

极端气象条件下综合能源系统可靠性评估方法 研究与展望

曾林俊¹, 马宏毅², 肖 赞², 卿 巍¹, 徐佳妮¹, 刘 铮¹

(1. 长沙理工大学能源与动力工程学院, 长沙 410114; 2. 长沙理工大学国际工学院, 长沙 410114)

摘 要: 全球气候变化背景下, 极端高温、严寒低温冰冻、强风暴雨等极端气象事件频发, 严重威胁综合能源系统(IES)的运行可靠性。基于上述事件, 首先, 聚焦极端气象下综合能源系统可靠性评估方法, 深入剖析极端高温、严寒低温冰冻、强风暴雨3种极端气象对能源生产设备, 涵盖发电、供热、储能设备及能源传输网络的多方面影响。其次, 全面综述针对这些极端气象的综合能源系统可靠性评估方法, 探讨现有方法在气象数据处理、系统耦合建模、多方法融合、韧性量化及多因素考量等方面的不足。最后, 对极端气象条件下综合能源系统运行可靠性评估提出未来可能的研究方向, 旨在为提升极端气象下 IES 可靠性评估的准确性与有效性提供一定的理论与实践参考, 保障能源供应安全与稳定。

关键词: 综合能源系统; 极端气象; 可靠性; 评估

中图分类号: TM732

文献标志码: A

0 引 言

近年来, 受气候变化影响, 极端天气事件的出现频率呈增多、增强趋势, 所造成的大规模停电事故频发, 由此带来巨大的经济损失和社会影响, 对全球能源系统的稳定性和可靠性构成严峻挑战。由于电能使用的领域广泛, 同时电力故障传播速度极快, 使得电力系统故障导致大停电事件并不罕见, 如 21 世纪以来发生的美加“8·14”大停电事件^[1]及印度“7.30”大停电事件^[2]在实现电力、热力、天然气系统之间的互联耦合后, 相对于单独的电力系统而言, 互联系统极大的增加了系统运行以及控制的复杂度, 给综合能源系统(integrated energy system, IES)安全可靠运行带来更大挑战。



图1 极端气象条件下电力系统事件脉络

Fig. 1 Integrated energy system failure event pulse

极端气象条件, 不仅能直接破坏能源基础设施, 还可能导致能源供应中断, 影响 IES 稳定运行^[3]。当 IES 受到极端事件破坏时, 其相对复杂的结构和较大的规模, 在极端天气

导致电气元件高故障率的背景下, 故障连锁的隐患尤为凸显, 将会影响数百万用户的电力供应^[4], 而天然气供应中断则可能导致供暖和工业生产的严重问题^[5]。因此, 研究极端气象事件对 IES 可靠性的影响, 以及如何提高能源系统在这些条件下的可靠性, 成为能源领域的一个重要课题。

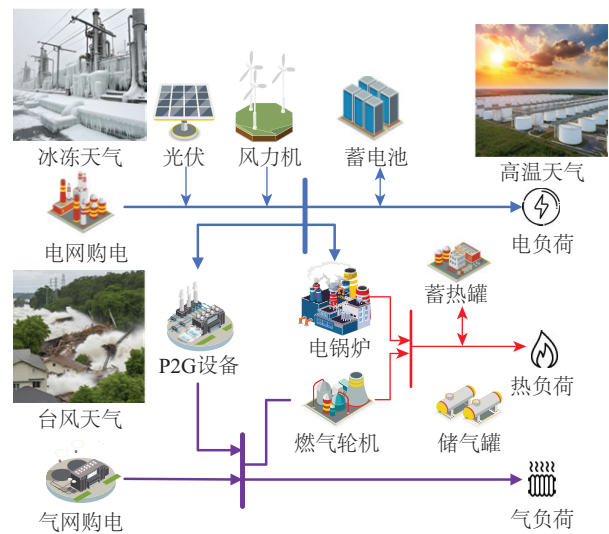


图2 极端气象影响下综合能源系统结构

Fig. 2 Structure of IES under extreme meteorological conditions

IES 可靠性是指能源系统经受扰动并不间断向用户提供能源的能力。可靠性包括充裕度和安全性两个评估方面, 充

收稿日期: 2025-01-21

基金项目: 湖南省自然科学基金(2026JJ80510); 国家自然科学基金(52307080); 湖南省大学生创新训练项目(S202410536180)

通信作者: 曾林俊(1993—), 男, 博士、讲师, 主要从事极端气象下综合能源系统优化等方面的研究。zenglj23@csust.edu.cn

裕度是指系统具备足够的容量,能在任何时候满足用户峰值需求,反映了系统的稳态性能;安全性是指系统在面临事故状态时具有保障安全、防止连锁反应,并保持在可控范围内的能力,展现了系统的动态性能。IES 可靠性评估对保障能源系统的稳定运行,具有关键作用;对制定能源政策、优化能源结构、提高能源效率和促进可持续发展具有重要意义^[6-7]。目前,极端气象条件下 IES 的可靠性评估面临着许多挑战。首先,极端气象事件的不确定性以及不可预测性增加了评估的复杂性^[8]。其次,不同能源系统之间的相互耦合,使需要的评估方法更加综合和复杂^[9]。最后,能源系统的物理特性和运行模式在极端气象条件下可能发生变化,这要求评估方法能适应这些变化^[10]。综上,极端高温、严寒低温冰冻、强风暴雨等极端气象事件对能源系统的影响^[11]和 IES 在现代社会中的作用及可靠性评估在能源系统管理中的重要性^[12],共同构成了研究背景。值得关注的是,极端气象事件往往并非孤立发生,例如台风可能伴随强降雨和低温,寒潮期间可能叠加冰雪与大风。这种多气象条件的协同效应可能对 IES 产生非线性叠加甚至倍增的破坏力。现有研究多聚焦单一气象条件的影响,对多气象耦合作用下的系统可靠性评估方法仍需深入探索。本文通过对极端高温、严寒低温冰冻、强风暴雨 3 种极端气象的深入分析和研究,可为 IES 的设计、规划和运行提供理论基础和实践指导,以提高其在极端气象条件下的可靠性和韧性^[13]。

1 极端高温对综合能源系统可靠性的影响

随着全球气候变暖,极端高温会直接影响 IES 能源生产设备的效率与寿命、改变能源传输网络的工作条件,并对 IES 的可靠性构成威胁。在这样的背景下,深入研究极端高温对 IES 的可靠性变得尤为关键。图 3 为极端高温对 IES 可靠性的影响及评估方法。

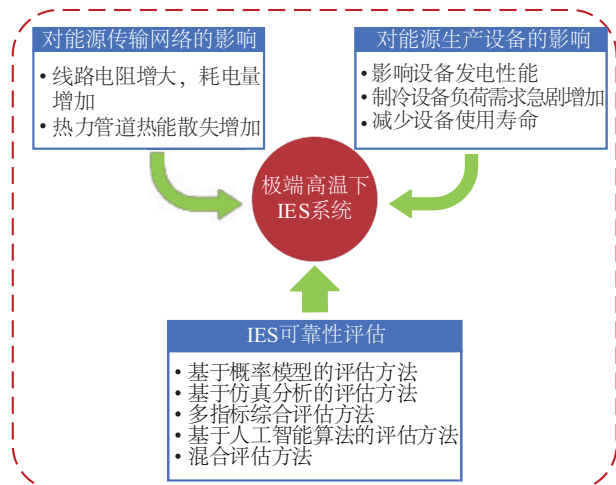


图3 极端高温对综合能源系统可靠性的影响及评估方法

Fig. 3 Impacts of extreme high temperatures on reliability of IES and assessment methods

1.1 极端高温对能源生产设备的影响

1.1.1 发电设备

极端高温显著影响传统发电设备的运行性能,水电出力减少以及设备过热损坏等问题。文献[14]通过构建压气机进气冷却系统的多物理场耦合模型,定量揭示了高温环境对燃气轮机热力性能的链式冲击:当环境温度从 25 °C 升至 45 °C 时,压气机入口空气密度下降,导致燃烧室燃料-空气当量比偏离设计值,燃烧效率从 92.3% 降至 84.1%,净发电功率大幅下降。对于蒸汽轮机发电系统,高温环境影响锅炉的热交换效率,使蒸汽产量和品质下降,最终影响蒸汽轮机的输出功率与运行稳定性^[15]。

极端高温同样对可再生能源发电方面带来挑战。对于光伏发电系统,高温会导致光伏面板的光电转换效率降低。随着温度升高,太阳能电池中的半导体材料特性发生变化,从而使发电功率下降^[16]。一般而言,光伏面板温度每升高 1 °C,发电效率可能降低 0.3%~0.5%。对于风力发电设备,高温可能影响风力机的润滑系统和电气设备性能。高温使润滑油粘度降低,增加部件摩擦损耗;同时,电气设备在高温下的绝缘性能下降,影响风力机的正常运行与发电效率^[17]。

1.1.2 制冷设备

在极端高温环境下,空调等制冷设备的大量使用导致电力需求激增。制冷设备的高负荷运行,这不仅加重了 IES 的供电负担,还可能因长时间高负荷运行导致设备故障^[18]。此外,高温还会降低制冷设备的制冷效率,由于冷凝器散热困难,冷凝压力升高,压缩机功耗增大,进一步影响制冷设备的可靠性与使用寿命^[19]。

1.1.3 储能设备

极端高温对储能设备的性能和寿命产生不可忽视的影响。对于锂离子电池储能系统,高温会加速电池内部的副反应,导致电池自放电加剧,容量衰减加快^[20]。当环境温度长期高于 35 °C 时,锂离子电池的容量每年可能衰减 5%~10%。同时,高温还会增加电池热失控的风险,威胁储能系统的安全性与可靠性。对于热储能设备,如熔盐储能系统,极端高温环境会增加热量散失,降低储能效率,影响其在 IES 中削峰填谷、调节供需平衡的能力^[21]。

