

新型电力系统风险评估研究现状及展望

郭创新¹, 刘祝平¹, 冯斌¹, 江博游¹, 郭骏², 李付存³

(1. 浙江大学电气工程学院, 杭州 310027; 2. 国家电网有限公司华北分部, 北京 100053;
3. 国网山东省电力公司电力科学研究院, 济南 250003)

摘要: 随着高比例新能源的接入, 新型电力系统惯量持续下降, 动态特性发生变化, 电网的安全稳定运行风险日益突出。风险评估能够量化电力系统风险, 是电力系统安全分析的必要环节和可靠保障。因此, 为了深入探究风险评估在新型电力系统背景下的研究方法, 总结归纳了近年国内外有关风险评估的研究成果, 重点分析了新型电力系统背景下风险评估的理论研究成果。首先, 由于元件级风险建模是电力系统风险评估的基础, 依据“源网荷储”模式, 从能源侧、电网侧、负荷侧、储能侧 4 侧风险建模分别展开讨论。其次, 以元件级风险建模为基础, 从系统级风险分析、风险评估指标体系、风险调控方法 3 个方面围绕着风险评估核心算法和计算效率、多层次概率指标体系等进行综述。最后, 归纳提出了新型电力系统风险评估存在的关键性问题及其未来可能的研究方向。
关键词: 新型电力系统; 风险建模; 风险分析; 风险调控; 量化评估

Research Status and Prospect of New-type Power System Risk Assessment

GUO Chuangxin¹, LIU Zhuping¹, FENG Bin¹, JIANG Boyou¹, GUO Jun², LI Fucun³

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;
2. North China Branch of State Grid Corporation of China, Beijing 100053, China;
3. State Grid Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250003, China)

Abstract: Along with the access of a high proportion of renewable energy, the inertia of the new-type power system continues to decline, the dynamic characteristics will qualitatively change, and the safe and stable operation of the power grid is affected. Risk assessment can quantify risks of the power system and is a reliable guarantee for power system security analysis. Therefore, to deeply explore the research methods of risk assessment in the context of new-type power system, this paper summaries the research results of risk assessment in recent years, and emphatically analyzes the theoretical research results of risk assessment in the context of new-type power systems. Firstly, according to the “source-grid-load-storage” model, the risk modeling of energy side, grid side, load side, and storage side is discussed separately, since component-level risk modeling is the basis of power system risk assessment. Secondly, based on the component-level risk modeling, this paper reviews the core algorithm and calculation efficiency of risk assessment, and multi-level probability index system from the three aspects of system-level risk analysis, risk assessment index system, and risk control methods. Finally, the key issues and possible future research directions of new-type power system risk assessment are summarized.

Key words: new-type power system; risk modeling; risk analysis; risk control; quantitative assessment

0 引言

2020 年 9 月, 习近平总书记在第七十五届联合国大会一般性辩论上宣布, 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”^[1]。2021 年 3 月, 习近平总书记在中央财经委第九次会议上提出, 要实现“碳达峰”, 应重点做好几项工作, 其中就包括构建新型电力系

统。讲话明确了新型电力系统在实现“双碳”目标中的重要地位, 为电力工业的发展指明了科学方向、提供了根本遵循。

新型电力系统是以承载实现“碳达峰、碳中和”, 贯彻新发展理念、构建新发展格局、推动高质量发展为主旨, 以确保能源电力安全为前提, 以满足经济社会发展电力需求为首要目标、以最大化消纳新能源为主要任务, 以坚强智能电网为枢纽平台, 以源网荷储互动与多能互补为支撑, 具有清洁低碳、安全可控、灵活高效、智能友好、开放互动基本特

基金资助项目: 国家电网公司总部科技项目(520626210065)。
Project supported by Science and Technology Project of SGCC (520626210065).

征的电力系统^[2]。无论对于中国还是世界, 大力发展新能源, 在新能源安全可靠的前提下逐步使用新能源替代传统能源, 构建新型电力系统, 是电力行业的必然趋势, 也是实现碳中和、碳达峰的必由之路^[3]。

电力系统在运行过程中存在发生不可控的随机故障的风险, 例如设备故障、负荷波动、外力破坏、系统失稳等风险。因此, 对于电力系统来说, 风险评估是一项必不可少的环节。电力系统风险评估是对电力系统失效事故发生的可能性及事故后果的严重程度进行量化评估的过程^[4]。电力系统风险评估保障了系统安全稳定运行, 降低了随机故障发生的可能性, 避免了局部或大面积的失负荷风险, 从而稳定保障民用和工业负荷, 减少社会经济损失。因此, 风险评估已经成为了电力系统具有挑战性的一项基本任务。

随着新型电力系统的建设, 传统风险评估在面对新型电力系统时存在一些问题。新能源大规模接入比例快速提高, 电网就地消纳程度不足, 系统调峰能力缺额较大, 导致电力系统频率调节能力下降, 电网存在频率越限甚至稳定破坏风险; 风电、光伏等新能源无功电压调节能力远远低于常规火电机组, 使得系统会面临电压失稳风险; 高比例新能源接入并叠加电网跨区交直流互联以及分布式微电网接入, 系统扰动事件下的局部暂态能量冲击特性更为复杂, 容易引发全局性的稳定性风险。这些问题在传统风险评估背景下并未纳入考虑范围。由此可见, 传统的电力系统风险评估理论不能完全适应新型电力系统, 尤其是新型电力系统中新能源电力电子设备引入的新特点, 以及高比例新能源接入带来的波动性和随机性。因此, 为了更好地提升系统调控能力, 需要建立以“源网荷储”4 侧联动为基础的新型电力系统风险评估体系。

本文立足于新型电力系统, 归纳了电力系统风险评估的相关理论方法和案例分析。首先, 由于元件级风险建模是电力系统风险评估的基础, 依据“源网荷储”模式, 从能源侧、电网侧、负荷侧、储能侧 4 侧风险建模分别展开讨论。其次, 以元件级风险建模为基础, 从系统级风险分析、风险评估指标体系、风险调控方法 3 个方面围绕着风险评估核心算法和计算效率、多层次概率指标体系等进行综述, 总体风险评估流程图如图 1 所示。最后, 归纳提出了新型电力系统风险评估存在的关键科学问题并对

未来研究方向进行了展望。

1 新型电力系统风险建模研究现状

本章将通过能源侧、电网侧、负荷侧、储能侧 4 侧的元件来进行元件级风险建模的整理和概述, 4 侧主要元件及其关联如图 2 所示。新型电力系统在能源侧, 需要构建多元化清洁能源供应体系, 包括开发利用风电、光伏等新能源, 大力挖掘水电开发和核电建设。因此能源侧的电源结构由煤电装机占主导向新能源发电装机占主导转变, 其出力由原先的连续可控向不确定性和弱可控转变。新型电力系统在电网侧, 需要提高跨区输送清洁能源比重, 使电网形态由单向逐级输电为主的传统电网, 向包括交直流混联大电网、微电网、局部直流电网和可调节负荷的能源互联网转变^[5]。新型电力系统在负荷侧, 需要全面推进电气化和节能提效, 进一步挖掘需求侧响应潜力。因此负荷侧的元件特性由传统的刚性、纯消费型, 向柔性、生产与消费兼具型转变。新型电力系统在储能侧, 需要推广应用大规模储能装置, 加快大容量、高密度、高安全、低成本储能装置研制。因此储能侧的电力元件形态从传统的水电蓄能模式, 向主配网、生产和消费、多种储能方式多元化转变。

