),应加强杆塔结构检查和绝缘防护;其余因素影响微弱,可维持常规运维。建议优先防控电气故障,兼顾机械性缺陷管理。

设备损坏的主要风险因素是短路(后验概率 0.27,差值 0.19),需重点加强短路防护和快速隔离措施;发电机组故障(差值 0.07)和分布式储能(差值 0.06)为次要因素,应优化其运行维护;避雷器接触树枝和引流线脱落(差值均为 0.04)也需定期检查;而热储能电站和抽水蓄能电站影响较小。建议优先防控短路风险,同时关注发电机组和分布式储能的可靠性管理。

从双极闭锁的敏感性分析结果来看,线路跳闸和断路故障是主要影响因素,线路跳闸的敏感性为 0.27,先验概率 0.1,后验概率提升至 0.37,关联程度显著增强;其次断路故障敏感性为 0.09,二者对双极闭锁的驱动作用最为突出。其余节点中,横担放电、配电架空线路敏感性为 0.02,倒塔为 0.03,抽水蓄能电站和绝缘子受损为 0.01,敏感性均较低,后验概率仅略高于先验概率,表明它们对双极闭锁的影响较弱。

变压器过负载的主要影响因素是线路跳闸(敏感性 0.34,后验概率显著上升至 0.44),需优先防控;断路故障(0.07)和倒塔(0.03)影响较小但需次要关注。因此,运维应重点加强线路跳闸事故的监测与保护。

3.2 风险耦合情景分析

在情景分析中,重点分析暴雨、强风、雷击 3 类典型极端天气事件,取值为“发生(Yes)”或“未发生(No)”,输出变量为 7 类电力设施(风力发电机组、抽水蓄能电站、配电架空线路、光伏发电机组、电化学储能电站、分布式储能)在不同情景下的故障概率,最终共设计 5 类情景,见表 8。

表 8 BN 情景设置

Table 8 BN scenario setting

| 情景编号 | 暴雨  | 强风  | 雷击  |
|------|-----|-----|-----|
| 1    | Yes | Yes | Yes |
| 2    | Yes | Yes | No  |
| 3    | Yes | No  | Yes |
| 4    | No  | Yes | Yes |
| 5    | No  | No  | No  |

随后借助在 Genie 软件中实现 BN 情景分析,如图 6 所示,如情景 2 在暴雨和雷击节点中,将状态设

置为发生,点击更新按钮实现其他节点的概率更新。

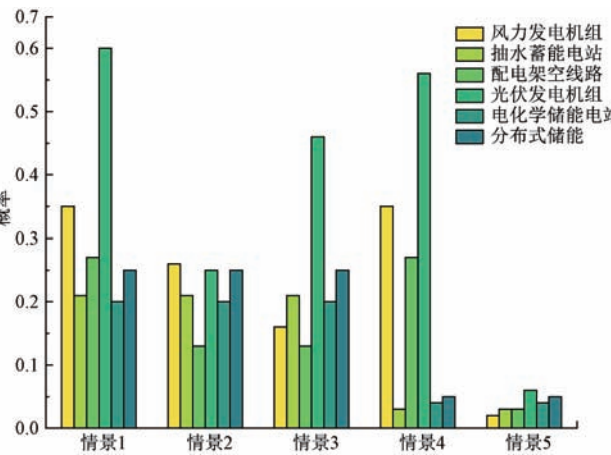


图 6 BN 情景分析结果

Fig. 6 BN scenario analysis results

BN 情景分析软件结果如图 7 所示,从图 6 和图 7 可以看出,极端天气因素的组合对不同电力设施的故障概率影响存在显著差异,当暴雨、强风、雷击同时发生(情景 1)时,光伏发电机组的故障概率最高(60%),显著高于其他设施,表明光伏组件对多重极端天气的敏感性最强,可能与光伏板暴露在外、易受雷击损坏及强风导致支架变形有关。其次是风力发电机组(35%)和配电架空线路(27%),这 2 类设施因户外布置特性,易受强风与暴雨的联合冲击(如风机叶片过载、线路覆冰或倒塔)。

对比情景 2 与情景 3 可知:强风的发生使光伏发电机组故障概率从 25%升到 45%,说明强风是光伏发电机组故障的关键驱动因素,而电化学储能电站与分布式储能设施受强风影响较小,可能与其地下厂房的结构特性相关。风力发电机组故障概率从 16%上升至 27%,说明强风是风机故障的主导因素。