1.2 极端高温对能源传输网络的影响

1.2.1 电力传输网络

极端高温使电力传输线路的电阻增大,电能损耗加剧。根据金属导电特性^[22],线路电阻随温度升高而增加,导致线路损耗呈指数上升。在实际电网运行中,夏季极端高温时,部分线路的电能损耗较常温时可增加 20%~30%。此外,高温引起线路热膨胀使线路弧垂增大,可能导致线路与树木、建筑物等物体的安全距离不足,显著增加放电短路事故的发生

生概率,威胁电力传输的安全性与可靠性。同时,高温还会加速电缆绝缘材料的老化,降低电缆的绝缘性能,增加电缆故障概率^[23]。

1.2.2 热力与燃气传输网络

对于 IES 热力传输网络,极端高温环境下,热力管道与周围环境的温差减小,散热功率增加,这将导致热力传输效率降低,终端用户的供热质量难以保证^[24]。在燃气传输网络方面,高温会使燃气管道的材料性能发生变化,强度降低、韧性变差^[25],增加管道泄漏的风险,严重影响燃气供应的可靠性与安全性,对居民生活和工业生产造成不利影响。

1.3 极端高温下综合能源系统可靠性评估方法的研究

1.3.1 基于概率模型的评估方法

部分学者采用概率模型对极端高温下 IES 的可靠性进行评估。文献[26]提出一种基于蒙特卡洛模拟的可靠性评估方法。该方法将极端高温视为随机变量,考虑了发电设备、输电线路、储能设备等不同温度下的故障概率分布,通过蒙特卡洛抽样模拟 IES 系统在极端高温下的运行状态,计算系统的可靠性指标。这种方法主要意义在于,较为准确地处理极端高温的不确定性及系统各组件故障的随机性,为系统规划和运行决策提供了全面的可靠性评估信息。在城市 IES 规划中,可根据不同区域的极端高温概率分布,系统组件的可靠性数据,以确定是否需增加备用电源或优化能源传输网络布局。然而,该方法的计算量较大,对计算资源的要求较高,且需长时间的计算过程来保证模拟结果的收敛性,对于大规模、复杂的 IES,计算成本可能过高。

1.3.2 基于仿真分析的评估方法

部分学者采用仿真软件对极端高温下 IES 的可靠性评估进行研究。在文献[27]利用 EnergyPlus 和 GridLAB-D 两款软件分别对 IES 中建筑能源需求和电力、热力网络进行建模与仿真。在仿真模型中设置极端高温场景,通过模拟系统在不同高温条件下的动态运行过程,分析系统的能源供应能力、电能质量、热力平衡等方面性能指标,评估 IES 的可靠性。这种方法的优势在于能详细地模拟系统的实际运行行为,直观地展示系统在极端高温下的响应特性,以此便于发现系统中的薄弱环节。如在极端高温下,某个区域的电力负荷因制冷设备大量运行而激增,导致电力传输网络出现电压波动或过载现象,进而确定需对该区域的电力设施进行升级或优化。但该方法的准确性依赖于仿真模型的精度和参数设置的合理性,且对于复杂的 IES,模型搭建和仿真计算的难度较大,需采用专业的仿真技术知识和大量的实验数据来校准模型参数。

1.3.3 多指标综合评估方法

部分研究从多个维度提出多指标综合评估方法。文献[28]

综合考虑了能源供应的充足性、能源转换的高效性、设备运行的稳定性等多个指标,采用模糊综合评价法确定各指标的权重,构建了 IES 在极端高温下的可靠性评估指标体系。该方法能全面地反映系统在极端高温下的可靠性状况,从多个维度为系统的优化和改进提供依据。在评估包含多种能源供应和转换设备的工业园区 IES 时,可综合考虑电力供应是否满足生产需求、热力转换效率是否达标、设备故障率是否在可接受范围内等指标,对系统可靠性进行全面评估,并根据评估结果确定是优先升级发电设备还是改善热力传输网络。然而,指标权重确定存在一定的主观性,且不同指标之间的相互关系较为复杂,在实际应用中需进一步深入研究如何准确地量化和处理这些关系,以提高评估结果的准确性和客观性。

1.3.4 基于人工智能算法的评估方法

随着人工智能技术的发展,开始将人工智能算法应用于极端高温下 IES 的可靠性评估。文献[29]提出一种基于深度学习的可靠性评估模型,该模型利用大量的历史数据,包括极端高温数据、IES 运行数据等,训练深度学习神经网络,使其能自动学习极端高温与系统可靠性之间的复杂映射关系,实现对系统可靠性的快速准确评估。这种方法主要优点是能处理大规模、高维度的数据,具有较强的自学习和自适应能力,能快速适应系统的变化和极端高温条件的不确定性。在面对极端高温天气模式或系统设备更新时,深度学习可通过重新学习新的数据来调整评估结果。但其对数据的依赖性较强,需大量的高质量数据进行训练,且模型的可解释性较差,难以直观地理解模型的决策过程,对于工程应用中故障诊断和系统优化带来了一定的困难。

1.3.5 混合评估方法

鉴于单一评估方法存在局限性,部分研究采用了混合评估方法。文献[30]将基于概率模型和基于仿真分析的方法相结合。首先,利用概率模型对系统组件在极端高温下的故障概率进行初步估算,然后,将这些概率作为参数输入到仿真模型中,进行更精确的 IES 可靠性评估。这种混合方法既利用了概率模型处理不确定性的优势,又借助了仿真模型详细模拟系统行为的能力,提高了评估的准确性和效率。另一种混合方法是将多指标综合评估与人工智能算法相结合,文献[31]通过多指标综合评估确定系统的关键性能指标,然后利用人工智能算法对这些指标与极端高温之间的关系进行深度挖掘和预测,克服了多指标综合评估中指标权重确定主观性强和人工智能算法可解释性差的问题。然而,混合评估方法在实施过程中需解决不同方法之间的数据融合、模型衔接等技术难题,增加了评估的复杂性。

表1 极端高温天气下 IES 可靠性评估方法对比

Table 1 Comparison of IES reliability assessment under extreme hot weather

文献	评估方法	优势	劣势
[26]	概率模型评估	准确处理不确定性和随机性	计算量较大,计算资源要求较高
[27]	仿真分析评估	直观展示响应特性	模型搭建和仿真计算难度较大
[28]	多指标综合评估	全面地反映系统的可靠性状况	指标权重确定存在一定主观性
[29]	人工智能算法评估	处理大规模、高维度数据,有自学习和自适应能力	数据依赖性较强
[30-31]	混合评估	综合各方法优势	评估复杂性增加

不同的评估方法在极端高温下 IES 可靠性评估方面具有一定的内在联系。基于概率模型的方法为其他方法提供了理论基础,其对高温事件和系统元件故障随机性的处理方式,为仿真分析中随机事件模拟、多指标综合评估的指标概率分布确定,以及人工智能算法中数据生成和模型训练提供了重要的参考依据。

不同的研究方法在可靠性评估方面各有侧重,基于概率模型的评估方法侧重于理论分析和数学推导,通过概率模型的建立来描述系统的可靠性,但对于计算复杂且对实际系统运行细节模拟而言相对有限,难以直观地展示系统在极端高温下的具体运行行为和动态变化过程。基于仿真分析的评估方法注重系统的实际运行过程模拟,能详细展示系统在极端高温下的动态行为,但模型构建和参数设置较为繁琐,且计算资源消耗较大,对于大规模复杂 IES 的评估可能面临计算时间过长和资源不足的问题。多指标综合评估方法则强调通过多维度综合衡量 IES 系统的可靠性,构建的指标体系具有较强的主观性,且不同指标之间的相互关系较为复杂,在实际应用中还需进一步深入研究如何准确地量化这些关系,以确保评估结果的准确性和可靠性。基于人工智能算法的评估方法依靠大量数据训练模型,具有高效快速的评估能力,但对数据的依赖性较强,需大量的高质量数据进行训练,且模型的可解释性差,难以直观地理解模型的决策过程,这对于工程应用中的系统优化和故障诊断带来了一定的困难。混合评估方法虽然综合了多种方法的优势,但在实施过程中需解决不同方法之间的数据融合、模型衔接等技术难题,增加了评估的复杂性,且不同混合方法适用场景和效果也需根据具体的系统特点和评估要求进行深入研究和选择。

极端高温对 IES 的可靠性产生了多方面的影响,涵盖能源生产设备、能源传输网络及系统可靠性评估方法等关键领域。目前不同评估方法之间的融合程度较浅,对于极端高温与其他极端气象条件、能源市场波动等复杂因素的综合考虑不足等。未来的研究应致力于加强不同评估方法的集成创新,构建更加全面、准确且高效的极端高温下 IES 可靠性评估体系,同时充分考虑多种复杂因素的协同影响,以提高 IES 在极端高温环境下的可靠性、韧性和可持续性,为应对全球气候变化和保障能源安全提供有力的技术支持。

2 严寒低温冰冻对综合能源系统可靠性影响

由于人类活动的增加,生态环境的破坏,低温冰冻天气发生频率也大幅增加。低温冰冻条件下 IES 面临的挑战,包括发电、供热和储能设备性能下降及电力、热力和燃气传输网络的故障风险增加。同时,分析低温环境下 IES 可靠性评估的方法,如故障树分析、动态模拟、数据驱动及混合方法,以提高系统的抗灾能力和运行稳定性。通过这些分析,旨在为保障能源安全提供科学依据和技术支持。低温冰冻不仅影响设备效率,还增加了维护成本和故障风险。严寒、低温冰冻对综合能源系统可靠性的影响及评估方法如图 4 所示。

