

引文格式:景祥,秦文萍,姚宏民,等.极端自然灾害下新型电力系统弹性提升措施研究及关键技术综述[J].太原理工大学学报,2022,53(3):432-442.

JING Xiang, QIN Wenping, YAO Hongmin, et al. A review of research and key technologies on the resilience improvement measures of new power systems under extreme natural disasters[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2022, 53(3): 432-442.

极端自然灾害下新型电力系统弹性提升措施研究及关键技术综述

景祥, 秦文萍, 姚宏民, 朱志龙, 黄倩, 张信哲

(太原理工大学 电气与动力工程学院, 太原 030024)

摘要:新型电力系统弹性是保障能源可持续发展和结构形态改革安全的基石。首先阐述新型电力系统弹性的概念,明确新型电力系统弹性在极端自然灾害下的演化过程,而后分析新型电力系统对弹性的影响,指出源-网-荷不确定性波动加剧、受灾系统时-空特性不均衡、动态控制系统可行性不足三个方面的挑战,从灾前规划配置、灾中管理控制和灾后恢复响应角度综述新型电力系统弹性的提升措施。最后对提升新型电力系统弹性的关键技术进行了归纳,明确弹性全时段不确定性表征和物联网与人工智能在弹性提升措施中的价值,并给出重点研究方向,从而为新型电力系统的弹性建设提供参考。

关键词:新型电力系统;极端自然灾害;弹性提升;不确定性

中图分类号:TM73 **文献标识码:**A

DOI:10.16355/j.cnki.issn1007-9432tyut.2022.03.008 **文章编号:**1007-9432(2022)03-0432-11

A Review of Research and Key Technologies on the Resilience Improvement Measures of New Power Systems Under Extreme Natural Disasters

JING Xiang, QIN Wenping, YAO Hongmin, ZHU Zhilong, HUANG Qian, ZHANG Xinzhe

(College of Electrical and Power Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The resilience of novel power system is the cornerstone of ensuring the sustainable development of energy and the safety of structural reform. With the development of the economy, the society has put forward higher requirements for the system to resist extreme natural shocks, ensure rapid power recovery and load energy consumption. In this paper the concept of resilience of novel power system was first expounded, the evolution process of the resilience in novel power system under extreme natural disasters clarified, and then the impact of novel power system on the resilience analyzed. Three challenges were pointed out in terms of source-network-load uncertainty fluctuations, unbalanced spatiotemporal characteristics of disaster-hit systems, and insufficient feasibility of dynamic control systems. The measures to improve the resilience of

收稿日期:2022-03-06

基金项目:国家自然科学基金联合基金重点支持项目(U1910216);山西省科技重大专项项目(20181102028)

第一作者:景祥(1994-),博士研究生,主要研究方向为弹性电网规划与优化运行,(E-mail)jingx0926@163.com

通信作者:秦文萍(1972-),教授,博士生导师,研究方向为电力系统可靠性/稳定性分析、微电网运行与控制、新能源发电技术和微机保护等,(E-mail)qinwenping@tyut.edu.cn

novel power system were reviewed from the perspectives of pre-disaster planning and configuration, management and control during disasters, and post-disaster recovery response. Finally, the key technologies for improving the resilience novel power systems were summarized, and the full-time uncertainty representation of resilience and the value of IoT and artificial intelligence in resilience improvement measures were clarified. The key research directions were also given so as to provide reference for the resilience construction of novel power systems.

Keywords: new power systems; extreme natural disasters; resilience improvement; uncertainty

随着人类社会对化石能源的开采和利用,全球平均气温逐步上升^[1-2]。二氧化碳等温室气体的过量排放,提升了诸如台风、暴雪等极端自然灾害的出现频次,进而破坏了能源系统的稳定与安全^[3]。2015年12月巴黎气候变化大会通过《巴黎协定》,目标是实现对21世纪全球平均气温上升的有效遏制。为了从根源上建设弹性电力系统,应对气候变化的同时缓解对化石能源的依赖,近年来世界各国纷纷提出可持续发展战略,意图打造绿色化、低碳化的新型电力系统,我国能源结构低碳化改革要求迫切^[4]。2020年9月,习近平总书记在第七十五届联合国大会指出“我国二氧化碳排放量力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和”,旨在进一步推进能源产输消产业链改革,布局可持续发展建设,构建环境友好、稳定高效的能源生态。2021年5月,国家电网公司召开构建以新能源为主体的新型电力系统研讨会,为实现双碳目标贡献力量^[5]。

新型电力系统以最大化消纳新能源为主要目标,呈现出广泛互联、多能互补、稳定可靠、灵活智能的特征^[6-8]。风电、光伏等非化石能源将从原来电力消费的增量补充,转变为电力生产主体,从电源侧提高了电力系统的环境友好性。此外,新型电力系统引导负荷参与需求响应,推动负荷分类可控管理。伴随海量智能电力设备的接入实现了系统数据的实时交互,源荷能量动态匹配进一步提升了系统能量利用效率^[9]。值得注意的是,尽管极端自然灾害发生属于罕见事件,但是仍对新型电力系统造成了巨大损失,如2019年“利奇马”台风造成我国600万用户停电,累计经济损失高达500亿元^[10];同年,“法茜”台风导致日本输电线路和杆塔受到严重破坏,近100万用户停电^[11];2021年极寒天气导致美国得克萨斯州发生大面积停电事故,最终累计切除负荷20000 MW^[12]。由此说明,保证新型电力系统安全关乎国家稳定、经济发展命脉,新型电力系统应对极端自然灾害的能力也亟待提升^[13-15]。

因此,本文归纳新型电力系统弹性的概念,揭示新型电力系统弹性在极端自然灾害下的演化过程,基于新型电力系统理论与技术,明晰新型电力系统对弹性的影响,综述规划设计与运行调度方面提升新型电力系统弹性措施的研究成果,并理清提升新型电力系统弹性提升的关键技术,给出相应研究重点,旨在为我国能源清洁低碳转型的安全提供指导性建议。