情景 4 中,抽水蓄能电站故障概率骤降至 3%,电化学储能与分布式储能故障概率(4%、5%)显著低于其他情景,表明此类设施对强风与雷击的组合敏感性较低,可能与其封闭性设计或选址策略有关。

电化学储能电站与分布式储能的故障概率波动较小(4%~20%),表明其受直接天气因素影响较弱,故障可能更多与内部设备状态相关;风力发电机组在强风参与的情景(1、2、4)中故障概率均为 26%~35%,凸显其对强风荷载的依赖性。

3.3 基于 MC 的城市新型电力系统风险补偿作用分析

综上,线路跳闸的诱因中,除断路等电气故障外,倒塔等机械性缺陷是次要但需关注的因素。杆

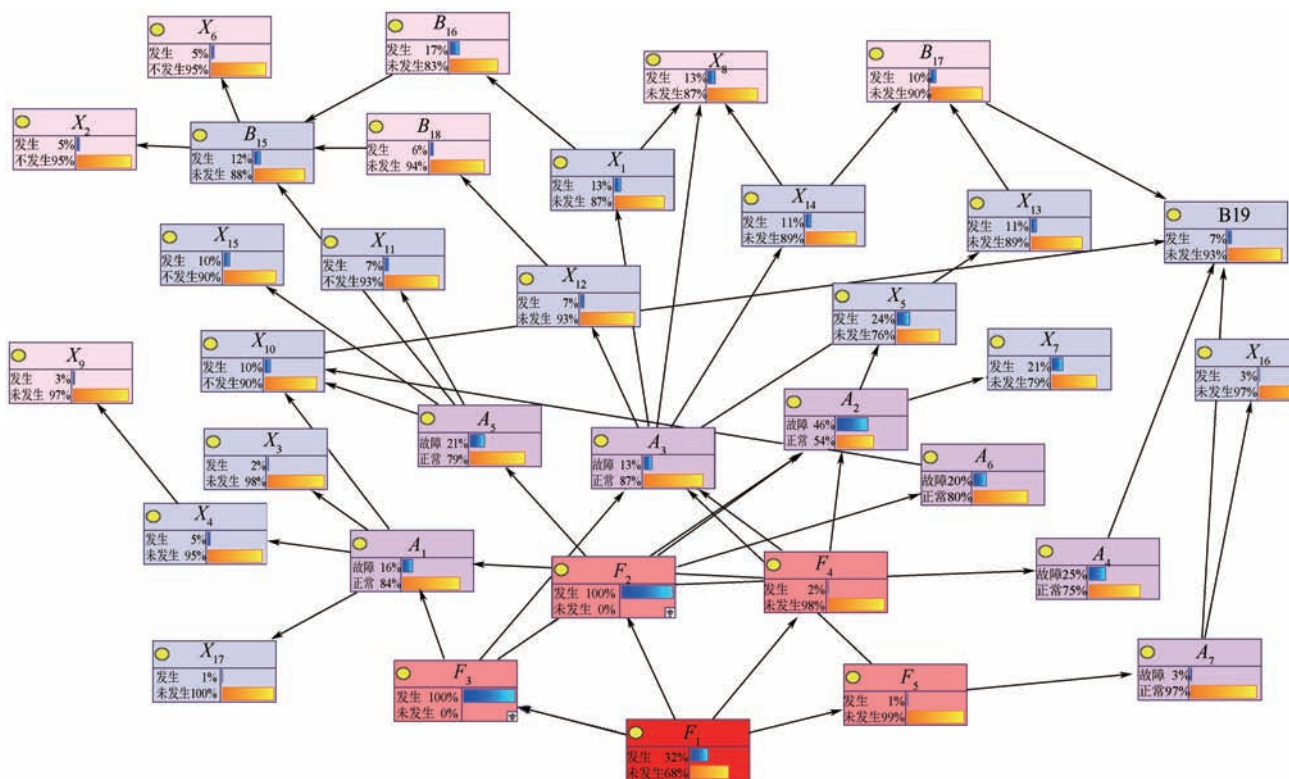


图 7 BN 情景分析软件结果

**Fig. 7** BN scenario analysis results in software

塔作为线路的核心机械支撑,其结构稳定性直接影响线路整体可靠性,进一步分析杆塔的结构强度、抗风设计等,可针对性解决倒塔这一机械缺陷,与电气故障防控形成互补,提升了线路运维的全面性。