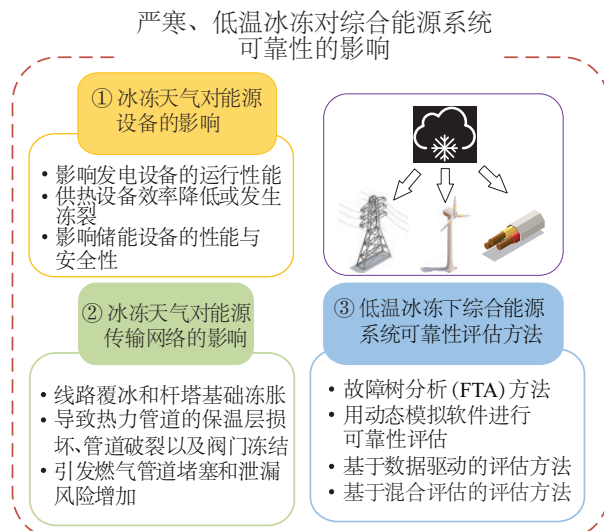


图4 严寒、低温冰冻对综合能源系统可靠性的影响及评估方法

Fig. 4 Impact of severe cold and freezing temperatures on reliability of integrated energy systems and assessment methods

2.1 低温冰冻对能源生产设备的影响

2.1.1 发电设备

在严寒与低温冰冻条件下,IES 的发电设备的运行性能受到极大影响。对于小型火力发电系统,低温会导致燃料特

性发生改变,如煤炭的粘性增大、流动性变差,使得燃料在输送与燃烧过程中出现诸多问题。文献[32]研究表明间接空冷系统在 -20°C 环境下,循环冷却水流量需提升15%~20%以维持热平衡,否则换热效率下降导致机组出力受限。同时,低温还使汽轮机的润滑油粘度大幅增加,启动阻力剧增,严重时造成轴承等关键部件损坏,对发电设备的可靠性和可用率产生严重威胁。

风力发电设备在严寒、低温冰冻气候事件中同样面临挑战。低温会导致风力机叶片表面结冰,这不仅改变了叶片的气动外形,降低了风能捕获效率,据文献[33]研究,叶片结冰可使风力机功率输出降低20%~50%,而且冰层的不均匀分布会加剧叶片振动,加速叶片材料的疲劳损伤,缩短叶片使用寿命,增加断裂风险。此外,低温还会对风力机的电气设备和控制系统产生负面影响,例如电池容量衰减、传感器精度降低等,从而严重干扰风力机的正常运行与控制。

2.1.2 供热设备

IES供热设备在严寒、低温冰冻天气下承担着重要使命,但自身也会遭受多种不利影响。在集中供热系统中,锅炉作为核心设备,低温环境使其热负荷需求急剧上升,要求其提高供热功率。然而,低温可能引发锅炉的水管、阀门等部件发生冻裂现象,尤其是在设备停运期间或保温措施不完善时。文献[34]指出在严寒地区部分老旧供热锅炉,因水管冻裂导致供热中断的事故时有发生。同时,低温还会影响热交换器的换热效率,由于低温使传热介质的物性参数发生变化,降低了热量传递速率,进而影响供热系统的供热能力与稳定性。

热泵供热系统在低温环境下的制热效率会显著下降。随着室外温度降低,热泵的制热系数逐渐减小,当温度低于一定阈值时,热泵可能无法满足供热需求,甚至出现故障停机。文献[35]研究发现,在严寒地区的冬季,空气源热泵在室外温度低于 -15°C 时,制热性能急剧下降,需辅助加热设备才能维持正常供热,不仅增加了系统的复杂性与运行成本,还降低了系统可靠性。

2.1.3 储能设备

严寒、低温冰冻对IES储能设备的性能与安全性有着不可忽视的影响。以锂离子电池储能为例,低温会使电池内部的化学反应速率显著降低,导致电池容量衰减、放电功率下降。文献[36]表明,在 -20°C 时,锂离子电池容量可能仅为常温的50%~60%。同时,低温充电还可能引发锂枝晶的生长,刺穿电池隔膜,导致电池短路,引发安全事故,严重威胁储能设备的可靠性与使用寿命。

对蓄热储能设备,如相变蓄热装置等,低温环境可能导致蓄热材料的凝固点升高,影响其蓄热与放热性能。在严寒条件下,如果蓄热装置的保温措施不当,热量散失会加剧,降低蓄热效率,无法在需要时提供足够的热量,影响IES的能量调节与供应可靠性^[37]。

2.2 低温冰冻对能源传输网络的影响

2.2.1 电力传输网络

架空输电线路是低温雨雪冰冻灾害下受损最为严重的电网设备,根据国内外的冰灾事故,输电线路的覆冰危害可归纳为以下几类:1)过载;2)绝缘子闪络损坏;3)气动力失稳振动;4)不均匀覆冰或不同期脱冰。在低温冰冻天气下,大气中的水汽凝结在输电线路表面形成覆冰。线路覆冰会增加导线的重量和迎风面积,导致导线张力增大,可能引发导线断线、杆塔倒塌等事故,严重破坏电力传输的连续性与可靠性。2008年初中国发生的恶劣低温雨雪冰冻天气给电网带来了巨大的损毁和经济损失^[38]。大部分省区出现了冰闪跳闸,变电站停运,杆塔倒塌,导线舞动,变电站设备损坏等事故。

此外,低温还会使杆塔基础土壤冻结,产生冻胀现象。冻胀力可能使杆塔基础发生位移、倾斜,破坏杆塔的稳定性,影响电力线路的安全运行。同时,低温环境下,电缆绝缘材料性能也会发生变化,如绝缘电阻下降、脆性增加等,易引发电缆故障,降低电力传输网络的可靠性。文献[39]虽主要研究高温对电缆绝缘性能的影响,但也提及低温同样会对电缆产生类似的负面作用。

2.2.2 热力传输网络

对IES热力传输网络,严寒、低温冰冻可能导致热力管道的保温层损坏、管道破裂及阀门冻结等问题。低温使管道周围的土壤冻结,土壤的冻胀力可能挤压热力管道,造成管道变形、破裂,导致热力泄漏。文献[40]中北方寒冷地区部分老旧热力管道,因冻胀力导致的管道破裂事故较为常见,不仅影响了周边居民的供热质量,还可能引发安全事故。同时,保温层在低温冰冻环境下可能因受潮、结冰而失去保温效果,增加热力传输过程中的热损失,降低供热效率,影响终端用户的供热质量与可靠性。阀门在低温下可能因内部积水结冰而无法正常工作,影响热力系统调节与控制能力。

2.2.3 燃气传输网络

在燃气传输网络中,严寒、低温冰冻可能引发燃气管道堵塞和泄漏风险增加。由于燃气中含有一定的水分,在低温环境下,水分可能凝结成冰,在管道内形成冰堵,阻碍燃气的正常输送。文献[41]详细阐述了低温导致燃气管道冰堵的原理及解决方法。此外,低温会使燃气管道的材料变脆,降低其韧性和抗冲击能力,在外部应力作用下,如土壤冻胀或第三方施工破坏时,更易发生管道破裂泄漏事故,威胁燃气供应的安全与可靠性,对周边环境和居民生命财产安全造成潜在危害。

2.3 低温冰冻下综合能源系统可靠性评估方法研究

2.3.1 基于故障树分析的评估方法

部分学者采用故障树分析(fault tree analysis, FTA)方法

评估严寒、低温冰冻下 IES 的可靠性。文献[42]构建了以综合能源系统故障为顶事件的故障树模型,将严寒、低温冰冻导致的发电设备故障、能源传输网络故障等作为中间事件和基本事件,通过逻辑门关系描述事件之间的因果联系。在发电设备故障分支中,将风力机叶片结冰、火力发电燃料输送故障等作为基本事件。在能源传输网络故障分支中,将电力线路覆冰断线、热力管道冻裂等作为基本事件,通过计算系统故障的概率,评估系统的可靠性。这种方法在于能直观地展示系统故障的各种可能途径,便于分析导致系统可靠性下降的关键因素,为制定针对性的预防措施提供依据。根据故障树分析结果,确定对风力机叶片除冰装置进行优化或加强热力管道的保温措施等。然而,故障树分析方法在处理复杂的动态系统和多状态变量时存在一定局限性,难以准确描述系统在不同严寒、低温冰冻程度下的动态可靠性变化,对于系统运行过程中的反馈机制和时序关系难以有效表达。

2.3.2 基于动态模拟的评估方法

部分研究利用动态模拟软件对严寒、低温冰冻下的 IES 进行可靠性评估。文献[43]采用 TRNSYS 对包含多种能源设备和网络的综合能源系统进行建模,在模型中设置严寒、低温冰冻环境参数,模拟系统在不同低温场景下的动态运行过程。在模拟过程中考虑发电设备的动态响应特性,如风力发电机的功率输出随叶片结冰程度的变化、火力发电设备的热效率随低温环境的调整等。同时也考虑了能源传输网络的动态变化,如电力线路覆冰后电阻变化、热力管道热损失动态变化等。通过分析模拟结果中的能源供应中断时间、能源短缺量等指标来评估系统的可靠性。该方法优势在于能详细模拟系统在严寒、低温冰冻过程中的动态行为,考虑了系统各组件之间的动态交互作用,更真实地反映系统的实际运行情况。且也可模拟在持续低温冰冻天气下,随着时间推移,电力供应逐渐减少、热力需求逐渐增加,系统如何通过能源转换设备和储能设备进行调节以维持运行。但是,动态模拟方法需精确的模型参数和大量的计算资源,模型的准确性和计算效率受限于系统的复杂程度和模拟时间步长的选择。对于大规模、复杂的综合能源系统,构建高精度模型和进行长时间模拟可能面临巨大的计算挑战。

