

新型电力系统下工程风险管理重构研究

于 洋

华电郑州机械设计研究院有限公司 河南郑州 450046

摘要：随着“双碳”目标的推进，以高比例可再生能源接入、多能互补、源网荷储协同为特征的新型电力系统加速构建，传统电力工程风险管理模式面临严峻挑战。现有风险识别滞后、评估模型静态化、应对机制被动化等问题日益凸显，难以适应系统高度不确定性、动态耦合性与复杂拓扑结构带来的新型风险。本文提出“风险重构”理念，主张从系统性、动态性和韧性视角重构电力工程全生命周期风险管理框架。研究首先剖析新型电力系统在电源结构、电网形态与运行机制上的变革及其引发的工程风险新特征；进而构建基于数字孪生与大数据驱动的“感知—评估—决策—响应”闭环风险管理体系；最后提出融合韧性理论的主动适应型风险管理策略。通过某省级新型电力系统示范工程案例验证，该重构框架可提升风险预警准确率32%，缩短应急响应时间40%，显著增强工程系统的抗扰动能力与恢复力。本研究为新型电力系统工程建设提供了科学、前瞻的风险管理范式，具有重要的理论价值与实践意义。

关键词：新型电力系统；工程风险管理；风险重构；韧性管理

一、新型电力系统工程风险的新特征与挑战

新型电力系统在能源转型背景下风险特征显著演化。高比例风电、光伏并网使电源出力受气象条件主导，波动性强、预测偏差大，引发规划失准与并网稳定风险。电-气-热-氢多能系统深度耦合，能量与信息交互复杂，局部故障易跨系统传播，形成连锁故障。负荷侧因电动汽车与分布式储能接入呈现随机性与双向调节特征，加剧电力平衡与调度难度。电网中电力电子设备广泛替代同步机组，导致系统惯量下降、短路容量不足，抗扰动能力减弱。信息物理融合加深，通信网络成为关键依赖，网络攻击可能引发远程控制失效，威胁系统安全。极端天气频发对输变电设施造成直接物理破坏，暴露系统在重大扰动下的脆弱性。传统依赖历史数据与专家经验的风险管理方法静态割裂，缺乏动态感知与协同响应能力，预警滞后，处置被动，难以应对新型电力系统高不确定性、强耦合性与高韧性要求，风险管控体系面临重构需求。

二、工程风险管理重构的理论框架

1. 核心理念：从“管控”到“重构”

系统性重构要求摒弃孤立看待风险点的局限，将电力工程置于能源、信息、社会交织的开放复杂巨系统中审视，识别源-网-荷-储各环节间跨专业、跨时空的耦合关联与级联效应。风险不再被视为可完全消除的负面

因素，而是系统演化过程中的内生属性，需通过结构优化与机制设计实现风险的动态平衡。动态性重构聚焦于风险的时变特性与演化路径，借助实时数据流驱动风险模型持续更新，实现从“事后追溯”向“事前预警”与“事中调控”的转变。系统状态的微小扰动可通过非线性放大引发重大故障，唯有建立具备自适应能力的动态评估体系，才能捕捉风险萌芽并预测其发展趋势。韧性导向重构则重新定义风险管理目标，不再执着于追求绝对安全的“零风险”理想状态，而是强调系统在遭受扰动时的吸收能力、适应能力和快速恢复能力。面对极端事件与不确定性冲击，系统应具备弹性缓冲空间与功能重构能力，在部分功能受损时仍能维持核心服务，灾后可高效复原甚至实现性能跃升。

2. 重构路径：构建“四维一体”风险管理体系

全过程覆盖维度贯穿工程全生命周期，从前期规划选址的资源评估与环境影响分析，到设计阶段的技术方案比选与安全裕度设定，从施工建设中的质量控制与进度风险管控，到调试并网的系统兼容性验证，再到长期运行维护的状态监测与故障处置，直至设备退役的环保处理，各阶段风险管控形成无缝衔接的链条，避免管理断点。全要素集成维度打破技术、管理、环境、经济等领域的壁垒，统一纳入风险评估框架。技术风险涵盖设备可靠性、工艺成熟度与网络安全；管理风险涉及组织

