

能源转型下新能源电力系统概率风险评估

别朝红^{1,2,3}, 潘超琼^{1,2,3}, 陈叶^{1,2,3}, 李芙蓉^{3,4}

(1. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安; 2. 西安交通大学陕西省智能电网重点实验室, 710049, 西安; 3. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安; 4. 英国巴斯大学电气工程学院, BA2 7AY, 英国巴斯)

摘要: 当前我国正处在能源转型的关键时期,在碳达峰和碳中和背景下,高比例新能源接入带来的不确定性使得确定性的风险评估已经无法保障电力系统的安全可靠运行。概率风险评估是评估高度不确定性系统风险的有效工具,其旨在突破确定性风险评估基于风险长期平均数字特征无法对高概率低损失和低概率高损失事件进行区分的局限。本文首先阐述了新能源电力系统概率风险评估的迫切性,然后对其进行了概述,包括概率风险评估的含义、应用现状以及新能源电力系统概率风险评估的特点,继而在风险评估研究现状的基础上,从风险建模、评估、分析和决策4个层面论述了新能源出力模型和故障模式、概率风险评估核心算法和计算效率、多层次概率指标体系和薄弱环节识别方法、运行方式安排和设备备用规划决策等方面的关键问题。未来亟需从新能源出力与负荷之间的时空相关性以及新能源的相依故障模式、概率风险全分布评估的算法和全面提高计算效率的方法、基于分割多目标风险分析理论建立面向不同风险类型的多层次指标及薄弱环节识别体系、在优化模型的目标函数或者约束条件中计及概率风险指标的决策方法等方向展开研究。

关键词: 新能源电力系统;概率风险评估;风险全分布;分割多目标风险分析;概率风险优化决策

中图分类号: TM73 文献标志码: A

DOI: 10.7652/xjtuxb202107001 文章编号: 0253-987X(2021)07-0001-11



OSID 码

Probabilistic Risk Assessment of New Energy Power System in the Context of Energy Transition: a Review

BIE Zhaohong^{1,2,3}, PAN Chaoqiong^{1,2,3}, CHEN Ye^{1,2,3}, LI Furong^{3,4}

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Smart Grid, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 4. Department of Electronic & Electrical Engineering, University of Bath, Bath, BA2 7AY, UK)

Abstract: In the context of energy transition in China, the uncertainty from a high proportion of new energy has made the deterministic risk assessment unable to ensure safe and reliable operation of power system under the 'carbon peaking and carbon neutral' background. Probabilistic risk assessment is an effective tool to evaluate the risk of high uncertainty system, which aims to break through the limitation that the deterministic risk assessment based on the long-term average numerical characteristics of risk cannot distinguish the events with high probability and low loss from those with low probability and high loss. Firstly, this paper expounds the urgency for probabilistic risk assessment of new energy power system (PRANEPS).

收稿日期: 2021-03-10。 作者简介: 别朝红(1970—),女,教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51637008)。

网络出版时间: 2021-03-16

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20210316.1648.006.html>

Then, PRANEPS is summarized including the meaning, application status of probabilistic risk assessment and characteristics of PRANEPS. Further, on the basis of the research status of risk assessment, this paper discusses the key issues of PRANEPS from four aspects of risk modeling, risk assessment, risk analysis and risk decision, such as the output model and failure mode of new energy, the core algorithm and calculation efficiency of probabilistic risk assessment, the multi-level probability index system and weak part recognition method, the operation mode and equipment spare planning decision-making. In the future, it is urgent to study temporal and spatial correlation between new energy and load, as well as dependent failure mode of new energy, probabilistic risk full distribution algorithm and improved calculation efficiency method, multi-level index and weak part recognition system for different risk types based on partitioned multi-objective risk method (PMRM), decision-making method considering probabilistic risk index in the objective function or constraint of optimization model.

Keywords: new energy power system; probabilistic risk assessment; full risk distribution; partitioned multi-objective risk method; probabilistic risk optimization decision

我国国家主席习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上发表重要讲话^[1],明确指出“中国二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和”,表明我国需进一步加快能源变革转型,以解决当前我国面临的能源结构不合理、资源环境约束趋紧、能源安全风险高、能源利用效率低等严重制约经济、社会、环境协调可持续发展的深层次矛盾与问题。同时,我国关于制定“十四五”规划的建议^[2]中也明确指出要“促进经济社会发展全面绿色转型,建设人与自然和谐共生的现代化”。

能源转型给我国能源行业的发展带来了巨大的机遇和挑战。新能源由于其资源丰富、清洁低碳的特点受到广泛关注,国务院发布的《新时代的中国能源发展》白皮书指出要大力推进低碳能源替代高碳能源、可再生能源替代化石能源,优先发展非化石能源,建设多元清洁的能源供应体系^[3]。同时,随着高比例新能源不断接入电力系统,其所具有的间歇性和波动性给系统带来了高度的不确定性。

风险评估由于能够准确地刻画电力系统所面临的威胁、存在的弱点及造成的影响,而成为了确保系统安全、优质、经济地供应电能的首要研究。然而,随着高比例具有高度不确定性的新能源接入电力系统,确定性的风险评估已经无法适应新能源电力系统在规划、运行、交易、决策等领域的应用需求,而概率风险评估是评估高度不确定性系统风险的有力工具,因此针对新能源电力系统的概率风险评估成为非常必要的研究和亟待解决的难题。

本文立足于能源转型下的新能源电力系统,首先阐述了新能源电力系统概率风险评估的迫切性,

其次对概率风险评估的含义和应用现状以及新能源电力系统概率风险评估的特点进行了概述,然后在风险评估研究现状的基础上,从风险建模、风险评估、风险分析和风险决策4个层面分析了新能源电力系统概率风险评估的关键问题,最后对未来研究方向进行了展望并总结。

