

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

别朝红, 卞艺衡, 张理寅, 黄玉雄, 孙思源, 李更丰

(电工材料电气绝缘全国重点实验室(西安交通大学电气工程学院), 陕西省 西安市 710049)

Key Technologies of Risk Prevention and Emergency Management Against Extreme Events for New Power Systems

BIE Zhaohong, BIAN Yiheng, ZHANG Liyin, HUANG Yuxiong, SUN Siyuan, LI Gengfeng

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment (School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University), Xi'an 710049, Shaanxi Province, China)

ABSTRACT: Ensuring power security is a basic requirement for implementing the overall national security concept. At present, China's power system is evolving towards the new power system. The uncertainty of renewable energy, low immunity and weak support of equipment, and other characteristics are superposed by increasingly severe extreme events, making it a complex and challenging task to improve the resilience of power systems and prevent power security risk. Based on the detailed introduction of the challenges faced by the new power system in improving the resilience, this paper summarizes techniques of risk prevention and emergency management for the new power system in coping with extreme events from the four levels of "risk assessment, investment planning, prevention/preparation, and response/restoration", and systematically analyzes the key technologies and research priorities at each level. Finally, the realization path of ensuring the power security of the new power system is prospected, and the directions of further research are put forward.

KEY WORDS: new power system; resilience; extreme events; high proportion of renewable energy; risk assessment; multiple indexes benefit analysis; collaborative operation; flexible resource

摘要: 保障电力安全是贯彻落实总体国家安全观的基本要求。当前,我国电力系统正向新型电力系统演进,新能源不确定性、设备低抗扰与弱支撑性等特征变化叠加日益严峻的极端事件威胁,使得提升电力系统弹性、防范电力安全风险成为一项复杂且具有挑战性的工作。该文在详细介绍新型电

力系统弹性提升所面临挑战的基础上,从“风险评估—投资规划—预防准备—响应恢复”4个层面归纳新型电力系统对极端事件的电力风险防范与应急管理技术,系统分析各层面的关键技术与研究重点。最后,对保障新型电力系统电力安全的实现路径进行展望,提出进一步深入研究的方向。

关键词: 新型电力系统; 极端事件; 高比例新能源; 弹性; 风险评估; 多指标要素效益分析; 协同运行; 灵活资源

0 引言

电力系统是现代国家运行的基石,保障电力可靠供应对现代社会的有序运转具有重要意义。近年来,台风、暴雨洪涝、极寒、高温等自然灾害以及网络攻击、电磁攻击等人为攻击事件频发,给电力系统安全运行造成严重威胁,迫切需要提升电力系统的风险防范与应急管理能力,保障电力可靠供应与人民生命财产安全。旨在防范极端事件风险的电力系统弹性的概念应运而生,提升电力系统弹性已逐步成为各国着力发展的国家战略^[1-3]。

“双碳”战略目标指引下,建设清洁低碳、安全高效的新型能源体系,提高能源供给保障能力成为转变经济发展方式、保障国家能源安全的重要一环。围绕这一目标,电力系统“发—输(变)—配—用”各环节将发生根本变革,系统形态、供给结构、运行机理等将实现深刻转变,呈现出“低系统转动惯量、高比例新能源+高比例电力电子设备、夏冬负荷双高峰、发电出力和用电负荷双侧随机波动(一低、两高、双峰、双随机)”的特征,给电力系统安全稳定运行提出了新的挑战。我国的电力系统规模

基金项目: 国家自然科学基金项目(U22B20103)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (U22B20103).

大、传输距离长、电压等级高、网架结构复杂，在新型电力系统建设背景下极端事件风险极高，亟需提出适应新型电力系统的弹性提升技术，形成风险防范与应急管理对策，支撑新型能源体系构建与能源安全国家战略。

本文面向提升新型电力系统弹性、防范极端事件下电力安全风险的重大需求，首先，介绍弹性研究基本架构，阐明了提升新型电力系统弹性面临的技术难题；其次，归纳应对极端事件的“风险评估—投资规划—预防准备—响应恢复”电力风险防范与应急管理技术，结合调研综述与理论创新，深入分析各层面的关键技术；最后，对未来的研究方向进行展望。

1 电力系统弹性的概念及技术框架

1.1 电力系统弹性的概念及辨析

1.1.1 电力系统弹性概念

防范极端事件的电力安全风险是电力系统弹性的研究范畴。电力系统弹性的概念可以归纳为系统对小概率-高风险极端事件的预防、抵御以及快速恢复负荷的能力，具有较高弹性的电力系统称为弹性电力系统。图1的梯型曲线描述了电力系统在极端事件发生前后的响应特性，相较于传统电力系统，弹性电力系统在极端事件前有能力针对其做出相应的准备与预防，极端事件过程中有能力充分抵御、吸收、响应以及适应，极端事件后有能力强快速恢复到事先设定的期望正常状态。

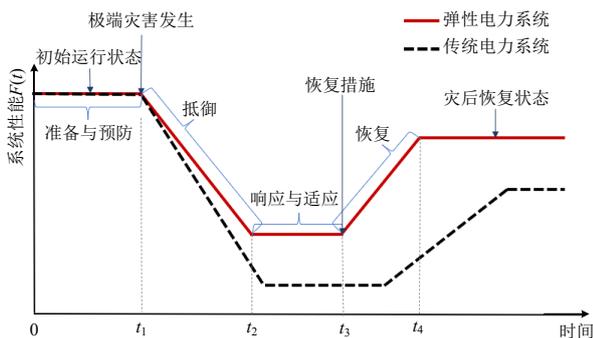


图1 电力系统在极端事件发生前后的响应特性

Fig. 1 Response characteristics of power system before and after extreme events

1.1.2 电力系统弹性与3道防线

从20世纪60年代起，大面积停电事故就时有发生^[4]。为应对这类事故，我国颁布了《电力系统安全稳定导则》，将电力系统的扰动分为一般故障、严重故障、特别严重故障3类，要求分别采取相应措施保障系统安全稳定，也就是“三道防线”^[5-6]。

以三道防线为基础，有学者进一步提出了大停电综合防御体系^[4,6-7]，有效降低了大面积停电风险，保障了我国电力系统的安全稳定运行。大停电防御体系通常更关注电力系统局部故障引发的连锁反应，典型案例包括2003年北美“8·14”大停电^[8]、2009年巴西“11·10”大停电^[9]等，控制与恢复以大电网为主，对极端事件的影响考虑不足。而极端事件影响范围广，往往会在短时间内造成大量元件故障，系统最后一道防线可能被突破。电力系统弹性作为大停电防御体系的补充，将在极端事件风险防范方面做出突破。

1.1.3 电力系统弹性与可靠性

弹性与可靠性都能衡量电力系统故障损失，但可靠性以停电损失的数学期望为核心，在全概率意义上刻画安全风险，由于电力系统元件众多，评估的抽样环节通常仅计及N-1、N-2等常规事件，小概率极端事件导致的电力安全风险被湮没，如图2的概率-损失坐标图所示；弹性反映的是系统条件概率意义下的风险，仅针对小概率极端事件，描述图中的拖尾部分，这些极端事件概率小，但损失极大（如造成上百万用户停电，经济损失达亿元量级），风险很高，如图2的风险-损失坐标图定性展示，在电力系统风险评估中需加以重视。

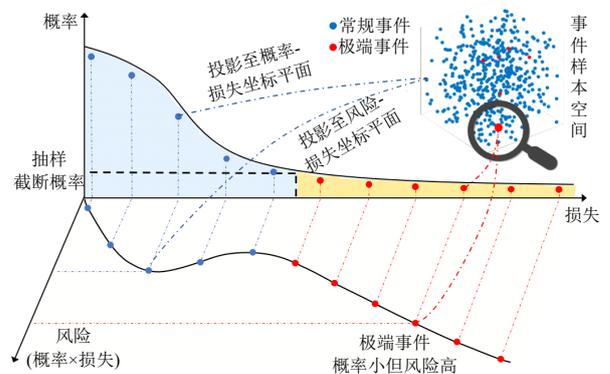


图2 电力系统弹性针对的极端事件与常规事件的比较

Fig. 2 Comparison between extreme events studied by power system resilience and normal events

1.2 电力系统弹性研究的基本架构

电力系统弹性相关研究通常可以划分为极端事件及其影响建模、弹性评估、弹性提升3部分^[10]，如图3所示。

极端事件及其影响建模旨在刻画极端事件多维参数的概率及其对电力系统的致灾机理，为弹性评估与提升研究提供基础的数学模型。具体而言，其包含极端事件概率建模、元件脆弱性建模两部

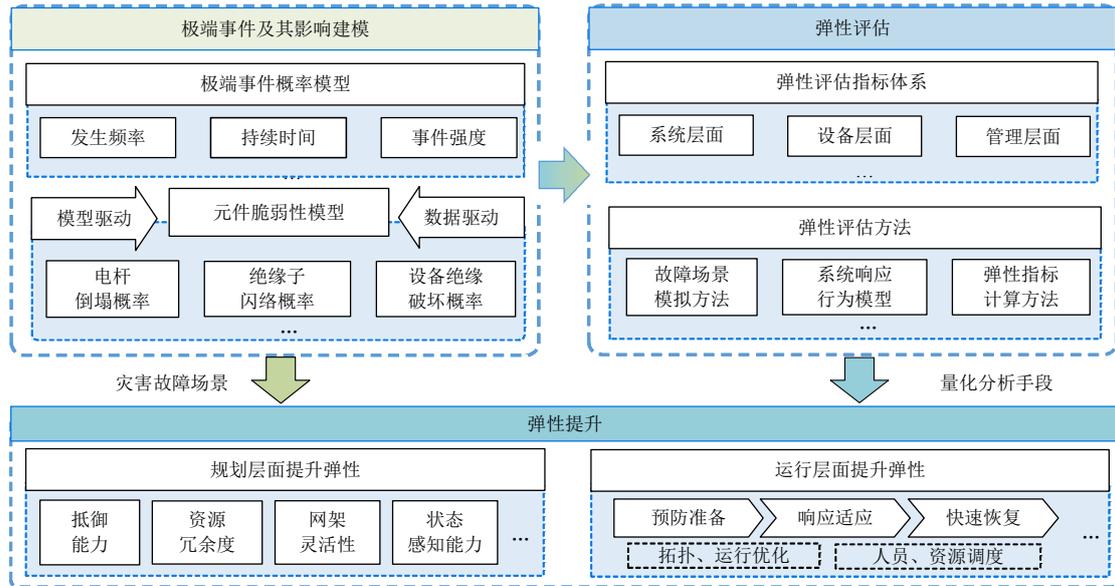


图 3 电力系统弹性研究的基本架构

Fig. 3 Basic framework of power system resilience study

分。极端事件概率建模主要分析极端外部环境的发生频率、持续时间、强度等参数的规律，从而能够生成符合地区灾害发生演进规律的灾害场景。元件脆弱性建模主要分析极端事件影响下电力系统元件的复杂故障模式，考虑元件故障的独立性和相关性，通过机理模型或数据驱动方法建立元件的故障模型，将极端事件对电力系统的影响反映在元件故障率参数中。

