

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241457

## 新型电力系统下核机组涉网运行风险评估综述

翟常营<sup>1</sup>, 顾秋斌<sup>1</sup>, 马红星<sup>1</sup>, 侯可馨<sup>2</sup>, 姜毅<sup>1</sup>, 李岩<sup>2</sup>, 谢庆<sup>2</sup>

(1. 福建福清核电有限公司, 福建 福清 350300; 2. 华北电力大学(保定), 河北 保定 071003)

**摘要:** 核电是构建清洁低碳新型电力系统的重要基础, 但新型电力系统存在惯性水平降低、抗扰能力减弱等特征, 这些变化对核机组涉网运行带来的风险尚不清晰。为此, 首先归纳了新型电力系统的特征, 介绍了新型电力系统对核机组运行稳定性的影响。其次, 介绍了核电厂的基本运行特性及其安全运行准则, 分析了核机组与电网间的相互作用效果。然后进一步探讨了新型电力系统下核机组的涉网风险, 并介绍了基于不确定性分析的风险评估方法。最后, 针对新型电力系统下核机组的涉网风险展开讨论并提出优化运行建议。研究可为新型电力系统中核机组的涉网运行安全提供理论支持和实践指导。

**关键词:** 新型电力系统; 核电; 风险评估; 不确定性风险; 涉网运行

### Review of grid-connected operation risk assessment for nuclear power units in the context of new power systems

ZHAI Changying<sup>1</sup>, GU Qiubin<sup>1</sup>, MA Hongxing<sup>1</sup>, HOU Kexin<sup>2</sup>, JIANG Yi<sup>1</sup>, LI Yan<sup>2</sup>, XIE Qing<sup>2</sup>

(1. Fujian Fuqing Nuclear Power Co., Ltd., Fuqing 350300, China;

2. North China Electric Power University (Baoding), Baoding 071003, China)

**Abstract:** Nuclear power is an important basis for building a clean and low-carbon new power system. However, this emerging power system is characterized by reduced system inertia and diminished disturbance resilience, introducing unclear risks to the grid-connected operation of nuclear power units. This paper first summarizes the characteristics of the new power system and discusses its influence on the stability of nuclear power units. Then, it introduces the basic operation characteristics and safe operation principles of nuclear power plants, while the interaction between nuclear power units and the power grid is also analyzed. Furthermore, this paper explores the potential grid-integration risks faced by nuclear power units under the new power system and presents risk assessment methods based on uncertainty analysis. Finally, it discusses strategies to mitigate these risks and proposes recommendations for optimal operation. This study aims to provide theoretical support and practical guidance for ensuring the safe operation of nuclear power units in new power systems.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52277147).

**Key words:** new power system; nuclear power; risk assessment; uncertainty risk; grid-connected operation

## 0 引言

2021年3月15日, 习近平总书记首次提出新型电力系统的概念, “要构建清洁低碳安全高效的能源体系, 控制化石能源总量, 着力提高利用效能, 实施可再生能源替代行动, 深化电力体制改革, 构建以新能源为主体的新型电力系统<sup>[1]</sup>。”新型电力系统是我国能源系统的建设目标, 将根本改变目前我

国以化石能源为主的发展格局, 实现能源消费的电气化和电力消费的清洁化。

核能对于中国构建清洁低碳、安全高效的新型电力系统具有举足轻重的作用。截至2024年3月, 我国在运、在建、核准待建机组的总装机容量已超1亿kW, 全国核机组累计发电约4万亿kWh, 其中2023年发电量为4300亿kWh, 相当于减排二氧化碳约3.2亿吨<sup>[2]</sup>。群堆百万千瓦级核电机组的不断并网极大地减少了我国碳排放总量, 为助力实现碳中和目标, 应对全球气候变化发挥了建设性作用。近年来我国核科技创新体系能力全面提升, 拥

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(52277147); 北京市自然科学基金项目资助(3222057)

有自主知识产权的“华龙一号”与国产化 CAP1000 技术均为三代压水堆核电技术。华龙一号独创“177 堆芯设计”和“能动与非能动相结合”的安全设计理念,采用“双层安全壳”设计,配备完善的严重事故预防与缓解措施,满足国际最高安全标准,已成为中国为世界贡献的三代核电优选方案<sup>[3]</sup>。然而,新型电力系统具有惯性低、抗扰性弱、拓扑结构复杂、电磁与机电暂态交织等特点,为核电机组的涉网运行带来诸多挑战。新型电力系统背景下核电涉网运行面临的风险尚不清楚,因此迫切需要对其进行系统性评估。本文综合考虑新型电力系统特征,全面阐述核电机组面临的涉网运行风险,为新型电力系统下核电机组涉网风险评估方法提供技术指导,为核电机组长期安全并网运行提供有益参考。

## 1 新型电力系统概述

### 1.1 新型电力系统特征

新型电力系统将重塑我国能源结构,承担着电力系统清洁低碳转型任务,是实现“双碳”目标的关键载体。其主要特征体现在以下几个方面。

#### 1) 高比例可再生能源

截至 2024 年 6 月底,我国可再生能源发电装机达到 16.53 亿 kW, 约占我国发电总装机的 53.8%, 可再生能源发电新增装机占比达 88%<sup>[4]</sup>。现阶段我国可再生能源装机容量增速远超总装机容量增速, 可再生能源在我国能源结构中的占比稳步上升, 电力系统逐渐实现从传统的以煤炭为主的能源结构向更多元化、清洁化的能源结构转变。

#### 2) 高比例电力电子设备

新型电力系统呈现明显的高比例电力电子设备特征。发电侧大规模可再生能源通过变流器接口并入电网, 基于构网型变流器技术, 可更好地发挥变流器灵活可控的优势, 为系统提供可靠的电压、频率支撑。先进电力电子设备的研发极大地推动了我国柔性直流输电技术与特/超高压直流输电技术的发展。负荷侧方面, 新型负荷元件与微网以电力电子器件为并网接口设备; 电动汽车通过电力电子设备实现可控充放电。储能系统利用功率半导体器件实现电能的储存与释放。

#### 3) 多能互补的综合能源

多能互补的综合能源电力系统核心在于通过资源的优化配置, 实现能源的高效转换与利用。综合能源系统涵盖了核能、太阳能、风能、水能、生物质能以及化石能源等多种能源形式, 通过先进的能源转换技术和智能控制策略, 实现对各类能源的协同调度与互补管理。核电出力稳定、转动惯量大,

可以弥补高比例新能源接入电网所带来的不足, 故核电有益于可再生能源并网, 可提高风电、光伏的利用效率。因此, 充分发挥核电在电力供应和能源转型中的作用, 因地制宜推进核能综合利用, 有利于我国电网的安全稳定运行, 使多能互补的综合能源电力系统朝着更加高效、可持续的方向发展。

### 1.2 新型电力系统对核电机组稳定性的影响分析

在新型电力系统背景下, 特别是随着风光渗透率不断增加, 电力系统结构、动态响应特性和运行方式发生了显著变化, 给系统内核电机组的涉网运行带来影响, 主要体现在以下几个方面, 并归纳如图 1 所示。

#### 1) 小扰动功角稳定性(低频振荡)影响

当系统阻尼不足时, 小扰动可能引发功角的持续振荡, 即低频振荡。高比例新能源特征下的电力系统低频振荡模式复杂多变, 主要影响因素是潮流分布和系统惯量<sup>[5]</sup>。一方面, 大量新能源机组直接接入电网引起系统潮流发生较大变化时, 会对电力系统阻尼产生严重影响。系统阻尼无法继续满足机组间的功率平衡需求, 小干扰稳定性受到威胁, 进而影响低频振荡的频率、幅值、衰减速度等特性<sup>[6-8]</sup>。另一方面, 当新能源机组取代传统机组接入电网时, 大量电力电子设备造成系统整体的惯性水平降低, 导致低频振荡风险加剧。因此当系统因小扰动(如负荷波动或设备投切)发生小功角失稳时, 若阻尼不足或存在负阻尼, 核电机组可能因功角持续振荡而被迫脱网。

#### 2) 暂态功角稳定性的影响

大规模双馈风电机组接入系统后, 电力系统暂态功角稳定性受到风电比例、风机并网接入位置、联络线阻抗比、同步机功角摇摆方向、同步机出力调整方式、负荷接入位置等多种因素的影响<sup>[9-10]</sup>。光伏渗透率、电网拓扑结构、光伏电源控制策略等均会影响光伏并网后的系统暂态功角稳定性<sup>[11]</sup>。此外, 当暂态事件发生时, 并网的光伏因改变了系统原有的机电振荡模式, 还可能带来新频段范围的周期性振荡, 导致与主网异步运行<sup>[12-13]</sup>。面对短路故障等大扰动, 新型电力系统下电网频率变化率加快, 同步机转子动能缓冲不足, 功角摇摆幅度增大, 易引发暂态失步, 影响核电机组稳定运行, 因此需增加辅助设备或调整控制策略提高系统暂态稳定能力<sup>[14-16]</sup>。

#### 3) 电压稳定性的影响

新能源出力的不可预测性加剧了系统电压的波动, 风电功率的波动会导致电压发生闪变<sup>[17]</sup>。新能源的接入引入了新的无功-电压特性, 如光伏电源的

