

# 面向严重自然灾害的电力系统韧性评估技术综述

孙为民, 孙华东, 何剑, 屠竞哲, 张国宾

(电网安全全国重点实验室(中国电力科学研究院有限公司), 北京市 海淀区 100192)

## Review of Power System Resilience Assessment Techniques for Severe Natural Disasters

SUN Weimin, SUN Huadong, HE Jian, TU Jingzhe, ZHANG Guobin

(State Key Laboratory of Power Grid Safety (China Electric Power Research Institute), Haidian District, Beijing 100192, China)

**ABSTRACT:** As one of the most important public infrastructures, the safe operation of a power system is related to the national economy, the people's livelihood, and the economic and social stability. In recent years, some serious natural disasters around the world have led to severe blackouts, exposing the inadequacy of the power system's ability to deal with serious natural disasters. Strengthening the system resilience is a widely recognized means to enhance the disaster prevention and mitigation capabilities in the view of the academia and industry. In this paper, the concept of the power system resilience is first described. By comparing the difference between resilience and reliability, the emphasis of resilience assessment research is clarified. Then, based on literature research, the power system resilience assessment methods ever used are summarized, and the research status of the power system resilience framework and the key links based on the simulation method is specifically analyzed. Finally, based on the internal and external security risks faced by China's power grid, the difficulties and key technologies of the power system resilience assessment for severe natural disaster scenarios are prospected.

**KEY WORDS:** power system; natural disaster; resilience assessment; analogue simulation

**摘要:** 电力系统是最重要的公共基础设施之一, 其安全运行关乎国计民生和经济社会稳定。近年来全球范围内严重自然灾害引发了多起大停电事故, 暴露了电力系统应对严重自然灾害的能力存在不足, 而强化系统韧性是学术界与工业界普遍认可一种提升防灾、减灾能力的手段。首先阐述了电力系统韧性的概念, 通过比较韧性和可靠性的区别, 明确韧性评估研究的侧重点; 然后在文献调研的基础上, 归纳了电力系统韧性评估方法, 具体分析了基于仿真模拟法的电力系统韧性框架和关键环节的研究现状; 最后基于我国电网面临的内外部安全风险, 对面向严重自然灾害场景的电力系统韧性评估研究的难点和关键技术进行了展望。

**关键词:** 电力系统; 自然灾害; 韧性评估; 仿真模拟

**DOI:** 10.13335/j.1000-3673.pst.2022.2073

## 0 引言

电力系统是现代社会最重要的公共基础设施, 千家万户的衣食住行、经济社会的有序运转离不开电力可靠供应。近年来, 随着能源转型进程加快推进, 电能在终端能源消费中的比重快速提升<sup>[1]</sup>, 历次大停电事故表明, 经济社会对电力依赖程度越高, 大面积停电事故造成的损失越大<sup>[2]</sup>。与此同时, 随着全球气候变化, 严重自然灾害有明显增多趋势, 对电力系统安全运行构成巨大威胁, 2011年3月11日, 日本突发9.0级特大地震并引发海啸, 日本多地发生大停电, 损失负荷超过10 000 MW, 还造成严重核泄漏事件<sup>[3]</sup>。2016年9月28日, 台风、暴雨和冰雹等严重自然灾害导致南澳地区在88s内出现5次线路故障、6次系统电压跌落, 风电大规模脱网, 系列故障最终造成了全州停电50h<sup>[4]</sup>。2019年8月10日, 超强台风“利奇马”登陆浙江温岭市, 造成759.17万用户停电, 台州、温州电网受损严重<sup>[5]</sup>。2022年9月18日, 受飓风“菲奥娜”影响, 美国海外属地波多黎各全岛停电, 影响用户数超过146.8万<sup>[6]</sup>。

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电力系统“韧性”(Resilience, 也称“弹性”)概念<sup>[7-8]</sup>, 将其拓展为一个新的研究领域, 包括韧性评估、极限生存、快速恢复等研究方向<sup>[9-11]</sup>, 并从不同的方面开展电网实践, 国外韧性电网实践大致可分为两类, 一类是配置储能电池等应急电源在灾后为重要负荷或社区供电, 一类是利用微电网、综合能源系统等分布资源进行备灾和恢复。美国联邦爱迪生公司(Commonwealth Edison Company)在芝加哥南部建设Bronzeville社区电网, 集成分布式可再生能源发电和储能电池, 可脱离主网为超过1000个住宅、企业和公共机构提供用电服务<sup>[12]</sup>, 日本致力于建设

微电网示范工程,以提高灾害中用户不间断供电能力,并为大电网恢复提供助力<sup>[13]</sup>。国内各地电力公司根据自身特点开展韧性电网工程探索,浙江电力公司提出能源互联网形态下多元融合高弹性电网概念,强调通过聚合调用源网荷储各类灵活资源以最经济的方式应对系统外部变化,打造了杭州萧山亚运高弹性电网等多个综合示范区<sup>[14]</sup>;上海电力公司提出韧性电网具有感知力、协同力、应变力、防御力、恢复力和学习力6个关键特征,并在这6个方面开展技术攻关和电网建设实践<sup>[15]</sup>;南方电网公司在深圳、广州等重要城市投资建设保底电网,选取重要变电站、线路和保障电源进行差异化建设,以提高严重自然灾害、外力破坏等极端情况下城市核心区域和关键用户供电安全<sup>[16]</sup>。

韧性评估是系统风险和薄弱环节识别的重要方法,评估结果可用于支撑电网运行决策和投资建设。从广义上讲,电力系统韧性评估关注的场景包括人为蓄意破坏、严重自然灾害、系统严重故障等各类符合“低概率、高风险”特征的事件<sup>[17]</sup>,每类极端事件分析方法和应对措施存在较大差异,严重自然灾害这类极端事件(如强风、暴风雪、地震等)通常在某种程度上可预测,并在事件期间可追踪,可通过预防性系统规划、系统强化设计、态势感知技术、安全防御手段等降低灾害的影响。本文所综述韧性评估技术主要针对严重自然灾害场景,但对其他场景(如人为蓄意破坏)也有一定的适用性。

本文从韧性概念入手,对比分析了韧性与可靠性之间的区别,在此基础上,总结提出了电力系统韧性评估的框架,调研了评估框架下系统故障场景生成、系统响应与恢复模型构建、韧性指标体系构建、评估结果应用等几个部分的研究进展,分析了考虑严重自然灾害场景的电力系统韧性评估研究的难点问题,以及为解决难点问题需要重点攻克的关键技术。

## 1 电力系统韧性概念

### 1.1 韧性概念

C.S.Holling 于 1973 年首次在生态学研究提出韧性概念,定义为衡量“系统的持久性及其吸收变化和干扰的能力”<sup>[18]</sup>。自这个基本概念提出以来,韧性在组织、社会、经济、工程等多个领域得到发展<sup>[19]</sup>,美国、英国、欧洲等国家和地区更是将强化基础设施韧性提升至国家战略高度<sup>[20-23]</sup>。电力系统作为最重要关键基础设施之一,国内外能源电力部门、组织和高校对其韧性的含义也做出了不同的诠

释<sup>[24-30]</sup>,具体如表1所示。从表1中可以看出,目前学术界、工业界对电力系统韧性的定义仍没有统一说法,但对韧性的内涵理解基本一致,可以总结为:系统具备预测、抵御、适应极端事件并从中快速恢复的能力。