弹性评估旨在通过科学、合理的指标量化系统应对极端事件的抵御和恢复能力，反映电力系统弹性的核心影响因素，为电力系统弹性提升确定优化方向。弹性评估研究包括弹性评估指标体系和评估方法两个方面。指标体系的研究分析电力系统弹性的内涵和特征，从系统、设备、管理等不同层面定义能够反映极端事件下系统弹性水平影响因素的评估指标，建立综合评价体系。评估方法的研究在基于建模方法生成一系列故障场景的基础上，考虑极端事件影响及系统响应行为，对极端事件下电力系统的抵御和恢复过程进行模拟以计算弹性指标，为电力系统弹性提升研究提供量化手段。

弹性提升旨在通过规划、运行等层面的措施提升系统对极端事件的抵御、适应与恢复能力。在规划层面通过元件强化、资源配置等措施提升系统抵御能力、资源冗余度、网架灵活性及状态感知能力，研究的重点为考虑复杂场景识别系统关键环节，在有限的预算下尽可能使资源发挥更大的弹性提升效果；在运行阶段制定高效的预防准备、响应适应、

应急恢复决策，通过优化拓扑运行与人员资源调度方案实现故障的及时清除与负荷的快速恢复。

2 新型电力系统背景下防范极端事件风险面临的挑战

2.1 极端事件的影响愈发显著

2.1.1 复合自然灾害频发强发

全球变暖加剧气候系统不稳定性，自然灾害呈现“频发、强发”的趋势，多灾害并发的复合灾害愈发频繁，对电力系统的影响愈发显著。2019年8月在浙江省温岭市登陆的超强台风“利奇马”两天内共造成72座35kV以上变电站、4330条10kV及以上线路、676.95万用户停电；2021年2月，美国得克萨斯州极寒天气导致采暖负荷急剧上升，风机叶片、天然气井口冰冻，负荷削减峰值一度达到2000万kW；2022年8月，我国四川遭遇高温天气叠加严重干旱，单日最大电力缺口超1700万kW；2023年7月在福建省晋江市登陆的台风“杜苏芮”叠加暴雨，一天内造成1075条10kV及以上线路、130.47万用户停电。

2.1.2 人为攻击威胁与日俱增

电力系统是人为攻击的重要目标。近年来逆全球化思潮甚嚣尘上叠加多重政治博弈，地缘政治持续紧张，电力系统遭受物理破坏、网络攻击、电磁攻击等威胁与日俱增。2019年3月，委内瑞拉大部分地区发生持续时间超过24h的停电事故，23个州中一度有20个州全面停电，委内瑞拉政府方面

表示其电力系统先后遭受了针对计算机和控制中枢的网络攻击,以及阻碍恢复过程、瘫痪电力设备的电磁和物理攻击;俄乌冲突中,俄军于2022年11月对高压输电线路的炮击导致为乌克兰提供25%以上电力的扎波罗热核电站完全断开与乌电网的连接,乌全国450万人遭遇停电,首都基辅将近50%居民断电。

2.1.3 终端高度电气化下停电损失难以承受

随着各领域电能替代的不断加深,通信基站、数据中心等新兴产业对电力的需求快速增长,工业、建筑、交通等领域能源消费结构也在深刻变化,电能逐步成为终端能源消费的主体。预计到2060年,电能占终端能源消费比重将达到70%^[11]。高度电气化的现代社会对电力供应的依存度越来越高,极端事件带来的停电损失已经难以承受。

2.2 新型电力系统特征变化带来的挑战

2.2.1 系统充裕度及稳定性问题突出

未来电源结构呈现高比例新能源特征,预计到2060年,风电、光伏发电装机容量占比将接近80%^[12],成为新型电力系统的主要电量来源。受自然因素影响,风、光等新能源出力波动性较大,导致供需平衡难度加大。2017年2月8日发生的南澳大停电,事故当天风电出力锐减,而南澳电网内风电装机占比达30%,高温天气造成负荷激增,大量用户停电,损失负荷近30万kW。同时,随着新能源占比提高,常规机组被大量替代,电力系统调节能力下降,存在频率越限和功角稳定破坏风险。2019年8月9日,英国电网大规模停电事故中,由雷击引起的单相接地短路故障导致大量分布式电源脱网,频率大幅变化触发更多电源脱网,电网频率调节能力无法满足功率缺额,从而触发低频减载装置动作,导致多地区停电。

2.2.2 故障演化及设备耦合关系复杂

大量自动化、信息化设备融入电网,系统故障波及范围增大,更容易受到网络攻击威胁,发生大面积停电。同时,设备耦合关系更为复杂,有序控制与恢复的难度增大。

2.3 提升新型电力系统弹性的技术难点

当前,弹性研究已经取得丰硕成果,但在新型电力系统内部特征及外部环境变化的背景下,提升电力系统弹性、防范极端事件风险面临新的挑战,有待突破如下4个层面的技术难题。

1) 在风险评估方面,极端事件的演进特性、

高比例新能源带来的强不确定性与低抗扰性导致新型电力系统故障模型不仅要包含传统的元件层级的故障机理模型,同时要对系统层级的故障演化规律进行刻画;新型电力系统设备类型、数量的增多导致其状态呈指数增长,系统的复杂响应行为导致运行模拟模型更加复杂,传统的解析法难以处理维数灾难问题,模拟法也难以保障评估效率。

2) 在应对极端事件的投资规划方面,新型电力系统低惯量特性导致频率问题凸显,在规划中应计及安全运行约束,然而规划模型中显式表达复杂安全约束困难;新型电力系统建设中需兼顾可靠性、经济性、弹性、碳减排等多目标需求,通过优化的方式难以对长期运行细致建模,有待从评估的角度对规划方案在长时间尺度上的多指标要素效益进行分析。

3) 在极端事件前的预防准备方面,事前确定薄弱环节,加固高风险元件能够有效减轻灾害影响,然而,气候变化背景下复合灾害及气象、地理、运行多维影响因素给风险设备的准确预警带来挑战;事前调整开机方式、发电机出力、电网拓扑以及部署应急资源等措施可以减轻扰动事件的影响,然而,复合灾害往往导致大面积停电,预防措施有效支持恢复尚需解决故障不确定下事前-中-后多阶段多资源协同难题。

4) 在事中及事后的响应恢复方面,新型电力系统运行状态多变,特别是配电网层面,灾害下需快速准确感知系统状态以协调一、二次设备实施控制策略,然而复杂故障导致状态感知困难,同时信息设备失效对感知与控制的影响难以忽视;分布式新能源、电力电子设备大量接入,灵活性资源广泛分布,不同类型、不同位置灵活资源支撑恢复的潜力尚待挖掘。

3 新型电力系统应对极端事件的全周期风险防范关键技术

应对上述难题,应充分考虑新型电力系统形态特征变化的影响,完善极端事件下系统风险的辨识与评估方法,挖掘应对极端事件的各阶段措施、各类灵活资源的协同潜力,形成系统性的解决方案。本文从“风险评估—投资规划—预防准备—响应恢复”4个层面归纳了电力风险防范与应急管理技术,如图4所示。

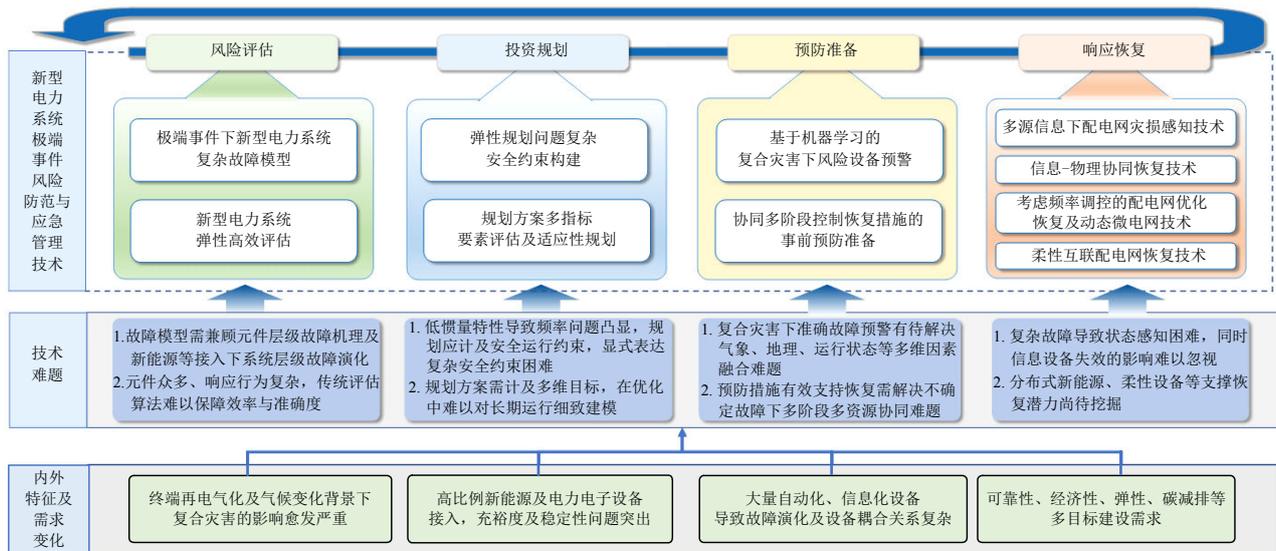


图 4 新型电力系统应对极端事件的风险防范与应急管理技术

Fig. 4 Risk prevention and emergency management technologies against extreme events for new power systems

3.1 风险评估

3.1.1 极端事件下新型电力系统复杂故障模型

1) 元件层级故障建模。

在极端事件风险评估中，元件层级故障建模是建立致灾因子与元件故障率之间的关联模型。对于极端自然灾害，大量研究围绕灾害强度、发生范围、持续时间对元件故障的影响展开。这类模型从外力破坏或电气故障两个方面建立描述元件故障机理的物理模型，比如电杆载荷模型、滑坡倒杆模型、绝缘子闪络模型、架空线击距模型等，再根据物理模型中多种因素的概率分布推导得出元件故障率。对于极端人为攻击，因其不具备概率统计特性，通常采用事故模式及后果分析方法进行建模分析。文献[13]基于风速和风暴等级量化了风暴对电力系统元件故障率的影响；文献[14]采用统计数据建立回归模型，将风速值和线路设计值故障率建立函数映射关系；文献[15]通过考虑台风路径与区域输电系统的关系来确定影响持续时间，量化了台风对元件的影响程度；文献[16]根据天气模型计算了输电线路处的风速、降雨速率和载冰量，通过曲线拟合得到载冰量与线路故障率之间的关系。上述研究表明，极端事件下元件故障率显著受外部环境因素影响，而台风、暴雨等极端事件具有时空演化特性，时变元件故障率模型成为研究重点。文献[17]详细分析了电气设备故障概率受台风和暴雨的影响，提出了一种针对这些自然灾害的时-空预警方法，能够预测自然灾害的时-空演变趋势，定量分析自然灾害造成的输电线路元件故障率变化。