无功调节范围小于传统电源, 无法为系统提供充足的无功支撑, 系统有效无功储备降低, 削弱了系统的静态电压稳定性, 因而在新能源发电切换控制和交直流强耦合的作用下, 系统存在暂态过电压安全风险。尤其是风光发电渗透率增大且接入弱电网时,

电网短路容量降低, 系统受到扰动后的恢复能力减弱, 核电机组并网点可能面临长时间低电压或过电压问题。新能源电源逐级升压接入电网, 与主网的电气距离是常规机组的 2~3 倍, 降低了系统的电压稳定水平<sup>[18]</sup>, 也会给网内的核电机组带来冲击。

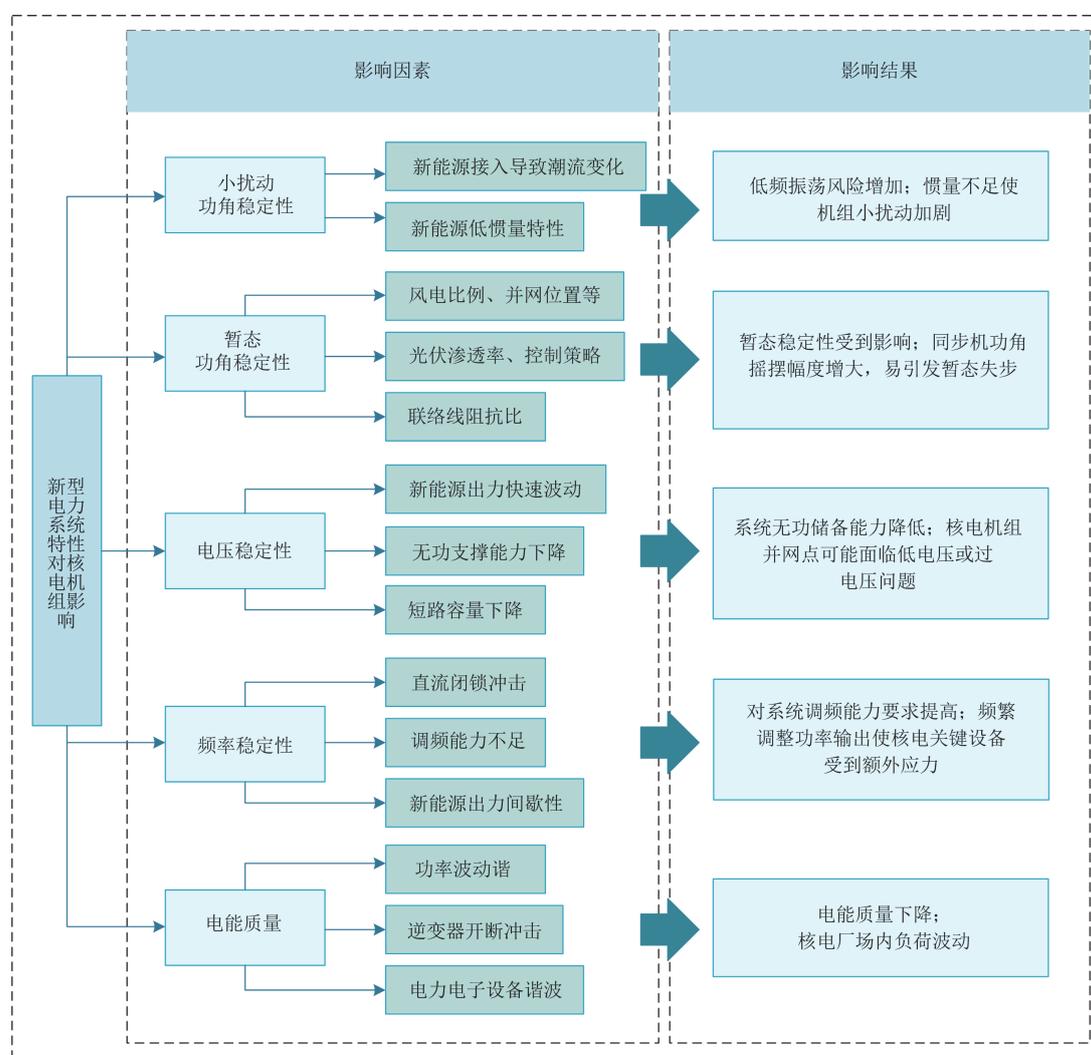


图 1 新型电力系统特性及其对核电机组影响关系图

Fig. 1 New power system characteristics and their influence on nuclear power units

#### 4) 频率稳定性的影响

新能源出力特性以及直流闭锁带来的不平衡功率冲击对电力系统的频率稳定构成了严重威胁。风速的不可预测性在长时间尺度上对系统的频率控制策略提出更高考验；风电输出功率间歇性对系统的调频能力提出更高要求。在一次调频的时间尺度上，风电场的集聚效应在一定程度上降低了风电总功率的波动<sup>[17]</sup>。而光伏电源一般不具备一次调频能力，导致系统中能用于应对频率波动的备用容量有限，光伏并网可能因故障穿越能力不足引发脱网事故，

导致功率缺额加重，系统暂态频率稳定性变差。当核电机组参与一次调频跟踪电网频率变化时，若频繁调整功率输出，可能对控制棒驱动机构、蒸汽发生器等关键设备和汽轮机调节阀、低压缸末级叶片和轴承造成额外的机械和热应力，缩短其使用寿命<sup>[19]</sup>。

#### 5) 电能质量的影响

高比例电力电子设备的投入虽然提高了系统的可控性和调节能力，但也带来了谐波污染，降低了系统的电能质量。光伏系统中逆变器频繁的开通和关断对电网造成短暂冲击，不仅导致电压波动，还

会在开关频率附近产生谐波分量；光照强度急剧变化导致输出功率大幅波动，也会产生大量谐波。虽然风电机组本身产生的谐波可以忽略不计，但变速风电机组中采用的变流器、变频器等电力电子设备在接入电网时同样会引发谐波注入问题。电能质量下降可能对核电厂内负荷带来不利影响。

## 2 新型电力系统下核电机组概述

### 2.1 核电厂基本运行特点

核电站的运行原则与火力发电厂大致相同，即根据电力系统的负荷需求调整反应堆的输出功率，实现核电站的发电量与电网负荷需求之间的动态平衡。在运行方面，核电机组单机功率大、单位千瓦造价高、燃料成本低、核电机组起停次数少、宜带基本负荷运行，故核电机组通常不参与电网调频。此外，为了确保燃料元件的安全，核电厂负荷变化速度必须严格限制。

### 2.2 核电厂安全运行原则及机组保护

为保障核电站安全运行，在核电发展的初期，核工业界就提出了以设计的保守性和设备的可靠性为中心的纵深防御原则。1979年美国三里岛核电厂事故后，国际原子能机构提出了完整的四道屏障五个层次的防御原则。中国核安全法规中也系统地阐述了这一原则，其核心是设置多道屏障和多重保护。其中，针对核电机组的继电保护系统是确保核电安全稳定运行的关键手段之一，通过对发电机组的各种异常状态进行实时监测，一旦发现潜在故障能够迅速响应，有效防止事故扩大。核电发电机组主要故障及异常对应的继电保护方式归纳如表 1 所示<sup>[20]</sup>。

表 1 核电发电机故障及异常对应的继电保护

Table 1 Relay protection for nuclear power generator

failure and anomaly

故障及异常状态	对应的发电机保护
定子绕组相间短路	纵联差动保护
定子绕组接地	保护区为 100%的定子接地保护
定子绕组匝间短路	定子匝间保护
发电机外部相间短路	宜装设复合电压(包括负序电压及线电压)启动的过电流保护
定子绕组过电压	为防止励磁系统误强励造成的危害,宜装设空载过电压保护
转子表层(负序)过负荷	由定时限与反时限组成的转子表层过负荷保护
励磁绕组过负荷	由定时限与反时限组成的励磁绕组过负荷保护
励磁电流异常下降	失磁保护
定子铁芯过励磁	过励磁保护

### 2.3 核电厂电气系统及其并网影响

#### 2.3.1 压水堆核电系统介绍

压水堆核电厂利用压水反应堆将核裂变能转换为热能再产生蒸汽发电。压水堆核电厂与气冷堆核电厂、重水堆核电厂和沸水堆核电厂相比，具有功率密度高、安全易控、技术成熟、造价和发电成本较低等特点，是目前国际上应用最广泛的核电站类型。压水堆核电厂组成包括核岛与常规岛部分，即一回路和二回路。核岛是压水堆发电厂的核心，其作用是产生核蒸汽；常规岛包括了核电汽轮机与发电机，与常规火力发电厂类似。二回路将一回路传递过来的热量进一步转换为蒸汽，驱动汽轮机旋转从而带动发电机发电。为了分析涉网运行特性，压水堆核电系统需要针对性地进行建模。文献[21]针对大容量压水堆核电机组一回路进行建模，包括功率控制系统、温度控制系统以及主泵等。文献[22]建立了压水堆核电机组主蒸汽系统、凝结水给水系统和汽轮机通流部分等二回路系统的动态模型。文献[23]提出一种适用于压水堆核电站机组原动机调节系统的数学模型。相比于常规火电机组原动机模型，该模型更加适用于核电机组原动机及其调节系统的模型参数，有助于更好地开展区域互联电网的稳定性分析。