表1 电力系统韧性概念  
Table 1 Concept of power system resilience

提出者	电力系统韧性的含义	参考文献
西安交通大学	针对小概率-高损失极端事件的预防、抵御以及快速恢复负荷的能力	[7, 24]
清华大学	遭受重大灾害(例如飓风、地震等)的情况下,是否可以减少故障过程损失,并尽快恢复到正常供电状态的能力	[17]
北京交通大学	应对大型扰动事件(如极端灾害等)的抵抗能力和恢复能力	[25]
河海大学	面对极端事件时具有预防性能力、实时调度能力以及恢复性能力	[26]
美国能源部	承受和适应中断并迅速从中恢复的能力	
北美输电论坛	在合理的时间内最大限度地减少损坏并提高从非常规中断中恢复的能力	[27]
电气与电子工程协会	承受和减少破坏性事件的幅度和/或持续时间的能力,包括预测、吸收、适应和/或从此类事件中迅速恢复	[28]
北美可靠性委员会	承受极端事件并从中恢复的能力	[29]
曼彻斯特大学	预测和承受外部冲击的能力,能够尽快恢复到冲击前的状态,并能更好地适应未来的灾难性事件	[30]

### 1.2 韧性与可靠性的区别

电力系统可靠性概念已经确立了几十年,其定义和指标已经标准化并广泛应用。比较电力系统韧性与可靠性概念,便于加深对韧性的理解,明确电力系统韧性评估研究的侧重点。

可靠性是对电力系统按照可接受的质量标准和所需数量不间断地向用户供应电力和电能量能力的度量<sup>[31]</sup>,通常采用一些均值指标(例如电力不足期望值、电量不足期望值)来表征。韧性和可靠性主要区别包括以下几个方面:

1) 可靠性侧重于评价全概率下扰动事件对电力系统的影响,而韧性侧重于评价小概率极端事件对电力系统的影响。蒙特卡洛法和解析法是可靠性评估中常用的2种方法,蒙特卡洛法是以概率统计为基础的数值计算方法,理论上能够考虑全部的故障,计算是指标平均值,由于极端事件的概率极小,抽样结果易忽略极端事件给电力系统造成的影响;解析法中,故障状态通过枚举法来实现,状态数随着元件数目增加呈指数增长,为了减小计算量,一般采取空间状态截断,同样忽略发生概率极小的故障<sup>[32]</sup>。可靠性评估往往不考虑造成系统故障的原因,反映的是全概率意义下系统风险,韧性评估与

极端事件场景相关，反映的是条件概率下系统风险，无法脱离极端事件场景来评价某个电网的韧性程度，比如某电缆化率较高的城市电网可能在台风灾害中韧性水平较高，但由于电缆修复时间长、难度大，在地震灾害中该电网未必具备韧性。另外，极端气象灾害往往存在地域差异，评价电网在气象灾害中的韧性水平时需要考虑其所处的地理位置、气候特点以及灾害的时空分布等，比如沿海城市往往关注台风灾害中系统韧性，在台风过境时重点考虑对路径上电力设备造成损害<sup>[33]</sup>。

2) 可靠性侧重评价长时间尺度下系统平均性能，而韧性侧重评价极端事件下的系统动态性能。具体而言，可靠性通常采用一组静态指标来评价电力系统状态，而韧性则往往通过一组动态指标评估电力系统状态和状态之间的转换时间，是否包含“时间维度”是区分韧性与可靠性的重要特征<sup>[44]</sup>。基于安全边界，电力系统的状态分为正常、警戒、紧急、极端紧急、恢复等<sup>[35]</sup>，从极端事件应对角度，韧性分为预防准备、抵御吸收、响应适应、恢复 4 个阶段，韧性的 4 个阶段与电力系统状态转换存在对应关系<sup>[36]</sup>，如图 1 所示。尤其是，常规可靠性评估中对系统恢复过程做了简化处理，其中一种做法是认为系统元件修复率为一个常数<sup>[31]</sup>，但在极端场景下，元件的修复率与极端事件类型和强度、元件的地理位置、检修资源配置以及应急恢复策略等因素相关，韧性评估是综合考虑各类因素对恢复过程的影响，对系统恢复力进行量化。

图 1 中： $R_T(t)$ 为系统目标性能曲线； $R(t)$ 为系统实际性能曲线； $R_{nor}$ 为系统正常状态性能； $R_{ext}$ 为系统极端紧急状态性能； $R_{re}$ 为恢复措施用尽后的系统性能。

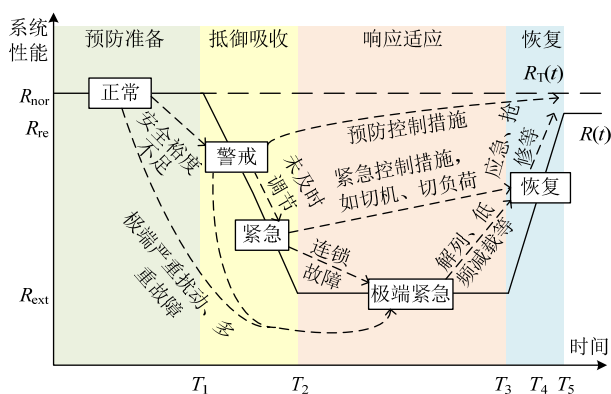


图 1 电力系统韧性曲线  
Fig. 1 Resilience curve of power system

3) 可靠性主要关注故障状态下负荷损失情况，而韧性除了关注负荷损失外，还需要考虑电力中断对经济社会的影响。严重自然灾害等极端场景下，电力与供水、燃气、电信、交通等基础设施耦合失

效风险增加<sup>[37-38]</sup>，大停电事故衍生后果关系经济、社会稳定<sup>[39-40]</sup>。所以，电力系统韧性评估不仅要考虑极端事件下负荷损失，还应站在公共安全，甚至国家安全的视角，来考量停电造成的间接影响。IEEE PES 指出电力系统韧性考虑范围扩大源于关键基础设施(以及多个能源载体)之间日益增长的互连性和相互依赖性<sup>[28]</sup>。美国能源部的电网现代化实验室联盟(Grid Modernization Laboratory Consortium, GMLC)构建的电力系统韧性评估指标中后果类别分为直接和间接两类，其中间接类后果包括社区功能影响、间接经济损失、关键军事设施停电等<sup>[41]</sup>。

总结可靠性与韧性的区别，如表 2 所示。多数情况下，更好的可靠性会带来更好的韧性，反之亦然。但是，在某些情况下，高可靠的系统可能具有较低的韧性，反之亦然。

表 2 韧性与可靠性的区别	
Table 2 Difference between resilience and reliability	
可靠性	韧性
全概率空间	针对具体场景的条件概率空间
长时间尺度下系统平均性能	极端事件下系统动态性能
评估电力系统状态	评估电力系统状态和状态间的转换过程
简化考虑元件恢复过程	详细刻画系统恢复过程
关注负荷损失	关注负荷损失及对经济社会影响

## 2 严重自然灾害下电力系统韧性评估框架

有效的电力系统韧性评估框架应致力于将破坏性事件发生的可能性以及影响降至最低，并为资源的部署调度提供正确的指导，以便在事件发生时高效地响应和恢复。韧性评估包括定性和定量两类方法，如图 2 所示，定性评估方法包括问卷调查法<sup>[42]</sup>、矩阵评分法<sup>[43]</sup>、层次分析法<sup>[44]</sup>等，定性评估的核心是指标的划分与定义，具有一定的主观性，评价结果准确性对评价者经验依赖性强。

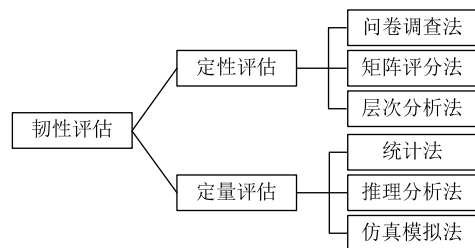


图 2 韧性评估方法分类

Fig. 2 Classification of resilience assessment methods

韧性定量评估主要分为统计法、推理分析法、仿真模拟法 3 类<sup>[45-49]</sup>，统计法，是从发生的历史极端事件中提取中断和恢复过程数据来量化系统韧性，文献[45]统计了 2015—2020 年北美输电系统上所有与天气相关的大型停电事件，按照极端天气类型(如飓风、龙卷风和冬季风暴)分类计算，研究了