随着新型电力系统发展，其元件故障建模也面临气候变化加剧、高比例新能源渗透、大量电力电子设备接入等挑战。极端气候具有年际群发性和气候分区群发性特征^[18]，因此在描述元件故障率时，需要从原来的一维连续时间下的年均值模型，拓展到考虑历史同期时间和外部气象环境因素的多维模型。文献[19]通过解析方法建立了长时间尺度下的元件时变故障率模型，刻画了系统随时间、外部因素等变化的运行风险。高比例新能源的接入使新型电力系统在极端气候下的运行风险进一步加剧，文献[20]分析了风机叶片覆冰下的气动特性，建立了冰灾下风机输出功率模型和设备可用性模型。大量电力电子设备入网使故障类型更加复杂，元件的控制模式成为影响故障的重要因素。文献[21]分析了换流器控制策略影响元件故障的机理，建立换流器引起保护误动的模型，并提出柔性互联配电系统的连锁故障评估方法。综上，新型电力系统元件故障建模从外部需要考虑极端事件在不同时间标度的统计特性，从内部需要考虑新能源、电力电子设备接入下元件故障的机理，建立时间、环境、元件运行模式共同影响的故障模型。

2) 系统层级故障演化过程。

目前，关于极端事件下系统层级的故障时-空演化机理的研究有待深入。复杂故障的发展过程可分为 2 个阶段^[22]：1) 电网网架仍比较坚强，偶发的故障引发潮流的重新分配，而不会导致系统崩溃，且相邻故障之间的间隔时间较长；2) 连续的故障使电网稳定性持续降低，可能导致低压、过载、频

率波动等问题,甚至使系统处于紧急状态,出现解列,发生大规模停电事故。以下将从上述2方面分别介绍国内外极端事件下新型电力系统复杂故障机理的研究现状。

在复杂故障的演化过程中,在上述第一种情况下若故障之间间隔时间较长,可以认为相邻故障之间的暂态过程已经结束,可采用基于潮流计算的稳态分析。该阶段是故障演化研究的主要关注时期,目前已有部分国内外学者基于稳态分析对新型电力系统的故障演化机理进行研究,通过OPA连锁故障模型(ORNL-Pserc-Alaska, OPA)等方法从电力系统分析的角度揭示了电力系统的自组织临界特征。文献[23]对OPA的模型进行改进,在内循环的快动态中综合考虑线路潮流越限、调度、自动化和继电保护等因素的影响。为了衡量新能源接入对潮流分布的影响,文献[24]基于复杂网络理论提出了相应的量化指标,可在较小的计算复杂度下分析线路过载风险,为系统的安全运行提供参考。

上述第二种情况下,故障演化是一个连续的复杂动态过程,涉及到发电侧、输电系统、配电网以及负载用户等多个环节的众多元件的动态特性,以及相应的控制策略,因此动态过程也是新型电力系统故障演化的一个研究重点。通过考虑电网电压骤降恢复阶段,文献[25]建立了暂态数学模型,详细剖析了其对风电机组动态特性和连锁脱网中高电压穿越过程的影响。在高比例新能源背景下,新能源将对电网动态过程产生重大影响,该文献在探究了高渗透率风力发电对于系统功角、电压以及频率稳定性的作用和影响之后,定性地讨论了大规模风电并网下故障可能的发展过程。

总体而言,现有针对多类极端事件下元件层级故障机理的研究已较为丰富。在系统层级故障演化方面,极端事件下诸如强风、降雨等外部环境因素造成的故障和系统内部过压、失稳等故障相互交织发展,现有研究主要围绕过载、过压等故障引发的连锁故障展开,未来的研究可以重点关注考虑极端事件时空演变下的故障动态演化过程和高效的在线推演算法,将秒级的系统状态模拟和小时级的极端事件模拟结合,推演出合理的连锁故障路径。

3.1.2 新型电力系统弹性高效评估

1) 基于模拟法的高效弹性评估。

弹性评估的核心是构建合理的评价指标和准确高效的评估方法,量化电力系统的弹性水平,为

面向弹性提升的规划和运行提供分析手段。在评价指标方面,“梯形”曲线常被用于描述电网在极端事件发展不同阶段的响应情况,通过定义时间依存的弹性指标,对弹性梯形曲线进行量化,可以获取不同阶段下系统性能的退化及恢复特征^[26-27]。文献[28]面向应对突发事件,归纳了适应力、吸收力、恢复力3个指标以表征系统维持稳定、抵抗中断、恢复性能的能力的。文献[29]在总结应变力、防御力和恢复力3个核心特征的基础上,进一步提出感知力、协同力和学习力以拓展弹性的内涵。文献[30]着眼于新型电力系统风险因素更加多源化、多样化的特征,综合考虑安全性、灵活性和弹性等系统属性,提出了包含切负荷、弃风/弃光/弃水、碳排放的风险指标体系,综合量化系统风险。

传统弹性评估算法主要包括解析法和模拟法,其中解析法通过场景枚举获得可能出现的弹性场景,通过系统状态的发生概率与故障后果计算系统弹性指标,不涉及系统状态的时序转变过程,难以计算切负荷频率等时序相关的评价指标,且随着系统规模变大,元件数量与类型不断增多,系统状态数目将呈指数增长,基于解析法的弹性评估将面临维数灾难^[31]。

模拟法通过概率抽样、多元模拟等手段,采样元件可能出现的系统状态,模拟系统在未来一段时间内的运行情况,据此进行故障后果分析,计算弹性指标^[32]。模拟法的计算效率与系统规模的关联性较弱,相对来说更适合用于大规模系统的弹性评估^[33];另一方面,在评估过程中需要基于数学规划等方法获得考虑防御与恢复措施的停电损失。例如,在配网失去主网供电能力后,可以灵活调整拓扑结构,形成基于分布式电源的负荷恢复策略^[34],为此,需要建立多元灵活资源协同支撑的电力系统应急调控和负荷恢复模型。基于模拟法的弹性评估流程包括极端事件模拟、元件脆弱性分析、系统响应行为分析、弹性指标计算4个环节^[35],如图5所示。

在极端事件建模环节,建立灾害强度和频率之间的关系,由此导出在未来一定时段内某灾害关键参数的概率分布。进而采样得到所模拟灾害的初始状态,并通过气象或地理模型将参数转化为具有时空特性的动态灾害场景。在元件脆弱性建模环节,挖掘电力系统元件易损性与各类致灾因子强度之间的关系,其核心是建立考虑各类极端事件影响的元件故障率模型。在系统响应行为分析环节,建立

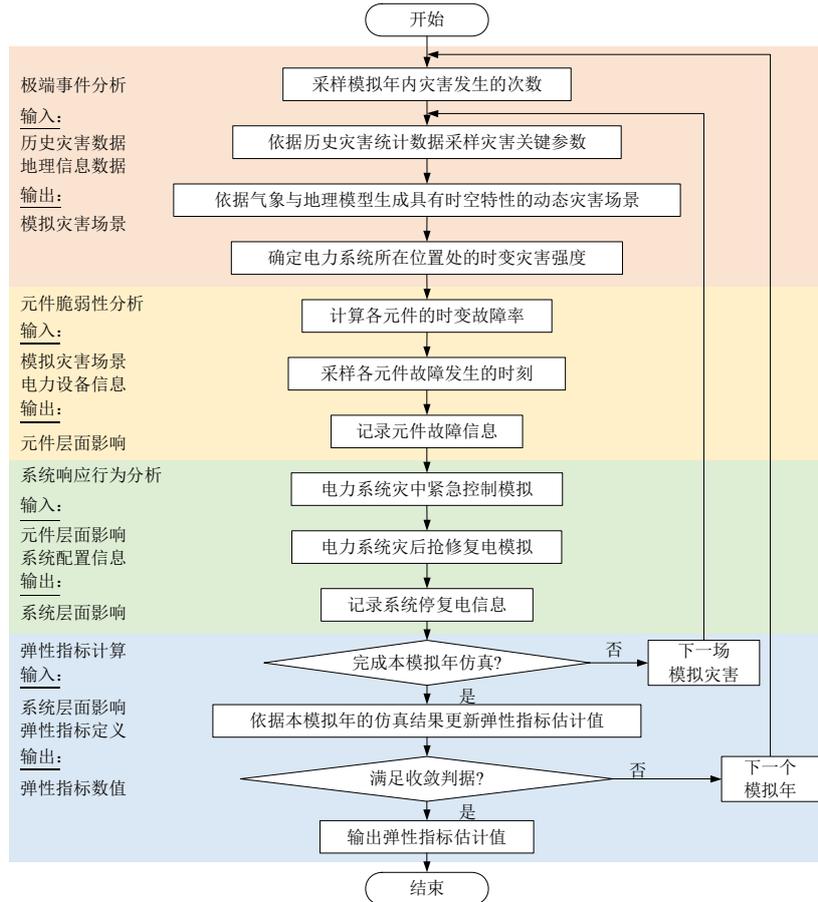


图 5 成本-效益分析中的弹性指标概率化评估方法

Fig. 5 Calculation method of resilience indexes in cost-benefit analysis

电力系统应对极端事件的紧急控制与抢修复电模型，实现系统停电过程的模拟。在弹性指标计算环节，考虑系统在整个灾害中加权失负荷损失与维修成本，采用蒙特卡洛方法模拟每年造成的经济损失，通过大量模拟年计算实现指标的收敛。以台风为例，其造成的年度经济损失 X 可由下式计算：

$$X = \sum_{r=1}^{\Lambda} \left[\sum_{k \in \mathcal{F}_r^L \cup \mathcal{F}_r^N \cup \mathcal{F}_r^{SB}} L_k^{\text{repair}} + \sum_{i \in \mathcal{N}} L_i^{\text{outage}}(d_{i,r}) \right] \quad (1)$$

式中： Λ 为过境台风总数； \mathcal{F}_r^L 、 \mathcal{F}_r^N 、 \mathcal{F}_r^{SB} 为第 r 次台风下故障线路、节点和变电站集合； L_k^{repair} 为元件 k 的维修费用； L_i^{outage} 为节点 i 的失负荷损失； $d_{i,r}$ 是节点 i 在第 r 次台风期间的失负荷时间。

由于系统多重严重故障发生概率较低，为高效捕捉严重故障事件、量化综合风险，研究人员提出了改进的采样方法。文献[36]提出“分层采样、逐层嵌套”的子集模拟算法，通过马尔可夫链引入条件事件，将小概率事件转化为逐层嵌套的多个高概率条件事件，实现小概率事件的精准捕捉。文献[37]基于交叉熵理论提出重要抽样方法，通过系统状态

概率分布的扭曲变形，有效提高对系统失负荷状态的抽样效率，减少蒙特卡洛仿真的抽样次数。

2) 基于人工智能的在线弹性评估。

极端事件及其对电力系统的影响具有较强的时变性和不确定性，在电力系统失电演化期间，需要根据内外部条件的变化情况，对系统弹性进行短时间尺度的在线分析与可视化展示，指导事中阶段的故障防控以及事后阶段的负荷恢复决策制定。然而，极端事件的时-空演化特性以及新型电力系统的复杂响应行为，给弹性评估的场景生成、运行模拟、状态分析等带来严峻挑战，模拟类方法难以满足灾害发生过程中在线指导决策的需求。电力系统的数字化转型与智能化升级，混合增强智能等新兴人工智能技术为高效评估电力系统弹性提供了新的范式[38]。可以利用极端事件以及极端事件下的电力系统停电和恢复历史数据进行数据驱动的弹性分析[39]，支撑故障特征挖掘、负荷恢复决策等任务。然而，现有研究受制于机器学习黑箱特性的缺陷，难以满足电力系统弹性评估的综合需求。因此，探索人工智能与弹性评估算法的结合，基于数据驱动

