

极端自然灾害下我国城市电力系统韧性提升 框架与发展策略研究

徐雪松^{1,2*}, 唐加乐^{1,2}, 曾子洋¹, 徐凯¹, 蒋鸿涛¹, 何远兴¹

(1. 湖南工商大学前沿交叉学院, 长沙 410205; 2. 湘江实验室, 长沙 410205)

摘要: 城市电力系统是关系到城市安全的关键基础设施。自然灾害下“小概率-高损失”的极端事件频发, 严重威胁城市电力供应的持续性和城市的安全运行。韧性是用于描述系统抵御扰动并快速恢复到正常运行状态的能力, 因此针对极端自然灾害下提升城市电力系统韧性至关重要。本文首先对极端自然灾害下城市电力系统韧性提升的内涵进行了概述, 明确了城市电力系统应对极端自然灾害的过程。其次, 结合极端自然灾害下城市电力系统韧性建设面临的挑战, 从“信息-物理-应用”3个维度剖析了系统韧性提升的关键要素。在此基础上, 构建了极端自然灾害下城市电力系统韧性提升框架, 从数智感知-场景构建-响应评估-应急恢复4个角度, 剖析了城市电力系统韧性提升的4种关键技术; 最后, 针对极端自然灾害下城市电力系统韧性提升提出发展建议: 加强顶层规划和统筹设计, 智慧化升级电力基础设施; 攻克核心问题和关键技术, 推进技术成果落地应用; 健全标准化技术文件, 建立统一设备配置原则; 推进多元主体协同共治, 建立高效应急协同机制。

关键词: 自然灾害; 城市电力系统; 韧性提升框架; 城市安全

中图分类号: X43; TM71 **文献标识码:** A

Framework and Strategy for Enhancing Resilience of China's Urban Power Systems under Extreme Natural Disasters

Xu Xuesong^{1,2*}, Tang Jiale^{1,2}, Zeng Ziyang¹, Xu Kai¹, Jiang Hongtao¹, He Yuanxing¹

(1. College of Interdisciplinary Studies, Hunan University of Technology and Business, Changsha 410205, China;

2. Xiangjiang Laboratory, Changsha 410205, China)

Abstract: The urban power system is a critical infrastructure that is essential for urban safety. The frequent occurrence of extreme natural disasters characterized by a low probability and high losses severely threatens the continuity of urban power supply and the overall safety of cities. Resilience is the capability of a system to withstand disturbances and rapidly return to normal operating conditions. Therefore, enhancing the resilience of urban power systems is crucial in the face of extreme natural disasters. This study provides an overview of the implications of enhancing resilience in urban power systems under extreme natural disasters, clarifying the processes by which urban power systems respond to extreme natural disasters. Subsequently, in conjunction with the challenges faced by the resilience construction of urban power systems under extreme natural disasters, key developmental elements for resilience improvement are analyzed from the information, physical, and application dimensions. Based on this, a framework for

收稿日期: 2024-01-17; **修回日期:** 2024-03-20

通讯作者: *徐雪松, 湖南工商大学前沿交叉学院教授, 研究方向为智慧社会、韧性能源; E-mail: xuxs@hutb.edu.cn

资助项目: 国家自然科学基金项目 (72091515, 71991465); 教育部人文社科基金项目 (22YJAZH122)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

enhancing the resilience of urban power systems under extreme natural disasters is established. From the perspectives of data-driven sensing, scenario construction, response assessment, and emergency recovery, the framework dissects four critical technologies for improving the resilience of urban power systems. Furthermore, the following recommendations are proposed: (1) strengthening top-level planning and coordinated design to upgrade power infrastructure through smart initiatives; (2) overcoming core issues and critical technologies and promoting the practical application of technological achievements; (3) enhancing standardized technical documents and establishing unified equipment configuration principles; (4) advancing collaborative governance among diverse entities to establish an efficient emergency coordination mechanism.

Keywords: natural disasters; urban power systems; resilience enhancement framework; urban safety

一、前言

随着城市化进程加快,城市基础设施的规模和重要性不断上升。基础设施是保障城市安全运行的重要基础,韧性建设是提升城市基础设施安全水平的关键^[1,2]。美国、欧盟等多个国家和地区将强化基础设施韧性提升至国家战略高度^[3,4]。党的二十大报告明确指出:加强城市基础设施建设,打造宜居、韧性、智慧城市。作为城市基础设施体系的重要组成部分,城市电力系统不仅是保障居民生活和工业生产的重要基石,同时也是其他关键基础设施正常运行的主要推动力^[5]。城市电力系统的关键性地位日益凸显,但随着全球气候变暖的日益加剧,各种极端自然灾害如暴雨、台风、冰灾等频繁发生。自然灾害带来的强大破坏,严重威胁着城市电力系统的稳定运行。2008年,我国南方雪灾导致3670条电力线路和1700多座变电站停运^[6]。2011年3月11日,日本突发9.0级特大地震并引发海啸,导致日本多个地区大规模停电,造成的损失超过10 000 MW的电力负荷,还造成了严重的核泄漏事件^[7]。2019年,超强台风“利奇马”登陆浙江省温岭市,导致759.17万用户遭受电力中断^[8]。2021年,河南遭受特大暴雨,导致800多条配电线路受损,近百万用户受到影响^[9]。2022年9月18日,美国海外属地波多黎各因飓风“菲奥娜”的侵袭而遭遇全岛性停电,影响了超过146.8万的用户^[10]。这些极端自然灾害事件破坏速度快、蔓延范围广、恢复时间长,进一步导致交通、通信、供水、医疗等城市生命线系统功能失效,严重威胁城市公共安全,凸显了城市电力系统面临的自然灾害风险及减轻其对社会造成影响的紧迫性。

在此背景之下,政府部门、学术界与工业界共同提出了电力系统“韧性”概念^[11-13],电力系统韧性通常是指系统抵御极端事件破坏,吸收、适应并于事后快速恢复的能力。目前,国内外围绕极端自然灾害下的电力系统韧性建模、韧性评估、韧性技

术等方向开展了初步研究,并从不同方面开展电网实践。美国在智能电网发展中首次提出电力系统韧性概念,并通过深化相关政策不断加强这一理念^[14]。为提升韧性,其通过建立综合考虑气象事件和设备故障等多因素的风险评估模型,详细分析不同风险因素对系统的影响,制定相应的风险管理措施,以全面应对各类挑战。英国专注于提升电网在自然灾害面前的韧性,并根据不同地域的特定灾害类型进行定制化研究^[15]。欧盟关注电力系统对长期变化的适应性,如气候变化的影响^[16]。日本自然灾害多发,传统政策侧重灾害预防,近年研究重点转移至建设微电网示范工程以保障灾害中用户供电,从而增强电网灾害抵御力、灾后响应能力和恢复力^[17]。我国各地的电网公司以及地方政府也在韧性电网建设方面展开实质性工作。国网浙江省电力有限公司提出了多元融合高弹性电网概念,并在其特定示范区域实施资源集成调度策略,以应对来自电力系统外部的变化^[18]。国网上海市电力公司强调韧性电网的6个关键特征,并从这6个方面开展技术攻关和电网建设实践^[19]。中国南方电网有限责任公司为保障城市核心区域及关键用户的电力供应,在深圳等主要城市采用差异化策略,投资建设基础电网设施^[20]。北京市怀柔区、四川省雅安市通过引入各种可再生能源技术和智能微电网控制策略,实现了可再生能源的高效利用和管理,提高了电网的韧性和安全性^[21]。面对极端自然灾害的冲击和扰动,提升电力系统韧性已成为国内外关注的重点和现实需求。但就已有文献来看,针对极端自然灾害下城市电力系统韧性提升以及发展策略的研究仍然较少。各国对研究的关注角度存在差异,但在韧性提升方面,都追求实现全过程目标,包括抵御、适应和恢复;主要采用战略规划、功能整合、韧性评估和技术创新等方法,为城市电力系统的韧性提升提供多方面的启示。

