

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.226217

# 电力系统韧性评估与提升研究综述

陈磊, 邓欣怡, 陈红坤, 石晶

(武汉大学电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 随着极端天气(如飓风、地震和洪水)和人为攻击(网络、物理攻击)发生频率的不断提高,对电力系统安全稳定运行造成了严重影响,长时间停电和基础电气设施损坏的概率显著增加。为减小停电事故所带来的经济损失与社会影响,构建具备抵御力、适应力、恢复力的高韧性电力系统,无疑有着重要的理论价值与现实意义。针对此,首先,概述了电力系统韧性的基本概念和主要特征,比较了其与可靠性、安全性、鲁棒性之间的差异。其次,建立了从灾害建模到系统响应的韧性评估框架,依据静态评估和动态评估将韧性指标进行了分类,并进一步梳理了电力系统韧性评估指标体系。另外,从故障预防、故障响应、故障恢复3个方面出发,探讨了提升电力系统韧性的关键技术。最后,对电力系统韧性研究领域的未来发展方向进行了展望。

**关键词:** 电力系统韧性; 韧性评估; 指标体系; 韧性提升; 故障恢复

## Review of the assessment and improvement of power system resilience

CHEN Lei, DENG Xinyi, CHEN Hongkun, SHI Jing

(School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** The frequency of extreme events (e.g., hurricanes, earthquakes, and floods) and artificial attacks (cyber and physical ones) has increased dramatically in recent years, and these events have severely affected power systems ranging from long outage times to major equipment destruction. To reduce the economic loss and social impact caused by power failure, it is of significance to build highly resilient power systems with defense, adaptability, and restoration ability. First, the basic concept and main characteristics of power system resilience are elaborated, and the differences among power system resilience and reliability, security, robustness are compared. Secondly, a framework of resilience evaluation from disaster modeling to system response is constructed, and the resilience index system is reviewed comprehensively, while two categories of resilience indices for static and dynamic assessment are considered. Further, the key technologies of improving the power system resilience are discussed from the three aspects of fault prevention, response, and recovery. Finally, the potential research directions of power system resilience are prospected.

This work is supported by the General Program of National Natural Science Foundation of China (No. 51877154).

**Key words:** power system resilience; resilience assessment; index system; resilience improvement; fault recovery

## 0 引言

受全球极端天气和自然灾害的影响,近年来电网大规模停电事故频发,所造成的经济损失急剧增长。2021年2月,美国得克萨斯州遭遇冰雪寒潮,导致40 000 MW发电机组被迫停运,最大限电负荷达到事故前负荷的20%以上,约500万用户遭遇断电<sup>[1]</sup>。2021年7月,中国河南省多地遭遇强降雨天气,当地电网受到严重影响,多数关键变电站全停

避险。气候变化增加了洪水、飓风、暴风雪等极端天气事件的发生频率和强度,给电力系统安全稳定运行带来了严峻挑战。一般而言,这种小概率、高影响力的事件具有以下特征:

- (1) 事故发生时间及地点具有高度不确定性,难以准确预测;
- (2) 事故持续时间长,极大可能会对电气基础设施造成永久性损害,恢复难度大;
- (3) 若事故引发连锁故障,将在短期内引起较大范围用户供电中断。

虽然现阶段电力系统的规划运行需要满足一定

基金项目: 国家自然科学基金面上项目资助(51877154)

的可靠性与安全性指标，可以处理常规突发事件，但其对极端扰动事件及大规模连锁故障的应对能力仍有诸多不足。在某种意义上，当前基于  $N-1$  可靠性和安全性准则的电力系统运行规划方法将在未来数年内遇到重大挑战。

在此背景之下，国内外科研机构提出了电力系统韧性概念，以衡量其在极端事件下的性能。韧性一词源于英文单词“resilience”，字面含义为回弹，被广泛用于评价个体或系统承受压力的能力及扰动之后的恢复能力。电力系统韧性通常是指系统抵御极端事件破坏，吸收、适应并于事后快速恢复的能力。相较于可靠性对电力系统的内涵要求，韧性对电气基础设施建设与灾害防治的要求更高，注重强调系统抵御各类危害、承受故障后果并恢复负荷供电的能力。

目前，关于极端天气下的电力系统韧性建模、评估及恢复已开展了初步研究，取得了较好成效。在韧性建模方面，曾有学者将电网拓扑映射成三维空间展开布置的纵向受力网络，将韧性定义为电网保持静态稳定的能力<sup>[2-3]</sup>。另有专家将研究工作侧重于系统脆弱性建模，根据功能函数随时间变化的韧性曲线，解析了抵御、吸收、适应和恢复等不同阶段的过程特征<sup>[4-5]</sup>。在韧性评估方面，除建立了多种韧性指标之外<sup>[6-8]</sup>，亦有专家学者通过引入韧性评估矩阵，从技术、社会、经济等不同维度对输电网、配电网进行了韧性评估<sup>[9]</sup>。在韧性提升方面，现有工作主要围绕故障恢复及相关指标改善，探究了不同场景下的电力系统应急维修策略与分布式电源、储能及其他受控设备的优化配置方法<sup>[10-12]</sup>。

本文立足于电力系统韧性的定义与内涵，阐明了基本概念和主要特征，比较了其可靠性、安全性、鲁棒性之间的差异；进而，构建了从灾害建模到系统响应的韧性评估框架，梳理了电力系统韧性评估指标体系。通过整体考虑故障预防、故障响应和故障恢复，讨论了韧性提升的关键技术及应用潜力；最后，展望了电力系统韧性研究领域的未来发展方向，指出了相关难点问题 and 研究思路。

## 1 电力系统韧性的概念与特征

韧性概念最早由霍林(Holling C S)提出，即衡量生态系统可持续性、吸收变化和扰动后维持种群关系的能力<sup>[13]</sup>。此后，“韧性”逐渐扩展至心理学、组织管理和工程系统等领域。不同领域对韧性的诠释有所差异，本文选取的是与电力系统相关的定义和属性。2017年，美国国家工程院在《提升电力系统韧性》报告中指出：电力系统韧性为能够识别大

面积、长时间的电力中断事件，事件发生前充分预备，事件发生时减小其影响，事件发生后迅速恢复，并能从事故中获取经验进行学习的能力。2018年，英国能源研究中心及美国电力系统工程研究中心对韧性进行了定义，认为其应涵盖可靠性、鲁棒性、冗余性、快速性、恢复力等多个方面的综合特征<sup>[14]</sup>。

在我国，华中科技大学于2014年提出电力系统韧性应包含鲁棒性、冗余性、机敏性和快速性4个属性。此后，文献[15-16]提出弹性电网及其恢复力概念，强调弹性电网应有效利用各种灵活性资源应对极端事件所带来的强扰动，适应环境变化。2020年，国网上海市电力公司提出韧性电网的6个关键特征，即为感知力、协同力、应变力、防御力、恢复力和学习力。