台风是研究中考虑的极端事件,因为它在该地区最常见。这类极端事件通常采用最大持续风速的概率分布进行建模。对于此类建模,建议采用 Gumbel 概率分布。Gumbel 分布在方程中定义如下:

$$N(v) = \exp(\exp(-a(v-b))) \quad (7)$$

$$a = \frac{\pi}{\sigma\sqrt{6}} \quad (8)$$

$$b = \bar{v} - 0.45\sigma \quad (9)$$

式中:  $N(v)$  为 Gumbel 极值分布函数;  $v$  为台风极值事件的最大持续风速;  $a$  为尺度参数;  $b$  为位置参数;  $\bar{v}$  为历史数据得到的平均最大持续风速;  $\sigma$  为历史数据得到的最大持续风速的标准差。利用式(8)的逆变换, 可采样得到台风极端事件的最大持续风速。

为获得杆塔受损概率随风速的变化情况,利用 Logistic 模型找出各条件属性值与受损概率  $P_d$  之间的关系,由于  $P_d$  只在  $0 \sim 1$  变化,不适合采用最小二乘法,因此,对  $P_d$  进行 Logit 变换:

$$\alpha = \ln [P_d / (1 - P_d)] \quad (10)$$

式中  $\alpha$  为对  $P_d$  进行 Logistic 模型变换后得到的值,  $\alpha$  在整个实数域内, 可用最小二乘法进行拟合:

$$\alpha = d_0 + d_1 \cdot x_1 + \dots + d_n \cdot x_n \quad (11)$$

式中: $d_i$  为常系数; $x_i$  为各条件属性值。根据下式:

$$P(Y = 1) = \frac{1}{1 + \exp(-(d_0 + d_1 \cdot x_1 + \dots + d_n \cdot x_n))} \quad (12)$$

式中  $Y$  为分级的指标,  $Y=1$  表示电力杆塔受损,  $Y=0$  表示未受损。文中重点分析台风对电力杆塔造成的机械损伤, 而损伤事件是一个二分类变量。在相关数据可得的情况下, 选取 YU Shiwen 等<sup>[25]</sup> 提出的台风信息、电力杆塔信息及微地形信息 3 方面进行建模:

根据上述信息推导出模型基本结构,如下:

$$P(Y = 1) = 1 / (1 + \exp(-(d_0 + d_1 \cdot \text{MG} + d_2 \cdot DW + d_3 \cdot T + d_4 \cdot \text{AL} + d_5 \cdot \text{AS} + d_6 \cdot \text{SL} + d_7 \cdot R))) \quad (13)$$

式中:MG (Maximum Gust) 为最大阵风风速, m/s;  
DW (Design Wind) 为设计风速, m/s;  $T$  为时间, a;  
AL (Altitude) 为高程, m; AS (Aspect) 为坡向, ( $^{\circ}$ );  
SL (Slope) 为坡度, ( $^{\circ}$ );  $R$  为粗糙度, 即地表风速为



0 时的高度, m。根据拟合结果, 同时选取 YU Shiwen 等<sup>[25]</sup>所筛选出的显著性较强的电力杆塔损伤的 Logistic 模型协变量方程。

提升抗风等级后的杆塔损伤概率曲线如图 8 所示, 由图 8 可知: 抗风等级越高失效概率下降越显著, 以实时风速 36 km/h 为例, 当杆塔的抗风等级为 35 km/h 时, 杆塔的失效概率达到 79.89%, 杆塔的抗风等级为 40 km/h 时, 失效概率为 20.5%, 总降幅达到 59.39%, 说明提升抗风等级对降低杆塔失效风险效果显著。同时, 抗风等级提升也存在非线性特征, 在低风速区段, 风速为 40 km/h 时, 当杆塔的抗风等级从 35 km/h 提升至 36 km/h 时, 杆塔失效概率下降 7.7%, 从 36 km/h 提升至 37 km/h 时, 失效概率下降 9.83%, 从 37 km/h 提升至 38 km/h 时,

失效概率下降 12.5%。在中风速区段, 风速为 45 km/h 时, 杆塔失效概率依次下降 3.95%、6.07%、8.89%, 在相同的抗风等级提升幅度下, 低风速区段的失效概率下降幅度普遍大于中风速区段, 因此, 在实际工程中, 对于经常面临高风速威胁的地区, 提升抗风等级虽然能降低风险, 但可能需要更大幅度的提升或结合其他措施。

4 结 论

1) 极端天气条件下城市新型电力系统需优先防控线路跳闸和断路故障 2 个敏感性较高的节点, 同时加强短路防护和发电机组维护, 以有效降低双极闭锁和变压器过载等连锁故障概率。