本文结合极端自然灾害下我国城市电力系统建

设面临的新形势及国内外研究经验，对极端自然灾害下城市电力系统韧性提升的内涵进行了概述；从“物理-信息-应用”三个维度剖析极端自然灾害下城市电力系统韧性提升的关键要素；在此基础上，提出城市电力系统韧性提升框架，总结城市电力系统韧性提升的4种关键技术；最后，针对极端自然灾害下城市电力系统韧性提升提出发展建议，以期为城市电力系统韧性提升建设研究提供参考。

二、极端自然灾害下城市电力系统韧性提升的内涵及关键要素

(一) 极端自然灾害下城市电力系统韧性提升的内涵

韧性最早由生态学家C.S.Holling提出，用于衡量生态系统可持续性、吸收变化和扰动后维持种群关系的能力^[22]。系统受灾后回弹到原始状态，是系统演变的动态揭示。2010年，Martin引用了复杂适应系统理论，提出了“演化韧性”的概念，这一概念可被解释为系统在遭受极端事件时的抗干扰、维持正常运行以及快速恢复的能力。城市电力系统韧性提升是指采取一定措施和策略，以增强城市电力系统抵御外部扰动、应对紧急事件并迅速恢复正常运行的能力。这是一个全过程的概念，涉及从理论到实践的多个层面，涵盖感知、应变、防御、恢复、协同以及学习力6种关键特征，并要求系统感知潜

在风险，协同内外资源应对扰动，以及从经验中学习优化，最大程度地减小对电力系统正常运行的影响，从而确保城市电力供应的连续性和安全性。

城市电力系统应对极端自然灾害事件的过程可划分为三个主要阶段，即预防准备、应急响应和迅速恢复（见图1）。在未经过韧性提升的城市电力系统中（见图1黑线），扰动抵抗能力相对较差，极端灾害事件会导致系统功能急剧下降，表现为调控能力大幅减弱、电网广泛中断以及基础设施感知能力丧失等^[11]。相反，一个具备韧性的城市电力系统（见图1红线）应当具备迅速而准确的系统受损评估和失效范围推演能力，并能够协同多种应急管控策略，促使城市电力系统更迅速地地从受损状态中恢复正常功能^[13]。此外，应能通过自我调节机制更好地适应外部事件的冲击和扰动，提高系统的安全稳定性，实现城市电力系统的可持续发展。

(二) 极端自然灾害下城市电力系统韧性提升的关键要素

城市电力系统是一个信息物理多维度耦合的复杂系统，其通过物理网和信息网将多源信息和多种设备进行整合，融合多种关键技术，从而满足城市多元化的用电需求^[23]。极端自然灾害给城市电力系统带来了严峻挑战，凸显了其对“小概率-高损失”事件的应对能力不足等问题^[24-26]。随着我国“双碳”

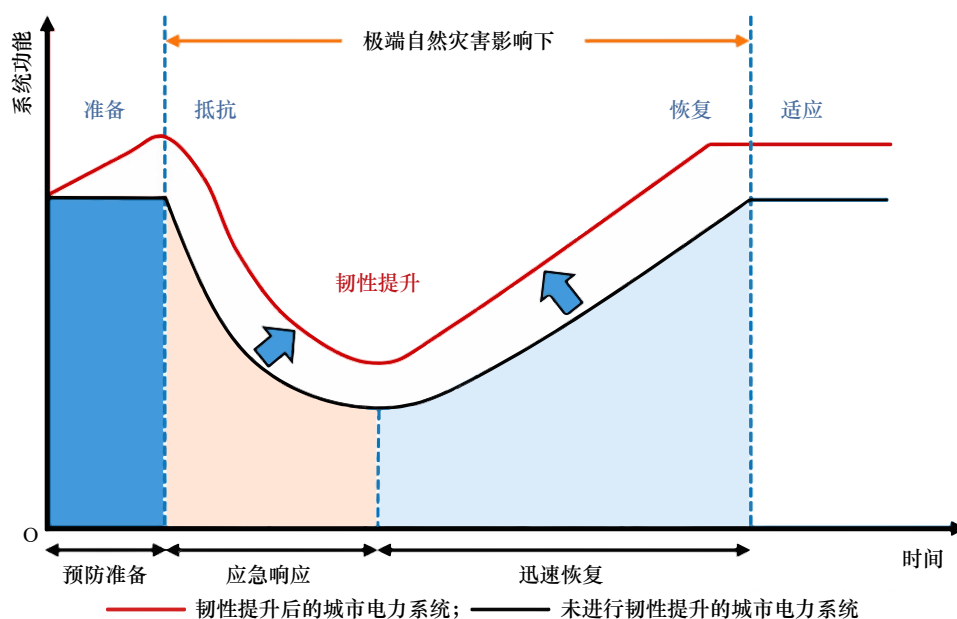


图1 韧性城市电力系统概念图

目标的提出,未来新型城市电力系统呈现高比例可再生能源、高比例电力电子设备的“双高”特征,面临系统主体多元化、不确定性波动加剧,系统结构复杂化、时空特性不均衡,系统功能数智化、建设规划难度大等新挑战^[27-29]。厘清不确定因素,准确构建不确定情况下的模型,是提高城市电力系统抗灾能力的关键。为此,结合韧性提升的内涵,客观分析极端自然灾害下我国现阶段城市电力系统面临的韧性建设现状,从信息、物理、应用三个维度对城市电力系统韧性提升关键要素进行凝练阐述。

1. 信息维度

电力系统信息层的主要功能是实现系统的态势感知和信息传递,相当于电力系统的“感知器官”和“神经传导系统”,决定了电力系统运行控制决策的实施^[30]。极端自然灾害下大量的物理设备与通信设备受到直接或者间接的损坏,正常的电力供给无法保障,通信传输质量、状态感知能力断崖式下降,系统自身以及相关部门难以及时精准定位灾害的具体影响区域,无法采取特定的应对措施,极大地延迟了受灾后电力系统的故障检测、定位,难以应对自然灾害对电力系统的冲击。此外,现有电力系统在灾情预测预警、多源监测、科学决策等数据融合方面有壁垒,存在“数据孤岛”现象,造成应急决策缺乏支撑数据;缺乏专有模型对数据进行针对性的整合和分析。提高海量电力数据质量、挖掘数据价值是各种韧性提升策略应用发展的关键基础。因此,为保障城市电力系统在极端自然灾害环境下的稳定运行,提升城市电力系统全景状态感知、数据可靠传输和信息分析处理能力,实现系统内源-网-荷-储各环节状态量的实时测量和快速分析,有效辨识城市电力系统在不同时间和空间尺度下极端自然灾害中的故障时间和具体位置,分析不同自然灾害与电力系统之间的相互作用机制,提前构建预警模型有效识别电力系统潜在风险是城市电力系统韧性提升的关键。