#### 2.3.2 核电与电网相互影响

电网扰动会对核电机组造成多方面影响。核电机组对系统电压和频率的波动非常敏感，主要体现在以下三个方面：一是电网电压、频率的不稳定使机组的调速系统受到影响，引起反应堆内部暂态变化，甚至引发机组切机。二是电网电压或者频率的降低将使冷却剂泵转速下降，冷却剂流量减少进而导致反应堆内部温度升高<sup>[24]</sup>。三是由于保护不正确动作导致故障长期存在时，可能使系统内机组失去同步，为了避免这种现象，必须在核电机组内采取一些特殊的措施<sup>[25]</sup>。压水堆核电厂具备自稳自调的特性，能够通过温度效应与中毒效应的负反馈机制，抵御电力系统的外部扰动并维持稳定运行，但达到稳定所需的时间较长，因此需要功率控制系统使反应堆能更快速地达到稳定状态<sup>[24]</sup>。

反之，机组的扰动也会对电网造成波动。当核电机组突然甩负荷或切机时系统出现功率缺额，进而使系统的稳定性、电压和频率受到严重影响。同时，随着电压等级不断提高，大容量核电机组接入系统后，会增加系统的短路电流水平，但通过增大核电站送出输电线路的导线截面、减少核电站送出输电线路回路数，均能部分降低短路电流水平<sup>[26]</sup>。在大规模风电集中并网后，尤其在孤网内风电、核

电联合运行工况下, 风电近区系统的频率动态稳定性将面临严峻挑战, 文献[27]提出可以在合适范围内调整大容量核电机组的高频保护定值, 使其尽量保持在电网中, 有利于孤网的频率稳定。

华东与南方区域合计核电装机容量占全国比重预计在 2030 年、2035 年将分别达到 80%、77.5%, 考虑到 2050 年非化石能源发电量占比 80% 的约束, 核电将对传统化石能源形成明显的替代关系<sup>[28]</sup>。随着核电与以风电为代表的新能源并网容量增加以及负荷峰谷差的增大, 电网调度将更加困难。因此, 对于核电比重较高的地区, 未来亟须做好调整核电运行方式的技术储备<sup>[29]</sup>。文献[30]分析了压水堆核电机组调峰的可行性, 并介绍了不同机组参与调峰的多种运行模式。文献[31]从机组损失、燃料添加、乏燃料处理、调峰安全等方面对核电调峰成本进行定量分析, 提出了核-光电-储能-抽水蓄能-热多电源联合调峰调度模型, 协同优化了系统的调峰深度、功率爬坡速率, 为保证核电调峰的安全性提供了一定的技术支撑。

### 3 新型电力系统下核电机组涉网风险评估

随着新型电力系统中新主体的不断涌现, 源网荷储各环节资源种类显著增多且特性各异, 在元件层级精确刻画其运行特性、在系统层级准确量化协同互动能力难度增大<sup>[32-33]</sup>。因此, 为准确评估核电机组涉网安全运行风险, 亟需建立新型电力系统下的风险评估体系, 重点解决系统确定性问题。本节将从 3 个层面介绍新型电力系统下核电机组涉网风险评估, 即不确定性建模、风险评估方法和风险指标建立, 如图 2 所示。

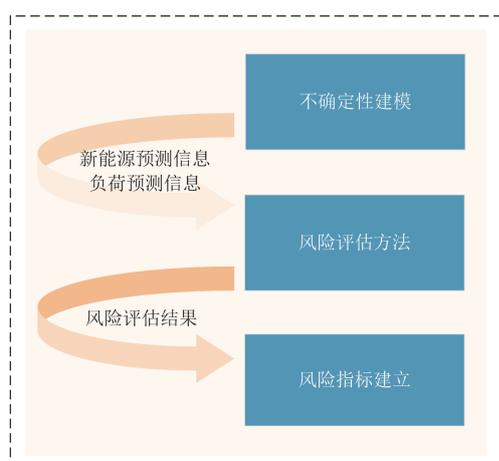


图 2 新型电力系统下核电机组涉网风险评估流程

Fig. 2 Grid-connected operation risk assessment process of nuclear power units in a new power system

#### 3.1 源网荷储不确定性

##### 3.1.1 电源侧不确定性

准确预测风机出力及其波动特征是实现大规模不确定性能源并网运行的基础, 也是分析新型电力系统背景下核电机组安全的必要条件。目前, 风电出力建模方法主要可分为以下 3 类: 1) 物理模型; 2) 统计模型; 3) 人工智能模型。物理模型主要基于气象数据对风电进行短期预测, 该方法受限于气象数据的准确性。统计法则基于历史风速或功率数据进行建模。文献[34]针对不同功率波动特性和多空间风电预测误差进行拟合, 提出一种基于高斯混合分布的正态云耦合概率密度分布方法, 有效提高了预测精度。然而, 风电场风速-功率特性的单一曲线建模不能包含核电机组所有的运行方式, 为了更好地满足实际工程需求, 可以建立包含不确定性因素的功率特性模型, 因此文献[35]引入测量环节中的不确定性因素, 基于尾流效应提出一种风机最优功率曲线迭代拟合算法。此外, 核电机组故障的不确定性同样给系统的安全可靠运行带来影响。文献[36]采用 Copula 函数来模拟随机变量之间的相关性, 利用非序贯蒙特卡洛方法来模拟各个风电场的出力状态, 提出了一种计及风速与核电机组故障相关性的风电场可靠性建模方法。人工智能预测法适合处理动态、非线性和不确定的风电特征。学者基于神经网络、深度学习、支持向量机、极限学习机和自适应神经模糊推理系统等对风电功率进行了预测。然而, 采用单一的人工智能模型可能会受到初始参数的影响, 在计算过程中容易陷入局部最优<sup>[37]</sup>。为了进一步提高建模的准确性, 基于人工智能方法的组合模型越来越受欢迎。一方面, 考虑采用各种优化算法对参数进行预处理, 如遗传算法、粒子群优化算法、果蝇优化算法、灰狼优化算法等。另一方面, 采用权重分配算法求解组合预测模型的权重系数, 确定最优权重值。近年来基于人工智能技术的风电出力预测方法相关研究归纳于表 2 中。

相比于风电, 光伏系统不确定建模起步较晚。文献[43]提出了一种兼顾短时波动性和中长时间尺度变化规律的光伏出力概率模型。为了提高预测的精度, 文献[44]提出了一种基于波动分类和特征因子提取的混合动力预测模型。文献[45]介绍了一种基于改进时间卷积神经网络架构的超短期光伏功率预测方法, 大大提高了超短期光伏出力预测的准确性。此外, 新建光伏电站缺乏足够的训练样本导致功率预测更加困难。为此文献[46]在不依赖历史发电数据的情况下, 通过提取不同光伏电站的不变因果结构关系提高新建光伏电站的功率预测性能。

表 2 基于人工智能技术的风电预测模型优化方法

Table 2 Optimization method of wind power prediction model based on artificial intelligence technology

方法	优势	文献
深度卷积神经网络、改进灰狼优化算法	采用改进灰狼算法提高执行速率且避免陷入局部最优	[38]
变分模态分解、遗传算法、小波神经网络	采用变分模态分解和遗传算法消除数据噪声与优化小波神经网络参数	[39]
人工神经模糊推理系统、人工神经网络、支持向量回归、经验模态分解、稳态小波分解	采用经验模态分解与稳态小波分解法预处理参数；采用人工神经模糊推理系统、人工神经网络与支持向量回归法提高了风速与功率预测精度	[40]
诱导有序加权平均算子、广义回归神经网络、极限学习机、支持向量机	基于诱导有序加权平均算子，自适应确定广义回归神经网络等多个模型的权重，避免在某个未知时间产生的预测误差过大	[41]
改进优化算法、双通道深度学习模型、长短期记忆、时序卷积网络	通过引入自注意力机制，增强时序卷积网络对多维气象数据特征的提取能力；引入非线性决策因子、自适应动态边界和柯西突变的改进优化算法对模型参数进行优化	[42]

同一区域内风光出力往往具有一定的互补性，相比于二者单独出力，风光互补输出功率波动更小。近年来有学者同时考虑风电场和光伏电站出力的模型，文献[47]考虑风电和光伏在时空上的波动性和相关性，提出基于混合高斯模型的多时空尺度的风电-光伏联合功率预测方法。文献[48]提出一种基于R 藤 Copula-动态贝叶斯网络时空相关性建模的风光功率概率预测方法。文献[49]在分析风光出力不确定性、负荷波动的基础上进一步考虑风光联合出力及天气对线路停运率的影响，提出计及风光并网的电力系统运行风险评估模型。

### 3.1.2 电网侧不确定性

在新型电力系统框架下，电网侧的建模工作变得尤为重要，它涵盖了如特高压输电、柔性直流输电等多个关键系统。特高压输电系统被视为电力传输的“主动脉”，其建模工作需精确反映长距离、大容量输电的特性，包括整流换流站、逆变换流站、直流传输线路以及两端的交流系统。文献[50]针对特高压交直流混联系统的故障特点，提出了特高压交直流混联电网安全稳定分析方法，并在传统安全稳定分析中引入风险评估理论，基于关键要素对风险评估模型进行改进。文献[51]基于直流一、二次设备建模情况，提出了针对特高压直流运行特点的在线分析关键技术，构建了特高压直流运行风险评估总体框架。

