

极端天气下含灵活资源的新型 电力系统韧性研究综述

加鹤萍^{1,2}, 吴昌蔚^{1,2}, 刘敦楠^{1,2}, 杨菁³, 余涛³

(1. 新能源电力与低碳发展研究北京市重点实验室(华北电力大学),北京市 102206;
2. 华北电力大学经济与管理学院,北京市 102206; 3. 国网上海市电力公司,上海市 200122)

摘要:【目的】“双碳”目标下,随着能源低碳化进程和新能源发展步入快车道,低概率、高风险的极端天气给高新能源占比的新型电力系统安全可靠运行带来突出挑战。电力灵活资源如电动汽车、分布式发电等能够为极端天气下的系统韧性提升提供解决方案。【方法】文章首先阐述了电力系统韧性概念特征,揭示了极端天气对新型电力系统的影响;其次,从极端天气下的系统元件建模、系统韧性分析方法、韧性指标体系等三个方面阐述了极端天气下的新型电力系统韧性研究;然后,通过分析极端天气下的电力灵活资源可调能力,从源、网、荷、储四个方面,面向极端天气下的预防、紧急调控与供电快速恢复三个阶段,分析极端天气下考虑灵活资源的新型电力系统韧性提升策略。【结果】最后,针对极端天气下含灵活资源的新型电力系统韧性研究发展方向进行展望,旨在形成极端天气下新型电力系统风险控制及韧性提升的闭环管理,为极端天气下的电力保供提供理论依据。

关键词:极端天气;灵活资源;系统韧性;新型电力系统

中图分类号: TM73

文献标志码: A

文章编号: 1000-7229(2026)01-0090-22

DOI: 10.12204/j.issn.1000-7229.2026.01.008

Review on the Resilience of New Power Systems with Flexible Resources under Extreme Weather Conditions

JIA Heping^{1,2}, WU Changwei^{1,2}, LIU Dunnan^{1,2}, YANG Jing³, YU Tao³

(1. Beijing Key Laboratory of Renewable Energy and Low-carbon Power Development (North China Electric Power University), Beijing 102206, China; 2. School of Economics and Management, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 3. State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200122, China)

ABSTRACT: [Objective] Under China's "dual carbon" goals, as energy decarbonization accelerates and renewable energy deployment enters a fast-growth phase, low-probability but high-risk extreme weather poses significant challenges to the safe and reliable operation of new power systems with high renewable energy penetration. Flexible power resources—such as electric vehicles and distributed generation—offer solutions to enhance system resilience during extreme weather. [Methods] This paper outlines the conceptual characteristics of power system resilience and examines the impact of extreme weather on new power systems. It reviews the resilience research of new power systems under extreme weather from three aspects: system component modeling under extreme weather, system resilience analysis methods, and resilience indicator frameworks. Furthermore, by analyzing the adjustable capacity of flexible power resources during extreme weather, the paper proposes strategies for enhancing the resilience of new power systems considering flexibility and extreme weather from four perspectives (generation, grid, load, and storage), and across three stages (prevention, emergency control, and rapid power restoration). [Results] Finally, the paper identifies research directions on the resilience of new power systems with flexible resources under extreme weather, aiming to establish a closed-loop risk management and resilience enhancement framework, and provide a theoretical basis for ensuring power supply during extreme weather.

This work is supported by the Beijing Social Science Foundation (No. 24JCC101).

KEYWORDS: extreme weather; flexible resources; system resilience; new power system

0 引言

推进国家安全体系和能力现代化建设是实现社会主义现代化国家全面建设的必然要求^[1],也是根据我国实际情况维护国家利益的必然选择^[2]。党的二十大报告对构建国家安全体系进行战略性规划,并明确指出国家安全是实现民族复兴的重要基石。“双碳”目标下,我国出台《关于加强新形势下电力系统稳定工作的指导意见》^[3],明确提出要“提升电力应急供应和事故恢复能力”“建立健全应对极端天气、自然灾害及突发事件等的电力预警和应急响应机制,加强灾害预警预判和各方协调联动”等来加强电力系统应急管理。构建可信的城市电网韧性评估指标体系和量化方法,是开展电网韧性增强规划、投资决策以及韧性提升策略有效性验证的基础^[4]。

然而,近年来低概率、高风险的极端天气频发,高比例新能源接入下,新型电力系统的安全可靠运行面临突出挑战与运行风险。如美国得州极端低温寒潮造成超过480万用户停电^[5];2022年8月,我国四川因极端高温干旱天气引发严峻应急限电事件^[6]。2022年7月,《北京市“十四五”时期电力发展规划》指出,以首都能源安全可靠供应为着力点,打造安全性、绿色低碳、能力充足、智能高效的新型电力系统。

新型电力系统发展呈现风电、光伏等强不确定性新能源发电占比不断提高,电力负荷需求复杂化、多样化等特点,极端天气出现,将放大电力供应、负荷需求及设备故障等多环节不确定性的影响^[7]。

因此,为提高新型电力系统在极端天气下安全可靠运行能力,采取的方法一般分为两大类。一类从加强电力基础设施建设角度出发,提高能源供应基础设施抵御极端气候的能力,这种方法会增加系统投资;另一类从提高极端天气下电力系统的优化决策能力角度出发,提高电力系统应对极端天气变化的能力。

近年来,灵活资源推广应用,电力需求侧响应能力得到极大提升。而在极端天气动态演化场景下,如何进一步挖掘电力灵活资源的价值,在不增加电力基础设施投资的情况下,通过对各类电力灵活资源的优化配置,降低系统运行风险、提升系统韧性,提高新型电力系统安全运行能力亟待研究。本文结合目前研究成果,介绍电力系统韧性概念、韧性与其他性质区别及极端天气对电力系统影响,从电力系统内元件建模、系统韧性分析、韧性指标体系评估三方面阐述极端天气下新型电力系统韧性研究,通过分析极端天气下电力灵活资源可调能力,从源、网、荷、储四个方面,面向极端天气下预防、紧急调控与

供电快速恢复三个阶段,分析极端天气下考虑灵活资源的新型电力系统韧性提升策略,最后对未来研究方向进行展望。

1 极端天气下电力系统韧性概述

1.1 电力系统韧性概述

为应对低概率、高风险的极端事件,政府部门、学术界与工业界共同提出了“韧性”(Resilience)的概念^[8]。“韧性”最早用来描述在外力作用下形变之后的恢复能力,之后逐渐扩展到社会生态系统、工程系统、城市规划等诸多领域并应用至电力系统^[9],其内涵不断丰富,受关注度不断攀升。针对韧性含义及内涵国内外组织和高校也做出了不同侧重的解释。美国能源部认为韧性是扰动事件发生前进行准备、灵活应对变化、抵抗干扰并能够迅速从干扰中恢复的能力^[10]。英国能源研究组织对韧性解释为减轻破坏性事件的影响范围和持续时长的能力,包括事前准备、抵御冲击、灵活适应及迅速复原能力^[11]。国内研究方面,文献[12]认为韧性是电力系统在面对极端事件时能够预防、吸收、适应和快速恢复的能力;文献[13]认为韧性是配电网在自然灾害情况下对关键负载的维持和快速恢复能力;文献[14]指出韧性是电力系统在持续的随机干扰下能够防止系统崩溃、避免解体,并维持正常运作的能力。综上,国内外研究普遍认为,韧性是新型电力系统应对极端天气、保障能源安全的关键属性,需从“预防—抵御—恢复”全链条构建技术体系^[15],并强调灵活资源在提升韧性中的核心作用。因此,电力系统韧性概念可总结为关注低概率高影响事件下系统预防抵御、吸收响应及快速恢复的能力^[16]。图1“梯形图”描述的是电力系统的性能(通常用负荷损失来衡量)在极端天气发生前、中、后的变化情况^[17]。其中 $R(t)$ 为系统

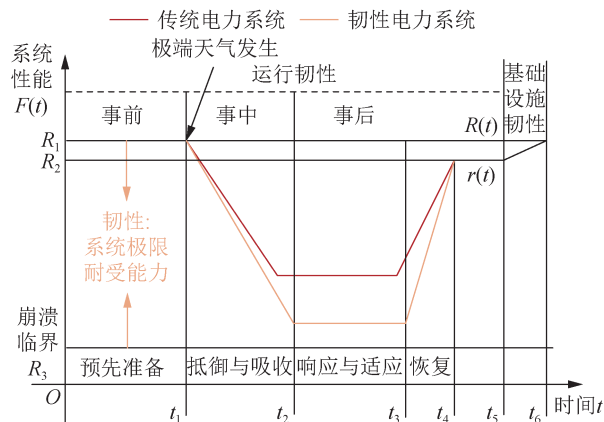


图1 极端天气发生前后韧性电力系统状态示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the state of a resilient power system before and after extreme weather events

目标性能曲线; $r(t)$ 为系统实际性能曲线; R_1 为系统正常状态性能; R_2 为恢复措施用尽后的系统性能; R_3 为系统崩溃临界。

1.2 韧性与其他性质的区别

为更深入理解新型电力系统韧性的概念,可将新型电力系统韧性与其他相关性质进行比较,分析各自异同点进而明确韧性研究重点。韧性作为新型电力系统重要的性质,其与弹性、可靠性、稳定性等之间既有共同点也存在差异。

1) 韧性与弹性。

电力系统弹性和韧性的核心理念基本一致,即在面对极端事件时具有一定程度的抵御能力、适应能力以及恢复能力。抵御能力旨在降低极端事件引发系统故障概率及严重程度;适应能力指系统在受损后仍能维持部分电网稳定运行;恢复能力强调系统在极端事件后能在较短时间内恢复到接近事前的水平和状态。

国内学术界和产业界对电力系统弹性与韧性定义理解存在共识,虽然韧性和弹性两者同样面向小概率、高风险极端事件,但各有侧重,弹性侧重于极端事件中的抗扰动能力,而韧性更关注系统在长期、持续的随机扰动下的稳定性。

弹性方面,文献[18]认为是在极端事件中能够预防、吸收、适应和快速恢复的能力,不仅是系统在极端事件中的抗扰动能力,还包括事件后的快速恢复能力。韧性方面,文献[14]认为其侧重于电力系统在持续随机扰动下的耐受能力,强调系统在长期、持续的扰动下保持正常运行的能力。

2) 韧性与可靠性。

电力系统可靠性理论经过长期发展,已建立起完善的定义体系和标准化指标,并在业界得到普遍应用。

可靠性侧重系统在常规运行条件下的持续供电能力,评估系统在长时间尺度下的平均性能。韧性侧重于电力系统在极端事件中的表现,强调在低概率、高影响事件下的抗扰动能力、适应能力和快速恢复能力^[19]。

具体而言,可靠性通常以停电频率、持续时间等指标衡量,反映系统抵御日常故障和扰动的性能。韧性则关注系统在极端条件下的最小化损失和快速恢复供电等指标,反映系统应对低概率、高影响事件的能力。

3) 韧性与稳定性。

稳定性主要关注系统在受到扰动后保持各参数在允许范围内并恢复到原来运行状态或达到新的稳

定运行状态的能力,其主要着眼于系统的动态行为和稳定性边界的维持,研究系统在暂态过程中的动态行为,例如功角稳定、电压稳定和频率稳定等,稳定性属于技术层面的动态特性。韧性属于系统层面的综合能力,更侧重于系统在遭受极端事件后维持基本功能、最小化损失并快速恢复的能力,强调系统在极端条件下的适应性和恢复力。

1.3 极端天气对电力系统的影响

过去几十年的气候演变显示,南部地区具有高温湿润气候特征(具体表现为降雨量增多、气温升高、降雨在时间和空间上不均衡性增加且极端气候事件的频率上升),北部地区则趋于高温干燥气候状态(具体表现为气温升高、降雨量减少、河流流量降低、湖泊面积缩小以及生态环境退化)。2024年4月开始,我国南方地区频繁遭遇复合型强对流天气,包括狂风、冰雹、暴雨、雷暴和气温剧降等极端现象,这些现象交替出现或同时发生^[20];6月华北和黄淮地区高温天气迅速加剧,山东、河北超过20个气象站刷新当地6月上旬极值^[21]。总体来看,我国气候呈现出复杂多变的特征,极端天气频发导致我国电力气象灾害种类繁多,以GB/T 28592—2012《电力气象灾害预警等级》为例^[22],按成因及灾害等级可分为:1)天气灾害,如暴雨、干旱、台风、冰灾、高温、低温冰冻、沙尘暴;2)气候灾害,如季风异常等现象。而本文主要考虑极端天气的影响,极端天气对电力系统影响按照GB/T 28593—2012《电力气象灾害风险评估技术导则》^[23]可分为:1)突发性影响,发展迅速、危害严重的灾害,如台风、暴雨、冰雹、龙卷风等;2)缓发性影响,持续时间长、影响范围广的灾害,如干旱、高温热浪、低温冰冻等。而各类天气灾害对电力系统各环节的影响各不相同。如台风、暴雨、洪涝易引发输电线路倒塔断线、变电站设备进水受潮,导致大面积停电;干旱会导致水电出力下降,加剧电力供需矛盾;高温热浪会降低发电效率,增加线路损耗,并导致用电负荷激增;低温冰冻会导致输电线路覆冰、风机叶片结冰,影响电力输送和风电出力;雷电易引发线路雷击跳闸、设备绝缘击穿,威胁电力系统安全稳定运行;冰雹、大风、沙尘暴则会对电力设施造成机械损伤,影响设备正常运行。因此,本文将从宏观与微观两个层面解释极端天气对新型电力系统的影响。宏观层面关注电力系统的主要组成部分及其整体运行状况,而微观层面则深入探究具体的气候因素对电力系统各部分的详细影响,两者共同构成完整分析框架。

极端天气频发,对新能源高占比的新型电力系统安全可靠供电带来不可忽视的影响。极端天气对电

力系统的宏观影响如图 2 所示。从宏观层面看,影响主要分为三个维度:1)电力供应短缺,从电源侧、电网侧及负荷侧三个主要方面产生影响^[24];2)电力系统稳定性下降,极端天气影响频率稳定性、电压稳定性、功角稳定性;3)电力系统直接或间接经济损失。