### 1.1 电力系统韧性的内涵及区分

电力系统韧性与可靠性、安全性、鲁棒性之间既有共同点又有差异性，以下进行简要比较。

#### (1) 韧性与可靠性

韧性和可靠性同属电力系统的重要性能指标，表1给出了二者的关键特性区分。事实上，可靠性涵盖广义和狭义可靠性，前者为系统按可接受的质量和数量标准不间断地向用户供应电力的量度，包括充裕度与安全性；后者为静态可靠性，仅考虑充裕度<sup>[17]</sup>。可靠性主要是反映电力系统对持续供电的保障能力，其评估对象为高频发的小干扰事件，且时长通常以年为单位。韧性则主要关注系统受到扰动后的抵御、适应、恢复等一系列过程，通常是对某次极端事件进行全过程动态评估。

表1 韧性与可靠性的区分

Table 1 Differences between resilience and reliability		
关键特性	可靠性	韧性
事件发生频率	高	低
事件造成影响	低	高
时间尺度	年	短期秒级、长期小时级
可预测性	可预测	不易预测
目标负载	全部负载	关键负载
适用场景	单点故障 (线路过载、单点短路)	多重/连锁故障 (飓风、地震、网络攻击)
评价指标	年平均停电次数， 年平均停电时间	亟需确定

当前，电力系统遭遇高频发、小干扰事件的停电时间一般比较短，传统的可靠性指标可以达到“3个9”及以上。然而，对于电力系统韧性而言，极端事件通常影响规模较大，事故发生时各元件故障状况的时空分布也与一般类型故障不同，高可靠性

并不意味着高韧性。

### (2) 韧性与安全性

韧性与安全性均可用于衡量电力系统故障状态,但二者关注的侧重点有所差异。以配电系统为例,安全性是衡量故障状态下系统保持对负荷持续供电的能力,其一般针对短时故障干扰事件,并不涉及大面积的供电中断。另要指出的是,安全性更侧重于判断系统的稳定裕度与计算稳定运行域,即正常状态和故障状态下系统各约束条件均应得到满足,各运行参数均应在允许范围内。

### (3) 韧性与鲁棒性

鲁棒性可用于量度电力系统在承受故障影响下的生存能力,包括在多种设备损失情况下的系统容错能力。韧性不仅关注电力系统抗击灾害的能力,更注重从这种破坏性事件中快速恢复的能力<sup>[18-19]</sup>。因此,韧性的度量应包含鲁棒性。

## 1.2 电力系统韧性的描述及框架

图1为极端事件发生前后系统性能函数的梯形曲线<sup>[20-22]</sup>,用以描述电力系统遭受极端事件的行为。

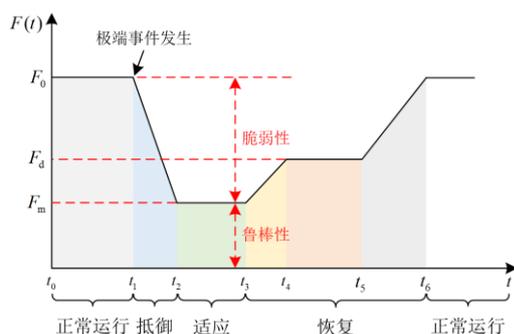


图1 电力系统韧性曲线示意图

Fig. 1 Schematic diagram of power system resilience curve

图1中, $F(t)$ 为系统功能函数在各阶段的变化, $F_0$ 表示正常运行下的系统性能,通常意义上为系统负荷供电水平。由图1可知,极端事件演变过程包括以下4个阶段:

(1) 正常运行阶段  $t_0 \sim t_1$ , 系统在极端事件发生前保持安全稳定运行,性能维持在  $F_0$ ;

(2) 抵御阶段  $t_1 \sim t_2$ , 极端事件后引入主动抵御措施,负荷得到部分维持,系统性能下降到  $F_m$ ;

(3) 适应阶段  $t_2 \sim t_3$ , 采取紧急协调措施以适应极端事件,降低负荷波动,系统性能稳定在  $F_m$ ;

(4) 恢复阶段  $t_3 \sim t_6$ , 执行网络重构、元件修复等措施恢复系统性能。由于电力基础建设可能在极端事件中遭到破坏,从系统遭受极端事件侵扰到完全恢复性能,这个过程往往需要数小时甚至数天。

现有的电力系统韧性研究主要聚焦于预防韧性

与恢复韧性,考虑到电力系统在进行紧急处理和故障恢复的时间跨度差别很大,可将韧性划分为短期韧性与长期韧性。短期韧性是指系统进行紧急处理(例如故障电流抑制、故障穿越、稳定协调控制)等操作所提供的支撑力;长期韧性是指系统通过制定故障自愈和故障元件抢修策略,部署维修人员修复永久性故障提升供电能力。

结合鲁棒性、冗余性、有源性和迅速性等韧性基础属性<sup>[23]</sup>,以及资源丰富性、学习性等需求<sup>[24]</sup>,本文给出了电力系统韧性研究框架,如图2所示。即在拥有足够备用设备和受控资源的前提下,电力系统应具备承受外界极端事件扰动的防御力,在事件发生时调动所需资源和启动紧急服务快速恢复到原始状态,并能在事件后积累经验,识别潜在风险进行学习 and 自我提升。



图2 电力系统韧性研究框架

Fig. 2 Research frame of power system resilience

## 2 电力系统韧性评估方法与指标体系

### 2.1 电力系统韧性评估流程

图3为电力系统韧性评估的流程示意图,其中包括:极端事件下的故障场景选取、故障场景建模、故障抵御适应、故障恢复实施及系统韧性评估5个基本步骤。

(1) 在进行韧性评估之前,首先确定极端事件对象<sup>[25]</sup>,例如极端冰雪天气或地震等自然灾害;

(2) 根据作用机理差异将极端事件作用描述为对元件产生力学效应和造成短路/断路故障<sup>[26]</sup>;

(3) 选取典型故障场景,刻画系统元件脆弱性曲线,分析故障规模,形成抵御和适应策略;

(4) 确定故障恢复目标函数,考虑故障自愈和元件维修等手段生成恢复策略,直至系统性能恢复;

(5) 在划分故障时段,构建韧性评估指标体系,使用定性定量评价方法对系统韧性进行综合评估。

### 2.2 电力系统韧性评估分类与指标体系

电力系统韧性评估可分为两类:一类是基于网络拓扑结构、元件冗余度、资源充裕性的静态韧性评估<sup>[27-30]</sup>;另一类是根据系统应对极端事件的多个过程建立相应指标体系的动态韧性评估<sup>[31-38]</sup>。