柔性直流输电技术具有控制灵活、谐波含量低、无换相失败问题等优点，在海上风电直流送出、新能源并网等领域得到广泛应用<sup>[52]</sup>。其建模工作需重点关注换流器的控制策略与调制方式，如电压源换流器的稳态模型与小信号模型<sup>[53]</sup>。文献[52]针对实际工程中高频谐振问题，建立了柔直系统的精确阻抗模型。但考虑到元件数量庞大，逐一建立精细化模型并进行稳定性分析耗时较长，文献[54]将短路比概念合理扩展至全电力电子化系统，基于戴维南

等效网络来度量新能源-柔直送出系统电压支撑强度，提出能快速评估新能源-柔直送出系统振荡风险的计算方法。文献[55]针对引起保护误动的不确定因素进行建模，并建立柔性互联配电网连锁故障风险指标，提出基于最优切负荷故障后果的计算方法。文献[56]通过建立柔直与外部系统谐波谐振风险判定模型、外部系统谐波阻抗计算模型以及多直流馈入系统谐波阻抗模型，有效评估了系统中的谐波谐振风险，为新型电力系统的稳定运行提供了重要技术支持。

### 3.1.3 负荷侧不确定性

在新型电力系统场景下催生了大量的新型电力负荷元件，典型代表是电动汽车。负荷的不确定性直接影响电网供需平衡，决定核电机组出力。近年来随着电动汽车的普及与推广，其充电负荷对电力系统的影响日益显著，研究者们从扩散理论、分段充电策略、统计分析等多角度提出模型，旨在精准预测大规模电动汽车充电波动对电网负荷的影响。文献[57]通过分析电动汽车的充电行为和负荷特性，提出了一种电动汽车充电负荷的概率分布模型，为电网规划和运行提供了理论支持。文献[58]考虑了电动汽车的流动性和充电设施的空间分布因素，建立充电负荷时空分布概率模型。随着研究的深入，文献[59]进一步考虑了电动汽车充电行为的多样性和不确定性，提出了基于分段充电策略的概率负荷模型。该模型能够更准确地反映电动汽车在不同充电阶段对电网负荷的影响，提高了负荷预测的准确性。

### 3.1.4 储能侧不确定性

储能系统作为新型电力系统中的重要组成部分，通过与源网荷侧协同互动平衡系统供需关系。储能包括电池储能、抽水蓄能、压缩空气储能、超级电容器等储能方式。储能侧的不确定性同样会影响新型电力系统的性能，进而牵涉核电机组涉网表

现。文献[60]考虑电池储能充放电约束和容量约束, 提出了用于评估风力发电与储能复合系统可靠性的概率仿真方法。文献[61]考虑光储充电站中储能运行效率和寿命衰减过程, 以及光伏发电出力、电动汽车充电负荷、电价的不确定性, 建立了基于强化学习的储能优化运行模型。储能同样会增加多源系统的不确定性, 在分析时需特别考虑<sup>[62]</sup>。

### 3.2 核电机组涉网运行风险评估方法

从风险的角度, 可以将故障分为连锁性故障和非连锁性故障。对于非连锁性故障, 电力系统风险评估方法一般采用概率风险评估(probabilistic risk assessment, PRA), 即通过建模求解得到系统事故发生的概率<sup>[63]</sup>。概率计算方法主要有解析法和模拟法两种。

解析法也称枚举法, 包括概率卷积法、预想故障集法、贝叶斯网络法、状态空间法(马尔可夫过程)等。对于问题不是很复杂的情况, 解析法计算速度快, 结果精确, 但在处理复杂问题时, 由于相关的建模和推导较为复杂, 系统状态的数量随着组件数量的增加而呈指数级增长, 含大量组件的系统在状态计算上无法求解, 此时必须借助计算机进行数值仿真模拟。

在电力系统风险评估问题中, 模拟法以蒙特卡洛抽样法为代表, 也称随机抽样法。此外, 模拟法还包括状态枚举法、交叉熵重采样法、考虑时齐/非时齐马尔可夫过程的序贯仿真法。文献[64]考虑强随机性和不确定性风电、光伏的接入, 结合全概

率抽样、等分散抽样和自适应重要抽样的思想, 提出一种改进蒙特卡洛混合抽样的风险评估方法。文献[65]基于马尔可夫状态概率转移矩阵建立了风电和光伏的发电可靠性模型, 综合考虑了风光资源变化的随机性和连续性及温度对光伏出力的影响。

在核反应堆设计与分析方面, 蒙特卡洛法因其强大的几何处理能力和高计算精度, 成为模拟分析复杂堆芯的有效手段<sup>[66]</sup>, 可以用于反应堆燃料栅格中子能谱、压力容器快中子注量计算以及燃料燃料耗计算等。在核燃料后处理阶段, 通过模拟粒子的传输与相互作用, 可以评估放射性废物的辐射影响。文献[67]提出一种确定性截断蒙特卡洛求解方法, 通过克服随机蒙特卡洛模拟面临的困境, 减少了对中子模拟的方差。近年来, 研究人员试图通过增加典型场景数量来提高核电厂风险评估方法的准确性。然而每个场景都需要求解对应的物理模型, 对计算要求较高。为此文献[68]提出了一种基于深度神经网络与蒙特卡洛-dropout 算法来预测场景的不确定性, 可以最大限度地减少模拟次数, 确定假设动态场景(如失去冷却剂事故)的成功或失败。

由于核电厂涉及风险评估的事故序列和不确定因素众多, 若对所有事故序列进行蒙特卡洛采样并采用最佳估算程序计算, 计算量级将成指数级增长。因此研究者们提出一系列能够减少抽样次数、提高计算效率的改进蒙特卡洛采样法, 不同改进方法及其特点如表 3 所示。这些方法使得计算效率和准确性大大提高。

表 3 改进蒙特卡洛法特点

Table 3 Features of improved Monte Carlo method

改进蒙特卡洛法	特点与优势	局限性
重要抽样法	通过对重要性分布的选取, 使样本更多地集中在感兴趣的区域, 提高估计的效率、减少估计方差	依赖于分布的选取, 选择的分布不合适可能产生偏差
控制变量法	通过引入已知期望的辅助变量, 降低主要估计方差; 在估计量的相关性较强时, 能显著提高估计精度	需要找到合适的控制变量, 引入控制变量增加了计算的复杂性
分层抽样法	通过对样本空间分层, 在每一层中进行抽样, 提高了估计的精度、减少了样本间相关性从而降低方差	分层过程可能较为复杂; 分层效果依赖于分层策略的选择
方向抽样法	在处理高维问题时更具优势, 尤其适用于复杂的非线性极限状态方程问题	高度依赖于方向选择, 且实现复杂
拉丁超立方抽样法	通过确保每个维度的样本均匀分布提高样本的代表性; 具有更小方差	相比于普通蒙特卡洛方法, 实现较为复杂

此外, 概率论安全分析(probabilistic safety assessment, PSA)属于一种特定的 PRA, 是一种公认的专注于评价核电站可靠性的方法。核电厂可靠性指在规定的堆芯寿期内, 核电厂维持其正常供电运行的能力。PSA 通过把与安全有关的信息(如事件发生频率、事故后果、设备可靠性、分析的不确定性

等)数量化、集合进一个连贯的框架, 从而提供一个核电厂安全的全面图景, 揭露其中的薄弱环节, 优化资源配置, 提高系统安全性与经济性。在 PSA 中, 堆芯状态的判据通常包括堆芯峰值节点温度、净液体水位以及燃料包壳温度等参数。通过模拟核电厂运行过程中的各种始发事件和后续事件链, 计算出

各个事件引发风险的频率和概率。一般地，核电厂系统和设备的可靠性定量评价采用的 PSA 主要由故障树分析(fault tree analysis, FTA)和事件树分析(event tree analysis, ETA)两部分组成。

1) 故障树分析：确定导致严重后果的事故序列。即用于描述特定事件是如何由其他不希望事件的逻辑组合所引发的。通过构建故障树，可以识别并量化导致堆芯损坏的各种路径和概率。

2) 事件树分析：量化不同事故序列的概率与不确定性。即用于描述从初始事件到一系列不同后果的事件序列的过程。

基于上述分析，最后得出各序列的失效概率。但由于数据不足、环境变化等原因，难以获得故障树所有基本事件的故障率。为此文献[69]提出一种基于模糊概率的事件树分析来评估核电厂的堆芯损伤频率。文献[70]通过构建不同电压等级母线故障树模型，针对 APRI400 先进动力反应堆建立了元件老化影响的概率论安全分析模型。文献[71]考虑多机组核电站风险，提出了一种基于树组合计算的快速生成多单元事件树的方法，以提高多机组事件树建模效率与准确性。此外，文献[72]将蒙特卡洛、拉丁超立方体和网格点采样方法应用于沸水堆电站停电序列的动态概率风险评估，即通过耦合热压模拟和概率抽样来处理认知和偶然性的不确定性，能够进行更现实和详细的分析。

以上方法一般适用于非连锁性故障，然而核电厂涉网风险存在大量不确定性，这些不确定性通过包括核电厂在内的新型电力系统的复杂拓扑传播，使得电力系统的故障连锁演化过程更加复杂，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<sup>[73]</sup>。在此背景下，学者们针对新型电力系统连锁故障相关问题展开研究，文献[74]提炼了新能源高占比电力系统连锁故障的 4 类主要诱因，并介绍了事故链搜索的关键技术。文献[75]深入分析了连锁故障演化进程中交流故障、直流换相失败、直流闭锁、新能源机组高/低电压穿越、新能源脱网等关键事件的关联关系，分阶段、系统性地剖析了故障连锁演化机理。