从微观层面看,不同类型极端天气对电力系统会产生不同的具体影响效果,且随着极端天气的动态演化而变化,会触发整个电力系统的连锁反应,打破系统原本的供需平衡状态,同时系统呈现非线性反馈,进而导致系统崩溃。具体微观影响分为:1)电

力设备损坏;2)电力系统保护误动与拒动。不同类型极端天气对电力系统产生不同的微观影响,本文总结几种典型极端天气造成的影响,如表 1 所示。

2 极端天气新型电力系统韧性分析

2.1 极端天气新型电力系统韧性分析概述

极端天气对电力系统的韧性提出前所未有的挑战。随着全球气候变化的加剧,极端天气事件的频率和强度不断增加,电力系统面临更加复杂和严峻的考验。具体而言,面临的主要挑战如图 3 所示。

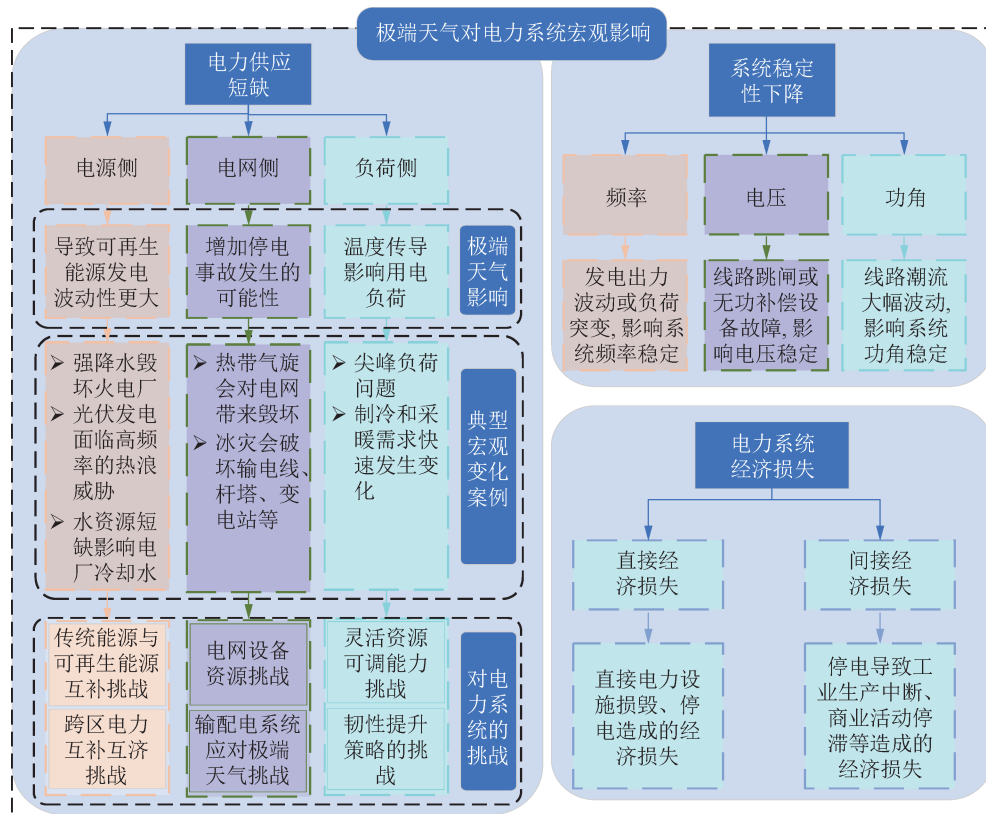


图 2 极端天气宏观影响

Fig. 2 Macro impacts of extreme weather

表 1 典型极端天气对电力系统的微观影响

Table 1 Micro-impacts of common extreme weather on power systems

速度	类型	影响	分类	实例	文献
缓发性	低温寒潮	影响温控负荷;电池难以实现大电流放电,且因阻抗的增加,导致充电电压迅速上升	电力设备损坏	影响电动汽车电池充放电特性	[25]
	高温	高温导致变压器油温过高、绝缘老化;线路载流量下降;用电负荷激增	电力设备损坏	2013 年南方高温多地变压器故障	[26]
	干旱	干旱导致水电出力下降;火电厂冷却水不足	电力设备损坏	水资源短缺影响电厂冷却用水;制冷需求激增	[27]
突发性	冰灾	覆冰导致输电导线容易发生闪络事故;融冰易形成冰闪,烧伤绝缘子,引起绝缘子绝缘强度下降	电力设备损坏	2016 年江苏冰雹天气导致多地光伏电站受损	[28]
	台风雷暴	输电线路倒塔断线、绝缘子闪络、金具损坏;导致变电站设备进水受潮;雷击导致输电线路跳闸	电力设备损坏;电力系统保护误动拒动	2019 年超强台风“利奇马”导致电力设施受损	[29]
	沙尘	沙尘暴导致绝缘子污闪,对电力设施造成物理损害	电力设备损坏	2020 年内蒙古沙尘暴天气导致多条输电线路跳闸	[30]

基于此,首先需要针对极端天气影响机理,构建电力系统内元件故障模型;其次,综合考虑电力系统中元件及设备在极端天气下多状态分析模型,总结

新型电力系统韧性分析方法;最后,阐述电力系统韧性指标体系的划分与度量方法,形成极端天气电力系统多维韧性指标体系及评估策略。图 4 为极端天

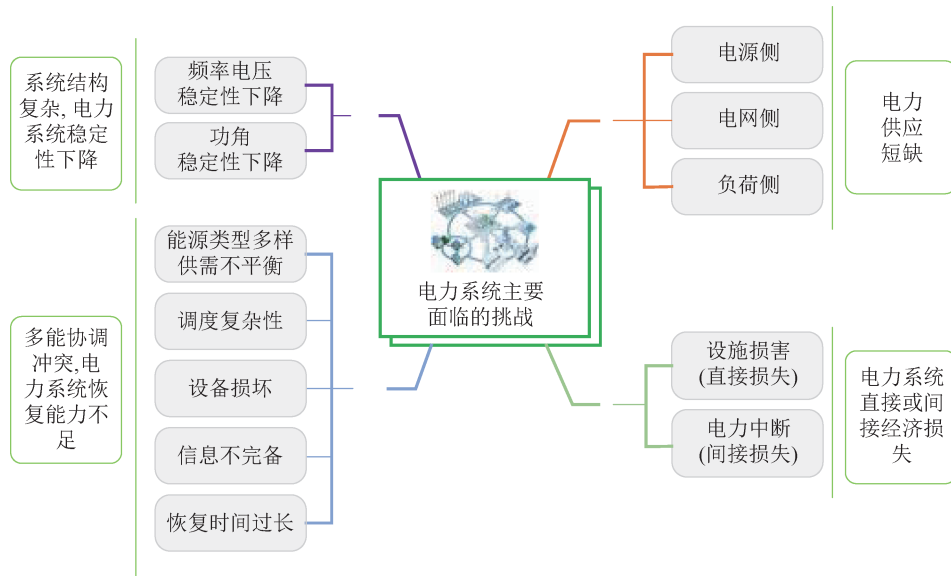


图 3 极端天气下电力系统面临的主要挑战

Fig. 3 The main challenges faced by power systems under extreme weather conditions

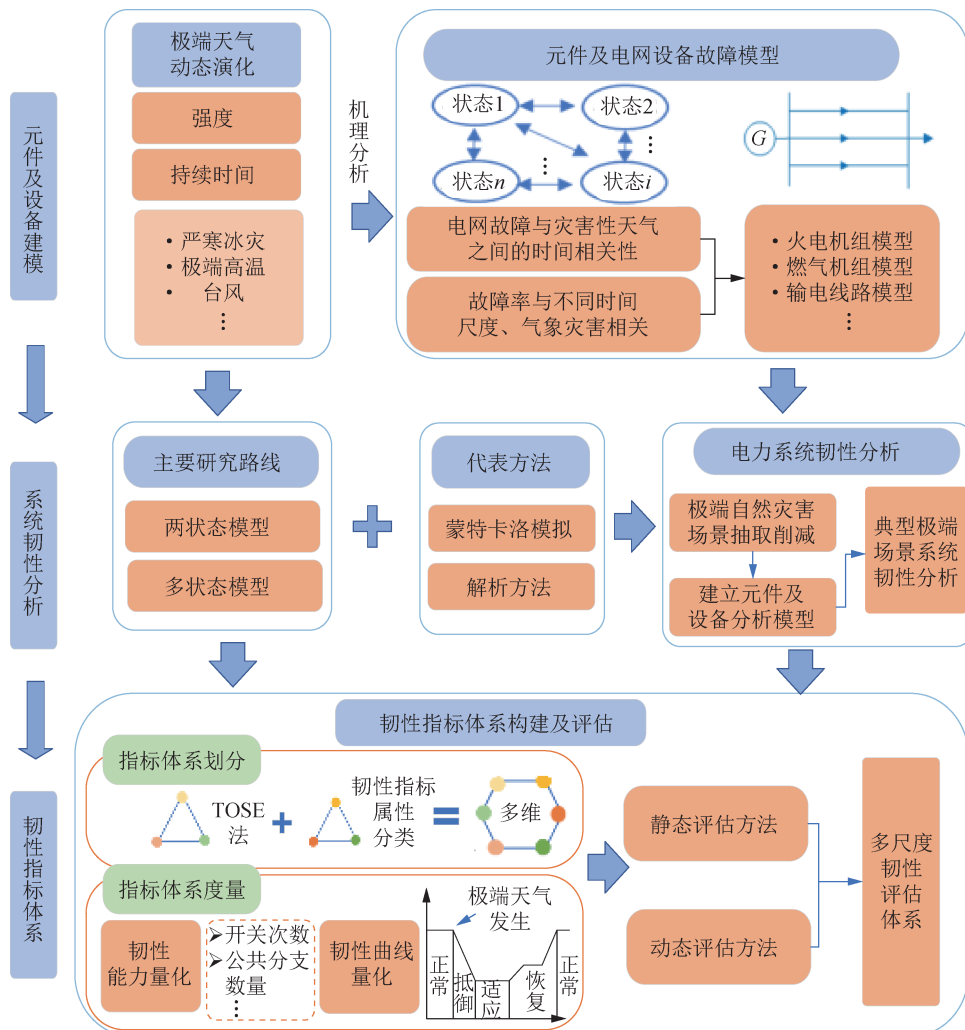


图 4 极端天气下新型电力系统韧性多维分析

Fig. 4 Multi-dimensional resilience analysis of new power systems under extreme weather conditions

气下新型电力系统韧性分析路线图。

2.2 极端天气下电力系统元件及设备分析

极端天气对电力系统的稳定运行造成影响。一方面,由于极端天气现象未能及时得到有效控制,电力设施持续遭受极端气候事件的冲击;另一方面,现行电力系统规范和法规尚未将极端天气对电力设施的影响纳入考量^[31]。由于极端气候事件等因素,电力系统面临着巨大的风险。极端天气场景下,电力系统元件及电网设备故障率与常规场景相比有所增加,难以精确刻画其在极端天气下的状态,建立精确的极端天气影响模型是一项极具挑战性的任务。因此,在电力系统韧性研究中,通过量化极端天气对电力系统的影响,寻找故障率与天气因素之间的关联关系,从而进行元件及设备故障建模。在众多极端天气中,由于冰灾、台风和高温对电力系统构成严重威胁,且易导致大规模元件故障使得电网瘫痪;此外,近年来频发的城市洪涝、间歇寒潮等典型极端天气也对社会生产经济造成极大影响,因此把此五类情况作为重点分析对象,极端天气下电力元件及设备分析流程图如图 5 所示。

对上文提到典型极端天气,列举部分情况下元件及设备故障分析模型,具体如下:

1)冰灾。冰灾的主要特征参数包括覆冰量、湿度与降水以及气温,其中覆冰量将直接影响输电导线的质量和弧垂或影响风电机组叶片运行积雪程度等。文献[32]利用通用生成函数(universal generating function,UGF)来描述冰灾下架空线路、风电机组随机故障的不确定性;文献[33]建立了冰雪灾害影响下的

输电线路模型,提出融冰调度的电网韧性提升模型;文献[34]通过对杆塔和导线上的冰负荷进行分析,构建冰暴天气条件下设备故障预测模型。

2)台风。台风天气关键因素包括台风的移动轨迹、中心气压和台风中心的最大风速梯度等^[35]。基于这些因素,构建较为精确的台风风场模型,如Batts^[36]、Shapiro、Weibull等模型。在探讨台风对电网损害的研究中,文献[35]依据台风历史路径数据,开发台风时空变化模型和电力线路故障模型;文献[37]用Batts风场模型来确定风速,并分析极端风力事件对输电线和杆塔风力负荷的影响,同时考虑输电线和杆塔的组件强度,得出不同负荷效应下的电力线路故障率函数。

3)高温。高温情况会导致电力需求急剧上升、线路绝缘性能退化及供电缺口扩大等问题,这些问题导致电力系统的元件及设备故障率上升。通过分析高温天气时段与节点负荷比率之间的对应关系,进一步研究电力流动变化,从而建立元件故障率模型^[38]。文献[39]考虑温度升高对电缆线路绝缘老化和接头应力影响,建立电缆型配电网线路故障模型;高温天气下大量水资源蒸发导致水电站水位下降,因此建立水轮机故障模型^[40];此外,高温天气易导致风力发电机过热,因此建立风电机故障模型^[41]。

4)城市洪涝。城市洪涝灾害特征参数主要包括洪水水位、浸泡时间、冲击力等。对于输电线路,文献[42]通过分析洪水水位与杆塔基础强度的关系,建立了基于洪水水位的故障模型;对于变电站设备,文献[43]分析变电站设备的防水等级和洪水浸泡时