系统韧性指标如何随季节和年份变化；推理分析法，是利用极端事件中停电概率预测结果来表征韧性水平，一种做法是利用历史数据建立大范围停电贝叶斯网络，然后根据灾情推理电网停电范围和停电概率<sup>[46]</sup>；仿真模拟法，是通过仿真计算的手段得到韧性指标，基于此类方法开展韧性研究的文献居多<sup>[47-50]</sup>，这种方法很容易与场景结合，物理概念清楚，易于理解和接受。本文结合韧性评估研究的侧重点，总结了基于仿真模拟法的电力系统韧性评估整体框架，包括严重自然灾害下故障场景生成、系统响应与恢复模型构建、韧性指标体系构建、评估结果应用4个部分，如图3所示，其中结果应用为评估的目的，指标体系为评估的标准，系统模型是指标求解方式，故障场景生成确定系统模型的计算边界。

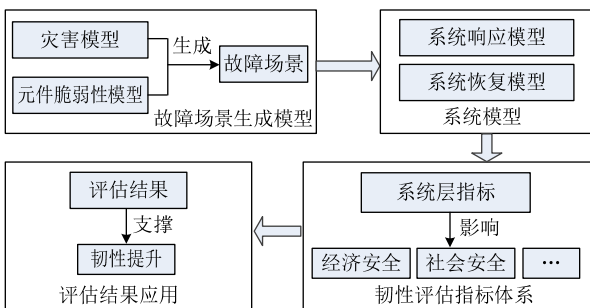


图3 基于仿真模拟的电力系统韧性评估框架

Fig. 3 Power system resilience assessment framework based on simulation

## 2.1 严重自然灾害下系统故障场景

严重自然灾害下系统故障场景与灾害的类型、强度、持续时间等外部因素和系统元件脆弱性、运行状态等内部因素相关，需要分别建立严重自然灾害模型以及与灾害时空特性相关的系统元件脆弱性模型。在研究严重自然灾害对电力系统影响时候，主要关注灾害致灾因子(比如台风灾害中强风、暴雨、雷电等)及其对电力系统承灾载体(比如杆塔、导线等)的影响<sup>[51]</sup>。严重自然灾害下电力故障场景生成的基本思路<sup>[52-53]</sup>：首先，构建严重自然灾害模型，计算灾害发生的概率、相关致灾因子的幅度及时空变化规律，然后，构建电力系统元件脆弱性曲线，得到元件故障概率与致灾因子强度之间函数关系，最后将灾害模型与脆弱性模型结合，通过随机抽样生成严重自然灾害中电力系统元件故障场景。具体流程如图4所示。

严重自然灾害场景生成方法主要有基于灾害数据模拟和灾害模型推演两大类<sup>[49, 54]</sup>，灾害数据模拟，是通过使用具有时间和地理的实际量测来建立所需的天气数据库，或者利用已知部分灾害数据，与参数模型相结合，重现具有一定地理和时间分辨

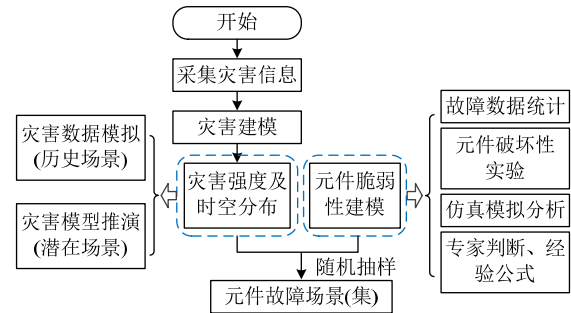


图4 严重自然灾害下电力系统故障场景生成流程

Fig. 4 Generation process of power system fault scenarios under severe natural disasters

率的过去极端灾害场景。比如，文献[55]将强台风“韦森特”测量数据与Yan Meng风场模型结合计算求得配电网各区域随台风演变过程变化的风速值；灾害模型推演，是结合历史灾害数据统计灾害模型关键参数的概率分布，通过抽样方式获得关键参数组合，用于模拟潜在的未来可能的灾害场景。文献[56]提出台风登陆位置、移动速度、移动方向、初始压差等参数概率分布，通过随机抽样生成台风灾害场景。文献[57]中将地震震级和震中点的可行域划分为多段取值区间，构建震级和震中心概率分布函数，某一地震场景发生概率则由震级分布与震中点分布求得。两类方法中均采用了参数化的灾害模型，由于每种参数化灾害模型都有自身的特点和适用边界，故两类方法构造的故障场景难以具备广泛代表性<sup>[58]</sup>。

元件脆弱性曲线是将灾害场景与元件故障风险紧密联系的桥梁，作为脆弱性评价方法和灾害评估的关键环节，元件脆弱性曲线核心要素是表达致灾因子强度和承灾体脆弱性的定量关系<sup>[59]</sup>。元件脆弱性曲线构建方法主要有4种<sup>[60]</sup>：1)从大量观察到的故障统计分析中得出；2)通过元件破坏性实验获得；3)利用仿真模型模拟分析；4)利用专家判断或经验公式。4种方法均存在一定不足，方法1)中，与某一类自然灾害相关的电力系统元件故障数据不足，无法准确绘制元件脆弱性经验曲线；方法2)中，元件破坏性实验通常代价很大，也无法制定全网规模的不同类型元件整体实验方案；方法3)中，模拟模型构建过程复杂，通用性差；方法4)中，由于可借鉴的经验太少，具有高度不确定性和主观性。输变电工程应用中，常采用方法3)，通过有限元建模的方式分析输电线路、杆塔载荷能力<sup>[61]</sup>，但这种方法计算量大，难以应用到系统规模的仿真中；现有系统韧性评估研究中，大多采用方法4)，脆弱性曲线根据经验公式构建，模型过于简化，忽略了元件本身载荷的差异性。

## 2.2 系统响应与恢复模型

系统响应模型用于分析极端事件和控制措施作用下系统结构或状态变化。文献中系统响应模型主要包括复杂网络模型、最优潮流模型和连锁故障模型 3 类，如图 5 所示。复杂网络模型，是将变电站等效为节点、线路等效为边，将电力系统表示为拓扑网络，基于连通性或过载机理建立级联失效模型来模拟系统故障过程<sup>[62-63]</sup>，适用于分析系统结构性依赖关系，评估电力系统结构韧性。最优潮流模型，是考虑系统的充裕性，通过建立基于交流潮流或直流潮流的最优切负荷模型来仿真功率调整过程，在可靠性评估和韧性评估中均广泛应用<sup>[64-66]</sup>，然后这种方法对故障后系统动态过程进行了大量简化，导致评估结果偏乐观，缺乏实际应用价值。为了更精准刻画灾时系统状态，有学者提出系统响应模型应考虑极端情况下系统连锁故障过程，采用短时间暂态仿真与长时间稳态仿真交替进行的方式模拟灾害中系统故障演化过程<sup>[67]</sup>，这在一定程度上贴近了严重故障下系统状态变化，仍未能实现极端情况下系统动态全过程的模拟。