2) 极端天气因素与电力设施自身属性对系统风险的影响存在显著差异。在暴雨、强风、雷击同时发生的情景下, 其故障概率高达 60%, 且强风是导致其故障的关键驱动因素。风力发电机组和配电架空线路因户外布置特性, 易受强风与暴雨联合冲击, 在强风参与的情景中, 二者故障概率处于 26%~35%。

3) 提升电力设施抗风等级对降低失效风险效果显著: 以杆塔为例, 当实时风速为 36 km/h 时, 将抗风等级从 35 km/h 提升至 40 km/h, 可使失效概率下降 59.39%。抗风等级提升存在非线性特征, 低风速区段的失效概率下降幅度普遍大于中风速区段。

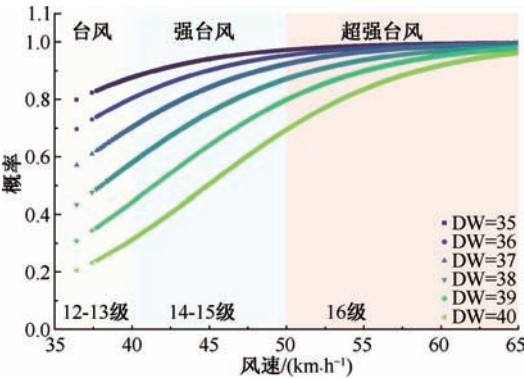


图 8 提升抗风等级后的杆塔损伤概率曲线  
Fig. 8 Probability curve of tower damage after improving the wind resistance level

参 考 文 献

[1] ZHENG Yanhao, LI Junru, LI Jinhui, et al. Quantitative risk assessment of road posed by levee slope failure: a novel framework integrating Monte Carlo simulation and material point method[J]. Engineering Geology, 2025, 353: DOI: 10.1016/J.ENGGEOL.2025.108148.

[2] 张振波, 郝宝盛, 李献民, 等. 山岭隧道建造全过程瓦斯风险评估方法: 以中梁山隧道工程为例[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(16): 6 933-6 941.

[3] ZHANG Zhenbo, QIE Baosheng, LI Xianmin, et al. Gas risk assessment method for the whole construction process of mountain tunnel: taking Zhongliangshan tunnel project as an example[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(16): 6 933-6 941.

[4] 李源, 尹纯亚, 商乔晏. 基于 ICEM 与 NM-TDO-BP 的变电站气象灾害风险评估[J]. 高电压技术, 2025, 51(10): 5 103-5 113.

[5] LI Yuan, YIN Chunya, SHANG Qiaoyan. Meteorological disaster risk assessment of substations based on ICEM and NM-TDO-BP[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(10): 5 103-5 113.

[6] 文海家, 颜方毅, 赵静宜, 等. 山区高速公路滑坡风险评估研究[J]. 中国公路学报, 2025, 38(10): 50-61.

[7] WEN Haijia, YAN Fangyi, ZHAO Jingyi, et al. Research on landslide risk assessment of mountainous highways[J]. China Journal of Highway and Transport, 2025, 38(10): 50-61.

[8] ZOU Yuansu, WU Jun, ZHOU Jing, et al. Grey stochastic TOPSIS-based ensemble learning for risk assessment on road traffic emergencies[J]. Quality and Reliability Engineering International, 2025, 41(5): 1 714-1 734.

[9] LI Jian, YANG Zhao, HE Hongxia, et al. Quantitative risk model and safety assessment of flammable working fluid leakage and explosion in a limited space[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2025, 96: DOI: 10.1016/J.JLP.2025.105620.

[10] 贺治超, 兰猛, 贺非凡, 等. 基于概率性仿真的危化品多米诺事故风险动态评估软件系统设计与应用[J]. 中国安全

生产科学技术,2025,21(4):5-11.

HE Zhichao, LAN Meng, HE Feifan, et al. Design and application of software for dynamic risk assessment on domino accidents of hazardous chemicals based on probabilistic simulation[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2025, 21(4): 5-11.