1.1 能源侧风险建模

由于不同的新能源出力具有波动性及不确定性, 因此作为电力系统的接入端, 新能源发电的强随机性对系统的安全稳定运行带来一定的风险隐患, 需要评估其接入系统后的风险。能源侧包括风

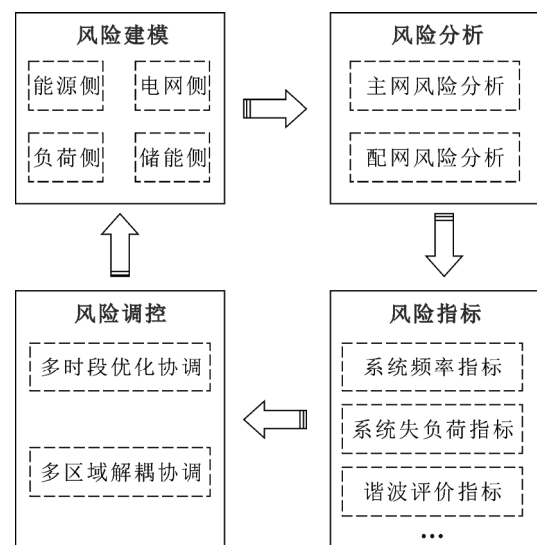


图 1 新型电力系统风险评估流程

Fig.1 New-type power system risk assessment process

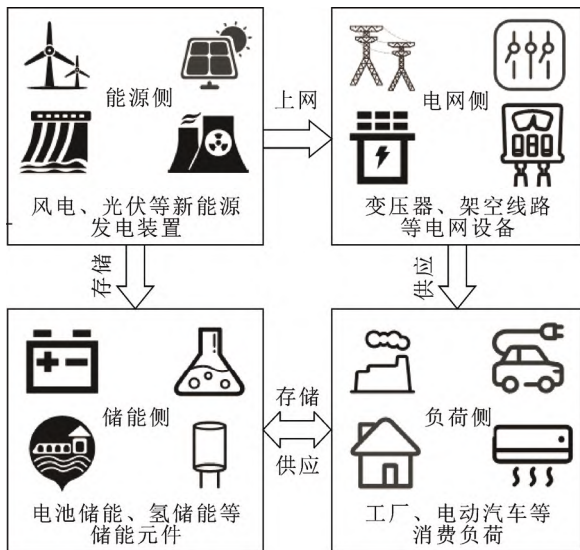


图2 新型电力系统中的“源网荷储”元件示意图

Fig.2 Diagram of the source-grid-load-storage components in the new-type power system

电、光伏、水电和其他电力生产。其中风力发电技术起步较早、风险建模较为成熟；光伏发电起步较晚，其风险建模仍处于探索阶段。近年来也有学者提出同时考虑风电场和光伏电站出力的模型^[6]。

在风力发电风险建模方面，常基于 Weibull、Rayleigh、Lognormal 等风速概率分布模型^[7]来建立风电出力模型、风电状态模型或风电故障模型，并计算各类风险指标。文献[8]基于风速的概率分布与风电机组的功率特性，建立了风电场可发出力概率模型。文献[9]进一步考虑了风速的影响，结合风速的自回归滑动平均模型，建立了风电机组时变故障模型。文献[10]采用 T-location scale 分布描述风电功率预测误差分布，建立风电机实时状态概率模型。文献[11]认为以上单一模型没有办法适用于所有的风速场景，对此，结合 Copula 函数提出了一种新型的广义密度/分布拟合方法建立了风电出力模型。

在光伏发电方面，光照强度的概率分布模型是光伏风险建模的基础。常用的模型包括 Weibull 分布^[12]和 Beta 分布^[13]。在此基础上，文献[14]基于蒙特卡洛方法建立了太阳辐照度时变模型，并依据该时变模型建立了光伏出力模型。文献[15]通过综合光伏元件的敏感性和可靠性分析，提出了并网光伏系统的可靠性模型。相较于基于公式的风险建模方法，文献[16]从 63 个不同光伏电站的历史数据中统计出定量信息，以分析光伏电站的故障模式和故障率，提出了一种风险建模的新思路。

在同时计及风电和光伏以及其他能源发电方式的风险建模方面，多种能源组合发电方式被提出并加以验证。首先，由于同一地区的风电、光伏出力往往具有互补性，文献[6]建立了基于 Copula 理论的风光互补发电系统可靠性模型。除了风电和光伏，其他可再生能源也可用于新能源发电的补充。文献[17]提出了同时考虑光伏和水力发电系统的风险分析方法，使用马尔可夫法建立了基于气象的模型。另外，风光储联合发电系统也成为了近年来的热点。文献[18]考虑了大规模风-光-储联合发电场景，通过序贯蒙特卡洛法建立了风电、光伏和储能系统的发电可靠性评估模型。文献[19]进一步考虑风-光-负荷多变量间耦合相关性，在使用核密度估计法构建单变量概率分布模型的基础上，使用 Pair-Copula 函数模型建立了高维相关变量联合分布模型。

1.2 电网侧风险建模

电网侧元件主要包括变压器、线路、高压断路器、静态无功补偿装置等风险元件。本部分主要介绍变压器和架空线路的故障率建模。

目前对于变压器时变失效停运的研究主要可分为 2 大类^[20]，第 1 类方法较为常用，是根据变压器的内部结构进行分析，并建立内部故障模型，通过模型来模拟变压器内化学反应的发展程度和变压器本身的失效概率。文献[21]选择了油中溶解气体分析信息来判断变压器内部潜伏性故障的实时发展程度，建立了内部故障的故障率估计模型。在此基础上，文献[22]将多状态马尔可夫模型的结果与指数时变停运模型值进行叠加，得到了变压器综合时变停运模型。近年来，一些新的智能变压器状态评估方法，如基于支持向量机的评估方法^[23]、基于神经网络的评估方法^[24]等也逐渐涌现。第 2 类方法涉及的文献较少，主要是基于数理统计知识，统计、分析变压器运行数据，计算变压器实时失效率。如文献[25]通过建立变压器振动信号累积概率分布模型和分析信号的能量谱，对变压器短路故障程度进行快速准确的识别。

架空输电线的停运模型主要分为 4 类，分别为重负载潮流下、恶劣灾害条件下、线路老化以及输电线路综合时变停运模型。其中，基于重负载潮流的输电线路停运模型最为简单，即通过线路潮流计算，使用拟合法计算线路潮流的停运概率。而后 3 种模型则需要考虑多因素或多阶段性影响。恶劣灾