2. 物理维度

城市电力系统通常由输电线路、变电站、配电网、充电桩等组成。这些组件极易受到极端自然灾害事件的影响,加上系统基础设施相对陈旧,使得城市电力系统应对灾害冲击的工作难度大、防备能力欠缺,无法及时感知设备状态、故障或受损情况,导致电力系统的不稳定。此外,新型城市电力

系统的强不确定性、波动性会导致电力设备承受更加极端、变化剧烈的运行工况,进而导致绝缘材料加速老化、关键设备过热,甚至缩短关键设备寿命^[31]。极端自然灾害下大量电力电子装置存在失效问题,系统不可控波动性加大且无法匹配负荷变化,严重影响系统持续供电。且现有传统机理建模与仿真过程中存在一定的条件假设和边界简化,一些电力电子装置建模机理不够完善,容易造成仿真计算偏差,导致难以快速检测设备潜在问题或异常情况,不能实现对发生的故障或灾害进行全面的复盘分析。因此,选择高质量设备增强其可靠性,完善电力电子装置建模机理,创新智能电网技术对系统设备故障进行诊断、评估、识别维持系统韧性所必需的关键元件,指导系统网架结构建设、电力网络的韧性设计是城市电力系统韧性提升的关键。

3. 应用维度

极端自然灾害通常具有突发性,往往在短时间内发生,无法提前准确预测且影响范围通常很广泛^[24]。不同类型的自然灾害间存在复杂的触发、伴随、耦合、级联等效应。在灾害发生的不同阶段,各子系统的运行状态呈现出复杂的耦合关系。为构建一系列合理的灾害-系统运行场景并进行综合分析,有必要揭示自然灾害下不同子系统之间的动态相互作用机制^[32]。极端自然灾害的不确定性使得电力系统的场景更加复杂多变,现有评估机制中缺乏描述安全运行形态的量化评估指标体系以及统一的“正常-故障-恢复”运行状态迁移仿真模型。同时对极端自然灾害下城市电力系统中的随机性和复杂响应的定量描述仍然不足,不能充分反映新型电力系统不同运行与控制场景的核心特征。在实际城市电力系统应用中,不同自然灾害对城市电力系统的影响均存在明显差异,韧性提升措施的制定最终需要以韧性评估结果为依据^[19]。因此,在人工智能技术与设备制造工艺突飞猛进的大背景下,通过数字技术,以数据作为核心生产要素,打通系统源-网-荷-储各环节信息,构建韧性指标体系,实现对城市电力系统极端自然灾害下以及未来运行场景下物理实体对象的特征和性能等进行描述和建模,实现物理实体在虚拟灾害故障场景的完整映射;初始故障场景,在虚拟灾害故障场景空间中开展时空变换,实现对系统未来态势的演化及预测,模拟系统应对过程并将极端自然灾害下异常结果输入智能

体进行分析，计算分析得出解决方案反馈，分析韧性提升路径，实现系统性能评估，识别潜在的问题或系统弱点。优化系统运行空间，整合可再生能源实现多样化电源配置，更新调整现有韧性措施，完善评估指标体系，加快灾后系统恢复，提高系统整体的可靠性和应变能力是城市电力系统韧性提升的关键。

三、极端自然灾害下城市电力系统韧性提升框架构建

极端自然灾害下城市电力系统韧性提升是一个循环迭代的过程，需要在实践中进行韧性感知，开展包括正常情况和极端灾害条件在内的多情景分析，持续监控和评估新的潜在风险，不断验证技术

和模型的有效性；通过动态适应和改进，根据事后评估结果对城市电力系统韧性体系（常态预警-灾前防御-灾中应对-灾后修复-事后评估）进行调整和优化，确保城市电力系统能够持续应对未来可能出现的极端自然灾害。为此，基于韧性提升的内涵与国内外电力系统韧性研究理论框架和方法经验，结合极端自然灾害下城市电力韧性提升的关键要素，构建了极端自然灾害下城市电力系统韧性提升框架，相应提升框架主要分为6个层级（见图2）。

（一）韧性感知层

结合智慧电力系统建设，通过融合深度学习神经网络和片上传输、计算、存储一体化的新型感知设备以及5G、窄带物联网（NB-IoT）等先进无线数据传输技术全面对源-网-荷-储的各环节进行监测，