1 新能源电力系统概率风险评估的迫切性

对于新能源电力系统而言,在保障系统安全、优质、经济地供应电能的基础上,适应高比例新能源接入的特点是其发展的核心要求之一。随着新能源的不断接入,系统将呈现高度的不确定性,同时电力系统的规模将不断扩大,网架结构也将变得更加复杂,确保系统在如此不确定且复杂情况下的安全可靠供电,并避免低概率高损失故障的发生成为新能源电力系统规划和运行过程中的首要任务。

针对上述新能源电力系统所要解决的在高度不确定性情况下实现系统安全可靠供电的这—首要任务,确定性的风险评估在风险建模方面,新能源出力模型大多单独考虑一种类型新能源的时空相关性,新能源故障模式多为单一故障模式;在风险评估方面,算法核心大多基于对高概率低损失和低概率高损失故障无差别对待的时序或者非时序蒙特卡罗模拟,算法加速大多是基于状态抽样层面的;在风险分析方面,风险指标均基于长期的平均数字特征,薄弱环节识别一般使用可靠性跟踪或者灵敏度分析法;在风险决策方面,无论是运行方式安排还是设备备用规划上,均使用确定性的原则且对不同类型的风险

险不作区分。综上所述,确定性风险评估的理论和方法已经无法适应新能源电力系统在规划、运行、交易、决策等领域的应用需求。

而后兴起的概率风险评估通过建立不确定性来源的模型、刻画不确定性故障的发展过程、分析不确定性的最终结果、指导系统的优化决策等来开展具有极高不确定度系统的风险评估。由此而言,概率风险评估为解决含高比例新能源电力系统风险评估所面临的瓶颈难题提供了一条可行的研究思路。虽然概率风险评估研究已经在航空航天、核能、化工、国防等领域得到广泛应用,但是由于新能源电力系统具有高度不确定性、元件数目繁多、拓扑结构复杂、电磁与机电暂态交织等众多特点,其他领域的概率风险评估研究成果难以直接应用。针对新能源电力系统的上述特点,从模型、方法、指标和应用等方面进行深入研究,建立一套完整的新能源电力系统概率风险评估方法体系十分迫切。

2 新能源电力系统概率风险评估概述

2.1 概率风险评估的含义

概率风险评估的概念最早于 1972 年在美国原子能委员会首次应用事件树和故障树相结合的分析技术,成功地对核电站的风险进行定量的综合评估后得到广泛应用。随后,美国核管理委员会和美国航空航天局开始使用概率风险评估对系统风险进行定量的评估,用以实现工程系统的安全管理^[4-6]。

概率风险评估是一种定量的概率性风险评估方法,通过概率性建模综合考虑系统中的各种定量信息和随机因素,构建量化的风险事件链模型,利用合理的不确定性分析方法,预测系统的风险水平,分析影响风险的关键因素,进而为复杂系统的风险管理提供决策支持^[7-9]。概率风险评估的核心内涵包括风险源概率建模、事件链建模、故障建模、模型量化与集成、不确定性与敏感性分析、结果分析,它们之间的内在联系如图 1 所示。

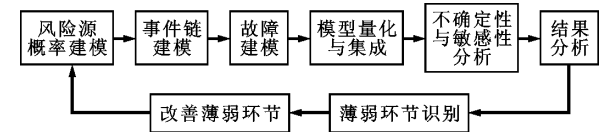


图 1 概率风险评估的核心内涵

Fig. 1 Kernel contents of probabilistic risk assessment

概率风险评估与传统可靠性评估及危险分析的区别和联系如表 1 所示,概率风险评估针对具有不确定性的复杂系统进行完整、系统的概率性量化建

模和分析,它不仅提供概率性的风险指标,而且更加强调对导致风险不确定性的来源、发展和影响的准确描述,因此更能反映系统的真实风险水平,进而为资源分配和风险决策提供更加合理的依据^[10]。

表 1 概率风险评估与可靠性评估及危险分析的对比

Table 1 Comparisons of probabilistic risk assessment, reliability assessment, and hazard analysis			
评估方法	后果严重度 描述程度	后果可能性 描述程度	不确定性 分析程度
概率风险评估	详细	详细	详细
可靠性评估	简单(两状态)	详细	简单(置信度)
危险分析	详细	无	无

2.2 概率风险评估的应用现状

由于概率风险评估技术在不确定复杂系统风险建模、评估、分析、决策等方面的优势,已经在航空航天、核能、化工、国防等领域广泛应用。文献[11-14]在剖析概率风险评估技术在载人航天的范围、对象、实施条件等方面工程实用性问题的基础上,结合我国航天系统安全性分析的现状,将该技术应用于我国航天系统并给出了具体的应用示例。文献[15-17]介绍了概率风险评估技术在反应堆核设施和放射性物质运输以及核电厂等方面的应用。文献[18]分析了概率风险评估技术在国外污染场地风险评估中的案例应用,通过对比传统确定性风险评估,进一步说明了概率风险评估在我国污染场地健康管理应用上的有效性。由此而言,概率风险评估为解决含高比例新能源电力系统风险评估目前的瓶颈问题提供了可行的研究思路。

2.3 新能源电力系统概率风险评估的特点

基于概率风险评估理论的核心内涵,欲构建完整的新能源电力系统概率风险评估方法体系,需要从风险建模、风险评估、风险分析以及风险决策 4 个方面进行深入研究。具体而言,它通过新能源的概率风险建模、复杂电力系统的概率风险建模及算法研究,提出全面反映系统实际风险水平的多层次指标体系及薄弱环节识别方法,从而探索具有更高实用价值的新能源电力系统概率风险评估应用理论。其旨在突破确定性风险评估基于风险长期平均数字特征无法对高发生概率低严重后果和低发生概率高严重后果事件进行区分的局限,全面精细地刻画系统的不确定性,为高比例新能源接入的电力系统的规划和运行提供合理的决策依据。新能源电力系统概率风险评估在模型、算法、指标和应用方面的具体

关键问题将在下一章中展开详述。

3 新能源电力系统概率风险评估的关键问题

3.1 新能源的概率风险建模

3.1.1 新能源出力模型研究现状 新能源间歇性和波动性的特点给电力系统的风险评估带来了极大的挑战,随着对新能源特点认知的不断深入,其风险模型也在逐步完善。其中,风力发电技术起步较早,风险模型发展较为成熟,从单一风电场到多个风电场、从仅考虑概率分布到考虑时空相关性等都有相应的研究,现有的风电场出力模型总结于表 2 中。