害条件下的停运模型可以有效反映灾害对线路可靠性的影响, 包括大风灾害、覆冰灾害、山火灾害等; 由大风、覆冰引发的基于荷载灾害下的停运模型因荷载具有分散性, 需要用概率分布进行拟合, 如正态分布、威布尔分布、极值分布等, 从而更精确地反映荷载本身的不确定性和离散性^[26]; 基于山火灾害下的停运模型计及山火地表火行为数理模型, 计算得出灾害情况下的设备因外力损害的概率, 建立相应的停运概率模型^[27]; 基于线路老化的停运模型常用威布尔分布来描述初始运行期、稳定运行期和损耗区, 通过引入疲劳折损指数, 得出考虑老化折损效应后的实际停运概率^[28]。实际上, 重负载潮流、恶劣灾害、线路老化这些故障因素并不是完全独立的。因此, 为了准确反映架空输电线路的事实停运概率, 需要引入综合考虑的输电线路综合时变停运模型, 通过综合考虑 2 及以上的停运模型得到综合架空输电线路实际停运概率。

除了变压器和架空线路, 许多学者也对其他电网侧电气设备进行了风险建模。其中, 文献[29]建立了智能变电站软件失效模型以及信息运行层设备失效模型, 并基于此建立了智能变电站功能失效概率评估模型, 分析了智能变电站系统安全风险。文献[30]针对新能源电力系统, 基于情景构建与推演建立了新能源电力设备运行风险评估模型。

另外, 含有柔性直流供电系统的交直流电网也成为当今电网中重要的组成部分, 其中如何评估电力电子设备所引发的谐波振荡风险也成为了风险评估过程中的必要环节。部分文献对直流侧换流器进行了建模, 主要模型类型包括实时仿真模型^[31]、状态空间模型^[32]、阻抗模型^[33]等。文献[34]对交流侧系统进行了等效阻抗建模, 进一步分析了电力电子设备所带来的谐波不稳定性。换流器的后续稳定性分析和振荡控制方法与普通的转换侧元件风险分析方法有所不同, 通常采用特征值分析法、频率扫描分析法、时域仿真法、阻抗分析法等进行分析^[35]。

1.3 负荷侧风险建模

在新型电力系统场景下, 负荷侧元件主要包括电动汽车、电锅炉、热泵等。其中, 电动汽车作为一种低碳的交通工具, 近年来成为了众多学者甚至公司的研究热点, 也是当今时代交通低碳化的重点发展方向。电动汽车因其充电行为具有时空随机性、间歇性, 会影响电网的电能质量, 给电网运行带来一定的波动和冲击。有关电动汽车风险评估的研究

常基于充电负荷模型。常用的电动汽车充电负荷模型包括概率平均模型、蒙特卡洛抽样概率模型、基于出行统计数据概率模型^[36]。在此基础上, 文献[37]在考虑蒙特卡洛模拟法的基础上增加了层次分析法, 考虑了不同类型电动汽车的充电负荷差异, 为电动汽车的充电行为和负荷特性进行了更准确的建模。文献[38]考虑了分布式电源与不同类型可变功率电动汽车, 并建立了负荷模型。文献[39]构建了基于日行驶里程的恒流-恒压变功率多类型电动汽车充电负荷的时序模型, 用日行驶里程数代替了主观设定的多种电动汽车的起始荷电状态, 较全面地建立了电动汽车时序概率分布模型。基于电动汽车的负荷模型或概率分布模型, 可以进一步求出电压、支路潮流等风险指标, 从而进行风险评估。

除了电动汽车的负荷建模之外, 单独计及热泵、燃气锅炉等负荷侧元器件负荷模型较少有文献涉及。文献[40]考虑到太阳能热点热电联产电厂和电锅炉的耦合转换特性, 定义了风险因素, 建立了含热电联产电站和电锅炉的系统风险评估方法, 但是没有关于电锅炉设备的负荷建模。文献[41]模拟热电联产机组和热泵的灵活性, 构建其调节能力模型, 并提出了一个联合能源和多类型储备方法的风险调度方案。

1.4 储能侧风险建模

大规模储能技术是实现新型电力系统低碳化的重要环节。储能侧元件主要有电池、水电站、冰蓄冷储能设备、氢储能设备、压缩空气储能设备和天然气储能设备等。当前储能侧风险建模研究重点在于电池储能。文献[42]基于电池储能的充放电、电量等约束, 建立了含储能的风电场出力模型, 但是没有考虑电池储能系统的停运率并建立相应的停运模型。为此, 文献[9]综合考虑了风电场的出力模型、电池储能的充放电及容量约束和其故障率的影响, 建立了电池储能系统的出力模型, 并基于不同风能调度策略得到了含电池储能风电场的出力模型。文献[43]详细分析了电池储能的故障失效模型, 并结合风机的故障失效模型建立了含有风储一体化电站的电力系统多目标优化调度模型。除了各种新能源外, 电池储能也因其充放电能力灵活、与新能源互补性较好的特点在能源侧被加以利用。

除了电池储能以外, 抽水蓄能也是运用较为广泛的储能技术。但是目前基于抽水蓄能的风险建模较少, 缺乏定量化的故障机理研究。电转气技术是

近年来的新兴储能技术,为电能的大规模储存提供了新思路^[44]。该技术尚处于起步阶段,风险评估方面的研究并不多见。

2 新型电力系统风险评估与调控研究现状

本章在前章的基础上,先后对新型电力系统中的系统级风险分析、系统级指标体系建立、系统级风险调控研究现状进行了概述。

2.1 新型电力系统中的系统级风险分析

2.1.1 主网的系统级风险分析

传统的电力系统运行风险评估方法主要包括解析法、模拟法等。其中解析法包括半不变量法^[45]、预想故障集法^[46]、故障树法^[47]等,模拟法包括蒙特卡洛法、交叉熵重采样法^[48]、离散多空间非序贯仿真法^[49]、考虑时齐^[50]和非时齐马尔可夫过程的序贯仿真法^[51]等。

现有的新型电力系统风险评估最常用的方法为蒙特卡洛法,均基于传统的序贯蒙特卡洛法和非序贯蒙特卡洛法。但该方法因其需要大量抽样的特点,在精度要求较高的前提下计算效率低,且收敛性差。因此大量学者试图通过改进状态抽样方法来提高算法效率,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^[52]。

在以上方法的基础上,文献^[53]兼顾了枚举法和模拟法的优点,提出了适用于两状态元件的状态空间划分法,通过空间划分的方法加速收敛,实现快速精确的评估。文献^[54]基于点估计法思想提出了三点估计法,依据风电、光伏机组输出功率的概率分布函数构造其出力的3个点,快速计算了风险指标。在此基础上,文献^[19]提出基于移动最小二乘法和高维模型表达方法(moving least squares & high dimensional model representation, MLS-HDMR)的新能源电力系统小干扰失稳风险评估方法,通过对非线性耦合相关性变量的稀疏逼近,降低采样数量、提高求解效率;并针对风-光-负荷实际概率分布特征,优化了采样方法,提高了评估准确性。

进一步地,随着大量新能源代替传统常规能源,电力系统中的电力电子装备将不断增多。相比于传统发电机,电力电子装备过流耐受能力差^[3],因此需要考虑故障发展以及连锁故障的风险评估。新型电力系统风险评估需要考虑高比例新能源的不确定性可能引发的连锁故障,由于连锁故障的事故链与不同阶段的故障皆相关,通常认为事故链发生