预测决策技术,平衡评估算法效率与准确性矛盾,满足极端事件下弹性在线实时评估的要求成为弹性评估领域的重要方向,研究重点包括:1)弹性评价指标及其分类表征,将新型电力系统的弹性指标分为“事前-事中-事后”3个部分,依据停电损失的不同维度,从频率、数量、时长等基础指标要素出发,建立“全过程-多要素”弹性指标体系;进一步嵌入领域知识,分析故障校正措施对于指标要素的影响,建立面向学习的指标要素分类表征模型,为混合增强的评估方法提供量化分析工具;2)弹性混合增强智能评估算法,研究故障场景特征提取方法,基于智能体-环境交互学习,搜寻考虑灵活弹性资源的最优恢复策略,得到故障后果,进而建立基于深度学习的场景-后果映射模型,加速弹性评估的在线计算效率;基于上述研究内容,设计混合增强的弹性评估算法,由领域模型保障弹性评估的可行性,由数据驱动延拓弹性评估的应用场景,由认知增强平衡人的智力和计算机的计算能力,最终形成“模型-数据-认知”混合增强智能评估新方法。

在严重自然灾害下,由于室外的测量设备、通信设施可能出现损坏,电网信息采集水平下降,实测数据可能不充分且准确度难以保证,需要采用状态估计技术分析电网的运行状态。新型电力系统分布式资源、电动汽车、多能耦合等技术的应用使系统面临着更为复杂多样的不确定因素,状态估计所需数据量大大增加^[40],有待提出相适应的状态估计和态势感知方法,综合应用高级量测体系(advanced measurement infrastructure, AMI)采集的负荷和发电数据、微型相量测量单元(micro-phasor measurement unit, μ PMU)采集的各节点数据准确估计系统运行状态^[41]。

3.2 投资规划

3.2.1 弹性规划问题复杂安全约束构建

现有规划模型在运行模拟中侧重考虑稳态安全约束,或考虑电压幅值与设备容量等能够显式表达的安全运行约束,而考虑高比例新能源和电力电子设备接入后,低惯量特性会给频率调节带来巨大挑战,在规划模型中显式表达此类复杂安全运行约束将会十分困难或无法实现。文献[42]在没有显式微分代数方程(differential-algebraic equations, DAEs)的情况下进行建模,通过扩展等面积准则(extended equal area criterion, EEAC)进行快速暂态稳定判断并解析

推导稳定割,能够将问题大小缩小到与传统规划模型相似的大小,较好地解决了问题规模爆炸的问题。

为了实现电力系统运行问题的高效解决方案,得益于神经网络强大的表达能力,基于神经网络的数据驱动方法被认为是一种很有前途的方法^[43]。文献[44]基于深度神经网络,将复杂频率安全约束嵌入机组组合问题。文献[45]基于深度强化学习,提出一种电力系统预防性安全约束最优潮流快速求解方法。为了更好地将神经网络集成至机组组合问题。然而,神经网络作为“黑盒模型”的可解释性以及在面对高维问题时的学习能力仍然受到考验。内嵌物理知识神经网络(physics informed neural network, PINN)为解决此问题提供了新的思路^[46],提出了通过PINN进行电网暂态稳定评估的基本框架,网络输入涵盖了发电机的出力、网络拓扑变化,较好地实现了暂态稳定特性刻画。

未来进一步完善基于PINN的约束构建方法的方向包括研究系统规模增长和故障场景增多情况下方法的泛化能力,以及考虑更为复杂的发电机模型或控制模式下网络的收敛性问题。

3.2.2 规划方案多指标要素评估与适应性规划

研究弹性规划方案的多指标要素评估方法能够定量刻画不同规划方案之间的优劣,为新型电力系统的构建提供正确引导。结合新型电力系统多目标建设需求,建立规划方案弹性效益、经济性、碳排放效益3类要素的概率评估框架。

规划方案的弹性效益评估旨在对施加该方案前后的系统在未来一定年限内承受极端事件的损失情况进行差异对比,以明确方案的弹性提升效果。弹性效益评估需模拟该区域未来一定年限内的典型极端事件场景,针对特定极端事件的模拟评估方法已在3.1.2节介绍,本节不再叙述。由于不同模拟年下极端事件的发生及发展过程由采样得到,规划方案的效益量化需提取弹性(损失)指标的统计特征,选择损失的风险价值(value at risk, VaR)以及尾部在险价值(tail value at risk, TVaR)进行量化,损失的VaR以及TVaR可计算如下:

$$VaR_{\alpha}(X) = \inf\{x : P(X \leq x) \geq \alpha\} \quad (2)$$

$$TVaR_{\alpha}(X) = \frac{1}{1-\alpha} \int_{\alpha}^1 VaR_u(X) du \quad (3)$$

式中: $\inf\{\cdot\}$ 表示下确界; α 表示设定的置信水平。

针对碳减排效益,可采用宏观统计法,基于各类燃料的典型碳排放因子,计算得到系统在统计周

期内的碳排放；或采用全生命周期法以及碳排放流方法对规划周期内电力系统建设、源侧、荷侧、网侧的低碳成本进行核算估计，加和规划周期内各年的电力设施建设碳排放量、源侧发电直接碳排放量、荷侧用电间接碳排放量和网侧网损间接碳排放量，得到规划周期内新型电力系统规划方案的碳排放量水平^[47-48]。针对规划方案的经济性，对于可控机组、储能等设备配置，计算其投产、运行、维修、退役处置成本在内的的设备资产全生命周期成本；对于线路强化或建设标准提升，计算固定投资费用以及规划方案实施前后的运行维护成本差异。

基于所构建的多指标要素评估框架对拟采取规划方案进行评估和比选，筛选 Pareto 最优方案进行实施，可以提升规划方案的科学性和可行性。随着气候不稳定性的加剧，气候变化以及极端事件发生趋势面临不确定性，为了保障规划决策在长时间尺度上的有效性，采取适应性规划思想建立新型电力系统的动态适应性规划决策框架成为应对气候不确定性的重要手段^[49]。在极端事件演化趋势研判的基础上，构建极端事件影响模型并形成规划方案，对拟采取规划方案进行评估和比选，在系统运行中对实施的策略进行监测和效果的后评估^[50]，从而形成决策闭环，如图 6 所示。

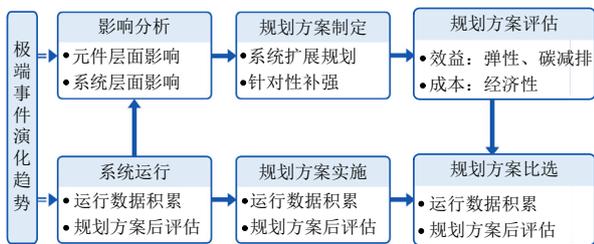


图 6 新型电力系统规划方案决策方法

Fig. 6 New power system planning decision method

当前，规划问题中综合考虑经济性和低碳效益仍是研究空白及难点^[51]，有待进一步完善考虑各类不确定因素的概率评估方法；同时，研究不同类型极端天气事件发生发展的时空相关性，在规划中考虑复合灾害的影响也是未来的重要方向^[52]。

3.3 预防准备

3.3.1 基于机器学习的复合灾害下风险设备预警

以台风、暴雨等极端自然灾害为代表的极端事件具有时-空演化特性^[53]。以台风为例，从生成到登陆可持续 3~5 日，在灾害发展的前期通过风险设备预警技术提前调整系统运行方式、加固高风险元件，能够有效降低灾害损失。

极端事件影响下，外部气象、环境等因素是导致设备故障的主要原因之一，设备风险预警的核心是确定极端事件影响下元件的故障概率。文献[54-57]分别建立了元件故障概率受台风、洪涝、冰灾的影响模型。在气候变化的背景下，台风灾害叠加快速上升的海平面，导致风暴潮、洪水等灾害在强度与频率上进一步变大，电网可能面临更加严峻的复合极端灾害影响，因此复合灾害影响下的设备风险预警具有现实意义。

极端事件影响下元件故障与气象、地理、运行状态等多维复杂因素相关，难以直接建立完备的物理模型，而机器学习方法能够从数据中直接挖掘元件故障与外部因素的条件依赖关系，如图 7 所示。同时，随着极端事件演变，系统风险动态变化，机器学习方法通过“离线训练-在线应用”满足实时风险预警需求，因此被广泛应用于风险设备预警中。文献[58]使用神经网络算法预测与强风、雷击相关的故障，并证明神经网络算法预测准确率优于统计回归算法；文献[59]提出基于贝叶斯神经网络的故障预测方法，将贝叶斯方法引入到神经网络中，使得模型能够表达每个模型参数中的不确定性，从而实现对预测置信区间的估计。同时，大量研究围绕多种机器学习算法的组合展开，文献[60-62]均采用了 CART、BART、QRF、RF 等方法，通过集成学习综合各模型优势，实现预测准确率的提升。

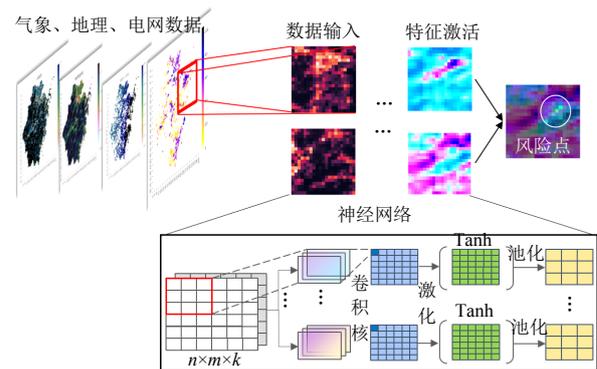


图 7 数据融合的设备风险预警

Fig. 7 Device risk warning by data fusion

由于极端事件发生概率低，实际灾害数据及灾害下电力系统故障数据有限，数据驱动的设备风险预警面临“小样本”难题，需要充分发挥先验知识和小样本数据的潜力，通过数据增强、迁移学习等方法提高模型的泛化能力。文献[63]提出基于 ADASYN 的数据增强方法，有效应对台风灾害下电网故障数据的不平衡问题；文献[64]通过迁移学

习-AlexNet 神经网络降低了故障特征提取的复杂性,在具有类不平衡性的样本集上实现了故障辨识;文献[65-66]均采用对抗生成网络方法,从小样本数据中充分学习共性特征,再将学习到的知识迁移到目标领域;文献[67]提出了相似数据匹配算法,通过筛选高相似特征提高了迁移学习模型的正向迁移率与准确度,从而实现小样本数据下的特征迁移学习。