表 2 风电场出力模型
Table 2 Output models of wind farms

文献	方法	特点
[19]	概率分布函数法	威布尔分布抽样
[20-21]	马尔可夫链法	状态概率转移
[22-23]	自回归移动平均法	时间相关性
[24]	拉丁超立方采样法	空间相关性
[25-26]	Copula 函数法	时空相关性

相对而言,光伏发电起步较晚。文献[27]基于光伏电站出力服从的贝塔分布提出了光伏发电的概率分布函数抽样法。文献[28]根据季节判断云朵的位置和降雨量,结合晴空系数和光透射比等天气参数,提出了每小时光辐照度数据的生成算法。

同时考虑风电场和光伏电站出力的模型方面也有相应的研究成果。文献[29]提出经验模态分解算法来预测风速和光辐照度数据。文献[30]分析了同一地区风速和光辐照度序列的自相关性和互相关性。文献[31]在考虑风电场和光伏电站空间相关性的基础上对新能源场站进行了容量规划。文献[32]考虑风功率和负荷之间的不确定性及相关性研究了电力系统的概率多目标优化潮流。

3.1.2 新能源故障模式研究现状 新能源场站作为电力系统的发电元件,其故障的不确定性给系统的安全可靠运行带来风险。目前新能源的故障模式多为单一故障模式,相依故障模型方面的研究较少考虑。实际上,相依故障后果严重,忽略新能源相依故障使得风险评估结果过于乐观,无法反映其接入系统后风险的真实水平。

3.1.3 风险建模的关键问题 现有的新能源出力模型中大多单独考虑风电场出力的时空相关性或者单独考虑光伏电站出力的时空相关性,较少从互补

的角度同时考虑风电场和光伏电站出力之间的时空相关性以及新能源出力与负荷之间的时空相关性;新能源故障模式多为单一故障模式,较少同时考虑内、外部因素导致的相依故障模式。随着高比例具有高度不确定性新能源的接入,电力系统所面临的风险进一步增大,现有的新能源出力和故障模型无法精确刻画其不确定性,亟需进一步完善新能源的风险模型,为系统的概率风险评估做好准备工作。

(1)在出力模型方面,由于 Copula 函数模型和其他考虑相关性的模型相比,能够更好地保持历史新能源出力数据的基本统计量、概率分布特性以及线性和非线性相关结构,故而可以利用其从互补的角度考虑风电场和光伏电站出力之间的时空相关性以及新能源出力与负荷之间的时空相关性。

(2)在故障模式方面,除考虑单一故障模式外,还需要借鉴常规元件故障模型研究极端天气等外部因素对新能源故障停运的影响,并基于可靠性理论中的共因故障和共模故障原理研究内部因素对故障停运的影响,建立新能源的复杂相依故障模型。

3.2 概率风险评估技术

3.2.1 风险评估算法研究现状 现有的电力系统风险评估方法^[33-38]均基于传统的非时序或者时序蒙特卡罗框架,仅针对抽样到的故障状态进行充裕度评估和状态校正,不考虑故障的发展。对于电力系统而言,连锁故障反映故障的进一步发展,忽略连锁故障的风险评估将导致评估结果偏离真实的风险水平。同时,新能源的时序出力波动性是连锁事故链的重要触发源,即系统故障时段内新能源出力的波动很可能引发进一步故障,但目前同时考虑高比例新能源不确定性和连锁故障之间相互作用对电力系统风险评估影响的研究还较少。

另外,现有风险评估方法大多基于风险的长期平均数字特征,对高发生概率低严重后果和低发生概率高严重后果事件不作区分地抽样评估,无法全面、深刻、真实地反映电力系统实际所面临的风险特性。实际上,高概率低损失和低概率高损失故障发生的概率和对电力系统造成的后果不同,如图 2 所示,决策者在面对不同风险类型时所做的决定也有很大的差别。

3.2.2 算法计算效率研究现状 提高算法的计算效率也是风险评估研究的重点,蒙特卡罗模拟法的计算量与试验函数的方差成正比,与估计精度的平方成反比,即在一定的精度下,减小抽样次数的唯一途径就是减小方差。目前的研究大多是从状态抽样

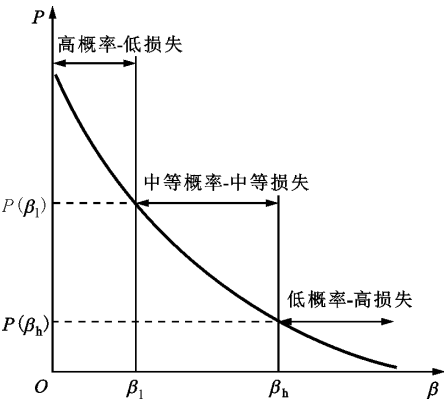


图 2 风险类型
Fig. 2 Risk types

这一层面来加速算法的,包括控制变量法、分层抽样法、重要抽样法、故障智能筛选排序法等减小方差的研究,归纳于表 3 中。随着电力系统越来越可靠,风险评估的计算精度越来越小,所需要的计算量变大,仅依靠传统的状态抽样层面减小方差的加速方法已经不能满足高比例新能源接入的电力系统对风险评估计算效率的要求。

表 3 蒙特卡罗模拟加速方法

Table 3 Acceleration methods of Monte Carlo simulation

文献	方法	特点
[39]	控制变量法	状态抽样层面
[40]	分层抽样法	状态抽样层面
[41]	重要抽样法	状态抽样层面
[42]	故障智能筛选排序法	状态抽样层面

3.2.3 风险评估的关键问题 在算法核心方面,现有风险评估算法不能同时考虑连锁故障和新能源出力时序波动性之间的相互作用对电力系统的影响,且评估时不能区分不同类型的风险;在算法效率方面,传统基于状态抽样层面的加速方法有待提高。因此,亟需建立针对新能源电力系统的系统化、高效的概率风险评估算法。