概率为自阶段故障概率的积^[55]。在含新能源的电网连锁故障风险评估方面,文献^[56]采用了交流潮流计算方法,设置了频率稳定控制、线路过流保护机制、低压减载模型,使得模型能够从多方位研究风电接入后的风险。文献^[57]采用随机潮流计算方法,计算求取各连锁故障搜索指标的分布,并生成预测事故链集合。但这些研究涉及到潮流计算时,出现假设模型与实际情况不符的场景,如假设全网不平衡功率由平衡节点来承担等。因此,文献^[58]则在此基础上结合了半不变量法与随机潮流计算,提出了基于半不变量法的改进随机潮流模型。该模型在常规随机潮流基础上,借鉴牛拉法思路,计及系统调频作用重新推导了随机潮流计算方法。在此基础上,文献^[58]考虑了系统的调频作用,输出了频率信息,建立了反应事故链的风险指标。文献^[59]提炼了4类新能源高占比电力系统连锁故障的主要诱因和3个连锁故障事故链搜索的关键技术。文献^[60]分析源-网-荷之间的故障交互动态,分别建立了集中式和分布式新能源保护逻辑和风险指标。主网的系统级风险分析方法归纳如表1所示。

2.1.2 配电网的系统级风险分析

相较于主网,配电网设备具有电压等级多、设备种类多、负荷特性各异、区域特征明显、网络拓扑结构复杂且多变的特点。因此,配电网故障具有强随机性、高概率性和低风险性的特征。数据显示,约有80%的停电事故是由配电系统故障造成的^[61],但影响区域一般较小。在新型电力系统场景下,大规模分布式风电光伏等新能源以及电动汽车等主动

表1 新型电力系统中的系统级风险分析方法

Table 1 System risk analysis method in new-type power system

故障类型	分析方法	
非连锁故障	解析法	半不变量法 预想故障集法 故障树法
	模拟法	蒙特卡洛法 交叉熵重采样法 离散多空间非序贯仿真法
		马尔可夫法
		状态空间法
	其他	点估计法 MLS-HDMR法
		交流潮流计算方法 随机潮流计算方法 基于半不变量的改进随机潮流法
	连锁故障	

负荷的接入也进一步增加了配电网的复杂程度。因此配电网的风险评估不仅需要进行宏观风险分析,更需要进一步完善评估细节以改进薄弱环节,提高风险分析准确性,保障配电网供电安全性。

配电网风险评估的相关研究与主网相比较少。文献[62]考虑气象影响因数、时间因数、负荷重要因数,量化评估了配电网风险等级,建立了一套科学的配电网故障停电风险评估方法。在考虑高比例新能源接入的新型电力系统背景下,文献[63]计及大规模分布式光伏系统,运用基于蒙特卡洛法的概率潮流计算,以节点电压越限和线路潮流越限为风险评估指标,建立了配电网运行风险评估模型。配电网的连锁故障发生概率较主网更小,文献[64]分析了配电网连锁故障的形成机理,建立了柔性互联配电网连锁故障风险指数和基于故障后果的最优切负荷方案。上述配电网风险评估的方法主要在参数边界条件和概率输出方面更加精准细致,时效性更强,可以在较短时间内获得配电网各个区域负荷的风险情况,为调度人员分析处理故障提供时效性依据。

2.2 新型电力系统中的风险评估指标体系

当前,在建立新型电力系统风险评估指标体系方面,尚未建立统一标准。常用的风险指标有系统频率、电压、线路潮流、系统失负荷、故障状态等。具体来说,文献[10]引入切负荷风险、电压越限风险、线路有功功率越限风险、电压崩溃风险4种指标,综合评估含风电的电力系统运行风险状况,通过加权得出综合风险指标。文献[65]为反映切负荷给发电厂和电网造成的损失,分别计算了发电系统和输电系统的经济损失期望,并基于期望值建立风险评估体系。文献[66]基于改进等分散抽样蒙特卡洛法,计算了系统暂态稳态故障状态、经济损失与结构强度3个层面的风险指标。文献[45]选取支路功率、节点电压、系统频率和节点气压作为系统运行风险指标。此外,一些其他风险指标,如灵活性定量评价指标^[67]、谐波评价指标^[68]等也有涉及到。

上述文献多数通过单一的主观赋权法或简单的加权算法将各风险指标系数加权,得到简单的综合风险指标。文献[39]利用主成分分析方法求取风险指标的权重大小,并进行复杂的综合风险评估,能够较好地得到风险指标权重。

2.3 新型电力系统中的风险调控

基于风险分析得到风险指标权重与预想故障集实施风险调控,可以有效降低系统风险发生的概

率或严重程度。风险调控是风险评估管控的最后一环,旨在传统安全约束经济调度的基础上,考虑电网运行需求,寻求使得电网在保证稳定运行的同时,自身风险处于可容许范围内的调控方案^[69]。区别于传统的风险管控,新型电力系统场景下的风险管控需能够自适应系统外部环境,在保证供电安全的同时最大限度地接纳新能源电力,以实现应对新型电力系统强波动性、随机性的精准预测与管控。

本节将从时间、空间2个维度来简述新型电力系统风险管控的方法。时间维度方面,电力系统发电调度计划依据时间尺度可以划分为5类:长期调度计划、中短期调度计划、日前机组组合与发电计划、日内实时调度计划和自动发电控制计划^[70]。新型电力系统风险调控通常运用不确定性概率分布估算未来不同时间阶段的未知风险概率,并基于模型方法考虑多时间阶段风险管控的协调优化问题,实现对局部电网的调度与控制。如文献[71]基于高风电渗透率的新能源场景,提出了一种风电机组参与系统调频的多时间尺度协调的风险调控优化模型。

空间维度方面,传统风险调控主要采用集中式调控模型。如文献[72]提出了联合传统能源与新能源的电网跨区协调的发电优化模型,解决了新能源的跨区消纳问题。随着电力系统的发展,集中式风险调控在灵活性、精确度等方面无法满足新型电力系统的需求,因此分散式风险调控模型逐步被提出。如文献[73]以分散区域协调调度的角度为切入点,研究了大规模风电的跨区消纳问题,构建了多区电网分散协调鲁棒模型。目前学者普遍采用“全局协调,分区自治”的调控策略,结合集中式与分散式风险调控,进一步优化新型电力系统风险调控的鲁棒性与可靠性^[74]。

3 新型电力系统风险评估中的关键问题与展望

基于上述新型电力系统各个环节风险评估中已有的研究成果,本章对于新型电力系统风险评估中的元件级风险模型建立、系统级风险指标分析、系统级风险体系构建这3个方面的关键性问题进行概括总结,并对新型电力系统风险评估的未来发展进行展望,具体内容见图3。