架构、流程效率与人员能力；环境风险包括自然灾害、生态影响与社会舆情；经济风险则关注投资超支、成本波动与市场机制变化。多维要素的协同分析确保风险画像完整。全响应闭环维度建立“感知—评估—决策—响应”（SADR）的动态循环机制，通过传感器网络与信息系统实时采集数据，运用智能算法评估风险等级，生成应对策略并自动或半自动执行，执行结果反馈至感知层形成闭环优化。

3. 理论基础支撑

复杂系统理论为理解新型电力系统中风险的非线性、涌现性与级联传播提供分析框架。系统内各单元相互依赖，局部扰动可能通过耦合关系引发全局失稳，该理论支持构建网络化风险传播模型，识别关键节点与脆弱路径，揭示“小故障引发大停电”的内在机理。韧性工程理论由 Hollnagel 等人提出，强调系统在动态环境中维持功能的能力，其核心四能力——预见潜在威胁、监测运行状态、响应突发扰动、事后学习改进——为构建主动适应型风险管理体系提供方法论指导。该理论推动设计阶段预留冗余与灵活性，运行阶段强化监测与快速恢复机制，实现从“故障容忍”到“功能维持”的理念升级。贝叶斯网络及其动态扩展形式为风险建模提供概率化工具。贝叶斯网络能清晰表达变量间的因果关系，融合先验知识与实时证据，实现风险概率的动态更新；动态贝叶斯网络进一步引入时间维度，刻画风险状态随时间演化的路径，适用于预测设备退化、负荷波动等时序风险过程。

三、基于数字孪生的风险管理重构实践路径

1. 构建工程数字孪生体

新型电力系统工程风险管理重构的物理基础在于构建高保真的工程数字孪生体。该虚拟模型精确映射实际工程的物理结构、运行逻辑与环境边界，涵盖发电机组、输变电设备、控制系统、储能单元及周边地理气候条件等全要素。三维建模技术还原设备几何形态与空间布局，机理模型刻画能量转换与动态响应特性，控制逻辑仿真复现保护、调度与自动化功能。数字孪生体通过工业物联网平台与真实系统建立双向数据通道，持续接入来自 SCADA 系统的运行参数、PMU 装置的高精度同步相量、气象站的风速光照数据、视频监控的现场影像以及传感器网络的温度、振动、局部放电等状态信息。数据流经清洗、对齐与融合处理后驱动虚拟模型实时演进，实现物理世界与数字空间的动态同步。模型支持多时间尺度

仿真，既能进行秒级暂态过程模拟，也可开展小时级运行推演。在规划阶段用于多方案比选与风险预评估，在建设阶段辅助施工进度监控与质量缺陷识别，在运行阶段支撑故障预演与策略验证。数字孪生体作为风险管控的“虚拟试验场”，使工程师能在无风险环境下测试极端场景应对方案，优化系统设计与运行规则，显著提升工程全生命周期的决策科学性与风险预见能力。

2. SADR 闭环体系实施

以数字孪生体为中枢，构建“感知—评估—决策—响应”（SADR）动态闭环体系，实现风险管理的智能化与自动化。感知层依托密集部署的智能传感器与边缘计算节点，实现对电压、电流、频率、功率流、设备温度、机械振动及环境温湿度等关键参数的高频采集与初步分析，AI 图像识别技术自动检测施工中的焊接缺陷、设备安装偏差或运行中的绝缘子破损、连接点过热等隐患。评估层整合多源数据，构建涵盖电气安全、设备健康、网络延迟、气象影响等维度的风险指标体系，运用 LSTM 神经网络预测新能源出力波动趋势，采用图神经网络（GNN）分析电网拓扑变化下的潮流分布与电压稳定性，通过蒙特卡洛模拟生成大量极端场景样本，评估系统在多重故障叠加下的脆弱性等级与失效概率。决策层集成风险知识库，内嵌专家经验规则与历史处置案例，结合 NSGA-II 等多目标优化算法，在保障系统安全、经济运行与用户供电可靠性之间寻求最优平衡，生成差异化应对策略集，引入博弈论模型协调电网调度、分布式能源运营商与负荷聚合商的互动行为。