1 新型电力系统弹性的内涵

1.1 新型电力系统弹性的概念

弹性的概念最早于1973年由HOLLING C S在生态学研究提出,用来衡量生态系统承受、吸收扰动量,并保持系统稳定的能力^[16]。虽然目前世界各国对弹性进行了大量研究,但尚未形成统一的概念^[13-14,17-19],普遍强调其面对极端自然灾害这类高影响-低概率事件时应具有的抵抗能力和恢复能力,其涵盖了电网鲁棒性、冗余性、快速性、智能性、灵活性等多个维度。在此基础上,本文将新型电力系统的弹性定义为:依据系统操作运行的时序过程,应对极端自然灾害时充分预防、有效抵御和快速恢复的能力^[13,19]。

1.2 新型电力系统弹性的演化过程

在新型电力系统应对极端自然灾害全时段,系统运行状态将发生一系列变化,依据新型电力系统弹性在时间尺度上的演变,系统弹性曲线^[13,19-20]可分为3个阶段,如图1所示。其中, Q 为系统功能,表示新型电力系统在某一极端自然灾害下的弹性水平; t_E 表示系统出现降额的时刻; t_D 表示系统开始恢复的时刻; t_R 表示系统恢复完成的时刻。

1) 灾前预防阶段($[t_0, t_E]$)。该阶段新型电力系统从长期和短期两个时间尺度令弹性保持在正常水平。在长期时间尺度,运营商结合历史数据与地理因素分析电网可能受到的灾害类型与强度并进行风险评估,加固输电通道,明确可用于支撑弹性水平的

恢复资源,在此基础上协调配置恢复资源,指导系统投资建设。在短期时间尺度,运营商结合极端自然灾害预测信息与系统状态临时调配恢复,在灾前提升系统的抗灾能力。

2) 灾中防御阶段($[t_E, t_D]$)。该阶段新型电力系统弹性水平显著下降,发电设备、传输线路等系统元件受到破坏,出现潮流不平衡情况,伴随着能量传输过程中的短期频率、电压波动,导致大规模保护装置动作,弹性水平可能因连锁故障进一步降额。相较于传统电网,新型电力系统的装备种类更为丰富,通过智能控制设备的快速响应,可有效遏制故障蔓延。

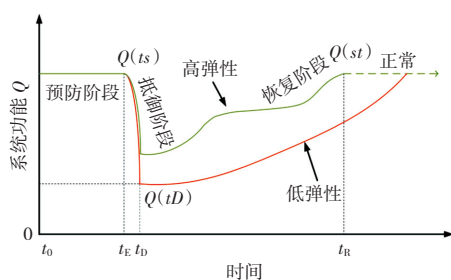


图 1 新型电力系统弹性曲线

Fig. 1 Resilience curves of novel power systems

3) 灾后恢复阶段($[t_D, t_R]$)。该阶段系统弹性水平逐步恢复,运营商通过故障定位、预测算法和负荷侧报告进行损伤评估,从空间层面上有序安排抢修队伍对故障元件进行修复。与此同时,运营商唤醒分布式电源、储能设备等恢复资源,从时间上保障高优先级负荷供应,有效恢复系统弹性水平,但受能源储备影响,系统弹性水平恢复的速率可能出现波动。

2 新型电力系统对弹性的影响

新型电力系统以智能电网为枢纽,以最大化新能源消纳为目标,最终形成发电主体转变、网络结构灵活、负荷形式多样的新一代能源网络^[8]。极端自然灾害下,新型电力系统可调控丰富的恢复资源支撑系统运行,但也将面临扰动形式更加繁杂的挑战,对弹性的影响具有两面性。

2.1 新型电力系统对弹性的优化潜力

新型电力系统对弹性的优化潜力源于广泛分布在系统生产、输送和消费环节的恢复资源,为系统弹性的提升提供时间或空间上的灵活性,详见表 1。

在电源侧,依据电网周边的水和燃料的使用需求、气候和地理条件来分配多种可再生能源的组合有助于平滑其固有的变异性,同时能保证在大停电

表 1 新型电力系统的恢复资源
Table 1 Restoration resources for novel power systems

所有者	类型	时间灵活性	空间灵活性
电源侧	柴油机	✓	
	水电机组	✓	
	燃气轮机	✓	
	风电、光伏		
电网侧	SOP	✓	
	手动开关	✓	
	维修队伍	✓	✓
	应急发电车	✓	✓
	可移动储能	✓	✓
负荷侧	分布式储能	✓	
	需求响应	✓	
	电动汽车	✓	

事件中的安全性^[6,21]。例如,在易受洪水干扰的水电站发电地区设置具有低用水量需求的风电、光伏系统,可以提高当地极端自然灾害下的电力供应。在电网侧,伴随着智能电网技术的发展,高级测量体系(advanced metering infrastructure, AMI)、同步相量测量单元(phasor measurement unit, PMU)等新型装备大量接入系统,为电网公司提供了详细的测量数据,以便实时感知电网的健康状况^[22]。这些数据还包括极端自然灾害、停电时间、瞬时状态和其它历史数据,蕴含着丰富的信息,分析海量数据并揭示其中隐藏的价值将有效提升新型电力系统抵御干扰的能力。与此同时,部署于线路的智能软开关(soft open point, SOP)等动态控制系统提供了灵活、便捷的潮流优化调控能力,避免了系统故障的传播与扩大^[23]。在负荷侧,新型负荷和多元化储能设备等灵活性资源的出现,不仅在正常运行条件下为系统提供了较高的可靠性和经济性,还为系统功率平衡提供了新的恢复资源^[24-25],可实现故障状态下紧缺发电资源的有效分配,保障负荷持续用电,提升电源黑启动能力。

2.2 新型电力系统对弹性的多重挑战

新型电力系统给弹性带来的威胁来自于源-网-荷不确定性强和抗扰动能力弱等方面,需从多个维度实现技术突破。结合新型电力系统形态特征,其弹性提升研究应考虑以下挑战:

1) 源-网-荷不确定性波动加剧。在风机、光伏等可再生能源、元件易损性与用户消费行为的作用下,不确定性将广泛存在于新型电力系统各个阶段^[26]。此外,考虑到灾害对电网智能监测设备的破坏,导致系统实时态势感知能力下降,进一步增加了精细化预测的难度。如何明晰源-网-荷不确定因素,在弹性研究中准确地构建表征不确定性差异的