3.1 元件级风险模型建立的关键问题与展望

在元件级风险模型建立方面,需要不断探索和拓展新型电力电子设备的风险建模,逐步完善对模

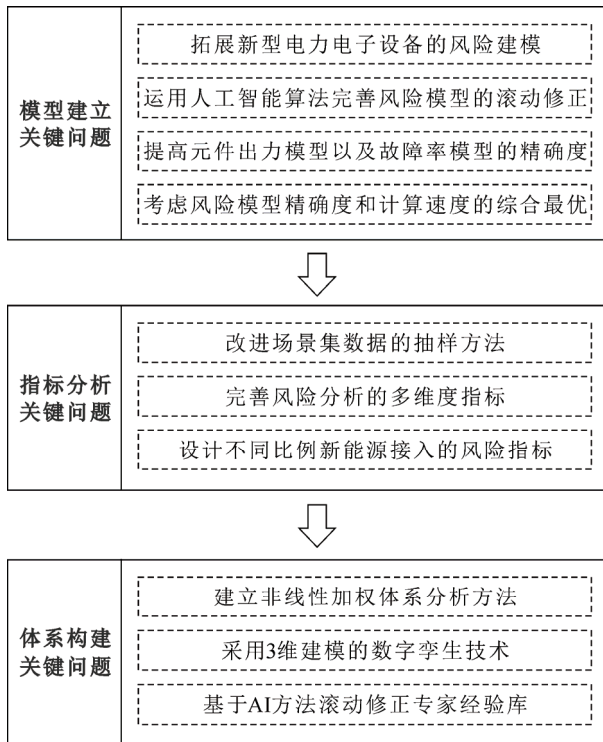


图3 新型电力系统风险评估关键问题

Fig.3 Key issues in risk assessment of new-type power system

型的及时反馈和修正,以获得对风险模型更准确的模拟。

1) 随着新型电力系统中多端柔直及风光电一体化等系统中电力电子设备不断增加,其引发的新型电磁振荡等问题逐步凸显且变得愈发复杂,因此需要进一步探究关于新型电力电子设备的风险建模,探索应对不同元器件可能引发的潜在系统风险进行多维评估。

2) 目前对于元件级风险模型的验证方式较为单一,算例相对独立,通常根据历史数据的计算结果进行修正。因此可以进一步探索对于风险模型参数的修正,将处理后的历史数据与原模型计算结果进行比较,并依据比较结果基于人工智能算法进行多次自动滚动修正,直到比较结果收敛,以达到更精确的目标。

3) 目前一些设备故障率仿真建模缺失故障前兆和演变的情景模拟,以及后续衍生危害严重程度的模拟。在新型电力系统场景下,需要对元件出力模型以及故障率模型进行更准确的模拟,尤其需要考虑故障前后的演化路径,建立包含初始模型和演化模型的全流程风险模型。

4) 在基于传统方法对元件设备风险建模的过程中,建模的精确度和复杂度通常呈正相关,模型

复杂度与计算速度之间又存在相互制约的关系。因此,模型精确度越高通常计算速度越慢。新型建模方式亟待开发,考虑追求风险模型精确度和计算速度的综合最优,以便应对突发场景时,能及时进行高效风险评估并做出相应的预案。

3.2 系统级风险指标分析的关键问题及展望

在系统级风险指标分析方面,需要改进场景集数据的抽样方法,提高系统级风险分析速度,不断完善风险分析的多维度指标,提高风险评估指标的准确度,增加风险评估指标的深度和广度。

1) 在系统级采样计算过程中多用蒙特卡洛算法,抽样过程中存在低概率高风险和高概率低风险的区域。目前已有文献通过分层抽样法、故障智能筛选排序法等方法^[52]来优化蒙特卡洛的抽样过程。然而很少有文献同时考虑高低风险区域并采取不同的抽样密度。因此,可以通过选择多种抽样方法相结合的方式,或者探索其他的抽样方法,在提高高风险区域抽样密度的同时,降低低风险区域的抽样密度,以保证风险评估的实时性和准确性。

2) 在双碳目标下以及碳交易环境下的新型电力系统的运行除了考虑可靠性和经济性指标外,还应考虑含碳的相关指标。关于碳指标方面的研究,目前少有文献涉及,可以先以电力行业为主体对碳排放进行一定比例的模拟测算,再用于系统综合风险评估模型之中。另外,电力系统的安全稳定运行离不开系统惯量的基本要求,而目前将低惯量指标考虑进风险指标体系的文献较少。由于高比例新能源的接入会给电力系统带来低惯量特征,因此可以考虑在指标体系中增加系统惯量指标。

3) 随着新能源接入的逐步提高,新能源设备完全取代传统电力设备指日可待。全球许多国家和地区陆续提出100%可再生能源电力系统转型的设想,此时,火电逐步退出,系统调节能力、稳定裕度、电能质量、供电可靠性下降,系统敏感度增加。因此,电力系统风险分析将面临挑战,需要设计一套适应100%新能源接入场景下的风险指标,并重新考虑系统耦合风险分析形成指标的方法。

3.3 系统级风险体系构建的关键问题及展望

在系统级风险体系构建方面,需要建立非线性加权分析方法,滚动修正专家经验库,并采用3维建模的数字孪生技术提升风险评估系统的实时性和可用性。

1) 目前电力系统风险体系构建方法通常采用

线性加权方法。但是新型电力系统是非线性的动力系统, 线性的加权方式难以准确得到各指标之间的关联。因此有必要研究各指标之间的合理非线性加权方法, 对系统高风险大干扰的失稳情况进行综合风险的评估。

2) 目前在风险评估指标计算和赋权中, 风险指标权重通常是通过查询专家经验库的方式确定, 主观性较强, 也不够准确。可研究基于人工智能的指标权重设计方法, 并结合专家经验知识与当前系统环境及时滚动修正指标权重。

3) 目前的风险评估系统对运行管理人员不够直观和友好, 常考虑基于时间尺度的 2 维风险建模方式。可以建立实时在线风险评估模型, 采用数字孪生技术构建随时间变化的全景式 3 维模型, 能够更直观地观察电网风险, 开展全天候的在线状态监测、风险预警和故障诊断, 实现实时安全分析与风险评估。

4 结论

在新型电力系统的建设中, 风电、光伏等多种新能源接入比例显著增长, 接入能源种类逐渐复杂, 能源之间的耦合程度不断加深, 如何评估新型电力系统风险, 保障电网的安全稳定运行成为了近年来的重大课题。本文首先回顾总结了国内外大量研究机构和学者对新型电力系统“源网荷储”4 侧的风险分析和风险调控相关理论研究成果, 从元件级风险建模、系统级风险分析、风险评估指标体系以及风险调控方法 4 个层面重点归纳总结了新型电力系统风险评估现有研究成果及其存在的不足。最后提出了新型电力系统风险评估存在的关键性问题以及未来的展望, 为新型电力系统风险评估以及需进一步开展的研究工作提供参考和借鉴。

参考文献 References

- [1] 习近平. 在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话[N]. 人民日报, 2020-09-23(003).
XI Jinping. Speech at the general debate of the 75th UN general assembly[N]. People's Daily, 2020-09-23(003).
- [2] 张友良. 电力系统全面转型升级的重大历史机遇[EB/OL]. (2022-07-31). <https://www.q578.com/s-9-1673470-0/>.
ZHANG Youliang. Power system upgrading | state grid chief engineer Chen Guoping: a major historical opportunity for comprehensive transformation and upgrading of the power system[EB/OL]. (2022-07-31). <https://www.q578.com/s-9-1673470-0/>.
- [3] 张智刚, 康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2806-2818.

- ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2818.
- [4] LI W Y. Risk assessment of power systems: models, methods, and applications[M]. Piscataway, USA: IEEE Press, 2005.
- [5] 陈 熙. 能源互联网背景下人工智能在电力通信网中的应用探析[J]. 电力信息与通信技术, 2021, 19(9): 45-50.
CHEN Xi. Application of artificial intelligence in power communication network under the background of energy internet[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2021, 19(9): 45-50.
- [6] 赵继超, 袁 越, 傅质馨, 等. 基于 Copula 理论的风光互补发电系统可靠性评估[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(1): 124-129.
ZHAO Jichao, YUAN Yue, FU Zhixin, et al. Reliability assessment of wind-PV hybrid generation system based on Copula theory[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(1): 124-129.
- [7] LO BRANO V, ORIOLI A, CIULLA G, et al. Quality of wind speed fitting distributions for the urban area of Palermo, Italy[J]. Renewable Energy, 2011, 36(3): 1026-1039.
- [8] 黄海煜, 于文娟. 考虑风电出力概率分布的电力系统可靠性评估[J]. 电网技术, 2013, 37(9): 2585-2591.
HUANG Haiyu, YU Wenjuan. Power grid reliability assessment considering probability distribution of wind farm power output[J]. Power System Technology, 2013, 37(9): 2585-2591.
- [9] 蒋 程, 刘文霞, 张建华. 含电池储能风电场的电力系统风险评估[J]. 电网技术, 2014, 38(8): 2087-2094.
JIANG Cheng, LIU Wenxia, ZHANG Jianhua. Risk assessment for power system with wind farm and battery energy storage[J]. Power System Technology, 2014, 38(8): 2087-2094.
- [10] 黎静华, 左俊军, 汪 赛. 大规模风电并网电力系统运行风险评估与分析[J]. 电网技术, 2016, 40(11): 3503-3510.
LI Jinghua, ZUO Junjun, WANG Sai. Analysis and assessment of operation risk for power system with large-scale wind power integration[J]. Power System Technology, 2016, 40(11): 3503-3510.
- [11] LIN C F, BIE Z H, PAN C Q, 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.
- [12] LIU Z P, WEN F S, LEDWICH G. Optimal siting and sizing of distributed generators in distribution systems considering uncertainties[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(4): 2541-2551.
- [13] ZHANG S X, CHENG H Z, ZHANG L B, et al. Probabilistic evaluation of available load supply capability for distribution system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 3215-3225.
- [14] 汪海瑛, 白晓民. 并网光伏的短期运行备用评估[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(5): 55-60.
WANG Haiying, BAI Xiaomin. Short-term operating reserve assessment for grid-connected photovoltaic system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(5): 55-60.
- [15] GUPTA N, GARG R, KUMAR P. Sensitivity and reliability models of a PV system connected to grid[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 69: 188-196.
- [16] GALLARDO-SAAVEDRA S, HERNÁNDEZ-CALLEJO L, DUQUE-PÉREZ O. Quantitative failure rates and modes analysis in photovoltaic plants[J]. Energy, 2019, 183: 825-836.
- [17] EHNBERG S G J, BOLLEN M H J. Reliability of a small power system using solar power and hydro[J]. Electric Power Systems Research, 2005, 74(1): 119-127.
- [18] 汪海瑛, 白晓民, 许 婧. 考虑风光储协调运行的可靠性评估[J].