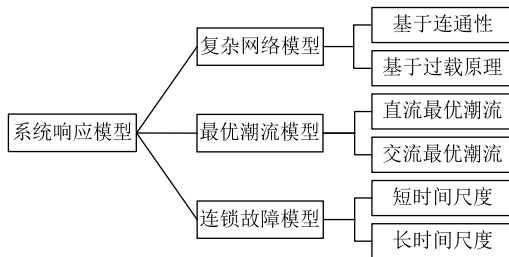


图 5 系统响应模型分类

Fig. 5 Classification of system response models

系统恢复模型用于分析运行控制、应急抢修等措施作用下系统恢复过程。可靠性评估中往往对恢复过程做大量简化，比如故障元件修复时间采用假设平均修复时间生成的随机修复时间代替<sup>[68]</sup>，然而实际极端情况电力系统恢复过程较为复杂，为多决策变量、多非线性约束的复杂优化问题，涉及调度和应急 2 个层面<sup>[69]</sup>，如图 5 所示。在调度层面，目前恢复模型研究大多聚焦于配电网，考虑在配电网大面积停电，且与主网失去联系形成孤岛的状态下如何实现电化学储能、可控分布电源(燃气轮机、柴油发电机等)、固定间歇电源(光伏、风电)、自备应急电源等多源协同恢复问题<sup>[70-71]</sup>，在应急层面，研究电力-交通基础设施耦合下抢修人员和应急物资调配、应急电源优化调度等<sup>[72-73]</sup>。在系统恢复模型构建中，分布式间歇性电源出力和负荷的不确定性、故障点修复时间的不确定性、交通路况时变性等是需要重点考虑的问题<sup>[74-75]</sup>，除此之外，为了在

实际系统恢复过程中发挥作用，模型需在短时间内计算得出恢复方案，因此如何在保证模型准确性的前提下提高求解的高效性也是学者关注的一个重要方向<sup>[76-77]</sup>。

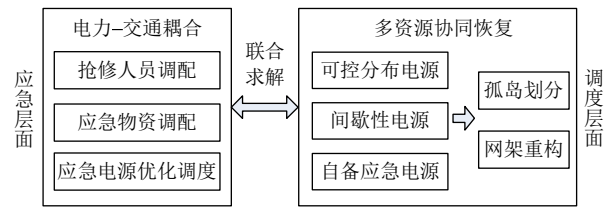


图 6 系统恢复模型框架

Fig. 6 Framework of system recovery model

## 2.3 韧性指标体系构建

韧性指标体系是评价一个系统韧性水平的准绳，指标体系构建包括指标划分和指标度量两个方面。指标划分方式与评价者的视角与关切问题相关，Bruneau 在研究社区韧性时构建了包括技术、组织、社会、经济(technical, organization, social, and economic, TOSE)4 个维度指标体系<sup>[78]</sup>，在电力系统韧性研究中得到广泛应用，其中技术维度关注系统遭受灾害时保持原有运行状态的能力，组织维度关注系统运营者应对极端事件的管理和执行能力，如应急响应等，社会维度关注减少停电造成社会后果的能力，经济维度关注减少停电造成经济损失的能力。TOSE 的每个维度韧性又可以划分为多个属性，形成多维评估评估矩阵。文献[79]总结系统韧性包含鲁棒性、冗余性、有源型和迅速性等基础属性，国网上海电力公司周健等从组织和技术维度构建了评价电网韧性的矩阵架构<sup>[80]</sup>，架构中评价对象包括输电网、配网、设备 3 个层级，每个层级定义应变力、防御力、恢复力等 6 类属性，每类属性规定了细化评估指标。

目前韧性指标量化主要包括基于系统性能曲线和基于韧性能力表征 2 种方法<sup>[81]</sup>，基于系统性能曲线的电力系统韧性度量，是以系统性能响应函数(又称韧性曲线)模型为基础，研究极端事件下系统性能随时间的变化，并用系统性能响应函数积分面积来表征系统韧性<sup>[82]</sup>。随着研究的深入，部分学者对基础模型做了变化和拓展<sup>[83-85]</sup>，在文献[85]中，韧性指标定义为实际性能曲线与目标性能曲线面积比值，积分时间从系统性能下降开始到系统恢复为止，文献[55]在此基础上将积分时间扩展到从灾害发生开始到系统恢复为止，并与故障持续因子相乘。基于系统性能曲线的指标可以反应系统的总体韧性，但无法量化极端事件应对的各阶段系统的表现。基于韧性能力表征的电力系统韧性度量，是

采用一组指标来对极端事件下的系统响应的各个过程分别进行评价等, Panteli 等在文献[65]中提出 5 类指标体系框架, 除了韧性曲线积分面积外, 还包括“4H”指标, 即在抵御吸收阶段系统性能下降的速度和程度(How fast and How low), 响应适应阶段持续的时间(How extensive)以及恢复过程的及时性(How promptly); 也有学者将系统性能下降程度、恢复程度与表征恢复时间的参数乘积作为韧性评估指标<sup>[86]</sup>。对照图 1, 总结部分代表性韧性度量指标如表 3 所示。

表 3 部分代表性韧性度量指标  
Table 3 Some representative resilience metrics

分类	公式	参考文献
基于系统性能曲线	基础指标 $F = \int_{T_1}^{T_2} R_T(t) - R(t)dt$	[82]
	指标拓展 $F = \int_{T_1}^{T_2} R(t)dt / \int_{T_1}^{T_2} R_T(t)dt$	[83-85]
基于韧性能力表征	基础指标 $\Phi = \frac{R_{nor} - R_{ext}}{T_2 - T_1}, \quad A = R_{nor} - R_{ext}$ $E = T_3 - T_2, \quad \Pi = \frac{R_{nor} - R_{ext}}{T_5 - T_3}$	[65]
	指标拓展 $F = S_p \frac{R_{re} - R_{ext}}{R_{nor} - R_{ext}}$ $S_p$ 为恢复因子, 与恢复阶段时间相关	[86]

韧性评估中系统性能(也就是韧性曲线的纵坐标)常采用负荷的加权量表示<sup>[87]</sup>, 则基于曲线积分的韧性指标转化为

$$R = \int_{T_1}^{T_2} R_T(t) - R(t)dt = \int_{T_1}^{T_2} \sum_{i \in \Omega} \omega_i P_i dt = \sum_{i \in \Omega} \omega_i P_i t_i$$

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

除了负荷加权量以外, 学者提出了考虑网架拓扑、供电能力等因素的系统性能表征指标, 包括最大节点规模<sup>[88]</sup>、线路故障条数<sup>[89]</sup>、发电功率缺额(比)<sup>[90]</sup>、线路容量(裕度)/失效比例<sup>[91]</sup>等, 并在具体评估时, 结合不同自然灾害的破坏特点选择采用不同的指标, 文献[89]考虑到天然气系统对地表灾害有一定抵御能力, 在评估电-气混联能源系统韧性时采用了区别于地质灾害场景的表征指标。从指标划分和系统性能选择上, 可以看出目前系统韧性评估大多从技术维度出发, 侧重于评价系统本身结构韧性或功能韧性, 很少从经济、社会维度关注韧性不足带来的潜在性或间接性后果, 例如, 大停电可能导致的生产中断、交通堵塞、群众恐慌等。电力系统韧性研究的本质上应考虑多层次系统复杂相互依赖关系, 最终目标是考虑生存问题和社会秩序<sup>[92]</sup>。

## 2.4 评估结果应用

严重自然灾害造成的电力系统故障场景可能

远超现有的防御体系, 但由于资金、资源受限, 不可能通过系统全面加固来消除灾害的所有影响, 因此有必要考虑电网规划、投资的优先级, 以最有效且具成本效益的方式实现韧性目标。在实际电网应用中, 由于各地区电网现状、应急资源配置、遭受的主要灾害类别等方面均存在差异, 韧性提升措施的制定没有“一刀切”的解决方案, 需要以评估结果为依据, 具体流程包括包括确定韧性目标并构建韧性指标体系、初始化故障场景、模拟系统应对过程、分析韧性提升路径、形成韧性提升方案等环节。研究中专家学者大多以韧性指标为衡量, 采用单一变量控制法进行试验, 通过对比韧性提升路径或措施落实前后指标的变化来判断其有效性。文献[65]对暴风灾害中英国输电网韧性水平进行评估, 基于评估结果分析了增强输电设备的抗风能力、缩短应急恢复时间、增加抢修队伍等措施对提升系统韧性的作用。美国桑迪亚和洛斯阿拉莫斯国家实验室针对新奥尔良市关注的飓风灾害场景, 对其电网韧性进行评估, 根据评估结果制定了增加备用电源、局部电网黑启动、微电网供电 3 种提升措施<sup>[93]</sup>。实际应用中, 韧性提升方案往往为多种措施组合, 决策者除了关心单一提升措施可行性和有效性外, 还需要考虑其经济性, 基于评估结果的韧性提升方案制定为多目标、多决策变量优化问题。