为了深入探究复杂系统的演化规律，学者们基于复杂性理论和复杂网络理论建立了多种连锁故障分析模型，包括 OPA 模型、CASCADE 模型、隐性故障模型、级联失效模型和分支过程模型等。连锁故障是造成电网大停电的主要诱因，而大规模新能源并网加剧了系统发生连锁故障的风险。文献[76]提出了一种考虑风电不确定性及系统调频作用的改进方法，用于电网连锁故障的事故链搜索及风险评

估。文献[77]提出一种基于多时间尺度的连锁故障演化模型，基于风险理论，对得到的连锁故障演化路径及其故障环节进行风险评估。文献[78]基于渗流理论结合电气性质研究连锁故障发展机理，构建了支路故障渗流概率模型与系统连锁故障路径综合后果指标，结合发生概率构建路径风险评估模型，全面诊断连锁故障可能发展路径。综上，新型电力系统下核电机组涉网运行风险评估方法如图 3 所示。针对非连锁性故障，可采用解析法和模拟法进行分析；针对核电厂可靠性，当前研究普遍采用 PSA 方法进行研究；而针对连锁性故障，则使用基于复杂性理论的模型进行分析。

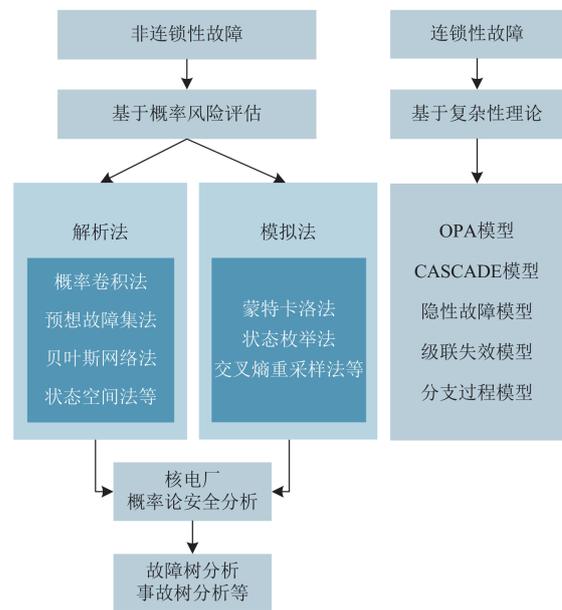


图 3 新型电力系统下核电机组涉网运行风险评估方法  
Fig. 3 Grid-connected operation risk assessment method of nuclear power unit in a new power system

### 3.3 风险评估指标体系

为了分析新型电力系统下核电机组涉网运行风险，首先应全面描述新型电力系统风险，目前应用较多的主要有以下几类指标。

- 1) 概率：如弃风率、恢复率、碳中和率等；
- 2) 频率：如期望缺电频率、负荷削减频率等；
- 3) 平均持续时间：如负荷削减平均持续时间等；
- 4) 期望值：如期望缺供电量、电力不足时间期望值、灵活性不足期望等。

在应用过程中通常采用多类指标来描述同一系统，以弥补不同指标之间的不足。例如文献[79]采用切负荷概率、电量不足期望、供电可用率风险指标评价含风电的电力系统可靠性。文献[80]在传统充裕性评估基础上引入对短缺事件集的持续时间、

规模、短缺容量等特征的综合分析, 拓展并量化了各类评估指标。然而, 可靠性评估一般用于系统规划, 立足于长时间尺度风险评估。上述综合性指标不适用于调度运行场景下的运行风险评估, 与之相比, 从短时特性指标(如电压、功率、负荷等)出发建立风险指标体系能更直观地反映系统安全问题。文献[81]在分析综合能源系统运行特性的基础上, 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。文献[64]建立了具有递进关系的3层风险评估指标: 第一层引入系统切负荷、线路越限和电压越限指标; 第二层指标拟合各指标的概率分布函数; 第三层引入综合风险指标, 更综合地评估了系统运行风险。

对于新型电力系统而言, 还需要考虑来自源网荷储不确定性风险。因此, 文献[64]在传统风险指标体系基础上, 增加了弃风弃光和稳态频率越限风险指标, 更全面地考量风光并网风险来源。文献[82]将层次分析法和模糊综合评价法联系起来, 建立包含电压、容量等定量指标, 及用户侧满意度、电力市场等定性模糊指标的多区域互联电网综合评估体系。文献[83]针对可再生能源并网要求, 综合考量电网接入、协调、适应和承载4个维度指标, 构建了大规模新能源接入的电网性能评价体系。文献[84]根据不同风险来源, 梳理出从风险表现“是什么”到风险“为什么”产生, 再到风险控制“怎么做”的三级指标体系, 为完善新型电力系统风险评估指标体系提供了指导。

而评价核电厂的可靠性指标, 一般应包括: 1) 核电设备耐久性; 2) 核电设备无故障性; 3) 核电设备维修性; 4) 核电设备经济性。核电厂可靠性随着环境条件、维护方法、储备条件等的不同而变化, 设备连续运行时间越长, 其可靠性随之下降, 因此不同的规定时间可靠性也不同。此外, 为了监测与评定核电厂运行状况与发展趋势, 世界核电营运者协会(world association of nuclear operators, WANO)颁布了衡量核电厂运行性能的指标, 包括机组能力因子、非计划能力损失因子、强迫损失率、安全系统性能等多项指标。其中华龙一号全球示范工程中的福清核电5、6号机组的WANO综合指数均达到满分, 每台机组的装机容量接近1200 MW, 生产运营绩效达到了国际先进水平。

## 4 新型电力系统下核电涉网运行问题讨论

### 4.1 新型电力系统下核电涉网风险评估面临的挑战

一是系统风险来源不确定。风速、日照的不可预测性使可再生能源输出功率发生波动, 导致线路

功率的不确定性, 故障时线路所引发的潮流转移也呈现出不确定性; 新能源汽车、虚拟电厂等新型负荷的出现加剧了负荷需求的不确定性; 极端天气事件可能减少新能源电力负荷、电力设备服役寿命。这些不确定性使得新型电力系统在故障分析方面面临着一定的挑战。

二是更复杂的系统结构导致故障概率增加。高比例可再生能源并网下系统低惯量、抗扰性弱等特征明显, 线路故障停运的概率大幅上升, 系统产生连锁故障的风险增加; 随着直流输电技术的蓬勃发展, 系统中交直流送受端呈现出强耦合、电压层级复杂的网络形态; 分布式能源的接入导致电网拓扑结构动态变化, 增加了电网规划和运行的复杂性。随着电力电子设备在电网中渗透率的提高, 系统的有功平衡原理、动态特性及相关控制方法将发生根本性变化。电力电子装置使得可再生能源机组和柔性输配电设备呈现更复杂的非线性、切换性和离散性特征。具有高调制频率、宽频带耦合特性的电力电子设备动态反应灵敏, 可在与电网相互作用的过程中产生宽频带电磁谐振/振荡, 导致谐波过压、过流及系统稳定性问题<sup>[5]</sup>。

三是传统风险评估分析方法与技术存在一定的滞后性。目前风险的计算过程往往对电力电子元件等进行简化处理, 忽略了其在物理结构、机械特性、能量转换机制方面的差异, 导致在系统故障风险分析过程中产生过评估或欠评估。含高频电力电子装置的仿真模拟往往需要更短的时间步长, 对计算机硬件条件提出更高要求, 仿真时需充分考虑系统电磁暂态与电力电子暂态之间的相互作用, 注意其开关特性、控制策略、动态响应对系统稳定性产生的影响。

### 4.2 核电机组涉网运行风险管控优化思路

为了应对核电机组涉网运行风险, 可以从以下3方面提升其风险管控能力。

1) 优化核电机组涉网运行风险评估方法。优化含多重不确定性风险的建模方法, 考虑不同时间、空间尺度下核电机组与新型电力系统的耦合风险, 建立含核电的综合能源风险建模策略。结合电网典型预想故障, 建立多核电机组故障传导模型。在核电机组涉网运行风险评估系统中加入核电设备可靠性指标、核电厂运行性能指标、网间联络参数等体现核电涉网状态的相关参量, 构建针对性的核电涉网风险评估方法。

2) 采用基于风险的调度策略应对电网侧运行风险。风险调度基于风险评估技术, 可改善新型电力系统中灵活调节能力不足、消纳压力增加等问题。其重点一是在传统调度技术的基础上, 考虑风险因

素的影响并对调度方式进行改善,提高电网的风险抵御能力;重点二是预想事故下的风险控制,即针对电网所面临的各类风险点提供风险管控辅助决策,以实现风险管控从“事后分析”向“事前防范”转变。目前,风险调度在计及源荷储的系统优化层面已经有所应用<sup>[85]</sup>,为了降低核电机组的涉网运行风险,需进一步建立基于风险指标体系与预想事故集的风险决策优化模型,将核电涉网运行风险概率融入电网调度的优化目标,建立考虑核电涉网运行风险的网侧调度方法。