3. 韧性提升策略

规划设计阶段注重增强系统内在冗余与灵活性，合理配置旋转备用、快速调频资源与分布式储能容量，优化电网网架结构，预留可扩展接口，确保在部分单元失效时仍能维持基本功能。运行维护阶段推行基于状态的预防性维护（CBM），利用数字孪生体对设备健康度进行连续评估，预测剩余使用寿命，精准安排检修窗口，避免过度维护或突发故障，降低非计划停运风险。应急响应阶段强化系统自主恢复能力，部署微网控制系统，实现主网故障时关键区域（如医院、数据中心）在 30 秒内无缝切换至孤岛运行模式，保障重要负荷持续供电，配置移动式储能与应急电源车提升现场支援能力。学习改进阶段建立闭环反馈机制，每次风险事件或应急演练后开展深度复盘，分析处置过程的有效性与不足，将新发现的风险模式、失效机理与优化策略反向注入数字孪生

模型与风险知识库，驱动模型参数更新与算法迭代，实现系统的“自学习”与“自进化”。

四、案例分析：某省级新型电力系统示范工程风险管理重构实践

某省级新型电力系统示范工程集成了1吉瓦风电、500兆瓦光伏、200兆瓦/800兆瓦时电化学储能、智能配电网及多能互补综合能源站，新能源装机占比超过75%，是典型的高比例可再生能源系统。工程运行初期面临多重风险挑战：风电与光伏出力受天气影响显著，传统预测模型误差常超20%，导致日前调度计划与实际运行严重偏离，引发功率平衡困难与辅助服务压力；储能电站单体容量大，电池簇间一致性差异与热管理系统故障隐患叠加，存在热失控引发火灾的高风险；源-网-荷-储多类型设备由不同厂商提供，控制系统协议不统一，协同调度逻辑复杂，在功率快速波动场景下易触发保护装置误动作，造成非计划解列。原有风险管理依赖人工巡检与静态预案，响应滞后，难以应对系统高度动态性与耦合性带来的复合型风险。

为破解上述难题，工程实施风险管理重构。核心举措是部署一体化数字孪生平台，集成气象预报、设备SCADA、PMU量测、电池管理系统（BMS）及视频监控等多源数据，构建覆盖全系统的高保真虚拟模型。在此基础上建立“感知—评估—决策—响应”（SADR）闭环体系：感知层布设数千个智能传感器，实时采集关键参数；评估层应用深度学习模型，将新能源出力预测误差压缩至10%以内，基于电池内阻、温差与充放电曲线实时评估储能健康度（SOH）与安全状态（SOS）；决策层开发协同优化算法，动态生成储能充放电指令与电压无功调节方案，规避保护误动区间；响应层实现自动切负荷、储能紧急放电等控制指令的毫秒级下发。韧性建设方面，配置100兆瓦快速调频资源，划分多个可独立运行的微网区域，确保主网故障时关键用户持续供电。

实施一年后，第三方评估显示重构成效显著。风险

预警系统对电压越限、储能过热、保护误动等典型事件的识别准确率提升32%，预警时间提前30分钟以上。应急响应机制自动化程度提高，平均响应时间由15分钟缩短至9分钟。年度非计划停机时间减少40%，减少电量损失约1.2亿千瓦时。系统整体韧性指数经专业模型测算提升25%，在两次区域性极端大风天气中，通过微网孤岛运行保障了重要设施供电，验证了重构体系的有效性与实用性。该案例为新型电力系统工程风险管理提供了可复制、可推广的实践范本。

结束语

新型电力系统的快速发展对工程风险管理提出了前所未有的挑战，本文提出的“风险重构”理念，强调从系统性、动态性与韧性视角出发，构建基于数字孪生与SADR闭环的全过程、全要素、全响应管理体系，是对传统风险管理理论与实践的重要创新与深化。研究表明，通过融合大数据、人工智能等先进技术，实现风险的实时感知、精准评估、智能决策与快速响应，能够显著提升工程系统的安全水平与抗风险能力。未来研究可进一步探索量子计算在复杂风险模拟中的应用、跨区域电力系统风险协同治理机制、以及基于区块链的风险信息共享模式。

参考文献

- [1] 别朝红, 卞艺衡, 张理寅, 等. 新型电力系统应对极端事件的风险防范与应急管理关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(18): 7049-7067. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.241046.
- [2] 魏建. 电力系统配网线路运行与检修安全风险管理的研究[C]//2024精益数字化创新大会平行专场会议——冶金工业专场会议论文集(中册). 2024.
- [3] 刘俊峰, 罗燕, 侯媛媛, 等. 考虑广义储能的微电网主动能量管理优化算法研究[J]. 电网技术, 2023. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2021.1926.