## 3 面向严重自然灾害的电力系统韧性评估关键技术展望

随着能源转型的不断推进, 电源侧风电、光伏等清洁能源高比例接入电网, 负荷侧分布式能源快速增长、电能替代加速推进, 电力系统与外部环境系统深度耦合, 电力系统运行受到气象等因素影响增多, 同时经济社会对电力依赖程度越来越高。新时期电力系统安全风险防控的场景更多、要求更高、难度更大。具体体现在 2 个方面: 一是受气候变化等因素影响, 电力系统所处的环境更加复杂, 包括极端天气、严重自然灾害在内的等各类极端事件频发, 电力系统遭受的外部冲击持续增大; 二是电力系统与通信、交通、供水、燃气等城市基础设施之间耦合关系更加复杂, 电力系统一旦发生大范围停电事故, 将连锁产生诸多次生和衍生灾害事件, 产生巨大的直接和间接损失, 严重影响经济社会稳定。由此产生了灾害场景下的电力系统韧性评估研究的重大挑战: 环境-电力-社会系统深度耦合下电力系统应对严重自然灾害能力的定量表征问题。围绕此问题提出灾害场景下系统韧性评估的关键技术。



### 3.1 多致灾因子作用下电力系统故障场景构建技术

不同小概率高影响极端事件簇特性各异,系统故障场景也将千差万别,不同类型严重自然灾害表现出不同的时空特征,灾害中系统故障元件类型、数量、分布特点等也是截然不同。随着电力系统越来越复杂,且与外部环境耦合程度不断加深,迫切需要研究极端事件发生的频次以及作用于电力系统的方式和后果。一般情况下,在严重气象灾害场景中,系统元件状态由范围性大气作用和灾害自身物化特性两方面因素影响<sup>[94]</sup>,比如台风常伴随强降雨和大幅降温,会对作用区内电气元件造成普遍性影响,同时,台风风圈的移动往往会导致元件故障分布呈现一定的集中性,整体影响表现为集中分散性;由于严重自然灾害中致灾因子种类多样、影响各异<sup>[95]</sup>,需对实际运行中灾害造成的元件各类故障数据进行统计,分析引发元件故障的原因、不同类型故障发生的场景及概率,基于数据物理双向驱动的思路,将数据驱动模型与物理解析模型相结合,建立系统元件故障与不同致灾因子之间的关联关系,构建精细化、多元化的元件脆弱性函数,以生成更加符合实际、具有代表性的故障场景集。

### 3.2 极端严重故障下系统状态全过程模拟仿真技术

严重自然灾害下电力系统元件普遍大面积受损,远超系统的设防标准,比如飓风“桑迪”造成电力系统“N-90”事件<sup>[96]</sup>,目前针对严重自然灾害韧性评估中,往往忽略系统暂态过程,评估结果严重失真,尤其是负荷损失偏乐观。为了使得系统韧性评估实用化,亟待研究极端严重故障下系统状态全过程模拟仿真技术。常规电力系统安全稳定分析技术主要针对安全稳定标准中的常规N-1、N-2故障(即“大概率小后果”故障),重点关注系统的运行控制限额和稳定控制策略<sup>[97]</sup>,而极端严重故障下系统状态全过程模拟仿真技术主要是针对多重N-m故障(即“小概率大后果”故障),重点关注故障发展过程、系统状态转换以及系统最终状态,需要基于长时间尺度范畴,充分考虑保护、稳控、第三道防线的动作逻辑和策略,完整计及系统防御措施、事故过程和连锁反应对电力系统安全运行的影响。部分学者基于现有计算软件对电网连锁故障进行仿真,文献[98]中采用PSD和PSASP软件仿真分析了直流故障、控制保护策略调整等对故障连锁演化过程的影响,文献[99]基于PSD-PSmodel构建机电-电磁混合模型开展多时间尺度混合仿真,搜索交直流连锁故障演化路径。基于现有软件开展连锁故障仿真一般以系统失稳作为计算的终止判据,

而系统状态全过程模拟需要得到最终负荷损失结果以支撑评估指标计算,所以极端故障场景下仿真分析需要考虑电压、频率等系统运行指标严重偏离正常值时,现有软件模型及求解方法的适用性问题。

### 3.3 计及经济和社会安全的多维电网韧性评估指标构建方法

在以往的韧性评估中,电力系统通常为视为一个独立实体,评估指标也是局限于电力系统本身的性能变化。然而,随着电力系统与其他关键基础依存性加深,经济、社会安全对电力系统的依赖性加强,这类指标显现无法反映电力系统韧性不足带来的严重后果,需要研究严重自然灾害下系统大面积停电对经济、社会的影响,构建多维指标矩阵,从系统、经济、社会安全等不同视角来量化电力系统韧性,评估者可以根据需要,选择其中一维或多维指标来表征系统韧性水平。系统层面,学者之前已经开展大量研究;经济层面,需考虑严重自然灾害下大停电造成的经济损失,包括停电对电力行业、工商业及居民造成的直接经济损失以及在宏观经济效应和产业结构效应影响下的间接经济损失。美国劳伦斯伯克利国家实验室在这方面做了一些探索,开发了一款基于web的中断成本估算(interruption cost estimate, ICE)计算器,用于估算停电对消费者的影响<sup>[100]</sup>,美国国家可再生能源实验室开发一种客户损失计算工具,用于估算电力设施中断成本,为联邦机构韧性投资提供决策支持<sup>[101]</sup>。社会安全层面,基于公共安全理论,分析电网、燃气网、供水网等城市关键基础设施的结构和功能依赖关系,研究以电网为中心的城市关键基础设施耦合关系建模方法,在此基础上研究电网重要负荷损失对城市功能正常运转和社会安全的影响。薛禹胜院士考虑能源与社会系统耦合关系日益紧密,提出了能源的信息物理社会系统(cyber-physical-social system in energy, CPSSE)框架<sup>[102]</sup>,并开发了跨领域交互仿真平台<sup>[103]</sup>,CPSSE侧重于研究多样的用户用电行为对电力系统的影响<sup>[104]</sup>,而考虑社会安全的韧性评估指标需反映电力系统故障对社会系统的影响。由于社会安全涉及公众心理及行为研究,关联因素复杂,量化难度极大,目前涉及社会安全的电力系统韧性评估研究尚属空白。

## 4 结语

自韧性概念提出后,很多专家学者对其内涵、评估方法及提升措施进行了研究,但目前仍没有形成普遍共识,更无统一定义和可参照执行的标准评

价指标，也缺乏评估系统韧性的工具，其中很大一部分原因是韧性针对极端小概率事件，而极端小概率事件场景繁多、研究方法和侧重点各异，这导致韧性框架内的研究外延宽泛。本文聚焦严重自然灾害场景，基于文献调研，总结提出韧性评估流程和框架以及包含的主要关键环节，即系统故障场景生成、系统响应与恢复模型搭建、韧性指标体系构建、评估结果应用等。当前电力系统面临的内外部风险增加，韧性评估的难点是在考虑外部环境-电力系统-社会系统三者的耦合关系后，如何量化计算电力系统应对严重自然灾害的能力，涉及多致灾因子作用下电力系统故障场景构建、极端严重故障下系统状态全过程模拟仿真、计及经济和社会安全的多维电网韧性评估指标构建等多项关键技术。在未来的工作中，研究团队计划将文中所提关键技术作为研究方向，结合实际电网开展韧性评估，探索提出有工程指导意义的指标体系和计算方法。