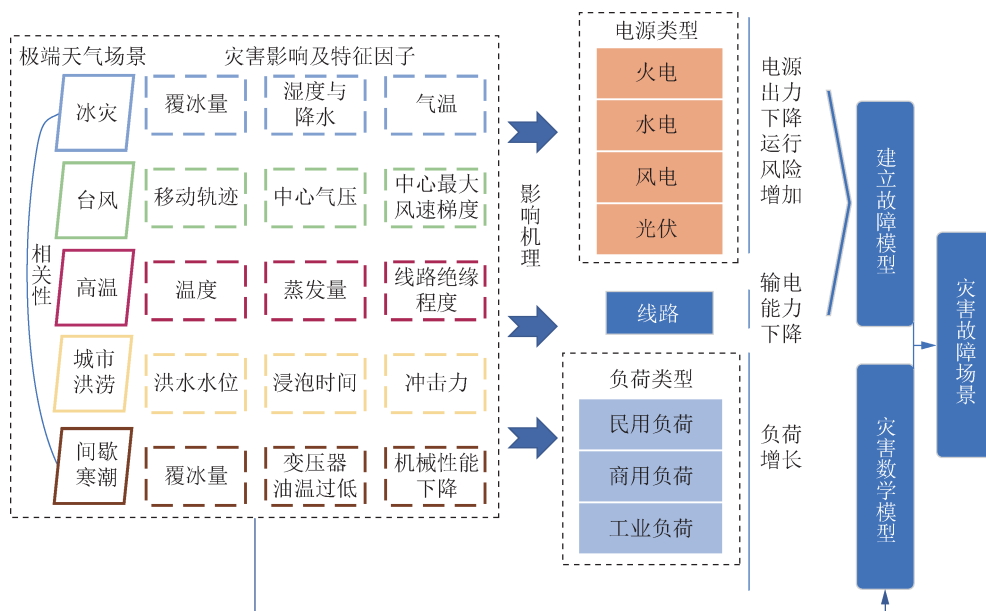


图 5 极端天气下电力元件及设备分析流程图

Fig. 5 Analysis flowchart of power components and equipment under extreme weather conditions

间,建立故障模型;对于配电设备,文献[44]通过分析配电设备的绝缘性能和洪水浸泡深度,建立设备短路故障模型。

5) 间歇寒潮。间歇寒潮时电力系统面临的主要挑战包括输电线路覆冰、变压器油温过低、设备机械性能下降等问题,对输电线路的影响已在前文冰灾部分介绍。针对其他问题,文献[45]考虑油温与绝缘老化之间的关系,提出基于温度变化的变压器低温条件故障函数;文献[46]考虑低温对设备机械性能和绝缘性能的影响,建立基于温度的配电设备故障率模型。

极端天气包括但不限于低温、高温、干旱、台风、冰灾和沙尘等,这些气候现象能在很短的时间内引起电力系统基础设施重大故障,进而影响电力系统安全和稳定运行^[47]。因此,针对极端天气机理分析不同区域的元件及电网设备,构建极端天气场景下元件及电网设备时空故障模型是后续研究的基础。

2.3 电力系统韧性分析

极端天气下,电力系统不同时间、不同区域多种参数耦合,韧性分析的模型规模剧增,导致韧性评估效率低下,难以满足极端天气场景下快速决策需求。基于前述极端天气下元件及设备故障模型,对新型电力系统建立多尺度韧性分析模型是韧性高效分析的关键。电力系统韧性分析如图6所示。

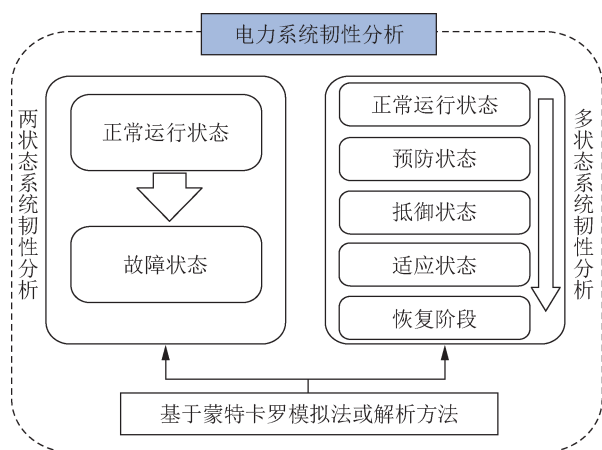


图6 电力系统韧性分析

Fig. 6 Resilience analysis of power systems

目前电力系统韧性分析主要从两个方面展开:

1) 考虑系统元件及电网设备在正常运行状态和故障状态下的两状态模型。文献[48]建立元件两状态转移概率模型,基于蒙特卡罗模拟方法提出台风天气下的电力系统韧性评估方法;文献[49]建立极端台风灾害下电网线路故障恢复模型,构建差异化规划两阶段优化模型进行电网规划;文献[50]采用性能时程响应函数法,结合攻防双方策略博弈模型,基于蒙特卡罗模拟方法建立两状态蓄意攻击下城市

电力网络毁伤韧性评估方法。通过对文献的整理可知,在极端天气条件下,该两状态模型可评估系统从故障状态恢复到正常状态的能力,这种方法适用于简化分析,但处理具有多个运行状态和复杂恢复路径的系统时可能不够精确。

2) 考虑系统元件及设备在极端场景下的多状态模型^[51]。文献[52]提出基于半马尔科夫过程的弹性模型来描述元件状态转移分布,并提出快速重复算法计算多状态网络韧性;文献[53]针对工程系统进一步讨论了多状态网络韧性评估方法及其进展;文献[54]针对大型装备复杂系统,通过构建面向不同耦合结构的极限序列核和极限可靠度逼近函数,探索多状态可靠性建模、分析与快速评估方法。通过对文献的整理可知,上述方法能够在考虑电力系统自身特性基础上,分析多状态电力系统韧性,该多状态模型在电力系统中提供全面、灵活框架来分析和预测多个元件及设备运行状态。

通过对现有文献整理,归纳出电力系统韧性分析具体方法主要为蒙特卡罗模拟法、解析法等^[55]。

1) 蒙特卡罗模拟法通过随机抽样技术来模拟系统运行场景,通过重复抽样过程并统计结果的频率分布,直至系统的性能指标趋于稳定^[56],但由于可再生能源的输出功率和元件的故障率随时间而变化,使结果收敛变得复杂,尤其在变化的故障率条件下,韧性分析指标的收敛变得更加困难。

2) 解析方法通过分析各种预设事件的概率及其对系统的影响,来综合计算系统的韧性指标,该方法避免大规模的场景模拟和抽样,计算效率更高,且模型的数学和物理基础更加明确^[57],但传统解析方法假设元件的故障率是恒定的,这无法准确反映系统在短期内的可靠性变化。

2.4 电力系统韧性指标体系

在进行电力系统的结构优化、负荷管理和资源配置时,为了更直观展示所采取策略效果,首先需根据电力系统韧性的定义和特点,建立韧性指标体系。这些指标将为各种优化策略的模型提供目标导向,为评估优化结果提供评判标准,从而构建完整的韧性评估和提升流程,如图7所示。

指标体系构建包括划分和量化两个方面^[16]。指标划分常与评估者的观点和关注的问题紧密相连,在电力系统韧性指标划分中广泛应用TOSE法^[58],对技术(technology)、组织(organization)、社会(society)和经济(economy)四个方面的指标体系进行划分。文献[59]从经济层面考虑,以期望供电缺额和期望供电缺额成本作为韧性指标;文献[60]从技术层面考虑

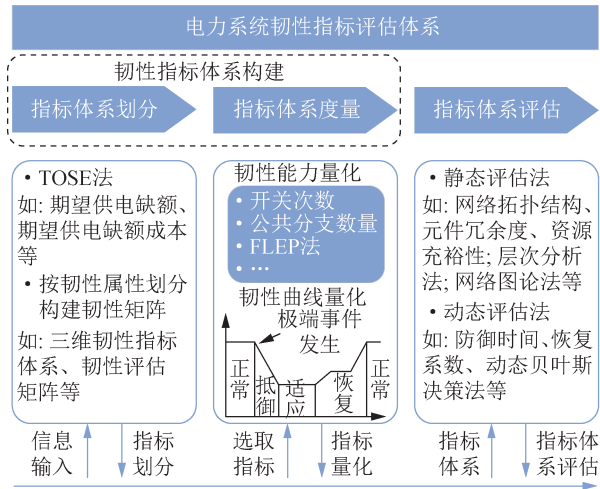


图 7 韧性指标体系构建及评估

Fig. 7 Construction and evaluation of resilience indicator system

建立广义极值分布模型,通过吸收率、适应率和修复速率 3 个综合指标进行韧性评估。除上述建立多种韧性指标之外,也有研究人员通过引入韧性评估矩阵进行分析^[61],文献[62]提出三维韧性评估指标体系,该体系通过构建三维矩阵结构,包含状态、架构、时间等属性对配电网进行韧性评估;文献[63]描述的系统韧性包含冗余性、有源型、鲁棒性等基础属性。

对于指标量化,目前主要包括韧性能力量化与韧性曲线量化两种方法^[63]。

1)韧性能力量化是在特定时间点或条件下,对电力系统韧性的评估,侧重于评估系统在某一特定状态下的韧性水平。文献[64]提出 FLEP (fast, low, extensive, promptly) 指标, F 、 L 描述下降速度及性能损失低点, E 描述灾害影响的广度, P 描述以怎样的速度恢复供电;文献[65]提出 AWR (anticipate, withstand, recover) 韧性度量框架,创新性地将预防、抵御和恢复三阶段能力整合到统一度量方法中,量化系统在极端天气发生前风险预测与准备能力、事件发生时抗干扰与性能保持能力,及事件过后快速恢复能力;还有学者引入公共分支数量、开关操作次数和设备可用性等评价指标^[66]。

2)韧性曲线量化考虑时间因素,评估电力系统在不同时间段内的韧性变化,能够更好地反映系统在面对连续变化的外部条件(如天气变化、负荷波动等)时的适应性和恢复力,刻画随时间变化的韧性趋势。传统动态量化指标通常是基于韧性曲线给出的,即用面积定义的韧性指标,通过计算梯形图中系统性能曲线与时间的积分得到^[67];随着研究的不断深入,有研究人员对传统韧性曲线量化方法进行拓展^[68],文献[69]以台风天气绘制系统性能曲线,采

用极值概率分布基于历史数据模拟未来极端天气灾害的全过程,考虑故障发生后根据负荷的重要性及切负荷与总负荷的比例来衡量配电网的韧性,并将该比例作为评估韧性的关键指标纳入考量;文献[59, 70-72]针对韧性曲线的不同阶段构建韧性指标,包括维修时间、负荷中断率、自愈恢复能力、最大负荷损失等。根据图 1,总结代表性韧性量化指标如表 2 所示。

表 2 代表性韧性量化指标

Table 2 Representative quantitative indicators of resilience

类型	指标	公式	参考文献
基础指标	基础指标	$F = \int_{t_1}^{t_2} [R'(t) - r'(t)] dt$	[67]
	指标拓展	$F = \int_{t_1}^{t_2} r'(t) dt / \int_{t_1}^{t_2} R'(t) dt$	[68]
	极值概率分布模型	$R = \int_{t_0}^{t_1} P(Q(t) \geq Q_{min}) dt$	[69]
韧性曲线量化	维修时间	$T_{repair} = \sum_{i=1}^n t_i$	[70]
	负荷中断率	$L_{interrupt} = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{L_{total}}$	[71]
	自愈恢复能力	$R_{self-heal} = \frac{T_{self-heal}}{T_{total}}$	[72]
韧性能力量化	公共分支数量	$N_{branch} = \sum_{i=1}^n b_i$	[66]
	开关操作次数	$N_{switch} = \sum_{i=1}^n s_i$	[73]
	设备可用性	$A_{device} = \frac{T_{up}}{T_{up} + T_{down}}$	[66]

表 2 公式中: $R'(t)$ 表示 t 时间收益率; $r'(t)$ 表示 t 时间成本率; $Q(t)$ 表示在 t 时间性能变量; t_i 表示第 i 次维修事件所需的时间; t_f 表示最终时间; L_i 表示第 i 次中断事件中损失的负荷量; L_{total} 表示总负荷量; $T_{self-heal}$ 表示系统自愈恢复的总时间; T_{total} 表示总观察时间; b_i 表示第 i 个分支的计数; s_i 表示第 i 次开关操作; T_{up} 表示总正常运行时间; T_{down} 表示总停机时间。

韧性评估中系统性能常采用负荷加权量表示,则基于曲线积分的韧性指标转化为:

$$F = \int_{t_1}^{t_2} [R(t) - r(t)] dt = \int_{t_1, i \in \Omega}^{t_2} \omega_i P_i dt = \sum_{i \in \Omega} \omega_i P_i t_i \quad (1)$$

式中: Ω 为重要用户集合; P_i 为 t_i 时间损失的负荷量; ω_i 为负荷重要程度系数。

韧性指标体系构建是韧性评估的基础,有效的电力系统韧性指标体系评估能将极端天气带来的影响降至最低。目前韧性评估方法主要分为:

1)静态韧性评估^[63]。聚焦系统在特定维度的韧性,该指标主要考虑系统在遭受干扰后性能降低以

及故障恢复期间性能提升的能力。如考虑网络拓扑结构、元件冗余度、资源充裕性等因素^[74]构建韧性评估指标;采用层次分析法^[30]、网络图论法^[75]等对系统韧性进行评估。

2)动态韧性评估。考虑系统抵抗、适应和恢复能力,聚焦系统遭受攻击后行为,包括紧急处理、故障自愈和故障元件抢修等,以评估系统在面对不同故障情况下的应对策略。如文献[76]将电网遭受极端事件分为预防、适应和恢复,并构建含重要负

荷平均中断时间、恢复系数和防御时间韧性评估指标;文献[77]考虑高温对元件影响,利用脆弱性曲线建立故障概率模型,并构建含应变力、抵御力、恢复力的综合韧性评估指标;文献[78]提出基于动态贝叶斯多准则决策,考虑在不同时间片上进行评估的方法。

综上所述,在面临极端天气下电力系统韧性挑战时,表3总结了目前电力系统相关的解决方法。

表3 极端天气下电力系统韧性挑战及系统性解决方法总结

Table 3 Challenges to power system resilience under extreme weather and summary of systematic solutions