(1)在评估算法方面,需要研究能够区分处于中心分布和尾部分布两种不同风险类型的风险全分布评估算法。首先,对于中心分布的高概率低损失风险,利用时序连锁交叉蒙特卡罗方法考虑新能源时序出力波动性和连锁故障之间相互作用对系统风险的影响;其次,可以利用极值原理来刻画尾部分布的低概率高损失风险的特性。

(2)在计算效率方面,研究从蒙特卡罗模拟的全过程包括状态抽样、状态评估和状态校正 3 个方面全面提高概率风险评估算法效率的方法。首先,在

状态抽样环节可以通过子集模拟法引入合理的中间事件,从而精准高效地捕捉低频高危状态;其次,在状态评估环节可以将解析法和模拟法相结合,从而减少每次状态评估的时间;最后,在状态校正环节可以通过对偶理论研究去除冗余约束的方法,从而减少优化模型的求解时间。

3.3 多层次概率指标体系和薄弱环节识别方法

3.3.1 风险指标体系研究现状 当前,电力系统风险评估的指标体系主要以基于期望值的单一性风险指标为主^[43-49],不能区分高概率低损失和低概率高损失故障,致使后者被前者湮没。实际上,高概率低损失故障虽然发生概率高,但给系统造成的损失小,而低概率高损失故障虽然发生概率低,但带来的后果格外严重且易引发连锁事故,是电力系统运行人员严格防控的对象。因此,面向不同的风险类型必须使用不同的指标进行评估,目前的指标体系还无法做到。

3.3.2 薄弱环节识别方法研究现状 识别系统中的薄弱环节,从而提出具有针对性的改善措施,对电力系统安全可靠运行非常重要。在电力系统薄弱环节识别方面,现有的研究大致分为可靠性跟踪和灵敏度分析两种方法,总结归纳如表 4 所示。

表 4 薄弱环节识别方法

Table 4 Weak part recognition methods

方法	文献	特点
可靠性跟踪	[50-51]	常规输配电系统
	[52]	贝叶斯网络模型
	[53]	克服比例分摊精度低的问题
灵敏度分析	[54]	常规配电网
	[55]	变电站
	[34]	储能容量规划
	[56]	交直流系统

可靠性跟踪法通过将系统的可靠性指标完全分摊到每个元件上,来反映每个元件对系统可靠性指标的贡献程度,进而识别出系统中最薄弱的元件。文献[50]基于配电网分块算法和可靠性跟踪准则,提出了配电网元件可靠性双层分摊模型。文献[51]运用可靠性跟踪原理分析了省级电网各元件对系统不可靠性的分摊关系,辨识出了 4 种典型运行方式下的系统薄弱环节并提出针对性的改善方案。文献[52]从部件的角度构建了电力变压器的贝叶斯网络模型,并提出了基于贝叶斯网络的多状态变压器可靠性跟踪分析方法。文献[53]基于 Shapley 值分摊

不同元件停运对系统削负荷的影响,克服了传统上基于比例分摊准则平均化处理元件对系统不可靠性贡献度导致的精度不高的问题。

灵敏度分析法通过求解可靠性指标对系统元件参数的偏导数,研究系统可靠性对元件参数变化的敏感程度,从而识别系统的薄弱环节。文献[54]利用灵敏度分析法分析了配电网可靠性指标对于可量化和不可量化因素的灵敏度。文献[55]基于灵敏度分析法比较了断路器元件参数变化对变电站可靠性的影响。文献[34]在多个风电场接入电力系统的场景下,从灵敏度分析的角度研究了储能容量的规划问题。文献[56]针对含风电的交直流电力系统,推导出了可靠性指标对直流功率和双馈感应发电机有功出力灵敏度的解析表达式。

3.3.3 风险分析的关键问题 总体而言,无论是风险评估指标体系还是薄弱环节识别方面,现有的研究均不能对高概率低损失和低概率高损失故障进行区分,无法做到针对不同的风险类型给出相应的评估指标和薄弱环节识别方法,运行管理人员只能基于“大平均”的评估结果进行决策,不利于电力系统的安全可靠运行。特别是高比例具有高度不确定性新能源接入的场景下,电力系统风险规避和管控对薄弱环节识别的要求更加严格,亟需建立能够反映电力系统风险水平的多层次概率风险评估指标体系和基于概率风险评估的薄弱环节识别方法。

(1)在多层次概率指标体系方面,分割多目标风险分析理论将系统的风险状态划分为多个区间,除了得到单一的平均风险指标外,还可以得到不同风险区间的风险分布,有利于捕捉系统潜在的极端风险^[57]。它引入了条件期望值的概念,例如高风险区间的风险概率和条件风险分别如下

$$P_h = \int_{\beta_h}^{+\infty} P(x) dx \quad (1)$$

$$R_h = \frac{\int_{\beta_h}^{+\infty} xP(x) dx}{\int_{\beta_h}^{+\infty} P(x) dx} \quad (2)$$

式中: P_h 为高风险区间的风险概率; β_h 为高风险区间划分的起始风险; $P(x)$ 为当系统风险为 x 时的概率; R_h 为高风险区间的条件风险。其余风险区间的公式以此类推。基于此,可以利用分割多目标风险分析理论构建多层次的概率风险评估指标体系,以反映不同层次的风险水平。

(2)在薄弱环节识别方面,可以将概率风险评估中的割集重要度、微分重要度等重要度辨识方法和

传统电力系统可靠性灵敏度分析理论相结合,研究含新能源节点影响的全面薄弱环节识别体系。

3.4 概率风险优化决策

3.4.1 运行方式安排研究现状 推广风险评估结果的应用能够最大程度地保证电力系统的安全可靠运行。在运行方式安排的决策应用方面,通常分为在目标函数和约束条件中考虑风险指标两种方法。文献[58]将切负荷费用考虑在目标函数最小化中,从而对社区微电网的储能容量进行优化。文献[59]在建筑热动力学背景下,将风险指标考虑在目标函数中来对社区微电网进行优化调度。文献[60]在约束条件中给出条件风险价值的上下限范围,从而实现自主分布式智能电网的电力采购优化。文献[61-62]对可靠性指标进行约束,以达到优化决策维护配电系统的目的。