2.3.3 基于数据驱动的评估方法

随着大数据技术的发展,基于数据驱动的评估方法逐渐应用于严寒、低温冰冻下 IES 可靠性评估。文献[44]收集了大量严寒、低温冰冻天气下 IES 的运行数据,包括如风速、温度等气象数据,发电设备功率、储能运行参数等设备运行参数,电力供应中断次数、热力供应不足时长等能源供应数据,以及设备故障记录等信息。利用支持向量机、神经网络等机器学习算法来构建 IES 可靠性评估模型。采用神经网络算法时,将气象数据和设备运行参数作为输入层变量,将系统可靠性指标作为输出层变量,通过大量数据训练模型,使其能学习到数据中的特征和模式,从而预测系统在不同严寒、低温冰冻条件下的可靠性指标。这种方法的优点是弥补了低温寒潮小样本事件由于数据稀缺而难以建模的问题,降低了低温寒潮天气下风电功率的极端预测偏差,同时需对系统的物理过程进行详细建模,能自动适应系统的复杂变化和不确定性,具有较强的泛化能力。当系统中新增一种能源设备或出现新的运行工况时,数据驱动模型可通过学习新的数据来调整预测结果。然而,数据驱动方法对数据的质量和数量要求较高,数据的缺失、异常值和噪声可能影响模型的准确性。如果气象数据采集设备故障导致部分低温数据缺失,可能使模型对严寒影响评估出现偏差。且模型的可解释性相对较差,难以深入理解系统可靠性与各影响因素之间的内在物理机制,不利于工程人员根据物理原理对系统进行优化和改进。

2.3.4 基于混合方法的评估策略

鉴于上述单一评估方法的局限性,部分研究提出基于混合方法的 IES 可靠性评估策略。文献[45]将故障树分析与动态模拟相结合。首先利用故障树分析确定系统中关键故障模式和薄弱环节,然后针对这些关键部分在动态模拟中详细模拟分析,这样既可利用故障树的分析直观性和故障筛选能力,又能借助动态模拟的动态特性和精确性,提高评估的准确性。另一种混合方法是数据驱动与物理模型相结合,文献[46]利用数据驱动模型处理大量复杂的数据关系,同时借助物理模型对系统的基本物理原理进行约束和解释,提高模型的可解释性和准确性。这种混合方法能综合不同方法的优势,弥补单一方法的不足,但也面临着方法融合过程中的协调问题,如数据接口、模型转换等。

表2 4种严寒、低温冰冻天气下 IES 可靠性评估方法对比

Table 2 Comparison of four methods for assessing IES reliability in severe cold and freezing temperatures

文献	评估方法	优势	劣势
[42]	故障树分析评估	直观展示系统故障各种可能性	计算量较大,对计算资源要求较高
[43]	动态模拟评估	详细模拟系统动态行为、真实反应运行情况	构建模型和模拟的计算难度较大
[44]	数据驱动评估	自动适应系统的复杂变化和不确定性	数据缺失、异常和噪声影响准确性
[45]	混合方法评估	综合不同方法的优势,弥补单一方法的不足	面临方法融合过程中的协调问题

不同研究方法在严寒、低温冰冻下 IES 可靠性评估方面相互关联、互为补充。故障树分析法通过分层逻辑推理,可明确电力系统失效路径的因果关系,其输出的如线路覆冰关键故障模式为动态仿真提供优先级参数。其确定的关键故障因素,可作为动态模拟中的重点关注对象和数据驱动方法中的重要特征变量。此外,基于蒙特卡洛仿真的动态模拟数据可验证 FTA 割集概率准确性,当仿真结果与故障树预测的失效模式偏差超过 12% 时,需反向修正故障树逻辑,通过对比模拟得到的故障情况与故障树分析预测的故障模式,可检验故障树的合理性并进行修正。同时,动态模拟数据也为数据驱动方法提供了丰富的数据样本,帮助训练更准确的机器学习模型,尤其是在处理系统的动态变化和复杂交互关系方面的数据支持。数据驱动方法则可挖掘系统在严寒、低温冰冻下隐藏的复杂关系和规律,为故障树分析方法中的故障逻辑完善和动态模拟方法中的模型优化提供参考依据。

每一种方法又有各自的侧重,故障树分析方法侧重于系统故障的逻辑分析,以静态的故障树结构描述系统故障的因果关系,适用于对系统故障机理的初步分析和关键因素筛选,但在处理动态系统行为方面能力有限,难以准确反映系统在严寒、低温冰冻过程中的实时变化情况,对系统动态调节过程和连续变化状态难以有效模拟。基于动态模拟的评估方法着重于系统的动态运行过程模拟,详细展示系统在严寒、低温冰冻下随时间变化的运行状态,考虑系统各组件之间的动态交互作用,但对模型精度和计算资源要求较高,构建复杂系统的高精度动态模型需大量的参数确定和验证工作,且计算过程耗时较长,对于大规模系统可能面临计算资源瓶颈。基于数据驱动的评估方法依靠大量数据训练模型,具有较强的适应性和预测能力,无需深入了解系统的物理过程,但受数据质量和可解释性问题的制约,数据的准确性和完整性对模型结果影响较大,且难以从物理原理角度解释模型的预测结果,不利于工程人员深入理解系统运行机制和进行针对性的优化。混合方法虽能平衡评估精度与效率,但其数据格式异构性仍需通过标准化接口解决及如何合理分配不同方法在评估过程中的权重和作用。

综上,数据驱动的网络拓扑可靠性评估理论与方法已得到初步发展,利用机器学习解决能源领域现有问题,已成为当下学界的研究热点,并在诸多方面已取得初步研究成果,但仍面临诸多科学挑战和技术难题,模型-数据混合驱动有望成为未来机器学习在综合能源系统中应用的主要形式。

3 强风暴雨对综合能源系统可靠性影响

强风暴雨频发对 IES 的稳定运行构成了重大威胁。将分析强风暴雨对发电设备、储能设备性能的具体影响,讨论其对电力、热力和燃气传输网络带来的不利因素,综述当前针对强风暴雨环境下 IES 可靠性评估的方法,以提高系统的抗灾能力和运行稳定性。通过这些分析,旨在为提升 IES 在极

端气象条件下的可靠性和韧性提供科学依据和技术支持。强风暴雨对 IES 可靠性的影响及评估方法如图 5 所示。

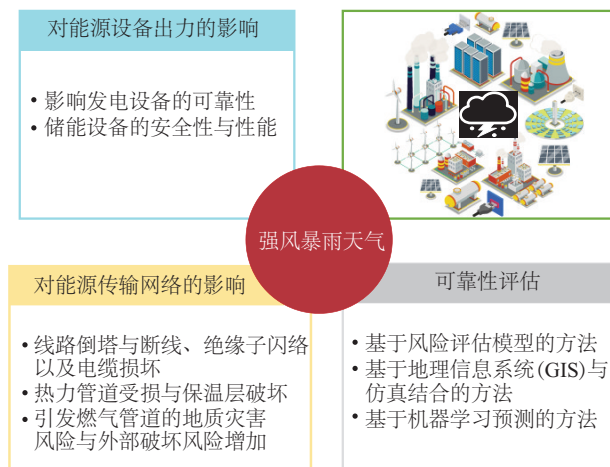


图 5 强风暴雨对综合能源系统可靠性的影响及评估方法

Fig. 5 Impact of strong wind and rainstorms on reliability of IES and assessment methods

3.1 强风暴雨对能源生产设备的影响

3.1.1 发电设备

强风暴雨对各类发电设备均产生显著影响。在风电领域,强风虽可在一定范围内提升风能利用效率,但超过风力机设计极限风速的强风会引发严重问题。文献[47]指出风电机组在运行过程中会承受多种复杂的力矩作用,如风轮周期性转动、偏航运行产生的周期性载荷,风速随机变化及复杂的湍流产生的随机载荷等。当实际风速达到风电机组所能承受的最大风速以上时,机组的风能捕获量会提高,但极限和疲劳载荷增加,影响机组寿命。在 2019 年 5 月 19 日,受强冷空气影响,华北地区出现大风降温天气,由于大风影响,某省电网部分风电场发生大范围的大风停机。同时,暴雨可能使风力机内部电气系统受潮,引发短路故障,降低发电设备的可靠性与可用性^[48]。

对于太阳能发电系统,强风暴雨的影响不容忽视。当出现短时暴雨的时候,雨水不断冲刷光伏组件,不仅留下更多污秽,还会对光伏面板造成腐蚀^[49]。此外,云层遮挡和光照强度减弱在暴雨天气下较为常见,这使得光伏发电系统的输出功率大幅波动,可能出现长时间低功率或零发电状态,影响 IES 的电力平衡与稳定性。

传统火力发电与水力发电设备同样面临强风暴雨的威胁。强风可能破坏火力发电厂的输电线路与冷却设施,导致电力传输中断和机组运行异常。文献[50]研究表明,台风引发的强风曾使部分火力发电厂的输电杆塔倒塌,线路受损,造成大面积停电事故。暴雨引发的洪水对水力发电站危害极大,可能淹没机房、损坏水轮机等关键设备^[51],严重影响水力发电的可靠性与持续性。

3.1.2 储能设备

强风暴雨对储能设备的安全性及性能亦产生重要影响。锂离子电池储能系统在高湿度的暴雨环境下,电池外壳与连接部件易发生腐蚀。文献[52]研究腐蚀会导致电池的电气连接性能下降,增加接触电阻,影响充放电效率与能量存储能力。若遭遇洪涝灾害,电池储能设施被淹没,可能引发电池短路、电解液泄漏等安全事故,对储能系统的稳定性与寿命构成严重威胁^[53]。

对于抽水蓄能电站园区 IES,强降雨引发的水位大幅波动可能超出机组正常运行范围,影响其抽水与发电功能的正常发挥。文献[54]所述水位过高可能导致机组压力过大,而水位过低则可能使机组无法正常运行。此外,强风暴雨引发的山体滑坡、泥石流等地质灾害可能破坏电站的输水管道、厂房等基础设施,导致储能系统瘫痪,严重影响 IES 的能量调节与供需平衡能力^[55]。