挑战	分析过程	具体措施	相关技术	系统性方法
电力供应短缺	电力系统元件及设备分析	建立极端天气下的元件故障模型,量化天气因素与故障率的关系;针对极端天气,优化源、网、荷侧资源配置	冰灾、台风、高温等极端天气下的元件故障模型(如UGF模型、Batts风场模型);多阶段规划与优化调度模型	1)增加备用发电容量(如储能系统、分布式能源);2)优化电网调度策略,保障关键负荷;3)提升发电设备耐高温、耐寒性能;4)虚拟电厂技术,聚合分布式能源和储能资源
	韧性分析	采用蒙特卡罗模拟法、解析法等,评估极端天气下电力系统供应能力	蒙特卡罗模拟法、解析法;多状态可靠性模型(如半马尔科夫过程模型)	
	韧性指标分析	构建韧性指标体系,量化电力供应短缺的影响;采用韧性曲线量化方法,评估系统在不同时间段的供电能力	韧性曲线量化方法(如面积定义的韧性指标);负荷加权量表示韧性指标	
系统结构复杂,电力系统稳定性下降	电力系统元件及设备分析	针对高温、低温等极端天气,建立变压器、输电线路、风机等设备的故障模型;优化设备设计,提升其抗极端天气能力(如耐高温变压器、防覆冰线路)	高温下的电缆型配电网故障模型;低温下的变压器故障率模型	1)安装动态无功补偿装置(如SVG、STATCOM);2)采用先进的控制策略(如广域测量系统WAMS);3)提升输电线路耐高温、耐寒、抗冰能力;4)引入人工智能预测模型
	韧性分析	分析极端天气对系统频率、电压和功角稳定性的影响;建立动态韧性评估模型	动态韧性评估模型(如基于贝叶斯网络的评估方法);系统稳定性边界分析	
	韧性指标分析	构建稳定性相关的韧性指标,如频率稳定性指标、电压稳定性指标	频率稳定性指标、电压稳定性指标;动态韧性曲线量化方法	
直接或间接经济损失	电力系统元件及设备分析	优化设备布局,减少极端天气对关键设备的损害	台风下的输电线路故障模型;洪水下的变电站设备故障模型	1)加强设备抗灾设计(防风、冰、水);2)建立快速响应机制,缩短停电时间;3)实施需求侧管理,减少高峰负荷;4)区块链技术,优化电力市场交易
	韧性分析	评估极端天气对电力系统经济的影响,量化停电损失	经济损失评估(如期望供电缺额成本);风险量化分析方法	
	韧性指标分析	构建经济相关的韧性指标,如期望供电缺额、期望供电缺额成本	期望供电缺额、期望供电缺额成本	
多能协调冲突,系统恢复力不足	电力系统元件及设备分析	针对极端天气下设备损坏,建立恢复时间模型;优化设备维护策略,提升设备恢复能力(如移动式储能、应急发电车)	设备恢复时间模型;移动储能调度优化模型	1)提前部署应急资源;2)采用智能巡检(如无人机)快速定位故障;3)提升设备模块化设计便于更换修复;4)引入移动储能和应急发电车,快速恢复关键负荷供电
	韧性分析	建立恢复能力评估模型,分析系统在不同阶段的恢复效率	恢复能力评估模型(如基于动态贝叶斯网络的评估方法);多阶段恢复优化模型	
	韧性指标分析	构建恢复能力相关的韧性指标,如维修时间、负荷中断率	维修时间、负荷中断率	

3 极端天气下含灵活资源的韧性提升策略

3.1 电力系统内灵活资源概念及类型

3.1.1 电力灵活资源概念

电力灵活资源概念近十年才被正式提出,并得到国际能源署(International Energy Agency, IEA)和北美电力可靠性委员会(North American Electric Reliability Corporation, NERC)等国际组织的认可^[79]。早期,电力系统灵活性资源主要依赖于传统可调节电源,如火电、水电^[80],这些资源提供一定的调峰能力,但响应速度和调节范围有限。随着电力市场化改革推进,需求侧资源开始参与电力市场,如需求响应和辅助服务市场交易^[81],用户可以利用需求侧资源灵活性和供需互动灵活性充分挖掘市场潜力。面对日益增长的不确定性,现代电力系统主要任务是确保系统的安全和稳定运行,需要充分利用“源网荷储”等各方面资源的灵活性^[82],以便在供需变化时能

迅速做出调整。

综上所述,电力系统灵活资源是在一定时间尺度,输出功率能够被调控的单元,具有以一定的成本适应发电、电网及负荷随机变化的能力,可通过灵活的控制调节实现对电力系统的有效管理^[83]。

3.1.2 电力灵活资源类型及应对极端天气措施

随着新型电力系统加快构建,大规模可再生能源并网发电的背景下,要保证电网安全稳定,挖掘更多电力灵活性资源至关重要,因此对源、网、荷、储灵活资源进行整理,深入挖掘在提升电力系统韧性方面的潜力,进而在极端天气来临时对电力系统规划和投资提供指导^[84]。

1)源侧。极端天气情况下电源侧灵活资源可通过提高可再生能源发电稳定性和互补性,以及强化传统电源的应急响应能力来有效增强新型电力系统韧性。传统应对方法主要是加固基础设施,如表4所示;也可通过优化调度调节出力进行应急响应^[85],如表5所示。

表 4 部分源侧资源传统应对极端天气措施

Table 4 Conventional measures of some source-side resources for addressing extreme weather

类型	极端天气	传统应对措施	作用
火电	雷暴、台风	海岸防御(隔板和海堤)	物理屏障减少海平面上升对沿海基础设施破坏,保障电厂运行安全
	高温、干旱	冷却系统改进(废水使用、减少蒸发损失、改进干式冷却塔);开发新的水源,增加水处理工程的数量;改进冷却系统以提高泵送能力	提高冷却水利用效率,降低冷却水排放温度,减少水资源消耗,确保电厂在高温干旱下的稳定运行
	洪水、暴雨	煤炭储备和燃料储存保护;防洪改进(防洪屏障、堤坝)	优化燃料储存和防洪设施,减少洪水对供应链影响,确保电厂持续供电
水电	洪水、暴雨	改变更适合水流的涡轮机类型;建造梯级水电站	优化水轮机设计,减少降水波动对水电输出影响
	高温、干旱	安装可控的溢洪道闸门,并修改溢洪道容量;增加储水库	调节水库容量和溢洪道设计,降低高温干旱条件下水库淤泥沉积风险
风电	低温、寒潮	加热丝和沿叶片的充气膜;纳米结构材料的覆盖物	防止水电站设备在低温条件下结冰
	暴雨、雷暴	加固杆塔和地基;机舱避雷针;叶片避雷保护;电流隔离、过电压避雷器	结构加固和防雷设计,减少雷击对风电机组损害
光伏	沙尘暴、台风	将光伏板置于云量低且少沙尘区域	优化光伏系统布局,减少沙尘和云量对光伏效率的影响
	高温	改进高温峰值的结构	结构优化,降低高温对光伏组件和电池效率影响

2)网侧。通过优化电网建设和运行调度,可以确保电力供应稳定性和安全性,提升电力系统吸纳可再生能源发电能力,促进电力资源高效分配,主要通过电网智能化、数字化建设及调节技术的应用,解决新能源大规模并网及分布式电源接入电网时的复杂问题,进而增强电网在极端天气下的稳定性和韧性^[95],部分网侧灵活资源传统应对极端天气措施如表6所示,改进措施如表7所示。

3)荷侧。灵活的负荷管理能有效平抑负荷峰值,在极端天气导致的用电需求波动时,通过需求响

应等措施平衡供需,提升电力系统的抗干扰能力和恢复速度。主要类型分为民用、商用及工业负荷^[100],详细分类如表8所示,典型可控负荷应对极端天气措施如表9所示。

4)储侧。储能资源在新型电力系统因极端天气发生扰动时能提供快速功率支撑,并作为应急电源保障重要负荷供电安全,替代部分线路改造,有效降低电网的防灾抗灾投资成本。储能主要分为机械储能、电化学储能、热储能和化学储能四大类,具体分类如表10所示。基于现有研究,储能类型多种多样,每

表 5 部分源侧资源应对极端天气的改进措施

Table 5 Improved measures of some source-side resources for addressing extreme weather

类别	应对极端天气的改进措施	文献
传统发电	火电(燃料供应链优化、设备耐候性提升等) [86]	[86]
	水电(水库调度优化、洪水风险管理等) [87]	[87]
	智能数字化技术优化运行策略 [88]	[88]
可再生能源发电	光伏发电和风电选址 [89]	[89]
	光伏发电和风电优化调度 [90]	[90]
分布式发电	分布式发电机选址规划 [91]	[91]
	移动应急发电机调度 [92]	[92]
形成综合能源系统	基于韧性指标进行动态调整 [93]	[93]
	预防性和主动性规划和调度 [94]	[94]

表 6 部分网侧灵活资源传统应对极端天气措施

Table 6 Conventional measures of some grid-side flexible resources for addressing extreme weather

类型	极端天气	传统应对措施	作用
变电站	高温	改进变电站冷却系统	降低故障概率
	暴雨、洪水	抬高变压器和相应的组件	免受洪水和强降雨的影响
	低温、寒潮	使用红外技术、乙二醇液体和蒸汽除冰技术	提高生产线承载能力
线路、杆塔	高温	安装地下电缆或加固架空线路	提高生产线承载能力
	台风	设计更高标准	防止结构损坏
	低温、寒潮	使用高压热水射流、消火栓和除冰飞机	防止结构损坏

表 7 部分网侧灵活资源应对极端天气改进措施

Table 7 Improved measures of some grid-side flexible resources for addressing extreme weather

类别	应对极端天气的具体改进措施	文献
网络重构	动态拓扑优化 [96]	[96]
	分布式能源接入	[96]
互联互通	区域电网互联 [97]	[97]
	多能源协同调度	[97]
柔性输电	柔性交流输电系统 [98]	[98]
智能 ICT 系统	智能化感知、预测与动态调控(如基站健康度检测) [99]	[99]

种技术都有其特定优势和局限性,因此需根据不同特点对储能类型进行选择,详细方法如表 11 所示。

3.2 电力灵活资源可调能力分析

针对电力灵活性资源可调能力分析研究目的、研究方向的不同,目前研究主要可以分为基于常规场景与少部分极端天气两类,包括:负荷侧电动汽

表 8 典型可控负荷及其极端天气下作用

Table 8 Typical controllable loads and their role in extreme weather

类型	具体资源	极端天气下作用
居民负荷	民用电动汽车	备用电源
	温控负荷(热、气负荷)	负荷调整,能源平衡
商业负荷	智能家居	应急响应
	电动汽车换电站	充电调度,能源分配
工业负荷	楼宇中央空调(热、气负荷)	能耗调整
	数据中心	能效优化
工业负荷	制氯、造纸、电解铝、水泥、炼钢	工业用电调整,应急保障

表 9 典型可控负荷应对极端天气措施

Table 9 Measures for typical controllable loads to address extreme weather

类别	应对极端天气的具体措施	文献
减载	优先级分级减载 [101]	[101]
	基于实时电网状态和极端天气预测,动态减载 [102]	[102]
负荷转移	时间维度转移,将高耗能活动(充电、生产)从用电高峰时段转移至低谷时段 [103]	[103]
	空间维度转移,将负荷从受灾严重区域转移至供电稳定的区域 [104]	[104]
需求响应	价格型需求响应 [105]	[105]
	激励型需求响应 [106]	[106]
	自动需求响应,智能电表和物联网技术 [107]	[107]

表 10 典型储能及其极端天气下作用

Table 10 Typical energy storage systems and their role in extreme weather

类型	应用场景	极端天气	极端天气下作用
电化学储能(锂离子电池等)	短时高频次的能量调节	高温、低温寒潮	支持负荷高峰期的电力需求
机械储能(抽水蓄能等)	大规模能量存储和长时间放电	高温干旱	支持水电不足期间电力供应
热储能(熔盐储能等)	热能存储和区域供热/供冷系统	高温	备用电源,防止因高温导致发电设备故障或输电线路过载
化学储能(氢能等)	长时间、跨季节的能量存储	低温寒潮	支持供暖系统和关键负荷
分布式储能(电动汽车等)	局部供电	台风、城市内涝	灾害期间孤岛运行,保障关键设施供电

车、温控型负荷需求响应的可调能力分析,储侧的分布式储能参与调节的策略及调度容量,多类型电力灵活资源聚合调节办法等方面。其中对于电力灵活资源可调能力分析目前主要分为两种方式:1)“自上而下”法,通过概率性建模及数据分析等方法直接构

表 11 典型储能应对极端天气措施
Table 11 Measures for typical energy storage systems to address extreme weather

方法类别	方法描述	文献
提供备用电源	极端天气导致发电或输电故障时,储能系统可作为备用电源,保障关键负荷供电	[108]
支持微电网运行	储能系统与分布式能源结合,形成微电网,极端天气下实现孤岛运行,提高局部供电可靠性	[109]
平衡供需波动	储能系统快速充放电能力,平抑因极端天气导致供需波动,维持电网频率电压稳定	[110]

建集群运行可行域;2)“自下而上”法,通过先分析单个资源调节能力,再将多个彼此独立的运行域聚合为一个整体^[111]。电力灵活资源的可调能力分析研究现状如图 8 所示。

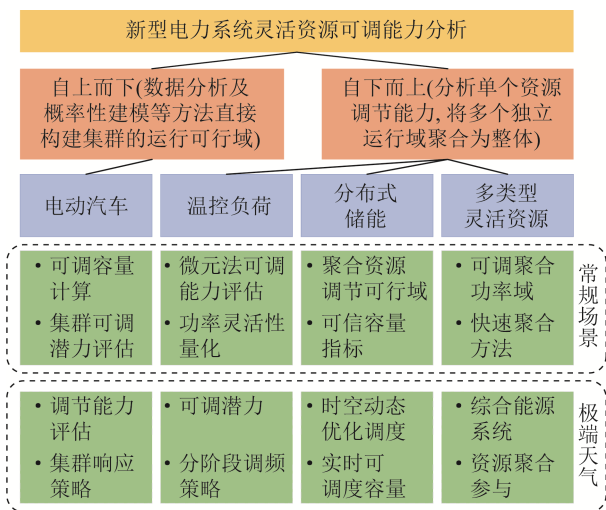


图 8 电力灵活资源的可调能力分析研究现状图

Fig. 8 Current research status on adjustable capacity analysis of flexible power resources