3.3.2 协同多阶段控制恢复措施的事前预防准备

1) 预防控制措施。

有效的预防控制措施可以减轻扰动事件对设备的损坏及造成的停电严重程度。在事前或系统处于警戒状态时,采取调整开机方式、调整发电机出力、调整电网拓扑等预防控制措施可以增加系统的稳定裕度^[68]。应对极端事件对预防控制与恢复的协同性提出了更高的要求,将事前-中-后不同阶段措施密切配合,能够充分发挥预防措施对恢复的支持效果。文献[69-70]从应对最严重的故障方式着手,将预防控制、紧急控制与事后恢复建立为防御-攻击-防御-防御(defender-attacker-defender-defender)多层模型,以提升系统对极端事件的准备和响应能力,防止故障规模扩大并加快灾后恢复进程。文献[71]提出了配电网事前主动孤岛方法以减小故障波及范围,考虑了故障的随机性,以及主动孤岛与事后故障隔离、恢复的协同;文献[78]在极端事件前调整微电网运行方式及与外部电网的电能交易,考虑了故障导致的孤岛事件及其持续时间的不确定性,保障事后微网负荷供应安全。

2) 移动应急资源部署。

极端事件下恢复不仅依赖电网运行控制,还需对移动能源、应急资源等进行统筹协调。移动应急发电车(mobile emergency generators)和移动储能(mobile energy storage)具有机动性强、容量大等优点,通过预先的部署,在大面积停电后可以迅速转移到缺电区域电网以供应本地负荷或进一步形成微电网向更大的区域供电。文献[73-74]建立了考虑事后微网分区的随机规划模型以实现移动能源的优化部署,并应用渐进对冲(progressive hedging, PH)算法实现快速求解。随着用户规模的不断扩大,电动汽车也作为一种移动能源被应用于配电网恢复研究中;文献[75]将电动公交车视为发电资源,在飓风前配置在充电站中,在电网故障期间建立与关键负荷的连通路径进行供电。现阶段,电动汽车

参与电网恢复尚需要相应的引导与保障机制;文献[76]考虑用户在灾害过程中的行为特征,提出包含避难阶段和响应阶段的供电恢复引导补偿机制,以促使在站内的电动汽车用户参与向电网反向输电。除了移动能源,具备辅助巡线或搭建通信网络功能的无人机等应急资源近年来也得到了高度关注;文献[77]在事前对无人机进行优化部署,以快速巡查线路,减小故障后的灾损评估时间。

表1对上述预防准备措施的多阶段协同性及建模方法进行了梳理。现有研究多针对特定种类资源以及单一层级电网进行措施优化,考虑资源间的耦合关系及不同层级电网的协同对多资源进行联合优化将进一步提升资源利用效率与弹性提升效果。

表1 协同多阶段控制恢复措施的预防准备相关研究

Table 1 Research on preventive/preparation actions coordinated with multi-stage control/restoration measures

文献	预防决策	目标	与事中、事后的协同	模型及算法
[69-70]	输电网运行方式及拓扑调整, 负荷削减	防止故障规模扩大并加快恢复	考虑紧急控制与事后恢复措施	两阶段鲁棒规划, Nested CCG 算法
	配电网主动孤岛	减小故障波及范围	考虑故障隔离与恢复措施	两阶段随机规划
[71]	配电网主动孤岛	减小故障波及范围	考虑故障隔离与恢复措施	两阶段随机规划
[72]	微电网运行方式调整	保障孤岛后的负荷供应安全	考虑孤岛期间的运行措施	两阶段鲁棒规划, CCG 算法
[73-74]	移动发电车、移动储能部署	快速恢复负荷	考虑移动资源运输、电网重构及微网分区	两阶段随机规划, PH 算法
[75]	电动汽车部署	快速恢复负荷	考虑重要负荷恢复路径连通	两阶段随机规划, 启发式算法
[77]	无人机部署	快速感知电网状态	考虑无人机巡线路径调度	两阶段随机规划

3.4 响应恢复

3.4.1 多源信息下配电网灾损感知技术

配电网点多面广,分支众多,极端事件下识别故障位置是调控与恢复不可或缺的环节^[78],也是高效开展现场灾损评估、减少抢修响应时间的重要前提^[79]。智能电网与自动化技术发展下,数据采集与监视控制(supervisory control and data acquisition, SCADA)系统和AMI等为故障位置识别提供了多种技术手段。根据数据来源不同,故障识别方法主要有如下几类。

1) 传感器、智能电表和 μ -PMU等模拟量信息。

基于模拟量方法的一个常用思路是采集故障时或故障后的电气量,利用状态估计等方法推断征

兆最为接近的故障场景。文献[80]将无线传感器等在故障时的测量数据与搜索空间中每个故障场景的在线潮流分析数据进行比较以识别故障区段。文献[81]应用故障时的 μ -PMU 数据和负荷/DG 节点伪量测(Pseudo-measurements)数据来识别故障区段，其思想是：如果 2 个具有包含关系子图的边界之间的区域没有故障电流注入，则 2 个子图状态估计量的加权测量残差(weighted measurement residuals)应该彼此接近。文献[82]通过两个相邻子图的边界点的电压判断子图与边界点的连通性，具体方法为分别针对两个子图进行状态估计，随后对两次估计得到的边界点的电压概率分布进行比较，根据差异大小判断边界点是否与子图连接，从而判断停电区域。文献[83]通过自适应重要抽样获取拓扑状态在量测数据下的后验分布来估计拓扑和停电区域。

另一类工作是应用稀疏贝叶斯学习(sparse bayesian learning, SBL)进行故障区域识别^[84-85]。文献[84]应用有限节点的测量电压建立节点伪序电压方程，利用 SBL 以恢复完整的节点电流注入向量。将电流注入向量中元素最大的两个节点作为有故障电流注入的节点以确定故障区域。文献[85]采用故障前后测量的相量变化来恢复完整的节点注入电流信号，方法适用于不平衡配网。

2) 故障指示器信号、保护动作等数字量信息。

由于具有较低的安装和维护成本，故障指示器(fault indicator, FI)已广泛配置于配电网，并被作为高效经济的故障区段识别工具^[86-87]。当流经其所在位置的故障电流超过设置的阈值时，FI 将发出警报，具有通信功能的 FI 将向停电管理系统(outage management system, OMS)发送过流警报通知。文献[86, 88]提出了基于矩阵和逻辑推理的方法来分析触发警报的 FI 与故障位置之间的关系。文献[89]应用模糊 Petri 网(fuzzy petri net, FPN)模型来分析 FI、智能电表和保护设备的数据从而判断故障区段。文献[90]提出一种基于优化的故障诊断方法，通过最小化实际接收的 FI 数据和预期 FI 状态之间的差异来确定最可能的故障场景。文献[91-92]通过结合智能电表的停电报告和变电站测量数据对基于优化的方法做出了进一步的改进。文献[93]改进了预期 FI 状态的逻辑约束，使模型能够兼容部分场景下同一供电路径上的同时多重故障。文献[94]利用额外传感器的量测数据以解决 FI 对逆变型 DG 的微弱故障电流检测能力不足的问题。

3) 智能电表停电通知、用户故障电话以及社交媒体消息等用户侧信息。

智能电表停机通知、用户故障电话以及社交媒体消息也为灾损评估提供了有价值的信息。文献[95]根据用户电话估计每条线路的故障概率，首先利用贝叶斯定理计算样本空间中所有故障场景的概率，然后通过聚合包含所关注线路的场景，推导出每条线路的故障概率。文献[96]利用贝叶斯网络对设备停运的依赖关系进行刻画，结合智能电表的停电通知、用户电话、社交媒体消息等定位停电区域。该模型利用上下游线路状态的条件独立性对网络拓扑和征兆数据的联合概率分布进行分解，方法的一个改进方向为计及 DG 双向潮流的影响。

表 2 对上述故障区段及停电状态识别相关研究进行了总结。由于配电网量测设备部署有限，融合不同来源数据、综合各类方法的优势可以实现有限信息的互补与矫正。同时，对气象、地理、电网元件脆弱性信息进行时空匹配可以有效提升故障识别准确度^[97-98]。此外，台风等极端事件下故障及其演变模式复杂，优化灾损评估路径也是快速明确灾损状态的重要途径^[77]。

表 2 配电网故障区段及停电状态识别相关研究
Table 2 Research on identification of fault sections and outage status for distribution systems

文献	数据源				方法
	S	F	C	W	
[80]	✓	—	—	—	在线潮流计算、残差比较、遍历搜索
[81]	✓	—	—	—	状态估计、残差比较、迭代计算
[82]	✓	—	—	—	状态估计、概率分布比较、迭代计算
[83]	✓	—	—	—	贝叶斯推理、重要抽样
[84]	✓	—	—	—	稀疏贝叶斯学习、迭代计算
[85]	✓	—	—	—	稀疏贝叶斯学习、边界优化
[86]	—	✓	✓	—	逻辑推理、遍历搜索
[88]	—	✓	—	—	逻辑关系矩阵
[89]	✓	✓	—	—	模糊 Petri 网、短路计算
[90,93]	—	✓	—	—	MFISD、MILP
[91]	—	✓	—	—	考虑智能电表信息约束的 MFISD、MILP
[92]	✓	✓	—	—	考虑 FI 和智能电表信息约束的故障距离概率最大化、MILP
[94]	✓	✓	—	—	考虑弱电流检测约束的 MFISD、MILP
[95]	—	—	✓	✓	贝叶斯概率模型、蒙特卡洛模拟
[96]	—	—	✓	✓	贝叶斯网络、Gibbs 抽样

注：S：智能传感器、 μ -PMU 等模拟量信息；F：故障指示器、保护设备等数字量信息；C：智能电表停电报告、用户故障电话、社交媒体信息；W：气象、地理、元件脆弱性信息；MFISD：最小化 FI 数据与预期偏差。

3.4.2 信息-物理协同恢复技术

新型电力系统越来越多引入先进传感和控制装置以及信息通信技术,为信息流和能量流的交互进而实现更高效的感知与控制搭建了桥梁,但也同时导致了信息和物理设施的高度相互依赖。在感知方面,尽管3.4.1节中所介绍的优化、数据融合等方法能够一定程度应对量测设备出现的数据漏报、误报,但对于大量数据错误或主站接收不到任何量测信息的情况,系统将无法判断故障位置;在控制层面,开关遥控功能失效会造成电网无法快速准确隔离故障和转供恢复^[99]。

因此,恢复过程中有必要考虑信息与电网的耦合关系。文献[100]考虑了极端事件下量测通信的不完备性,提出了与灾损评估联动、在部分区域灾损信息明确后开展抢修恢复的优化建模方法。文献[101]利用软件定义网络(software defined networking, SDN)技术和环形通信架构通信网的路由灵活性和自恢复能力,控制通信网的路由路径实现通信恢复,进而提出信息-物理耦合的配电网灾后恢复模型,设计了逐次寻找最具恢复价值负荷的启发式算法。文献[102]将交通网纳入耦合模型,通过调配搭载无线通信基站的无人机至故障区域构建应急通信网络,恢复对线路开关的控制能力以及与电动汽车的交互能力。文献[103]进一步考虑了修复队伍的抢修进程,建立了电网运行、修复调度和应急通信车调度联合优化模型,应用通信车作为移动基站在灾害后快速建立调控中心与FTU的无线通信网络。文献[104]将供能路径、开关操作人员、故障维修人员、无线路由器之间的通信流的传递或转移过程抽象为代理节点的路由,建立了多代理节点的依赖关系模型,实现电网与通信设备恢复序列的优化求解,并建立了仿真模型模拟不可预见的通信故障来定量对比所提方法与未考虑信息恢复方案的效果差异。