3.4.2 设备备用规划研究现状 在电力系统备用规划方面,文献[63]提出了一种考虑燃气蒸汽联合循环机组运行模式的综合能源系统备用配置与校核模型,克服了传统线性模型高估机组爬坡能力所导致的系统实际备用不足的问题。文献[64]基于条件风险价值研究了综合能源系统风险厌恶机组组合问题,为电力系统设备备用规划研究打下了基础。

3.4.3 风险决策的关键问题 传统的电力系统风险决策使用确定性的原则,如发电容量规划的百分比备用原则和输电规划的 $N-1$ 原则等^[65]。同时,仍存在无法区分高概率低损失和低概率高损失两种不同风险类型的问题,使得决策结果太过粗略,减弱了风险评估对大规模停电事故的预防抵御作用。在高比例的具有高度不确定性的新能源接入之后,电力系统的可靠性和经济性之间的矛盾愈发突出,这些确定性的应用原则更加无法合理、全面地考虑新能源、系统元件故障和负荷的不确定性,故而无法满足系统在规划、运行、交易、决策等领域的应用需求,亟需探索和研究具有更高实用价值的新能源电力系统概率风险评估决策应用理论,为规划和运行提供合理的决策依据,进而提高系统的整体安全运行水平。

将新能源的概率风险模型应用到复杂电力系统概率风险评估的方法中,结合多层次的概率风险评估指标体系和薄弱环节识别方法,同时考虑确定性和概率性的因素,通过在优化决策模型的目标函数或者约束条件中考虑概率风险指标,来实现对新能源电力系统规划和运行中不同层次风险决策的有效指导,如

$$\min \left\{ R'(t) + \sum_{i=1}^N [C_i(t) + S_i(t)] \right\} \quad (3)$$

$$R_l \leq R(t) \leq R_u \quad (4)$$

式中: $R'(t)$ 为概率风险费用; N 为发电机组总数; $C_i(t)$ 为 t 时刻发电机组 i 的燃料费用; $S_i(t)$ 为 t 时刻发电机组 i 的启停费用; $R(t)$ 为概率风险指标; R_u 和 R_l 为概率风险指标的上下界。

上述新能源电力系统概率风险评估关键问题在风险建模、评估、分析和决策方面的具体内容及 4 者之间的关系如图 3 所示。

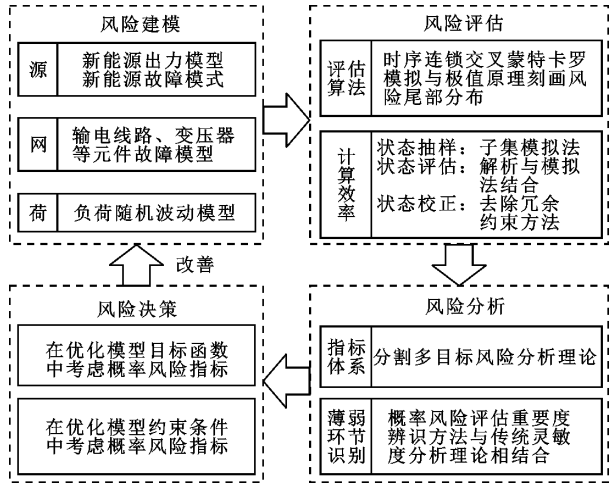


图 3 新能源电力系统概率风险评估的关键问题

Fig. 3 Key issues about probabilistic risk assessment of new energy power system

4 新能源电力系统概率风险评估未来研究方向展望

随着我国能源转型的不断深入,高比例新能源的接入既是构建清洁低碳、安全高效的现代能源体系的必要手段,同时其高度的不确定性又给电力系统的安全可靠运行带来了诸多挑战,针对新能源电力系统的概率风险评估就显得尤为重要。结合风险评估的研究现状,新能源电力系统概率风险评估未来的研究重点如下。

(1)在风险建模方面:①从互补的角度考虑风电场和光伏电站出力之间的时空相关性以及新能源出力与负荷之间的时空相关性;②同时考虑新能源的单一故障模式以及由内、外部因素导致的相依故障模式。

(2)在风险评估方面:①研究风险全分布评估算法,对于中心分布的高概率低损失故障研究能够考虑新能源时序波动性与连锁故障之间相互作用对风险影响的评估算法,并寻求能够准确刻画低概率高

损失故障尾部分布特性的方法;②研究从蒙特卡罗模拟的全过程包括状态抽样、状态评估和状态校正 3 个方面全面提高算法计算效率的方法。

(3)在风险分析方面:①基于分割多目标风险分析理论提出面向不同风险类型的多层次概率风险评估指标体系;②将概率风险评估中的重要度辨识方法与传统的灵敏度分析理论相结合,来研究含新能源节点影响的全面薄弱环节识别体系。

(4)在风险决策方面:同时考虑确定性的传统优化决策模型和概率性的风险评估指标,通过在优化模型的目标函数或者约束条件中计及概率风险指标,实现对新能源电力系统规划和运行中不同层次风险决策的有效指导。

5 结 论

新能源电力系统概率风险评估既是衡量高比例不确定性新能源接入系统所带来风险的亟需研究,又是确保系统安全可靠运行的关键保障。概率风险评估针对具有不确定性的复杂系统进行完整和系统的概率性量化建模和分析,相对于传统可靠性评估而言,它能够提供更概率性的风险指标且更加强调对风险发展和影响的准确描述,非常有利于确保新能源电力系统在高度不确定情况下的安全可靠运行。未来应结合我国能源转型的新特征,重点研究新能源电力系统概率风险评估在新能源出力模型和故障模式、概率风险评估核心算法和计算效率、多层次概率指标体系和薄弱环节识别方法、运行方式安排和设备备用规划决策等方面的关键技术。

参考文献:

[1] 中华人民共和国中央人民政府. 习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上发表重要讲话 [EB/OL]. [2020-12-14]. http://www.gov.cn/xinwen/2020-09/22/content_5546168.htm.
[2] 中华人民共和国中央人民政府. 中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议 [EB/OL]. [2020-12-04]. http://www.gov.cn/zhengce/2020-11/03/content_5556991.htm.
[3] 中华人民共和国国务院. 新时代的中国能源发展白皮书 [EB/OL]. [2021-03-04]. <http://www.scio.gov.cn/zfbps/32832/Document/1695117/1695117.htm>.
[4] 颜兆林,周经伦,龚时雨,等. 概率风险评价及其应用 [J]. 劳动保护科学技术, 2000(6): 26-29.
YAN Zhaolin, ZHOU Jinglun, GONG Shiyu, et al.