电动汽车方面,文献[112]基于马尔科夫状态转移方法设计状态空间模型,实现电动汽车可调节容量计算;文献[113]考虑不同时段电动汽车可调能力不同,基于闵可夫斯基加法提出充电站内电动汽车集群模型压缩方法,建立电动汽车集群可调度潜力评估模型;文献[114]在极端天气下基于电动汽车两阶段多微电网韧性提升方法,实现时空分布各异电动汽车广义储能的调节能力评估;文献[115]基于两阶段模型提出极端天气电动汽车集群需求响应策略,与住宅及多联产系统协调优化。

温控负荷方面,文献[116]考虑空调投切状态与空调调控总时长,提出基于微元法的空调可调能力评估方法;文献[117]基于 Weber-Fechner 定律建立电采暖负荷聚合为虚拟电厂的模糊响应模型;文献

[118]研究极热天气下工商业及住宅空调负荷聚合后的可调节潜力;文献[119]建立极端天气下投切型温控负荷在抵御阶段、适应阶段、恢复阶段调频聚合模型,形成其参与电网调频的控制策略。

分布式储能方面,文献[120]建立规模化 5G 基站备用电源调节模型,采用近似闵可夫斯基法分析不同聚合算法下灵活资源调节能力可行域;文献[121]将实际储能(电池储能、抽水蓄能等)与虚拟储能(温控负荷、电动汽车等)定义为虚拟储能,提出决策依赖不确定性广义储能可信容量指标;文献[122]建立移动储能在极端天气来临前预调度模型,在灾后考虑其实时可调容量、救援态及充电态进行时空动态优化调度;文献[123]计及极端天气配电网潜在电力中断以及停电恢复时间因素,建立 5G 基站可靠性评估模型,评估 5G 基站储能实时可调度容量。

多类型灵活资源方面,文献[124]建立多类型分布式灵活资源集群的虚拟电池聚合模型,基于闵可夫斯基和约束空间叠加法获得可调聚合功率域;文献[125]利用奇诺多面体表征参数特殊性质,建立多类型电力灵活资源可行域快速聚合方法;文献[126]考虑极端天气下热电耦合密切特性,基于分布鲁棒优化方法建立多类型灵活资源灾前热惯性储存热能及灾后闭合联络开关故障抢修可调能力模型;文献[127]基于极端天气态势感知技术,考虑多类型灵活资源聚合参与,提出针对重点区域电网负荷的保供策略。

通过对上述文献整理可知,现有研究常聚焦于常规场景电力灵活资源可调节能力分析,对极端天气场景电力灵活资源特性分析较少。因此,未来研究有必要借鉴现有电力灵活资源调节能力分析方法,综合极端天气场景的演化规律,形成极端天气下的电力灵活资源调节能力分析体系。

3.3 极端天气下含灵活资源的电力系统韧性提升方法

近年来,由于极端灾害频发,增强电力系统韧性可以有效减轻这类高影响事件带来的后果,减少极端天气对国家社会重要基础设施所造成的损失。传统韧性提升方法通常在不利用灵活资源的前提下进行,如:改进现有资源配置和使用效率、加强安全防护措施、定期检查设备并更新老旧部件及储备必要应急物资等,但这些做法易出现资源忽视、调配能力不足、利用效率低下、缺乏协同整合等问题。为避免这些问题,需按极端天气动态演化机理,将事件以时间轴分为灾前预防、灾中抵御、灾后恢复阶段^[128],积极调动“源网荷储”各类灵活资源,并注重资源协同

与整合,实现韧性有效提升。含灵活资源的电力系统韧性提升策略如图9所示。

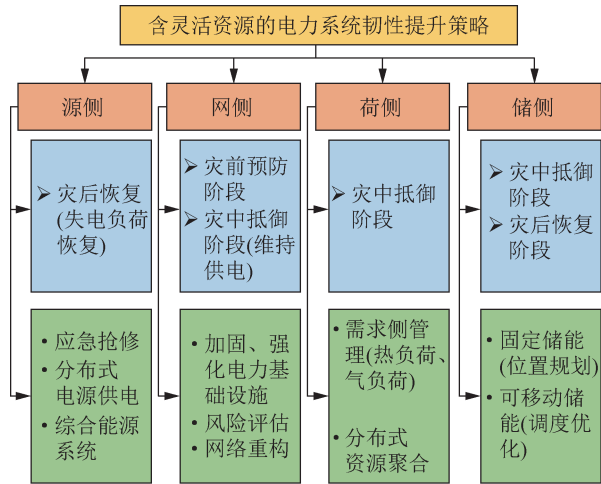


图9 含灵活资源的电力系统韧性提升策略

Fig. 9 Strategies for enhancing power system resilience with flexible resources

源侧,主要提供灾后失电负荷恢复。常见技术有:1)应急抢修。利用移动式储能、应急发电车及电动汽车等应急资源针对性提供失电负荷恢复,如灾后恢复将电动汽车作为应急资源的车辆并网技术(vehicle-to-grid, V2G)^[129];2)分布式电源供电。输出可控电源按调度运行优化方法供电^[130],输出半可控电源按多阶段规划与其他电源系统控制;3)综合能源系统。考虑“电-热-气”能源互补特性,协调各系统间设备能量流动,实现多系统性能恢复及多能流网络差异化恢复策略^[131]。

网侧,主要应对灾前预防及灾中维持供电。常见技术有:1)加固强化电力基础设施,如采用核密度估计方法计算韧性概率分布加固元件^[132]、建立线路加固和分布式发电配置策略^[133],但本文主要考虑在不增加电力设施投资的基础上最大化挖掘电力灵活资源价值,因此该方法为常见应用方法,不是未来主要趋势;2)风险评估,从脆弱性、暴露性、危险性三维对电网企业综合评估,提高对极端灾害产生影响的预判能力,保障电力运输安全^[134];3)网络重构,运用分段开关、自动开关、联络开关对非故障电力设施拓扑结构进行优化,并进行孤岛划分,最大程度地恢复电力供应^[135]。

荷侧,主要应对灾中抵御阶段。常见技术有:1)需求侧管理,通常为负荷响应,主要针对热负荷与气负荷两大类降低峰值负荷,通过三种方式即激励型、电价型与直控式进行负荷调节。第一种利用先进设备,采用先进节电技术和设备来提高终端用电效率以及改变用电方式。第二种利用负荷特性,通

过价格机制来调节电力市场供求关系,包括:调整电价结构、开展需求侧竞价、直接激励措施^[95]。第三种构建负荷管控体系与用户达成补偿协议,在电网供电能力受限或紧急状况时,中断部分可削减负荷,以缓解电网供电紧张问题^[136]。2)分布式资源聚合,利用分布式能源资源提高电力系统韧性。如:电转热(power-to-heat, P2H)利用可再生能源发电制热;电转气(power-to-gas, P2G)利用可再生能源发电制氢,再将氢气与二氧化碳合成甲烷替代传统天然气;分布式热电联产(combined heat and power, CHP)利用天然气或其他燃料发电的同时回收余热用于供暖。

储侧,主要提供灾中、灾后失电负荷恢复。常见技术有:1)固定储能,主要面向电池储能、抽水蓄能、氢能储能等,考虑储能位置规划^[137]。具体技术包括:在电网故障时提供黑启动能力,帮助电网快速恢复稳定运行;通过其快速响应能力维持电网频率稳定,防止因频率波动导致系统崩溃。2)可移动储能,主要面向移动式电池储能、柴油发电机、电动汽车等,考虑调度运行优化^[138]。具体技术包括:建立两阶段鲁棒优化模型,确定移动储能的配置数量和位置,应对自然灾害;迅速部署到重要负荷区域,为关键用户或设施提供紧急备用电源。

4 研究展望

虽然电力系统利用灵活资源提高系统韧性已取得可观成果,但仍需新思路与方法以应对不断变化的极端天气,丰富极端天气下利用灵活资源提高系统韧性的研究。

4.1 极端天气动态演化过程中电力灵活资源响应机制与建模

当前研究多集中于极端天气对电力系统的静态影响,缺乏对极端天气动态演化过程中电力灵活资源响应机制的深入探讨。极端天气的动态演化具有非线性、异质性和时空耦合特征,对灵活资源的可调能力分析提出更高要求。未来研究应结合气象学、电力系统动力学等多学科交叉方法,构建极端天气动态演化模型,深入分析极端天气“预测期—爆发期—持续期—恢复期”各阶段对电力灵活资源的影响机理。因此,未来针对严寒冰灾、极端高温等典型极端天气场景,分析极端天气演化过程对发电、负荷、储能等电力灵活资源物理特性的影响,提出计及极端天气演化特征的电力灵活资源设备及元件故障模型,研究其对系统韧性的影响,揭示极端天气动态演化对电力灵活资源物理特性的影响机理。应重点关注以下方向:

1)极端天气动态演化模型构建。结合气象预测模型和电力系统运行模型,构建极端天气的动态演化模型,量化极端天气对电力系统供需、能源生产传输及电网安全运行多维度影响。

2)灵活资源响应机制建模。针对极端天气的动态演化特征,提出计及极端天气演化过程的电力灵活资源设备及元件故障模型,揭示极端天气对灵活资源物理特性的影响机理。

3)跨学科融合与协同优化。加强气象与电力系统的深度融合,结合气象预测模型和电力系统运行模型,提升极端天气的预测精度和电力系统的响应能力,形成跨学科的协同优化框架。

4.2 极端天气下电力灵活资源动态可调能力与聚合效应

现有研究主要聚焦于常规场景下的电力灵活资源可调节能力分析,缺乏对极端天气场景下电力灵活资源动态可调能力的系统评估。极端天气的动态演化使得灵活资源的调节能力可行域数学表征复杂,如何在现有常规场景下的电力灵活资源调节能力分析方法基础上,探索形成极端天气下的电力灵活资源调节可行域亟待解决。

因此,未来的研究应重点关注以下方向:

1)动态可调能力建模。结合极端天气的动态演化特征,构建电力灵活资源的动态可调能力模型,量化其在极端天气下的调节容量、调节时间和调节速率等关键参数,分析可调能力聚合的置信度。

2)多类型灵活资源协同调度。研究多类型灵活资源在极端天气下的协同调度策略,探索在极端天气下的聚合效应提升整体韧性。具体方法包括基于数据驱动的机器学习模型、动态优化算法等,准确刻画灵活资源在极端天气下的响应能力。

3)灵活资源聚合效应评估。提出极端天气下电力灵活资源聚合效应的评估方法,量化灵活资源在极端天气下的协同效应,为系统韧性提升提供理论依据。

4.3 极端天气下多尺度韧性评估与高效分析方法

传统韧性评估通常假设电力负荷损失是均质的,没有考虑到不同电力负荷优先级、停电带来的不同后果以及恢复能力的差异,且当前针对电力系统韧性的分析多集中在两状态设备故障模型,在韧性指标方面未考虑不同类型负荷的重要程度及恢复难度等,难以精细全面刻画极端天气下的电力系统韧性。然而,极端天气下新型电力系统需要对韧性在不同时间和空间尺度上进行量化分析,以精确评估

极端天气对系统安全和稳定运行的影响,并满足极端天气场景下的快速决策需求。

因此,未来研究应结合时间和空间尺度的多维度分析,构建多尺度韧性评估框架。研究应重点关注以下方向:

1)构建多尺度韧性评估框架。考虑不同类型保供负荷异质性,分析不同时间和区域电网设备特性,建立计及时变故障率的电网设备时空多状态模型。

2)动态韧性评估模型。提出适应极端天气动态演化的系统多阶段多维韧性指标体系,形成计及灵活资源与电网互动的系统多尺度韧性高效分析方法。具体而言,(1)时间尺度:研究极端天气下电力系统在不同时间阶段(预防、抵御、恢复)的韧性,并构建动态韧性评估模型;(2)空间尺度:考虑电力系统区域差异性,研究不同区域电网在极端天气下的韧性,并提出区域协同韧性提升策略;(3)多状态模型:建立多状态可靠性模型,刻画电力系统在极端天气下复杂故障模式和恢复过程。

3)开发高效韧性分析算法。结合蒙特卡罗模拟、解析法、机器学习等技术,提升极端天气下电力系统韧性评估的计算效率和准确性。

4.4 极端天气下多时空韧性提升策略

现有研究大多局限于极端天气发生后的恢复阶段,缺乏对预防和抵御阶段的系统性探讨,且多基于系统状态已知的假设,未能充分考虑信息不完备条件下的韧性提升问题。此外,现有优化策略往往局限于特定资源的局部优化,未能从多类型灵活资源的协同调度和多时空尺度的全局优化角度出发,提出系统性解决方案。因此,未来研究应结合极端天气的动态演化特性,提出更具创新性和前瞻性的多时空韧性提升策略,重点解决以下关键问题:

1)极端天气动态演化下的预防阶段优化策略。(1)结合高精度气象预测数据,构建极端天气的动态演化模型,量化极端天气对电力系统各环节的影响。在此基础上,提出基于风险感知的灵活资源预调度策略,优化储能、分布式电源等灵活资源的配置与调度,提前调整系统运行状态。(2)针对极端天气预测的不确定性和信息不完备性,研究基于鲁棒优化或分布鲁棒优化预防决策方法,构建考虑极端天气演化不确定性灵活资源调度模型,提升极端天气来临前预防能力。

2)极端天气发生时的抵御阶段动态调控策略。(1)结合广域测量系统(wide-area measurement system, WAMS)和物联网(internet of things, IoT)技术,构建基于实时数据的灵活资源动态调度模型,实