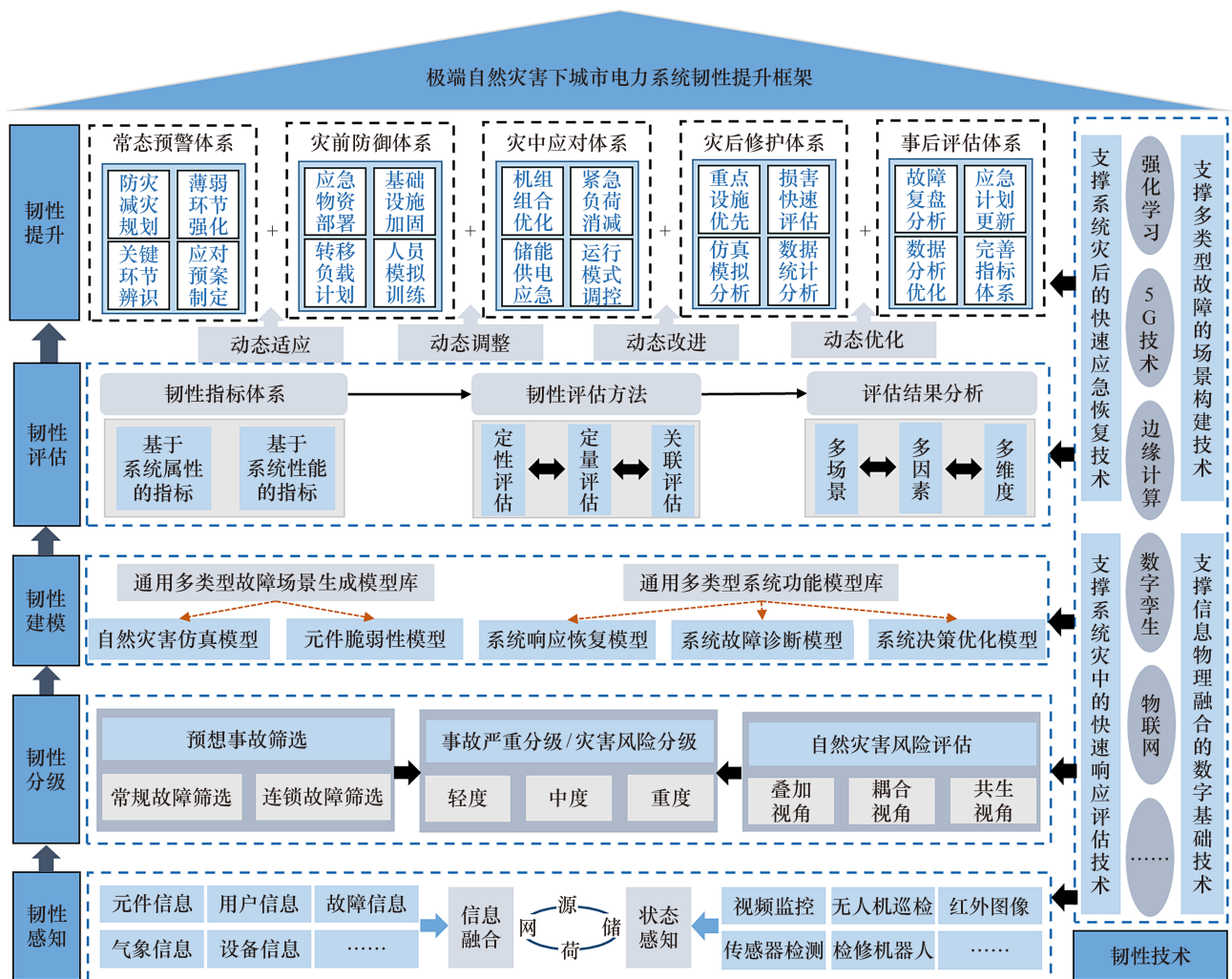


图2 极端自然灾害下城市电力系统韧性提升框架
注：5G表示第五代移动通信。

实时获取电力设备、气象灾害、设备元件等动态数据。通过机理模型和机器学习融合驱动的设备缺陷智能诊断^[33]、声学影像数据的人工智能分析等技术^[34]分析多源化信息以及设备状态感知结果,实现对系统潜在灾害风险快速感知并迅速反馈给系统做出响应,为后续韧性分级、建模、评估提供数据基础。

(二) 韧性分级层

基于韧性感知层获取的故障信息、设备信息等数据,通过随机向量函数神经网络和量子启发多目标进化等算法^[35]、极端天气条件下基于影响增量的方法^[36]对系统中大量N-k故障(常规故障、连锁故障)状态的影响进行快速分析和筛选,按照其严重性分为不同级别,确定故障处理的紧急程度和优先级^[37]。基于气象信息、故障信息等数据,根据情况选择适用视角(叠加视角、耦合视角、共生视角)对自然灾害进行多灾因子风险评估^[38],按照其对系统影响程度进行分级,结合相关致灾因子的幅度及时空变化规律,形成特定灾害-电力系统交互机理,提高后续建立韧性模型的通用性和针对性。

(三) 韧性建模层

基于韧性分级层的事态严重等级、自然灾害风险等级以及韧性感知层获取的数据,利用强化学习、数字孪生等数字技术,通过灾害数据模拟^[39]、灾害模型推演^[40]建立自然灾害仿真模型。通过对不同场景下元件物理实体对象的特征、行为、演进过程和性能等进行描述,建立元件脆弱性模型。计算极端自然灾害发生的概率并分析其在不同时间和空间尺度下变化规律,建立城市电力系统元件的脆弱性曲线,确定元件故障概率与灾害因子强度之间的函数关系,最后将自然灾害模型与元件脆弱性模型结合,生成针对极端自然灾害情况下城市电力系统可能出现的各类故障场景的模型库。

系统通用多类型模型库主要包括系统响应恢复模型、系统故障诊断模型、系统决策优化模型。系统响应恢复模型用于分析极端自然灾害事件和控制措施作用下的系统结构或状态变化,分析运行控制、应急抢修等措施作用下系统的恢复过程;例如,频率响应模型^[41]、需求侧响应模型^[42]、多资源协同恢复模型等对保障极端自然灾害下电力系统安全运行具有重要作用。系统故障诊断模型是基于机

器学习和数据分析技术的工具^[43],通过收集系统运行时的数据并提取关键特征,构建训练模型,例如,基于混合量子计算的电力系统故障诊断深度学习框架模型,来准确预测系统是否正常^[44],包括数据标记、模型选择、训练评估等步骤;将训练好的模型部署到实际城市电力系统,实时监测系统状态并进行故障诊断,持续优化模型以适应极端自然灾害下系统变化。系统决策优化模型是通过数学建模和深度强化学习优化算法,从数据驱动角度解决复杂的电力系统控制问题^[45],以维持电力系统的稳定性;通过机器学习和统计信息分析传感器软硬件生产批次间的可靠性差异,实现设计参数的自适应优化,逆向修改设计方案,确定最佳传感器的结构和布局^[46]。协同多能源以提高城市电力系统抵御极端天气事件的能力,并尽可能多地恢复重要负荷,实现城市电力系统的最佳运营^[47]。通用多类型故障场景生成模型库以及建立多类型通用模型库,可为后续城市电力系统的韧性评估以及提升提供支撑。

(四) 韧性评估层

基于系统属性或者性能,结合不同极端自然灾害的破坏特点,建立包含恢复速度、供应可靠性、灾后重建能力等关键性指标的韧性指标体系^[48]。通过使用韧性建模层中所构建的多类型故障场景模型库,模拟不同故障场景下的系统通用多类型模型库中系统响应恢复模型、故障诊断模型、决策优化模型的应对表现,定量地衡量和比较实际表现与预期目标之间的差异。从多维度对评估结果进行分析量化评分,客观反映电力系统在面对极端自然灾害条件下的短板,对于评分未达标的环节应重点攻坚,形成韧性提升方案,指导后续城市电力系统建设,提升系统韧性。例如,美国桑迪亚国家实验室和洛斯阿拉莫斯国家实验室针对新奥尔良市的飓风灾害场景,对其电网韧性进行评估,根据评估结果制定了增设备用电源、实施电网局部冷启动策略、建立微型电网系统3种提升措施^[49]。

(五) 韧性提升层

根据韧性评估层形成的韧性提升方案,结合通用多类型系统功能模型库中的系统决策优化模型,对常态预警体系、灾前防御体系、灾中应对体系、灾后修复体系、事后评估体系实施针对性的调整、

改进、优化策略，确保系统在未来极端灾害前展现更强韧性。例如，加强基础设施建设以提高对极端天气或物理攻击的抵抗力；实施资源的灵活调度，确保在需求激增或供给短缺时能够快速平衡负荷；优化应急管理体系，提高快速反应和灾后恢复的效率；开展故障复盘分析，进一步查明系统薄弱环节，进行设备升级和改造。有效调整不同机组或设备的组合方式或供电结构，以最大程度地提高系统韧性。