模型,是新型电力系统弹性提升的关键。

2) 受灾系统时空特性不均衡。对新型电力系统而言,自然灾害的发生时间变得更加关键。如果在某一发电资源出力占比高时受干扰,则系统可能面临严重的发电不足,进而出现源荷不匹配现象。与此同时,系统发电组合中每类发电资源受灾害的影响程度不同,导致系统抵御极端自然灾害的能力具有差异。如何有效辨识新型电力系统在多时空极端自然灾害中的故障时间和故障位置,分析特定灾害-新型电力系统交互机理,是新型电力系统弹性提升的基础。

3) 动态控制系统可行性不足。由于新能源占比提升,新型电力系统的转动惯量急剧下降,加之新型电力系统调峰、调频、高/低压穿越能力较弱,从而降低了系统的抗扰动能力。伴随系统无功支撑能力

差,潮流倒送频繁,暂态过电压问题突出,加剧了系统运行过程中开关动作频繁带来的瞬时冲击导致大规模电网解列的可能^[27]。如何在新型电力系统由 $N-1$ 到 $N-k$ 故障再到正常运行转变下,保证面向稳态的弹性提升措施在极端状态下的可行性,是新型电力系统弹性提升的底线。

3 新型电力系统弹性的提升措施

保障新型电力系统应对极端自然灾害的持续供电能力是弹性提升的首要任务^[26]。目前弹性提升措施主要围绕对各类恢复资源的规划设计和运行调度,结合新型电力系统弹性的演化过程,将弹性提升措施分为三类,包括:灾前规划配置、灾中管理控制和灾后恢复响应。其中,灾中管理控制和灾后恢复响应属于运行层面,具体如图2所示。

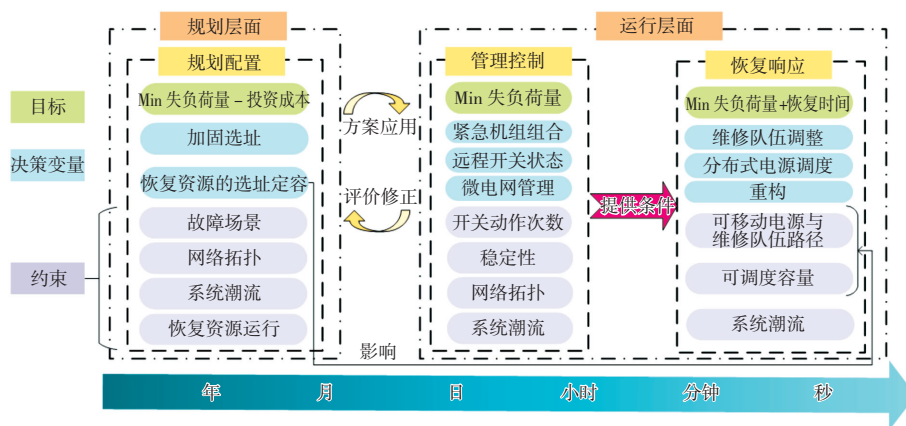


图2 新型电力系统的弹性提升措施

Fig. 2 Resilience improvement measures for novel power systems

3.1 灾前规划配置

新型电力系统通过多种发电组合实现能源结构的调整优化,导致电网结构不断复杂,伴随多种分布式能源的高比例接入,亟需在规划层面对网架和各类资源的接入位置、容量进行配置,以充分挖掘各类资源对弹性提升的潜在价值,指导新型电力系统投资建设^[28-29]。然而,极端自然灾害往往不易预测、无规律可循、出现频率低,尽管部分灾害可以通过预警而感知,但难以实现基础设施与不可移动资源的有效配置。因此,本节将从弹性长期规划和弹性短期配置进行综述。

弹性长期规划主要是基于历史数据对基础设施和不可移动资源进行规划。文献[30]研究了地震灾害下杆塔选型与档距选择的规划,基于数据采集与监视控制分析了上述元件在不同地震烈度下的易损性。文献[31]通过建立附加线路、断路器和变压器来保障线路传输能力,避免潮流阻塞。文献[32]通

通过对输电线路附近的植被进行修剪与砍伐来达到植被管理的目的,以降低线路故障概率。然而,围绕基础设施的加固与冗余导致了系统规划的投资成本较高。在不可移动资源规划方面,文献[33]对自动开关的安装位置进行规划,目的是最大化系统供能。文献[34-37]构建了“防御者-攻击者-防御者(DAD)”的三层优化策略。在第一层,系统计划层(充当防御者)在指定的预算限制下确定分布式电源或储能最佳安装位置。在第二层,自然灾害(攻击者)在指定的线路故障数量下最大化系统失负荷量,即在 $N-k$ 个故障场景下选择最严重的一个。在第三层,系统操作层通过恢复策略将系统失负荷量降至最低。文献[38]建立台风下电动汽车充电站的弹性规划模型,基于历史数据研究了杆塔的故障状态,并建立了计及相关性的杆塔失效概率模型。

弹性短期配置通过灾害预警实现可移动资源的最优配置,相较于不可移动资源在时间维度对弹性

的提升,可移动资源还具备空间维度上的提升。文献[39]依据系统电压等级,结合可能故障场景的预测对应急电源车聚集点进行选址,以最小化系统失负荷量。文献[40]部署线路维修队伍,为电网提供了一定的拓扑灵活性,通过保障关键负荷的供电提高了系统的弹性。

3.2 灾中管理控制

保证系统极限生存和负荷供能是控制管理环节最关键的两个目标,保证系统安全可靠运行优先于最小化失负荷量^[41]。相较于传统电网,大规模电力电子设备与智能控制系统涌入新型电力系统,提供了丰富的弹性响应措施^[27]。作为运行层面措施的第一步,该阶段抑制强扰动在系统内的传播,及时切断事故链,防止故障蔓延,提升系统弹性。此阶段弹性响应依据灾害发生的时间分为正常管理与紧急控制。

正常管理是已预知即将到来的极端自然灾害时电力系统提前一天的调度措施^[42]。多数方案集中于网架拓扑控制(如:防御性孤岛、线路切换)和增加系统备用措施,设定不同时段的负荷优先级,以提升系统在灾害事件下的表现。在正常管理之后,依据实时的系统灾情进行紧急控制。紧急控制包括风险评估和管理、保护整定和配合、故障定位和隔离、拓扑优化和重构、能量调度和分配^[43]。下面将讨论一些常用的紧急控制。