- [8] 吕振华,葛亚明,李纪元,等. 海上风电交流汇集并网系统稳定边界构建及振荡风险评估方法[J/OL]. 高电压技术: 1-15. [2025-06-22]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20241975>.  
LYU Zhenhua, GE Yaming, LI Jiyuan, et al. The method of stability boundary construction and comprehensive oscillation risk assessment for offshore wind farms grid-connected system[J/OL]. High Voltage Engineering: 1-15. [2025-06-22]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20241975>.
- [9] 赵牧驰,汪海蛟,何国庆,等. 基于多端口筛查的新能源基地振荡风险评估方法[J/OL]. 电网技术: 1-13. [2025-06-22]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2025.0016>.  
ZHAO Muchi, WANG Haijiao, HE Guoqing, et al. A multi-port screening method for assessing oscillation risks in renewable energy bases[J/OL]. Power System Technology: 1-13. [2025-06-22]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2025.0016>.
- [10] XUAN Gong, DONG Feifei, DONG Chao, et al. Probabilistic stability analysis of low frequency oscillation of largescale interconnected power grid based on the theory of point estimation method and risk assessment[J]. Tehnicki Vjesnik-technical Gazette, 2015, 22(6): 1 393-1 398.
- [11] ALDEEN M, SAHA S, ALPCAN T, et al. New online voltage stability margins and risk assessment for multi-bus smart power grids[J]. International Journal of Control, 2015, 88(7): 1 338-1 352.
- [12] 邱刚,高超,陈杰,等. 架空输电线路雷击跳闸风险评估方法研究[J]. 机械设计与制造, 2025 (2): 99-102, 108.  
QU Gang, GAO Chao, CHEN Jie, et al. Research on the risk assessment method of lightning tripping for overhead transmission lines[J]. Machinery Design & Manufacture, 2025 (2): 99-102, 108.
- [13] 周毅,杨海,秦康平,等. 考虑冰风载荷影响的输电线路运行风险评估方法[J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(7): 142-148.  
ZHOU Yi, YANG Hai, QIN Kangping, et al. Risk assessment method for transmission line operation considering influence of ice and wind loads[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2021, 17 (7): 142-148.
- [14] NORUZI A, BANKI T, ABEDINIA O, et al. A new method for probabilistic assessments in power systems, combining monte carlo and stochastic-algebraic methods[J]. Complexity, 2015, 21(2): 100-110.
- [15] PIAO M J, LI Y P, HUANG G H, et al. Risk analysis for Shanghai's electric power system under multiple uncertainties[J]. Energy, 2015, 87: 104-119.
- [16] ZHOU Long, PENG Zewu, LIU Xindong, et al. Risk assessment of power system considering the CPS of transformers[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018: DOI: 10.1088/1755-1315/113/1/012194.
- [17] 马梓刚,麻荣宽,李贝贝,等. SSPN-RA:基于SS-petri网的工业控制系统安全一体化风险评估方法[J]. 计算机科学, 2024, 51 (10): 380-390.  
MA Zigang, MA Rongkuan, LI Beibei, et al. SSPN-RA: security integration risk assessment method for ICS based on SS-petri Net[J]. Computer Science, 2024, 51 (10): 380-390.
- [18] IEŠMANTAS T, ALZBUTAS R. Bayesian assessment of electrical power transmission grid outage risk[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 58: 85-90.
- [19] 秦荣水,石晨晨,陈超,等. 基于模糊贝叶斯网络的城市商业综合体火灾风险分析[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(12): 176-182.  
QIN Rongshui, SHI Chenchen, CHEN Chao, et al. Risk analysis on fire accident of urban commercial complex based on fuzzy Bayesian network[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(12): 176-182.
- [20] 张津嘉. 台风条件下电网设备灾害演化机制[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(11): 179-184.  
ZHANG Jinjia. Evolution mechanism of disasters of power grid equipment under typhoon[J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(11): 179-184.
- [21] DL/T1500—2016, 电网气象灾害预警系统技术规范[S].  
DL/T1500-2016, Technical specification for the meteorological disaster forewarning system of grid[S].
- [22] GB/T 46241—2025, 风能发电系统 风力发电机组机舱风速传递函数数测量[S].  
GB/T 46241-2025, Wind energy generation systems: measurement based nacelle wind speed transfer function of electricity producing wind turbines[S].
- [23] GB/T 19964—2024, 光伏发电站接入电力系统技术规定[S].  
GB/T 19964-2024, Technical requirements for connecting photovoltaic power station to power system[S].
- [24] ZHU Xiaoping, WU Jiansong, BAI Yiping, et al. Integrating FBN and FDS for quantitative risk assessment of cable fire in utility tunnel[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2024, 88: DOI: 10.1016/j.jlp.2024.105266.
- [25] YU Shiwen, HAO Wu, HAO Geng, et al. Study on risk assessment of the electric power tower and pole damage in power system under typhoon disaster[J]. Procedia Computer Science, 2018, 130: 1 164-1 169.

作者简介: 刘坤琦 (2000—),女,山西太原人,博士研究生,主要研究方向为安全科学。E-mail: taylorkqi@163.com。