（六）韧性技术层

运用5G技术、强化学习、边缘计算、物联网、数字孪生等前沿技术支撑整体提升框架中模型-数据-认知的深度融合，实现信息与物理系统的集成（支撑信息物理融合的数字基础技术），生成详尽的故障场景以改进韧性提升措施（支撑多类型故障的场景构建技术），迅速评估灾害事件的规模和影响（支撑系统灾中的快速响应评估技术）并确保在灾害发生后系统能够迅速进行应急响应和恢复（支撑系统灾后的快速应急恢复技术）。通过韧性技术的综合应用，全面提升极端自然灾害下城市电力系统在物理和数字层面上的韧性。

四、极端自然灾害下城市电力系统韧性提升关键技术

随着新型电力系统数字化转型的不断推进，能源产业与数字技术融合，是能源电力高质量发展的必然要求。城市电力系统与外部环境系统深度耦合，极端自然灾害下城市电力系统运行受气象等因素影响增多，系统安全风险防控的场景更多、要求更高、难度更大。城市电力系统与其他城市基础设施之间的耦合关系越来越复杂，电力系统一旦发生大范围停电事故，将连锁产生诸多次生和衍生灾害。极端自然灾害下城市电力系统韧性提升过程中需感知潜在风险，协同内外资源应对扰动，以及从经验中学习优化，最大程度地减小对电力系统正常运行的影响。为此，针对所提的城市韧性提升框架，围绕极端自然灾害下城市电力韧性提升的关键要素，从数智感知、场景构建、响应评估、应急恢复四个角度，提出以下极端自然灾害下提升城市电力系统韧性的关键技术以及建设案例，为后续框架落地做好支撑，为理论研究提供实证。

（一）支撑信息物理融合的数字基础技术

城市电力系统具有分布式、联结式、开放性的特征，极端自然灾害下城市电力系统需灵活迅速地调整电力分配、设备运行来应对突发情况，需要对灾情预测预警、多源监测、科学决策。为此，需聚焦智能感知与传感技术、通信网络规划与管理技术、数据质量提升与关联挖掘技术，实现电力智能设备信息的快速、广泛、准确采集，通过信息交互，融合决策优化模型，实现不同区域的优化控制。因此，可以韧性理论、数字基础技术为支撑，围绕“综合接入、一体承载、平台贯通、智能联动”的架构建设理念。从极端自然灾害下城市电力系统面临的 N 种风险出发，构建一体化城市电力系统风险管控中心（见图3），贯通设备物联、数据治理、应用集成、人工智能、数字孪生、优化调度、组织协同、音视频8个平台，建立安全可靠、承载能力强的数据智慧感知协同网，支撑 N 个应用场景韧性感知层的设施信息交互，以应用层信息进行对内、对外的反馈、交互，实现城市电力关键基础设施协同、灾害精准预警、系统故障预警等功能。

（二）支撑多类型故障的场景构建技术

极端自然灾害事件的发生，导致城市电力系统面临更高的故障风险，包括设备受损、电缆破坏等。随着新能源接入比例和电力电子装置应用比例的不断增加，电力网络规模持续扩大，导致电网运行方式更加复杂多变，这使得安全隐患变得更加隐蔽，同时也给调度运行、故障处置带来了巨大的压力。为适应这种变化，开展巨灾情景构建与分析，发现韧性体系中的结构性缺陷，有助于我们理解极端自然灾害事件下故障在多主体间耦联传播的机理，探索协同应灾策略。因此，可构建通用模型，量化区域风险因素（如地理、天气和气候变量），以便更好地量化自然灾害带来的灾难性损失的频率和严重性。结合极端自然灾害下城市电力系统复杂运行条件下的电力设备故障产生机理、特定灾害-电力系统交互机理以及演变规律，将人工智能技术与电力设备数字孪生建模仿真相结合，通过仿真、推演、数据分析等手段，精准描述电力设备的内部运行规律和外部运行特性，实现设备内部健康状态精准分析和故障智能诊断预测，支持新型电力系统环境下设备的精益化管理和高效维护。此外，可基

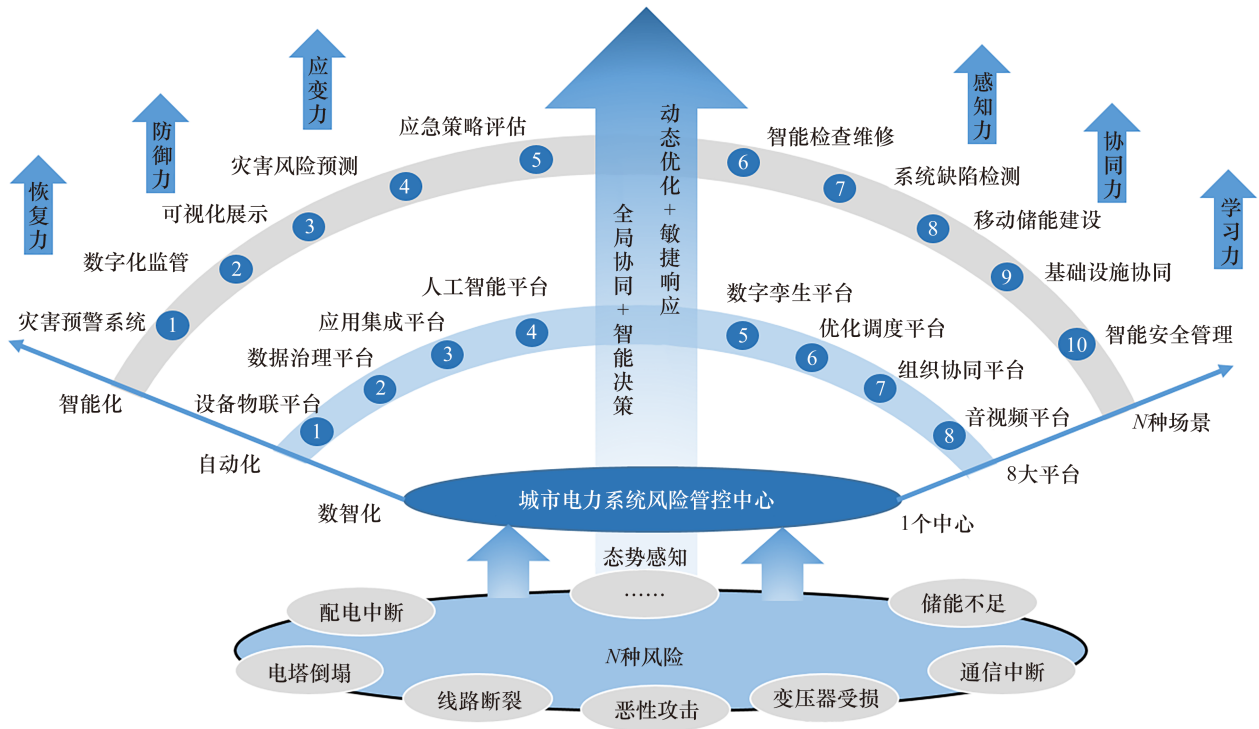


图3 一体化城市电力系统风险管控中心

于实际设备的物理特性和运行参数，采用数字孪生建模仿真技术，创建包括发电机、变电站和输电线路的虚拟模型。通过实时监测与数据同步，在虚拟环境中模拟多种故障场景，如电力线路中断、设备故障等，使决策者能够在虚拟环境中评估系统对不同故障的响应，识别潜在问题和薄弱环节。通过仿真不同的运行策略和调度方案，优化电力系统的运行效率和可靠性，预测不同类型故障情况下的系统性能。