3.2.1 基于弹性的机组组合

基于弹性的机组组合策略是提高电力系统运行弹性的主要途径之一,目前已有文献建立了基于弹性的发电资源调度模型。文献[44]建立了紧急发电资源和储能系统的调度模型,通过平抑极端自然灾害给系统带来的时-空不均衡性和潮流的动态变化来提升系统弹性。文献[45]提出基于弹性提升的机组组合策略,适用于多个发电设备同时停机的情况。

3.2.2 远程开关控制

远程开关控制是常被应用于辐射状拓扑直流输电系统的弹性提升措施。远程开关分为线路常开开关与线路常闭开关,根据发电资源状态和网架结构情况控制其动作,优化电网拓扑结构,改变能量流向,从而最大化其持续供电能力。文献[6,46-47]建立了最小化线路潮流阻塞和失负荷量的开关控制模型,以具有远程开关线路的动作状态为模型的决策变量,目的是最大程度地改善电力系统的弹性,其最大开关动作的次数由运营商确定。进一步地,文献[48-49]建立了防御性孤岛的自适应控制方法,通过

求解一个割平面问题来隔离电力系统中易受损元件,可减轻系统故障的级联效应。

3.2.3 微电网生成

在极端自然灾害中应急生成微电网是保证关键负荷用能,提升输/配电网弹性的有效措施^[50-51],是远程开关控制的进一步拓展。微电网可以被视为三种形式的恢复资源,包括本地资源、社区资源和系统资源^[49,51-52]。现有研究基于渗透理论,利用层次分析法通过微电网提升系统的弹性。文献[53]将配电网分成多个微电网,并提出双层分级停电管理模型,在拓扑因素上,进一步考虑了微电网调度对系统弹性的提升。在模型第一阶段对微电网的分布式电源进行调度,通过分时停电整合微电网的空闲资源,在第二阶段保障上一阶段未供电的关键负荷的用能。文献[54]提出多微网的动态控制策略,将固定边界的微网扩展到动态边界的虚拟微网,通过降低负荷削减提高系统弹性,其中两个微电网可以在确定条件下相互连接,形成一个更大的微电网,反之亦然。

3.3 灾后恢复响应

恢复响应环节作为系统弹性提升的最后一个环节,目的是尽可能快地统筹全部恢复资源恢复尽可能多的负荷。在极端自然灾害后,运营商需要尽快调度维修队伍,从“硬件层”对故障元件进行抢修,伴随着对本地分布式电源、应急发电车和需求侧管理等恢复资源的“软件层”调度,对电网弹性的提升具有十分重要的现实意义。

目前就系统硬件的维修主要集中于配电网范畴。维修队伍分布于系统关键设施附近,各小队包括配电杆、线路和变压器等设备的修理资源和几名维修人员。在故障定位后,维修队伍依据经验或预先确定的元件重要度进行修复工作,一般认为元件重要度是传输线路、变电站、关键线路(医院,交通)^[55]。但是,故障线路的数量通常多于维修队伍的数量,依靠经验或指南难以对有限的修复资源和行径路线进行最优分配^[56]。文献[57]建立了多中心维修队伍调度模型,考虑网络拓扑约束、队伍行径约束、时间窗约束,采用“先分配再调度”的方法降低了求解难度,实现了配电网受损元件的快速恢复。文献[40]考虑元件修复时间的不确定性,建立了维修队伍的在线派遣模型。

在系统供用能恢复过程中,文献[50]通过调度微型燃气轮机为系统复电,以快速地恢复本地负荷,提升系统弹性。文献[58-59]将系统恢复和直接负荷控制、需求响应相结合,通过负荷提供的灵活性提

升系统弹性。文献[60]利用车载储能电池的能量双向交互能力,在适当的时间和位置接入系统,保障关键负荷用能。为了应对不可移动资源受灾情影响不可用的故障场景,文献[61]建立了电动公交车的调度模型,并基于路网图引导其至充电站有序放电。在多恢复资源联合调度方面,文献[62]通过屋顶光伏与分布式储能的协同调度,减少了功率波动,为微电网集群提供了稳定的功率输出。文献[63]建立了计及拓扑重构和需求响应的两阶段优化模型,结合节点电价机制为配电网恢复提供了支撑。

4 提升新型电力系统弹性的关键技术与展望

综合目前弹性提升措施,其对弹性全时段不确定性因素考虑不充分、灾害-电力系统交互行为预测不精确、控制系统瞬时电压频率波动分析不周全,尚无法全面指导新型电力系统弹性提升。笔者认为弹性全时段不确定性表征、物联网与人工智能是支撑新型电力系统弹性研究的两个关键技术。

4.1 弹性全时段不确定性表征

4.1.1 弹性提升措施中的不确定性

新型电力系统弹性提升研究主要是通过规划与运行两个层面,这一系列问题在数学本质上均可归纳为最优化问题。随着新型电力系统的发展,电力系统的不确定性加剧。加之低概率的极端自然灾害的干扰,系统在原有出力预测和用户行为分析误差等导致的新能源功率的不确定性、需求侧管理的不确定性的基础上,进一步增加了故障时空分布的不确定性。弹性研究中的不确定性主要分为节点注入功率的不确定性、输电网络状态的不确定性和恢复资源运行的不确定性,各维度的不确定性既相对独立又有机关联,如图 3 所示。

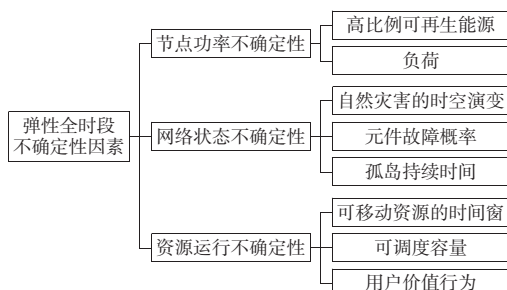


图 3 弹性全时段不确定性因素

Fig. 3 Uncertainty factors of resilience

4.1.2 弹性提升措施中的不确定性建模

弹性提升措施的不确定性建模方法包括随机优化(stochastic optimization,SO)和鲁棒优化(robust

optimization,RO)两种。

SO 依据目标函数是否含有不确定性变量分为期望值模型和机会约束模型。在目标函数中含有不确定性变量的期望值模型中,首要完成的是对不确定性变量的概率测度,然后通过场景分析将随机优化问题转变为等价的确定性优化问题,最后以各场景结果的加权平均值最小化(或最大化)作为优化目标^[64]。文献[65]使用概率分布模型预测台风风速,将概率分布离散化,定量分析输电线路在不确定场景下的过程。随着系统规模的升级与受影响设备的扩大,导致这类弹性研究中需要生成大量场景,为了避免模型求解精度的降低,常需要通过场景削减技术或 Benders 分解减少场景数目^[66]。文献[67]建立了发输电双层随机规划模型,通过场景生成与削减技术对不确定量进行刻画。但是新型电力系统不确定因素众多,难以准确获得响应的概率分布,进而降低了期望值模型的准确性。