## 参考文献

- [1] 张智刚, 康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2806-2818.  
ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2818(in Chinese).
- [2] 胡源, 薛松, 张寒, 等. 近 30 年全球大停电事故发生的深层次原因分析及启示[J]. 中国电力, 2021, 54(10): 204-210.  
HU Yuan, XUE Song, ZHANG Han, et al. Cause analysis and enlightenment of global blackouts in the past 30 years[J]. Electric Power, 2021, 54(10): 204-210(in Chinese).
- [3] Atomic Energy Society of Japan. The Fukushima Daiichi nuclear accident: final report of the AESJ investigation committee[M]. Tokyo: Springer, 2015.
- [4] Australian Energy Market Operator. Black system south Australia 28 September 2016: final report[R]. Melbourne: Australian Energy Market Operator, 2017.
- [5] 张怡. 超强台风对浙江电网的影响及防范建议[J]. 浙江水利水电学院学报, 2020, 32(4): 39-44.  
ZHANG Yi. Influence of super typhoon on Zhejiang power grid and preventive measures[J]. Journal of Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, 2020, 32(4): 39-44(in Chinese).
- [6] U.S. Department of Energy. Hurricane Fiona | update #1[R]. Washington: U.S. Department of Energy, 2022.
- [7] 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): 1-10.  
QIU Aici, BIE ZhaoHong, LI Gengfeng, et al. HEMP threat and development strategy of resilient power system[J]. Modern Applied Physics, 2021, 12(3): 1-10(in Chinese).
- [8] KOBAYASHI Y. Enhancing energy resilience: challenging tasks for Japan's energy policy[R]. Washington: Center for Strategic and International Studies, 2014.
- [9] GASSER P, LUSTENBERGER P, CINELLI M, et al. A review on resilience assessment of energy systems[J]. Sustainable and Resilient Infrastructure, 2021, 6(5): 273-299.
- [10] MA Shanshan, CHEN Bokan, WANG Zhaoyu. Resilience enhancement strategy for distribution systems under extreme weather events[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(2): 1442-1451.
- [11] 顾雪平, 白岩松, 李少岩, 等. 电力系统黑启动恢复问题的研究评述[J]. 电工技术学报, 2022, 37(13): 3183-3200.  
GU Xueping, BAI Yansong, LI Shaoyan, et al. Research review of power system black-start restoration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(13): 3183-3200(in Chinese).
- [12] LU Xiaonan, BAHRAMIRAD S, WANG Jianhui, et al. Bronzeville community microgrids: a reliable, resilient and sustainable solution for integrated energy management with distribution systems[J]. The Electricity Journal, 2015, 28(10): 29-42.
- [13] MARNAY C, AKI H, HIROSE K, et al. Japan's pivot to resilience: how two microgrids fared after the 2011 earthquake[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2015, 13(3): 44-57.
- [14] 尹积军, 夏清. 能源互联网形态下多元融合高弹性电网的概念设计与探索[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 486-496.  
YIN Jijun, XIA Qing. Conceptual design and exploration of multi-factor integrated high-elastic power grid in energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 486-496(in Chinese).
- [15] 梁旭. 韧性电网[M]. 北京: 中国电力出版社, 2022.
- [16] 程鑫, 樊扬, 龚贤夫, 等. 城市抗冰保底电网防灾综合评价指标体系研究[J]. 电网技术, 2019, 43(10): 3808-3815.  
CHENG Xin, FAN Yang, GONG Xianfu, et al. Study on comprehensive evaluation index system for disaster prevention of urban ice-resistant secure power grid[J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3808-3815(in Chinese).
- [17] 高海翔, 陈颖, 黄少伟, 等. 配电网韧性及其相关研究进展[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(23): 1-8.  
GAO Haixiang, CHEN Yin, 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).
- [18] HOLLING C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, 4: 1-23.
- [19] KAHNAMOUEI A S, BOLANDI T G, HAGHIFAM M R. The conceptual framework of resilience and its measurement approaches in electrical power systems[C]//IET International Conference on Resilience of Transmission and Distribution Networks (RTDN 2017). Birmingham: IET, 2017: 1-11.
- [20] Homeland Security Blog Team. Presidential policy directive (PPD)-8: national preparedness[R]. Washington: U.S. Department of Homeland Security, 2011.
- [21] Cabinet Office. Keeping the country running: natural hazards and infrastructure[R]. London: Cabinet Office, 2011.
- [22] European Commission. A framework strategy for a resilient energy union with a forward-looking climate change policy[R]. Brussels: European Commission, 2015.
- [23] BERKELEY III A R, WALLACE M. A framework for establishing critical infrastructure resilience goals: final report and recommendations by the council[J]. Washington: National Infrastructure Advisory Council, 2010: 18-21.
- [24] 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).
- [25] 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(in Chinese).
- [26] 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(in Chinese).
- [27] CHIU B, BOSE A. Resilience framework, methods, and metrics for the electricity sector[R]. New York, USA: IEEE Power & Energy Society, 2020.
- [28] STANKOVIC A. The definition and quantification of resilience[R]. Piscataway: IEEE PES Industry Technical Support Task Force, 2018: 1-4.
- [29] North American Electric Reliability Council. An assessment of 2021 bulk power system performance[R]. Atlanta: North American Electric Reliability Council, 2022.
- [30] 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.
- [31] 程林, 何剑. 电力系统可靠性原理和应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2015.
- [32] 别朝红, 王锡凡. 蒙特卡洛法在评估电力系统可靠性中的应用[J]. 电力系统自动化, 1997, 21(6): 68-75.  
BIE Zhaohong, WANG Xifan. The application of Monte Carlo method to reliability evaluation of power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(6): 68-75(in Chinese).
- [33] 王钰山, 邓晖, 王旭, 等. 考虑台风时空演变的配电网移动储能优化配置与运行策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(9): 42-51.  
WANG Yushan, DENG Hui, WANG Xu, et al. Optimal configuration and operation strategy of mobile energy storage in distribution network considering spatial-temporal evolution of typhoon[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(9): 42-51(in Chinese).
- [34] BIE Zhaohong, LIN Yanling, LI Gengfeng, et al. Battling the extreme: a study on the power system resilience[J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 105(7): 1253-1266.
- [35] 中华人民共和国国家经济贸易委员会. 电力系统安全稳定控制技术导则: DL/T 723—2000[S]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- [36] PANTELI M, MANCARELLA P. Modeling and evaluating the resilience of critical electrical power infrastructure to extreme weather events[J]. IEEE Systems Journal, 2017, 11(3): 1733-1742.
- [37] DANZIGER M M, BARABÁSI A L. Recovery coupling in multilayer networks[J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 955.
- [38] 侯验秋, 丁一, 包铭磊, 等. 电—气耦合视角下德州大停电事故分析及对我国新型电力系统发展启示[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(21): 7764-7774.  
HOU Yanqiu, DING Yi, BAO Minglei, et al. Analysis of Texas blackout from the perspective of electricity-gas coupling and its enlightenment to the development of China's new power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(21): 7764-7774(in Chinese).
- [39] 刘自发, 刘钊, 吉星, 等. 基于社会公共安全模型的大停电社会损失评估[J]. 电网技术, 2014, 38(11): 2964-2971.  
LIU Zifa, LIU Zhao, JI Xing, et al. Evaluation on blackout-caused social loss based on social public security model[J]. Power System Technology, 2014, 38(11): 2964-2971(in Chinese).
- [40] 刘自发, 张在宝, 杨滨, 等. 电网大停电社会综合损失评估[J]. 电网技术, 2017, 41(9): 2928-2938.  
LIU Zifa, ZHANG Zaibao, YANG Bin, et al. Evaluation of great blackout social comprehensive loss of power grid[J]. Power System Technology, 2017, 41(9): 2928-2938(in Chinese).
- [41] VUGRIN E D, SILVA-MONROY C A. Metrics analysis for grid modernization[R]. Albuquerque, NM, United States: Sandia National Lab. (SNL-NM), 2017.
- [42] CARLSON J L, HAFFENDEN R A, BASSETT G W, et al. Resilience: theory and application[R]. Argonne: Argonne National Laboratory, 2012.
- [43] MCMANUS S, SEVILLE E, BRUNSDON D, et al. Resilience management: a framework for assessing and improving the resilience of organisations[R]. New Zealand: Resilient Organisations Programme, 2007.
- [44] ORENCIO P M, FUJII M. A localized disaster-resilience index to assess coastal communities based on an analytic hierarchy process (AHP)[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2013, 3: 62-75.
- [45] EKISHEVA S, DOBSON I, RIEDER R, et al. Assessing transmission resilience during extreme weather with outage and restore processes[C]//2022 17th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS). Manchester: IEEE, 2022: 1-6.
- [46] 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).
- [47] CHANDA S, SRIVASTAVA A K. Defining and enabling resiliency of electric distribution systems with multiple microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(6): 2859-2868.
- [48] 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).
- [49] ESPINOZA S, PANTELI M, MANCARELLA P, et al. Multi-phase assessment and adaptation of power systems resilience to natural hazards[J]. Electric Power Systems Research, 2016, 136: 352-361.
- [50] ZHANG Han, YUAN Hanjie, LI Gengfeng, et al. Quantitative resilience assessment under a tri-stage framework for power systems[J]. Energies, 2018, 11(6): 1427.
- [51] 杜诗嘉, 郭创新, 俞啸玲, 等. 台风灾害下的弹性配电网研究综述与展望[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(2): 176-186, 209.  
DU Shijia, GUO Chuangxin, YU Xiaoling, et al. Review and prospect of resilient distribution network under typhoon disaster[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(2): 176-186, 209(in Chinese).
- [52] 王晗, 侯楷, 余晓丹, 等. 计及地震灾害不确定性的电气互联系统韧性评估与提升方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(3): 853-863.  
WANG Han, HOU Kai, YU Xiaodan, et al. The assessment and improvement method of electricity-gas system resilience considering earthquake disaster uncertainty[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(3): 853-863(in Chinese).
- [53] 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.
- [54] 尹昊冉, 崇振霄, 郝金慧, 等. 地震灾害下电—气综合能源系统的韧性评估[J]. 河北电力技术, 2022, 41(3): 22-29.  
YIN Haoran, CHONG Zhenxiao, HAO Jinhui, et al. Resilience