现极端天气下电力系统的快速响应与协同调控。研究多类型灵活资源(如储能、电动汽车、需求侧资源等)的动态聚合与协同调度策略,优化系统在极端天气下的运行状态。(2)研究基于区块链的电力市场交易机制。探索区块链技术在极端天气下电力市场中的应用,构建去中心化的灵活资源交易平台,实现灵活资源的快速响应与高效配置。通过智能合约和分布式账本技术,提升灵活资源在极端天气下的协同调度效率,确保关键负荷的供电安全。

3)极端天气过后的恢复阶段快速重构策略。(1)研究移动储能、应急发电车等可移动资源的快速部署与调度策略,构建基于两阶段鲁棒优化的恢复模型,优化移动储能配置数量和位置,确保关键负荷的快速恢复。(2)提出基于网络重构和多能流协同的恢复策略,优化电力系统的拓扑结构和能源流动路径,实现电力、热力、天然气等多能流网络的协同恢复。研究极端天气下电力系统的差异化恢复策略,优先恢复关键负荷和重要基础设施的供电。

4)不完备信息下韧性提升策略。(1)结合大数据分析和人工智能技术,构建极端天气下电力系统的韧性提升决策支持系统。通过机器学习算法,预测极端天气对电力系统的影响,优化灵活资源的调度策略,提升系统在信息不完整或不确定情况下的决策能力。(2)提出多时空尺度的韧性提升协同优化框架,综合考虑极端天气的动态演化特性、灵活资源的有限性以及系统的不完备信息,构建极端天气下电力系统的闭环管理机制,实现预防、抵御和恢复三个阶段衔接。

5 结束语

在新型电力系统建设背景下,面对极端天气迫切需求,利用灵活资源提高新型电力系统韧性成为行之有效的解决方案。本文通过分析极端天气对电力系统的影响,从元件故障建模、系统韧性分析、韧性指标体系三个方面阐述极端天气下新型电力系统韧性分析。然后,在分析电力灵活资源概念、可调能力的基础上,从源、网、荷、储多个角度分析极端天气下含灵活资源的新型电力系统韧性提升策略。最后,从极端天气动态演化对电力灵活资源影响机理分析、极端天气下电力灵活资源动态可调能力分析、极端天气下多尺度韧性评估与高效分析方法、极端天气下多时空韧性提升策略四个方面对未来极端天气下电力系统韧性研究的主要方向进行展望。

利益冲突声明(Conflict of Interests):

所有作者声明不存在利益冲突。

作者贡献声明(Authors' Contributions):

加鹤萍提出基本框架,提出研究方向,设计论文框架,撰写论文;吴昌蔚参与撰写论文;刘敦楠修订论文,审核论文;杨菁参与论文修订、论文最终版本修订;余涛参与论文修订。所有作者均阅读并同意了论文终稿内容。

6 参考文献

- [1] 新华社. 推进国家安全体系和能力现代化,坚决维护国家安全和社会稳定[R]. 北京:中华人民共和国中央人民政府,2022.
- [2] 新华社. 新时代的中国国家安全白皮书[R]. 北京:中华人民共和国中央人民政府,2025.
- [3] 国家发展改革委,国家能源局. 关于加强新形势下电力系统稳定工作的指导意见(发改能源[2023]1294号)[EB/OL]. (2023-12-25) [2024-12-9]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zc/fb/tz/202310/t20231025_1361514_ext.html.
- [4] 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 Weiguo, WANG Saiyi, XU Tangyun, et al. Construction and development path of the urban resilient distribution network [J]. Power System Technology, 2022, 46(2): 680-690.
- [5] 安学民,孙华东,张晓涵,等. 美国德州“2.15”停电事件分析及启示[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(10): 3407-3415, 3666.
AN Xuemin, SUN Huadong, ZHANG Xiaohan, et al. Analysis and lessons of Texas power outage event on February 15, 2021 [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(10): 3407-3415, 3666.
- [6] 高红均,郭明浩,刘俊勇,等. 从四川高温干旱限电事件看新型电力系统保供挑战与应对展望[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(12): 4517-4538.
GAO Hongjun, GUO Minghao, LIU Junyong, et al. Power supply challenges and prospects in new power system from Sichuan electricity curtailment events caused by high-temperature drought weather [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(12): 4517-4538.
- [7] 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.
- [8] 邱爱慈,别朝红,李更丰,等. 强电磁脉冲威胁与弹性电力系统发展战略[J]. 现代应用物理, 2021, 12(3): 3-12.
QIU Aici, BIE Zhaohong, LI Gengfeng, et al. HEMP threat and development strategy of resilient power system [J]. Modern Applied Physics, 2021, 12(3): 3-12.
- [9] US. Department of Energy. Smart grid system report [R]. Washington, DC: U. S. Department of Energy, 2009.

- [10] Presidential policy directive-critical infrastructure security and resilience [R/OL]. White House Press Release, 2013.
- [11] The ERP Working Group Members. Future resilience of the UK, electricity system[R]. Energy Research Partnership(ERP) 2018.
- [12] BIE Z H, LIN Y L, LI G F, et al. Battling the extreme: a study on the power system resilience [J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 105(7): 1253-1266.
- [13] 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 Haixiang, CHEN Ying, HUANG Shaowei, et al. Distribution systems resilience: an overview of research progress [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(23): 1-8.
- [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 Ping, WANG Chong, XIN Huanhai, et al. Flexibility, resilience and toughness of power system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(11): 1-7.
- [15] 杜洁, 张海锋, 王佳蕊, 等. 计及用户热耐受度的区域综合能源系统韧性评估及提升研究[J]. 全球能源互联网, 2024, 7(1): 3-13.
DU Jie, ZHANG Haifeng, WANG Jiarui, et al. Resilience assessment and enhancement oriented human heat tolerance of regional integrated energy systems [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2024, 7(1): 3-13.
- [16] 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 Weimin, SUN Huadong, HE Jian, et al. Review of power system resilience assessment techniques for severe natural disasters [J]. Power System Technology, 2024, 48(1): 129-139.
- [17] PANTELI M, MANCARELLA P. The grid: stronger, bigger, smarter? : presenting a conceptual framework of power system resilience[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2015, 13(3): 58-66.
- [18] 别朝红, 卞艺衡, 张理寅, 等. 新型电力系统应对极端事件的风险防范与应急管理关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(18): 7049-7068.
BIE Zhaohong, BIAN Yiheng, ZHANG Liyin, et al. Key technologies of risk prevention and emergency management against extreme events for new power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(18): 7049-7068.
- [19] 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 Qiantu, XIE Wei, XU Yin, et al. Concept and key features of resilient power grids [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(21): 6773-6784.
- [20] 尹莞婷, 王嘉杰, 王智敏, 等. 典型极端气候下电网未来态调度的数字化效果[J]. 电网与清洁能源, 2025, 41(10): 1-13.
YIN Wanting, WANG Jiajie, WANG Zhimin, et al. Digital effects of future-state power-grid dispatch under typical extreme-climate conditions[J]. Power System and Clean Energy, 2025, 41(10): 1-13.
- [21] 许静, 孔德政, 邢朝健, 等. 面向极端天气的发电设备自适应鲁棒防御策略[J]. 智慧电力, 2025, 53(9): 74-80.
XU Jing, KONG Dezheng, XING Chaojian, et al. Adaptive robust defense strategies for power generation equipment against extreme weather conditions[J]. Smart Power, 2025, 53(9): 74-80.
- [22] 降水量等级: GB/T 28592—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
Grade of precipitation: GB/T 28592—2012 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2012.
- [23] 沙尘暴天气预警: GB/T 28593—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
Warning of sand and dust storm weather: GB/T 28593—2012[S]. Beijing: Standards Press of China, 2012.
- [24] 冯家欢, 史雪晨, 张赟, 等. 基于张量低秩补全算法的极端天气短期负荷预测[J]. 分布式能源, 2024, 9(4): 51-59.
FENG Jiahuan, SHI Xuechen, ZHANG Yun, et al. Short-term load forecasting based on tensor low-rank completion algorithm in extreme weather[J]. Distributed Energy, 2024, 9(4): 51-59.
- [25] 陈玮, 周贤正, 李晏君, 等. 考虑电动汽车配置的主动配电网鲁棒孤岛恢复[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(S1): 58-67.
CHEN Wei, ZHOU Xianzheng, LI Yanjun, et al. A robust islanding restoration policy for active distribution network considering optimal allocation of emergency electric vehicles [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(S1): 58-67.
- [26] 张文博, 邢海军, 聂立君, 等. 考虑高渗透率可再生能源的新型电力系统可靠性评估综述[J]. 电测与仪表, 2025, 62(9): 51-61, 72.
ZHANG Wenbo, XING Haijun, NIE Lijun, et al. Review of the novel power system reliability assessment with high penetration renewable energy [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(9): 51-61, 72.
- [27] 田泉, 王斌. 气候变化及极端天气对地区电力设备需求影响研究[J]. 电子测试, 2017(15): 127, 119.
TIAN Quan, WANG Bin. Research on the impacts of climate change and extreme weather on regional power equipment [J]. Electronic Test, 2017(15): 127, 119.
- [28] 杨国林, 蒋兴良, 王茂政, 等. 输电线路单导线覆冰形状对直流大电流融冰时间的影响[J]. 电工技术学报, 2024, 39(9): 2916-2924.
YANG Guolin, JIANG Xingliang, WANG Maozheng, et al. The impact of ice accumulation shape on the DC high current ice-melting time for a single conductor on power transmission line[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(9): 2916-2924.
- [29] 杨思全. “一带一路”区域防灾减灾战略思路研究[J]. 中国保险, 2017(3): 7-11.
YANG Siqian. Study on the strategic thinking of disaster prevention and mitigation in the Belt and Road Region [J]. China Insurance, 2017(3): 7-11.
- [30] 牛奎焯, 刘金波, 汤奕, 等. 计及极端气象事件的年度系统运行场景生成方法[J]. 电网技术, 2024, 48(10): 3992-4006.
NIU Kuiye, LIU Jinbo, TANG Yi, et al. A method for generating annual system operating scenarios considering extreme meteorological events [J]. Power System Technology, 2024, 48(10): 3992-4006.
- [31] 卢赓, 邓婧, 王渝红, 等. 电力系统受极端天气的影响分析及其适应策略[J]. 发电技术, 2021, 42(6): 751-764.

- LU Geng, DENG Jing, WANG Yuhong, et al. Analysis of power system affected by extreme weather and its adaptive strategy [J]. *Power Generation Technology*, 2021, 42(6): 751-764.
- [32] 朱永清, 林佳宁, 李庆生, 等. 冰灾下考虑多重不确定性的负荷聚合商市场力评估方法 [J]. *浙江电力*, 2024, 43(1): 64-71.
- ZHU Yongqing, LIN Jianing, LI Qingsheng, et al. A market power assessment method for load aggregators considering multiple uncertainties under ice disasters [J]. *Zhejiang Electric Power*, 2024, 43(1): 64-71.
- [33] 李京, 王国庆, 朱建明, 等. 冰雪灾害背景下电网投资优化和韧性提升模型 [J]. *中国管理科学*, 2020, 28(3): 122-131.
- LI Jing, WANG Guoqing, ZHU Jianming, et al. Investment optimization and resilience enhancement of power system under ice storm disaster [J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2020, 28(3): 122-131.
- [34] HOU G Y, MURALEETHARAN K K, PANCHALOGARANJAN V, et al. Resilience assessment and enhancement evaluation of power distribution systems subjected to ice storms [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2023, 230: 108964.
- [35] 耿宁, 覃智君, 黄镇. 台风灾害下含多元储能的气-电-热综合能源系统韧性提升策略 [J]. *电网与清洁能源*, 2025, 41(9): 64-73.
- GENG Ning, QIN Zhijun, HUANG Zhen. A resilience enhancement strategy for electricity-gas-heat integrated energy systems with multi-energy storage under typhoon disaster [J]. *Power System and Clean Energy*, 2025, 41(9): 64-73.
- [36] 陈朝晖, 汤海涛. 台风极值风速的数值模拟及分布模型 [J]. *重庆大学学报*, 2008, 31(11): 1285-1289.
- CHEN Zhaohui, TANG Haitao. Distribution models of extreme typhoon winds based on numerical simulation of wind data [J]. *Journal of Chongqing University*, 2008, 31(11): 1285-1289.
- [37] LIU Y, XIE S P, DENG M H, et al. Toughness analysis and enhancement strategy research of distribution network in extreme environment [C]//2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). IEEE, 2020: 1929-1934.
- [38] 黄坤鹏, 赵平, 康留涛. 高低温条件下隔离开关零部件机械特性研究及稳定性提升措施 [J]. *高压电器*, 2024, 60(8): 259-268.
- HUANG Kunpeng, ZHAO Ping, KANG Liutao. Research on mechanical characteristics and stability improvement measures of disconnecter parts under hot and cold temperature conditions [J]. *High Voltage Apparatus*, 2024, 60(8): 259-268.
- [39] 袁家海, 张凯, 张健, 等. 极端高温天气下电力系统韧性提升策略 [J]. *发电技术*, 2025, 46(4): 694-704.
- YUAN Jiahai, ZHANG Kai, ZHANG Jian, et al. Resilience enhancement strategies for power systems under extreme high-temperature weather [J]. *Power Generation Technology*, 2025, 46(4): 694-704.
- [40] 闵骞, 张万琨. 水库水面蒸发量计算方法的研究 [J]. *水力发电*, 2003, 29(5): 35-40.
- MIN Qian, ZHANG Wankun. Study on the calculation method of reservoir surface evaporation [J]. *Water Power*, 2003, 29(5): 35-40.
- [41] AL-KHAYAT M, AL-RASHEEDI M. A new method for estimating the annual energy production of wind turbines in hot environments [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2024, 195: 114343.
- [42] WANG Y H, ZHANG Q T, LIN K R, et al. A novel framework for urban flood risk assessment: multiple perspectives and causal analysis [J]. *Water Research*, 2024, 256: 121591.
- [43] SHI Y J, ZHAI G F, XU L H, et al. Assessment methods of urban system resilience: from the perspective of complex adaptive system theory [J]. *Cities*, 2021, 112: 103141.
- [44] XU C L, NIE Z R, PENG Y C. Fault prediction for distribution transformers based on stacking [C]//2024 IEEE 6th International Conference on Power, Intelligent Computing and Systems (ICPICS). IEEE, 2024: 1221-1227.
- [45] 金坤坎, 郝丽丽, 闫新旭, 等. 考虑热浪或寒潮下城市电网供需安全的风-光-抽蓄协同规划 [J]. *电力自动化设备*, 2025, 45(10): 30-39, 58.
- JIN Kunkan, HAO Lili, YAN Xinxu, et al. Collaborative planning of wind-photovoltaic-pumped storage considering supply-demand security of urban power grid under heat wave or cold wave [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2025, 45(10): 30-39, 58.
- [46] 黄涛, 张智, 丁玉杰, 等. 考虑寒潮天气下源-网故障概率信息的两阶段鲁棒预防调度方法 [J]. *高电压技术*, 2025, 51(10): 5114-5126.
- HUANG Tao, ZHANG Zhi, DING Yujie, et al. A two-stage robust preventive scheduling method incorporating source-grid failure probabilities under cold wave weather [J]. *High Voltage Engineering*, 2025, 51(10): 5114-5126.
- [47] 汤奕, 易俊, 薛峰. “双碳”目标下的新型电力系统规划与运行 [J]. *全球能源互联网*, 2024, 7(3): 241-242.
- TANG Yi, YI Jun, XUE Feng. Planning and operation of new power system under the goal of “dual carbon” [J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2024, 7(3): 241-242.
- [48] 黄定威, 王锋, 李波. 面向新型电力系统的含风光储配电网多目标调度方法 [J]. *电测与仪表*, 2025, 62(3): 38-45.
- HUANG Dingwei, WANG Feng, LI Bo. A multi-objective scheduling method for wind and solar energy storage and distribution network facing novel power system [J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2025, 62(3): 38-45.
- [49] 黄文鑫, 吴军, 郭子辉, 等. 台风灾害下电网韧性评估及差异化规划 [J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(5): 84-91.
- HUANG Wenxin, WU Jun, GUO Zihui, et al. Power grid resilience assessment and differentiated planning against typhoon disasters [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(5): 84-91.
- [50] 韩林, 赵旭东, 陈志龙, 等. 蓄意攻击下城市电力网络毁伤韧性评估 [J]. *中国安全科学学报*, 2021, 31(6): 161-169.
- HAN Lin, ZHAO Xudong, CHEN Zhilong, et al. Research on damage resilience assessment of urban power networks under intentional attacks [J]. *China Safety Science Journal*, 2021, 31(6): 161-169.
- [51] 王丽英, 崔利荣. 基于随机过程理论的多状态系统建模与可靠性评估 [M]. 北京: 科学出版社, 2017.