机会约束模型的主要特征是相关决策变量在观测到随机变量前已确定,因此模型有部分可能违背约束条件,需要就违反约束的概率给定一个阈值。文献[68]对风机和储能进行联合调度,将含有随机变量的约束改写为机会约束,从而等效为一个确定性问题。文献[69]建立了基于机会约束的移动应急电源的优化调度模型,综合考虑其电源容量与行驶时间,实现了重要负荷停电损失最低的目标。但是机会约束的改写对随机变量的概率分布有着较高的要求,服从非正态分布等典型分布的随机变量将导致模型求解精度下降。

RO 相较于 SO 无需得知不确定性变量的详细概率分布,具有适用性高的特点,被广泛应用于含不确定性因素的弹性研究中。鲁棒优化按照构建所描述参数波动不确定集的类型,可以分为传统鲁棒优化与分布式鲁棒优化。传统鲁棒优化多通过构建多面体不确定集,给定其波动区间的上、下界。文献[70]考虑风机出力的不确定性,建立以切负荷量最小为目标的传统鲁棒优化模型,但其对不确定因素的刻画较粗糙,造成结果过于保守。文献[71]对系统负荷和孤岛持续时间构造基数约束不确定集合,引入鲁棒预算,用于约束不确定区间的总偏差量,较好协调了经济性与保守性。而分布式鲁棒优化将静态鲁棒优化和随机优化结合,构建具有一定概率特征的不确定集,进一步降低了结果的保守性。文献[72]基于风机、光伏出力的历史数据,构建了基于散度的不确定集合。上述鲁棒优化中决策变量在不确

定性变量观测前确定,是一种静态数学模型。但是系统弹性提升行为往往受不确定因素扰动,需要在其观测后做出决策,静态鲁棒优化模型与许多现实情况不符,导致结果仍然保守。文献[73]研究线路多重故障下的机组组合问题,构建了两阶段传统鲁棒模型。在此基础上,文献[74]构造了线路故障矩信息不确定集,通过两阶段分布式鲁棒模型,最小化运行成本。同时,由于其模型考虑了线路故障的概率信息,降低了结果的保守性。

上述研究虽然处理了弹性过程中的不确定性因素,但优化结果偏保守是不确定优化的固有局限,模型求解精度与不确定集精确建模是造成这一现象的主要问题。目前,线性决策规则、Benders 分解和列与约束生成(column and constraints generation, C&CG)在求解鲁棒优化问题已经得到了广泛应用。然而现有弹性研究模型中常含有表征线路通断状态、开关动作状态、资源可用状态等二进制决策变量,导致上述以主问题和子问题迭代为核心的求解方法难以保障解的最优性,同时显著增加了模型的求解时间。

在未来弹性提升措施中,应依据具体环节,统筹其不确定性因素,结合现有不确定性的数学表征方法,建立计及概率特征差异的多重不确定性优化模型,并研究高效精确的求解算法,是保证提升措施实施稳定可靠、数学模型分析精确高效的关键环节。

4.2 物联网与人工智能

新型电力系统日益增长的复杂性与不确定性对其弹性的建模分析、精细预测带来了极大的挑战。而人工智能(artificial intelligence, AI)对物理系统数学模型的依赖程度较低,具有从海量数据中自我学习的能力。运营商依托电力物联网的建设,将广域监测、传感器、智能设备等装置收集的海量环境数据与电力系统运行数据储存在服务器,并通过电信交通与互联网的形式上传至云端,实现了多源异构数据的可靠分发,为人工智能技术的推广提供了平台,也为新型电力系统弹性提升提供了新的方法^[75]。目前机器学习的算法分类为传统神经网络、核方法、基于树的方法、概率建模、集成学习这五类。

由于天气和系统等各种因素的不确定性,传统物理分析难以分析实际准确的场景,机器学习可以通过分析天气数据,探究典型极端自然灾害的时空传播特征,收集对应灾害的历史中断区域、易受攻击组件等信息,指导电力系统在灾前规划配置工作。文献[76]提出了一种基于时间和空间信息的监督学

习模型,并通过实际的停电案例进行了验证,这项研究帮助运营商实现对实际停电区域的准确预测。

在灾中管理控制阶段,机器学习方法可以提高其控制的速度和精度。通常,系统实时运行数据会发送给大数据平台,通过处理和计算,再将各设备的控制策略反馈给运营商。目前已有多种强化学习方法用于解决发电机控制问题。文献[77]将多智能体化学习方法与多目标优化模型相结合,解决了多区域分布式电源的控制问题。为了更好地解决大规模可再生能源并网带来的电压波动问题,文献[78]针对可再生能源和电动汽车普及率较高的互联电网,建立了一种基于强化学习的时序调度模型。然而强化学习极易受标签数据量影响,导致其在大规模电力系统的计算效率降低,难以保证措施稳定有效。现有研究将深度学习和强化学习相结合提出深度强化学习,并广泛用于系统稳定性控制中。文献[79]基于深度强化学习,依据暂态电压变化制定系统的切负荷策略。

相较于管理控制阶段,恢复响应阶段还需要收集历史故障修复时间与所需资源、交通道路状态、用户行为数据等恢复资源的数据。现有研究应用在恢复响应的人工智能技术还比较少,文献[80]利用智能电表数据来预测冷负荷回升带来的用户行为变化。

但是,基于数据驱动的方法并不是一劳永逸的,物联网的发展也给极端自然灾害带来了新的作用对象,通信设备故障、样本数量与质量的下降可能会导致预测精度严重劣化。此外,极端自然灾害对电力系统造成的危害极大,加之其低概率性,导致离线训练过程难以保证正负样本的平衡性。随着信息物理融合技术的发展,降低数据驱动固有的过拟合、欠拟合风险,将模型驱动相互补,建立模型-数据混合驱动的弹性提升方法,实现“能量流”和“信息流”的协同,将成为未来研究的重点方向。