- evaluation of electricity gas integrated energy system considering earthquake disaster[J]. Hebei Electric Power, 2022, 41(3): 22-29(in Chinese).
- [55] YANG Yihao, TANG Wenhui, LIU Yand, et al. Quantitative resilience assessment for power transmission systems under typhoon weather[J]. IEEE Access, 2018, 6: 40747-40756.
- [56] WANG Yuantao, HUANG Tiannen, LI Xiang, et al. A resilience assessment framework for distribution systems under typhoon disasters[J]. IEEE Access, 2021, 9: 155224-155233.
- [57] 吴彬, 高军彦, 班全, 等. 地震灾害下的电气耦合系统韧性评估[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(5): 59-69.  
WU Bin, GAO Junyan, BAN Quan, et al. Resilience assessment on integrated electricity-gas system under earthquake disaster[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022, 34(5): 59-69(in Chinese).
- [58] 方伟华, 林伟. 面向灾害风险评估的台风风场模型研究综述[J]. 地理科学进展, 2013, 32(6): 852-867.  
FANG Weihua, LIN Wei. A review on typhoon wind field modeling for disaster risk assessment[J]. Progress in Geography, 2013, 32(6): 852-867(in Chinese).
- [59] 周瑶, 王静爱. 自然灾害脆弱性曲线研究进展[J]. 地球科学进展, 2012, 27(4): 435-442.  
ZHOU Yao, WANG Jing'ai. A review on development of vulnerability curve of natural disaster[J]. Advances in Earth Science, 2012, 27(4): 435-442(in Chinese).
- [60] 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.
- [61] 王东东, 周超, 马御棠, 等. 架空输电塔线体系有限元建模及风载分析[J]. 电工技术, 2022(5): 132-137.  
WANG Dongdong, ZHOU Chao, MA Yutang, et al. Finite element modeling and wind load analysis of overhead transmission tower-line system[J]. Electric Engineering, 2022(5): 132-137(in Chinese).
- [62] 刘文霞, 黄钰辰, 万海洋, 等. 复杂网络理论在能源互联网脆弱性与鲁棒性研究中的应用[J]. 智慧电力, 2021, 49(1): 14-21.  
LIU Wenxia, HUANG Yuchen, WAN Haiyang, et al. Application of complex network theory in vulnerability and robustness evaluation of energy Internet[J]. Smart Power, 2021, 49(1): 14-21(in Chinese).
- [63] MALLA N, POUDEL S, KARKI N R, et al. Resilience of electrical power delivery system in response to natural disasters[C]//2017 7th International Conference on Power Systems (ICPS). Pune: IEEE, 2017: 806-811.
- [64] SABOUHI H, DOROUDI A, FOTUHI-FIRUZABAD M, et al. Electrical power system resilience assessment: a comprehensive approach[J]. IEEE Systems Journal, 2020, 14(2): 2643-2652.
- [65] 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.
- [66] 张鑫, 王楠, 王伟, 等. 考虑台风天气的电力系统韧性评估[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(8): 21-26.  
ZHANG Xin, WANG Nan, WANG Wei, et al. Resilience assessment on power system under typhoon[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(8): 21-26(in Chinese).
- [67] 李家钰, 秦文萍, 景祥, 等. 台风灾害下考虑连锁故障的电力系统弹性评估[J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(1): 14-22.  
LI Jiayu, QIN Wenping, JING Xiang, et al. Power system resilience assessment considering cascading failure under typhoon disaster[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2023, 35(1): 14-22(in Chinese).
- [68] PANTELI M, MANCARELLA P. Operational resilience assessment of power systems under extreme weather and loading conditions[C]//2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Denver: IEEE, 2015: 1-5.
- [69] 王颖. 大面积停电场景下配电网多源协同故障恢复方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
- [70] XU Yin, LIU C C, SCHNEIDER K P, et al. Toward a resilient distribution system[C]//2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Denver: IEEE, 2015: 1-5.
- [71] 俞拙非, 刘菲, 刘瑞环, 等. 面向配电网弹性提升的源网荷灵活资源优化研究综述及展望[J]. 中国电力, 2022, 55(4): 132-144.  
YU Zhuofei, LIU Fei, LIU Ruihuan, et al. Resilience-oriented optimization of source-grid-load flexible resources in distribution systems: review and prospect[J]. Electric Power, 2022, 55(4): 132-144(in Chinese).
- [72] LAVORATO M, FRANCO J F, RIDER M J, et al. Imposing radiality constraints in distribution system optimization problems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(1): 172-180.
- [73] WANG Ying, XU Yin, HE Jinghan, et al. Coordinating multiple sources for service restoration to enhance resilience of distribution systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(5): 5781-5793.
- [74] 万海洋, 刘文霞, 石庆鑫, 等. 计及交通流量动态变化的配电网灾后修复多时间断面优化策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(12): 119-129.  
WAN Haiyang, LIU Wenxia, SHI Qingxin, et al. Multiple-time-section optimization strategy for post-disaster recovery of distribution network considering dynamic changes of traffic flow[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(12): 119-129(in Chinese).
- [75] 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(in Chinese).
- [76] LI Zepeng, TANG Wenhui, LIAN Xianglong, et al. A resilience-oriented two-stage recovery method for power distribution system considering transportation network[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 135: 107497.
- [77] 杨丽君, 赵宇, 赵优, 等. 考虑交通路网应急电源车调度的有源配电网故障均衡恢复[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(21): 170-180.  
YANG Lijun, ZHAO Yu, ZHAO You, et al. Balanced fault recovery of active distribution network considering emergency power supply vehicle scheduling in traffic network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(21): 170-180(in Chinese).
- [78] 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.
- [79] 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(in Chinese).
- [80] 周健, 阮前途, 谢伟, 等. 一种多维度多层级的韧性电网评估方法及系统: 113868586A[P]. 2021-12-31.
- [81] 毕玮, 汤育春, 冒婷婷, 等. 城市基础设施系统韧性管理综述[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(6): 14-28.  
BI Wei, TANG Yuchun, MAO Tingting, et al. Review on resilience management of urban infrastructure system[J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(6): 14-28(in Chinese).
- [82] BRUNEAU M, REINHORN A. Exploring the concept of seismic