3.2 强风暴雨对能源传输网络的影响

3.2.1 电力传输网络

强风暴雨对电力传输网络的危害主要体现在线路倒塔与断线、绝缘子闪络以及电缆损坏等方面。强风具有强大的冲击力,可吹倒电力杆塔,导致线路断线,引发大面积停电事故。文献[56]指台风频发给电网带来巨大威胁,具体表现为输电系统频繁跳闸,输电线路的杆塔、导地线、绝缘子和金具等遭到不同程度的破坏导致停电,致使电力传输网络遭受严重破坏。暴雨天气使空气湿度增大,绝缘子表面易受潮污损,在电场作用下可能发生闪络现象,导致线路跳闸^[57]。此外,暴雨引发的洪水可能淹没电力线路基础,破坏线路稳定性,增加故障概率。同时,强风暴雨还可能对电力电缆造成损害,如电缆沟进水导致电缆浸泡,影响其绝缘性能与输电能力,威胁 IES 电力传输的可靠性与安全性^[58]。

3.2.2 热力传输网络

对于 IES 热力传输网络,强风暴雨可能导致热力管道受损与保温层破坏。强风可能吹倒热力管道支架,使管道发生位移、变形甚至破裂,造成热力泄漏。在强风暴雨冲击下,一些老旧热力管道支架强度不足,易发生倒塌事故,进而引发热力管道破裂。暴雨可能冲刷管道周围土壤,使管道暴露,增加散热损失,降低热力传输效率^[59]。同时,雨水侵入保温层会使保温材料受潮,失去保温效果,进一步加剧热量散失,影响终端用户的供热质量与可靠性^[60]。

3.2.3 燃气传输网络

在燃气传输网络方面,强风暴雨可能引发燃气管道的地质灾害风险与外部破坏风险增加。强降雨可能导致土壤松动,引发山体滑坡、泥石流等地质灾害,破坏燃气管道。文献[61]提到山区暴雨灾害中燃气管道被山体滑坡掩埋或冲断的案例,导致燃气供应中断,影响周边居民生活与工业生产。强风可能吹倒树木、广告牌等物体,砸坏燃气管道,造成燃气泄

漏。暴雨使道路积水,增加了第三方施工破坏燃气管道的风险,积水会阻碍施工人员准确识别地下燃气管道位置,易引发误操作导致管道破裂泄漏,威胁燃气供应的安全性与可靠性^[62]。

3.3 强风暴雨下综合能源系统可靠性评估方法的研究

3.3.1 基于风险评估模型的方法

部分学者采用风险评估模型研究强风暴雨下 IES 的可靠性。文献[63]构建了包含强风暴雨灾害发生概率、强度及 IES 各组件脆弱性的风险评估模型。该模型通过对历史气象数据和灾害记录的分析,确定强风暴雨的发生概率分布与强度参数范围。利用某地区多年的台风、暴雨监测数据,统计不同强度等级强风暴雨的发生频率。同时,基于组件的材料特性、结构设计和运行参数评估各组件在强风暴雨下的脆弱性指标,如风力发电机的抗风等级、电力杆塔的抗倾覆能力等。通过将灾害概率与组件脆弱性指标相结合,采用风险矩阵等方法计算 IES 在不同灾害场景下的风险值,以评估系统可靠性。这种方法的主要贡献在于量化了强风暴雨的不确定性与系统组件的脆弱性,为制定风险应对策略提供了依据。根据风险评估结果,确定在高风险区域对关键设备进行加固或增加备用设备。然而,该方法在确定灾害概率与组件脆弱性参数时可能存在主观性,且对系统在强风暴雨过程中的动态响应特性考虑不足,难以精确模拟灾害发生时系统的实时变化。

3.3.2 基于地理信息系统(GIS)与仿真结合的方法

部分研究利用 GIS 与仿真技术相结合来评估强风暴雨下 IES 可靠性。文献[64]借助 GIS 平台获取强风暴雨的地理分布信息,如风速、降雨量、洪涝淹没范围等,并将其输入到 IES 仿真模型中。在构建仿真模型时,充分考虑电力、热力、燃气等子系统的耦合关系,包括能源转换设备的运行特性、传输网络的拓扑结构和能量流分配规则等。在模拟电力与热力系统耦合时,考虑电锅炉在电力供应变化时对热力供应的影响。通过将 GIS 信息与仿真模型结合,可模拟不同地理区域强风暴雨对 IES 的影响,如某区域强风暴雨导致电力线路故障,进而影响周边地区的热力和燃气供应。通过分析模拟结果中的能源供应中断时间、能源短缺量等指标评估系统可靠性。该方法优势在于直观展示强风暴雨在地理空间上对 IES 的影响,考虑地理环境与系统运行的相互关系,有助于在城市规划或区域能源布局中识别薄弱环节。但该方法需大量地理数据与系统运行数据支持,数据准确性与完整性对评估结果影响较大,且模型构建与仿真计算复杂,对大规模 IES 模拟可能面临计算效率低下问题。

3.3.3 基于机器学习预测的方法

随着机器学习的发展,基于机器学习预测的方法被应用于强风暴雨下 IES 可靠性评估。文献[65]收集了大量强风暴雨历史数据以及 IES 在这些气象条件下的运行数据,包括气象参数、系统设备运行状态和故障记录等信息。利用机器学

习算法(如支持向量机、神经网络等)训练预测模型。将风速、降雨量等气象参数和发电设备功率、储能设备电量等系统状态参数作为输入,将能源供应中断概率、能源短缺量等可靠性指标作为输出,训练神经网络模型。该模型可根据气象预报数据预测强风暴雨发生时 IES 的可靠性指标,为 IES

系统提前调度与应急准备提供支持。这种方法的优点是能快速处理大量数据,对系统可靠性进行实时预测。然而,机器学习模型训练需大量高质量数据,数据缺失、异常值和噪声可能影响模型准确性,且模型可解释性差,难以理解预测结果背后的物理机制。

表3 3种强风暴雨天气下 IES 可靠性评估方法对比

Table 3 Comparison of three methods of IES reliability assessment under strong wind and rainstorms

文献	评估方法	优势	劣势
[63]	风险评估模型	量化强风暴雨的不确定性与系统组件的脆弱性	量化过程存在主观性,且动态响应特性考虑不足
[64]	地理信息系统 与仿真结合	直观展示强风暴对 IES 的影响	数据的准确与完整对评估结果影响大
[65]	机器学习预测	快速处理大量数据进行实时预测	数据的缺失、异常和噪声可能影响模型的准确性

上述不同的研究方法在强风暴雨下 IES 可靠性评估方面相互关联、互为补充。基于风险评估模型方法为基于 GIS 与仿真结合的方法和基于机器学习预测的方法提供了风险量化的思路与理论基础,其确定的风险因素可作为后两者方法中的重要考虑因素。基于 GIS 与仿真结合方法所得到的仿真结果可用于验证风险评估模型准确性,同时为机器学习预测模型提供丰富的数据样本与场景模拟依据。基于机器学习预测的方法则可利用其快速预测能力,为风险评估模型的参数更新与优化以及 GIS 与仿真结合方法中的场景筛选提供支持。

同时不同的 IES 可靠性评估方法各有侧重。基于风险评估模型的方法侧重于风险的量化分析,以静态风险指标评估系统可靠性,但对系统动态运行过程模拟有限,难以精确描述灾害发生时系统的实时变化。基于 GIS 与仿真结合的方法着重于地理空间信息与系统仿真的结合,能详细展示强风暴雨在地理空间上对 IES 的影响,考虑了地理环境与系统运行的相互关系,但数据需求大、模型复杂,计算资源消耗高。基于机器学习预测的方法依靠大量数据训练模型,具有快速预测能力,但数据质量要求高且可解释性差,难以深入理解模型预测结果背后的物理原理。在研究范围方面,部分研究聚焦于强风暴雨对 IES 某一特定子系统影响,而其他研究则从系统整体角度出发,综合考虑多种能源形式和子系统之间的相互作用对系统可靠性的影响。

强风暴雨对 IES 的可靠性产生了多方面的深刻影响,涵盖能源生产设备、能源传输网络以及可靠性评估方法等重要领域。通过对现有文献的综合梳理,不同研究取得了一系列有价值的成果,各研究方法在风险量化、地理空间分析与数据驱动预测等方面各有优劣。然而,目前研究仍面临一些挑战,如何更好地融合不同评估方法以实现更精准的可靠性评估、进一步考虑强风暴雨与其他极端气象条件或系统内部不确定性因素的综合影响等。未来研究应在现有基础上,加强跨学科研究与技术创新,构建更加完善、高效且具有广泛适

性的强风暴雨下 IES 可靠性评估体系,以提升 IES 在极端强风暴雨气象环境下的可靠性、稳定性和可持续性,为保障能源供应安全和应对全球气候变化提供有力的技术支撑。

4 当前研究存在问题及未来研究方向

4.1 当前研究存在问题

4.1.1 气象数据的精准获取与处理

IES 中极端气象数据具有高度的不确定性与多变性,准确获取和有效处理这些数据是可靠性评估的基础,但目前仍面临诸多困难,气象数据的噪声、缺失与不确定性直接影响可靠性评估的准确性。如强风暴雨中因传感器故障导致的风速数据异常跳变、冬季低温监测站点稀疏引起的空间插值误差、台风期间通信中断造成的降雨量记录缺失等,均会显著干扰评估模型输入。强风暴雨中风速、降雨量等参数的实时监测存在误差,且不同地区的气象监测设备精度和覆盖范围参差不齐。在严寒冰冻天气下,低温持续时间、冰冻厚度等数据的预测准确性有限^[66]。文献[67]指出台风路径的复杂性导致风速和降雨量预测偏差,使得基于气象数据的电力传输网络可靠性评估结果存在较大不确定性。此外,对于气象数据与 IES 各组件故障概率之间的精确量化关系,目前缺乏深入研究,难以将气象数据准确地融入可靠性评估模型中。