5 结束语

为实现低碳绿色的能源转型目标保驾护航,新型电力系统的弹性提升势在必行。本文总结了新型电力系统弹性的概念,明确了新型电力系统弹性在极端自然灾害下的演化过程,并在新型电力系统理论与技术的基础上,分析了新型电力系统对弹性的影响,指出了源-网-荷不确定性波动加剧、受灾系统时空特性不均衡、动态控制系统可行性不足等挑战,从而进一步归纳了灾前规划配置、灾中管理控制和灾后恢复响应等弹性提升措施方面的研究,并对

不确定优化理论、物联网和人工智能技术两个关键技术进行总结和展望。

然而目前国内外对于新型电力系统弹性提升的

研究仍处于起步阶段,仍需要进一步的深入,期望本文可以为后续相关研究提供参考,建设高弹性的“双高”新型电力系统。

参考文献:

- [1] IEA. World energy outlook 2019[R]. Paris:International Energy Agency,2019.
- [2] MICHAEL B M. Energy and climate:vision for the future[M]. Oxford:Oxford University Press,2016:1-15.
- [3] PERERA A T D,NIK V M,CHEN D L,et al. Quantifying the impacts of climate change and extreme climate events on energy systems[J]. Nature Energy,2020,5(2):150-159.
- [4] 王奖,邓丰强,张勇军,等. 园区能源互联网的规划与运行研究综述[J]. 电力自动化设备,2021,41(2):24-32,55.
WANG J,DENG F Q,ZHANG Y J,et al. Review on planning and operation research of park energy internet[J]. Electric Power Automation Equipment,2021,41(2):24-32,55.
- [5] 国家电网. 构建以新能源为主体的新型电力系统专家研讨会[EB/OL]. [2022-03-06]. https://m.thepaper.cn/baijiahao_12763577,2021-5-20.
- [6] 张运洲,张宁,代红才,等. 中国电力系统低碳发展分析模型构建与转型路径比较[J]. 中国电力,2021,54(3):1-11.
ZHANG Y Z,ZHANG N,DAI H C,et al. Model construction and pathways of low-carbon transition of China's power system [J]. Electric Power,2021,54(3):1-11.
- [7] 丁然,康重庆,周天睿,等. 低碳电网的技术途径分析与展望[J]. 电网技术,2011,35(10):1-8.
DING R,KANG C Q,ZHOU T R,et al. Analysis and prospect on technical approaches for low carbon power grid[J]. Power System Technology,2011,35(10):1-8.
- [8] 张文华,闫庆友,何钢,等. 气候变化约束下中国电力系统低碳转型路径及策略[J]. 气候变化研究进展,2021,17(1):18-26.
ZHANG W H,YAN Q Y,HE G,et al. The pathway and strategy of China's power system low-carbon transition under the constraints of climate change[J]. Climate Change Research,2021,17(1):18-26.
- [9] HU X,ZHANG H,CHEN D,et al. Multi-objective planning for integrated energy systems considering both exergy efficiency and economy[J]. Energy,2020,197:117155.
- [10] 新京报快讯. 近19年登陆我国台风中“利奇马”直接经济损失排第二[EB/OL]. [2022-03-06]. <http://www.bjnews.com.cn/news/2019/08/14/615233.html>,2019-08-14.
- [11] 席玥. 台风过后三天,日本部分地区恢复供电[EB/OL]. [2022-03-06]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1644469301936598521&wfr=spider&for=pc>,2019-09-12.
- [12] 王伟胜,林伟芳,何国庆,等. 美国德州2021年大停电事故对我国新能源发展的启示[J]. 中国电机工程学报,2021,41(12):4033-4043.
WANG W S,LIN W F,He G Q,et al. Enlightenment of 2021 texas blackout to the renewable energy development in China [J]. Proceedings of the CSEE,2021,41(12):4033-4043.
- [13] 阮前途,谢伟,许寅,等. 韧性电网的概念与关键特征[J]. 中国电机工程学报,2020,40(21):6773-6784.
RUAN Q T,XIE W,XU Y,et al. Concept and key features of resilient power grids[J]. Proceedings of the CSEE,2020,40(21):6773-6784.
- [14] 鞠平,王冲,辛焕海,等. 电力系统的柔性、弹性与韧性研究[J]. 电力自动化设备,2019,39(11):1-7.
JU P,WANG C,XIN H H,et al. Flexibility,resilience and toughness of power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(11):1-7.
- [15] MOHAMED M A,CHEN T,SU W C,et al. Proactive resilience of power systems against natural disasters:a literature review[J]. IEEE Access,2019,7:163778-163795.
- [16] HOLLING C S. Resilience and stability of ecological systems (1973)[M]. USA:Yale University Press,2013.
- [17] 高海翔,陈颖,黄少伟,等. 配电网韧性及其相关研究进展[J]. 电力系统自动化,2015,39(23):1-8.
GAO H X,CHEN Y,HUANG S W,et al. Distribution systems resilience;an overview of research progress[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(23):1-8.
- [18] ALHELOU H H,HAMEDANI-GOLSHAN M E,NJENDA T C,et al. A survey on power system blackout and cascading events:research motivations and challenges[J]. Energies,2019,12(4):1-28.
- [19] 别朝红,林雁翎,邱爱慈. 弹性电网及其恢复力的基本概念与研究展望[J]. 电力系统自动化,2015,39(22):1-9.
BIE Z H,LIN Y L,LIU A C. Concept and research prospects of power system resilience[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(22):1-9.
- [20] 许寅,和敬涵,王颖,等. 韧性背景下的配网故障恢复研究综述及展望[J]. 电工技术学报,2019,34(16):3416-3429.