现有信息-物理协同恢复研究已实现对故障抢修、开关操作等时序恢复措施的建模以及与交通设施的协同,后续的研究可以关注信息-物理耦合系统的弹性评估与保底网络构建,以及深入挖掘信息系统自愈方法在电网恢复中的应用潜力。

3.4.3 考虑频率调控的配电网优化恢复及动态微电网技术

随着新能源渗透率不断增加,配电网逆变型分布式电源占比增加。由于逆变型分布式电源容量有

限、惯性较低,在通过分段、联络开关形成基于分布式电源的微网以恢复负荷时,微网内动态频率可能越限,导致恢复方案失效。为此,在优化恢复模型中需要计及频率变化率、准稳态频率和频率最低点3项指标不越限,以获得频率安全稳定、现实可行的负荷恢复方案。由于频率最低点约束的非线性,通常需要加以处理才能实现快速优化求解。

文献[105]考虑了配电网中的储能设备提供额外的动态频率支撑,在优化问题求解方法上通过超平面拟合的分段线性化方法和二进制扩展法对频率最低点约束进行近似线性化处理,保证其可以通过商业软件求解。文献[106]考虑关键负荷的优先级,确定微电网到关键负荷的恢复路径并分步恢复路径上的负荷,通过动态仿真代替动态频率约束,验证每一步负荷恢复时的频率是否越限。文献[107]考虑分布式电源的跟网和构网控制方式,提出适用三相不平衡配电网的优化-仿真双层时序负荷恢复模型,在优化层基于MILP得到负荷恢复方案并代入仿真层,通过分布式电源的动态方程模拟频率响应,计算各分布式电源频率最低点,满足条件则进行下一时段的优化层求解。

微网分区恢复过程中,由于新能源出力波动及故障元件状态转化,动态改变微网的边界能够进一步提升资源互补利用效率。文献[108]提出了基于分布式电压、频率控制的两阶段配电网恢复技术。在停电后的第一阶段,配电网所有远程控制开关断开,形成多个独立微网,依靠本地的黑启动电源供能;在第二阶段进行系统重构,计及频率和电压稳定约束,将独立的微网有序连接,考虑了微网边界的动态改变以最大化负荷供电和新能源消纳。文献[109]建立了考虑随机抢修时间的抢修调度模型,并将其与频率约束下的动态微网分区结合,形成配电网动态恢复策略。

动态频率约束的引入使得基于微网的恢复模型更为复杂,现有的多微网分布式恢复、微网预防调度、交直流微网恢复等模型也需进行相应扩展,如何将近似线性化处理、优化-仿真方法以及解耦算法应用于这些场景是值得研究的方向。

3.4.4 柔性互联配电网恢复控制技术

电力电子技术的迅猛发展为“网”侧灵活调度提供了支持手段,以智能软开关(soft open point, SOP)为代表的柔性互联装置提高了配电网的控制灵活性和运行可靠性,为构建柔性互联配电网、支

撑新能源高效消纳与安全稳定运行提供了硬件基础^[110]。作为全控电力电子设备，SOP 可以迅速响应控制信号，准确、连续调节所连馈线的功率，实现系统潮流调节^[111]；同时，其具有限制故障传播范围、多端口能量路由等功能，从而有效隔离故障与转供负荷，提升配电网可靠性。

针对极端事件场景，充分利用 SOP 的高可控特性，实现拓扑灵活调整及分布式资源高效协调是研究关注的重点。目前，针对 SOP 在配电网恢复控制方面的研究大多采用平均模型，忽略换流器的损耗、谐波和快速开关瞬态^[112]。文献[113]将含 SOP 配电网的灾后恢复划分为两步，在第 1 步求解各恢复时段的最优运行策略，第 2 步确定不同运行状态转换的开关操作次序和 SOP 控制模式，并完成暂态仿真校验。文献[114]明确了 SOP 在主动孤岛-灾变退化-故障隔离-负荷恢复 4 个阶段的控制模式并构建相应的拓扑运行模型。文献[115]考虑了抢修人员、移动应急资源以及 SOP 控制下多微网的协调，提升系统恢复效率。

现有考虑 SOP 的恢复模型通常以恢复负荷为目标，后续的研究包括利用 SOP 的潮流及拓扑控制特性，将其与储能等各类灵活资源协同配置及运行，以提供常态运行的分布式新能源高效消纳、电压无功支撑以及极端事件下的快速恢复等多元目标支撑。

4 结论与展望

本文针对提升新型电力系统弹性、防范极端事件风险进行了思考与探索。首先对电力系统 3 道防线、可靠性、弹性等风险防范相关的技术进行了辨析，弹性作为大停电防御体系的补充，将在极端事件风险防范方面做出拓展。针对新型电力系统形态演变下的内外风险，阐明了提升新型电力系统弹性面临的技术难题，包括系统层级的故障演化规律难以刻画、规划问题中复杂安全约束难以显示表达、复合灾害及多维影响因素下风险设备难以准确预警、复杂故障及信息设备失效下难以感知与控制等。进而从“风险评估—投资规划—预防准备—响应恢复”4 个层面归纳了新型电力系统极端事件风险防范与应急管理技术，深入分析了各层面的技术重点与难点。

当前，防范极端事件电力安全风险已经获得了广泛共识。能源安全格局下建设新型电力系统应立

足我国电力系统特点和需求，采取标准机制设计与政策制定、理论技术与装备研发、环境模拟条件搭建与应用示范等多举措并重的发展思路，逐步实现战略目标。在理论技术层面，近年来，新技术的发展、市场化改革的推进也为保障电力安全提供了更多着力点，未来的研究重点有：1) 强化电力系统与能源、信息、交通、供水等其他基础设施的信息共享与协同能力；2) 深入研究人工智能、数据挖掘、机器学习等新技术在新型电力系统风险评估与恢复决策中的应用方法，推进新型储能、柔性互联装置等装备自主化研制与应用；3) 研究计及通信、控制和保护等二次系统安全的保底电网构建方法，加快网络安全核心技术及装备的自主研发；4) 将电力、能源市场的激励机制引入源-网-荷-储灵活资源配置与恢复的协作中；5) 加强对极寒、高温等极端气象带来的充裕度风险的重视，在投资规划阶段的长时间尺度运行模拟中应充分计及极端天气可能带来的供需问题，开展储能、联络线等资源投建，从规划源头提升系统保供电能力。

参考文献

- [1] 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 Zhaohong, LIN Yanling, QIU Aici. Concept and research prospects of power system resilience[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(22): 1-9(in Chinese).
- [2] 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(in Chinese).
- [3] WANG Yezhou, CHEN Chen, WANG Jianhui, et al. Research on resilience of power systems under natural disasters—a review[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(2): 1604-1613.
- [4] 汤涌. 电力系统安全稳定综合防御体系框架[J]. 电网技术, 2012, 36(8): 1-5.
TANG Yong. Framework of comprehensive defense architecture for power system security and stability[J]. Power System Technology, 2012, 36(8): 1-5(in Chinese).
- [5] 袁季修. 试论防止电力系统大面积停电的紧急控制——电力系统安全稳定运行的第三道防线[J]. 电网技术, 1999, 23(4): 1-4.
YUAN Jixiu. Emergency control for preventing

- widespread blackout of power system—the third line of defence[J]. *Power System Technology*, 1999, 23(4): 1-4(in Chinese).
- [6] 薛禹胜. 时空协调的大停电防御框架(一)从孤立防线到综合防御[J]. *电力系统自动化*, 2006, 30(1): 8-16.
XUE Yusheng. Space-time cooperative framework for defending blackouts part I from isolated defense lines to coordinated defending[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2006, 30(1): 8-16(in Chinese).
- [7] 杨卫东, 徐政, 韩祯祥. 电力系统灾变防治系统研究的现状与目标[J]. *电力系统自动化*, 2000, 24(1): 7-12.
YANG Weidong, XU Zheng, HAN Zhenxiang. Review and objective of research on power system collapse prevention[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2000, 24(1): 7-12(in Chinese).
- [8] 印永华, 郭剑波, 赵建军, 等. 美加“8·14”大停电事故初步分析以及应吸取的教训[J]. *电网技术*, 2003, 27(10): 8-11, 16.
YIN Yonghua, GUO Jianbo, ZHAO Jianjun, et al. Preliminary analysis of large scale blackout in interconnected north America power grid on August 14 and lessons to be drawn[J]. *Power System Technology*, 2003, 27(10): 8-11, 16(in Chinese).
- [9] 林伟芳, 孙华东, 汤涌, 等. 巴西“11·10”大停电事故分析及启示[J]. *电力系统自动化*, 2010, 34(7): 1-5.
LIN Weifang, SUN Huadong, TANG Yong, et al. Analysis and lessons of the blackout in brazil power grid on November 10, 2009[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2010, 34(7): 1-5(in Chinese).
- [10] 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 Zhaohong, LIN Chaofan, LI Gengfeng, et al. Development and prospect of resilient power system in the context of energy transition[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(9): 2735-2744(in Chinese).
- [11] 舒印彪, 谢典, 赵良, 等. 碳中和目标下我国再电气化研究[J]. *中国工程科学*, 2022, 24(3): 195-204.
SHU Yinbiao, XIE Dian, ZHAO Liang, et al. Re-electrification in China under the carbon neutrality goal[J]. *Strategic Study of CAE*, 2022, 24(3): 195-204(in Chinese).
- [12] 全球能源互联网发展合作组织. 2030年能源电力发展规划研究及2060年展望[R]. 北京: 全球能源互联网发展合作组织, 2021.
Global Energy Interconnection Development and Cooperation Organization. Energy and power development planning study for 2030 and outlook for 2060[R]. Beijing: Global Energy Interconnection Development and Cooperation Organization, 2021.
- [13] ZARAKAS W P, SERGICI S, BISHOP H, et al. Utility investments in resiliency: balancing benefits with cost in an uncertain environment[J]. *The Electricity Journal*, 2014, 27(5): 31-41.
- [14] BILLINTON R, SINGH G. Application of adverse and extreme adverse weather: modelling in transmission and distribution system reliability evaluation[J]. *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, 2006, 153(1): 115-120.
- [15] 唐文虎, 杨毅豪, 李雅晶, 等. 极端气象灾害下输电系统的弹性评估及其提升措施研究[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(7): 2244-2254.
TANG Wenhui, YANG Yihao, LI Yajing, et al. Investigation on resilience assessment and enhancement for power transmission systems under extreme meteorological disasters[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(7): 2244-2254(in Chinese).
- [16] 张恒旭, 刘玉田. 极端冰雪灾害对电力系统运行影响的综合评估[J]. *中国电机工程学报*, 2011, 31(10): 52-58.
ZHANG Hengxu, LIU Yutian. Comprehensive assessment of extreme ice disaster affecting power system operation [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(10): 52-58(in Chinese).
- [17] 吴勇军, 薛禹胜, 谢云云, 等. 台风及暴雨对电网故障率的时空影响[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(2): 20-29, 83.
WU Yongjun, XUE Yusheng, XIE Yunyun, et al. Space-time impact of typhoon and rainstorm on power grid fault probability[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(2): 20-29, 83(in Chinese).
- [18] 封国林, 侯威, 支蓉, 等. 极端气候事件的检测、诊断与可预测性研究[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
FENG Guolin, HOU Wei, ZHI Rong, et al. Detection, diagnosis and predictability research of extreme climate event[M]. Beijing: Science Press, 2012(in Chinese).
- [19] ZHANG Dingmao, LI Gengfeng, BIE Zhaohong, et al. An analytical method for reliability evaluation of power distribution system with time-varying failure rates[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2024, 250: 110290.
- [20] NIU Tao, HUANG Qianqian, FANG Sidun, et al. Multistage condition-based resilient maintenance scheduling for power systems during ice storms[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2024, 60(2): 2201-2213.
- [21] 薛俞, 李月乔, 刘文霞, 等. 柔性互联配电网系统连锁故障风险评估[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(8): 112-119.
XUE Yu, LI Yueqiao, LIU Wenxia, et al. Risk assessment of cascading failures in flexible interconnected power distribution system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(8): 112-119(in Chinese).
- [22] 刘友波, 胡斌, 刘俊勇, 等. 电力系统连锁故障分析理