(三) 支撑系统灾中的快速响应评估技术

极端自然灾害具有突发性，往往在短时间内发生，如飓风、地震等。其具体的发生时间和强度难以预测，且不同类型的自然灾害间存在复杂的触发、耦合等效应，可能导致城市电力系统的不可预测性加大，进一步增加了城市电网运行的不确定性。为提升在不确定环境中城市电力系统韧性，减少城市停电事故的发生，需从极端自然灾害下的系统运行状态、运行规律、运行性能等角度，准确评估系统的可靠性水平，减轻极端自然灾害对系统带来的潜在冲击。因此，可构建无人机巡检缺陷智能识别体系，开发能够高效处理大量实时数据的算

法，以从传感器和监测设备中迅速获取关键信息。利用机器学习算法，对实时数据进行分析，预测自然灾害后系统可能面临的挑战和问题。利用数字孪生技术建立城市电力系统的虚拟模型，以模拟自然灾害引起的各种场景，制定实时评估工具，通过使用无人机智能勘灾技术快速勘测灾中情况，实现勘灾现场信息回传至虚拟模型，结合实时数据和自然灾害模型，对城市电力系统的响应进行迅速评估，最大程度减轻极端自然灾害对城市电力系统的影响。

(四) 支撑系统灾后的快速应急恢复技术

在极端自然灾害冲击后，城市电力系统往往是受影响最为显著的基础设施之一，电力系统的受损会对城市的正常运行和居民生活造成严重影响。发生大停电事故后，电力系统恢复过程可分为3个阶段，即黑启动阶段、网架重构阶段以及负荷恢复阶段^[50]。黑启动和网络重构旨在提高电力系统的短期恢复能力，而负荷恢复则旨在提高系统的长期恢复能力。黑启动阶段与网架重构阶段，可基于一体化城市电力系统风险管控平台，在线辨识电网运行状态及获取应急恢复所需的数据信息，建立路径生成

及系统恢复辅助决策系统平台，通过整合各种数据源和算法优化机组的启动次序，实现“机组分层、电网分区、多目标协调”的并行恢复。在黑启动的后期阶段，可利用地理信息系统技术在灾后对城市电力系统进行空间数据分析，迅速获取受灾区域的电力设施状况、受损程度和修复优先级。依靠分布式电源进行网络重构，重新调整网络拓扑结构，利用启发式算法、数学编程算法和人工智能算法将网络重建转化为混合整数编程问题，从而获得最优解和故障恢复策略。当系统发生严重故障时，上级电源的直接路径和传输路径都可能被切断，出现多个“孤岛”。为此，需要合理布局资源，加强局部电网和微电网的建设。例如，分布式电源与微电网的融合可以大大提高系统的灵活性，为终端负荷提供有力支持，确保负荷的可靠供电；将移动应急发电机放置在预定位置，以维持重要负载的电力供应。

五、极端自然灾害下城市电力系统韧性提升的发展建议

随着我国城市建设逐渐向智慧化和韧性化发展，各类城市基础设施将进一步向综合立体、结构清晰、安全可控、灵活高效方向发展。城市电力系统作为城市基础设施体系的关键组成部分，必将要具备足够的智慧韧性，在面对极端自然灾害事件时，具有强大的抗干扰能力，以确保系统能够保持正常运行并快速恢复，维持城市电力供应，支撑城市基础设施运行。因此结合本研究，将韧性提升理论纳入城市电力系统的规划、设计、建设和管控中，对极端自然灾害下我国城市电力系统韧性提升以及建设做出如下发展建议。

（一）加强顶层规划和统筹设计，智慧化升级电力基础设施

在国家层面制定指导性纲领文件，加强对城市电力新基建重点任务的统筹考虑和顶层设计。合理规划城市电力基础设施的位置、容量、分布，考虑未来的城市扩展需求，以最大程度地优化电力资源利用，提高城市电力系统的可靠性和灵活性。同时，有序推进重要城市和多灾地区的电力基础设施的抗灾防灾建设，推动智能储能系统、智能用电管理和故障预测等手段的应用。通过利用人工智能、

大数据分析、数字孪生等数字化技术，逐步实现城市电力基础设施建设数字化、监测感知网络化，系统评估准确化、运营智能化和管理效率化，确保电力基础设施系统实现整体优化、协同融合和全面升级，从而逐步实现城市电力系统常态情景下的长久安全和极端自然灾害情景下的自主可控。

（二）攻克核心问题和关键技术，推进技术成果落地应用

针对极端自然灾害，通过技术、设备、数智、组织等多元赋能，实现面向城市电力系统抵御自然灾害的技术及其装备攻关与自主创新。实现城市电力系统管理模式向灾前预警防控、灾中应急管理、灾后抢修决策转变。坚持通过政策引导，推动城市电力系统韧性提升相关技术的落地，选取我国典型城市作为技术落地示范载体，结合特定极端自然灾害事件下的实际场景，在城市电力系统各环节深入开展分析，通过相关指标评估韧性提升关键技术的实际性能，采用分阶段的方式，逐步验证技术的可行性，提升统一标准规范下不同城市的韧性能力。同时，与有关部门以及供电公司建立经验共享机制与风险共担机制，在实际应用中发挥技术最大价值，为后续城市电力系统韧性建设规划制定提供参考。

（三）健全标准化技术文件，建立统一设备配置原则

不同类型的极端自然灾害事件具有不同的破坏程度和影响维度，当前城市电力系统应对、防控、协同、抢修措施和应急方案存在关联性不强、适用性不够、应用性不足等问题，且缺乏统一的韧性评估标准。未来需借鉴国际上已有的韧性标准和最佳实践，加快完善城市电力系统韧性提升的通用标准，将韧性标准融入城市规划编制与实践，结合城市各地区环境设施现状与电力管控系统的功能建设需求，拟定环境监测和电力基础设施设备的基本型、标准型、智能型等三类现场设备配置建设标准，鼓励企业和城市采用符合韧性标准的技术和实践，消除杂乱的设备部署，减少重复的建设投资，确保海量现场数据的质量，提高极端自然灾害仿真模型、故障场景模型与抵御自然灾害的技术及其装备的适用性和通用性。

(四) 推进多元主体协同共治, 建立高效应急协同机制

建立多元主体的合作平台, 明确各主体在应急响应中的责任和角色, 共同制定和实施灾害管理防控计划, 提高城市电力系统抵御极端自然灾害的能力。建立和健全信息共享机制, 确保各主体之间能够及时、准确地获取有关自然灾害信息, 建立跨地区、跨部门的联合监测预警机制, 完善自然灾害预警互通机制, 实现应急场景联防联控。拓展多种能源系统间的互补互济空间, 统筹源-网-荷-储多环节资源, 分析能源系统间的耦合关系, 设计协同防御机制, 发挥各自长处、补足相应短板。加强城市电力系统维修人员的有效协调, 统筹各类调节资源建设, 因地制宜推动各类储能科学配置, 形成多时间尺度、多应用场景的电力调节与稳定控制能力等措施, 减小系统故障停电范围, 增强极端自然灾害下城市电力系统的恢复能力。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: January 17, 2024; **Revised date:** March 20, 2024