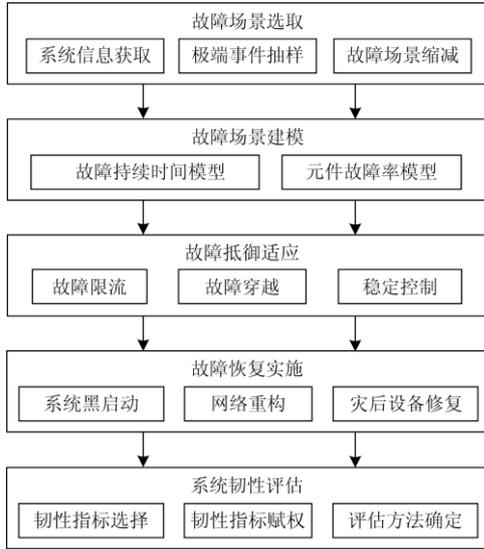


图 3 电力系统韧性评估流程

Fig. 3 Basic flowchart of power system resilience evaluation

(1) 静态韧性评估

文献[27]计算了系统连通度损失和分布式电源冗余度，评估了故障渗透阶段和故障恢复阶段的有源配电网韧性；文献[28]引入了公共分支数、开关操作数、路径冗余比、设备可用性等性能指标，采用 Choquet 积分法对系统韧性进行了量化。文献[29]运用网络图论法，考虑拓扑弹性、元件故障率和负荷不失电因子建立了如图 4 所示的韧性评估静态指标体系。

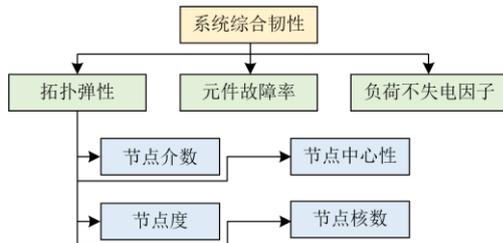


图 4 韧性评估静态指标体系

Fig. 4 Static index system for resilience evaluation

借鉴逾渗理论在大量节点受损网络中寻找联通路径的思路，文献[30]提出了一种结合图论、逾渗理论和层次分析法的韧性评估方法，使用介数中心性、图直径、聚类系数等拓扑特性度量系统韧性。

需指出的是，静态韧性评估主要是从某一特定方面对系统韧性进行评估，难以有效反映系统受扰动后的性能下降及故障恢复阶段的性能上升，也无法量化不同极端事件下的系统韧性差异。因此，宜使用考虑抵御、吸收、适应和恢复的动态韧性评估。

(2) 动态韧性评估

传统的动态韧性评估指标是通过计算梯形图中系统性能曲线与时间的积分，即有：

$$R = \int_{t_1}^{t_6} [F_0 - F(t)] dt \quad (1)$$

该指标可一定程度上反映系统的鲁棒性与恢复性，在单指标评估中应用较为广泛。文献[31]以台风天气为代表绘制了元件的脆弱性曲线，采用蒙特卡洛法模拟了极端天气灾害的全过程，根据负荷的重要程度分配不同权重，并选择 3 个阶段下负荷的加权损失量作为评价指标。

文献[9, 32-33]考虑技术、组织、经济和社会维度，创建了系统韧性评估矩阵，其中：技术维度对应系统供电能力的变化；组织维度对应故障恢复时执行决策、进行人员安排和资源协调等恢复策略；经济维度对应断电而损失的停电成本、失电能源成本等；社会维度对应政府、医院等公共机构失去供电所造成的社会影响。上述每个维度都可根据韧性 4 个基础属性形成 4×4 阶的评估矩阵，矩阵中每个元素对应系统不同方面的韧性特征。

文献[34]以鲁棒性、充裕性和安全性为准则，以电源、电网及用户为评价对象进行了韧性指标分解。文献[35-36]将电网遭受极端事件分为故障预防阶段、适应阶段和恢复阶段，构建了含配电网防御时间、恢复系数、孤岛可持续时间和重要负荷平均中断时间的韧性评估指标体系。文献[37-40]针对韧性梯形的不同阶段建立了韧性指标，包括最大负荷损失  $R_1$ 、负荷中断率  $R_2$ 、自愈恢复时间  $R_3$ 、自愈恢复能力  $R_4$ 、维修时间  $R_5$  等。

$$R_1 = \sum_{s \in S} \pi_s (F_0 - F_m) \quad (2)$$

$$R_2 = \sum_{s \in S} \pi_s \frac{F_0 - F_m}{t_2 - t_1} \quad (3)$$

$$R_3 = \sum_{s \in S} \pi_s (t_4 - t_3) \quad (4)$$

$$R_4 = \sum_{s \in S} \pi_s \frac{F_d - F_m}{F_0 - F_m} \quad (5)$$

$$R_5 = \sum_{s \in S} \pi_s (t_6 - t_1) \quad (6)$$

式中： $F_m$  表示故障适应阶段的系统性能，对应于系统最低性能； $S$  表示故障场景集； $\pi_s$  表示故障发生概率。可以看出，最大负荷损失  $R_1$  和负荷中断率  $R_2$  代表了系统的鲁棒性和吸收能力；自愈恢复时间  $R_3$ 、自愈恢复能力  $R_4$  和维修时间  $R_5$  用于反映灾害后的系统恢复水平，代表了系统的迅速性和有源性。

### 3 电力系统韧性提升策略

#### 3.1 故障预防阶段

在故障预防阶段, 对于台风、降水等自然灾害事件可提高气象灾害监测及高影响极端天气预警的准确性<sup>[41]</sup>, 建立监控预警系统, 全面感知设备状态以实现灾前预防。文献[42]从预防检修的角度出发, 综合考虑检修风险、检修经济性与系统韧性, 建立了不同阶段下的多目标优化模型, 在降低灾前检修费用与风险方面具有良好成效。文献[43-44]根据历史灾害信息建立了灾害数据库和预测模型, 并考虑灾害规模和损失情况对各类事件进行了分级。与此同时, 宜在灾害发生前制定极端事件应急预案, 通过调整网络运行方式等手段缩小停电范围, 保障关键负荷的持续供电。

在事件预防阶段, 常采用物理手段来提高防御力, 包括: 提高线路/杆塔强度、以电缆代替架空线路和树木修剪/植被管理等。该类方法可降低极端事件所带来的物理损伤, 减小元件故障率与故障规模<sup>[45]</sup>。但是, 大批量更换元件将带来高昂的投资成本, 可主要更换对系统韧性具有较大影响且故障率较高的薄弱元件。如何辨识这些元件并提供保护, 尚有待深入研究。文献[46]提出了一种易损线路识别方法, 根据对配网的网格化处理建立了线路综合故障模型, 由信息熵选取易损线路进行强化, 降低了地震灾害发生时系统的停电损失。另要补充的是, 铺设电缆可以增强电网抵御台风的能力, 但在地震情况下, 将导致受损线路的修复时间变长。

#### 3.2 故障响应阶段

在故障响应阶段, 可通过增强系统一次设备的自身抵御能力, 如引入故障电流限制器来提高系统的短期韧性。此外, 实现二次控保设备的快速响应对于韧性提升同样具有很强的积极意义。文献[47]通过在电网中配置智能量测装置, 提高了系统态势感知能力与响应速度。文献[48]配备了远动开关和自动化开关, 通过快速改变电网拓扑结构, 使备用电源及时投入, 缩短了故障响应和恢复时间。