- Probabilistic risk assessment and its application [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2000(6): 26-29.
- [5] 颜兆林, 龚时雨, 周经伦. AHP 在概率风险评价中的应用 [J]. 工业安全与防尘, 2001(5): 33-36.
YAN Zhaolin, GONG Shiyu, ZHOU Jinglun. Application of AHP in probabilistic risk assessment [J]. Industrial Safety and Dust Control, 2001(5): 33-36.
- [6] 任培, 周经伦, 郑龙, 等. 基于 PRA 方法风险评价系统的设计与研究 [J]. 计算机应用研究, 2007(6): 91-93.
REN Pei, ZHOU Jinglun, ZHENG Long, et al. Design and study of risk assessment system based on PRA [J]. Application Research of Computers, 2007(6): 91-93.
- [7] 郑恒, 周海京. 概率风险评价 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [8] 周海京, 遇今, 郑恒. 概率风险评价技术及应用 [J]. 质量与可靠性, 2007(6): 6-8.
ZHOU Haijing, YU Jin, ZHENG Heng. Probabilistic risk assessment technique and its application: part I [J]. Quality and Reliability, 2007(6): 6-8.
- [9] 周海京, 遇今, 郑恒. 概率风险评价技术及应用: 续 [J]. 质量与可靠性, 2008(1): 11-15.
ZHOU Haijing, YU Jin, ZHENG Heng. Probabilistic risk assessment technique and its application: part II [J]. Quality and Reliability, 2008(1): 11-15.
- [10] 海姆斯. 风险建模、评估和管理 [M]. 胡平, 译. 2 版. 西安: 西安交通大学出版社, 2007.
- [11] 赵丽艳, 顾基发. 概率风险评估(PRA)方法在我国某型号运载火箭安全性分析中的应用 [J]. 系统工程理论与实践, 2000(6): 91-97.
ZHAO Liyan, GU Jifa. The application of probabilistic risk assessment approach to the safety analysis of one specific type of launch vehicle in China [J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2000(6): 91-97.
- [12] 庄锦山. 概率风险评价及其在天基测控系统分析中的应用 [J]. 全球定位系统, 2010, 35(4): 58-61.
ZHUANG Jinshan. Application of probabilistic risk assessment on researching space-based tracking & control system [J]. GNSS World of China, 2010, 35(4): 58-61.
- [13] 顾基发, 赵丽艳. 航天系统安全性分析的的概率风险评估方法 [J]. 系统工程与电子技术, 1999(8): 3-5.
GU Jifa, ZHAO Liyan. Introduction of probabilistic risk assessment approach to analyze the safety of space systems [J]. Systems Engineering and Electronics, 1999(8): 3-5.
- [14] 节永师, 王伟, 王功, 等. 载人航天概率风险评价工程实践及其在空间应用中的前景分析 [J]. 载人航天, 2017, 23(1): 98-103.
JIE Yongshi, WANG Wei, WANG Gong, et al. Engineering practice of probabilistic risk assessment in manned spaceflight and its prospect analysis in space application system [J]. Manned Spaceflight, 2017, 23(1): 98-103.
- [15] 吴纯全, 仇永萍. 非能动技术对核电厂概率风险评价结果的影响 [J]. 核电工程与技术, 2008(1): 11-14.
WU Chunquan, QIU Yongping. Effect of passive technique application on probabilistic risk assessment results of nuclear power plant [J]. Nuclear Power Engineering and Technology, 2008(1): 11-14.
- [16] 赵兵, 张建岗, 王学新, 等. 概率风险评价(PRA)技术在放射性物质运输领域的应用 [C]//中国核学会 2001 学术年会. 北京: 中国核学会, 2001: 690-693.
- [17] 李禾, 郝海英. Risk Spectrum 软件在 PRA 领域中的应用 [J]. 核电工程与技术, 2001, 14(3): 13-18.
LI He, XI Haiying. Application of risk spectrum software in the domain of PRA [J]. Nuclear Power Engineering and Technology, 2001, 14(3): 13-18.
- [18] 贾晓洋, 夏天翔, 姜林. PRA 在污染场地健康风险评估中的应用 [C]//2013 中国环境科学学会学术年会论文集: 第四卷. 北京: 中国环境科学学会, 2013: 2896-2900.
- [19] WANG Jianzhou, HUANG Xiaojia, LI Qiwei, et al. Comparison of seven methods for determining the optimal statistical distribution parameters: a case study of wind energy assessment in the large-scale wind farms of China [J]. Energy, 2018, 164: 432-448.
- [20] 陆丹, 袁越, 杨苏. 基于马尔可夫链蒙特卡罗法的独立风光柴储微网运行风险评估 [J]. 电网技术, 2017, 41(3): 823-830.
LU Dan, YUAN Yue, YANG Su. Operation risk assessment of islanded wind-PV-diesel-storage microgrid based on Markov chain Monte Carlo method [J]. Power System Technology, 2017, 41(3): 823-830.
- [21] MA Jinrui, FOULADIRAD M, GRALL A. Flexible wind speed generation model: markov chain with an embedded diffusion process [J]. Energy, 2018, 164: 316-328.
- [22] 邹金, 朱继忠, 赖旭, 等. 基于时空自回归移动平均模型的风电出力序列模拟 [J]. 电力系统自动化, 2019, 43(3): 101-109.
ZOU Jin, ZHU Jizhong, LAI Xu, et al. Simulation of wind power output series based on space-time auto-