3) 提升涉网情况下核电机组自身应对风险的能力。一方面,提高核电设备状态评估的精准度,保障核电厂涉网运行安全性。随着在线监测系统在核电厂中的广泛应用以及设备运行数据的不断积累,利用数据驱动技术评估设备健康状态已成为业内关注的热点<sup>[86]</sup>。依托人工智能和机器学习等先进的数据挖掘技术,建立不同场景下实际运行数据的设备管理系统与数据库,利用核电设备状态监测系统在故障早期及时发现关键参数异常状态,对风险精确溯源并给出预警,实现设备故障的智能预测和诊断,从而降低核电机组运行风险。另一方面,针对核电厂发电机及其励磁系统等关键设备配备适应新型电力系统的继电保护装置。目前在运百万千瓦级核电站广泛采用多相环形无刷励磁机型,其旋转电枢结构导致仅能通过定子励磁电流的谐波特征实现故障诊断,但不同故障(如定子绕组短路、旋转整流器开路等)的谐波频谱易重叠,轻微故障特征微弱且难以区分,现有保护存在灵敏度不足和选择性差的问题<sup>[87]</sup>;同时,定值配合式保护仅利用保护安装处信息,在某些情况下无法正确识别复杂区内外故障,保护的整定与配合更加困难<sup>[88]</sup>。为应对上述挑战,应结合新型保护原理与协同防御技术:一是基于故障暂态全过程信息(如行波、高频分量)构建快速保护判据,利用谐波特征演变规律设计差异化诊断逻辑,提升轻微故障识别能力;二是通过信息融合与区域协同机制优化保护定值整定和后备保护动作速度,结合“区域协同+分布自治”防御体系增强核电站在极端场景下的孤岛运行韧性和自愈能力,最终实现复杂电网环境下核电机组故障的快速可靠隔离与风险主动防御<sup>[89]</sup>。此外,近年来快速发展的硬件在环和实时数字仿真技术也为建设大规模精细化继电保护数字孪生体系提供了支撑<sup>[90]</sup>,能够辅助提高机组涉网运行可靠性。

## 5 总结

核电作为中国能源系统中的重要形式,其装机

规模不断增加,应用领域得到进一步拓展。随着大规模间歇性新能源的不断接入,新型电力系统背景下核电涉网运行面临的风险尚不清楚,亟需建立新型电力系统下核电涉网运行风险与防范机制,提升大型群堆核电基地涉网运行安全策略,强化核电与新能源、储能技术耦合发展,促进核电消纳、保持基荷运行,破解地区间电量供需不平衡问题,为全球能源转型和我国能源安全做出更大贡献。本文综合考虑新型电力系统特征,总结了核电机组涉网运行的风险与挑战,归纳出计及“源网荷储”不确定性因素的新型电力系统核电机组涉网运行风险评估框架。最后对核电机组涉网运行安全问题进行了讨论,提出了核电机组涉网风险的应对措施,为新型电力系统下核电机组安全、高效运行提供有益参考。

## 参考文献

- [1] 中华人民共和国中央人民政府. 习近平主持召开中央财经委员会第九次会议[EB/OL]. [2021-03-15]. [https://www.gov.cn/xinwen/2021-03/15/content\\_5593154.htm](https://www.gov.cn/xinwen/2021-03/15/content_5593154.htm).
- [2] 国家安全局. 全国核电运行情况(2024年1-6月)[EB/OL]. [2024-08-01]. [https://nnsa.mec.gov.cn/ywdt/hyzz/202408/t20240801\\_1083114.htm](https://nnsa.mec.gov.cn/ywdt/hyzz/202408/t20240801_1083114.htm).
- [3] 国家能源局. 我国自主三代核电技术华龙一号在建在运机组数量位居全球第一[EB/OL]. [2024-08-23]. [https://www.nea.gov.cn/2024-08/23/c\\_1212390764.htm](https://www.nea.gov.cn/2024-08/23/c_1212390764.htm).
- [4] 国家能源局. 我国风电光伏发电装机规模超过煤电[EB/OL]. [2024-08-02]. [https://www.nea.gov.cn/2024-08/02/c\\_1310783697.htm](https://www.nea.gov.cn/2024-08/02/c_1310783697.htm).
- [5] 谢小荣, 贺静波, 毛航银, 等. “双高”电力系统稳定性的新问题及分类探讨[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 461-474.  
XIE Xiaorong, HE Jingbo, MAO Hangyin, et al. New issues and classification of power system stability with high shares of renewables and power electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 461-474.
- [6] 罗澍忻, 韩应生, 余浩, 等. 构网型控制在提升高比例新能源并网系统振荡稳定性中的应用[J]. 南方电网技术, 2023, 17(5): 39-48.  
LUO Shuxin, HAN Yingsheng, YU Hao, et al. Application of grid-forming control in improving the oscillation stability of power systems with high proportion renewable energy integration[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(5): 39-48.
- [7] 程静, 苏乐, 岳雷. 双馈风电并网系统的宽频振荡机理分析与抑制[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(12): 1-13.  
CHENG Jing, SU Le, YUE Lei. Mechanism analysis and suppression of broadband oscillation in a DFIG wind power grid-connected system[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(12): 1-13.

- [8] VARMA R K, AKBARI M. Simultaneous fast frequency control and power oscillation damping by utilizing PV solar system as PV-STATCOM[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2020, 11(1): 415-425.
- [9] 汤蕾, 沈沉, 张雪敏. 大规模风电集中接入对电力系统暂态功角稳定性的影响(一): 理论基础[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(15): 3832-3842.  
TANG Lei, SHEN Chen, ZHANG Xuemin. Impact of large-scale wind power centralized integration on transient angle stability of power systems—part I: theoretical foundation[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(15): 3832-3842.
- [10] 张雪娟, 束洪春, 孙士云, 等. 双馈风机参与系统调频对系统暂态功角稳定性的影响分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(2): 18-29.  
ZHANG Xuejuan, SHU Hongchun, SUN Shiyun, et al. Effect analysis of a doubly-fed induction generator participating in system frequency modulation on system transient power angle stability[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(2): 18-29.
- [11] 丁明, 王伟胜, 王秀丽, 等. 大规模光伏发电对电力系统影响综述[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(1): 1-14.  
DING Ming, WANG Weisheng, WANG Xiuli, et al. A review of the impact of large-scale photovoltaic power generation on power systems[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(1): 1-14.
- [12] SUN Yao, SHI Guangze, LI Xing, et al. An f-P/Q droop control in cascaded-type microgrid[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(1): 1136-1138.
- [13] REMON D, CANIZARES C A, RODRIGUEZ P. Impact of 100-MW-scale PV plants with synchronous power controllers on power system stability in northern Chile[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2017, 11(11): 2958-2964.
- [14] 余墨多, 黄文焘, 邵能灵, 等. 基于光伏电站暂态特性的自适应暂稳控制方法[J]. *电工技术学报*, 2020, 35(增刊 2): 512-522.  
YU Moduo, HUANG Wentao, TAI Nengling, et al. Transient stability enhancement with an adaptive control scheme for photovoltaic plants[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(S2): 512-522.
- [15] ZHANG Dan, JIANG Jianguo, ZHANG Liang, et al. Research on seamless switching control strategy for T-type three-level energy storage inverter based on virtual synchronous generator[J]. *The Journal of Engineering*, 2017, 13: 1524-1527.
- [16] UCKWITZ D, FISCHER B. Modeling and design of df/dt based inertia control for power converters[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2017, 5(4): 1553-1564.
- [17] 薛禹胜, 雷兴, 薛峰, 等. 关于风电不确定性对电力系统影响的评述[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(29): 5029-5040.  
XUE Yusheng, LEI Xing, XUE Feng, et al. A review on impacts of wind power uncertainties on power systems[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(29): 5029-5040.
- [18] 郭剑波. 新型电力系统面临的挑战以及有关机制思考[J]. *中国电力企业管理*, 2021, 25: 8-11.
- [19] 史香锬, 杨均勇, 杨鹏, 等. 调峰运行对核电机组主汽轮机的影响分析[J]. *浙江电力*, 2019, 38(1): 35-39.  
SHI Xiangkun, YANG Junyong, YANG Peng, et al. Effects of peak load regulation on main steam turbines of nuclear power units[J]. *Zhejiang Electric Power*, 2019, 38(1): 35-39.
- [20] 南京南瑞继保电气有限公司, 中广核工程有限公司, 中国电力工程顾问集团华东电力设计院有限公司, 等. 大型核电发电机变压器组继电保护技术规范: GB/T 37549—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.  
Nanjing Nanrui Jibao Electric Co., Ltd., CGN Nuclear Engineering Co., Ltd., China Power Engineering Consulting Group East China Electric Power Design Institute Co., Ltd., et al. Technical code for relaying protection of generator-transformer unit in large capacity nuclear power plant: GB/T 37549—2019[S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.
- [21] 刘庆, 吴国阳, 宋新立, 等. 适用于电网稳定分析的大容量核电机组建模[J]. *电网技术*, 2017, 41(3): 907-914.  
LIU Qing, WU Guoyang, SONG Xinli, et al. Modeling of large-capacity nuclear power unit suitable for power grid stability analysis[J]. *Power System Technology*, 2017, 41(3): 907-914.
- [22] 葛斌, 张俊礼. 核电机组二回路建模与动态仿真[J]. *电力自动化设备*, 2012, 32(6): 76-79.  
GE Bin, ZHANG Junli. Modeling and dynamic simulation of nuclear power plant secondary loop[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2012, 32(6): 76-79.
- [23] 方朝雄, 李旭东, 林章岁, 等. 核电机组对电力系统一次调频性能影响仿真分析[J]. *华北电力大学学报(自然科学版)*, 2019, 46(5): 54-60.  
FANG Chaoxiong, LI Xudong, LIN Zhangsui, et al. Simulation analysis on influence of nuclear power units on primary frequency regulation of power system[J]. *Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition)*, 2019, 46(5): 54-60.
- [24] 谭金, 黄岳峰, 徐政. 基于 Matlab-Simulink 的详细核电机组数学模型研究[J]. *中国电力*, 2013, 46(7): 18-23.  
TAN Jin, HUANG Yuefeng, XU Zheng. Study for a detailed nuclear power unit mathematical model based on Matlab-Simulink[J]. *Electric Power*, 2013, 46(7): 18-23.
- [25] 熊莉, 刘涤尘, 赵洁, 等. 大型核电站的建模及接入电网的相互影响[J]. *电力自动化设备*, 2011, 31(5): 10-14.  
XIONG Li, LIU Dichen, ZHAO Jie, et al. Large nuclear power plant modeling and grid-connection influence[J].

- Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(5): 10-14.
- [26] 陈汉雄, 郑勇. 大容量核电机组接入川渝电网适应性及参与系统调峰研究[J]. 中国电力, 2011, 44(3): 1-5.  
CHEN Hanxiong, ZHENG Yong. Adaptability of large-capacity nuclear power plants accessing Sichuan and Chongqing grids and ability of participating in system peak-load regulation[J]. Electric Power, 2011, 44(3): 1-5.
- [27] 李媛媛, 余秀月, 丁剑, 等. 含高渗透率风电的孤网频率动态特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(23): 158-163.  
LI Yuanyuan, YU Xiuyue, DING Jian, et al. Study on frequency dynamic characteristics of isolated network with high penetration of wind power[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(23): 158-163.
- [28] 中国核学会. 2030、2050 年我国核电发展战略展望 [EB/OL]. [2019-12-30]. <http://www.ns.org.cn/site/content/7339.html>
- [29] 郑宽, 徐志成, 鲁刚, 等. 高比例新能源电力系统演化进程中核电与新能源协调发展策略[J]. 中国电力, 2021, 54(7): 27-35.  
ZHENG Kuan, XU Zhicheng, LU Gang, et al. Coordinated development strategy for nuclear power and new energy in the evolution process of power system with high penetration of new energy[J]. Electric Power, 2021, 54(7): 27-35.
- [30] 林毅, 潘玺安, 林章岁, 等. 含高比例核电的电力系统调峰技术综述[J]. 现代电力, 2020, 37(1): 51-58.  
LIN Yi, PAN Xi'an, LIN Zhangsui, et al. Review of peak regulation for power system with a high penetration of nuclear power[J]. Modern Electric Power, 2020, 37(1): 51-58.
- [31] GUO Q, WU X, CAI H, et al. Multi-power sources joint optimal scheduling model considering nuclear power peak regulation[J]. Energy, 2024, 293.
- [32] 闫炯程, 李常刚, 刘玉田. 数据驱动的新型电力系统安全风险预警综述[J]. 电网技术, 2024, 48(12): 4989-5002.  
YAN Jiongcheng, LI Changgang, LIU Yutian. Review of data-driven security risk early warning research of the new-type power system[J]. Power System Technology, 2024, 48(12): 4989-5002.
- [33] 郭创新, 刘祝平, 冯斌, 等. 新型电力系统风险评估研究现状及展望[J]. 高电压技术, 2022, 48(9): 3394-3404.  
GUO Chuangxin, LIU Zhuping, FENG Bin, et al. Research status and prospect of new-type power system risk assessment[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3394-3404.
- [34] 马伟, 谢丽蓉, 马兰, 等. 短期风电功率预测误差及出力波动的概率建模[J]. 太阳能学报, 2023, 44(11): 361-366.  
MA Wei, XIE Lirong, MA Lan, et al. Probabilistic modeling of short-term wind power prediction errors and output fluctuations[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2023, 44(11): 361-366.
- [35] 崔嘉, 杨俊友, 邢作霞, 等. 基于单机最优功率曲线拟合的多场景风电功率预测方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(16): 23-28, 42.  
CUI Jia, YANG Junyou, XING Zuoxia, et al. Multi-scenario wind power forecasting method based on single turbine optimal power curve fitting[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(16): 23-28, 42.
- [36] 陈凡, 卫志农, 张小莲, 等. 计入风速与风电机组故障相关性的风电场可靠性建模及其应用[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(11): 2900-2908.  
CHEN Fan, WEI Zhinong, ZHANG Xiaolian, et al. Reliability modeling of wind farms incorporating correlation between wind speed and failure of wind turbines and its application[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(11): 2900-2908.
- [37] WANG J, ZHANG L, WANG C, et al. A regional pretraining-classification-selection forecasting system for wind power point forecasting and interval forecasting[J]. Applied Soft Computing, 2021, 113.
- [38] JALALI S M J, AHMADIAN S, KHODAYAR M, et al. An advanced short-term wind power forecasting framework based on the optimized deep neural network models[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 141.
- [39] WANG D, LUO H, GRUNDER O, et al. Multi-step ahead wind speed forecasting using an improved wavelet neural network combining variational mode decomposition and phase space reconstruction[J]. Renewable Energy, 2017, 113: 1345-1358.
- [40] ÇEVİK H H, ÇUNKAŞ M, POLAT K. A new multistage short-term wind power forecast model using decomposition and artificial intelligence methods[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2019, 534.
- [41] LU P, YANG J, YE L, et al. A novel adaptively combined model based on induced ordered weighted averaging for wind power forecasting[J]. Renewable Energy, 2024, 226.
- [42] HE X, HE B, QIN T, et al. Ultra-short-term wind power forecasting based on a dual-channel deep learning model with improved coot optimization algorithm[J]. Energy, 2024, 305.
- [43] 管霖, 陈旭, 吕耀棠, 等. 适用于电网规划的光伏发电概率模型及其应用[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(11): 1-7.  
GUAN Lin, CHEN Xu, LÜ Yaotang, et al. Probabilistic model of PV generation for power system planning and its application[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(11): 1-7.
- [44] YANG M, SHEN X, HUANG D, et al. Fluctuation classification and feature factor extraction to forecast very short-term photovoltaic output powers[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2025, 11(2):

- 661-670.
- [45] XIAO H, ZHENG W, ZHOU H, et al. Ultra-short-term photovoltaic power prediction based on improved temporal convolutional network and feature modeling[J/OL]. CSEE Journal of Power and Energy Systems: 1-12[2024-10-29]. DOI: 10.17775/CSEEJPES.2023.06130.
- [46] ZHAO P, HU W, CAO D, et al. Causal mechanism-enabled zero-label learning for power generation forecasting of newly-built PV sites[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2025, 16(1): 392-406.
- [47] 汪惟源, 窦飞, 程锦闽, 等. 一种风光联合出力概率模型建模方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(10): 22-29. WANG Weiyuan, DOU Fei, CHENG Jinmin, et al. A modeling method for a wind and photovoltaic joint power probability model[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(10): 22-29.
- [48] 廖芷燕, 李银红. 基于R藤Copula-DBN时空相关性建模的风光荷功率概率预测[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(3): 113-120. LIAO Zhiyan, LI Yinhong. Probabilistic forecasting of wind-photovoltaic-load power based on temporal-spatial correlation modelling of regular Vine Copula-DBN[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(3): 113-120.
- [49] 商皓钰, 刘天琪, 卜涛, 等. 计及风电与光伏并网的电力系统运行风险评估[J]. 现代电力, 2020, 37(4): 358-367. SHANG Haoyu, LIU Tianqi, BU Tao, et al. Operational risk assessment of power system considering wind power and photovoltaic grid connection[J]. Modern Electric Power, 2020, 37(4): 358-367.
- [50] 李岩, 滕云, 徐明忻, 等. 特高压交直流混联电网连锁故障安稳风险评估[J]. 高电压技术, 2018, 44(11): 3743-3750. LI Yan, TENG Yun, XU Mingxin, et al. Security and stability analysis method for AC/DC UHV power system cascading failure based on improved risk assessment[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(11): 3743-3750.
- [51] 冯长有, 姚伟锋, 江叶峰, 等. 特高压直流运行风险评估技术研究及应用[J]. 智慧电力, 2020, 48(7): 30-37. FENG Changyou, YAO Weifeng, JIANG Yefeng, et al. Study and application of UHVDC operation risk evaluation[J]. Smart Power, 2020, 48(7): 30-37.
- [52] 冯俊杰, 邹常跃, 杨双飞, 等. 针对中高频谐振问题的柔性直流输电系统阻抗精确建模与特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(15): 4805-4820. FENG Junjie, ZOU Changyue, YANG Shuangfei, et al. Accurate impedance modeling and characteristic analysis of VSC-HVDC system for mid-and high-frequency resonance problems[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(15): 4805-4820.
- [53] 叶杰, 汤广福, 赵成勇. 多电压等级柔性直流电网建模与稳定性分析[J]. 高电压技术, 2022, 48(4): 1433-1441. YE Jie, TANG Guangfu, ZHAO Chengyong. Modeling and stability analysis for flexible DC power grid with multi-voltage levels[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(4): 1433-1441.
- [54] 彭茂兰, 许诒翊, 严喜林, 等. 基于相对等效短路比的新能源——柔直送出系统振荡风险评估[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(5): 96-104. PENG Maolan, XU Jieyi, YAN Xilin, et al. Oscillation risk assessment of renewable connected to MMC-HVDC system based on relative equivalent short-circuit ratio[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(5): 96-104.
- [55] 薛俞, 李月乔, 刘文霞, 等. 柔性互联配电系统连锁故障风险评估[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(8): 112-119. XUE Yu, LI Yueqiao, LIU Wenxia, et al. Risk assessment of chaining failure in flexible interconnected distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(8): 112-119.
- [56] 李清, 张东辉, 陈名, 等. 多直流馈入输电系统中高压柔性直流高频风险评估计算方法[J]. 南方电网技术, 2023, 17(12): 1-9. LI Qing, ZHANG Donghui, CHEN Ming, et al. Calculation method for high frequency risk assessment of VSC-HVDC in multi-infeed DC transmission system[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(12): 1-9.
- [57] 张宇轩, 郭力, 刘一欣, 等. 电动汽车充电负荷概率分布的数值建模方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(18): 61-70. ZHANG Yuxuan, GUO Li, LIU Yixin, et al. Numerical modeling method for probability distribution of electric vehicle charging load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(18): 61-70.
- [58] 宋雨浓, 林舜江, 唐智强, 等. 基于动态车流的电动汽车充电负荷时空分布概率建模[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(23): 47-56. SONG Yunong, LIN Shunjiang, TANG Zhiqiang, et al. Spatial-temporal distribution probabilistic modeling of electric vehicle charging load based on dynamic traffic flow[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(23): 47-56.
- [59] 饶颖卿, 张晓东, 饶宇飞, 等. 考虑分段充电的实用型电动汽车概率负荷模型[J]. 电测与仪表, 2021, 58(6): 26-32. RAO Yingqing, ZHANG Xiaodong, RAO Yufei, et al. A practical probability load model of electric vehicles considering segmental charging[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(6): 26-32.
- [60] ZHANG Y, ZHU S, 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.