- 中国电机工程学报, 2012, 32(13): 13-20.
- WANG Haiying, BAI Xiaomin, XU Jing. Reliability assessment considering the coordination of wind power, solar energy and energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(13): 13-20.
- [19] 周一辰, 孙佳辉, 王书祥, 等. 基于高维模型表达方法的新能源电力系统小干扰失稳风险评估[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(14): 73-82.
- ZHOU Yichen, SUN Jiahui, WANG Shuxiang, et al. Risk assessment of small-signal instability for renewable power system based on high-dimensional model representation method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(14): 73-82.
- [20] 尹玉娟. 基于油气分析的油浸式变压器时变停运模型及故障诊断研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- YIN Yujuan. Time-varying outage model and fault diagnosis of oil immersed transformers based on DGA[D]. Hangzhou, China: Zhejiang University, 2012.
- [21] 宁辽逸, 吴文传, 张伯明. 运行风险评估中的变压器时变停运模型(一)基于运行工况的变压器内部潜伏性故障的故障率估计方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(15): 9-13, 95.
- NING Liaoyi, WU Wenchuan, ZHANG Boming. Time-varying transformer outage model for operational risk assessment part one condition based failure rate estimation method for transformer internal latent fault estimation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(15): 9-13, 95.
- [22] 郭创新, 王越, 王媚, 等. 表征内部潜伏性故障的变压器时变停运模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 63-69.
- GUO Chuangxin, WANG Yue, WANG Mei, et al. Time-varying outage model for transformers representing internal latent fault[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(1): 63-69.
- [23] FEI S W, ZHANG X B. Fault diagnosis of power transformer based on support vector machine with genetic algorithm[J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36(8): 11352-11357.
- [24] 阮羚, 谢齐家, 高胜友, 等. 神经网络和信息融合技术在变压器状态评估中的应用[J]. 高电压技术, 2014, 40(3): 822-828.
- RUAN Ling, XIE Qijia, GAO Shengyou, et al. Application of artificial neural network and information fusion technology in power transformer condition assessment[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(3): 822-828.
- [25] ZHANG Z L, WU Y Y, ZHANG R X, et al. Novel transformer fault identification optimization method based on mathematical statistics[J]. Mathematics, 2019, 7(3): 288.
- [26] 孙羽, 王秀丽, 王建学, 等. 架空线路冰荷载风险建模及模糊预测[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(7): 21-28.
- SUN Yu, WANG Xiuli, WANG Jianxue, et al. Wind and ice loading risk model and fuzzy forecast for overhead transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(7): 21-28.
- [27] 宋嘉婧, 郭创新, 张金江, 等. 山火条件下的架空输电线路停运概率模型[J]. 电网技术, 2013, 37(1): 100-105.
- SONG Jiajing, GUO Chuangxin, ZHANG Jinjiang, et al. A probabilistic model of overhead transmission line outage due to forest fire[J]. Power System Technology, 2013, 37(1): 100-105.
- [28] LI W. Incorporating aging failures in power system reliability evaluation[J]. IEEE Power Engineering Review, 2002, 22(7): 59.
- [29] 韩宇奇, 郭嘉, 郭创新, 等. 考虑软件失效的信息物理融合电力系统智能变电站安全风险评估[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(6): 1500-1508.
- HAN Yuqi, GUO Jia, GUO Chuangxin, et al. Intelligent substation security risk assessment of cyber physical power systems incorporating software failures[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(6): 1500-1508.
- [30] 任建强, 王璐阳, 吴家浩, 等. 基于情景构建与推演的新能源电力设备运行风险评估[J/OL]. 清华大学学报(自然科学版), 2022: 1-8[2022-08-29]. <https://doi.org/10.16511/j.cnki.qhdxxb.2022.21.008>.
- REN Jianqiang, WANG Luyang, WU Jiahao, et al. Operating risk assessments of new energy power equipment based on scenario construction and deduction[J/OL]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2022: 1-8[2022-08-29]. <https://doi.org/10.16511/j.cnki.qhdxxb.2022.21.008>.
- [31] 张宏俊, 郝正航, 陈卓, 等. 适用于模块化多电平换流器实时仿真的建模方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(7): 120-126.
- ZHANG Hongjun, HAO Zhenghang, CHEN Zhuo, et al. Modeling method for real time simulation of modular multilevel converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(7): 120-126.
- [32] 李探, 赵成勇, GOLE A M. MMC-HVDC 内部谐波模式识别及其稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(8): 2185-2195.
- LI Tan, ZHAO Chengyong, GOLE A M. Identification and stability analysis of the internal harmonic modes of the MMC-HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(8): 2185-2195.
- [33] 郭贤珊, 刘泽洪, 李云丰, 等. 柔性直流输电系统高频振荡特性分析及抑制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1): 19-29.
- GUO Xianshan, LIU Zehong, LI Yunfeng, et al. Characteristic analysis of high-frequency resonance of flexible high voltage direct current and research on its damping control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 19-29.
- [34] 李清, 孟潇潇, 王强钢, 等. 柔性直流输电系统接入交流电网的高频谐振风险运行方式辨识[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(8): 206-214.
- LI Qing, MENG Xiaoxiao, WANG Qianggang, et al. Identification of high-frequency resonance risk operation mode for flexible DC transmission system connected to AC grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(8): 206-214.
- [35] 尹聪琦, 谢小荣, 刘辉, 等. 柔性直流输电系统振荡现象分析与控制方法综述[J]. 电网技术, 2018, 42(4): 1117-1123.
- YIN Congqi, XIE Xiaorong, LIU Hui, et al. Analysis and control of the oscillation phenomenon in VSC-HVDC transmission system[J]. Power System Technology, 2018, 42(4): 1117-1123.
- [36] 郭建龙, 文福拴. 电动汽车充电对电力系统的影响及其对策[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(6): 1-9, 30.
- GUO Jianlong, WEN Fushuan. Impact of electric vehicle charging on power system and relevant countermeasures[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(6): 1-9, 30.
- [37] 徐国钧, 刘永胜, 李题印, 等. 基于层次分析和概率模拟的电动汽车对配网负荷影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(22): 38-45.
- XU Guojun, LIU Yongsheng, LI Tiyan, et al. Study on the impact of electric vehicles charging load integrated into distribution network based on analytic hierarchy process and probabilistic simulation[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(22): 38-45.
- [38] 杨景旭, 羿应棋, 张勇军, 等. 基于加权分布熵的配电网电动汽车并网运行风险分析[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(5): 171-179.
- YANG Jingxu, YI Yingqi, ZHANG Yongjun, et al. Operation risk analysis of electric vehicle integrated to distribution network based on weighted distribution entropy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(5): 171-179.
- [39] 王鹤, 余中枢, 李筱婧, 等. 基于主成分分析的多类型电动汽车接入配电网的综合风险评估[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(11): 57-65.

- WANG He, YU Zhongshu, LI Xiaojing, et al. Comprehensive risk assessment of multiple types of electric vehicles connected to distribution network based on principal component analysis method[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2021, 41(11): 57-65.
- [40] YU J, GUO L, MA M N, et al. Risk assessment of integrated electrical, natural gas and district heating systems considering solar thermal CHP plants and electric boilers[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2018, 103: 277-287.
- [41] TAN J, WU Q W, ZHANG M L, et al. Chance-constrained energy and multi-type reserves scheduling exploiting flexibility from combined power and heat units and heat pumps[J]. *Energy*, 2021, 233: 121176.
- [42] ZHANG Y, ZHU S Z, CHOWDHURY A A. Reliability modeling and control schemes of composite energy storage and wind generation system with adequate transmission upgrades[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2011, 2(4): 520-526.
- [43] 孙 辉, 刘 鑫, 贲 驰, 等. 含风储一体化电站的电力系统多目标风险调度模型[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(5): 94-101.
SUN Hui, LIU Xin, BEN Chi, et al. Multi-objective risk scheduling model of power system containing power station with integrated wind power and energy storage[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(5): 94-101.
- [44] 丁 一, 江艺宝, 宋永华, 等. 能源互联网风险评估研究综述(一): 物理层面[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(14): 3806-3816.
DING Yi, JIANG Yibao, SONG Yonghua, et al. Review of risk assessment for energy internet, part I: physical level[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(14): 3806-3816.
- [45] 谢 桦, 陈 昊, 邓晓洋, 等. 基于改进 K-means 聚类技术与半不变量法的电-气综合能源系统运行风险评估方法[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(1): 59-69.
XIE Hua, CHEN Hao, DENG Xiaoyang, et al. Electric-gas integrated energy system operational risk assessment based on improved K-means clustering technology and semi-invariant method[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(1): 59-69.
- [46] GUO L, GUO C X, TANG W H et al. Evidence-based approach to power transmission risk assessment with component failure risk analysis[J]. *IET Generation, Transmission and Distribution*, 2012, 6(7): 665-672.
- [47] WANG A S, LUO Y, TU G Y, et al. Vulnerability assessment scheme for power system transmission networks based on the fault chain theory[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2011, 26(1): 442-450.
- [48] 王 越, 郭创新, 文云峰, 等. 一种三段式序贯交叉熵重采样方法及其在电力系统短期可靠性评估中的应用[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(28): 94-100.
WANG Yue, GUO Chuangxin, WEN Yunfeng, et al. A three-stage sequential cross-entropy importance sampling method and its application in composite power system short-term reliability evaluation[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(28): 94-100.
- [49] WANG Y. Risk assessment of stochastic spinning reserve of a wind-integrated multi-state generating system based on a cross-entropy method[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2017, 11(2): 330-338.
- [50] WANG Y, GUO C X, WU Q H. A cross-entropy-based three-stage sequential importance sampling for composite power system short-term reliability evaluation[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, 28(4): 4254-4263.
- [51] 郭创新, 丁 一, 张金江, 等. 电力系统风险评估与风险调度[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
GUO Chuangxin, DING Yi, ZHANG Jinjiang, et al. Power system risk assessment and risk based dispatch[M]. Beijing, China: Science Press, 2018.
- [52] 别朝红, 潘超琼, 陈 叶, 等. 能源转型下新能源电力系统概率风险评估[J]. *西安交通大学学报*, 2021, 55(7): 1-11.
BIE Zhaohong, PAN Chaoqiong, CHEN Ye, et al. Probabilistic risk assessment of new energy power system in the context of energy transition: a review[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2021, 55(7): 1-11.
- [53] HE J, SUN Y, KIRSCHEN D S, et al. State-space partitioning method for composite power system reliability assessment[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2010, 4(7): 780-792.
- [54] 芦晶晶, 杜松怀, 韦永忠, 等. 基于三点估计法的新能源电网快速风险评估[J]. *高电压技术*, 2017, 43(1): 172-180.
LU Jingjing, DU Songhuai, WEI Yongzhong, et al. Three point estimation method for rapid risk evaluation of transmission system with new energy[J]. *High Voltage Engineering*, 2017, 43(1): 172-180.
- [55] 马志远, 石立宝, 姚良忠, 等. 电网连锁故障的事故链搜索模型及策略研究[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(13): 3292-3302.
MA Zhiyuan, SHI Libao, YAO Liangzhong, et al. Study on the modeling and search strategy of event chain for cascading failure in power grid[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(13): 3292-3302.
- [56] 张雪敏, 钟雨芯, 梅生伟, 等. 含双馈风电场的电力系统停电风险研究[J]. *电工电能新技术*, 2016, 35(7): 1-7.
ZHANG Xuemin, ZHONG Yuxin, MEI Shengwei, et al. Blackout risk analysis of power system integrated with DFIG wind farm[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2016, 35(7): 1-7.
- [57] 徐 迪, 王洪涛. 基于随机潮流和风险价值的含大规模风电系统高风险连锁故障评估[J]. *电网技术*, 2019, 43(2): 400-409.
XU Di, WANG Hongtao. High risk cascading outage assessment in power systems with large-scale wind power based on stochastic power flow and value at risk[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(2): 400-409.
- [58] 周智行, 石立宝. 考虑风电不确定性及系统调频作用的电网连锁故障风险评估[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(10): 3305-3316.
ZHOU Zhihang, SHI Libao. Risk assessment of power system cascading failure considering wind power uncertainty and system frequency modulation[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(10): 3305-3316.
- [59] 崔晓丹, 吴家龙, 雷 鸣, 等. 新能源高占比电力系统的连锁故障诱因及事故链搜索技术探讨[J]. *电力自动化设备*, 2021, 41(7): 135-143.
CUI Xiaodan, WU Jialong, LEI Ming, et al. Discussion on inducement and fault chain search technology of cascading failure in power system with high penetration of renewable energy[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2021, 41(7): 135-143.
- [60] 孟凡成, 郭 琦, 康宏伟, 等. 计及集中式和分布式新能源的电力系统连锁故障模拟[J]. *高电压技术*, 2022, 48(1): 189-198.
MENG Fancheng, GUO Qi, KANG Hongwei, et al. Cascading failure simulation for power system with utility-scale and distributed renewable energy[J]. *High Voltage Engineering*, 2022, 48(1): 189-198.
- [61] BILLINTON R, WANG P. Reliability-network-equivalent approach to distribution-system-reliability evaluation[J]. *IEEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, 1998, 145(2): 149-153.
- [62] 葛少云, 朱振环, 刘 洪, 等. 配电网故障风险综合评估方法[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2014, 26(7): 40-45.
GE Shaoyun, ZHU Zhenhuan, LIU Hong, et al. Comprehensive evaluation method for distribution network fault risk[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2014, 26(7): 40-45.
- [63] 乐 健, 朱江峰, 孙 旻, 等. 大规模分布式光伏接入的配网风险