Corresponding author: Xu Xuesong is a professor from College of Interdisciplinary Studies, Hunan University of Technology and Business. His major research fields include smart society and resilient energy. E-mail: xuxs@hutb.edu.cn

Funding project: National Natural Science Fund Project (72091515, 71991465); Ministry of Education Humanities and Social Science Fund Project (22YJAZH122)

参考文献

- [1] 毕玮, 汤育春, 冒婷婷, 等. 城市基础设施系统韧性管理综述 [J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(6): 14-28.
Bi W, Tang Y C, Mao T T, et al. Review on resilience management of urban infrastructure system [J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(6): 14-28.
- [2] 周姝天. 城市基础设施系统韧性提升策略初探 [J]. 城市与减灾, 2022, (5): 39-43.
Zhou S T. Preliminary study on strategies to improve resilience of urban infrastructure system [J]. City and Disaster Reduction, 2022, (5): 39-43.
- [3] Homeland Security Blog Team. Presidential policy directive (PPD)-8 national preparedness [R]. Washington DC: U. S. Department of Homeland Security, 2011.
- [4] European Commission. A framework strategy for a resilient energy union with a forward-looking climate change policy [R]. Brussels: European Commission, 2015.
- [5] 龚立, 王先培, 田猛, 等. 电力信息物理系统韧性的概念与提升策略研究进展 [J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(14): 169-187.
- [6] Gong L, Wang X P, Tian M, et al. Concepts and research progress on enhancement strategies for cyber physical power system resilience [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(14): 169-187.
- [6] 郭伟, 安佳坤, 贺春光, 等. 计及冰灾影响的电力系统韧性评估与提升方法 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(8): 116-122.
Guo W, An J K, He C G, et al. Resilience assessment and improvement method for power system considering the influences of ice disaster [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(8): 116-122.
- [7] 符杨, 顾吉平, 田书欣, 等. 基于地震灾害场景的主动配电网多维韧性评估方法 [J]. 电力自动化设备, 2023, 43(3): 1-11.
Fu Y, Gu J P, Tian S X, et al. Multidimensional resilience evaluation method of active distribution network based on earthquake disaster scene [J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(3): 1-11.
- [8] 张鑫, 王楠, 王伟, 等. 考虑台风天气的电力系统韧性评估 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(8): 21-26.
Zhang X, Wang N, Wang W, et al. Resilience assessment on power system under typhoon [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(8): 21-26.
- [9] 何秉顺. 河南郑州山区 4 市 2021 年“7·20”特大暴雨灾害调查的思考与建议 [J]. 中国防汛抗旱, 2022, 32(3): 37-40, 51.
He B S. Thoughts and suggestions on the investigation of “July 20” torrential rain disaster in four cities in Zhengzhou Mountain Area of Henan Province in 2021 [J]. China Flood & Drought Management, 2022, 32(3): 37-40, 51.
- [10] 孙为民, 孙华东, 何剑, 等. 面向严重自然灾害的电力系统韧性评估技术综述 [J]. 电网技术, 2024, 48(1): 129-139.
Sun W M, Sun H D, He J, et al. Review of power system resilience assessment techniques for severe natural disasters [J]. Power System Technology, 2024, 48(1): 129-139.
- [11] 别朝红, 林超凡, 李更丰, 等. 能源转型下弹性电力系统的发展与展望 [J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(9): 2735-2745.
Bie Z H, Lin C F, Li G F, et al. Development and prospect of resilient power system in the context of energy transition [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9): 2735-2745.
- [12] 陈磊, 邓欣怡, 陈红坤, 等. 电力系统韧性评估与提升研究综述 [J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(13): 11-22.
Chen L, Deng X Y, Chen H K, et al. Review of the assessment and improvement of power system resilience [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(13): 11-22.
- [13] Wender B A, Morgan M G, Holmes K J. Enhancing the resilience of electricity systems [J]. Engineering, 2017, 3(5): 580-582.
- [14] National Academies of Sciences, Engineering and Medicine, Division on Engineering and Physical Sciences, Board on Energy and Environmental Systems, etc. Enhancing the resilience of the nation’s electricity system [M]. Washington D C: National Academies Press, 2017.
- [15] Mishra D K, Eskandari M, Abbasi M H, et al. A detailed review of power system resilience enhancement pillars [J]. Electric Power Systems Research, 2024, 230: 110223.
- [16] Fulli G. Electricity security: Models and methods for supporting the policy decision making in the European union [D]. Turin: Polytechnic University of Turin (Doctoral dissertation), 2016.