4.1.2 综合能源系统耦合特性建模

IES 各能源子系统之间存在复杂的耦合关系,在极端气象下这种耦合性对系统可靠性的影响难以精确建模。在电力、热力、燃气等子系统交互过程中,不同能源形式的转换与传输相互制约,电力供应不足会影响电锅炉的供热能力,进而影响热力系统的稳定性,而热力需求的变化又会对电力负荷产生反馈作用。当前的建模方法往往难以全面、准确地描述这种动态、非线性的耦合关系。文献[68]在对严寒条件下 IES 进行动态模拟时,尽管考虑了部分组件的耦合,但对于一些间接耦合因素和复杂工况下的耦合效应仍未能充分体现,

导致模型对系统实际运行情况的模拟存在一定偏差。

4.1.3 多种可靠性评估方法的有效融合

现有的 IES 可靠性评估方法各有优劣,但将多种方法有效融合以实现更精准评估仍面临挑战。基于概率模型方法能提供理论性的可靠性量化,但难以处理系统动态变化;基于仿真分析的方法可模拟系统运行细节,但计算资源消耗大且模型构建复杂;基于数据驱动的方法具有自学习和快速预测能力,但数据质量要求高且可解释性差。在将故障树分析与动态仿真相结合时,如何确定故障树中基本事件的概率参数以准确反映仿真中的实际情况以及如何在仿真中合理利用故障树分析结果进行故障场景筛选等问题尚未得到妥善解决^[69-70]。数据方面,概率模型依赖历史统计数据,仿真分析需高精度时空序列,数据驱动方法依赖实时监测流数据。模型方面,物理仿真模型基于微分方程,数据驱动模型依赖黑箱神经网络,两者参数空间与输出维度难以对齐。计算方面,蒙特卡洛仿真需万级核心时,深度学习训练依赖 GPU 集群,资源分配冲突导致效率低下。

4.1.4 IES 系统韧性的定量评估与提升

尽管可靠性评估是研究的重点,但对于 IES 在极端气象下的韧性定量评估以及有效提升措施的研究内容尚显不足。韧性是体现 IES 系统抵御极端事件、减小故障影响并恢复供电的能力。目前缺乏一套完善的韧性评估指标体系,难以准确衡量系统在遭受极端气象破坏后的恢复速度和适应新运行条件的能力。文献[71]根据台风天气下电力系统故障的发展特征,确定了根据系统性能变化曲线及事故链发生概率综合评估系统韧性的整体框架和流程,提出考虑不同时间尺度故障的元件及系统状态转移概率模型。

4.1.5 多极端气象及其他因素的综合考量

实际情况中,IES 可能面临多种极端气象的组合影响,同时还需考虑能源市场波动、负荷需求不确定性等其他因素。然而,当前研究大多局限于单一极端气象对 IES 的影响,对于多种极端气象以及与其他因素的综合作用研究较少,如高温与强风可能通过“热胀-风振”耦合作用加速输电线路金属疲劳;暴雨叠加冰冻可能导致燃气管道冰堵与土壤液化风险并存。此类复杂场景下,现有的单一灾害概率模型评估方法,难以准确量化协同效应导致的故障概率倍增现象。在冬季可能同时出现严寒冰冻和强风天气,这种组合气象对 IES 发电、传输和存储环节的协同影响机制尚未明晰。且能源市场价格的波动会影响系统的能源调度策略,进而与极端气象共同作用于系统可靠性,但目前缺乏综合考虑这些因素的评估模型^[72]。

基于概率模型的评估方法对计算资源需求较高,且极端事件发生概率较低,可能导致小样本下的结果偏差。此外静态概率模型难以动态反映灾害实时响应,限制了该模型在实时调度中的应用。基于仿真分析的动态建模方法可模拟极端气象下系统的动态行为,优势在于可复现复杂耦合过程,

但模型构建高度依赖专业知识和实验数据校准。大规模系统建模耗时且难以覆盖全场景,同时仿真结果的高时空分辨率与计算效率存在矛盾,难以满足实时决策需求。数据驱动方法利用历史数据训练模型,快速预测极端气象下的可靠性指标,适用于边缘设备实时预警。然而这类方法对数据质量的依赖性极强,历史异常气象样本稀缺导致 LSTM 等模型在罕见事件中 MAPE 骤升,易导致样本失效。混合评估方法通过综合多方法优势提升评估精度,利用故障树筛选高风险场景后进行动态仿真验证,或结合 GIS 技术将台风淹没范围与电网拓扑叠加,实现空间维度的脆弱性识别。但实际应用中面临数据接口标准化、模型权重分配等技术挑战。多指标综合评估与韧性量化方法通过构建多维度指标体系,可全面衡量系统在极端气象下的综合性能。但指标量化仍依赖具体灾害场,缺乏普适性标准。韧性评估需进一步结合动态恢复路径建模,而现有研究多停留在静态指标层面。

总体而言,现有方法挑战集中体现在数据、建模与成本 3 方面:气象数据精度不足与跨部门数据壁垒限制模型输入质量;极端气象下多能流耦合效应的非线性关系难以精确刻画,现有模型多采用简化假设;高精度仿真与 AI 预测依赖昂贵硬件等。

4.2 未来研究方向

4.2.1 高精度气象数据采集与分析技术研发

未来需研发更先进的气象数据采集技术、面向极端气象场景的数据质量增强技术,提高极端气象数据的准确性和实时性。如通过重构误差识别并修正异常数据点、采用高精度的气象传感器网络,结合卫星遥感、雷达监测等多源数据融合技术,实现对风速、降雨量、温度等气象参数的精准测量与实时传输。同时,深入研究气象数据与 IES 组件故障概率之间的数学模型,利用大数据分析和机器学习算法挖掘气象数据特征与系统可靠性之间的潜在规律,为可靠性评估提供更可靠的数据支持。

4.2.2 综合能源系统耦合模型的精细化构建

根据不同地区的气象特征和能源系统特点,构建更精细化的 IES 耦合模型,全面考虑电力、热力、燃气等子系统在极端气象下的动态交互作用。采用多物理场耦合建模方法,将能量流、物质流、信息流等多维度因素纳入模型中,准确描述系统在不同极端气象条件下的运行状态变化。如文献[73]提出基于贝叶斯网络时序模拟的 IES 可靠性评估方法,通过实验数据和实际运行数据对模型进行验证与优化,提高模型对系统复杂耦合特性的模拟精度,为可靠性评估提供更符合实际的模型基础。

4.2.3 智能融合的可靠性评估方法创新

探索创新的可靠性评估方法,实现多种评估方法的智能融合。如将基于物理模型的方法与数据驱动的方法相结合,利用物理模型提供系统的基本运行原理和约束条件,数据驱

动方法挖掘系统运行数据中的隐藏信息,通过人工智能算法实现两者的自适应融合。开发基于混合智能算法的可靠性评估框架,根据系统的不同运行状态和评估需求自动选择合适的评估方法或组合策略,提高评估的准确性和效率。

4.2.4 系统韧性评估指标体系与提升策略研究

建立完善的 IES 韧性评估指标体系,从生存能力、恢复能力和适应能力等多维度量化系统韧性。如引入韧性指标如恢复时间指数、适应能力系数等,结合可靠性指标评估系统在极端气象下的综合性能。建立完善的 IES 韧性评估指标体系,可考虑从生存能力、恢复能力和适应能力等多维度量化系统韧性,生存能力可结合关键负荷维持率与最大功能损失率,恢复能力可结合平均恢复时间与资源调度效率评估,适应能力则可结合拓扑冗余度与动态重构指数等指标针对不同的极端气象条件和系统特点,研究有效的韧性提升策略,如优化系统的冗余配置、开发具有自修复能力的组件、制定灵活的能源调度策略等,提高系统在极端气象冲击下的韧性水平。

4.2.5 多因素综合影响下的可靠性评估模型构建

构建综合考虑多种极端气象及其他因素的 IES 可靠性评估模型。现有研究多聚焦单一气象条件的影响,对多气象耦合作用下的系统可靠性评估方法仍需深入探索。在未来研究中考考虑多种极端气象组合对系统的协同影响机制,建立多气象变量的联合概率分布模型,将其融入可靠性评估模型中。同时,极端气象条件与能源市场波动、负荷需求不确定性之间存在复杂的协同作用,考虑采用随机规划、鲁棒优化等方法构建不确定性环境下的可靠性评估模型,为 IES 在复杂多变环境下的可靠运行提供全面的评估与决策依据。

综上,极端气象下 IES 可靠性评估面临诸多挑战,但通过在气象数据处理、系统建模、评估方法创新、韧性评估与多因素考量等方面的深入研究,为保障能源供应安全和应对全球气候变化奠定坚实的理论与技术基础。

5 结 论

深入探讨了极端高温、严寒低温冰冻、强风暴雨 3 种极端气象条件对 IES 可靠性评估的影响。极端气象对能源生产设备和传输网络均产生一定效应,如极端高温致使发电设备效率降低、制冷设备负荷剧增、储能设备性能衰退及电力传输网络损耗加大等,也可考虑从设备热管理技术改进与系统运行优化两个层面提出应对方案。严寒低温冰冻使发电设备面临燃料与运行问题、供热设备可靠性受挑战、储能设备容量与安全性受影响且电力与热力传输网络易受损。强风暴雨对发电设备造成结构与运行故障、储能设备安全性降低且严重破坏电力、热力与燃气传输网络。

在可靠性评估方法方面,基于概率模型、仿真分析、数据驱动及混合方法等虽各有贡献,但均存在局限性。概率模型难以处理动态变化;仿真分析计算资源需求高;数据驱动受

数据质量制约且可解释性差;混合方法面临技术融合难题。当前研究在气象数据处理、系统耦合建模、多因素综合考量及韧性评估等方面尚不完善。

未来研究应致力于开发高精度气象数据采集与分析技术,构建精细化 IES 耦合模型,创新智能融合的可靠性评估方法,建立系统韧性评估指标体系并探寻提升策略,构建综合多极端气象与其他因素的可靠性评估模型,提升极端气象下 IES 可靠性评估的精准性与,将这些研究方向转化为可执行的科研计划或工程项目,增强系统应对极端气象的能力,保障能源供应的安全与稳定。