当前, 较多文献研究了如何利用分布式电源和微电网的应急响应能力来增强系统暂态性能<sup>[49-52]</sup>。图5为利用分布式电源和微电网提高电力系统韧性的示意图。当系统发生严重故障时, 上级电源的直供路径和转供路径均可能被切断, 导致产生多个孤岛。分布式电源和微电网的接入可大大增加系统灵活性, 为末端负荷提供功率支撑, 保障负荷可靠供电。文献[53]将车载移动应急发电机(Mobile Emergency Generators, MEGs)引入配电网, 在预定

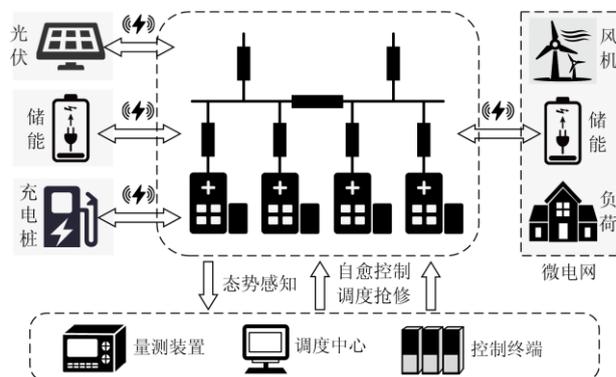


图5 利用分布式电源和微电网的电力系统韧性提升示意图  
Fig. 5 Schematic diagram of power system resilience enhancement using distributed generation units and microgrids

地点放置MEGs以保持重要负荷供电。需要注意的是, 随着分布式电源、微电网甚至多微网组成的微电网群渗透率不断升高, 其自身的故障敏感性和故障生存性将为系统韧性提升带来新的挑战。

#### 3.3 故障恢复阶段

在故障恢复阶段, 通常会涉及到黑启动、网络重构、元件修复等操作, 其中黑启动和网络重构旨在提升电力系统的短期韧性, 元件修复则是提高系统的长期韧性。在黑启动过程中, 系统主要通过重启部分机组来建立供电路径。文献[54]阐述了多机组并行恢复的重要步骤, 即分区方法与启动顺序, 以最小化机组启动费用为目标函数, 给出了故障恢复策略。在黑启动后期, 系统需要依靠分布式电源进行网络重构, 重新调整网络拓扑结构, 恢复重要负荷<sup>[55-58]</sup>。现有研究多利用启发式算法、数学规划算法和人工智能算法, 将网络重构转化为混合整数规划问题, 求取最优解, 得到故障恢复策略<sup>[59-61]</sup>。文献[62]提出了一种基于混合整数线性规划的资源调度模型, 利用分布式电源、区域通信系统等资源对系统进行了有效恢复。

在发生自然灾害后, 诸多电气基础设施可能遭到较大程度破坏, 需调动维修人员前往故障路段进行修复或替换。由于系统可用资源往往有限, 如何调配工作人员、合理安排元件的修复顺序是恢复阶段需解决的重要问题。文献[32]提出了一种面向系统韧性提升的故障定位、故障隔离和服务恢复方法, 在考虑三者耦合关系的基础上, 针对不同故障工况实施了差异化恢复方案。

图6为提升电力系统韧性的潜在措施, 部分策略的实施方式如表2所示。通过对这些策略的成本-效益进行整体比较, 可为电力系统韧性提升找到更经济、更合理可行的解决方案。于此而言, 成本需

考虑投资、维护和运行成本，效益则可涵盖其缩小停电范围/时间所带来的间接收益。图 7 为韧性提升策略成本/有效性的定性比较。为建立具有高韧性的电力系统，应在提高基础设施强壮性的同时优化投资结构。如何平衡电网改造成本和韧性提升效益，是尚待解决的关键问题。

#### 4 电力系统韧性研究展望

##### 4.1 韧性特征

韧性特征的研究依赖于对不同形式电力系统进行准确的极端事件场景模拟，而极端事件物理模型和系统响应模型的构建是研究的关键点。

图 8 为极端事件影响模型分类示意图。极端事件物理模型多基于具体事件和地理区域的特征来预计事故风险，系统响应模型通常根据对元件产生作

用力和造成系统故障两方面影响来评估其脆弱性。

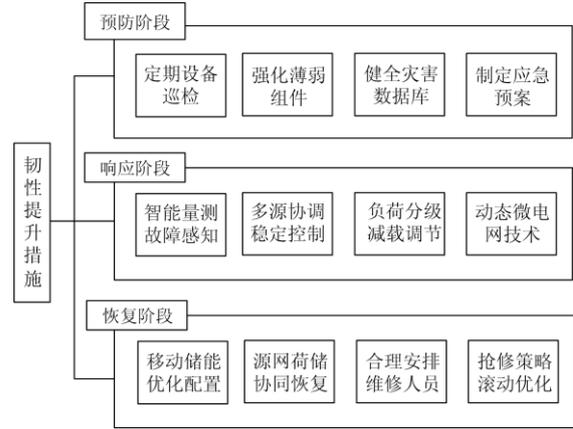


图 6 提升电力系统韧性的潜在措施

Fig. 6 Potential measures to improve power system resilience

表 2 典型韧性提升策略的实施方式

Table 2 Implementation of typical improvement strategies for power system resilience

韧性指标选择	韧性提升手段	目标函数	优化求解方法	文献
负荷削减程度	优化配置运动开关	最小化事故后切负荷功率	列约束生成算法	[48]
负荷供应度、故障恢复时间	主动孤岛和运动开关故障隔离	最小化停电损失	CPLEX/GUROBI 等求解器	[57]
故障恢复时间	调节分布式电源、动态微电网	最小化运行成本和最大化收益	两阶段滚动时域优化	[63]
负荷削减程度、停电等级	优化调度资源、最优负荷削减	最小化总预期停电成本	GUROBI 求解器	[64]
经济因素和韧性曲线函数	提高分布式能源渗透率	最小化停电损失、最小化维修成本	启发式算法	[65]

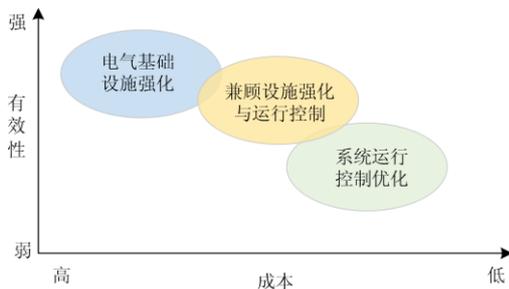


图 7 韧性提升策略的成本/有效性比较

Fig. 7 Cost and effectiveness comparison of power system resilience improvement strategies