- 论与应用(一)——相关理论方法与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(9): 148-155.
- LIU Youbo, HU Bin, LIU Junyong, et al. Power system cascading failure analysis theories and application I — related theories and applications[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(9): 148-155(in Chinese).
- [23] 梅生伟, 何飞, 张雪敏, 等. 一种改进的 OPA 模型及大停电风险评估[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(13): 1-5, 57.
- MEI Shengwei, HE Fei, ZHANG Xuemin, et al. An improved OPA model and the evaluation of blackout risk[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(13): 1-5, 57(in Chinese).
- [24] WANG Ansi, LUO Yi, TU Guangyu, et al. Vulnerability assessment scheme for power system transmission networks based on the fault chain theory[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(1): 442-450.
- [25] SUN Yushu, TANG Xisheng. Cascading failure analysis of power flow on wind power based on complex network theory[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2014, 2(4): 411-421.
- [26] 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.
- [27] JUFRI F H, WIDIPUTRA V, JUNG J. State-of-the-art review on power grid resilience to extreme weather events: definitions, frameworks, quantitative assessment methodologies, and enhancement strategies[J]. Applied Energy, 2019, 239: 1049-1065.
- [28] 肖智文, 王国庆, 朱建明, 等. 面向突发事件的电网韧性能力评价及构建方法[J]. 系统工程理论与实践, 2019, 39(10): 2637-2645.
- XIAO Zhiwen, WANG Guoqing, ZHU Jianming, et al. Method for assessing and constructing power system resilience under emergency events[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2019, 39(10): 2637-2645 (in Chinese).
- [29] 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): 6773-6783.
- RUAN Qiantu, XIE Wei, XU Yin, et al. Concept and key features of resilient power grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(21): 6773-6783(in Chinese).
- [30] 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(in Chinese).
- [31] HOU Kai, JIA Hongjie, LI Xue, et al. Impact-increment based decoupled reliability assessment approach for composite generation and transmission systems[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(3): 586-595.
- [32] GAUTAM P, PIYA P, KARKI R. Resilience assessment of distribution systems integrated with distributed energy resources[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(1): 338-348.
- [33] BILLINTON R, LI Wenyuan. Reliability assessment of electric power systems using Monte Carlo methods[M]. New York: Springer, 1994.
- [34] JABR R A, SINGH R, PAL B C. Minimum loss network reconfiguration using mixed-integer convex programming [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2): 1106-1115.
- [35] SUN Siyuan, LI Gengfeng, BIAN Yiheng, et al. Catastrophe risk management for electric power distribution systems: an insurance approach[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2023, 9(1): 393-410.
- [36] HUA Bowen, BIE Zhaohong, AU S K, et al. Extracting rare failure events in composite system reliability evaluation via subset simulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(2): 753-762.
- [37] WANG Can, XIE Haipeng, BIE Zhaohong, et al. Fast Supply reliability evaluation of integrated power-gas system based on stochastic capacity network model and importance sampling[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2021, 208: 107452.
- [38] 张宁, 马国明, 关永刚, 等. 全景信息感知及智慧电网[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(4): 1274-1283.
- ZHANG Ning, MA Guoming, GUAN Yonggang, et al. Panoramic information perception and intelligent grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(4): 1274-1283(in Chinese).
- [39] MALISZEWSKI P J, PERRINGS C. Factors in the resilience of electrical power distribution infrastructures [J]. Applied Geography, 2012, 32(2): 668-679.
- [40] 贾宏杰, 穆云飞, 侯恺, 等. 能源转型视角下城市能源系统的形态演化及运行调控[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(16): 49-62.
- JIA Hongjie, MU Yunfei, HOU Kai, et al. Morphology evolution and operation regulation of urban energy system from perspective of energy transition[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(16): 49-62(in Chinese).
- [41] 田家辉, 梁栋, 葛磊蛟, 等. 面向高精度状态感知的配电系统微型同步相量测量单元优化配置[J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2235-2242.
- TIAN Jiahui, LIANG Dong, GE Leijiao, et al. Placement

- of micro-phasor measurement units in distribution systems for highly accurate state perception[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(7): 2235-2242(in Chinese).
- [42] XU Yan, DONG Zhaoyang, ZHANG Rui, et al. A decomposition-based practical approach to transient stability-constrained unit commitment[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2015, 30(3): 1455-1464.
- [43] RAMESH A V, LI Xingpeng. Spatio-temporal deep learning-assisted reduced security-constrained unit commitment[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2024, 39(2): 4735-4746.
- [44] ZHANG Yichen, CUI Hantao, LIU Jianzhe, et al. Encoding frequency constraints in preventive unit commitment using deep learning with region-of-interest active sampling[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2022, 37(3): 1942-1955.
- [45] YAN Ziming, XU Yan. A hybrid data-driven method for fast solution of security-constrained optimal power flow[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2022, 37(6): 4365-4374.
- [46] 陆旭, 张理寅, 李更丰, 等. 基于内嵌物理知识卷积神经网络的电力系统暂态稳定评估[J]. *电力系统自动化*, 2024, 48(9): 107-119.
LU Xu, ZHANG Liyin, LI Gengfeng, et al. Transient stability assessment of power system based on physics informed convolution neural network[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(9): 107-119(in Chinese).
- [47] 康重庆, 杜尔顺, 李姚旺, 等. 新型电力系统的“碳视角”: 科学问题与研究框架[J]. *电网技术*, 2022, 46(3): 821-833.
KANG Chongqing, DU Ershun, LI Yaowang, et al. Key scientific problems and research framework for carbon perspective research of new power systems[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(3): 821-833(in Chinese).
- [48] 张宁, 李姚旺, 黄俊辉, 等. 电力系统全环节碳计量方法与碳表系统[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(9): 2-12.
ZHANG Ning, LI Yaowang, HUANG Junhui, et al. Carbon measurement method and carbon meter system for whole chain of power system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(9): 2-12(in Chinese).
- [49] 蒋存妍, 袁青, 于婷婷. 城市应对气候变化不确定性的动态适应性规划国际经验及启示[J]. *国际城市规划*, 2021, 36(5): 13-22.
JIANG Cunyan, YUAN Qing, YU Tingting. International experience and implications of dynamic adaptive planning for urban response to climate change uncertainty[J]. *Urban Planning International*, 2021, 36(5): 13-22(in Chinese).
- [50] 彭仲仁, 路庆昌. 应对气候变化和极端天气事件的适应性规划[J]. *现代城市研究*, 2012, 27(1): 7-12.
PENG Zhongren, LU Qingchang. Adaptation planning for climatic change and extreme weather events[J]. *Modern Urban Research*, 2012, 27(1): 7-12(in Chinese).
- [51] 韩肖清, 李廷钧, 张东霞, 等. 双碳目标下的新型电力系统规划新问题及关键技术[J]. *高电压技术*, 2021, 47(9): 3036-3046.
HAN Xiaoqing, LI Tingjun, ZHANG Dongxia, et al. New issues and key technologies of new power system planning under double carbon goals[J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(9): 3036-3046(in Chinese).
- [52] 李吉侗, 王洲, 达紫祺, 等. 计及恶劣天气时空相关性的弹性配电网储能电站多层规划方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(9): 128-137.
LI Jitong, WANG Zhou, DA Ziqi, et al. Multi-level planning method of energy storage stations for resilient distribution networks considering spatio-temporal correlation of severe weather[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(9): 128-137(in Chinese).
- [53] LI Gengfeng, ZHANG Peng, LUH P B, et al. Risk analysis for distribution systems in the northeast U.S. under wind storms[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014, 29(2): 889-898.
- [54] PANTELI M, PICKERING C, WILKINSON S, et al. Power system resilience to extreme weather: fragility modeling, probabilistic impact assessment, and adaptation measures[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, 32(5): 3747-3757.
- [55] TI Baozhong, LI Gengyin, ZHOU Ming, et al. Resilience assessment and improvement for cyber-physical power systems under typhoon disasters[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2022, 13(1): 783-794.
- [56] HUA Zhihao, ZHOU Bin, OR S W, et al. Robust emergency preparedness planning for resilience enhancement of energy-transportation nexus against extreme rainfalls[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2024, 60(1): 1196-1207.
- [57] 谢云云, 薛禹胜, 文福拴, 等. 冰灾对输电线路故障率影响的时空评估[J]. *电力系统自动化*, 2013, 37(18): 32-41, 98.
XIE Yunyun, XUE Yusheng, WEN Fushuan, et al. Space-time evaluation for impact of ice disaster on transmission line fault probability[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2013, 37(18): 32-41, 98(in Chinese).
- [58] KANKANALA P, DAS S, PAHWA A. AdaBoost+: an ensemble learning approach for estimating weather-related outages in distribution systems[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014, 29(1): 359-367.
- [59] DU Ying, LIU Yadong, WANG Xuhong, et al. Predicting weather-related failure risk in distribution systems using Bayesian neural network[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2021, 12(1): 350-360.