- XU Y, HE J H, WANG Y, et al. A review on distribution system restoration for resilience enhancement[J]. Transactions on China Electrotechnical Society, 2019, 34(16): 3416-3429.
- [21] 赵曰浩, 李知艺, 鞠平, 等. 低碳化转型下综合能源电力系统弹性: 综述与展望[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(9): 13-23+47.
- ZHAO Y H, LI Z Y, JU P, et al. Resilience of power system with integrated energy in context of low-carbon energy transition: review and prospects[J], 2021, 41(9): 13-23+47.
- [22] GAO X, AI X. The application of self-healing technology in smart grid[C]//Asia-pacific Power and Energy Engineering Conference, Wuhan, China, 2011: 1-4.
- [23] POURAHMADI F, HOSSEINI S, DEHGHANIAN P, et al. Uncertainty cost of stochastic producers: metrics and impacts on power grid flexibility[J]. IEEE Transactions on Engineering Management, 2022, 69(3): 708-719.
- [24] VARDAKAS J S, ZORBA N, VERIKOUKIS C V. A survey on demand response programs in smart grids: pricing methods and optimization algorithms[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(1): 152-178.
- [25] 齐宁, 程林, 田立亭, 等. 考虑柔性负荷接入的配电网规划研究综述与展望[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(10): 193-207.
- QI N, CHENG L, TIAN L T, et al. Review and prospect of distribution network planning research considering access of flexible load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(10): 193-207.
- [26] BIE Z, LIN Y, LI G, et al. Battling the extreme: a study on the power system resilience[J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 105(7): 1253-1266.
- [27] 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): 2735-2744.
- 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.
- [28] 肖定焱, 王承民, 曾平良, 等. 电力系统灵活性及其评价综述[J]. 电网技术, 2014, 38(6): 1569-1576.
- XIAO D Y, WANG C M, ZENG P L, et al. A survey on power system flexibility and its evaluations[J]. Power System Technology, 2014, 38(6): 1569-1576.
- [29] 兰颖. 考虑台风影响的配电网可靠性评估和规划[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- [30] BAJPAI P, CHANDA S, SRIVASTAVA A K. A novel metric to quantify and enable resilient distribution system using graph theory and choquet integral[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(4): 2918-2929.
- [31] BARNES A, NAGARAJAN H, YAMANGIL E, et al. Resilient design of large-scale distribution feeders with networked microgrids[J]. Electric Power Systems Research, 2019, 171(2): 150-157.
- [32] KUNTZ P, CHRISTIE R, VENKATA S. Optimal vegetation maintenance scheduling of overhead electric power distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 17(4): 1164-1169.
- [33] XU Y, LIU C, SCHNEIDER K P, et al. Toward a resilient distribution system[C]//Power & Energy Society General Meeting, USA, 2015: 1-5.
- [34] ALGUACIL N, DELGADILLO A, ARROYO J M. A trilevel programming approach for electric grid defense planning[J]. Computers & Operations Research, 2014, 41: 282-90.
- [35] YUAN W, WANG J, QIU F, et al. Robust optimization-based resilient distribution network planning against natural disasters[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(6): 2817-2826.
- [36] WANG X, SHAHIDEHPOUR M, JIANG C, et al. Resilience enhancement strategies for power distribution network coupled with urban transportation system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(4): 4068-4079.
- [37] WU X, WANG Z, DING T, et al. Microgrid planning considering the resilience against contingencies[J]. Generation, Transmission & Distribution, 2019, 13(16): 3534-3548.
- [38] 马丽叶, 王海锋, 卢志刚, 等. 计及相关性影响的台风灾害下灵活性资源韧性规划[J/OL]. 电力系统自动化, 2022: 1-15. [2022-03-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20211214.1300.004.html>.
- MA L Y, WANG H F, LU Z G, et al. Resilience planning for flexible resources in typhoon disasters with relevance impact[J/OL]. Automation of Electric Power Systems: 1-15. [2022-03-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20211214.1300.004.html>.
- [39] LEI S, WANG J, CHEN C, et al. Mobile emergency generator pre-positioning and real-time allocation for resilient response to natural disasters[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(3): 2030-2041.
- [40] ZHANG G, ZHANG F, ZHANG X, et al. Sequential disaster recovery model for distribution systems with co-optimization of maintenance and restoration crew dispatch[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(6): 4700-4713.
- [41] 张晶晶, 尉静慧, 李小燕. 台风对电力系统连锁故障的影响分析[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(10): 157-162.
- ZHANG J J, WEI J H, LI X Y. Impact analysis of typhoon on cascading failure for electric power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(10): 157-162.
- [42] HUANG G, WANG J, CHEN C, et al. Integration of preventive and emergency responses for power grid resilience enhance-