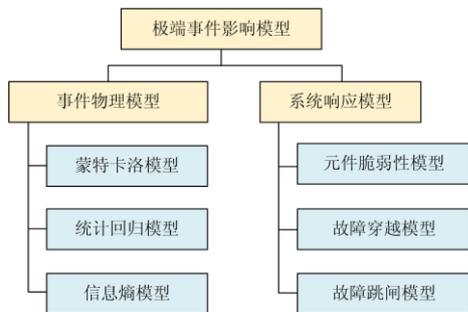


图 8 极端事件影响模型分类

Fig. 8 Categories of extreme event influence models

电力系统在面对不同极端事件时，其韧性特征将有所差异。现有研究对极端事件的模拟多采用蒙特卡洛法结合信息熵法来选取故障场景，使得风险评估偏理想化，不够客观。统计方法也具有严重依赖大量历史数据的弊端。现有的元件脆弱性建模多集中于线路和杆塔，缺少对于电力系统其他元件，如变压器、新能源发电装备在不同自然灾害下的脆弱性建模。在后续研究中，需深入分析自然灾害事件的随机因素特征，结合实测数据建立更为准确的极端事件扰动模型。

当前，随着含变流器分布式发电和电力电子设备大规模渗透到配电网，以及能量路由器(固态变压器)等高效电能传输和电压转换设备的应用，现代配电网逐渐呈现显著的电力电子化趋势<sup>[66]</sup>。电力电子化配电网在遭遇故障时，因电力电子器件受控性和新能源渗透比例的不同也将呈现较大差异。目前，鲜见公开资料开展电力电子化配电网的韧性特征研究，已有工作主要是针对非极端事件引发的简单故障抑制，亟需开展针对极端事件所造成的多重故障/连锁故障韧性研究。

此外，鉴于电网与交通、水、石油和天然气等其他关键基础设施的耦合日益紧密，亟需进一步探明极端事件作用于其他类型基础设施对电力系统的

影响<sup>[67-72]</sup>。综合能源系统是整合区域内煤炭、石油、天然气、电能、热能等多种能源, 并可实现多种能源互补互济、协同优化的新型系统, 其韧性研究示意图如图 9 所示。综合能源系统能够通过多种能源的横向互补和源-网-荷-储的纵向协调来高效利用能源, 在提升资源可控性的同时对于韧性改善极具前景。目前, 针对综合能源系统的研究工作大多集中于多类资源的优化调度、安全性分析与可靠性评估等方面, 亟需开展计及多源耦合、多能互补的综合能源系统韧性特征研究。

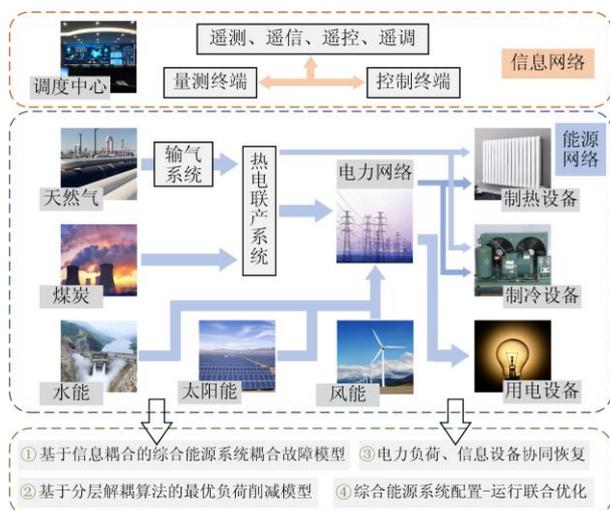


图 9 综合能源系统韧性研究示意图

Fig. 9 Schematic diagram of resilience study in integrated energy system

#### 4.2 韧性评估

现阶段的韧性评估研究主要是对极端事件前后电力系统供电能力的比较来量化韧性。然而, 实际电力系统结构复杂, 不确定性较高。如何考虑系统复杂的运行约束, 准确地获取事故后系统的运行状态是亟待解决的核心问题。科学有效的韧性评估不仅需要计及多方面因素交互影响, 制定更全面、更合理的韧性评价指标体系, 同时也能够针对极端事件下系统的全过程应对能力进行评估。通过评估多方面因素对韧性性能的影响, 能够有指向性地对电力系统的网架结构、资源配置进行优化。

在电力电子化配电网韧性评估中, 所含高比例分布式电源的出力情况受气候变化影响较大, 其在提高极端天气下供电冗余性的同时, 自身的并网稳定性及与电力电子化配电网其他设备(如固态变压器、储能装置、可控负荷等)的交互影响亦可能改变韧性评估结果。于此, 不同电力电子装备之间的多时间尺度交互作用机制及其对配电网韧性评估的影

响亟需进一步研究。

在综合能源系统韧性评估中, 现有研究较少考虑电-热或电-天然气之外的其他能源耦合作用, 导致韧性评估指标维度的选取较为单一, 无法全面评估能源转型和多能协调对系统韧性的综合效果。另外, 当前研究并未考虑极端事件对石油、天然气燃料供应和交通阻断的影响, 使得韧性评估结果的真实性有待商榷。在能源互联网的快速发展背景下, 如何建立综合能源系统的韧性评估体系, 是未来韧性评估研究的重点。

#### 4.3 韧性提升

电力系统故障恢复能力是韧性提升效果的直观体现。不同故障元件的修复难易程度及耗费时间与故障类型、故障强度和现有修复资源等多种因素有关。当采用两种以上辅助措施来提升电力系统韧性时, 各辅助措施的启动时序、作用区间、参量选择及优化方式需开展深入研究。例如在同一故障场景下, 当分布式电源接入配电网, 负荷可无需依靠上级电源供电, 故障恢复策略中线路修复的优先级顺序也将随之改变。如何计及内外部因素进一步改良电力系统故障恢复模型, 确定快速、准确的恢复模型求解算法, 是有待解决的关键问题。

针对电力电子化配电网的韧性提升研究刚刚起步, 源-网-荷-储深度协调下的电力电子化配电网故障恢复研究相对较少, 对故障穿越-故障恢复之间的相互影响和发展关系欠缺综合考虑。事实上, 电力电子化配电网具有更强的受控性和更为丰富的可调配资源, 其应比传统配电网有着更好的韧性。如何从抵御力、适应力和恢复力着手, 系统地解决故障全过程下的限流穿越、稳定控制和协同恢复问题, 是提高电力电子化配电网韧性的关键点与落脚点。

图 10 为考虑韧性的电力电子化配电网故障恢复流程。如何在构建源、荷时变模型的基础上, 使用改进聚类方法划分电力电子化配电网的故障时段, 从中构建负荷加权恢复量和源-网-荷-储协调运行效益的恢复模型, 实现复电能力和经济效益的联合优化, 亟待开展深入研究。