- [61] 陈亭轩, 徐潇源, 严正, 等. 基于深度强化学习的光储充电站储能系统优化运行[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(10): 90-98.  
CHEN Tingxuan, XU Xiaoyuan, YAN Zheng, et al. Optimal operation based on deep reinforcement learning for energy storage system in photovoltaic-storage charging station[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10): 90-98.
- [62] 滕云, 孙鹏, 罗桓桓, 等. 计及电热混合储能的多源微网自治优化运行模型[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(18): 5316-5324, 5578.  
TENG Yun, SUN Peng, LUO Huanhuan, et al. Autonomous optimization operation model for multi-source microgrid considering electrothermal hybrid energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(18): 5316-5324, 5578.
- [63] 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 Chaohong, 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.
- [64] 马燕峰, 骆泽榕, 赵书强, 等. 基于改进蒙特卡洛混合抽样的含风光电力系统风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(9): 75-83.  
MA Yanfeng, LUO Zerong, ZHAO Shuqiang, et al. Risk assessment of a power system containing wind power and photovoltaic based on improved Monte Carlo mixed sampling[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(9): 75-83.
- [65] 陆丹, 袁越, 杨苏. 基于马尔可夫链蒙特卡洛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.
- [66] GORIČANEC T, ŠTANCER Ž, KOTNIK D, et al. Applicability of the Krško nuclear power plant core Monte Carlo model for the determination of the neutron source term[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2021, 53(11): 3528-3542.
- [67] KIM I, KIM H T, Kim Y. Deterministic truncation of the Monte Carlo transport solution for reactor eigenvalue and pinwise power distribution[J]. Nuclear Science and Engineering, 2020, 194(1): 14-31.
- [68] BAE J, PARK J W, LEE S J. Limit surface/states searching algorithm with a deep neural network and Monte Carlo dropout for nuclear power plant safety assessment[J]. Applied Soft Computing, 2022, 124.
- [69] PURBA J H, TJAHYANI D T S, WIDODO S, et al. Fuzzy probability based event tree analysis for calculating core damage frequency in nuclear power plant probabilistic safety assessment[J]. Progress in Nuclear Energy, 2020, 125.
- [70] AGWA A M, HASSAN H M. Onsite power system risk assessment for nuclear power plants considering components ageing[J]. Progress in Nuclear Energy, 2019, 110: 384-392.
- [71] PENG P, TONG J, ZHAO J. A rapid approach to generate multi-unit event trees based on tree combinatorial calculation[J]. Progress in Nuclear Energy, 2023, 162.
- [72] KUBO K, JANG S, TAKASHI T, et al. Quasi-Monte Carlo sampling method for simulation-based dynamic probabilistic risk assessment of nuclear power plants[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2022, 59(3): 357-367.
- [73] 沈政委, 孙华东, 汤涌, 等. 传统交流电网与高比例新能源电网连锁故障差异性分析[J]. 电网技术, 2021, 45(12): 4641-4649.  
SHEN Zhengwei, SUN Huadong, TANG Yong, et al. Analysis of cascading failure differences between traditional AC power grid and high-proportion new energy power grid[J]. Power System Technology, 2021, 45(12): 4641-4649.
- [74] 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.
- [75] 沈政委, 孙华东, 仲悟之, 等. 基于关键事件的高比例新能源电力系统故障连锁演化规律分析[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(24): 57-65.  
SHEN Zhengwei, SUN Huadong, ZHONG Wuzhi, et al. Key event based analysis of evolution law of cascading failures in power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(24): 57-65.
- [76] 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, 3657.  
ZHOU Zhixing, 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, 3657.
- [77] 丁明, 钱宇骋, 张晶晶. 考虑多时间尺度的连锁故障演化和风险评估模型[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(20): 5902-5912.  
DING Ming, QIAN Yucheng, ZHANG Jingjing. Multi-timescale cascading failure evolution and risk assessment

- model[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(20): 5902-5912.
- [78] 张娟, 童晓阳, 姜建伟. 基于渗流和风险理论的电力系统连锁故障分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(5): 46-52. ZHANG Juan, TONG Xiaoyang, JIANG Jianwei. Analysis on power system cascading failure based on percolation and risk theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(5): 46-52.
- [79] 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.
- [80] 张宇天, 顾丹珍, 李振坤, 等. 基于分级分类和改进 AHP-EW-TOPSIS 的电力系统充裕性评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(4): 144-154. ZHANG Yutian, GU Danzhen, LI Zhenkun, et al. A power system adequacy assessment method based on hierarchical classification and improved AHP-EW-TOPSIS[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(4): 144-154.
- [81] 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, 374. 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, 374.
- [82] 朱继忠, 冯禹清, 谢平平, 等. 考虑不确定因素的含可再生能源互联电网综合评估体系[J]. 南方电网技术, 2018, 12(4): 48-55. ZHU Jizhong, FENG Yuqing, XIE Pingping, et al. Comprehensive evaluation system of interconnected power grid with renewable energy considering uncertainties[J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(4): 48-55.
- [83] 李响, 武海潮, 王文雪, 等. 考虑大规模新能源接入的电网性能评价指标体系[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(15): 178-187. LI Xiang, WU Haichao, WANG Wenxue, et al. Performance evaluation index system of a power grid considering large-scale new energy[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(15): 178-187.
- [84] 胡博, 谢开贵, 邵常政, 等. 双碳目标下新型电力系统风险评述: 特征、指标及评估方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(5): 1-15. HU Bo, XIE Kaigui, SHAO Changzheng, et al. Commentary on risk of new power system under goals of carbon emission peak and carbon neutrality: characteristics, indices and assessment methods[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(5): 1-15.
- [85] 张高航, 李凤婷. 计及源荷储综合灵活性的电力系统日前优化调度[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(12): 159-167. ZHANG Gaohang, LI Fengting. Day-ahead optimal scheduling of power system considering comprehensive flexibility of source-load-storage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(12): 159-167.
- [86] 许勇, 蔡云泽, 宋林. 基于数据驱动的核电设备状态评估研究综述[J]. 上海交通大学学报, 2022, 56(3): 267-278. XU Yong, CAI Yunze, SONG Lin. Review of research on condition assessment of nuclear power plant equipment based on data-driven[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2022, 56(3): 267-278.
- [87] 郝亮亮, 陈建林, 桂林, 等. 核电多相环形无刷励磁系统故障分析及继电保护原理[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(9): 137-146. HAO Liangliang, CHEN Jianlin, GUI Lin, et al. Fault analysis and relay protection principle for multi-phase ring brushless excitation system of nuclear power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(9): 137-146.
- [88] ERDIWANSYAH, MAHIDIN, HUSIN H, et al. A critical review of the integration of renewable energy sources with various technologies[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(1): 1-18.
- [89] 王增平, 林一峰, 王彤, 等. 电力系统继电保护与安全控制面临的挑战与应对措施[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(6): 10-20. WANG Zengping, LIN Yifeng, WANG Tong, et al. Challenges and countermeasures to power system relay protection and safety control[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 10-20.
- [90] 章耀耀, 侯勇, 叶海, 等. 继电保护数字孪生技术应用展望[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(12): 178-187. ZHANG Yaoyao, HOU Yong, YE Hai, et al. Application prospect for relay protection digital twin technology[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(12): 178-187.

收稿日期: 2024-10-30; 修回日期: 2025-03-21

作者简介:

翟常营(1989—), 男, 通信作者, 高级工程师, 研究方向为核电电气系统保护与控制及实时仿真技术、核电电气系统数字化、智能化运维技术。E-mail: 309525147@qq.com

(编辑 魏小丽)