- 评估及应对措施研究[J]. 电测与仪表, 2019, 56(14): 28-33.
- LE Jian, ZHU Jiangfeng, SUN Min, et al. Research on the risk assessment and countermeasures of distribution network with large scale distributed PV accessing[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(14): 28-33.
- [64] LIU W X, YAO Q, SHI Q X, et al. Risk assessment of cascading failure of distribution network with flexible multi-state switch[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 142: 108290.
- [65] 蒋程, 刘文霞, 张建华, 等. 含风电接入的发电系统风险评估[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 260-270.
- JIANG Cheng, LIU Wenxia, ZHANG Jianhua, et al. Risk assessment of generation and transmission systems considering wind power penetration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 260-270.
- [66] 马光, 张伊宁, 陈哲, 等. 含大规模风电的交直流混联系统风险评估方法[J]. 电网技术, 2019, 43(9): 3241-3252.
- MA Guang, ZHANG Yining, CHEN Zhe, et al. Risk assessment method for hybrid AC/DC system with large-scale wind power integration[J]. Power System Technology, 2019, 43(9): 3241-3252.
- [67] 李海波, 鲁宗相, 乔颖, 等. 大规模风电并网的电力系统运行灵活性评估[J]. 电网技术, 2015, 39(6): 1672-1678.
- LI Haibo, LU Zongxiang, QIAO Ying, et al. Assessment on operational flexibility of power grid with grid-connected large-scale wind farms[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1672-1678.
- [68] 赵伟, 姜飞, 涂春鸣, 等. 电动汽车充电站并网谐波分析[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(11): 61-66.
- ZHAO Wei, JIANG Fei, TU Chunming, et al. Harmonic currents of grid-connected EV charging station[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(11): 61-66.
- [69] 文云峰. 计及预想故障的电力系统风险调度模型与方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- WEN Yunfeng. Model and algorithm for risk-based dispatch in power systems considering credible contingencies[D]. Hangzhou, China: Zhejiang University, 2015.
- [70] WOOD A J, WOLLENBERG B F, SHEBLÉ G B. Power generation, operation, and control[M]. 3rd ed. New York, USA: Wiley, 2013.
- [71] 王瑞峰, 高磊, 谌杰, 等. 高风电渗透率下变速风电机组参与系统频率调整策略[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(15): 101-108.
- WANG Ruifeng, GAO Lei, SHEN Jie, et al. Frequency regulation strategy with participation of variable-speed wind turbines for power system with high wind power penetration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(15): 101-108.
- [72] 徐帆, 丁怡, 韩红卫, 等. 促进跨区新能源消纳的直流联络线功率优化模型及分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(18): 152-159.
- XU Fan, DING Qia, HAN Hongwei, et al. Power optimization model and analysis of HVDC tie-line for promoting integration of inter-regional renewable energy accommodation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(18): 152-159.
- [73] 翟俊义. 促进大规模风电消纳的电力系统协调调度模型与方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
- ZHAI Junyi. Research on power system coordination scheduling model and method for large-scale wind power accommodation[D]. Beijing, China: North China Electric Power University, 2019.
- [74] 郝广涛, 韩学山, 梁军, 等. 传统电力系统和比例可再生能源电力系统调度与控制方法综述[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(9): 10-19.
- HAO Guangtao, HAN Xueshan, LIANG Jun, et al. Review of dispatch and control methods for tradition power system and high-rate renewable energy generation power system[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2020, 32(9): 10-19.



GUO Chuangxin
Post-doctorate
Professor
Corresponding author

郭创新(通信作者)

1969—, 男, 博士(后), 教授, 博导

主要研究方向为智能电网和分布式能源并网、智能信息处理技术及其在电力系统中的应用

E-mail: guochuangxin@zju.edu.cn

收稿日期 2022-07-04 修回日期 2022-09-05 编辑 程子丰