对于综合能源系统而言, 其可以通过电能和热能的互补以及热电联产、灵活性负荷与储能的协调来充分利用能源, 在发生大规模故障时为重要负荷提供能源支撑。然而, 极端事件下综合能源系统的故障恢复能力不仅取决于电网侧的受损规模和恢复策略, 还与通信网络、天然气管道、交通网络等设施的抗扰能力紧密有关。例如, 当燃料或天然气供应被破坏造成部分内燃机和微型涡轮机停运时, 分

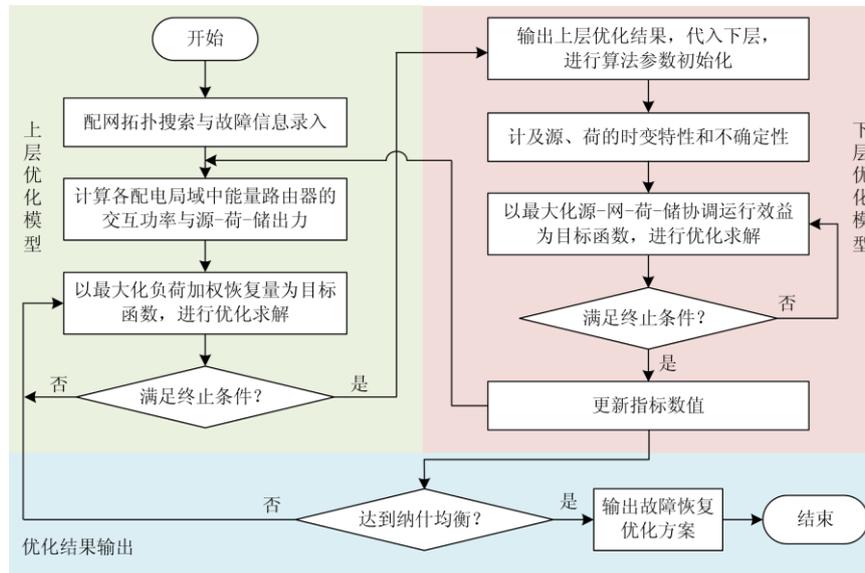


图 10 考虑韧性的电力电子化配电网故障恢复

Fig. 10 Fault recovery of power electronics dominated distribution networks for resilience enhancement

布式电源和远程控制开关也可能损毁。如何考虑不同能源网络之间的交互作用,理清主导因素及其对电源支撑能力的影响,制定更切实有效的能源支撑策略和故障恢复方案,是亟需攻克的难点问题。

## 5 结论

本文首先阐述了电力系统韧性的基本概念,分析了韧性和可靠性、安全性、鲁棒性的区别与联系,明确了电力系统韧性的研究对象和适用范畴。其次,围绕电力系统韧性评估方法与指标体系,综述了国内外研究现状。然后,从故障预防、故障响应、故障恢复3个方面出发,评述了现有韧性提升策略,并根据成本-效益对其进行了定性比较。最后,初探了电力系统韧性研究的未来发展方向,凝练了需进一步解决的难点问题。

(1) 相较于可靠性、安全性等传统特性指标,电力系统韧性更侧重于对小概率、高影响力事件的后果评估以及对重要负荷的供电恢复能力,更适合应对难以预测的灾难性威胁。

(2) 现阶段的韧性评估方法主要为基于网架结构及源荷配置的静态评估和根据电网应对极端事件的多过程动态评估。为真实反映电力系统在极端事件不同发展阶段下的运行状态,应根据韧性特征进行多维度、多阶段的动态评估。

(3) 构建高韧性电力系统需要在增强电力基础设施硬度的同时,结合分布式电源、微电网、源网荷储协同等不同类型灵活性资源进行智能化操作,软硬兼施并优化投资结构,以期达到更高效、更经

济的韧性提升效果。

(4) 从电力电子化配电网韧性特征、电气-交通-天然气多网耦合韧性建模、综合能源系统韧性评估及其提升方法等方面出发,展望了电力系统韧性研究的潜在发展方向,指出了未来有待解决的关键科学问题,为韧性建模、韧性评估及韧性提升措施的下一步发展提供了参考思路。

## 参考文献

- [1] 严道波, 文劲宇, 杜治, 等. 2021年德州大停电事故分析及其对电网规划管理的启示[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(9): 121-128.  
YAN Daobo, WEN Jinyu, DU Zhi, et al. Analysis of Texas blackout in 2021 and its enlightenment to power system planning management[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(9): 121-128.
- [2] 竺炜, 周孝信, 唐如. 电网的弹性力学网络拓扑映射[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(31): 109-117.  
ZHU Wei, ZHOU Xiaoxin, TANG Ru. Elasticity network topology mapping for power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(31): 109-117.
- [3] 秦清, 韩蓓, 李国杰, 等. 含智能软开关的配电网多阶段弹性力学映射与评估[J]. 电工技术学报, 2020, 36(21): 4444-4458.  
QIN Qing, HAN Bei, LI Guojie, et al. Multi-stage elastic mechanical modelling and evaluation of distribution networks with soft open point[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 36(21): 4444-4458.
- [4] 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.
- [5] 王守相, 黄仁山, 潘志新, 等. 极端冰雪天气下配电网弹性恢复力指标的构建及评估方法[J]. *高电压技术*, 2020, 46(1): 123-132.  
WANG Shouxiang, HUANG Renshan, PAN Zhixin, et al. Construction and evaluation of resilience restoration capability indices for distribution network under extreme ice and snow weather[J]. *High Voltage Engineering*, 2020, 46(1): 123-132.
- [6] 陈碧云, 李翠珍, 覃鸿, 等. 考虑网架重构和灾区复电过程的配电网抗台风韧性评估[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(6): 47-52.  
CHEN Biyun, LI Cuizhen, QIN Hong, et al. Evaluation of typhoon resilience of distribution network considering grid reconstruction and disaster recovery[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(6): 47-52.
- [7] TOROGHI S S H, THOMAS V M. A framework for the resilience analysis of electric infrastructure systems including temporary generation systems[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2020, 202.
- [8] 赵晓龙, 方恒福, 王罡, 等. 面向弹性配电网防灾减灾的组件重要度评估方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(16): 28-36.  
ZHAO Xiaolong, FANG Hengfu, WANG Gang, et al. Component importance indices evaluation considering disaster prevention and mitigation in resilient distribution systems[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(16): 28-36.
- [9] PAUL E R, ZACHARY A C, JAMES M, et al. Metrics for energy resilience[J]. *Energy Policy*, 2014, 72: 249-256.
- [10] ZHOU Zhenchen, WU Zhou, JIN Tao. Deep reinforcement learning framework for resilience enhancement of distribution systems under extreme weather events[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2020, 128.
- [11] 杨火明, 徐潇源, 严正. 考虑配电网韧性的储能系统选址定容优化方法[J]. *电力建设*, 2018, 39(1): 30-39.  
YANG Huoming, XU Xiaoyuan, YAN Zheng. Optimization approach of energy storage system locating and sizing considering distribution system resilience[J]. *Electric Power Construction*, 2018, 39(1): 30-39.
- [12] LIU Weijia, DING Fei, ZHAO Changhong. Dynamic Restoration Strategy for Distribution System Resilience Enhancement[C] // 2020 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), February 17-20, 2020, Washington, DC, USA: 1-5.
- [13] HOLLING C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, 4(1): 1-23.
- [14] National Academies of Sciences, Engineering, Medicine. Enhancing the resilience of the nation's electricity system[R]. Washington, DC: The National Academies Press, 2017.
- [15] FULLI G. Electricity security: models and methods for supporting the policy decision making in the European union[D]. Turin: Polytechnic University of Turin, 2016.
- [16] 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.
- [17] 别朝红, 王锡凡. 配电系统的可靠性分析[J]. *中国电力*, 1997, 30(5): 10-13.  
BIE Zhaohong, WANG Xifan. Reliability analysis of distribution networks[J]. *Electric Power*, 1997, 30(5): 10-13.
- [18] BEYZA J, YUSTA J M. Integrated risk assessment for robustness evaluation and resilience optimisation of power systems after cascading failures[J]. *Energies*, 2021, 14(7): 20-28.
- [19] KRGER W. Achieving resilience of large-scale engineered infrastructure systems[M]. 2019.
- [20] 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.
- [21] LIU Yue, LI Xiaoyang, XIAO Lianghua. Service oriented resilience strategy for cloud data center[C] // 2018 IEEE International Conference on Software Quality, Reliability and Security Companion (QRS-C), July 16-20, 2018, Lisbon, Portugal: 269-274.
- [22] HUSSAIN A, BUI V-H, KIM H-M. Microgrids as a resilience resource and strategies used by microgrids for enhancing resilience[J]. *Applied Energy*, 2019, 240: 56-72.
- [23] 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.
- [24] 阮前途, 谢伟, 许寅, 等. 韧性电网的概念与关键特征[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(21): 6773-6784.  
RUAN Qiantu, XIE Wei, XU Yin, et al. Concept and key