- ment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(6): 4451-4463.
- [43] ARAB A, KHODAEI A, KHATOR S K, et al. Stochastic pre-hurricane restoration planning for electric power systems infrastructure[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(2): 1046-1054.
- [44] RAHBARI-ASR N, ZHANG Y, CHOW M Y. Cooperative distributed energy scheduling for storage devices and renewables with resiliency against intermittencies[C]//IEEE. International Symposium on Industrial Electronics, Kyoto, Japan, 2016: 612-617.
- [45] ESKANDARPOUR R, KHODAEI A, LIN J. Event-driven security constrained unit commitment[C]//Innovative Smart Grid Technologies Conference, Slovenia, 2016: 1-5.
- [46] DEHGHANIAN P, ZHANG B, DOKIC T, et al. Predictive risk analytics for weather resilient operation of electric power systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(1): 3-15.
- [47] DEHGHANIAN P, ASLAN S, DEHGHANIAN P. Quantifying power system resilience improvement using network reconfiguration[C]//IEEE 60th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS), Boston, USA, 2017: 1364-1367.
- [48] PANTELI M, TRAKAS D N, MANCARELLA P, et al. Boosting the power grid resilience to extreme weather events using defensive islanding[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(6): 2913-2922.
- [49] PHILLIPS L R, CARTES D, LIU W, et al. Agents and islands: managing a power system before, during, and after transition to the islanded state[C]//IEEE/SMC International Conference on System of Systems Engineering. IEEE, 2006.
- [50] WANG Z, WANG J. Self-healing resilient distribution systems based on sectionalization into microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(6): 3139-3149.
- [51] ETO J, LASSETER R, SCHENKMAN B, et al. CERTS microgrid laboratory test bed[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 26(1): 325-332.
- [52] LIU X, SHAHIDEHPOUR M, LI Z, et al. Microgrids for enhancing the power grid resilience in extreme conditions[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(2): 589-597.
- [53] FARZIN H, FOTUHI-FIRUZABAD M, MOEINI-AGHTAIE M. Enhancing power system resilience through hierarchical outage management in multi-microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(6): 2869-2879.
- [54] SCHNEIDER K, TUFFNER F, ELIZONDO M, et al. Evaluating the feasibility to use microgrids as a resiliency resource[C]//Power & Energy Society General Meeting, Boston, USA, 2016: 1-10.
- [55] CHEN C, WANG J, TON D. Modernizing distribution system restoration to achieve resiliency against extreme weather events[J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 105(7): 1267-1288.
- [56] LEI S, CHEN C, LI Y, et al. Resilient disaster recovery logistics of distribution systems: co-optimize service restoration with repair crew and mobile power source dispatch[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(6): 6187-6202.
- [57] ARIF A, WANG Z, WANG J, et al. Power distribution system outage management with co-optimization of repairs, reconfiguration, and DG dispatch[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 9(5): 4109-4118.
- [58] HAFIZ F, CHEN B, CHEN C, et al. Utilising demand response for distribution service restoration to achieve grid resiliency against natural disasters[J]. Generation, Transmission & Distribution, 2019, 13(14): 2942-2950.
- [59] YE Z, WU K, ZHANG Z, et al. A value-of-service based model for resilient distribution system restoration with microgrids[C]//2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia), Chengdu, China, 2019: 1979-1983.
- [60] 翁晓勇, 谭阳红. 考虑移动储能有功时空支撑的不对称配电网负荷恢复策略[J]. 电网技术, 2021, 45(4): 1463-1470.
- WENG X Y, TAN Y H. Load restoration strategy for unbalanced distribution network considering active power temporal-spatial supporting of mobile energy storage[J]. Power System Technology, 2021, 45(4): 1463-1470.
- [61] LI B, CHEN Y, WEI W, et al. Resilient restoration of distribution systems in coordination with electric bus scheduling[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(4): 3314-3325.
- [62] 倪萌, 王蓓蓓, 朱红, 等. 能源互联背景下面向高弹性的多元融合配电网双层分布式优化调度方法研究[J]. 电工技术学报, 2022, 37(1): 208-219.
- NI M, WANG B B, ZHU H, et al. Study of two-layer distributed optimal scheduling strategy for highly elastic multi-resource fusion distribution network in energy interconnection environment[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(1): 208-219.
- [63] 景皓, 贾伯岩, 李小玉, 等. 考虑节点电价机制的主动配电网两阶段动态故障恢复方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(20): 29-37.
- JING H, JIA B Y, LI X Y, et al. A two-stage dynamic fault recovery method for an active distribution network considering the node price mechanism[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(20): 29-37.
- [64] WU L, SHAHIDEHPOUR M, LI T. Stochastic security-constrained unit commitment[J]. IEEE Transactions on Power Sys-

- tems, 2007, 22(2):800-811.
- [65] 侯慧,于士文,李显强,等.基于随机风场概率加权的台风灾害下输电线路损毁预警[J].电力系统自动化,2021,45(7):140-147.
HOU H, YU S W, LI X Q, et al. Early warning for transmission line damage under typhoon disaster based on random wind field probability weighting[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(7):140-147.
- [66] WANG J H, SHAHIDEHPOUR M, LI Z. Security constrained unit commitment with volatile wind power generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(3):1319-1327.
- [67] 张衡,程浩忠,张建平,等.高比例风电背景下计及 N-1 安全网络约束的发电优化规划[J].中国电机工程学报,2018,38(20):5929-5936.
ZHANG H, CHENG H Z, ZHANG J P, et al. Generation and transmission expansion planning considering N-1 security constraints with high penetration of Wind Power[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(20):5929-5936.
- [68] 于佳,任建文,周明.基于机会约束规划的风-蓄联合动态经济调度[J].电网技术,2013,37(8):2116-2122.
YU J, REN J W, ZHOU M. A chance-constrained programming based dynamic economic dispatch of wind farm and pumped-storage power station[J]. Power System Technology, 2013, 37(8):2116-2122.
- [69] 韩畅,梁博森,林振智,等.防灾应急电源优化调度的机会约束规划方法[J].电力自动化设备,2018,38(3):147-154.
HAN C, LIANG B M, LIN Z Z, et al. Chance-constrained programming method for optimal scheduling of emergency power source[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(3):147-154.
- [70] QIU J, ZHAO J, WANG D, et al. Decomposition-based approach to risk-averse transmission expansion planning considering wind power integration[J]. Generation, Transmission & Distribution, 2017, 11(14):3458-3466.
- [71] ZOGRAFOU-BARREDO N M, PATSIOS C, SARANTAKOS I, et al. Microgrid resilience-oriented scheduling: a robust MI-SOCP model[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(3):1867-1879.
- [72] 魏梅芳,吴燕,黎跃龙,等.基于分布鲁棒优化的微电网日前经济运行模型与求解方法[J/OL].电力系统及其自动化学报, 2022:1-12. DOI:10.19635/j.cnki.csu-epsa.000954.
WEI M F, WU Y, LI Y L, et al. Economic operation model and solution method of microgrid based on distributionally robust optimization[J/OL]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2022:1-12. DOI:10.19635/j.cnki.csu-epsa.000954.
- [73] MA S, LI S, WANG Z, et al. Resilience-oriented design of distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(4):2880-2891.
- [74] ALVARADO D, MOREIRA A, MORENO R, et al. Transmission network investment with distributed energy resources and distributionally robust security[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(6):5157-5168.
- [75] ROZHIN E, AMIN K. Machine learning based power grid outage prediction in response to extreme events[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 32(4):3315-3316.
- [76] SUN H, WANG Z, WANG J, et al. Data-driven power outage detection by social sensors[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(5):2516-2524.
- [77] YU T, WANG H, ZHOU B, et al. Multi-agent correlated equilibrium $q(\lambda)$ learning for coordinated smart generation control of interconnected power grids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 30(4):1669-1679.
- [78] ZHANG X, WANG H, ZHOU B, et al. Lifelong learning for complementary generation control of interconnected power grids with high-penetration renewables and EVs[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 33(4):4097-4110.
- [79] ZHANG J, LU C, FANG C, et al. Load shedding scheme with deep reinforcement learning to improve short-term voltage stability[J]. IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia), IEEE, 2018:13-18.
- [80] BU F, DEGHANPOUR K, WANG Z, et al. A data-driven framework for assessing cold load pick-up demand in service restoration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 33(6):4739-4750.

(编辑:贾丽红)