- resilience for acute care facilities[J]. *Earthquake Spectra*, 2007, 23(1): 41-62.
- [83] OUYANG Min, DUEÑAS-OSORIO L. Multi-dimensional hurricane resilience assessment of electric power systems[J]. *Structural Safety*, 2014, 48: 15-24.
- [84] HUANG Wenwei, QIAN Tong, LI Zepeng, et al. A survey of resilience indexes in power systems[C]//2021 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC). Nanjing: IEEE, 2021: 1475-1480.
- [85] OUYANG Min, DUEÑAS-OSORIO L, MIN Xing. A three-stage resilience analysis framework for urban infrastructure systems[J]. *Structural Safety*, 2012, 36-37: 23-31.
- [86] FRANCIS R, BEKERA B. A metric and frameworks for resilience analysis of engineered and infrastructure systems[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2014, 121: 90-103.
- [87] ROSALES-ASENSIO E, ELEJALDE J L, PULIDO-ALONSO A, et al. Resilience framework, methods, and metrics for the prioritization of critical electrical grid customers[J]. *Electronics*, 2022, 11(14): 2246.
- [88] 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.
- [89] 齐世雄, 王秀丽, 邵成成, 等. 极端事件下电—气混联综合能源系统的恢复力分析[J]. *电网技术*, 2019, 43(1): 41-49.  
QI Shixiong, WANG Xiuli, SHAO Chengcheng, et al. Resilience analysis of integrated electricity and natural gas energy system under extreme events[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(1): 41-49(in Chinese).
- [90] KANDAPERUMAL G, SRIVASTAVA A K. Resilience of the electric distribution systems: concepts, classification, assessment, challenges, and research needs[J]. *IET Smart Grid*, 2020, 3(2): 133-143.
- [91] HASANZAD F, RASTEGAR H. Robust optimal hardening for resilience enhancement of power system[C]//2021 29th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE). Tehran: IEEE, 2021: 432-436.
- [92] ROEGE P E, COLLIER Z A, MANCILLAS J, et al. Metrics for energy resilience[J]. *Energy Policy*, 2014, 72: 249-256.
- [93] JEFFERS R F, HIGHTOWER M M, BRODSKY N S, et al. A grid modernization approach for community resilience: application to New Orleans, LA[R]. Albuquerque: Sandia National Laboratories, 2017.
- [94] 王玮, 赵家悦, 郭创新, 等. 考虑故障连锁的多灾害输电网络弹性评估及关键弹性提升元件辨识[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(1): 127-139.  
WANG Wei, ZHAO Jiayue, GUO Chuangxin, et al. Assessing resilience of transmission network and identifying key elements to enhance resilience considering failure chain under multiple disasters [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(1): 127-139(in Chinese).
- [95] 从荣刚. 自然灾害对中国电力系统的影响(文献综述)[J]. *西华大学学报(自然科学版)*, 2013, 32(1): 105-112.  
CONG Ronggang. Impact of natural disasters on electric power systems of China (a literature review)[J]. *Journal of Xihua University (Natural Science Edition)*, 2013, 32(1): 105-112(in Chinese).
- [96] National Research Council, Division on Engineering and Physical Sciences, Board on Energy and Environmental Systems, et al. The resilience of the electric power delivery system in response to terrorism and natural disasters: summary of a workshop[M]. Washington: National Academies Press, 2013.
- [97] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 电力系统安全稳定导则: GB 38755—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- [98] 沈政委, 孙华东, 仲悟之, 等. 基于关键事件的高比例新能源电力系统故障连锁演化规律分析[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(24): 57-65.  
SHEN Zhengwei, SUN Huadong, ZHONG Wuzhi, et al. Key event based analysis of evolution law of cascading failures in power system with high proportion of renewable energy[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(24): 57-65(in Chinese).
- [99] 边晓燕, 杨云轶, 黄阮明, 等. 基于机电-电磁混合仿真的交直流混联受端电网连锁故障筛选指标及搜索策略[J/OL]. [2023-05-10] *中国电机工程学报*, 2022: 1-14. <https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=3uoqIhG8C45S0n9fL2suRadTyEVI2pW9UrhTDCdPD65dJwFi6aRxPSt9y0zlxJjWwnJDrsOVJwJ9nJsoWYMQP0APc8UqA4X&uniplatform=NZKPT>.  
BIAN Xiaoyan, YANG Yunyi, HUANG Ruanming, et al. Screening indices and search strategy for AC-DC hybrid receiving-end power grid cascading failures based on hybrid electromechanical-electromagnetic simulation [J/OL]. *Proceedings of the CSEE*, 2022: 1-14. <https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=3uoqIhG8C45S0n9fL2suRadTyEVI2pW9UrhTDCdPD65dJwFi6aRxPSt9y0zlxJjWwnJDrsOVJwJ9nJsoWYMQP0APc8UqA4X&uniplatform=NZKPT>(in Chinese).
- [100] JOSH Schellenberg, PETER Larsen. Changes to the underlying econometric models for the interruption cost estimate (ICE)[R/OL]. [2023-05-10] San Francisco, USA: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2018. [https://eta-publications.lbl.gov/sites/default/files/ice\\_calculator\\_recent\\_updates.pdf](https://eta-publications.lbl.gov/sites/default/files/ice_calculator_recent_updates.pdf).
- [101] NICHOLAS Gilroy, PAUL Susmarski, SEAN Ericson, et al. The customer damage function calculator user manual[R/OL]. [2023-05-10] Colorado, USA: National Renewable Energy Laboratory, 2022. <https://s3.us-west-2.amazonaws.com/gds-files.nrelcloud.org/auto-sync/cdf/cdf-calculator-user-manual.pdf>.
- [102] XUE Yusheng, YU Xinghuo. Beyond smart grid—cyber - physical - social system in energy future [point of view][J]. *Proceedings of the IEEE*, 2017, 105(12): 2290-2292.
- [103] 薛禹胜, 谢东亮, 薛峰, 等. 支持信息-物理-社会系统研究的跨领域交互仿真平台[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(10): 138-148.  
XUE Yusheng, XIE Dongliang, XUE Feng, et al. A cross-field interactive simulation platform for supporting research on cyber-physical-social systems[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(10): 138-148(in Chinese).
- [104] 柳文轩, 赵俊华, 黄杰, 等. 面向能源领域信息物理社会系统的行为仿真建模分析——以现货电力市场为例[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(4): 8-15.  
LIU Wenxuan, ZHAO Junhua, HUANG Jie, et al. Simulation and modelling analysis on behavior of cyber physical social system in energy: a case in electricity spot market[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(4): 8-15(in Chinese).



孙为民

在线出版日期: 2023-05-08。

收稿日期: 2022-10-18。

作者简介:

孙为民(1989), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统运行控制、电力系统安全防护, E-mail: sunweimin@epri.sgcc.com.cn;

孙华东(1975), 男, 博士, 教授级高级工程师, 博士生导师, 研究方向为电力系统稳定分析与控制等, E-mail: sunhd6566@126.com。

(责任编辑 宋钰龙)