- features of resilient power grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(21): 6773-6784.
- [25] WASTON J P, GUTTROMSON R, MONROY C S, et al. Conceptual framework for developing resilience metrics for the electricity, oil and gas sectors in the United States[R]. USA, 2014.
- [26] 周晓敏, 葛少云, 李腾, 等. 极端天气条件下的配电网韧性分析方法及提升措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(2): 505-513.  
ZHOU Xiaomin, GE Shaoyun, LI Teng, et al. Assessing and boosting resilience of distribution system under extreme weather[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(2): 505-513.
- [27] ARGHANDEH R, BROWN M, DEL ROSSO A D, et al. The local team: leveraging distributed resources to improve resilience[J]. IEEE Power & Energy Magazine, 2014, 12(5): 76-83.
- [28] BAJPAI P, CHANDA S, SRIVASTAVA A K, et al. A novel metric to quantify and enable resilient distribution system using graph theory and Choquet integral[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(4): 2918-2929.
- [29] 彭寒梅, 王小豪, 魏宁, 等. 提升配电网弹性的微网差异化恢复运行方法[J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2328-2335.  
PENG Hanmei, WANG Xiaohao, WEI Ning, et al. Microgrid differentiated recovery operation for enhancing distribution system resilience[J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2328-2335.
- [30] 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.
- [31] LUO Diansheng, XIA Yongwei, ZENG Yuanyuan, et al. Evaluation method of distribution network resilience focusing on critical loads[J]. IEEE Access, 2018, 6: 61633-61639.
- [32] LIU Jiancun, QIN Chao, YU Yixin. A comprehensive resilience-oriented FLISR method for distribution systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(3): 2136-2152.
- [33] DEGHANIAN P, ASLAN S, DEGHANIAN P. Maintaining electric system safety through an enhanced network resilience[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(5): 4927-4937.
- [34] 何英静, 王曦冉, 李海疆, 等. 一种高分辨度电网弹性评估方法: 中国, CN112613676A[P]. 2021-04-06.  
HE Yingjing, WANG Xiran, LI Haijiang, et al. A high resolution method of grid resilience assessment: China, CN112613676A[P]. 2021-04-06.
- [35] 顾明宏, 孙为兵, 李培培, 等. 面对极端扰动事件的城市弹性配电网评估指标体系[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(7): 103-109.  
GU Minghong, SUN Weibing, LI Peipei, et al. Evaluation index system for urban elastic distribution network in the face of extreme disturbance events[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(7): 103-109.
- [36] 李振坤, 王法顺, 郭维一, 等. 极端天气下智能配电网的弹性评估[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(9): 60-68.  
LI Zhenkun, WANG Fashun, GUO Weiyi, et al. Resilience evaluation of smart distribution network in extreme weather[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(9): 60-68.
- [37] HOSSEINI M M, UMUNNAKWE A, PARVANIA M. Automated switching operation for resilience enhancement of distribution systems[C] // 2019 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), August 4-8, 2019, Atlanta, GA, USA: 1-5.
- [38] 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.
- [39] 吴疆, 吕林, 黄媛, 等. 灾害全过程配电网弹性评估方法及提升策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(3): 32-42.  
WU Jiang, LÜ Lin, HUANG Yuan, et al. Evaluation method and promotion strategy for distribution network resilience during the entire process of disaster[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(3): 32-42.
- [40] ZHANG Huajun, WANG Peng, YAO Shuhan, et al. Resilience assessment of interdependent energy systems under hurricanes[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(5): 3682-3694.
- [41] 黄伟, 黄廷城, 王立勇, 等. 基于态势感知的电网台风预警防御框架研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(11): 162-169.  
HUANG Wei, HUANG Tingcheng, WANG Liyong, et al. Research on typhoon early warning and defense framework of power grid based on situation awareness[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(11): 162-169.
- [42] 梁海平, 石皓岩, 王铁强, 等. 考虑韧性提升的输电网灾前预防检修多目标多阶段优化[J/OL]. 电测与仪表: 1-8[2021-07-22].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20210223.1649.004.html>.  
LIANG Haiping, SHI Haoyan, WANG Tieqiang, et al. Multi-objective and multi-stage optimization of pre-disaster preventive maintenance of transmission network