- regressive moving average model [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(3): 101-109.
- [23] ZHAO Yongning, YE Lin, PINSON P, et al. Correlation-constrained and sparsity-controlled vector autoregressive model for spatio-temporal wind power forecasting [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(5): 5029-5040.
- [24] LI Jinghua, ZHU Dunlin. Combination of moment-matching, Cholesky and clustering methods to approximate discrete probability distribution of multiple wind farms [J]. *IET Renewable Power Generation*, 2016, 10(9): 1450-1458.
- [25] LIN Chaofan, BIE Zhaohong, PAN Chaoqiong, et al. Fast cumulant method for probabilistic power flow considering the nonlinear relationship of wind power generation [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2020, 35(4): 2537-2548.
- [26] PAN Chaoqiong, WANG Can, ZHAO Ziyang, et al. A Copula function based Monte Carlo simulation method of multivariate wind speed and PV power spatio-temporal series [J]. *Energy Procedia*, 2019, 159: 213-218.
- [27] YING Yiqiang, WU Yingjun, SU Yiqiang, et al. Dispatching approach for active distribution network considering PV generation reliability and load predicting interval [J]. *The Journal of Engineering*, 2017(13): 2433-2437.
- [28] LASLETT D, CREAGH C, JENNINGS P. A method for generating synthetic hourly solar radiation data for any location in the south west of Western Australia, in a world wide web page [J]. *Renewable Energy*, 2014, 68: 87-102.
- [29] WANG Yamin, WU Lei. On practical challenges of decomposition-based hybrid forecasting algorithms for wind speed and solar irradiation [J]. *Energy*, 2016, 112: 208-220.
- [30] ANJOS P S, SILVA A S A, STOSIC B, et al. Long-term correlations and cross-correlations in wind speed and solar radiation temporal series from Fernando de Noronha Island, Brazil [J]. *Physica: A*, 2015, 424: 90-96.
- [31] CAO Yongji, ZHANG Yi, ZHANG Hengxu, et al. Probabilistic optimal PV capacity planning for wind farm expansion based on NASA data [J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2017, 8(3): 1291-1300.
- [32] SHARGH S, KHORSHID-GHAZANI B, MOHAMMADI-IVATLOO B, et al. Probabilistic multi-objective optimal power flow considering correlated wind power and load uncertainties [J]. *Renewable Energy*, 2016, 94: 10-21.
- [33] JOHNSON B, COTILLA-SANCHEZ E. Estimating the impact of ocean wave energy on power system reliability with a well-being approach [J]. *IET Renewable Power Generation*, 2020, 14(4): 608-615.
- [34] OH U, LEE Y, CHOI J, et al. Reliability evaluation of power system considering wind generators coordinated with multi-energy storage systems [J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2020, 14(5): 786-796.
- [35] ZHUANG Xinran, YE Chengjin, DING Yi, et al. Data-driven efficient reliability evaluation of power systems with wind penetration: an integrated GANs and CE method [J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2020, 14(4): 577-584.
- [36] HOU Kai, JIA Hongjie, LI Xue, et al. Impact-increment based decoupled reliability assessment approach for composite generation and transmission systems [J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2018, 12(3): 586-595.
- [37] PENG Lvbin, HU Bo, XIE Kaigui, et al. Analytical model for fast reliability evaluation of composite generation and transmission system based on sequential Monte Carlo simulation [J]. *Electrical Power and Energy Systems*, 2019, 109: 548-557.
- [38] 杜孟珂, 程浩忠, 柳璐. 考虑大用户直购电的发电系统可靠性评估方法 [J]. *电网技术*, 2019, 43(2): 570-575.
- DU Mengke, CHENG Haozhong, LIU Lu. Reliability evaluation of generation and transmission system considering direct power purchase by large consumers [J]. *Power System Technology*, 2019, 43(2): 570-575.
- [39] 杜江, 郭瑞鹏, 李传栋, 等. 电力系统可靠性评估中的重要控制法 [J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(5): 69-74.
- DU Jiang, GUO Ruipeng, LI Chuandong, et al. An importance-control method for power system reliability evaluation [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(5): 69-74.
- [40] 王秀丽, 武泽辰, 曲翀. 光伏发电系统可靠性分析及其置信容量计算 [J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(1): 15-21.
- WANG Xiuli, WU Zechen, QU Chong. Reliability and capacity value evaluation of photovoltaic generation systems [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(1):