- [17] Marnay C, Aki H, Hirose K, et al. Japan's pivot to resilience: How two microgrids fared after the 2011 earthquake [J]. *IEEE Power and Energy Magazine*, 2015, 13(3): 44–57.
- [18] 尹积军, 夏清. 能源互联网形态下多元融合高弹性电网的概念设计与探索 [J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(2): 486–497.
Yin J J, Xia Q. Conceptual design and exploration of multi-factor integrated high-elastic power grid in energy Internet [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(2): 486–497.
- [19] 阮前途, 梅生伟, 黄兴德, 等. 低碳城市电网韧性提升挑战与展望 [J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(8): 2819–2830.
Ruan Q T, Mei S W, Huang X D, et al. Challenges and research prospects of resilience enhancement of low-carbon power grid [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(8): 2819–2830.
- [20] 程鑫, 樊扬, 龚贤夫, 等. 城市抗冰保底电网防灾综合评价指标体系研究 [J]. *电网技术*, 2019, 43(10): 3808–3815.
Cheng X, Fan Y, Gong X F, et al. Study on comprehensive evaluation index system for disaster prevention of urban ice-resistant secure power grid [J]. *Power System Technology*, 2019, 43(10): 3808–3815.
- [21] Zhou S C, Li Y F, Jiang C W, et al. Enhancing the resilience of the power system to accommodate the construction of the new power system: Key technologies and challenges [J]. *Frontiers in Energy Research*, 2023, 11: 1256850.
- [22] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems [J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, 4: 1–23.
- [23] Arghandeh R, von Meier A, Mehrmanesh L, et al. On the definition of cyber-physical resilience in power systems [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 58: 1060–1069.
- [24] 梁双, 严超, 厉瑜, 等. 电力系统应对极端天气自然灾害存在的薄弱环节及对策建议 [J]. *中国工程咨询*, 2022 (9): 27–31.
Liang S, Yan C, Li Y, et al. Weak links and countermeasures of power system in dealing with extreme weather and natural disasters [J]. *China Engineering Consultants*, 2022 (9): 27–31.
- [25] 康重庆, 姚良忠. 高比例可再生能源电力系统的关键科学问题与理论研究框架 [J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(9): 2–11.
Kang C Q, Yao L Z. Key scientific issues and theoretical research framework for power systems with high proportion of renewable energy [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(9): 2–11.
- [26] 何维国, 王赛一, 许唐云, 等. 城市韧性配电网建设与发展路径 [J]. *电网技术*, 2022, 46(2): 680–690.
He W G, Wang S Y, Xu T Y, et al. Construction and development path of the urban resilient distribution network [J]. *Power System Technology*, 2022, 46(2): 680–690.
- [27] 汤广福, 周静, 庞辉, 等. 能源安全格局下新型电力系统发展战略框架 [J]. *中国工程科学*, 2023, 25(2): 79–88.
Tang G F, Zhou J, Pang H, et al. Strategic framework for new electric power system development under the energy security pattern [J]. *Strategic Study of CAE*, 2023, 25(2): 79–88.
- [28] 石文辉, 屈姬贤, 罗魁, 等. 高比例新能源并网与运行发展研究 [J]. *中国工程科学*, 2022, 24(6): 52–63.
Shi W H, Qu J X, Luo K, et al. Grid-integration and operation of high-proportioned new energy [J]. *Strategic Study of CAE*, 2022, 24(6): 52–63.
- [29] 舒印彪, 陈国平, 贺静波, 等. 构建以新能源为主体的新型电力系统框架研究 [J]. *中国工程科学*, 2021, 23(6): 61–69.
Shu Y B, Chen G P, He J B, et al. Building a new electric power system based on new energy sources [J]. *Strategic Study of CAE*, 2021, 23(6): 61–69.
- [30] 刘瑞环, 陈晨, 刘菲, 等. 极端自然灾害下考虑信息-物理耦合的电力系统弹性提升策略: 技术分析与研究展望 [J]. *电机与控制学报*, 2022, 26(1): 9–23.
Liu R H, Chen C, Liu F, et al. Power system resilience enhancement strategy considering cyber-physical interdependence under disasters: Development and prospects [J]. *Electric Machines and Control*, 2022, 26(1): 9–23.
- [31] 秦潘昊, 陈威宇, 胡秦然, 等. 新型电力系统设备状态监测与故障诊断传感芯片关键技术与展望 [J]. *电力系统自动化*, 2024, 48(6): 83–95.
Qin P H, Chen W Y, Hu Q R, et al. Key technologies and prospects of equipment condition monitoring and diagnostic sensor chips for new power systems [J]. *Power System Automation*, 2024, 48(6): 83–95.
- [32] Zhang W X, Shao C Z, Hu B, et al. Transmission defense hardening against typhoon disasters under decision-dependent uncertainty [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2023, 38(3): 2653–2665.
- [33] 盛戈崑, 钱勇, 罗林根, 等. 面向新型电力系统的数字化电力设备关键技术及其发展趋势 [J]. *高电压技术*, 2023, 49(5): 1765–1778.
Sheng G H, Qian Y, Luo L G, et al. Key technologies and development trends of digital power equipment for new type power system [J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(5): 1765–1778.
- [34] 赵洪山, 孙京杰, 刘秉聪. 基于压缩感知的电力设备红外图像非盲自适应超分辨率方法 [J]. *高电压技术*, 2022, 48(8): 3068–3077.
Zhao H S, Sun J J, Liu B C. Non-blind adaptive super resolution method for infrared image of power equipment based on compressed sensing [J]. *High Voltage Engineering*, 2022, 48(8): 3068–3077.
- [35] Jia Y W, Meng K, Xu Z. N-k induced cascading contingency screening [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2015, 30(5): 2824–2825.
- [36] 李雪, 孙霆锴, 侯恺, 等. 极端天气下电力系统大范围随机设备故障的N-k安全分析及筛选方法 [J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(16): 5113–5126.
Li X, Sun T K, Hou K, et al. N-k security assessment and screening for large-scale random equipment faults in bulk power grid under extreme weather [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(16): 5113–5126.
- [37] Li G F, Huang G C, Bie Z H, et al. Component importance assessment of power systems for improving resilience under wind storms [J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2019, 7(4): 676–687.
- [38] 周姝天, 翟国方, 施益军, 等. 城市自然灾害风险评估研究综述 [J]. *灾害学*, 2020, 35(4): 180–186.
Zhou S T, Zhai G F, Shi Y J, et al. A literature review of urban natural disaster risk assessment [J]. *Journal of Catastrophology*, 2020, 35(4): 180–186.
- [39] Espinoza S, Panteli M, Mancarella P, et al. Multi-phase assessment and adaptation of power systems resilience to natural hazards [J]. *Electric Power Systems Research*, 2016, 136: 352–361.
- [40] 郝子君, 荣莉莉. 面向灾害情景推演的区域模型构建方法研究 [J].

- 管理评论, 2020, 32(10): 276–292.
- Qie Z J, Rong L L. A construction method of hazard-affected region for disaster scenario evolution [J]. *Management Review*, 2020, 32(10): 276–292.
- [41] 刘翔宇, 李晓明, 朱介北, 等. 新型电力系统的频率响应模型综述及展望 [J]. *南方电网技术*, 2022, 16(10): 38–47.
- Liu X Y, Li X M, Zhu J B, et al. Review and prospect on frequency response models of new power system [J]. *Southern Power System Technology*, 2022, 16(10): 38–47.
- [42] Morales-España G, Martínez-Gordón R, Sijm J. Classifying and modelling demand response in power systems [J]. *Energy*, 2022, 242: 122544.
- [43] Vaish R, Dwivedi U D, Tewari S, et al. Machine learning applications in power system fault diagnosis: Research advancements and perspectives [J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2021, 106: 104504.
- [44] Ajagekar A, You F Q. Quantum computing based hybrid deep learning for fault diagnosis in electrical power systems [J]. *Applied Energy*, 2021, 303: 117628.
- [45] Zhang H T, Sun X F, Lee M H, et al. Deep reinforcement learning-based active network management and emergency load-shedding control for power systems [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2024, 15(2): 1423–1437.
- [46] 杨挺, 耿毅男, 郭经红, 等. 人工智能在新型电力系统智能传感、通信与数据处理领域应用 [J]. *高电压技术*, 2024, 50(1): 19–29.
- Yang T, Geng Y N, Guo J H, et al. Applications of artificial intelligence in sensing, communication, and data processing in the new power system [J]. *High Voltage Engineering*, 2024, 50(1): 19–29.
- [47] Li X, Du X X, Jiang T, et al. Coordinating multi-energy to improve urban integrated energy system resilience against extreme weather events [J]. *Applied Energy*, 2022, 309: 118455.
- [48] Dobson I. Models, metrics, and their formulas for typical electric power system resilience events [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2023, 38(6): 5949–5952.
- [49] Panteli M, Mancarella P, Trakas D N, et al. Metrics and quantification of operational and infrastructure resilience in power systems [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, 32(6): 4732–4742.
- [50] Ganganath N, Wang J V, Xu X Z, et al. Agglomerative clustering-based network partitioning for parallel power system restoration [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2018, 14(8): 3325–3333.