[参考文献]

- [1] 赵希正. 强化电网安全保障可靠供电: 美加“8·14”停电事件给我们的启示[J]. 电网技术, 2003, 27(10): 1-7.
ZHAO X Z. Strengthen power system security to ensure reliable power delivery [J]. Power system technology, 2003, 27(10): 1-7.
- [2] 梁志峰, 葛睿, 董昱, 等. 印度“7.30”、“7.31”大停电事故分析及对我国电网调度运行工作的启示[J]. 电网技术, 2013, 37(7): 1841-1848.
LIANG Z F, GE R, DONG Y, et al. Analysis of large-scale blackout occurred on July 30 and July 31, 2012 in India and its lessons to China's power grid dispatch and operation [J]. Power system technology, 2013, 37(7): 1841-1848.
- [3] 孙华东, 许涛, 郭强, 等. 英国“8·9”大停电事故分析及对中国电网的启示[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(21): 6183-6191.
SUN H D, XU T, GUO Q, et al. Analysis on blackout in Great Britain power grid on August 9th, 2019 and its enlightenment to power grid in China [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(21): 6183-6191.
- [4] PANTELI M, MANCARELLA P. Influence of extreme weather and climate change on the resilience of power systems: Impacts and possible mitigation strategies [J]. Electric power systems research, 2015, 127: 259-270.
- [5] PRAJAPATI V K, MAHAJAN V. Reliability assessment and congestion management of power system with energy storage system and uncertain renewable resources [J]. Energy, 2021, 215(PB): 119134.1-119134.14.
- [6] LUND H, MÜNSTER E. Integrated energy systems and local energy markets [J]. Energy policy, 2006, 34(10): 1152-1160.
- [7] HE J, YUAN Z J, YANG X L, et al. Reliability modeling and evaluation of urban multi-energy systems: a review of the state of the art and future challenges [J]. IEEE access, 2020, 8: 98887-98909.
- [8] 时帅, 吴伟聪, 李媛媛, 等. 计及极端天气和海上风电

- 制氢的综合能源系统优化运行[J]. 电网技术, 2025, 49(6): 2293-2301, I0026-I0029.
- SHI S, WU W C, LI Y Y, et al. Optimal operation of comprehensive energy system considering extreme weather and offshore wind power hydrogen production [J]. Power system technology, 2025, 49(6): 2293-2301, I0026-I0029.
- [9] 唐坤霆, 周永智, 李宝聚, 等. 考虑热惯性的极端冰雪灾害下综合能源系统韧性提升[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(21): 129-137.
- TANG K T, ZHOU Y Z, LI B J, et al. Resilience enhancement of integrated energy systems under extreme ice and snow disasters considering thermal inertia [J]. Automation of electric power systems, 2024, 48(21): 129-137.
- [10] TANG K T, ZHOU Y Z, LI B J. Resilience enhancement of integrated energy systems under extreme ice and snow disasters [J]. Automation of electric power system, 2024, 48(21): 129-137.
- [11] PAUL S, POUDYAL A, POUDEL S, et al. Resilience assessment and planning in power distribution systems: Past and future considerations [J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2024, 189: 113991.
- [12] 任洪波, 张宇晨, 吴琼, 等. 面向韧性提升的综合能源系统规划与运行调度研究综述[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(13): 16-31.
- RENG H B, ZHANG Y C, WU Q, et al. Research review on planning and operation dispatch of integrated energy system for resilience enhancement [J]. Automation of electric power system, 2025, 49(13): 16-31.
- [13] 李春燕, 唐瞻文, 汤佑元, 等. 极端灾害下基于综合需求响应的电-水-气综合能源系统负荷恢复策略[J]. 高电压技术, 2024, 50(4): 1403-1415.
- LI C Y, TANG Z W, TANG J Y, et al. Load recovery strategy for integrated electricity-water-gas energy system based on integrated demand response under extreme disasters [J]. High voltage engineering, 2024, 50(4): 1403-1415.
- [14] 梁光芬. 燃气轮机进气冷却换热器数值模拟与结构优化研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
- LIANG G F. Numerical simulation and structure optimization of gas turbine intake cooling heat exchanger [D]. Chongqing: Chongqing University, 2021.
- [15] PILAVACHI P A. Power generation with gas turbine systems and combined heat and power[J]. Applied thermal engineering, 2000, 20(15/16): 1421-1429.
- [16] BASRAWI F, YAMADA T, NAKANISHI K, et al. Effect of ambient temperature on the performance of micro gas turbine with cogeneration system in cold region [J]. Applied thermal engineering, 2011, 31(6/7): 1058-1067.
- [17] CARAPELLUCCI R, GIORDANO L. A comparison between exergetic and economic criteria for optimizing the heat recovery steam generators of gas-steam power plants [J]. Energy, 2013, 58: 458-472.
- [18] HASAN M A, SUMATHY K. Photovoltaic thermal module concepts and their performance analysis: a review [J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2010, 14(7): 1845-1859.
- [19] SEQUEIRA C, PACHECO A, GALEGO P, et al. Analysis of the efficiency of wind turbine gearboxes using the temperature variable [J]. Renewable energy, 2019, 135: 465-472.
- [20] RAHIF R, KAZEMI M, ATTIA S. Overheating analysis of optimized nearly Zero-Energy dwelling during current and future heatwaves coincided with cooling system outage [J]. Energy and buildings, 2023, 287: 112998.
- [21] CHEN L. The influence of high ambient temperature on the performance of vapor compression refrigeration systems [J]. Applied thermal engineering, 2018, 130: 1071-1077.
- [22] 孟凡伟. 锂离子电池的相关设计与性能研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- MENG F W. Related design and performance research of lithium-ion battery [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.
- [23] BORETTI A, CASTELLETTO S. High-temperature molten-salt thermal energy storage and advanced-Ultra-supercritical power cycles [J]. Journal of energy storage, 2021, 42: 103143.
- [24] MORGAN V T, ZHANG B, FINDLAY R D. Effect of magnetic induction in a steel-cored conductor on current distribution, resistance and power loss [J]. IEEE transactions on power delivery, 1997, 12(3): 1299-1308.
- [25] ÇOMAKLI K, YÜKSEL B, ÇOMAKLI Ö. Evaluation of energy and exergy losses in district heating network [J]. Applied thermal engineering, 2004, 24(7): 1009-1017.
- [26] SHAMSUDDOHA M, DJUKIC L P, ISLAM M M, et al. Mechanical and thermal properties of glass fiber-vinyl ester resin composite for pipeline repair exposed to hot-wet conditioning [J]. Journal of composite materials, 2017, 51(11): 1605-1617.
- [27] SU H, ZIO E, ZHANG J J, et al. A systematic method for the analysis of energy supply reliability in complex Integrated Energy Systems considering uncertainties of renewable energies, demands and operations [J]. Journal of cleaner production, 2020, 267: 122117.

- [28] XU Y Q, LITARDO J, DEL PERO C, et al. District energy models: a comparative assessment of features and criteria for tools selection [J]. *Energy and buildings*, 2024, 314: 114291.
- [29] REN H B, JIANG Z P, WU Q, et al. Integrated optimization of a regional integrated energy system with thermal energy storage considering both resilience and reliability[J]. *Energy*, 2022, 261: 125333.
- [30] LI D, XU P, GU J F, et al. A review of reliability research in regional integrated energy system: indicator, modeling, and assessment methods [J]. *Buildings*, 2024, 14 (11): 3428.
- [31] MOSLEHI S, REDDY T A. Sustainability of integrated energy systems: a performance-based resilience assessment methodology[J]. *Applied energy*, 2018, 228: 487-498.
- [32] 王晓静, 关欣, 陈良, 等. 间接空冷系统多级设备防冻特性及安全监测研究[J]. *中国电机工程学报*, 2025, 45 (6): 2264-2273.
- WANG X J, GUAN X, CHEN L, et al. Multi-level anti-freezing characteristics and monitoring of natural draft dry cooling system [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2025, 45 (6): 2264-2273.
- [33] MA S C, CHAI J, JIAO K L, et al. Environmental influence and countermeasures for high humidity flue gas discharging from power plants [J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2017, 73: 225-235.
- [34] GAO L Y, HONG J R. Wind turbine performance in natural icing environments: a field characterization [J]. *Cold regions science and technology*, 2021, 181: 103193.
- [35] 赵沁童. 寒冷地区多能互补热泵系统的性能实验研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2013.
- ZHAO Q T. Experimental study on performances of the multiple-energy-driven heat pump applied in cold region [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2013.
- [36] JIA T, DOU P B, CHEN E J, et al. Feasibility and performance analysis of a hybrid GAX-based absorption-compression heat pump system for space heating in extremely cold climate conditions[J]. *Energy*, 2022, 242: 122936.
- [37] ZHANG X H, LI Z, LUO L G, et al. A review on thermal management of lithium-ion batteries for electric vehicles [J]. *Energy*, 2022, 238: 121652.
- [38] 彭向阳, 周华敏, 潘春平. 2008年广东电网输电线路冰灾受损情况及关键影响因素分析[J]. *电网技术*, 2009, 33(9): 108-112.
- PENG X Y, ZHOU H M, PAN C P. Damage condition of overhead transmission lines in Guangdong power grid caused by icing disaster in 2008 and analysis on key impacting factors[J]. *Power system technology*, 2009, 33 (9): 108-112.
- [39] ZHANG Z J, ZHANG H, YUE S, et al. A review of icing and anti-icing technology for transmission lines [J]. *Energies*, 2023, 16(2): 601.
- [40] 周阳. 影响电缆绝缘性能的因素研究及其对策[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
- ZHOU Y. Wire and cable insulation properties influence factors and countermeasures [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.
- [41] LI Y, REZGUI Y, ZHU H X. District heating and cooling optimization and enhancement-Towards integration of renewables, storage and smart grid [J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2017, 72: 281-294.
- [42] YU W B, ZHANG T Q, LU Y, et al. Engineering risk analysis in cold regions: state of the art and perspectives [J]. *Cold regions science and technology*, 2020, 171: 102963.
- [43] 宋丽斐, 刘尧, 李琦芬, 等. 燃气能源站主机设备风险及故障分析方法研究[J]. *上海电力大学学报*, 2020, 36 (2): 154-160.
- SONG L F, LIU Y, LI Q F, et al. Research on risk and fault analysis method of main equipment in gas distributed energy stations [J]. *Journal of Shanghai University of Electric Power*, 2020, 36(2): 154-160.
- [44] CAO M S, SHAO C Z, HU B, et al. Data-driven reliability assessment of integrated energy systems in cold weather using machine learning[J]. *IEEE transactions on industrial informatics*, 2023, 19 (3): 2018-2028.
- [45] GONÇALVES A C R, COSTOYA X, NIETO R, et al. Extreme weather events on energy systems: a comprehensive review on impacts, mitigation, and adaptation measures [J]. *Sustainable energy research*, 2024, 11(1): 4.
- [46] 孙萌萌. 考虑韧性的电热综合能源系统冰灾后优化调度研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2023.
- SUN M M. Study on optimal post-ice dispatch of electrothermal integrated energy system considering resilience[D]. Jilin: Northeast Dianli University, 2023.
- [47] 鞠冠章, 王靖然, 崔琛, 等. 极端天气事件对新能源发电和电网运行影响研究[J]. *智慧电力*, 2022, 50(11): 77-83.
- JU G Z, WANG J R, CUI C, et al. Impact of extreme weather events on new energy power generation and power grid operation[J]. *Smart power*, 2022, 50(11): 77-83.
- [48] BASKUT O, OZGENER O, OZGENER L. Effects of meteorological variables on exergetic efficiency of wind