- considering resilience improvement[J/OL]. *Electrical Measurement & Instrumentation*: 1-8[2021-07-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20210223.1649.004.html>.
- [43] ARIZUMI N, MINAMI K, TANJO T, et al. A first step towards resilient graph partitioning for electrical grids[C] // 7th International Conference on Information and Automation for Sustainability, December 22-24, 2014, Colombo, Sri Lanka: 1-6.
- [44] 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.
- [45] BARNES A, NAGARAJAN H, YMANGIL E Y, et al. Resilient design of large-scale distribution feeders with networked microgrids[J]. *Electric Power Systems Research*, 2019, 171: 150-157.
- [46] 雷霞, 郑国鑫, 胡益. 地震灾害下配电网的脆弱性分析及弹性提升措施[J]. *电网技术*, 2021, 45(9): 3674-3680.
- LEI Xia, ZHENG Guoxin, HU Yi. Vulnerability analysis of distribution network and resilience improvement under earthquake disasters[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(9): 3674-3680.
- [47] TON D T, WANG W T P. A more resilient grid: the U.S. department of energy joins with stakeholders in an R&D plan[J]. *IEEE Power & Energy Magazine*, 2015, 13(3): 26-34.
- [48] 卞艺衡, 别朝红. 面向弹性提升的智能配电网远动开关优化配置模型[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(3): 33-39.
- BIAN Yiheng, BIE Zhaohong. Resilience-enhanced optimal placement model of remote-controlled switch for smart distribution network[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(3): 33-39.
- [49] 余贻鑫. 智能电网实施的紧迫性和长期性[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(17): 1-5.
- YU Yixin. Urgency and long-term nature of smart grid implementation[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(17): 1-5.
- [50] 刘畅, 黄杨, 杨昕然, 等. 计及储能及负荷转供协同调度的城市电网弹性运行策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(6): 56-66.
- LIU Chang, HUANG Yang, YANG Xinran, et al. Flexible operation strategy of an urban transmission network considering energy storage systems and load transfer characteristics[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(6): 56-66.
- [51] 郑子萱, 倪扶瑶, 汪颖, 等. 基于模型预测控制混合储能系统的直流微电网韧性提升策略[J]. *电力自动化设备*, 2021, 41(5): 152-159.
- ZHENG Zixuan, NI Fuyao, WANG Ying, et al. Operation resilience enhancing strategy of DC microgrid based on model predictive controlled hybrid energy storage system[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2021, 41(5): 152-159.
- [52] 王兴贵, 张文莲, 薛晟. 基于EEMD的MMC串联结构微电网微源动态冗余控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(22): 34-42.
- WANG Xinggui, ZHANG Wenlian, XUE Sheng. A micro-source dynamic redundancy control strategy based on EEMD for MMC series microgrid[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(22): 34-42.
- [53] 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.
- [54] QIU Feng, WANG Jianhui, CHEN Chen, et al. Optimal black start resource allocation[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, 31(3): 2493-2494.
- [55] 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/OL]. *中国电力*: 1-13[2021-07-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20210621.1630.010.html>.
- YU Zhuofei, LIU Fei, LIU Ruihuan, et al. Resilience-oriented optimization of source-grid-load flexible resources in distribution systems: review and prospect[J/OL]. *Electric Power*: 1-13[2021-07-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20210621.1630.010.html>.
- [56] YAO Shuhan, GU Jiuxiang, ZHANG Huajun, et al. Resilient load restoration in microgrids considering mobile energy storage fleets: a deep reinforcement learning approach[C] // 2020 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), August 2-6, 2020, Montreal, QC, Canada: 1-5.
- [57] 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.
- [58] GILANI M A, KAZEMI A, GHASEMI M. Distribution system resilience enhancement by microgrid formation considering distributed energy resources[J]. *Energy*, 2020, 191.
- [59] 任郡枝, 陈健, 姜心怡, 等. 考虑可移动式储能与网络重构的弹性配电网灾后恢复策略[J]. *电力建设*, 2020, 41(3): 86-92.

- REN Junzhi, CHEN Jian, JIANG Xinyi, et al. Post-disaster recovery strategy of resilient distribution network considering mobile energy storage system and network reconfiguration[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(3): 86-92.
- [60] 陈春, 吴宜桐, 李猛, 等. 基于网络拓扑有向遍历的配电网故障快速恢复方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(7): 44-52.
- CHEN Chun, WU Yitong, LI Meng, et al. Method for fast recovery from distribution network fault based on directed traversal of network topology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(7): 44-52.
- [61] XU Yin, LIU Chencheng, SCHNEIDER K P, et al. Toward a resilient distribution system[C] // 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting, July 26-30, 2015, Denver, CO, USA: 1-5.
- [62] TAHERI B, SAFDARIAN A, MOEINI-AGHTAIE M, et al. Enhancing resilience level of power distribution systems using proactive operational actions[J]. IEEE Access, 2019, 7: 137378-137389.
- [63] WANG Zhaoyu, WANG Jianhui. Self-healing resilient distribution systems based on sectionalization into microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(6): 3139-3149.
- [64] DING Tao, QU Ming, WANG Zekai, et al. Power system resilience enhancement in typhoons using a three-stage day-ahead unit commitment[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(3): 2153-2164.
- [65] LIU Xinrui, WANG Hao, SUN Qiuye, et al. Research on fault scenario prediction and resilience enhancement strategy of active distribution network under ice disaster[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 135.
- [66] 李婷, 胥威汀, 刘向龙, 等. 含高比例可再生能源的交直流混联电网规划技术研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(12): 177-187.
- LI Ting, XU Weiting, LIU Xianglong, et al. Review on planning technology of AC/DC hybrid system with high proportion of renewable energy[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(12): 177-187.
- [67] ZHU Mengting, XU Chengsi, DONG Shufeng, et al. An integrated multi-energy flow calculation method for electricity-gas-thermal integrated energy systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(1): 65-76.
- [68] SHAO Chengcheng, SHAHIDEHPOUR M, WANG Xifan, et al. Integrated planning of electricity and natural gas transportation systems for enhancing the power grid resilience[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(6): 4418-4429.
- [69] 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): 41-51.
- 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): 41-51.
- [70] 齐世雄, 王秀丽, 邵成成, 等. 计及弹性恢复的区域综合能源系统多目标优化调度[J]. 中国电力, 2019, 52(6): 19-26.
- QI Shixiong, WANG Xiuli, SHAO Chengcheng, et al. Multi-objective optimal dispatch of district integrated energy system considering resilience[J]. Electric Power, 2019, 52(6): 19-26.
- [71] 杜雅昕, 张婷婷, 张文. 极端天气下计及电-气互联影响的配电网弹性评估[J]. 供用电, 2019, 36(5): 8-13.
- DU Yaxin, ZHANG Tingting, ZHANG Wen. Resilience assessment for distribution systems considering interconnections with gas systems under extreme weather[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(5): 8-13.
- [72] 董今妮, 孙宏斌, 郭庆来, 等. 面向能源互联网的电-气耦合网络状态估计技术[J]. 电网技术, 2018, 42(2): 400-408.
- DONG Jinni, SUN Hongbin, GUO Qinglai, et al. State estimation of combined electric-gas networks for energy internet[J]. Power System Technology, 2018, 42(2): 400-408.

收稿日期: 2021-08-20; 修回日期: 2021-11-30

作者简介:

陈磊(1982—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统故障限流及稳定控制技术; E-mail: chen\_lei@whu.edu.cn

邓欣怡(1999—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统韧性建模与评估. E-mail: delphine\_dxy@163.com

(编辑 姜新丽)