- [52] LIU T, BAI G H, TAO J Y, et al. Modeling and evaluation method for resilience analysis of multi-state networks [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2022, 226: 108663.
- [53] 白光哈,张帅,张云安,等.多状态网络可靠性与韧性评估方法综述[J].*中国科学:技术科学*, 2023, 53(8): 1284-1301.
BAI Guanghan, ZHANG Shuai, ZHANG Yun'an, et al. Survey of multistate network reliability and resilience evaluation methods [J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2023, 53(8): 1284-1301.
- [54] 史跃东,金家善,柴凯.大型复杂系统多态可靠性快速评估算法[J].*系统工程与电子技术*, 2022, 44(10): 3282-3290.
SHI Yuedong, JIN Jiashan, CHAI Kai. Multi-state reliability fast evaluation algorithm for large-scale complex system [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2022, 44(10): 3282-3290.
- [55] 别朝红,李更丰.极端天气条件下新型电力系统风险评估与弹性提升[J].*全球能源互联网*, 2024, 7(1): 1-2.
BIE Zhaohong, LI Gengfeng. Risk assessment and resilience improvement of new power systems in extreme weather [J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2024, 7(1): 1-2.
- [56] 张译心,狄晨焯,赵男,等.面向复合极端天气的高新能源渗透率电网风险评估技术[J].*电力建设*, 2024, 45(10): 34-46.
ZHANG Yixin, DI Chenye, ZHAO Nan, et al. Risk assessment techniques for grids with high penetration of new energy under extreme weather conditions [J]. *Electric Power Construction*, 2024, 45(10): 34-46.
- [57] EAJAL A A, EL-AWADY A, EL-SAADANY E F, et al. A Bayesian approach to the reliability analysis of renewables-dominated islanded DC microgrids [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2021, 36(5): 4296-4309.
- [58] BRUNEAU M, CHANG S E, EGUCHI R T, et al. A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities [J]. *Earthquake Spectra*, 2003, 19(4): 733-752.
- [59] ZHANG H J, WANG P, YAO S H, et al. Resilience assessment of interdependent energy systems under hurricanes [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2020, 35(5): 3682-3694.
- [60] 陈碧云,李翠珍,覃鸿,等.考虑网架重构和灾区复电过程的配电网抗台风韧性评估[J].*电力系统自动化*, 2018, 42(6): 47-52.
CHEN Biyun, LI Cuizhen, QIN Hong, et al. Evaluation of typhoon resilience of distribution network considering grid reconstruction and disaster recovery [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(6): 47-52.
- [61] ROEGE P E, COLLIER Z A, MANCILLAS J, et al. Metrics for energy resilience [J]. *Energy Policy*, 2014, 72: 249-256.
- [62] 田甜,张骏,叶樊,等.洪涝灾害下配电网三维韧性指标评估体系[J].*电工电能新技术*, 2022, 41(7): 80-88.
TIAN Tian, ZHANG Jun, YE Fan, et al. Three-dimensional resilience index evaluation system for distribution network under flood disaster [J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2022, 41(7): 80-88.
- [63] 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 Lei, DENG Xinyi, CHEN Hongkun, et al. Review of the assessment and improvement of power system resilience [J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(13): 11-22.
- [64] PANTELI M, TRAKAS D N, MANCARELLA P, et al. Power systems resilience assessment: hardening and smart operational enhancement strategies [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2017, 105(7): 1202-1213.
- [65] KANDAPERUMAL G, PANDEY S, SRIVASTAVA A. AWR: anticipate, withstand, and recover resilience metric for operational and planning decision support in electric distribution system [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2022, 13(1): 179-190.
- [66] 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.
- [67] 周阳焯,王国庆,于雷.配电网韧性研究现状及展望[J].*工程研究——跨学科视野中的工程*, 2022, 14(3): 171-181.
ZHOU Yangye, WANG Guoqing, YU Lei. Research status and prospect of distribution network resilience [J]. *Journal of Engineering Studies*, 2022, 14(3): 171-181.
- [68] OUYANG M, DUEÑAS-OSORIO L, XING M. A three-stage resilience analysis framework for urban infrastructure systems [J]. *Structural Safety*, 2012, 36: 23-31.
- [69] 侯祖锋,王超,徐春华,等.考虑负荷重要程度的配电网韧性提升策略及评估方法[J].*电力科学与技术学报*, 2024, 39(3): 78-85.
HOU Zufeng, WANG Chao, XU Chunhua, et al. Promotion strategy and evaluation method of distribution network resilience considering load importance [J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2024, 39(3): 78-85.
- [70] WANG H Z. A survey of maintenance policies of deteriorating systems [J]. *European Journal of Operational Research*, 2002, 139(3): 469-489.
- [71] BESSANI M, MASSIGNAN J A D, FANUCCHI R Z, et al. Probabilistic assessment of power distribution systems resilience under extreme weather [J]. *IEEE Systems Journal*, 2019, 13(2): 1747-1756.
- [72] 吴疆,吕林,黄媛,等.灾害全过程配电网弹性评估方法及提升策略[J].*电力系统及其自动化学报*, 2021, 33(3): 32-42.
WU Jiang, LYU Lin, HUANG Yuan, et al. Evaluation method and promotion strategy for distribution network resilience during the entire process of disaster [J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2021, 33(3): 32-42.
- [73] ISSICABA D, PECAS LOPES J A, DA ROSA M A. Adequacy and security evaluation of distribution systems with distributed generation [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2012, 27(3): 1681-1689.
- [74] ARGHANDEH R, BROWN M, DEL ROSSO A, et al. The local team: leveraging distributed resources to improve resilience [J]. *IEEE Power and Energy Magazine*, 2014, 12(5): 76-83.
- [75] 彭寒梅,王小豪,魏宁,等.提升配电网弹性的微网差异化恢复运行方法[J].*电网技术*, 2019, 43(7): 2328-2335.
PENG Hanmei, WANG Xiaohao, WEI Ning, et al. Microgrid differentiated recovery operation for enhancing distribution system resilience [J]. *Power System Technology*, 2019, 43(7): 2328-2335.
- [76] 李振坤,王法顺,郭维一,等.极端天气下智能配电网的弹性

- 评估[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(9): 60-68.
- LI Zhenkun, WANG Fashun, GUO Weiyi, et al. Resilience evaluation of smart distribution network in extreme weather [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(9): 60-68.
- [77] 顾靖达, 李伟, 赵宇鑫, 等. 高温天气下配电网综合韧性评估方法[J]. 电力建设, 2024, 45(9): 123-132.
- GU Jingda, LI Wei, ZHAO Yuxin, et al. Research on comprehensive resilience assessment method of distribution network under high temperature weather [J]. Electric Power Construction, 2024, 45(9): 123-132.
- [78] 左一成, 王元龙, 王晓明, 等. 基于混合动态贝叶斯多准则决策的配电网韧性评估方法[J]. 自动化与仪器仪表, 2024(9): 345-350.
- ZUO Yicheng, WANG Yuanlong, WANG Xiaoming, et al. Based A hybrid dynamic Bayesian multi-criteria decision making approach for distribution network resilience assessment [J]. Automation & Instrumentation, 2024(9): 345-350.
- [79] 孙彦章, 郭贺宏, 侯哲晖, 等. 国外提升电力系统灵活性措施及对我国的经验启示[J]. 现代管理, 2022, 12(1): 37-44.
- SUN Yanzhang, GUO Hehong, HOU Zhehui, et al. Overseas measures to enhance power system flexibility and their implications for china [J]. Modern Management, 2022, 12(1): 37-44.
- [80] 司方远, 张宁, 韩英华, 等. 面向多元灵活资源聚合的区域综合能源系统主动调节能力评估与优化: 关键问题与研究架构[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(6): 2097-2119.
- SI Fangyuan, ZHANG Ning, HAN Yinghua, et al. Fundamental problems and research framework for assessment and optimization of the functional regulation capacity of the regional integrated energy system under the aggregation of diversified and flexible resources [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(6): 2097-2119.
- [81] 林卫斌, 宁佳钧, 张凡. 分“三步走”构建新型电力系统的战略构想[J]. 价格理论与实践, 2022(10): 71-74.
- LIN Weibin, NING Jiajun, ZHANG Fan. The strategic conception of constructing a new power system in three steps [J]. Price (Theory & Practice), 2022(10): 71-74.
- [82] 麻宁杰, 王华昕, 汤波, 等. 新型电力系统下架空输电线路受极端天气影响的风险评估与运维决策[J]. 电测与仪表, 2025, 62(11): 95-102.
- MA Ningjie, WANG Huaxin, TANG Bo, et al. Risk assessment and operation and maintenance decision of overhead transmission lines affected by extreme weather in novel power system [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(11): 95-102.
- [83] 丁一, 加鹤萍, 宋永华, 等. 考虑风电与灵活资源互动的智能电网可靠性分析方法评述[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(6): 1517-1526.
- DING Yi, JIA Heping, SONG Yonghua, et al. Review of reliability evaluation methods for the smart grid considering the interaction between wind power and flexible demand resources [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(6): 1517-1526.
- [84] 田新成, 文艺林, 卢泽汉, 等. 多类型灵活资源的建模与分层式协调控制架构[J]. 分布式能源, 2024, 9(1): 10-18.
- TIAN Xincheng, WEN Yilin, LU Zehan, et al. Modeling techniques and a hierarchical coordinated control framework for various-type flexible resources [J]. Distributed Energy, 2024, 9(1): 10-18.
- [85] 王庆, 赵宏. 灵活可调节性资源参与电力辅助服务成本补偿机制探讨[J]. 价格理论与实践, 2023(5): 87-90, 209.
- WANG Qing, ZHAO Hong. Discussion on cost compensation mechanism of flexible and adjustable resources participating in power ancillary services [J]. Price (Theory & Practice), 2023(5): 87-90, 209.
- [86] HOSSEINI S, BARKER K, RAMIREZ-MARQUEZ J E. A review of definitions and measures of system resilience [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2016, 145: 47-61.
- [87] 李军徽, 董福财, 郭琦, 等. 考虑调峰特性的抽水蓄能电站综合效能量化评估[J]. 全球能源互联网, 2024, 7(5): 567-578.
- LI Junhui, DONG Fucui, GUO Qi, et al. Quantitative assessment of the integrated efficiency of pumped storage power stations considering peak shifting characteristics [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2024, 7(5): 567-578.
- [88] LU Y Q, LIU C, WANG K I, et al. Digital twin-driven smart manufacturing: connotation, reference model, applications and research issues [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2020, 61: 101837.
- [89] ZHANG B, DEGHANIAN P, KEZUNOVIC M. Optimal allocation of PV generation and battery storage for enhanced resilience [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 535-545.
- [90] WANG C T, QIAO Y L, WANG Y C, et al. Optimal scheduling of electric-hydrogen hybrid shared energy storage system considering seasonal time scale [J]. Energy, 2025, 330: 136674.
- [91] RANJBAR H, HOSSEINI S H, ZAREIPOUR H. Resiliency-oriented planning of transmission systems and distributed energy resources [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(5): 4114-4125.
- [92] ZHANG G, ZHANG F, ZHANG X, et al. Mobile emergency generator planning in resilient distribution systems: a three-stage stochastic model with nonanticipativity constraints [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(6): 4847-4859.
- [93] AHMADI S, SABOOHI Y, VAKILI A. Frameworks, quantitative indicators, characters, and modeling approaches to analysis of energy system resilience: a review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 144: 110988.
- [94] 李亚莎, 张永衡, 陈俊璋, 等. 计及氢能高效利用和热电灵活输出的综合能源系统源荷灵活运行策略[J]. 广东电力, 2024, 37(4): 49-61.
- LI Yasha, ZHANG Yongheng, CHEN Junzhang, et al. Flexible operation strategy for source and load of integrated energy system considering efficient utilization of hydrogen energy and flexible thermal and electric output [J]. Guangdong Electric Power, 2024, 37(4): 49-61.
- [95] Quantitative comparative study on power system flexibility between Beijing-Tianjin-Hebei region and germany [EB/OL]. Carbon Neutrality Sector.
- [96] NASERVAND M, SETAREH M, NEGHAH A P. Dynamic reconfiguration of network structure and connected microgrids for