- [60] HOU Hui, CHEN Xi, LI Min, et al. Prediction of user outage under typhoon disaster based on multi-algorithm Stacking integration[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2021, 131: 107123.
- [61] HE Jichao, WANIK D W, HARTMAN B M, et al. Nonparametric tree-based predictive modeling of storm outages on an electric distribution network[J]. *Risk Analysis*, 2017, 37(3): 441-458.
- [62] YANG Feifei, WANIK D W, CERRAI D, et al. Quantifying uncertainty in machine learning-based power outage prediction model training: a tool for sustainable storm restoration[J]. *Sustainability*, 2020, 12(4): 1525.
- [63] TANG Lingfeng, XIE Haipeng, WANG Yun, et al. Predicting typhoon-induced transmission line outages with coordination of static and dynamic data[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2022, 142: 108296.
- [64] 王建, 吴昊, 张博, 等. 不平衡样本下基于迁移学习-AlexNet 的输电线路故障辨识方法[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(22): 182-191.
WANG Jian, WU Hao, ZHANG Bo, et al. Fault identification method for transmission line based on transfer learning-AlexNet with imbalanced samples[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(22): 182-191(in Chinese).
- [65] 兰健, 郭庆来, 周艳真, 等. 基于生成对抗网络和模型迁移的电力系统典型运行方式样本生成[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(8): 2889-2899.
LAN Jian, GUO Qinglai, ZHOU Yanzhen, et al. Generation of power system typical operation mode samples: a generation adversarial network and model-based transfer learning approach[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(8): 2889-2899(in Chinese).
- [66] 任佳星, 孙英云, 秦继朔, 等. 基于改进域对抗网络的新能源基地风光时序功率曲线生成方法[J]. *电网技术*, 2024, 48(8): 3409-3417.
REN Jiaying, SUN Yingyun, QIN Jishuo, et al. Improved domain adversarial neural networks based generation method of wind-photovoltaic power time series curves for renewable energy base[J]. *Power System Technology*, 2024, 48(8): 3409-3417(in Chinese).
- [67] 魏泽涛, 刘友波, 沈晓东, 等. 基于样本数据迁移学习的贫资料地区小水电超短期出力建模及发电预测[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(7): 2652-2665.
WEI Zetao, LIU Youbo, SHEN Xiaodong, et al. Ultra-short-term power generation modeling and prediction for small hydropower in data-scarce areas based on sample data transfer learning[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(7): 2652-2665(in Chinese).
- [68] 江昌旭, 刘晨曦, 林铮, 等. 基于深度强化学习的电力系统暂态稳定控制策略研究综述[J]. *高电压技术*, 2023, 49(12): 5171-5186.
JIANG Changxu, LIU Chenxi, LIN Zheng, et al. Review of power system transient stability control strategies based on deep reinforcement learning[J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(12): 5171-5186(in Chinese).
- [69] HUANG Gang, WANG Jianhui, CHEN Chen, et al. Integration of preventive and emergency responses for power grid resilience enhancement[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, 32(6): 4451-4463.
- [70] QIN Zhijun, CHEN Xinwei, HOU Yunhe, et al. Coordination of preventive, emergency and restorative dispatch in extreme weather events[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2022, 37(4): 2624-2638.
- [71] LIU Jiancun, QIN Chao, YU Yixin. Enhancing distribution system resilience with proactive islanding and RCS-based fast fault isolation and service restoration[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 11(3): 2381-2395.
- [72] GHOLAMI A, SHEKARI T, GRIJALVA S. Proactive management of microgrids for resiliency enhancement: an adaptive robust approach[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2019, 10(1): 470-480.
- [73] LEI Shunbo, WANG Jianhui, CHEN Chen, 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.
- [74] KIM J, DVORKIN Y. Enhancing distribution system resilience with mobile energy storage and microgrids[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(5): 4996-5006.
- [75] GAO Haixiang, CHEN Ying, MEI Shengwei, et al. Resilience-oriented pre-hurricane resource allocation in distribution systems considering electric buses[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2017, 105(7): 1214-1233.
- [76] 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 Zhaohong, 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(in Chinese).
- [77] LIM G J, KIM S, CHO J, et al. Multi-UAV pre-positioning and routing for power network damage assessment[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 9(4): 3643-3651.
- [78] ZIDAN A, KHAIRALLA M, ABDRABOU A M, et al. Fault detection, isolation, and service restoration in distribution systems: state-of-the-art and future trends[J].

- IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(5): 2170-2185.
- [79] CHEN Chen, WANG Jianhui, TON D. Modernizing distribution system restoration to achieve grid resiliency against extreme weather events: an integrated solution[J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 105(7): 1267-1288.
- [80] HOSSAN M S, CHOWDHURY B. Data-driven fault location scheme for advanced distribution management systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(5): 5386-5396.
- [81] ZHANG Ying, WANG Jianhui, KHODAYAR M E. Graph-based faulted line identification using micro-PMU data in distribution systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(5): 3982-3992.
- [82] LI Xingzhi, HAN Bei, LI Guojie, et al. Dynamic topology awareness in active distribution networks under DG uncertainties using GMM-PSEs and KL divergence[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(4): 2086-2096.
- [83] XU Yijun, VALINEJAD J, KORKALI M, et al. An Adaptive-importance-sampling-enhanced Bayesian approach for topology estimation in an unbalanced power distribution system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(3): 2220-2232.
- [84] JIA Ke, YANG Bin, DONG Xiongying, et al. Sparse voltage measurement-based fault location using intelligent electronic devices[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(1): 48-60.
- [85] JIANG Kuan, WANG Huifang, SHAHIDEHPOUR M, et al. Block-sparse Bayesian learning method for fault location in active distribution networks with limited synchronized measurements[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(4): 3189-3203.
- [86] SUN Kongming, CHEN Qing, GAO Zhanjun. An automatic faulted line section location method for electric power distribution systems based on multisource information[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(4): 1542-1551.
- [87] FARAJOLLAHI M, FOTUHI-FIRUZABAD M, SAFDARIAN A. Simultaneous placement of fault indicator and sectionalizing switch in distribution networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(2): 2278-2287.
- [88] TENG J H, HUANG Weihao, LUAN Shangwen. Automatic and fast faulted line-section location method for distribution systems based on fault indicators[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(4): 1653-1662.
- [89] KIAEI I, LOTFIFARD S. Fault section identification in smart distribution systems using multi-source data based on fuzzy petri nets[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(1): 74-83.
- [90] JIANG Yazhou. Toward detection of distribution system faulted line sections in real time: a mixed integer linear programming approach[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(3): 1039-1048.
- [91] JIANG Yazhou. Data-driven fault location of electric power distribution systems with distributed generation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(1): 129-137.
- [92] JIANG Yazhou. Data-driven probabilistic fault location of electric power distribution systems incorporating data uncertainties[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(5): 4522-4534.
- [93] WANG Qiujie, JIN Tao, MOHAMED M A. A fast and robust fault section location method for power distribution systems considering multisource information[J]. IEEE Systems Journal, 2022, 16(2): 1954-1964.
- [94] WANG Chongyu, PANG Kaiyuan, SHAHIDEHPOUR M, et al. MILP-based fault diagnosis model in active power distribution networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(5): 3847-3857.
- [95] AL-KANJ L, BOUZAIENE-AYARI B, POWELL W B. A probability model for grid faults using incomplete information[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(2): 956-968.
- [96] YUAN Yuxuan, DEHGHANPOUR K, WANG Zhaoyu. Multisource data fusion outage location in distribution systems via probabilistic graphical models[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(2): 1357-1371.
- [97] 陈颖, 刘冰倩, 朱淑娟, 等. 极端气象条件下配电网大范围停电贝叶斯网络建模和停电概率预测方法[J]. 供用电, 2019, 36(7): 30-34, 43.
- CHEN Ying, LIU Bingqian, ZHU Shujuan, et al. Bayesian network modeling and power outage probability prediction method for large-scale power outages in distribution networks under extreme weather conditions [J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(7): 30-34, 43(in Chinese).
- [98] BIAN Yiheng, SUN Siyuan, LI Gengfeng, et al. A generic Bayesian method for faulted section identification in distribution systems against wind-induced extreme events[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2024, 15(2): 1821-1836.
- [99] 陈碧云, 陆智, 李滨. 考虑故障处理过程信息系统连通性和准确性的配电网可靠性评估[J]. 电网技术, 2020, 44(2): 742-750.
- CHEN Biyun, LU Zhi, LI Bin. Reliability assessment of distribution network considering connectivity and accuracy of information system in fault treatment process [J]. Power System Technology, 2020, 44(2): 742-750(in Chinese).
- [100] BIAN Yiheng, CHEN Chen, HUANG Yuxiong, et al.

- Service restoration for resilient distribution systems coordinated with damage assessment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(5): 3792-3804.
- [101] 钟剑, 陈晨, 别朝红. 基于 SDN 的配电网信息-物理协同恢复策略[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(11): 4193-4209.
ZHONG Jian, CHEN Chen, BIE Zhaohong. A SDN based cyber-physical integrated restoration scheme for distribution systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(11): 4193-4209(in Chinese).
- [102] 刘达夫, 钟剑, 杨祺铭, 等. 基于 V2G 与应急通信的配电网信息物理协同快速恢复方法[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(7): 147-158.
LIU Dafu, ZHONG Jian, YANG Qiming, et al. Fast recovery method for distribution network through cyber-physical collaboration based on vehicle to grid and emergency communication[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(7): 147-158(in Chinese).
- [103] YE Zhigang, CHEN Chen, LIU Ruihuan, et al. Boost distribution system restoration with emergency communication vehicles considering cyber-physical interdependence[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(2): 1262-1275.
- [104] LIU Xin, ZHANG Bo, CHEN Bo, et al. Towards optimal and executable distribution grid restoration planning with a fine-grained power-communication interdependency model[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(3): 1911-1922.
- [105] 张智, 周明, 武昭原, 等. 考虑动态频率支撑的储能选址定容规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(7): 2708-2720.
ZHANG Zhi, ZHOU Ming, WU Zhaoyuan, et al. Energy storage location and capacity planning method considering dynamic frequency support[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(7): 2708-2720(in Chinese).
- [106] XU Yin, LIU C C, SCHNEIDER K P, et al. Microgrids for service restoration to critical load in a resilient distribution system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(1): 426-437.
- [107] ZHANG Qianzhi, MA Zixiao, ZHU Yongli, et al. A two-level simulation-assisted sequential distribution system restoration model with frequency dynamics constraints[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(5): 3835-3846.
- [108] DU Yuhua, TU Hao, LU Xiaonan, et al. Black-start and service restoration in resilient distribution systems with dynamic microgrids[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 10(4): 3975-3986.
- [109] PANG Kaiyuan, WANG Chongyu, HATZIARGYRIOU N D, et al. Dynamic restoration of active distribution networks by coordinated repair crew dispatch and cold load pickup[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(2): 4699-4713.
- [110] 王成山, 宋关羽, 李鹏, 等. 基于智能软开关的智能配电网柔性互联技术及展望[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(22): 168-175.
WANG Chengshan, SONG Guanyu, LI Peng, et al. Research and prospect for soft open point based flexible interconnection technology for smart distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(22): 168-175(in Chinese).
- [111] JI Haoran, WANG Chengshan, LI Peng, et al. Robust operation of soft open points in active distribution networks with high penetration of photovoltaic integration[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(1): 280-289.
- [112] COLE S, BEERTEN J, BELMANS R. Generalized dynamic VSC MTDC model for power system stability studies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(3): 1655-1662.
- [113] 王颖, 马佳骏, 王小君, 等. 含智能软开关的配电网重要负荷恢复方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(8): 104-111.
WANG Ying, MA Jiajun, WANG Xiaojun, et al. Critical load restoration method for distribution network with soft open point[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(8): 104-111(in Chinese).
- [114] YANG Xiaodong, ZHOU Zhiyan, ZHANG Youbing, et al. Resilience-oriented co-deployment of remote-controlled switches and soft open points in distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(2): 1350-1365.
- [115] DING Tao, WANG Zekai, JIA Wenhao, et al. Multiperiod distribution system restoration with routing repair crews, mobile electric vehicles, and soft-open-point networked microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(6): 4795-4808.



别朝红

收稿日期: 2024-05-07。

作者简介:

别朝红(1970), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统规划与可靠性评估、新能源电力系统安全风险评估、弹性电力系统, zhbie@xjtu.edu.cn。

(编辑 乔宝榆, 李新洁)