- 15-21.
- [41] 曹伟, 叶桂南, 周先哲, 等. 基于非序贯蒙特卡罗法的复杂大电网可靠性评估 [J]. 电工技术, 2020(13): 29-31.
- CAO Wei, YE Guinan, ZHOU Xianzhe, et al. Reliability evaluation of complex large power grid based on non-sequential Monte Carlo method [J]. Electric Engineering, 2020(13): 29-31.
- [42] 王灿, 别朝红, 潘超琼, 等. 考虑期望损失的综合能源系统故障智能筛选和排序方法 [J]. 电力系统自动化, 2019, 43(21): 44-55.
- WANG Can, BIE Zhaohong, PAN Chaoqiong, et al. Contingency intelligent screening and ranking approach for integrated energy system considering expected loss [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(21): 44-55.
- [43] SHARIATKHAH M H, HAGHIFAM M R, PARSA-MOGHADDAM M, et al. Modeling the reliability of multi-carrier energy systems considering dynamic behavior of thermal loads [J]. Energy and Buildings, 2015, 103: 375-383.
- [44] ZENG Ziyu, DING Tao, XU Yiting, et al. Reliability evaluation for integrated power-gas systems with power-to-gas and gas storages [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(1): 571-583.
- [45] LI Gengfeng, BIE Zhaohong, KOU Yu, et al. Reliability evaluation of integrated energy systems based on smart agent communication [J]. Applied Energy, 2016, 167: 397-406.
- [46] HE Zhe, HOU Kai, WANG Yue, et al. Reliability modeling for integrated community energy system considering dynamic process of thermal loads [J]. IET Energy Systems Integration, 2019, 1(3): 1-11.
- [47] 余娟, 马梦楠, 郭林, 等. 含电转气的电气互联系统可靠性评估 [J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(3): 708-715.
- YU Juan, MA Mengnan, GUO Lin, et al. Reliability evaluation of integrated electrical and natural-gas system with power-to-gas [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(3): 708-715.
- [48] 吕佳伟, 张沈习, 程浩忠. 计及热惯性和运行策略的综合能源系统可靠性评估方法 [J]. 电力系统自动化, 2018, 42(20): 9-18.
- LYU Jiawei, ZHANG Shenxi, CHENG Haozhong. Reliability evaluation of integrated energy system considering thermal inertia and operation strategy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(20): 9-18.
- [49] 陈娟伟, 余涛, 许悦, 等. 气电耦合综合能源系统供电可靠性评估解析算法 [J]. 电力系统自动化, 2018, 42(24): 59-69.
- CHEN Juanwei, YU Tao, XU Yue, et al. Analytic method for power supply reliability assessment of electricity-gas coupled energy system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(24): 59-69.
- [50] 冯光, 王文博, 胡博, 等. 配电网可靠性薄弱元件辨识模型及应用 [J]. 电测与仪表, 2016, 53(20): 84-92.
- FENG Guang, WANG Wenbo, HU Bo, et al. Weak components identification model of electrical distribution network reliability and its application [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(20): 84-92.
- [51] 郑颖, 谢开贵, 李洪兵, 等. 基于可靠性跟踪的薄弱环节辨识方法在省级电网可靠性改善中的应用研究 [J]. 电测与仪表, 2015, 52(6): 118-123.
- ZHENG Ying, XIE Kaigui, LI Hongbing, et al. Application of the weak part identification based on reliability tracking method to reliability improvement of provincial power network [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 52(6): 118-123.
- [52] 余文辉, 王沾, 曾祥君, 等. 基于贝叶斯网络的多状态变压器可靠性跟踪分析 [J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 78-85.
- YU Wenhui, WANG Zhan, ZENG Xiangjun, et al. Reliability tracing analysis for multi-state power transformers using Bayesian network [J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 78-85.
- [53] 胡博, 周家浩, 王蕾报, 等. 考虑削负荷责任分摊的电力系统可靠性跟踪方法 [J]. 电力系统自动化, 2020, 44(23): 64-71.
- HU Bo, ZHOU Jiahao, WANG Leibao, et al. Reliability tracing method for power system considering responsibility allocation of load shedding [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(23): 64-71.
- [54] 白玉东, 王浩, 袁田. 基于改进回路搜索法的配电网可靠性优化控制 [J]. 中国电力, 2016, 49(S1): 31-34.
- BAI Yudong, WANG Hao, YUAN Tian. An optimal control method for distribution network reliability based on the improved loop search method [J]. Electric Power, 2016, 49(S1): 31-34.
- [55] BAGEN B, HUANG Dange, FATTAL K. Enhanced probabilistic approach for substation reliability assessment [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2019, 13(12): 2488-2495.

- [56] 李生虎, 张楠, 张浩. 考虑风电出力状态转移和直流线路功率调整的 AC/UHVDC 系统静态可靠性及其灵敏度评估 [J/OL]. 电网技术 [2020-12-02]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2020.0294>.
- [57] 谢绍宇, 王秀丽, 曲翀, 等. 分割多目标风险分析框架下不同风速模拟方法对电力系统可靠性评估的影响 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(31): 81-89.
XIE Shaoyu, WANG Xiuli, QU Chong, et al. Impacts of wind speed simulation methods on adequacy evaluation of power systems in the partitioned multi-objective risk analysis framework [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(31): 81-89.
- [58] LIU Guodong, LI Zhi, STARKE M, et al. Optimal sizing of energy storage for community microgrids considering building thermal dynamics [C]//IEEE Power & Energy Society General Meeting. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2017: 1-5.
- [59] LIU Guodong, STARKE M, XIAO Bailu, et al. Community microgrid scheduling considering building thermal dynamics [C]//IEEE Power & Energy Society General Meeting. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2017: 1-5.
- [60] SAFDARIAN A, FOTUHI-FIRUZABAD M, LEHTONEN M, et al. Optimal electricity procurement in smart grids with autonomous distributed energy resources [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(6): 2975-2984.
- [61] DEHGHANIAN P, FOTUHI-FIRUZABAD M, AMINIFAR F, et al. A comprehensive scheme for reliability centered maintenance in power distribution systems: part I Methodology [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(2): 761-770.
- [62] DEHGHANIAN P, FOTUHI-FIRUZABAD M, AMINIFAR F, et al. A comprehensive scheme for reliability-centered maintenance in power distribution systems: part II Numerical analysis [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(2): 771-778.
- [63] 王春晓, 严超, 别朝红, 等. 一种考虑燃气蒸汽联合循环机组运行模式的综合能源系统备用配置与校核模型 [J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(2): 522-534.
WANG Chunxiao, YAN Chao, BIE Zhaohong, et al. A reserve allocation and reserve feasibility check model of the integrated energy system considering the configuration of CCGT [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(2): 522-534.
- [64] 王春晓, 严超, 张耀, 等. 考虑条件风险价值的电气综合能源系统风险厌恶机组组合研究 [J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(6): 17-27.
WANG Chunxiao, YAN Chao, ZHANG Yao, et al. CVaR based risk-averse unit commitment of integrated electricity and natural gas system [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(6): 17-27.
- [65] 卢恩, 鲁晓军, 龙霏, 等. 电力系统停电风险评估指标及方法 [J]. 电力自动化设备, 2015, 35(3): 68-74.
LU En, LU Xiaojun, LONG Fei, et al. Indexes and method of power system outage risk assessment [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(3): 68-74.

(编辑 荆树蓉 杜秀杰)