- resilience enhancement under storm conditions [C]//2025 12th Iranian Conference on Renewable Energies and Distributed Generation (ICREDG). IEEE, 2025: 1-6.
- [97] 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 Yin, HE Jinghan, WANG Ying, et al. A review on distribution system restoration for resilience enhancement [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(16): 3416-3429.
- [98] ALAJRASH B H, SALEM M, SWADI M, et al. A comprehensive review of FACTS devices in modern power systems: addressing power quality, optimal placement, and stability with renewable energy penetration[J]. Energy Reports, 2024, 11: 5350-5371.
- [99] RAO C K, SAHOO S K, YANINE F F. A literature review on an IoT-based intelligent smart energy management systems for PV power generation[J]. Hybrid Advances, 2024, 5: 100136.
- [100] 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 Ning, CHENG Lin, TIAN Liting, 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.
- [101] WANG Y J, TIAN J Q, SUN Z D, et al. A comprehensive review of battery modeling and state estimation approaches for advanced battery management systems [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 131: 110015.
- [102] SHI Q X, LIU W X, ZENG B, et al. Enhancing distribution system resilience against extreme weather events: concept review, algorithm summary, and future vision [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 138: 107860.
- [103] WESSEH P K, LIN B Q. A time-of-use pricing model of the electricity market considering system flexibility [J]. Energy Reports, 2022, 8: 1457-1470.
- [104] 刘祎泽,向月. 计及负荷转移需求响应的低碳数据中心光储容量优化配置[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(7): 149-155.
LIU Yize, XIANG Yue. Capacity optimal configuration of photovoltaic storage in low-carbon data centers considering load transfer demand response [J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(7): 149-155.
- [105] 徐涛,王樊云. 电力需求响应实施现状综述及展望[J]. 分布式能源, 2024, 9(3): 1-11.
XU Tao, WANG Fanyun. Review and prospect of power demand response implementation [J]. Distributed Energy, 2024, 9(3): 1-11.
- [106] TIWARI A, PINDORIYA N M. Automated demand response in smart distribution grid: a review on metering infrastructure, communication technology and optimization models [J]. Electric Power Systems Research, 2022, 206: 107835.
- [107] XU T, REN Y, GUO L X, et al. Multi-objective robust optimization of active distribution networks considering uncertainties of photovoltaic [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 133: 107197.
- [108] 唐文虎,聂欣昊,钱瞳,等. 面向新型电力系统安全稳定的储能应用技术研究综述与展望[J]. 广东电力, 2024, 37(12): 3-15.
TANG Wenhui, NIE Xinhao, QIAN Tong, et al. Review and prospect on application technologies of energy storage for safety and stability of new power system [J]. Guangdong Electric Power, 2024, 37(12): 3-15.
- [109] 李丽,朱益哲,郑晓光,等. 计及孤岛稳定性的主动解列断面搜索算法[J]. 广东电力, 2024, 37(11): 1-8.
LI Li, ZHU Yizhe, ZHENG Xiaoguang, et al. Controlled islanding sections search algorithm considering stability of islands [J]. Guangdong Electric Power, 2024, 37(11): 1-8.
- [110] WANG L Y, LIN J L, DONG H Q, et al. Demand response comprehensive incentive mechanism-based multi-time scale optimization scheduling for park integrated energy system [J]. Energy, 2023, 270: 126893.
- [111] JI C Y, WEI Y, POOR H V. Resilience of energy infrastructure and services: modeling, data analytics, and metrics [J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 105(7): 1354-1366.
- [112] WANG M S, MU Y F, LI F X, et al. State space model of aggregated electric vehicles for frequency regulation [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 11(2): 981-994.
- [113] 詹祥澎,杨军,韩思宁,等. 考虑电动汽车可调度潜力的充电站两阶段市场投标策略[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(10): 86-96.
ZHAN Xiangpeng, YANG Jun, HAN Sining, et al. Two-stage market bidding strategy of charging station considering schedulable potential capacity of electric vehicle [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(10): 86-96.
- [114] 王炜歆,张露元,王小君,等. 计及电动汽车引导和网络重构的配电网负荷恢复策略[J]. 山东电力技术, 2024, 51(8): 18-26.
WANG Weixin, ZHANG Luyuan, WANG Xiaojun, et al. Load restoration strategy of distribution system considering electric vehicle guiding and network reconfiguration [J]. Shandong Electric Power, 2024, 51(8): 18-26.
- [115] CHEN L M, TANG H L, WU J K, et al. A robust optimization framework for energy management of CCHP users with integrated demand response in electricity market [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 141: 108181.
- [116] 曾庆彬,梁伟强,张勇军,等. 考虑多重轮换调控的空调负荷调控潜力评估与控制策略[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(4): 123-131.
ZENG Qingbin, LIANG Weiqiang, ZHANG Yongjun, et al. Regulation potential evaluation and control strategy of air conditioning load considering multiple rotation regulation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(4): 123-131.
- [117] 冯云辰,加鹤萍,闫敏,等. 基于风电分时电价的虚拟电厂参与清洁供暖运营优化方法[J]. 中国电力, 2024, 57(1): 51-60.
FENG Yunchen, JIA Heping, YAN Min, et al. Operation optimization method for virtual power plant participating in clean heating based on time-of-use tariff of wind power [J]. Electric Power, 2024, 57(1): 51-60.

- [118] LU L, WEI M K, ZHANG P, et al. Load adjustable potential assessment considering load flexible control and air conditioner load response in extremely hot weather [C]//2023 8th International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE). IEEE, 2023: 1505-1510.
- [119] 聂世豪, 李桐, 陈磊, 等. 投切型温控负荷一次调频策略及电网侧聚合建模[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(S1): 1-11.
NIE Shihao, LI Tong, CHEN Lei, et al. Primary frequency modulation strategy of switching temperature control load and aggregation modeling of power grid side [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(S1): 1-11.
- [120] 王大为, 金渊, 张倩, 等. 面向新型电力系统的换电站聚合调控技术研究[J]. 高压电器, 2025, 61(11): 71-83.
WANG Dawei, JIN Yuan, ZHANG Qian, et al. Research on aggregated control technology of battery swap station for new power system [J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(11): 71-83.
- [121] 齐宁, 程林, 刘锋. 计及决策依赖不确定性的广义储能可信容量评估[J]. 电网技术, 2023, 47(12): 4916-4930.
QI Ning, CHENG Lin, LIU Feng. Capacity credit evaluation of generic energy storage under decision-dependent uncertainty [J]. Power System Technology, 2023, 47(12): 4916-4930.
- [122] 王月汉, 刘文霞, 姚齐, 等. 面向配电网韧性提升的移动储能预布局与动态调度策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(15): 37-45.
WANG Yuehan, LIU Wenxia, YAO Qi, et al. Pre-layout and dynamic scheduling strategy of mobile energy storage for resilience enhancement of distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(15): 37-45.
- [123] 陈实, 郭正伟, 周步祥, 等. 考虑 5G 基站储能可调度容量的有源配电网协同优化调度方法[J]. 电网技术, 2023, 47(12): 5225-5241.
CHEN Shi, GUO Zhengwei, ZHOU Buxiang, et al. Coordinated optimization scheduling for active distribution networks considering schedulable capacity of energy storage for 5G base stations [J]. Power System Technology, 2023, 47(12): 5225-5241.
- [124] 边晓燕, 孙明琦, 董璐, 等. 计及灵活性聚合功率的源-荷分布式协调调度[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(17): 89-98.
BIAN Xiaoyan, SUN Mingqi, DONG Lu, et al. Distributed source-load coordinated dispatching considering flexible aggregated power [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(17): 89-98.
- [125] 周海浪, 刘一畔, 陈雨果, 等. 考虑灵活性收益的需求侧资源可行域聚合方法[J]. 中国电力, 2022, 55(9): 56-63, 155.
ZHOU Hailang, LIU Yipan, CHEN Yuguo, et al. Demand side feasible region aggregation considering flexibility revenue [J]. Electric Power, 2022, 55(9): 56-63, 155.
- [126] 唐坤霆, 周永智, 李宝聚, 等. 考虑热惯性的极端冰雪灾害下综合能源系统韧性提升[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(21): 129-137.
TANG Kunting, ZHOU Yongzhi, LI Baoju, et al. Resilience enhancement of integrated energy systems under extreme ice and snow disasters considering thermal inertia [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(21): 129-137.
- [127] 何俊, 于华, 邓长虹, 等. 极端天气下基于态势感知的重点区域电网负荷供电保障策略[J]. 高电压技术, 2022, 48(4): 1277-1285.
HE Jun, YU Hua, DENG Changhong, et al. Power supply guarantee strategy for key regional power grid load based on situation awareness in extreme weather [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(4): 1277-1285.
- [128] 陈浩, 孙锴凌, 吴桂联, 等. 考虑配电系统灾后响应全过程的开关配置与线路加固方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2024, 36(11): 100-108.
CHEN Hao, SUN Nuoling, WU Guilian, et al. Switch allocation and line hardening method considering whole process of post disaster response of distribution system [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2024, 36(11): 100-108.
- [129] 杨祺铭, 李更丰, 别朝红, 等. 台风灾害下基于 V2G 的城市配电网弹性提升策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(12): 130-139.
YANG Qiming, LI Gengfeng, BIE Zhaozhong, et al. Vehicle-to-grid based resilience promotion strategy for urban distribution network under typhoon disaster [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(12): 130-139.
- [130] 张亚超, 谢仕炜. 面向配电网弹性提升的多时间尺度恢复策略协调优化框架[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(18): 28-34.
ZHANG Yachao, XIE Shiwei. Coordinated optimization framework of multi-timescale restoration strategies for resilience enhancement of distribution networks [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(18): 28-34.
- [131] 王放放, 杨鹏威, 赵光金, 等. 新型电力系统下火电机组灵活性运行技术发展及挑战[J]. 发电技术, 2024, 45(2): 189-198.
WANG Fangfang, YANG Pengwei, ZHAO Guangjin, et al. Development and challenge of flexible operation technology of thermal power units under new power system [J]. Power Generation Technology, 2024, 45(2): 189-198.
- [132] 周晓敏, 葛少云, 李腾, 等. 极端天气条件下的配电网韧性分析方法及提升措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(2): 505-513, 681.
ZHOU Xiaomin, GE Shaoyun, LI Teng, et al. Assessing and boosting resilience of distribution system under extreme weather [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(2): 505-513, 681.
- [133] SURAPARAJU S K, SAMYKANO M, VENNAPUSA J R, et al. Challenges and perspectives of energy storage integration in renewable energy systems for net zero transition [J]. Journal of Energy Storage, 2025, 125: 116923.
- [134] 陈耀红, 罗志坤, 叶文浩, 等. 针对湖南电网的高温热浪风险评估研究[J]. 供用电, 2024, 41(10): 94-100.
CHEN Yaohong, LUO Zhikun, YE Wenhao, et al. Research on risk assessment of high temperature heat wave for Hunan power grid [J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(10): 94-100.
- [135] 邹必昌. 含分布式发电的配电网重构及故障恢复算法研究

- [D]. 武汉: 武汉大学, 2012.
- ZOU Bichang. Research on reconfiguration and fault recovery algorithm of distribution network with distributed generation [D]. Wuhan: Wuhan University, 2012.
- [136] 廖思阳, 皮山泉, 徐箭, 等. 新型电力系统直控式负荷多级协同调控关键技术综述[J]. 高电压技术, 2023, 49(9): 3669-3685.
- LIAO Siyang, PI Shanquan, XU Jian, et al. Review of key technologies for multi-level cooperative regulation of direct-controlled loads in new power systems [J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(9): 3669-3685.
- [137] 李建林, 康靖悦, 辛迪熙. 新型电力系统储能技术应用研究[J]. 分布式能源, 2024, 9(6): 1-8.
- LI Jianlin, KANG Jingyue, XIN Dixi. Application research of new power system energy storage technology [J]. Distributed Energy, 2024, 9(6): 1-8.
- [138] 赵冬梅, 徐辰宇, 陶然, 等. 多元分布式储能在新型电力系统配电网侧的灵活调控研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(5): 1776-1799.
- ZHAO Dongmei, XU Chenyu, TAO Ran, et al. Review on

flexible regulation of multiple distributed energy storage in distribution side of new power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(5): 1776-1799.



加鹤萍

收稿日期: 2025-01-17 修回日期: 2025-06-11

作者简介:

加鹤萍(1992),女,博士,副教授,通信作者,主要研究方向为面向新能源消纳的灵活资源建模及优化,E-mail: jiaheping@ncepu.edu.cn;

吴昌蔚(2001),男,硕士研究生,主要研究方向为虚拟电厂与电力市场,E-mail: wuchangwei_ncepu@163.com;

刘敦楠(1979),男,博士,教授,主要研究方向为电力市场、能源互

联网,E-mail: liudunnan@163.com;

杨菁(1977),男,学士,高级工程师,主要研究方向为电力市场和电力经济,E-mail: Yang-jing@sh.sgcc.com.cn;

余涛(1980),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为电力市场和电力系统及其自动化,E-mail: yu_tao@sh.sgcc.com.cn。

(编辑 曾文静)