- turbine power plants [J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2010, 14(9): 3237-3241.
- [49] 陈思宇, 蒋俊霞, 李帅兵. 极端气候条件下光伏发电功率预测方法综述[J]. *电气工程学报*, 2025, 20(1): 281-290.
- CHEN S Y, JIANG J X, LI S B. Review of photovoltaic power prediction methods under extreme climate conditions [J]. *Journal of electrical engineering*, 2025, 20(1): 281-290.
- [50] QIAN M H, CHEN N, CHEN Y G, et al. Optimal coordinated dispatching strategy of multi-sources power system with wind, hydro and thermal power based on CVaR in typhoon environment [J]. *Energies*, 2021, 14(13): 3735.
- [51] YUCESAN M, KAHRAMAN G. Risk evaluation and prevention in hydropower plant operations: a model based on Pythagorean fuzzy AHP[J]. *Energy policy*, 2019, 126: 343-351.
- [52] GABRYELCZYK A, IVANOV S, BUND A, et al. Corrosion of aluminium current collector in lithium-ion batteries: a review [J]. *Journal of energy storage*, 2021, 43: 103226.
- [53] JEEVARAJAN J A, JOSHI T, PARHIZI M, et al. Battery hazards for large energy storage systems [J]. *ACS energy letters*, 2022, 7(8): 2725-2733.
- [54] BHAYO B A, AL-KAYIEM H H, GILANI S I U, et al. Power management optimization of hybrid solar photovoltaic-battery integrated with pumped-hydro-storage system for standalone electricity generation [J]. *Energy conversion and management*, 2020, 215: 112942.
- [55] CONFREY J, ETEMADI A H, STUBAN S M F, et al. Energy storage systems architecture optimization for grid resilience with high penetration of distributed photovoltaic generation [J]. *IEEE systems journal*, 2020, 14(1): 1135-1146.
- [56] 厉天威, 江巴彦, 赵建华, 等. 南方电网沿海地区输电线路风灾事故分析[J]. *高压电器*, 2016, 52(6): 23-28.
- LI T W, JIANG S Y, ZHAO J H, et al. Wind accident analysis of southern grid coastal region transmission line [J]. *High voltage apparatus*, 2016, 52(6): 23-28.
- [57] 董冰冰, 宋家乐, 李特, 等. 强暴雨条件下 110 kV 硅橡胶绝缘子雷电冲击电弧发展过程与闪络特性[J]. *高压技术*, 2023, 49(2): 525-535.
- DONG B B, SONG J L, LI T, et al. Lightning impulse arc development process and flashover characteristics of 110 kV SIR insulators under heavy rainstorms [J]. *High voltage engineering*, 2023, 49(2): 525-535.
- [58] 徐香香. 极端天气下电网故障在线预警及风险评估技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2020.
- XU X X. Research of risk assessment and online early warning of power grid fault under extreme weather [D]. Nanjing: Southeast University, 2020.
- [59] SHAN X F, WANG P, LU W Z. The reliability and availability evaluation of repairable district heating networks under changeable external conditions [J]. *Applied energy*, 2017, 203: 686-695.
- [60] LIN X Y, TIAN Z, LU Y K, et al. An energy performance assessment method for district heating substations based on energy disaggregation [J]. *Energy and buildings*, 2022, 255: 111615.
- [61] YU J, CHEN C, LI C J. Safety analysis and emergency response of suspended oil and gas pipelines triggered by natural disasters [J]. *Sustainability*, 2022, 14(24): 17045.
- [62] WASIM M, DJUKIC M B. External corrosion of oil and gas pipelines: a review of failure mechanisms and predictive preventions [J]. *Journal of natural gas science and engineering*, 2022, 100: 104467.
- [63] PANTELI M, PICKERING C, WILKINSON S, et al. Power system resilience to extreme weather: fragility modeling, probabilistic impact assessment, and adaptation measures [J]. *IEEE transactions on power systems*, 2017, 32(5): 3747-3757.
- [64] MUSELLI M, NOTTON G, POGGI P, et al. Computer-aided analysis of the integration of renewable-energy systems in remote areas using a geographical-information system [J]. *Applied energy*, 1999, 63(3): 141-160.
- [65] IBRAHIM M S, DONG W, YANG Q. Machine learning driven smart electric power systems: current trends and new perspectives [J]. *Applied energy*, 2020, 272: 115237.
- [66] 赵斌, 胡名科, 敖显泽, 等. 太阳能光伏发电-辐射制冷建筑一体化复合装置的性能分析[J]. *太阳能学报*, 2019, 40(5): 1267-1275.
- ZHAO B, HU M K, AO X Z, et al. Performance analysis of building integrated composite apparatus for both solar photovoltaic and radiative cooling [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2019, 40(5): 1267-1275.
- [67] CASTILLO A. Risk analysis and management in power outage and restoration: a literature survey [J]. *Electric power systems research*, 2014, 107: 9-15.
- [68] 曾博, 胡品端, 王涵, 等. 基于 NSBM-DEA 的矿山综合能源系统能效评估方法[J]. *太阳能学报*, 2025, 46(3): 177-188.
- ZENG B, HU P D, WANG H, et al. Energy efficiency evaluation method of mine integrated energy system based

- on NSBM-DEA[J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2025, 46(3): 177-188.
- [69] LIU Z Y, LI H, HOU K, et al. Risk assessment and alleviation of regional integrated energy system considering cross-system failures [J]. *Applied energy*, 2023, 350: 121714.
- [70] MAKHMALBAF A, FULLER J, SRIVASTAVA V, et al. Co-simulation of detailed whole building with the power system to study smart grid applications [C]//2014 IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech). Portland, OR, USA, 2015: 192-198.
- [71] 荣俊杰, 周明, 元博, 等. 台风天气考虑故障演化的电力系统韧性评估方法[J]. *电网技术*, 2024, 48(3): 1114-1124.
- RONG J J, ZHOU M, YUAN B, et al. Resilience assessment method on power systems under typhoon disaster considering failure evolution process [J]. *Power system technology*, 2024, 48(3): 1114-1124.
- [72] FOROOTAN M M, LARKI I, ZAHEDI R, et al. Machine learning and deep learning in energy systems: a review[J]. *Sustainability*, 2022, 14(8): 4832.
- [73] 岳宗阳, 魏征, 王凯庆, 等. 基于贝叶斯网络时序模拟的综合能源系统可靠性评估[J]. *太阳能学报*, 2024, 45(10): 220-230.
- YUE Z Y, WEI Z, WANG K Q, et al. Reliability evaluation of integrated energy system based on Bayesian network time series simulation [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2024, 45(10): 220-230.

RESEARCH AND PROSPECT OF RELIABILITY ASSESSMENT METHODS OF INTEGRATED ENERGY SYSTEMS UNDER EXTREME METEOROLOGICAL CONDITIONS

Zeng Linjun¹, Ma Hongyi², Xiao Zan², Qing Wei¹, Xu Jiani¹, Liu Zheng¹

(1. *College of Energy and Power Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;*

2. *International College of Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China*)

Abstract: Under the background of global climate change, extreme weather events such as extreme high temperature, cold and freezing temperature, and strong wind and heavy rain occur frequently, which seriously threaten the operational reliability of integrated energy system (IES). Based on this, we firstly focus on the reliability assessment methods of integrated energy system under extreme weather, and analyze the impacts of three types of extreme weather, namely, extreme high temperature, severe cold and freezing temperature, and strong wind and rainstorm, on the energy production equipment (including power generation, heat supply, and energy storage equipment) and the energy transmission network in various aspects. Secondly, we comprehensively review the integrated energy system reliability assessment methods under these extreme weather conditions, and explore the shortcomings of the existing methods in terms of meteorological data processing, system coupling modeling, multi-method fusion, toughness quantification, and multi-factor considerations. Finally, possible future research directions are proposed for the operational reliability assessment of integrated energy systems under extreme meteorological conditions, aiming to provide certain theoretical and practical references for improving the accuracy and effectiveness of IES reliability assessment under extreme meteorological conditions, so as to guarantee the safety and stability of energy supply.

Keywords: integrated energy systems; extreme weather; reliability; assessment